Pedagogiczna
Biblioteka Wojewódzka
w Białymstoku
p.5322

FIZYKA

DO UŻYTKU SZKÓŁ ŚREDNICH

CZYTELNIA

OPRACOWAŁ
KSAWERY SPORZYŃSKI
KANDYDAT NAUK PRZYRODNICZYCH,
NAUCZYCIEL SZKÓŁ ŚREDNICH

WYDANIE PIĄTE
POPRAWIONE I UZGODNIONE Z NOWYMI PROGRAMAMI
723 RYCINY W TEKŚCIE



Księgarnia
L. KRYSZEK
Łódź, Pomorska 15

WYDAWNICTWO M. ARCTA W WARSZAWIE
POZNAŃ, PLAC WOLNOŚCI 7
1919

PEDAGOGICZNA
Biblioteka Wojewódzka
w Białymstoku
p.5322
53(075.3)

DRUKARNIA M. ARCTA W WARSZAWIE, NOWY ŚWIAT 41.

PRZEDMOWA.

W niniejszym 5-ym wydaniu zaszły niewielkie zmiany i poprawki; poprzednie bowiem wydanie zostało znacznie przerobione i przystosowane do wymagań nowego szkolnictwa. Wyczerpanie 4-go wydania w ciągu półtora roku, w czasie gdy ukazało się kilka nowych podręczników tegoż zakresu, pozwala wnosić, że i bieżące wydanie odpowie spółczesnej potrzebie.

Istnienie kilku podręczników fizyki dla szkół średnich jest faktem pożądanym. Nie tylko bowiem różnica w programach szkół pozwala na wybór tej lub innej książki, ale zarazem podręczniki wzajemnie się ulepszają. Naturalnym również jest objaw, że autor nowego podręcznika, przekonany o jego celowości i użyteczności, usiłuje w przedmowie przekonać o tym czytelnika. Jeżeli jednak autor — jak to znajdujemy w pewnych podręcznikach — poświęca przedmowę na podchwytywanie i zwalczanie zdań innego autora, nie godzi to się z zadaniem przedmowy, ani wogóle stanowiskiem krytyki, skoro krytykowany odezwać się nie ma możności. Tymbardziej dziwnym się wydaje, gdy nowy autor nadto w samym wykładzie udziela przestrogi, że „wielu autorów fizyki daje niewłaściwe określenie", czyli ów autor stawia siebie ponad „wielu autorów"... Poprzestaję na zaznaczeniu podobnych niewłaściwości z ogólnego punktu widzenia; na polemikę bowiem istnieją łamy pism, bądź zebrania pedagogiczne.

Zmiany w 5-ym wydaniu mej „Fizyki" polegają głównie na częściowym przegrupowaniu materjału, niezbędnym wobec projektu ministerjalnego co do utworzenia kilku typów szkoły średniej. Tak np. dział maszyn prostych przerzucono do drugiej części mechaniki, uzupełniającej, wysuwając natomiast już w pierwszym roku pojęcia szersze, jak własności ciał, ruchy, siły, praca, energja. Ażeby szkoły o szczuplejszym programie fizyki miały wybór ułatwiony, jakie rzeczy można pominąć bez szkody dla ciągłości, wydrukowano pismem drobniejszym całe rozdziały, bądź artykuły, nadające się do opuszczenia; należy tu moment bezwładności, uderzenie kul, teorja ruchu harmonicznego i falowego, hydrodynamika i aerodynamika, fale świetlne, teorja luster i soczewek, promieniotwórczość, elektrony.

Jak w poprzednich wydaniach, tak i obecnie element matematyczny w podręczniku ograniczono do koniecznej normy, ażeby fizyka, wbrew swemu zadaniu w szkole średniej, nie stała się „piątą matematyką".

Układ materjału i rodzaj druku zachowano taki, aby wnioski, twierdzenia, właściwości każdego zjawiska rzucały się w oczy uczniowi, aby tenże nie potrzebował ich się doszukiwać pośród opisów, przykładów i objaśnień.

Całość uległa niejakiemu skróceniu przez opuszczenie miejscami szczegółów technicznych (np. wydajność maszyn parowych, rodzaje prądnic), oraz przyrządów przestarzałych (np. kalorymetr lodowy, ogniwo Bunsena). Drobne wreszcie zmiany zaszły w rycinach i zadaniach.

Pisownia w 5-ym wydaniu została zmieniona w myśl okólnika, jaki szkoły otrzymały przed rokiem z górą, w chwili gdy się rozpoczął druk niniejszej książki.

K. Sporzyński.

Warszawa, w maju 1919.

SPIS RZECZY.

str.

Przedmowa V
Skrócenia X

Rozdział I. Wiadomości wstępne.

A) Wielkość ciał.

§ 1. Zadanie fizyki 1
§ 2. Pomiary fizyczne w ogólności 4
§ 3. Pomiary linjowe 5
§ 4. Pomiar powierzchni i objętości 8

B) Ciężkość.

§ 5. Ciężar i masa 10
§ 6. Ciężar właściwy i gęstość 15

Rozdział II. Mechanika ogólna ciał stałych.

A) Siły cząsteczkowe.

§ 7. Budowa materji 21
§ 8. Spójność, przyleganie, sprężystość 24
§ 9. Własności ciał stałych 27

B) Ruch jednostajny.

§ 10. Ruch w ogólności 32
§ 11. Ruch jednostajny 34
§ 12. Składanie ruchów jednostajnych 37
§ 13. Ruch zmienny w ogólności 41

C) Nauka o działaniu sił. (Dynamika)

§ 14. Siły 43
§ 15. Dynamiczny pomiar sił 46
§ 16. Statyczny pomiar sił 51

D) Nauka o równowadze sił. (Statyka)

§ 17. Siły rozbieżne o wspólnym punkcie działania 53
§ 18. Siły rozbieżne w ogólności. Moment obrotu 58
§ 19. Siły równoległe 61
§ 20. Środek ciężkości 66
§ 21. Równowaga ciężarów 71

E) Nauka o pracy i energji. (Energetyka)

§ 22. Praca 74
§ 23. Sprawność 77
§ 24. Energja 82

Rozdział III. Nauka o płynach (w spoczynku).

(Hydrostatyka)

§ 25. Własności płynów 88
§ 26. Ciśnienie zewnętrzne w płynach 89
§ 27. Ciśnienie własne płynów 93
§ 28. Naczynia zespolone 99
§ 29. Pęd do góry 102
§ 30. Pływanie 105
§ 31. Siły cząsteczkowe w płynach 110

Rozdział IV. Nauka o gazach (w spoczynku).

(Aerostatyka)

str.

§ 32. Własności gazów 120
§ 33. Ciśnienie atmosfery 126
§ 34. Barometry 128
§ 35. Prężność gazów 134
§ 36. Pompy powietrzne 138
§ 37. Pompy wodne i lewary 144
§ 38. Siły cząsteczkowe gazów 147

Rozdział V. Nauka o cieple. (Kaloryka)

A) Stan cieplny.

§ 39. Ciepło a temperatura 153
§ 40. Termometry 155
§ 41. Rozszerzalność ciał stałych i płynów 159
§ 42. Rozszerzalność gazów 165

B) Ruch ciepła.

§ 43. Ciepło właściwe 170
§ 44. Przepływ ciepła 175

C) Zmiany stanu skupienia.

§ 45. Topnienie i krzepnięcie 182
§ 46. Ulatnianie i skraplanie 188
§ 47. Własności pary 194
§ 48. Wilgotność powietrza 200

D) Termodynamika.

§ 49. Źródła ciepła. 206
§ 50. Ciepło jako praca 210
§ 51. Skraplanie gazów 216
§ 52. Silniki cieplne 225

Rozdział VI. Mechanika szczegółowa (i uzupełnienia).

A) Układ bezwzględny i wymiary.

§ 53. Układ C. G. S. 234

B) Siła i praca.

§ 54. Składanie sił. Praca sił 237

C) Maszyny proste.

§ 55. Dźwignia 240
§ 56. Wagi 244
§ 57. Bloki. 250
§ 58. Kołowrót i koła trybowe 253
§ 59. Równia pochyła 257
§ 60. Klin 260
§ 61. Śruba. 261

D) Ruch zmienny w szczególności.

§ 62. Ruch jednostajnie przyśpieszony i opóźniony 264
§ 63. Spadek swobodny ciał 267

E) Zmiany w ruchu ciał.

§ 64. Energja mechaniczna 274
§ 65. Pęd i popęd. 278
§ 66. Przeszkody ruchu 280

F) Ruch krzywodrożny.

§ 67. Rzuty. 289
§ 68. Ruch obrotowy 291
§ 69. Moment bezwładności 295
§ 70. Ciążenie powszechne 298

G) Ruch drgający.

str.

§ 71. Ruch harmoniczny 304
§ 72. Wahadło 309

H) Ruch falowy.

§ 73. Ruch falowy w ogólności 313
§ 74. Fale poprzeczne 316
§ 75. Fale podłużne 321
§ 76. Teorja ruchu falowego 323

I) Ruch płynów. (Hydrodynamika)

§ 77. Wypływ cieczy 331
§ 78. Energja cieczy płynącej 336

K) Ruch gazów. (Aerodynamika)

§ 79. Wypływ gazów 339

Rozdział VII. Nauka o głosie. (Akustyka)

§ 80. Głos w ogólności 344
§ 81. Cechy głosu 350
§ 82. Dźwięki muzyczne 355
§ 83. Źródła dźwięków 356

Rozdział VIII. Nauka o promieniowaniu. (Optyka)

A) Energja promienista.

§ 84. Rodzaje promieniowania 361
§ 85. Ruch promieniowania 365
§ 86. Natężenie promieniowania. 369

B) Odbicie światła. (Katoptryka)

§ 87. Zwierciadła płaskie. 373
§ 88. Zwierciadła kuliste 377
§ 89. Teorja zwierciadeł 381

C) Załamanie światła. (Dioptryka)

§ 90. Załamanie promieni w ogólności 384
§ 91. Całkowite odbicie światła 388
§ 92. Pryzmat i szyba 390
§ 63. Soczewki 393
§ 94. Teorja soczewek 398

D) Rozkład promieniowania.

§ 95. Barwy 403
§ 96. Analiza widmowa 410
§ 97. Światło jako ruch falowy 414

E) Narzędzia optyczne.

§ 98. Oko 420
§ 99. Fotografja 424
§ 100. Narzędzia powiększające 427
§ 101. Lunety 431

Rozdział IX. Magnetyzm.

§ 102. Własności magnesu 435
§ 103. Pole magnetyczne 438
§ 104. Magnetyzm ziemski. 443

Rozdział X. Elektrostatyka.

§ 105. Stan elektryczny 447
§ 106. Nabój elektryczny 451
§ 107. Pole elektryczne 454
§ 108. Pojemność elektryczna 460
§ 109. Wyładowania elektryczne 465

Rozdział XI. Elektrodynamika.

		str.
	A) Prąd galwaniczny czyli elektrochemiczny.	
§ 110.	Źródła chemiczne elektryczności.	473
§ 111.	Pole elektromagnetyczne	478
§ 112.	Opór elektryczny	485
§ 113.	Pomiary elektryczne	491
	B) Energja prądu elektrycznego.	
§ 114.	Praca mechaniczna prądu	498
§ 115.	Praca chemiczna prądu	502
§ 116.	Praca cieplna prądu	510
	C) Prąd indukcyjny.	
§ 117.	Indukcja	519
§ 118.	Prądnice	524
§ 119.	Przetwornice	530
	D) Promieniowanie elektryczne.	
§ 120.	Prąd elektryczny w gazach	535
§ 121.	Fale elektromagnetyczne	539
§ 122.	Promieniotwórczość	547
§ 123.	Elektrony	551

SKRÓCENIA.

g oznacza gram
kg „ kilogram=1000 gramów
mg „ miligram = $\frac{1}{1000}$ grama
m „ metr
dm „ decymetr = $\frac{1}{10}$ metra
cm „ centymetr = $\frac{1}{100}$ metra
mm „ milimetr = $\frac{1}{1000}$ metra
μ „ mikron = $\frac{1}{1000}$ milimetra
$\mu\mu$ „ milimikron $\frac{1}{1\,000\,000}$ milimetra

m^2, dm^2 i t. p. oznacza metr kwadratowy, decymetr kwadratowy i t. p.

m^3, dm^3 i t. p. oznacza metr sześcienny, decymetr sześcienny i t. p.
kgm oznacza kilogramometr
tjm „ techniczna jednostka masy
HP „ koń parowy, koń mechaniczny
W „ wolt
A „ amper
Ω „ om
pt. „ patrz wyraz odnośny

ROZDZIAŁ I.

WIADOMOŚCI WSTĘPNE.

A) WIELKOŚĆ CIAŁ.

§ 1. Zadanie fizyki.

1. Materja i ciało. Wszelkie twory przyrody, zarówno jak przedmioty sztucznie wytworzone, zowiemy *ciałami fizycznymi*. To, z czego składają się ciała, zowiemy *materją*; ciało więc stanowi pewną określoną część materji. Zresztą, rozgraniczenie obu nazw nie zawsze da się ściśle przeprowadzić (pt. poniżej przykłady).

Zasadniczą cechą materji jest *ważkość*; wszystko, co można zważyć, jest materją.

O istnieniu ciał i materji przekonywamy się zapomocą zmysłów, najczęściej wzrokiem i dotykiem; wiele materji oddziaływa też na nasz smak i powonienie, słuch zaś odgrywa stosunkowo mniejszą rolę w naszej styczności ze światem fizycznym. Niektóre materje zdradzają swe istnienie dopiero wtedy, gdy są w ruchu, np. powietrze, które czujemy jako wiatr, słyszymy jego podmuchy; inne materje lub ciała dostrzegamy jedynie w jaskrawym oświetleniu, np. pyłki kurzu w promieniach słońca.

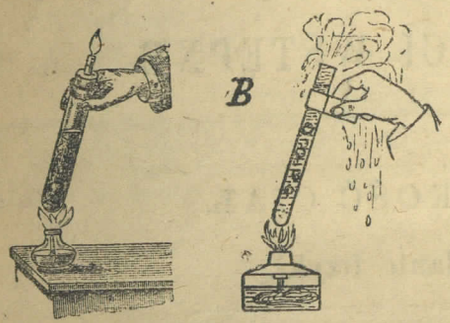
Wymienić, które z poniższych przykładów należy uważać za rodzaje materji, a które za ciała: cegła, glina; szkło, szyba; arkusz, papier; rura, żelazo; woda; mleko, powietrze, para, chmura, ziemia.

Przytoczyć inne przykłady pospolitych ciał i materji.

2. Zjawiska. Każdą zmianę, jakiej podlega ciało lub materja, zowiemy *zjawiskiem*. Jeżeli nie zmienia się przy tem istota materji, lecz tylko położenie ciała lub własności powierzchowne, np. wielkość, postać, kolor, połysk, jaskrawość, zmiany takie otrzymały miano *zjawisk fizycznych*; stanowią one przedmiot badań fizyki.

Skoro zaś materja podlega zmianom głębszym, wewnętrznym, które nadają jej nowe a stałe własności, czyli przeistaczają daną materję na inny, odmienny rodzaj materji, zmiany takie stanowią *zjawiska chemiczne* i należą do zakresu chemji. Pomiędzy jednymi a drugimi zachodzi związek tak ścisły, że ostatnimi czasy wyodrębniła się nowa gałąź wiedzy, chemja fizyczna.

Przykłady zjawisk fizycznych i chemicznych: *) spadek kamienia; lot kuli; pękanie szkła; nadymanie obręczy gumowej; wiatr; parowanie wody, zamarzanie; magnesowanie żelaza; świecenie żarówki elektrycznej. — Spalanie świecy; rdzewienie żelaza; zwarzenie się mleka; gnicie.



Rys. 1. Zjawisko chemiczne i fizyczne.

Za ogrzaniem w próbówce odrobiny węgla kamiennego uchodzi ze swędem gaz, który można zapalić (rys. 1); na szkle wewnątrz próbówki osiada ciecz gęsta i lepka; na spodzie zaś pozostaje twarda, spieczona masa węgla prawie czystego, zwanego koksem. Węgiel kamienny więc przestał istnieć. — Za ogrzaniem wody w podobnej próbówce (rys. 1B) wygotuje się ona zupełnie; woda więc przestanie istnieć. Jakiego rodzaju zjawiska mają miejsce w pierwszym i drugim przykładzie?

3. Stanowisko fizyki. Fizyka, jak wszystkie nauki przyrodnicze, zdobywa i gromadzi wiadomości zapomocą spostrzeżeń i doświadczeń, skąd wysnuwa wnioski, prawa, teorje, przyczem znakomitą pomoc znajduje w matematyce. W tym znaczeniu rozumiemy fizykę właściwą, ogólną, zwaną też fizyką doświadczalną; odrębny zakres studjów fizycznych stanowi fizyka matematyczna, opierająca się wyłącznie na rozumowaniu oraz na dociekaniach matematycznych.

Spostrzeżenie polega na zauważeniu zjawisk, zachodzących w przyrodzie i odróżnieniu stałych właściwości zjawiska od przypadkowych. Np. tęcza bywa i na wschodzie i na zachodzie, słońce jednak znajduje się zawsze z tyłu widza.

Doświadczenie polega na sztucznym wywołaniu zjawiska, ażeby zauważyć jego zależność od rozmaitych warunków. Np. dźwięk krótkiego pręta stalowego jest wyższy, niż długiego. Należy tu zawsze odróżniać przyczynę i skutek.

*) **Uwaga.** Każdy przykład powinien uczeń szczegółowo rozważyć i objaśnić jego znaczenie; pozatym winien starać się o przytoczenie własnych przykładów, odnośnie danego zjawiska. Uwaga ta dotyczy wszystkich przykładów, zawartych w niniejszym podręczniku.

Prawo fizyczne jest to twierdzenie, wyrażające stałą, niezmienną zależność pomiędzy przyczyną a skutkiem, albo zależność zjawiska od warunków, w jakich się odbywa, ściśle wyrażoną w słowach lub wzorach matematycznych. Prawo, dotyczące obszernej dziedziny zjawisk, zowie się *zasadą fizyczną*.

Doświadczenia uczą, że każde ciało, spadając bez przeszkody w ciągu 1, 2, 3... sekund, przebywa drogę 4,9, 19,6, 44,1... metrów, czyli $4{,}9 \times 1^2$, $4{,}9 \times 2^2$, $4{,}9 \times 3^2$... metrów. Stąd można wyciągnąć prawo: „Drogi, jakie ciało przebywa od początku spadania, wzrastają jak kwadraty odnośnych czasów". Długość drogi przebytej wyraża wzór: $h = 4{,}9\ t^2$, gdzie h oznacza drogę w metrach, t czas w sekundach.

Skoro zależności niepodobna ująć w sposób matematyczny, można się uciec nieraz do *wykresu* (djagramu); np. termometr „piszący" kreśli linję, wyrażającą zmiany temperatury, barometr linję ciśnienia.

Przez długi czas panowała doktryna, że prawa przyrody można wykrywać i badać przez samo rozumowanie, oparte na powierzchownej tylko znajomości materji; doświadczeń i badań szczegółowych nie uznawano, a nawet gardzono nimi. Mylne to mniemanie powstrzymywało przez całe wieki rozwój nauk przyrodniczych, wprowadzało natomiast szereg poglądów nieuzasadnionych lub urojonych, które z trudnością później musiano zwalczać.

Ogromny rozwój i stanowisko obecne zawdzięczają nauki przyrodnicze, a w szczególności fizyka, uznaniu tej prawdy, że istotnem źródłem wiedzy są bezpośrednie spostrzeżenia i doświadczenia; rozumowanie stanowi czynnik kontrolujący, chroniący od złudzeń zmysłowych, a zarazem rozszerza pojęcia i tą drogą prowadzi do odkryć dalszych.

Każde więc twierdzenie, jeżeli ma być prawem fizycznem, t. j. prawdą niewzruszoną, wymaga uzasadnienia zarówno na drodze doświadczalnej, jak rozumowej czyli teoretycznej. *)

4. Teorja i hipoteza. W braku rozważań pewnych i objawów oczywistych, nauka ucieka się do poglądu najbardziej prawdopodobnego na dane zjawisko; pogląd taki zowie się *hipotezą* czyli *przypuszczeniem*.

Jeżeli hipoteza lub zespół hipotez objaśnia szerszy zakres zjawisk, stanowi *teorję*.

Teorje, zarówno jak hipotezy, stanowią niepewną stronę wiedzy. Czasem do wyjaśnienia tego samego zjawiska nadaje się dwie i więcej hipotez równie prawdopodobnych; mogą one trwać obok siebie, aż nowe badanie wykaże słabość jednej z nich, np. spór Newtona z Huyghensem co do istoty światła. Należy więc teorje i hipotezy odróżniać od praw fizycznych, które są ustalonemi raz na zawsze prawdami.

*) W niniejszej „Fizyce", jako podręczniku szkolnym pomijamdy dowoy teoretyczne tam, gdzie przekraczają one zakres szkoły średniej, bądź przygotowanie matematyczne uczniów.

§ 2. Pomiary fizyczne w ogólności.

1. Dokładność badań fizycznych. Fizyka należy do t. zw. nauk ścisłych. Nie znaczy to jednak, aby prace fizyczne były bezwzględnie ścisłe, t. j. wolne od błędu; przeciwnie, każde mierzenie, ważenie, każde spotrzeżenie i doświadczenie nastręcza pewne niedokładności, których usunąć niepodobna, nawet w narzędziach najdoskonalszych, przy największej wprawie i umiejętności.

Każde zatym prawo fizyczne można stwierdzić doświadczalnie tylko w przybliżeniu; im więcej przytym wykonano doświadczeń, im bardziej są one różnorodne, tem większą dają pewność co do prawdziwości i ścisłości danego prawa.

W fizyce szkolnej, gdzie chodzi o sprawdzanie praw znanych, poprzestajemy na jednym lub paru doświadczeniach; powołujemy się wszakże na to, że podobne doświadczenia wykonało wielu badaczów, w różnych warunkach, a zgodność wyników upoważnia do ustalenia wniosku ogólnego czyli prawa.

2. Przyczyny błędów. 1) Ograniczenie naszych zmysłów, które nie są w stanie odczuwać różnic zbyt drobnych. Np. najlepszy wzrok nie dostrzega różnicy w długości mniejszej od $\frac{1}{10}$ lub $\frac{1}{20}$ mm, bez użycia szkieł powiększających.

2) Wady i niedokładności przyrządów, zanieczyszczenie materji. Np. części składowe nie mogą przystawać do siebie doskonale; podziałki nie mogą być bezwzględnie jednostajne, materjały badane nie są nigdy bezwzględnie czyste.

3) Obecność zjawisk ubocznych, które nie pozwalają wyróżnić dokładnie zjawiska lub własności badanej. Np. tarcie przeszkadza badaniu wszelkich ruchów na ziemi, ciężkość utrudnia mierzenie sił wewnętrznych, działających w wodzie i innych płynach.

3. Granice błędów. Pomiary lub doświadczenia wtedy tylko można poczytywać za udatne, jeżeli obok głównego wyniku pozwalają ocenić błąd doświadczalny, mianowicie, ile może on najwyżej wynosić.

Najpospolitsze i najłatwiejsze nawet pomiary bywają mało dokładne. Np. mierząc długość przedmiotu linijką milimetrową, możemy odczytać tę długość gołem okiem w milimetrach całkowitych, a nadto ocenić ułamek mm, czy wynosi mniej lub więcej niż $\frac{1}{2}$ mm. Popełniamy tu więc błąd bezwzględny w granicach $\frac{1}{2}$ mm, t. j. niezależnie od długości przedmiotu; błąd względny zaś, czyli błąd w stosunku do całej długości przedmiotu, będzie tym mniejszy, im większą długość wymierzamy. Np., gdy przedmiot mierzy 186 mm, odczytane na podziałce, oraz ułamek mm, oceniony na $\frac{1}{2}$ mm, błąd względny wynosi $\frac{1}{2}$ na $186\frac{1}{2}$ czyli 1 : 373; mierząc tą samą miarką dłuższy przedmiot, np. 721 mm, popełniamy błąd $\frac{1}{2}$: 721 czyli 1 : 1442, mierzymy więc prawie 4 razy dokładniej.

Podobnież istnieją niedokładności nieuniknione w każdym doświadczeniu. Np. przy wyciąganiu powietrza z flaszki pozostaje zawsze odrobina powietrza; nie licząc się z nią, powiadamy, że we flaszce jest próżnia.

4. Przykłady. 1) Mierzenie czasu. Zegarek kieszonkowy pozwala ocenić czas z dokładnością do $\frac{1}{5}$ sekundy: wahadełko jego bowiem uderza 5 razy na sekundę, czyli 300 razy na minutę („chód" zegarka). Przypuszczając więc, że zegarek idzie dobrze, t. j. nie przyśpiesza widocznie ani opóźnia się w ciągu np. jednej godziny, popełniamy błąd względny: na godzinie $\frac{1}{5}$: 3600 = 1 : 18000, na kwadransie $\frac{1}{5}$: 900 = 1 : 4500, na minucie 1 : 300. W ciągu dłuższego czasu, np. doby, każdy zegar, choćby najlepszy, daje nadto błąd dodatkowy wskutek widocznego już wtedy przyśpieszania lub opóźniania biegu; błąd ten w dobrym zegarku kieszonkowym dochodzi do 3 sekund na dobę, co stanowi 1 : 28800.

2) Obliczanie szybkości, jaką np. w danej chwili posiada kamień spadający, strumień wody, wiatr i t. p., musi być mniej dokładne, gdyż wchodzi tu wyżej przytoczony błąd na czasie, a nadto błędy nieuniknione przy obserwacji przebiegu zjawiska, jako to wskutek przeszkód ruchu czyli oporów, lepkości i t. p.

3) Oznaczanie temperatury na termometrze daje następujące błędy: przy odczytywaniu stopni niepodobna dostrzec zbyt drobnego posunięcia się słupka rtęciowego; podziałka nie może być zupełnie dokładna; rtęć rozszerza się od ciepła niezupełnie jednostajnie, zwłaszcza przy silniejszym ogrzaniu; szkło termometru zmienia się wewnętrznie z biegem czasu, a stąd i pojemność rurki, tak iż nie odpowiada pierwotnej podziałce na stopnie.

4) Ważenie, czy to na wagach handlowych, czy nawet najdokładniejszych wagach do celów naukowych, wydaje błędy dwojakie: wskutek niedokładności w budowie wagi (pt.) oraz w odrobieniu ciężarków do odważania czyli *odważników*. Ważymy ciało tym dokładniej, im mniej użyjemy odważników. Dobra waga analityczna wskazuje przy 200 gramach obciążenia różnicę o 0,0001 grama; przy ważeniu więc ciała zapomocą jednego odważnika 200 gramowego popełniamy błąd 0,0001 : 200 czyli 1 : 2 000 000. Niedokładność samego odważnika można tu pominąć, nie przenosi bowiem 0,00001 grama w odważnikach normalnych. Skoro jednak na ten sam ciężar ciała 200 gramów złożymy odważniki drobniejsze, jakie zwykle stanowią t. zw. garnitur do ważenia, błąd znacznie się powiększy: 100 + 50 + 20 + 10 + + 10 + 5 + 2 + 1 + 1 + 0,5 + 0,2 + 0,1 + 0,1 + 0,05 + 0,02 + 0,01 + 0,01 + + 0,005 + 0,002 + 0,001 + 0,001 + 0,001 grama, razem 22 odważniki sprawić mogą błąd, dochodzący do 0,00022 grama, czyli błąd większy, niż daje waga. Ciężar więc ciała wyraża się liczbą 200,000 gramów, czyli 6 cyframi dokładnymi, w siódmej zaś cyfrze i dalszych tkwi błąd doświadczalny; notowanie części grama mniejszych od 0,001 grama, czyli od jednego miligrama, byłoby bezcelowe.

§ 3. Pomiary linjowe.

1. Długość ciał, równie jak wysokość, szerokość, grubość, głębokość, wogóle wymiary linjowe mierzy się praktycznie w *metrach* i ich pochodnych. Jednostką długości i wogóle

jednostką wymiaru linjowego jest *metr* (*m*)

t. j. długość paryskiego wzorca platynowego, zwanego metrem archiwalnym, który miał stanowić dokładnie $\frac{1}{10\,000\,000}$ ćwiartki południka paryskiego. W rzeczywistości wzorzec metra różni się od tej idalnej jednostki prawie o grubość włosa, tak iż w praktyce nie robi się między nimi różnicy.

Metr i miary od niego pochodne wprowadzono we Francji w roku 1795; w ciągu XIX stulecia rozpowszechniły się miary metryczne we wszystkich krajach oświeconych, z wyjątkiem Anglji i Rosji, gdzie wszakże już je stosują w dziedzinie nauki i techniki.

Przy ustanowieniu miar metrycznych, miano na względzie, aby ich zasadnicza jednostka, metr, była niezmienną, t. j. aby w razie np. uszkodzenia lub zagubienia pierwowzoru metra, stanowiącego 0,0000001 ćwiartki południka, można było go odtworzyć z taką samą ścisłością, wymierzając powtórnie ten sam południk ziemski. Późniejsze jednak pomiary wykazały, że długość metra, odpowiadająca 0,0000001 ćwiartki południka, jest większa od pierwowzoru, czyli metra archiwalnego, według najnowszych obliczeń o 0,00015 metra.

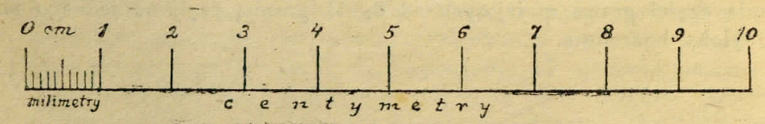
2. Podział metra jest dziesiętny (decymalny), t. j. każda część dzieli się na 10 mniejszych części, przyczym w pisowni przyjęto skrócenia następujące.

1 metr = 10 decymetrom = 100 centymetrom = 1000 milimetrom
1 m = 10 dm = 100 cm = 1000 mm
1 kilometr (km) = 1000 m | 1 mikron (μ) = $\frac{1}{1000}$ mm
1 myrjametr = 10000 m | 1 mikromilimetr (μμ) = $\frac{1}{1000000}$ mm.

Zamiana miar metrycznych na wyższe (większe) sprowadza się tylko do dzielenia przez 10, zamiana na niższe (drobniejsze) — do mnożenia przez 10; np.

375 mm = 37,5 cm = 3,75 dm = 0,375 m.
1,2 m = 12 dm = 120 cm = 1200 mm.

Rys. 2 podaje naturalną długość 1 decymetra, podzielonego na centymetry, a pierwszy centymetr nadto na milimetry, wszystko w długości rzeczywistej.



Rys. 2. Decymetr w naturalnej długości i jego podział.

3. Zalety miar metrycznych: 1) Są to miary naturalne i praktycznie stałe, jako wzięte z wymiarów kuli ziemskiej.

2) Mają podział dziesiętny, co znakomicie ułatwia rachunki.

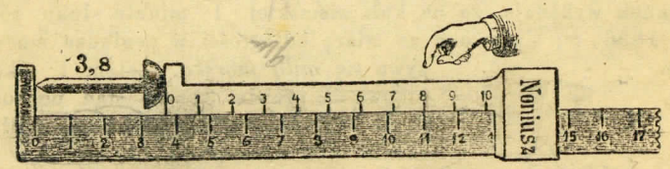
3) Stanowią miary międzynarodowe; posługuje się nimi już 400 miljonów ludzi.

4. Zamiana miar metrycznych na inne, spotykane u nas jeszcze w handlu i w życiu powszednim, daje się wykonać podług następującego zestawienia (do rachunku pamięciowego podano w nawiasie liczby zaokrąglone).

Mila geogr. = 7426 m (7½ km)
Mila polska = 8536 m (8½ km)
Mila rosyj. = 7586 m (7½ km)
Mila niem. = 7500 m (7½ km)
Mila franc. = 4452 m (4½ km)
(lieue)
Mila angielska = 1609 m
Mila włoska, Mila morska, Minuta równika = 1856 m

Wiorsta = 1067 m (1 km)
Sążeń ros. = 2,14 m (2 m)
Arszyn = 711 mm
Yard angielski = 0,9144 m (1 m)
Łokieć = 576 mm
Stopa ang., Stopa ros. = 305 mm (⅓ m)
Cal ang., Cal ros. = 25,4 mm (2½ cm)
Cal polski = 24 mm

5. Nonjusz (Vernier 1631) służy do ściślejszego mierzenia długości; stanowi linijkę, posuwaną wzdłuż skali zwykłej milimetrowej i podzieloną rozmaicie. Najbardziej używany bywa nonjusz dziesiętny, podzielony na 10 części, a mający długość 9 mm; mierzy on długość z błędem do dziesiątej części milimetra.

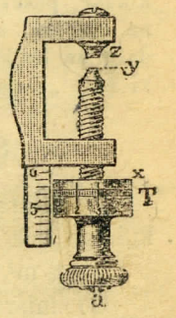


Rys. 3. Nonjusz.

Przedmiot do wymierzenia przykłada się do zera podziałki, przysuwa się doń nonjusz (rys. 3); wtedy jedna z kresek nonjusza zlewa się z jakąś kreską podziałki; kreska ta oznacza dziesiąte części milimetra, zawarte w przedmiocie, całkowite zaś milimetry odczytuje się wprost na podziałce. Na rycinie np. długość mierzonej śrubki wynosi 3,8 mm (gwoli wyrazistości, na rycinie figuruje skala powiększona).

Wogóle nonjusz do mierzenia $1/n$ części milimetra powinien zawierać n działek, a mieć długość $n—1$ mm.

Objaśnienie. Ponieważ 10 działek nonjusza = 9 dz. skali czyli 9 mm, to 1 działka nonjusza = $\frac{9}{10}$ mm, czyli różni się o $\frac{1}{10}$ mm. Kreska 8-a nonjusza zlewa się z 11-ą skali; sąsiednia, 7-a nonjusza odbiega od najbliższej 10-ej kreski skali o $\frac{1}{10}$ mm; następna, 6-a kreska nonjusza od 9 skali o $\frac{2}{10}$ mm i t. d., wreszcie kreska 0 nonjusza, czyli koniec przedmiotu, odbiega od 3-ej kreski skali o $\frac{8}{10}$ mm.



Rys. 4. Mikrometr.

6. Pomiar grubości, albo też drobnych różnic w długości, dokonywa się zapomocą *mikrometru;* błąd wynosi tutaj $\frac{1}{100}$, a nawet $\frac{1}{1000}$ milimetra.

Powszechnie uzywana *śruba mikrometryczna* (rys. 4) składa się ze śrubki o nacięciu (kroku) 1 mm i główce, podzielonej na obwodzie na 100 części.

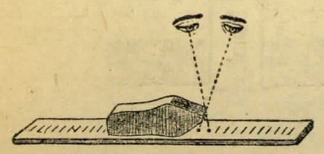
Skoro śrubka jest dokręcona do guzika *z* ramki, kreska 0 na główce przypada na 0 skali bocznej, milimetrowej. Za każdym obrotem całkowitym, czyli o 100 działek główki, koniec śrubki odbiega od guzika o 1 mm; części obrotu, odpowiadające częściom milimetra, oznacza działka na główce, przypadająca wprost skali (na rycinie np. odstęp *z y* wynosi 2,08 mm). — Jeżeli śruba ma nacięcia $\frac{1}{4}$ mm, a główkę podzieloną na 250 części, mierzy ona do $\frac{1}{1000}$ mm.

7. Miarę kątów stanowi kąt prosty, mierzony ćwiartką obwodu kołowego, czyli 90 stopni (90°); 1 stopień dzieli się na 60 minut (60′), 1 minuta na 60 sekund kątowych (60″). Do pomiaru minut i sekund kątowych służy specjalny nonjusz łukowy czyli *wernier*.

Nonjusz minutowy, dla podziałki półstopniowej na obwodzie koła, ma długość 29 takich łuków półstopniowych, podzieloną na 30 równych części czyli działek; każda więc działka nonjusza stanowi $\frac{29}{30}$ łuku półstopniowego czyli różni się o $\frac{1}{30}$ od połowy stopnia, czyli o $\frac{1}{60}$ całego stopnia.

Inny sposób mierzenia kątów polega na wyrażeniu wielkości kąta stosunkiem długości łuku do promienia. Jednostka kątowa czyli *radian*, zawiera 57°,296..., łuk bowiem wyprostowany takiego kąta równa się jego promieniowi, czyli stosunek łuk 57°, 296 : promień = 1.

Rachunek wykazuje, że na kuli ziemskiej 1 minuta łuku równika ma długość 1856 m; służy ona za miarę odległości w żegludze morskiej i nazywa się *milą morską*. Zatem 1 sekunda równikowa = prawie 31 m; stąd pochodzi t. zw. *węzel* żeglarski, miara szybkości. Bliższe znaczenie tych miar pt. § 11, art. 3.



Rys. 5. Paralaksa.

8. Błąd w odczytywaniu długości przedmiotów, przez przyłożenie do nich podziałki, powstaje skutkiem niedokładnego przystawania podziałki do przedmiotu. Pomiędzy promieniami wzrokowemi, czyli linjami prostymi, idącymi od końca przedmiotu do oka w dwu rozmaitych położeniach oka, zawiera się pewien kąt, zwany *paralaksą* (rys. 5). Uniknąć można paralaksy, kładąc pasek lustrzany wzdłuż podziałki; odczytuje się podziałkę, patrząc na nią tak, aby odbicie źrenicy oka w lustrze i koniec przedmiotu przypadały na linji prostej; wtedy promień wzrokowy jest prostopadły do podziałki (pt. „Zwierciadła płaskie").

§ 4. Pomiar powierzchni i objętości.

1. Miarą powierzchni jest *metr kwadratowy* (m²), czyli kwadrat, którego bok ma 1 m długości.

1 m² = 100 dm²; 1 dm² = 100 cm²; 1 cm² = 100 mm².

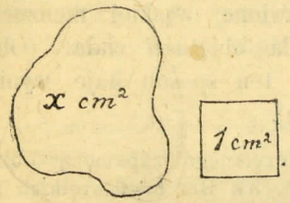
Do mierzenia większych powierzchni, np. miast, krajów służy kilometr kwadratowy, który zawiera miljon metrów kwadratowych.

Do pomiarów rolnych służy *ar* = 100 m² i *hektar* = 100 arom = prawie 2 morgom. Geograficzna mila kwadratowa = okr. 55 km².

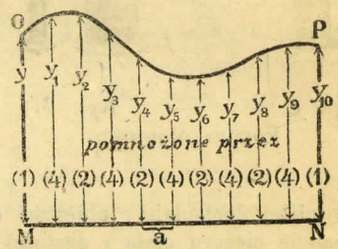
2. Pomiar powierzchni, mających postać foremną, jak trójkąt, trapez, koło i t. p., dokonywa się na zasadzie wzorów matematycznych.

Pola figur nieforemnych i wykresów wyznacza się zapomocą planimetru, przyrządu w rodzaju cyrkla poziomego, bądź zapomocą ważenia figury, wykrojonej z papieru, albo też z rachunku według reguły Simpsona.

Przykład na oznaczenie pola ważeniem (rys. 6). Skoro 1 cm² papieru waży 9 mg, a figura waży 22,5 mg, pole figury wynosi 22,5 : 9=2,5 cm².



Rys. 6.



Rys. 7. Reguła Simpsona.

Reguła Simpsona używa się zwłaszcza do figur, kreślonych na papierze o kratkach milimetrowych. Dzieli się pole figury (rys. 7) na paski równej szerokości *a* w liczbie parzystej i oznacza się wysokości $y, y_1, y_2 \ldots y_n$. Na nich pisze się liczby: 1, 4, 2, 4, 2, 4... 2, 4, 1, wyrażające, ile razy wypada wziąć te wysokości; wtedy pole figury, wedle zasad geometrji

$$S = \frac{a}{3}[1y + 4y_1 + 2y_2 + 4y_3 + 2y_4 \ldots + 1y_n].$$

3. Miarą objętości jest *metr sześcienny* (m³), czyli sześcian, którego bok ma długość 1 m.

1 m³ = 1000 dm³; 1 dm³ = 1000 cm³; 1 cm³ = 1000 mm³.

Objętość 1 decymetra sześciennego nazywa się *litrem* i stanowi najczęściej używaną miarę do płynów. Tak więc, praktyczne miary objętości stanowią:

1 metr sześcienny = 1000 litrów.

1 litr = 1000 cm³.

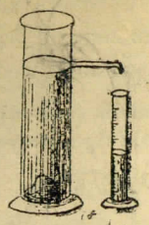
Litr = ściśle polskiej kwarcie = prawie $\frac{1}{1\frac{1}{2}}$ ros. wiadra.

4. Pomiar objętości brył foremnych, jako to kuli, sześcianu, graniastosłupa, ostrosłupa, walca, stożka i t. p., dokonywa się na zasadzie wzorów matematycznych.

Objętość ciał nieforemnych, jako też ciał bardzo drobnych lub ciał sypkich, oznacza się najłatwiej zapomocą *menzurki*, czyli naczynia walcowego ze szkła, podzielonego na centymetry sześcienne; podobnież odmierza się objętość płynów. Tę ostatnią odczytuje się wprost na podziałce; do oznaczenia zaś objętości ciała stałego nalewa się do menzurki najprzód wody lub innego płynu, w którym ciało się nie rozpuszcza, i zaznacza się objętość płynu, następnie wpuszcza się dane ciało (rys. 8), wskutek czego płyn się podniesie, a przybór jego wykaże objętość ciała.



Rys. 8.



Rys. 9.

Pomiar objętości.

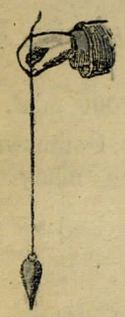
Dokładniej można wyznaczyć objętość ciała stałego zapomocą naczynia z odpływem bocznym (rys. 9). Napełnia się naczynie całkowicie wodą, a skoro przestanie ona wypływać rurką boczną, wpuszcza się ciało; objętość wody, jaka teraz wyleje się do podstawionej wąskiej menzurki, odpowiada objętości ciała. (Objaśnić, czemu ten sposób daje wyniki ściślejsze).

Najściślej dochodzimy objętości ciała nieforemnego zapomocą obliczenia, na zasadzie ciężaru ciała i gęstości (§ 6, art. 3). Dla brył wielkich stanowi to jedyny sposób wyznaczania objętości.

B) CIĘŻKOŚĆ.

§ 5. Ciężar i masa.

1. Wszelkie ciała są ciężkie, t. j. wywierają ciągnienie lub nacisk na przeszkodę, która im nie pozwala spadać. Jeżeli niektóre ciała nazywamy lekkimi, rozumiemy przez to, że one słabiej ciągną na dół, czyli mniej ważą, niż inne ciało tej samej wielkości.



Ponieważ ciała, puszczone swobodnie, spadają zawsze na ziemię, przyjmujemy, że ziemia przyciąga ciała; przyciąganie to zowie się *siłą ciężkości*, albo krócej *ciężkością*. Siła ta jest objawem poszczególnym ciążenia powszechnego, t. j. przyciągania wzajemnego wszystkich ciał na ziemi i we wszechświecie. Bliższe wiadomości podaje rozdział o grawitacji (pt.).



Rys. 10.
Pion i libella.

2. Kierunek siły ciężkości, t. j. kierunek, w którym ciała spadają, prowadzi do środka ziemi i zowie się *pionowym* *). Wskazuje go *pion* (rys. 10), złożony ze sznurka, wyprężonego ciężarkiem: przepalając sznurek, przekonamy się, że ciężarek spadnie w kierunku sznurka. Pionowość jakiejś powierzchni, np. muru, sprawdza się, przysuwając pion i bacząc, czy sznurek jednakowo odstaje u góry i u dołu.

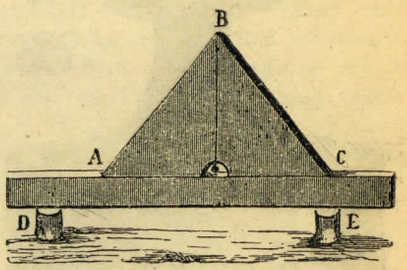
*) Pomijamy tutaj pewne uchybienia względem kierunku pionowego, zresztą znikome, a wynikające z rzeczywistej postaci ziemi, jako geoidy, z niejednostajności jej budowy, wpływu gór i t. p.

Kierunek prostopadły do pionu zowie się *poziomym*. Do jego wyznaczenia służy *libella*, złożona z rurki zlekka wygiętej i zawierającej wodę oraz pęcherzyk powietrza (rys. 10). Poziomość jakiejś powierzchni, np. stołu, sprawdza się, uważając, czy pęcherzyk przypada na środku rurki, gdy się libellę położy na tej powierzchni; czynność tę należy wykonać dwukrotnie, kładąc libellę raz w jednym kierunku, dowolnym, drugi raz w innym, najlepiej prostopadłym do poprzedniego (dlaczego?).

Najdokładniejszy poziom w naturze stanowi powierzchnia wody spokojnej, w małym zbiorniku, np. studni, sadzawce.

W znaczeniu ścisłym matematycznie, powierzchnia wody, choćby najmniejsza, jest nieco wypukła, należy bowiem do powierzchni kuli ziemskiej; wypukłość jednak wody w naczyniach jest tak mała, że nie daje się fizycznie zauważyć.

Do sprawdzania poziomu, oprócz libelli, służy też *węgielnica* (rys. 11), mianowicie w robotach grubszych, jak wznoszenie murów, układanie belek itp. Składa się z deski w kształcie trójkąta równoramiennego, przy którego wierzchołku wisi pion. Linja tego pionu trafia na środek podstawy, skoro podstawę ustawimy poziomo (dlaczego?).



Rys. 11. Węgielnica.

Piony pobliskie są równoległe do siebie, w znaczeniu praktycznym. np. piony wiszące w jednym pokoju.

Wszystkie piony prowadzą do środka ziemi, zatem spotykają się, nie są więc równoległe do siebie w znaczeniu matematycznym. Ponieważ jednak odchylenie wzajemne pionów, wiszących obok siebie, nie jest dostrzegalne, ani się nie da oznaczyć doświadczalnie, takie piony poczytujemy za równoległe.

Przykład. Jak daleko trzeba zawiesić dwa piony, aby tworzyły z sobą kąt 1 sekundy?

Rozwiązanie. Obwód ziemi $360^0 = 360 \times 60 \times 60 = 1\,296\,000''$ wynosi 40 000 000 m; zatym poszukiwana odległość

$$x : 40\,000\,000 = 1 : 1\,296\,000$$

$$x = \text{okrągło } 31 \text{ m.}$$

3. Ciężarem lub **wagą** ciała zowie się nacisk, jaki ciało wywiera na podstawę, czyli na poziomą powierzchnię, na jakiej spoczywa.

Do oznaczania ciężaru ciał służą wagi, znane w użyciu powszechnem. Najdokładniejszą jest waga równoramienna z szalkami (pt.), najprostszą jest waga sprężynowa (§ 9, art. 5).

Jednostką ciężaru jest *gram* (g)

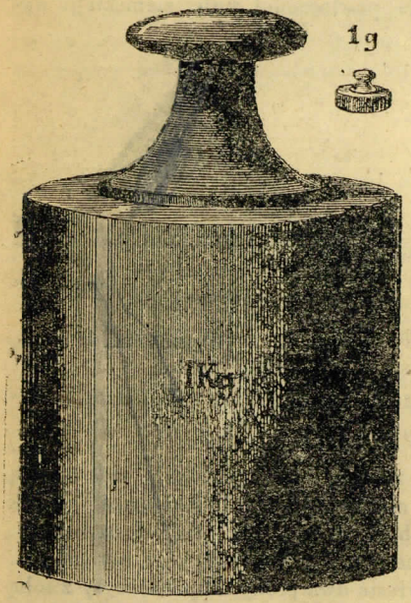
t. j. waga wody, zawartej w 1 cm³ (wody dystylowanej, w próżni, przy 4° C., w Paryżu *). Od grama pochodzą jednostki:

1 miligram (mg) = $\frac{1}{1000}$ grama;

1 kilogram (kilo, kg.) = 1000 gramów;

1 tonna = 1000 kilogramów.

Z powyższego wynika, że 1 litr wody waży 1 kilogram.



Rys. 12. Gram i kilogram.

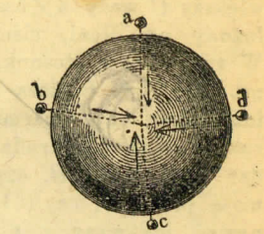
Gram wynosi prawie $\frac{1}{13}$ łuta; kilogram prawie $2\frac{1}{2}$ funta (dokładniej 1 funt = 410 g.). Do praktycznego użytku ciężarki gramowe odlewa się z mosiądzu, większe z żelaza; drobniejsze od grama robi się z blaszek platynowych, mosiężnych, glinowych. Rys. 12 wyobraża w wielkości naturalnej ciężarek 1 grama oraz 1 kilograma, wyrobione z mosiądzu; żelazne byłyby niewiele co większe.

4. Ciężar ciał jest zmienny, zależnie od ich położenia na kuli ziemskiej, mianowicie: 1) od szerokości geograficznej, 2) od wyniesienia ponad poziom morza. Każde ciało staje się lżejsze, skoro się je przenosi od biegunów ku równikowi: najwięcej waży na biegunie, najmniej na równiku; zarazem ciało staje się lżejsze w razie podnoszenia go coraz wyżej. Oba te jednak wpływy są tak nieznaczne, że w praktyce nie zważamy na nie, jedynie zaś przy pomiarach naukowych.

O zmienności wagi tego samego ciała można się przekonać zapomocą specjalnie urządzonej delikatnej wagi sprężynowej (pt. poniżej rys. 25), w której sprężyna jest wrażliwa na najmniejszą przewyżkę ciężaru, na niej zawieszonego. Wagi zwykłe, szalkowe, nie wskazują żadnej różnicy, bo ciężar przedmiotów na obu szalkach zmienia się jednakowo.

*) Woda dystylowana jest jedynie czysta. Ważenie w próżni daje prawdziwy ciężar ciała, w powietrzu ciała są cokolwiek lżejsze. Woda, mająca 4 stopnie ciepła, posiada najmniejszą objętość, czyli jest stosunkowo najcięższa. Paryż przyjęto jako miejsce do oznaczeń ciężaru, gdyż siła ciężkości działa na ziemi niejednakowo. Bliższe objaśnienia pt. w odnośnych rozdziałach.

Przyjmujemy, że każda cząstka ziemi przyciąga każdą cząstkę ciała, a wynikiem tych przyciągań jest ciążenie ku środkowi ziemi (rys. 13). Ponieważ ziemia nie jest kulą dokładną, ale jest spłaszczoną ku biegunom, przeto odległość bieguna od środka ziemi jest mniejsza, niż równika; stąd ciężar ciał maleje ku równikowi. Zarazem ciężar ciał zmniejsza się ku równikowi jeszcze skutkiem siły odśrodkowej (pt.), wynikającej z obrotu ziemi. W rzeczywistości ubytek wagi wynosi około $\frac{1}{200}$, np. ciężar 200 kg. na równiku wynosi 201 kg. na biegunie.



Rys. 13.

Ubytek ciężaru przy wznoszeniu się ciała wynosi 0,0003 wagi ciała na kilometr wyniesienia, dla niewielkich wysokości nad ziemią; znaczy to, że przedmiot, ważący tuż nad ziemią 10 kg, za podniesieniem go na 1 km będzie o 3 g lżejszy. Nawet w pokoju zwykłym można wykazać, że ciało ważące 1 kg, gdy leży na podłodze, jest przeszło o 1 miligram cięższe od tegoż ciała, umieszczonego u sufitu. Jolly zdołał to sprawdzić zapomocą bardzo czułej wagi o dwu parach szalek, ustawionej w wysokiej sali na półce tak, że dolna para szalek była o 5,2 m niżej zawieszona pod górną parą; gdy dobrano dwa ciała tak dokładnie, iż żadne nie przeważało, gdy oba leżały na górnych szalkach, waga przechyliła się wyraźnie po przełożeniu jednego ciała na dolną szalkę odpowiednią.

5. Masę pojmujemy jako ilość materji, zawartą w ciele. O wielkości masy stanowi opór, jaki ciało stawia przy poruszaniu lub zatrzymywaniu (bliżej rozważa to § 15 „Dynamiczny pomiar sił").

Najłatwiej ocenia się masę podług wagi ciała, w tym samym miejscu na ziemi: dwa ciała jednakowo ciężkie mają jednakowe masy; ciało przepołowione posiada w każdym kawałku połowę swej masy poprzedniej, a zarazem połowę wagi. Wogóle masa ciał jest proporcjonalna do ich wagi, o ile ciała pozostają na miejscu.

Jednostką masy jest *gram* (g)

t. j. masa wody, zawarta w 1 cm³ (wody dystylowanej, przy 4°). Stąd istnieją pochodne jednostki masy, podobnie jak dla ciężaru ciał: miligram = $\frac{1}{1000}$ g, kilogram = 1000 g, tonna = 1000 kg. Tak więc

masa 1 grama waży 1 gram

(w Paryżu, w próżni).

przez co rozumieć wypada, że materję w ilości 1 grama przyciąga ziemia siłą 1 grama.

Niechaj kawałek kredy A waży 5 g; dwa takie kawałki, albo, co na jedno wynosi, jeden kawałek B dwa razy większy waży $2 \times 5 = 10$g, trzy razy większy C waży $3 \times 5 = 15$ g i t. d. Znaczy to, że kawałek kredy C, położony na dłoni, ciśnie siłą 3 razy większą, B siłą 2 razy większą, niż A. W tym samym stosunku musi być ilość materji w danej kredzie: kawałek C ma trzy razy większą masę, B dwa razy większą od A. Skoro dobierzemy inne ciało, np. marmur, tak aby cisnął taką samą siłą na dłoń, czy na szalkę wagi, jak kreda B, t. j. aby ważył tyle, co kreda B, musi on posiadać masę równą B, czyli 10 g; marmur, ważący tyle co kreda C, posiada masę równą C, czyli 15 g. Tak więc na zasadzie wagi ciał można porównywać ich masy, bez względu na to, czy ciała są złożone z tej samej materji, czy różnorodne.

6. Masa ciał jest niezmienna czyli niezależna od wyniesienia nad ziemią, ani od położenia geograficznego, ani od umieszczenia masy w tym lub innym środowisku, bądź na tej czy innej bryle niebieskiej. Np. gram srebra i gram siarki mają masę jednakową i zawsze taką samą, czy to pod równikiem, czy pod biegunem, na szczycie góry czy na morzu; masa ich nie zmieni się przy zanurzeniu do wody, chociaż srebro stanie się lżejsze o $\frac{1}{10}$, a siarka o $\frac{1}{2}$ grama; masa nie zmieni się bodaj na księżycu, czy też na słońcu, chociaż przyciąganie ich przez księżyc jest prawie 6 razy słabsze, a przez słońce 28 razy silniejsze, aniżeli na ziemi, od tego zaś zależy waga ciał.

Oznaczanie wagi ciał, zarówno jak masy, jednostkami o tej samej nazwie wymaga ścisłego odróżniania obu pojęć. Zawsze więc, gdy mowa o gramach, kilogramach i t. p., konieczna zdawać sobie sprawę, czy chodzi o ilość materji w nich zawartą, czy o siłę, z jaką one ciężą ku ziemi.

Przykłady. Kupując bochenek chleba kilogramowy, mamy na myśli ilość materji w postaci chleba, nie zaś siłę przyciągania tego kilograma ze strony ziemi. — Siłacz, dźwigając kulę 100-kilogramową, pokonywa przyciąganie ziemskie; nie chodzi mu o masę tej kuli, ale o to, jak silnie ona ciągnie do ziemi. — Gdyby kula armatnia leciała ze zwykłą swą szybkością początkową w odległości takiej, jak księżyc od ziemi, nie ważyłaby ona nic prawie, ale wywarłaby uderzeniem skutek również zabójczy, jak tu na ziemi (masa czy waga?). — Artylerzysta, biorący z ziemi pociski, aby niemi nabijać armatę, wysila się i męczy (masa czy waga?).

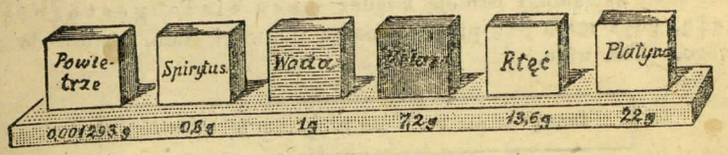
Zadania.

1. O ile odchylone są względem siebie dwa piony, zawieszone na końcach ulicy, długiej na 3,1 km? Odp. O kąt 1′40″.
2. Ile ciężaru traci człowiek, ważący 75 kg, skoro się wzbije balonem na 9 km? Odp. 202,5 g.
3. Jak daleko leży Kraków od Warszawy (w linji powietrznej), jeżeli piony w tych miastach tworzą względem siebie kąt 2° 5′? Odp. 232,5 km.
4. Ciało na równiku jest lżejsze o 6 g, niż na biegunie; ile waży na równiku? Odp. 1,2 kg.

§ 6. Ciężar właściwy i gęstość.

1. Ciężar właściwy. Rozmaite materje, wzięte w tej samej objętości, różnią się znacznie co do wagi. Np. kostka szklana wielkości 1 cm³ waży 3 razy mniej, niż taka sama kostka żelazna, a 4 razy więcej, niż drewniana.

Ciężar ciała w objętości 1 cm³ zowie się *ciężarem właściwym* albo *ciężarem gatunkowym*. Np. ciężar wł. spirytusu wynosi 0,8 g, wody 1 g, żelaza 7,2 g (por. rys. 14).



Rys. 14.

Ponieważ 1 cm³ wody waży 1 gram, ciężar właściwy wskazuje zarazem, ile razy dane ciało jest cięższe od wody w tej samej objętości; jest to ciężar względny i wyraża się tą samą liczbą, ale czystą, t. j. niemianowaną, zaś ciężar 1 cm³ ciała wyraża się w gramach, czyli liczbą mianowaną.

Dla uproszczenia odrzucamy miano gramowe przy liczbach, oznaczających ciężar właściwy, pisząc np. c. wł. spirytusu = 0,8, wody 1, żelaza 7,2; w żadnym jednak razie pojęcia ciężaru właściwego i ciężaru względnego nie są równoznaczne.

2. Gęstość (masa właściwa). Masa ciał w objętości 1 cm³ zowie się *gęstością*; wyraża się ona w jednostkach masy, czyli gramach, a liczebnie wynosi tyleż, co ciężar właściwy, w układzie praktycznym miar. Wypływa to już z określenia wagi i masy, przyczem i tutaj odróżniać należy, że gęstość stanowi wielkość niezmienną dla danego ciała, gdy tymczasem ciężar właściwy zależy od siły ciążenia.

Gęstość ciał w tem znaczeniu rozumiemy bezwzględną; gęstość względna jest stosunkiem gęstości bezwzględnej ciała do takiejże gęstości wody. Ponieważ gęstość wody = 1 g, gęstość względna wyraża się tą samą liczbą, co bezwzględna, ale czystą, niemianowaną.

Tak więc, liczba 0,8 oznacza gęstość spirytusu, a zarazem jego ciężar względny i ciężar właściwy; liczba 7,2 gęstość oraz ciężar względny i właściwy żelaza i t. p.

3. Zależność między wagą ciała, ciężarem wł. i objętością. Skoro 1 cm³ wody waży 1 gram, to waga 1 cm³ ciała o ciężarze wł. d wyniesie d gramów, a waga v cm³ czyli całego ciała.

$$\boxed{\text{waga } p = v \,.\, d = \text{objętość} \times \text{ciężar wł.}}$$

Stąd

$$\text{ciężar wł. } d = \frac{p}{v} = \frac{\text{waga}}{\text{objętość}}$$

$$\text{objętość } v = \frac{p}{d} = \frac{\text{waga}}{\text{ciężar wł.}}$$

Takie same zależności istnieją między masą ciała, gęstością i objętością, gdyż masa jest proporcjonalna do wagi ciała, gęstość do ciężaru właściwego. Tak więc,

$$\boxed{\text{masa } m = v \,.\, d = \text{objętość} \times \text{gęstość}}$$

Stąd

$$\text{gęstość } d = \frac{m}{v} = \frac{\text{masa}}{\text{objętość}}$$

$$\text{objętość } v = \frac{m}{d} = \frac{\text{masa}}{\text{gęstość.}}$$

Dla wody stosunek wagi do objętości jest najprostszy, mianowicie 1 : 1; ile cm³ wynosi objętość wody, tyle gramów waży woda. W praktyce więc ważenie wody zastępujemy zwykle jej odmierzaniem, co jest daleko dogodniejsze. Na tej zasadzie flaszki apteczne i naczynia chemiczne miewają oznaczoną zawartość wody w gramach: flaszka 100-gramowa zawiera 100 cm³ wody, 1000-gramowa zawiera 1 litr wody i t. d. Pomijamy tu drobne niedokładności wskutek temperatury i in.

4. Oznaczanie ciężaru właściwego (gęstości). 1) Zapomocą *menzurki* (rys. 8). Jest to łatwy i krótki sposób dochodzenia ciężaru właściwego w przybliżeniu, wystarczającym nieraz w praktyce.

a) Dla ciała stałego: waży się ciało, wlewa się do menzurki wodę lub inną ciecz nierozpuszczającą ciała, przyczem zaznacza się objętość jej, wreszcie wrzuca się ciało do menzurki, wskutek czego objętość się powiększa, przybór wody stanowi objętość ciała stałego; zatym

$$\text{ciężar wł. ciała stałego} = \frac{\text{waga ciała}}{\text{przybór wody}}.$$

Przykład. Kawałek szkła waży 34 g; wody nalano do menzurki 50 cm³, po wrzuceniu szkła woda podniosła się do 63 cm³. Ciężar wł. szkła = 34 : (63 — 50) = 2,6.

b) Dla cieczy: w menzurce, której wagę raz na zawsze ustalono, waży się ciecz i odczytuje się zarazem jej objętość; stąd

$$\text{ciężar wł. cieczy} = \frac{\text{waga cieczy}}{\text{objętość cieczy}}.$$

Przykład. Menzurka wraz z terpentyną waży 239 g, sama zaś menzurka 160 g; objętość terpentyny wynosi 91 cm³. Ciężar wł. terpentyny = =(239—160) : 91 = 0,87.

2) Zapomocą *piknometru* (rys. 15), t. j. flaszeczki z korkiem doszlifowanym i wydrążonym na wylot. Sposób ten daje wyniki bardzo ścisłe i nadaje się do ciał w małych ilościach, jako też w proszku, w okruchach; po napełnieniu i zatkaniu wytryska nadmiar płynu przez korek, a w wąziutkiej szyjce korka drobna część kropli stanowi już różnicę wyraźną.



Rys. 15.

Czynności przy oznaczaniu ciężaru właściwego:

a) Dla ciała stałego: waży się samo ciało, następnie ciało to wraz z piknometrem pełnym wody i zakorkowanym, wreszcie wrzuca się ciało do piknometru i znów się waży, zamknąwszy piknometr i obtarłszy od wylanej wody; różnica dwu liczb ostatnich stanowi ubytek wody w gramach, równy objętości ciała w cm³. Stąd

$$\text{ciężar wł. ciała stałego} = \frac{\text{waga ciała}}{\text{ubytek wody}}.$$

Przykład. Odważono 8,21 g. węgla kamiennego w okruchach; położony na szalce, obok piknometru, napełnionego wodą, węgiel wraz z nim waży 88,21 g, po wrzuceniu zaś do piknometru, 82,43 g. Ciężar wł. węgla = 8,21 : (88,21—82,43) = 1,42.

b) Dla cieczy: oznacza się raz na zawsze wagę piknometru próżnego, oraz napełnionego wodą, skąd ustala się wagę wody; waży się więc tylko piknometr z badaną cieczą, a odejmując wagę piknometru, otrzymuje się wagę cieczy. Stąd

$$\text{ciężar wł. cieczy} = \frac{\text{waga cieczy}}{\text{waga wody.}}.$$

Przykład. Piknometr, napełniony mlekiem, waży 81,42 g, napełniony wodą 80 g, próżny zaś 30 g. Ciężar wł. mleka = (81,42 — 30) : : (80—30) = 1,028.

Dla ciał rozpuszczalnych w wodzie oznacza się ciężar właściwy względem innej cieczy, w której dane ciało się nie rozpuszcza, np. w nafcie, eterze, spirytusie, o wiadomej gęstości; z pomnożenia obu liczb wypada poszukiwany ciężar właściwy.

Biblioteka Wojewódzka w Białymstoku

Jeżeli ciężar wł. ciała względem danej cieczy wynosi $d_1 = \frac{p}{P-P'}$, gdzie p oznacza wagę ciała, P wagę piknometru z wodą i ciałem obok położonem, P' wagę piknometru z wodą po wrzuceniu doń ciała, a ciężar właściwy tej cieczy wynosi d_2, to ciężar właściwy danego ciała (względem wody, t. j. waga 1 cm³ ciała)

$$d = d_1 \times d_2 = \frac{p}{P-P'} \times d_2.$$

Przykład. Kawałek cukru waży w powietrzu 5,6 g, w nafcie zaś, której cięż. właściwy = 0,8, waży 2,8 g. Ciężar właściwy cukru $d = 5{,}6 : (5{,}6 - 2{,}8) \times 0{,}8 = 1{,}6$.

5. Zastosowanie. Ciężar właściwy stosuje się często w obliczeniach i dochodzeniach praktycznych. Wiedząc np. ciężar właściwy ciała i jego wymiary albo objętość, można obrachować, ile ciało waży; jest to jedyna droga do określenia mas bardzo dużych, niemożliwych do zważenia, jak: mury, słupy, ciecze w zbiornikach i t. p.

Poza tym z ciężarów właściwych można dojść składu ilościowego mieszaniny dwu płynów, zawartości metalów w stopie, nawet w wyrobach gotowych. Ostatni ten rachunek daje wynik mniej ścisły, ze względu na pewne zmiany objętości przy stapianiu ciał z sobą, mieszaniu i rozpuszczaniu.

Niech ciężar wł. stopu = d, a metalów składowych d_1 i d_2; chodzi o oznaczenie stosunkowej ilości metalów w stopie, t. j. stosunku ich wag = $= p_1 : p_2$.

Zważywszy, iż we wzorze $d = p : v$ waga stopu $p = p_1 + p_1$, a objętości stopu $v = v_1 + v_2$, otrzymamy $d = (p_1 + p_2) : (v_1 + v_2)$.

Z podstawienia $v_1 = \frac{p_1}{d_1}$ i $v_2 = \frac{p_2}{d_2}$ wypada

$$d = (p_1 + p_2) : \left(\frac{p_1}{d_1} + \frac{p_2}{d_2}\right), \text{ skąd ostatecznie}$$

$$\frac{p_1}{p_2} = \frac{d_1}{d_2} \times \frac{d - d_2}{d_1 - d}.$$

Przykłady. 1) Ile czystego złota i srebra zawierają monety złote, mające ciężar właściwy $d = 17{,}8$?

Ciężar wł. złota $d_1 = 19{,}3$, srebra $d_2 = 10{,}5$; zatym

$$\frac{p_1}{p_2} = \frac{19{,}3}{10{,}5} \times \frac{17{,}8 - 10{,}5}{19{,}3 - 17{,}8} = 9.$$

Odp. Monety mają 9 razy tyle złota, co srebra, t. j. 90% złota i 10% srebra.

2) Ile waży deska 10 m długości, 24 cm szerokości i 5 cm grubości, jeżeli ciężar właściwy drzewa = 0,6?

Odp. Objętość deski = $1000 \times 24 \times 5 = 120\,000$ cm³.

Ze wzoru na wagę ciała (§ 6, Nr. 3) wypada

waga deski = $120\,000 \times 0{,}6 = 72\,000$ g = 72 kg.

3) Jaką ma objętość rzeczywistą węgiel kamienny, w 1 korcu 6-pudowym = 100 kg, skoro ciężar wł. węgla = 1,5?

Odp. Ze wzoru na objętość węgiel zajmuje $100\,000 : 1{,}5 = 66\,666$ cm³ = $= 66\frac{2}{3}$ dm³, czyli mniej więcej połowę objętości korca, resztę zapełnia powietrze. Mianowicie korzec = 32 garnce, garniec = 4 kwarty = 4 litry = = 4 dm³, czyli korzec = 128 dm³, w czem węgiel zajmuje tylko $66\frac{2}{3}$ dm³.

4) Jaki jest ciężar właściwy spirytusu, jeżeli w butelce $\frac{1}{2}$-litrowej spirytus waży 400 g?

Odp. Ze wzoru na ciężar wł. $400 : 500 = 0{,}8$.

Ciężary właściwe = gęstości ciał stałych i płynnych (woda = 1).

Tabelka podaje liczby średnie z wielu oznaczeń.

Iryd	22,4	Djament	3,5
Platyna	21,5	Grafit	2,1
Złoto	19,3	Szkło zwykłe (kron)	2,6
Ołów	11,3	Szkło ciężkie (flint)	3,6
Srebro	10,5	Mika	3,0
Miedź	8,9	Porcelana	2,2
Mosiądz	8,4	Kość słoniowa	1,9
Nikiel	8,7	Siarka	2,0
Bronz	8,8	Cukier	1,6
Stal	7,7	Ebonit (kauczuk twardy)	1,15
Żelazo kute	7,8	Kauczuk miękki	0,93
Żelazo lane	7,2	Stearyna	0,97
Cynk	7,1	Wosk	0,97
Cyna	7,3	Lód	0,92
Glin (aluminium)	2,6		
Magnez	1,7	Korek	0,24
Sód	0,98	Drzewo sosnowe	0,5
Potas	0,87	„ dębowe	0,9
		„ topolowe	0,36
Bazalt	3,0	„ brzozowe	0,6
Granit	2,8	Heban	1,26
Kwarc	2,7		
Gips	2,3	Eter	0,72
Marmur	2,7	Benzyna	0,70
Beton	2,5	Terpentyna	0,87
Wapno (palone)	2,6	Oliwa	0,92
Cegła	1,6	Nafta	0,80
Piaskowiec	2,3	Alkohol	0,79
Sól zwykła	2,2	Woda morska	1,026
		Gliceryna	1,26
Węgiel kamienny	1,4	Kwas siarczany	1,84
Koks	0,5	Chloroform	1,50
Węgiel do lamp elektr.	1,6	Rtęć	13,6

Zadania.

1. Ile waży:

a) fura żwiru objętości 1 m^3? Odp. 2000 kg.

b) płyta marmurowa, długa na 80 cm, szeroka 50 cm i gruba 2,5 cm? Odp. 27 kg.

c) mur na 5 m długi, 4 m wysoki i 50 cm gruby? Odp. 1700 kg.

d) lina miedziana o przekroju 2 cm^2 i długości 2 km? Odp. 3560 kg.

e) dach żelazny 20 m długości przy 8 m szerokości, z blachy na 1 mm grubej? Odp. 1232 kg.

2. Wyznaczyć objętość:

a) klucza żelaznego wagi 77 g? Odp. 10 cm^3.

b) młota żelaznego, wagi 1 kg? Odp. 130 cm^3.

c) 50 kg nafty? Odp. 62,5 litra.

d) bryły złotej, wagi 500 g? Odp. 25,9 cm^3.

e) 100 kg rtęci? Odp. 7,355 litra.

3. Plac Teatralny w Warszawie ma powierzchni około 1 hektara (10000 m^2); ile waży woda deszczowa, spadła na wysokość 5 mm? Odp. 50000 kg.

4. Nad brzegiem morza wykopano rów szeroki i wpuszczono doń 80 m^3 wody morskiej; ile pozostanie soli, gdy się woda ulotni? Owp. 2080 kg.

5. Basztę, wysoką na 100 m, wymurowano z cegły; jakie ciśnienie wywiera baszta na podstawę? Odp. 16 kg/cm^2.

ROZDZIAŁ II.

MECHANIKA OGÓLNA

CIAŁ STAŁYCH.

A) SIŁY CZĄSTECZKOWE.

§ 7. Budowa materji.

1. Stany skupienia. Przy całej rozmaitości materji w przyrodzie, bywa ona tylko w trojakiej postaci zewnętrznej, czyli trojakim stanie skupienia: stałym, płynnym albo lotnym. W danych warunkach materja zwykle istnieje w jednej tylko postaci; niewiele materji występuje w dwojakim stanie jednocześnie. Np. kamienie, metale, sól, drzewo są materjami stałymi lub *ciałami stałymi*; woda, oliwa, nafta stanowią *płyny* czyli *ciecze*; powietrze, wyziewy kominowe stanowią *materje lotne* czyli *gazy*. Do materji lotnych zalicza się też *para*, powstająca z wody, spirytusu, nafty i t. p. Do materji, występujących w dwu postaciach jednocześnie, należą ciecze w naczyniach otwartych lub niepełnych, np. woda, nad którą unosi się niewidzialnie *) jej postać lotna czyli para, podobnież benzyna i jej para, eter, spirytus.

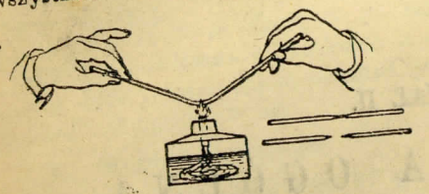
Za ogrzaniem dość silnym, jako też za oziębieniem, materje mogą przechodzić z jednego stanu w drugi, a nawet i w trzeci; np. siarka od gorąca staje się płynną, wreszcie zamienia się na parę; gazowy dwutlenek węgla można zamrozić na ciecz, a tę na ciało stałe.

Odróżniamy ciała stałe po tem, że mają swoistą postać i objętość. Płyn musi być zawarty w naczyniu, zamykającym go ze wszech stron z wyjątkiem wierzchu, przybiera więc postać naczynia, wymuszoną. Gaz trzeba zamknąć w naczyniu całkowicie, inaczej rozchodzi się na wszystkie

*) Należy zaznaczyć niewidzialność pary i odróżniać ją od oparów (kłębów), powstających ze skroplenia pary.

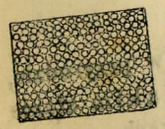
strony, brak mu więc własnej postaci i objętości; mówiąc np. o objętości powietrza, rozumiemy objętość sztucznie mu nadaną, jako to we flaszce, w pęcherzu.

Niektóre materje istnieją już w naturze, zależnie od warunków, we wszystkich trzech stanach, np. woda, lód i para wodna; inne zaś okazują jakby stan przejściowy między stałym a płynnym, np. wazelina, smoła szewcka, za ogrzaniem zaś wosk, lak, szkło; na tej ostatniej własności polega np. zginanie i wyciąganie rurek szklanych (rys. 16) oraz wydymanie i formowanie szkła.



Rys. 16.

2. Cząstki (molekuły, drobiny). Oczywistą własnością każdej materji jest *podzielność*. Najdrobniejsze pyłki, na jakie możemy rozetrzeć materję, można w wyobraźni podzielić dalej, na części jeszcze mniejsze, które wszakże nie mogą być nieskończenie małe, gdyż wtedy materja przestałaby istnieć. Zresztą wyjaśnienie wielu zjawisk i własności materji zmusza do założenia, że podzielność ma pewną granicę, mianowicie prowadzi do rozdrobnienia materji na *cząstki* (molekuły); cząstka stanowi najmniejszą, niedostrzegalną, niepodzielną środkami fizycznymi odrobinę materji. Przyjmujemy, że cząstka ma kształt kulisty i wielkość niezmienną: nie może się rozszerzyć, skurczyć, wyciągnąć, spłaszczyć; wogóle nie daje się naruszyć zewnętrznie. Przypuścić nadto musimy, że cząstki nie stykają się z sobą, ale utrzymują się w pewnych od siebie odległościach, oczywiście, nadzwyczaj małych, siłą wzajemnego przyciągania czyli spójności (§ 8, art. 1), oraz że cząstki każdego ciała są obdarzone ruchliwością w pewnych granicach. Budowę taką przedstawia obrazowo rys. 17 w powiększeniu wielomiljonowym.

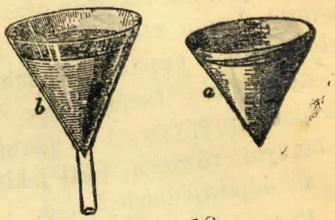


Rys. 17.

Wolne odstępy między cząstkami, czyli *pory* międzycząstkowe tłumaczą zdolność ciał kurczenia się za oziębieniem lub naciskiem, czyli *ściśliwość*, jako też *rozszerzalność* ciał za ogrzaniem; tu i tam zmienia się objętość ciała skutkiem zbliżania się lub oddalania cząstek, które same są niezmienne. Istnieniem pór objaśniamy *przenikanie* się wzajemne ciał, które się objawia w rozpuszczaniu ciał stałych w cieczach, mieszaniu się cieczy i gazów, pochłanianiu gazów, zabarwianiu, nabieraniu woni i t. p.

W ciałach stałych oprócz pór międzycząstkowych istnieją często luki większe, tak iż przepuszczają ciecze i gazy, np. mur, kamienie, cukier, drzewo, skóra, bibuła; własność taką zowiemy *dziurkowatością*.

Zastosowanie dziurkowatości: sączenie przez bibułę, którą wyłożono lejek (*filtry* chemiczne i apteczne, rys. 18), sączenie przez węgiel (filtry domowe), przez żwir i piasek (filtry miejskie), celem oczyszczenia płynów, najczęściej wody, od mętów, t. j. unoszących się w cieczy pyłków stałych; materje rozpuszczone, np. sole, cukry, barwiki, przechodzą przez filtry (dlaczego?).



Rys. 18.

O podzielności ciał, a stąd o niesłychanie drobnych wymiarach cząstek dają pojęcie materje pachnące, np. piżmo, którego miljonowa część miligrama już daje się uczuć w zapachu, jako też barwiki, np, fuksyna, której okruch ledwie widoczny zabarwia wodę w objętości dużej karafki. Najwybitniej wszakże oznajmia się podzielność we własnościach niedawno wykrytego pierwiastka radu, którego miljardowa część miligrama już zdradza się przez rozbrajanie ciał naelektryzowanych.

Obliczenia fizyki matematycznej podają średnicę cząstek w przybliżeniu na $\frac{1}{10\,000\,000}$ mm, a liczbę cząstek gazu w objętości 1 cm^3 na 24 tryljony, t. j. 24.10^{18}. Odstępy międzycząstkowe w gazach, jak łatwo sprawdzić z danych powyższych, muszą być bardzo obszerne względnie do wymiaru cząstek (rys. 16 uzmysławia budowę ciała stałego).

3. Atomy. Cząstki materji, dzięki środkom chemicznym, mogą się rozpadać na *atomy*; te ostatnie są już i tą drogą niepodzielne. Atomy zwykle nie istnieją w stanie wolnym, ale wkrótce po swem powstaniu z jakiejś cząstki łączą się między sobą w nową cząstkę; w ten sposób tworzą się nowe materje.

Dążność atomów do wzajemnych połączeń nazywa się *powinowactwem chemicznym*, przyczem dany atom łączy się z atomami jednej materji łatwiej, niż z innymi, jakby wybierał między niemi; stąd rozróżnia się powinowactwo silniejsze, słabsze lub obojętność chemiczną.

Badania chemiczne prowadzą do ogólnego, zasadniczego wniosku, że przy wszelkich zmianach ze współdziałania jednych materji powstają inne, atomy grupują się rozmaicie, lecz sama przez się, w ilości swej czyli masie

> materja jest niezniszczalną.

(Lavoisier 1774)

Najnowsze poglądy na istotę materji prowadzą do wniosku, że atomy mogą się niekiedy w szczególny sposób rozpadać samorzutnie, t. j. niezależnie od środków zewnętrznych, na t. zw. *elektrony* (pt.). Objaw ten stanowi spółczesny przedmiot dociekań chemji fizycznej, a w fizyce daje punkt wyjścia do nowych poglądów na istotę elektryczności, promieniowania i in., roztrząsanych w końcu niniejszej książki.

4. Eter powszechny. Pomiędzy cząstkami materji, zarówno jak pomiędzy bryłami niebieskimi, przypuszczamy istnienie pewnego niepochwytnego, nieważkiego ośrodka, zwanego *eterem* (powszechnym, kosmicznym). Istota eteru nie da się określić; wyobrażamy go sobie jako coś złożonego z cząstek tak subtelnych, że eter nie zdradza jakiejkolwiek gęstości, nie tamuje więc ruchu ciał, ani ich cząstek; zarazem jest doskonale sprężysty, t. j. poruszone cząstki eteru podlegają drganiom nieustannym, równym, póki jakiś nowy czynnik nie nada znów cząstkom drgań odpowiednich i t. d.

Eter przenika nawskroś wszelkie ciała, wypełnia próżnię wszechświata; można rzec obrazowo, że cały świat jest „materją, zanurzoną w eterze".

Na hipotezie eteru spoczywa teorja całej spółczesnej fizyki szczegółowej; liczba i rodzaj drgań eteru stanowi o istocie światła i wogóle promieniowania, elektryczności, magnetyzmu.

Jakkolwiek hipoteza eterowa, jak zresztą każda inna, nie uchodzi bynajmniej za pewnik naukowy, panuje ona dotąd w nauce, jako najlepszy i najogólniejszy sposób objaśnienia wielkiej dziedziny zjawisk przyrody. Spory co do istnienia eteru nie dają żadnego wyniku; nauce nie chodzi o to, czy eter istnieje: „wszystko dzieje się tak, jak gdyby był".

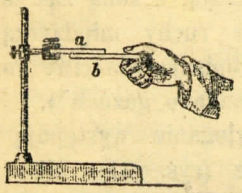
Konieczność przyjęcia pewnego choćby nieokreślonego środowiska wynika nie tylko z właściwości naszego umysłu, który nie pojmuje nicości, ale nastręcza się też na skutek rozważań fizycznych. Przenoszenie energji mechanicznej, np. uderzenia, głosu, wymaga zawsze pośrednictwa pewnej materji oraz pewnego czasu; byłoby więc niedorzecznością przypuścić, że przenoszenie innych rodzajów energji, jak światło, elektryczność, które można wytworzyć praktycznie kosztem energji mechanicznej, jako to obracaniem dynamomaszyny, może się obejść bez żadnego pośrednictwa i nie trwa wcale, ale polega na jakimś „działaniu z odległości". Jedynie tylko nierozwiązana jest dotąd sprawa co do udziału eteru w przenoszeniu grawitacji (pt.) czyli przyciągania wzajemnego ciał niebieskich.

§ 8. Spójność, przyleganie, sprężystość.

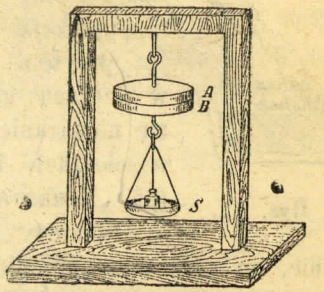
1. Spójność (kohezja) jest to siła wzajemnego przyciągania między cząstkami tej samej materji. Największą spójność mają ciała stałe, bardzo nieznaczną płyny, a w gazach spójność nie daje się zauważyć bezpośrednio.

Siła spójności działa tylko w odległościach znikomo małych, jakimi są właśnie odstępy międzycząstkowe. Z tego powodu kawałki ciała rozbitego, np. szkła, kamienia, trzymają się słabo po złożeniu, powierzchnie ich bowiem nie dadzą się tak przycisnąć, jak były przed rozłączeniem.

Ciała o powierzchni starannie wygładzonej, np. płytki szklane doszlifowane, przystają dosyć mocno do siebie, tak iż do oderwania potrzeba wyraźnego wysiłku (rys. 19). Siłę spójności można ocenić zapomocą ciężaru, jak wskazuje rys. 20.



Rys. 19.



Rys. 20.

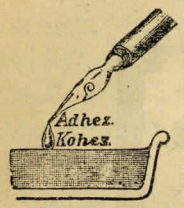
Najlepiej zachodzi spojenie ciał miękkich, jak: kit, glina mokra, ciasto, albo rozmiękczonych chwilowo przez ogrzanie, np. wosk, żelazo, platyna; na tym polega spawanie metalów w stanie rozżarzonym.

Z powodu silnej spójności, ciała stałe posiadają objętość i postać określoną. Płyny czyli ciecze zdradzają słabą spójność w tworzeniu kropel; w większej jednak ilości nie mają własnej postaci i przybierają kształt naczynia, odznaczają się bowiem ruchliwością cząstek. Gazy nie posiadają ani własnej objętości, ani postaci, lecz wypełniają przestrzeń bez granic, czyli są rozprężliwe.

Wyjaśnienie. Przyjmujemy, że cząstki wszelkich ciał są w ciągłym ruchu drgającym. W ciałach stałych ruch ten jest słaby, tak iż przewagę ma siła spójności; ciało przy rozrywaniu lub gnieceniu stawia duży opór. W płynach ruch cząsteczkowy równoważy mniej więcej spójność, tak iż cząstki zmieniają poprzednie położenia, przesuwają się między sobą, czyli są obdarzone ruchliwością, nie odrywają się wszakże od całości. W gazach siła ruchu drgającego przemaga siłę spójności, cząstki znajdują się poza obrębem działania innych cząstek i posiadają ruch postępowy; cząstki uderzają o ściany naczynia, sprawiając ciśnienie, zwane prężnością, a z otwartego naczynia uchodzą swobodnie.

2. Przyleganie (przyczepność, adhezja) jest to przyciąganie między cząstkami dwu rozmaitych materji, na powierzchni zetknięcia. Siła tego przyciągania działa, równie jak spójność, w odległościach znikomych; wzrasta ona w miarę przyciśnięcia oraz zwiększenia powierzchni ciał zetkniętych, jak przekonać się można doświadczeniem z płytkami (rys. 17); wyrobione z różnych materjałów, np. szkła i stali, płytki przystają do siebie tym silniej, im są gładsze, większe i bardziej ściśnięte.

Przyleganie ciał stałych zdradza się powszechnie przez to, że jedno ciało pozostawia ślady swej materji na innym, t. j. gdy smoli, brudzi, osiada. Płyny okazują przyleganie między sobą, skoro się przenikają wzajemnie czyli mieszają, a przyleganie do ciał stałych, skoro zwilżają ich powierzchnię albo je rozpuszczają. Gazy przylegają do ciał stałych, ulegając przytem szczególnemu zgęszczeniu lub skropleniu; w cieczach gazy się rozpuszczają, z sobą zaś mieszają się nieograniczenie. Powyższe ruchy międzycząstkowe w cieczach i gazach bliżej opisują właściwe rozdziały (pt. „Nauka o płynach" i „Nauka o gazach").



Rys. 21.

Niekiedy spójność i przyleganie występują równocześnie, np. przy maczaniu pióra w atramencie (rys. 21), albo między płytkami szklanymi (rys. 20), skoro je zwilżono wodą lub inną cieczą; płytki zwilżone trzymają się daleko mocniej, niż suche.

Przykłady i zastosowania. Pisanie ołówkiem, kredą, atramentem. — Malowanie. — Klejenie, kitowanie, lutowanie. — Osad lodowy na szybach (zamróz). — Powłoka metalowa luster. — Złocenie, srebrzenie, niklowanie. — Kurz na ścianach, sadze w kominie. — Zlepieńce skalne (konglomeraty).

Przenikanie się wzajemne ciał stałych stwierdzono niedawno doświadczeniem (Roberts-Austen 1896): pod bryłą ołowiu położono blaszkę złota i pozostawiono tak przez miesiąc, przy miernem ogrzaniu (do 100° C.); oba ciała nie tylko się złączyły, ale w masie ołowiu wykryto zawartość złota w odległości kilku cm od miejsca zetknięcia.

3. Sprężystością ciał nazywa się zdolność powracania do pierwotnego kształtu lub objętości, po usunięciu siły, która sprawiła to odkształcenie.

Odróżniamy *sprężystość postaci*, polegającą na zmianach kształtu ciała, i *sprężystość objętościową* czyli ściśliwość, polegającą na zmianach objętości pod wpływem sił zewnętrznych. Pierwsza cechuje wyłącznie ciała stałe, druga jest właściwą wszelkim ciałom, wyróżnia zaś płyny i gazy. Tak np. gumę, drzewo, stal można przez nacisk odpowiedni nie tylko zmniejszyć objętość, ale i odkształcić, czyli nadać kształt inny: zgiąć, wyciągnąć albo skręcić; woda zaś, oliwa, powietrze, gaz świetlny podlegają pod naciskiem tylko zmniejszeniu objętości, gdyż postaci nie posiadają.

---

§ 9. Własności ciał stałych.

1. Cechy ogólne. Ciała stałe mają postać i objętość określoną; ich bowiem siły międzycząstkowe utrzymują cząstki w stałej odległości oraz w stałym położeniu. Dopiero pod wpływem silniejszych działań mechanicznych spójność zostaje pokonana; ciała ulegają wtedy zmianom: uszkodzeniu powierzchni, zmianie postaci, rozerwaniu na części.

Rozróżniamy stąd kilka własności poszczególnych: twardość, podatność, kruchość, sprężystość, wytrzymałość.

Budowa wewnętrzna ciał tłómaczy nieraz różnice w ich własnościach; ciała podatne, czyli plastyczne okazują na odłamie budowę włóknistą, ciała kruche i twarde zwykle okazują budowę ziarnisto-krystaliczną.

2. Twardość pojmujemy jako opór ciała przeciwko zrysowaniu go innym ciałem. Ciało twardsze pozostawia ślady mniej lub więcej głębokie na powierzchni ciała miększego. Najtwardszym z ciał naturalnych jest djament, ze sztucznych karborund (węglik krzemu), które rysują wszystkie inne ciała. Metale w stanie zupełnie czystym są zwykle dość miękkie, nabierają zaś twardości przez stopienie z innymi metalami lub domieszkę ciał obcych, jak: węgla, krzemu, fosforu, nieraz bardzo nieznaczną, np. złoto i srebro jubilerskie, stal.

Duży wpływ na twardość ma ogrzewanie ciał; za ogrzaniem twardość się zmniejsza, nieraz bardzo znacznie. Natomiast nagłe ostudzenie pewnych ciał np. stali, szkła, które przedtym silnie rozżarzono, potęguje ich twardość.

Przykłady. Kucie żelaza na gorąco. — Noże, igły, nożyczki tępią się prędko w użyciu, skoro się je rozgrzewa. — Hartowanie stali w narzędziach ostrych, jak świdrach, pilnikach, brzytwach, igłach i t. p. — Odpuszczanie stali, t. j. rozżarzenie i powolne studzenie stali, przeznaczonej do obrabiania. — *Łzy batawskie*, *flaszeczki bolońskie* ze szkła hartowanego: nagłe oziębienie szkła rozżarzonego przez zanurzenie w wodzie sprawia, że powierzchnia twardnieje mocno, ale zarazem ściąga się i ciśnie na wnętrze, przez co wytwarza napięcie powierzchowne; stąd za uszkodzeniem powierzchni, np. zadrapaniem, albo nadłamaniem, cała masa szkła pęka i rozsypuje się z trzaskiem.

3. Podatność albo **plastyczność** jest to zdolność ciał do zmiany postaci, bez rozerwania, przyczym ciało zatrzymuje nadaną mu postać. Rozróżniamy poszczególne objawy podatności, zależnie od rodzaju traktowania ciał: można ciała gnieść, uderzać, wyciągać, zginać, stąd zowiemy je plastycznymi w ściślejszem znaczeniu (gniotkimi), np. kit, wosk, glina, bądź kowalnymi, jak wszystkie prawie metale, ciągliwymi, jak metale, szkło rozgrzane, giętkimi, np. ołów, złoto, szkło rozgrzane.

W ciałach przeważa bądź jeden z tych rodzajów podatności, np. glina jest głównie plastyczna, albo też bywają one podatne wszechstronnie, np. złoto jest bardzo kowalne, ciągliwe i giętkie.

Ogrzewanie zwiększa podatność ciał; osłabia ją zaś obrabianie mechaniczne, jak kucie, zginanie, skręcanie; stąd np. drut zakręcony, a następnie rozprostowany, łatwo się łamie. Podatność zależy też od wielkości siły, działającej na ciało, i od czasu jej działania; np. wosk zimny, uderzony mocno, rozłupie się, a naciskany zwolna ugniata się; laska laku, położona poziomo, tak iż wspiera się końcami, wygina się po dłuższym czasie pod wpływem własnego ciężaru.

Przykłady. Złoto daje się wyklepać na płatki o grubości 0,0001 mm, czyli 700 razy cieńsze od papieru książkowego. — Z platyny wyrabiają druty o średnicy 0,00005 mm, czyli kilkadziesiąt razy cieńsze od włosa, niewidoczne dla gołego oka.

4. Kruchość jest własnością przeciwną podatności; ciało kruche pęka przy usiłowaniu jakiejbądź zmiany w jego postaci, t. j. przy zginaniu, naciskaniu, wyciąganiu, skręcaniu, np. szkło, porcelana, węgiel, żelazo lane (surowiec). Kruchymi są zazwyczaj ciała twarde, ciała zaś miękkie są zwykle podatne.

Kruchość ciał zmniejsza się pod wpływem ciepła, nieraz bardzo znacznie; nadto zależy ona od grubości wyrobu. Np. szkło w postaci szyby lub szklanki jest nader kruche, wyciągnięte zaś w postaci nitki daje się skręcać i splatać; stąd wata szklana, tkaniny szklane. Węgiel w kształcie włókna cienkiego jest sprężysty, nie pęka mimo drgań raptownych, jak np. w lampkach elektrycznych żarowych. Inne przykłady: wełna drzewna, sznury i liny z cienkich drutów stalowych, miedzianych.

5. Sprężystość w ciałach stałych polega na zmianach kształtu ciała pod wpływem sił zewnętrznych (§ 8, art. 3), mianowicie rozciąganiu, zgnieceniu, zginaniu lub skręcaniu ciała, przyczym ciała stałe różnią się od siebie bardzo znacznie co do stopnia sprężystości. Do ciał najbardziej sprężystych należy kauczuk (guma), gąbka, trzcina, kość słoniowa, stal; mniej drzewo, papier, szkło; niektóre ciała nie zdradzają prawie sprężystości, np. wosk, ołów, glina wilgotna.

Sprężystość w ciałach stałych zawsze jest niedoskonała; pod wpływem siły nadmiernej ciało pęka, wyciąga się, lub zgina się trwale, a nadto sprężystość zmienia się z biegiem czasu od małego, lecz trwałego nacisku lub ciągnienia, tak iż trzeba coraz mniej siły do odkształcenia ciał, np. sprężyny w zegarach i wagach, stalówki, resory.

Granicą sprężystości nazywa się najwyższe odkształcenie, po którem ciało powraca jeszcze do dawnej postaci. Ilościowo granica sprężystości wyraża się w *kg/mm²*; jest to największy ciężar w kg, jaki można zawiesić na pręcie o przekroju 1 mm², nie nadając mu trwałego wyciągnięcia; np. dla stali wynosi on do 60 kg/mm², miedzi 12, ołowiu ¼ kg/mm².

Doświadczenie. Skoro sprężynę (rys. 25) obciąża się kolejno 1, 2, 3... gramami, powraca ona po zdjęciu ciężarów do poprzedniej długości; po obciążeniu 20 g sprężyna zachowa jeszcze długość pierwotną, po obciążeniu np. 25 g wydłuży się na stałe; zatem 20 g jest tu granicą sprężystości (oczywiście, w grubym przybliżeniu, pomiary bowiem tego rodzaju bynajmniej do ścisłych nie należą).

Odkształcenie jest proporcjonalne do ciśnienia (prawo Hooke'a, 1679); rozumie się tutaj, że odkształcenie nie przekracza granicy sprężystości. Tak więc, przy wydłużaniu pręta zapomocą ciężaru, przy zginaniu pręta, skręcaniu lub uciskaniu: ciśnienie $p = E \cdot$ odkształcenie

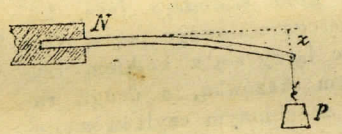
1) wydłużenie pręta jest proporcjonalne do obciążenia,
2) wygięcie " " " " "
3) kąt skręcenia " " " " "
4) skrócenie " " " " "

Doświadczenie 1 (rys. 22). Jeżeli ciężar P, zawieszony na drucie żelaznym $M_1 M_2$, wynosi 3 kg, a wydłuża drut o $d = 0{,}02$ mm, to ciężar 6 kg wydłuży tenże drut o 0,04 mm, ciężar 9 kg o 0,06 mm i t. d. aż do granicy sprężystości.

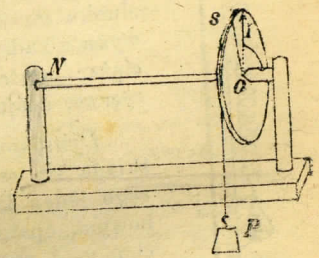
Doświadczenie 2 (rys. 23). Ciężar P wisi na wolnym końcu pręta, którego drugi koniec N umocowano poziomo, ciężar nagina pręt na dół, przyczem niewielkie wygięcie z, t. zw. *strzałkę zgięcia*, mierzy się w mm pionowo. Skoro ciężar $P = 5$ kg i sprawia wygięcie $z = 1{,}5$ mm, to ciężar 10 kg da wygięcie 3 mm, ciężar 20 kg da wygięcie 6 mm i t. d.



Rys. 22
Wydłużenie pręta.



Rys. 23. Wygięcie.



Rys. 24. Skręcenie.

Doświadczenie 3 (rys. 24). Pręt umocowano poziomo w ten sposób, że koniec N tkwi nieruchomo w oprawie, na drugim zaś końcu osadzono kółko, obracające się na osi O. Ciężar P, uczepiony na obwodzie, obraca kółko, a zarazem skręca pręt o kąt s względem pierwotnego położenia, zaznaczonego strzałką I. Skoro ciężar $P = 2$ kg wywołuje skręcenie $s = 15^0$, to ciężar 4 kg sprawi skręcenie 30^0, ciężar 6 kg sprawi skręcenie 45^0 itd.

Spółczynnik sprężystości przy wydłużeniu (spółczynnik wydłużenia) jest to wydłużenie pręta o długości 1 m i przekroju 1 mm² za obciążeniem 1 kg; wyraża się ułamkiem bardzo małym, np. dla żelaza i stali około $\frac{1}{20000}$, miedzi $\frac{1}{12000}$, ołowiu $\frac{1}{1800}$. Odwrotna wartość spółczynnika λ stanowi *moduł sprężystości* E:

$$\text{spółczynnik sprężystości } \lambda = \frac{1}{E} = \text{odwrotność modułu.}$$

Wielkość wydłużenia (rys. 22). Skoro P kg działa na pręt o przekroju q mm², na 1 mm² przypada stosunek P/q, zwany *napięciem*. Wydłużenie d rośnie wraz z ciężarem, zatem i z napięciem P/q, oraz z długością l pręta; przeto

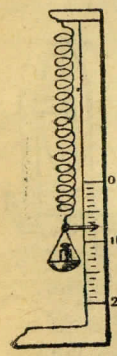
$$\text{wydłużenie } d = \frac{1}{E} \cdot l \cdot \frac{P}{q} \text{ metrów} = \begin{cases} \text{spółczynnik spręż.} \\ \times \text{ długość} \\ \times \text{ napięcie.} \end{cases}$$

To samo dotyczy skrócenia pręta, które stanowi ujemne wydłużenie.

Przykład. Słup żelazny, wysoki na 4 m, o przekroju 200 cm², skróci się pod ciężarem 10 ton o $d = \frac{1}{20000} \cdot 4 \cdot \frac{10000}{20000} = \frac{1}{10000}$ m $= \frac{1}{10}$ mm.

Znaczenie teoretyczne modułu sprężystości. Skoro we wzorze na wydłużenie założymy $d = l$, to $E = P/q$, zatem moduł sprężystości E jest to napięcie w kg/mm², któreby wydłużyło pręt o całą jego długość. W rzeczywistości ciała nie wytrzymują takiego napięcia.

Zastosowanie sprężystości. *Waga sprężynowa* Jolly'ego (rys. 25) składa się z drutu, skręconego spiralnie i zawieszonego u góry słupka pionowego; dolny koniec sprężyny ma skazówkę i szalkę, a na słupku mieści się podziałka na gramy i ich części. Waga powyższa nadaje się zwłaszcza do doświadczeń (ważenie zwykłe, ciężar właściwy, siły elektryczne i magnetyczne, spójność, przyleganie cieczy i t. p.).



Rys. 25. Waga sprężynowa (Jolly).

Dynamometr albo *siłomierz* (rys. 26) składa się ze zgiętego stalowego pręta, którego jeden koniec łączy się z kółkiem trybowym, opatrzonym skazówką, a drugi, ruchomy, z prętem zazębionym czyli krémaljerą b. Ciężar lub inna siła, jaką mamy zmierzyć, działa na haczyk c.


Rys. 26. Dynamometr.

Podziałkę obu przyrządów sporządza się oraz sprawdza się przez zawieszanie wiadomych ciężarków (objaśnić). Istotnej różnicy zresztą między tymi przyrządami niema: przyrząd rys. 25 może służyć do mierzenia odpowiednich sił, przyrząd zaś rys. 26 do ważenia.

Inne zastosowania. Sprężyny stalowe w materacach; resory powozowe; sprężyny poruszające zegary ścienne i kieszonkowe.—Obręcze gumowe do rowerów, powozów, samochodów; obcasy gumowe; piłki.—Kule bilardowe z kości słoniowej lub celuloidu. — Grzebienie rogowe.—Szpicruty trzcinowe; siedzenia trzcinowe krzeseł.

6. **Wytrzymałość** jest to opór, jaki ciało stawia rozdzieleniu go na części, mianowicie rozerwaniu, złamaniu, ukręceniu, zmiażdżeniu. Wytrzymałość stanowi niejako miarę spójności.

Skoro odkształcenie przekroczy granicę sprężystości, ciało trwale się wydłuża, zgina, skręca lub ściska, aż wreszcie pęka; powiadamy wtedy, że odkształcenie przekroczyło wytrzymałość ciała, a właściwie *granicę wytrzymałości*; jest ona znacznie wyższa od granicy sprężystości.

Ilościowo wyraża się wytrzymałość na zerwanie, czyli wytrzymałość bezwzględna, wielkością ciężaru w kg, potrzebnego do zerwania pręta o przekroju 1 mm². Wytrzymałość bezwzględna jest proporcjonalna do przekroju pręta, niezależnie od jego postaci; np. druty lub belki o przekroju 2, 3, 4... razy większym są 2, 3, 4... razy wytrzymalsze.

Wytrzymałość na złamanie, czyli *wytrzymałość względna* jest proporcjonalna do szerokości pręta, zależy jednak od postaci przekroju. Wytrzymałość na zgniecenie i ukręcenie zależy również nie tylko od wielkości przekroju, ale i od jego postaci.

Spółczynnik wytrzymałości stanowi napięcie, które sprawia zerwanie pręta; wyraża się ciężarem w kg na 1 mm² przekroju. Ilościowo wynosi to samo, co wytrzymałość bezwzględna:

$$\left.\begin{matrix}\text{spółczynnik wytrzymałości} \\ \text{(wytrzymałość bezwzględna)}\end{matrix}\right\} W = \frac{P}{q} = \frac{\text{ciężar w kg}}{\text{przekrój w mm}^2}.$$

Pewność techniczna stanowi dozwolone największe obciążenie, przy użyciu lin, maszyn, wznoszeniu budynków i t. p. Wynosi dla metalów zaledwie $\frac{1}{6}$, dla drzewa około $\frac{1}{10}$ wytrzymałości bezwzględnej, a to gwoli bezpieczeństwa, gdyż wytrzymałość nie da się ściśle obliczyć, a nadto słabnie wskutek wstrząśnień, ogrzewania, wpływów atmosferycznych, jak rdzewienie, butwienie, paczenie się i t. p.

Wpływ postaci na wytrzymałość względem złamania, zgniecenia i ukręcenia. Rury są wytrzymalsze niż pręty i belki przy tej samej wielkości przekroju; użytek w rowerach, aeroplanach, wiązaniach mostowych. — Szyna kolejowa i belkom nadaje się przekrój wąski a wysoki, w kształcie litery I, gdyż wytrzymałość względna wzrasta niepomiernie z wysokością (prawie jak 3-a potęga wysokości, a tylko 1-a potęga szerokości).— Słupy i podpory wydrążone opierają się lepiej skręceniu i zgnieceniu, aniżeli pełne o równym przekroju.—Długie liny i druty mogą ulec zerwaniu już od własnego ciężaru, gdyż z długością rośnie ich ciężar w tym samym stosunku.

Zestawienie sprężystości i wytrzymałości.

Materje	Wytrzymałość na zerwanie	Granica sprężystości	Moduł E sprężystości
stal	80 kg/mm²	60 kg/mm²	25000
żelazo kute	60 „	30 „	20000
miedź	40 „	12 „	12000
ołów	2 „	$\frac{1}{4}$ „	1800
drzewo dębowe	11 „	3 „	700
sznur konopny	10 „	—	—

Wytrzymałość na zgniecenie.

żelazo lane	7500 kg/cm²	granit	1600 kg/cm²
cłów	500 „	piaskowiec	1000 „
drzewo dębowe	600 „	cegła	200 „

Zadania.

1. Lampę zawieszono na lince miedzianej o przekroju 5 mm², a długości 2 m; lampa waży 10 kg, ciężar zaś linki pomija się, jako nieznaczny. Jakiego wydłużenia doznaje linka? Jakiego trzeba obciążenia, aby osiągnąć granicę sprężystości? Jakie obciążenie zerwie linkę?

Odp. ½ mm; 60 kg; 200 kg.

2. Na czterech słupach żelaznych, grubych każdy na 11 cm, o przekroju kwadratowym, spoczywa sklepienie wagi 425 ton. Czy możnaby obciążyć je dodatkowo takim samym ciężarem?

Odp. Nie, gdyż wytrzymałość teoretyczna słupów = 3630 ton, dopuszczalna zaś = ok. 600 ton.

3. Jakim ciężarem można skruszyć cegłę zwyczajną, wymiaru 25 × 12 cm? Odp. 60,000 kg.

4. Jak długa może być lina stalowa, aby się nie zerwała od własnego ciężaru? Odp. Najwyżej do 10,4 km.

B) RUCH JEDNOSTAJNY.

§ 10. Ruch w ogólności.

1. **Ruchem** zowie się zmiana miejsca ciała względem innych ciał, które uważamy za nieruchome.

Gdyby owe ciała rzeczywiście były w spoczynku, możnaby mówić o ruchu *bezwzględnym*. Takich ciał jednak niema w całym wszechświecie, ani wogóle miejsca stałego w przestrzeni, od którego możnaby ruch obliczać. Spotykamy więc tylko ruch *względny*, t. j. ruch jednego ciała względem innych, które są również w ruchu; jeżeli ten ostatni ruch odbywa się wraz z nami, poczytujemy te ciała za nieruchome czyli będące w *spoczynku* (względnym).

Ziemia, drzewa, skały wydają nam się nieruchome, ponieważ się obracają jednocześnie z nami i nie zmieniają miejsca względem siebie; słońce porusza się względem ziemi, drzew, skał i t. p. — Krajobraz, widziany z wagonu, porusza się względem człowieka, siedzącego w wagonie; człowiek i wagon są w spoczynku względem siebie.

2. **Rodzaje ruchu.** Każdy ruch odbywa się wzdłuż pewnej linji, zwanej *torem*; część toru, przebyta przez ciało, nazywa się *drogą*. Ruchy różnią się co do kształtu toru, co do czasu, zużytego na przebycie danej drogi, i co do zależności od innych ruchów lub wpływu ciał obcych. Można więc wyróżnić następujące rodzaje ruchu:

1) *Ruch postępowy*, gdy wszystkie cząstki ciała posuwają się jednakowo prędko i równolegle do siebie, np. bieg pociągu; *ruch obrotowy*, zwany też *kołowym* lub *osiowym*, gdy cząstki krążą dokoła wspólnego punktu lub linji prostej, zwanej *osią*, np. obrót skrzydeł wiatraka.

Ruch postępowy może odbywać się naprzemian, po tej samej linji, w jedną i drugą stronę od danego punktu, i stanowi wtedy ruch *drgający*, np. ruch igły w maszynie do szycia. Połączenie ruchu postępowego z obrotowym wywołuje *toczenie* się ciała, np. kuli w kręgielni.

2) *Ruch prostodrożny* (prostolinjowy), gdy ciało posuwa się ciągle w tym samym kierunku, tor ma postać linji prostej, np. rzut pionowy piłką; *ruch krzywodrożny*, gdy kierunek ruchu ustawicznie się zmienia, a tor wtedy się zakrzywia, np. rzut ukośny piłką.

3) *Ruch jednostajny*, gdy ciało w równych czasach przebywa jednakowe drogi, co np. w przybliżeniu ma miejsce na statku w pełnym biegu; *ruch zmienny*, gdy drogi przebyte w równych czasach są coraz inne, np. na statku wyruszającym lub wpływającym do przystani.

4) *Ruch swobodny*, gdy się odbywa bez żadnej przeszkody, np. spadek kamienia w przestrzeni próżnej; *ruch wymuszony*, skoro inne ciała wpływają na przebieg ruchu, np. staczanie się kamienia po zboczu góry.

5) *Ruch prosty* czyli *pojedynczy*, skoro istnieje tylko jeden powód ruchu, jak to ma miejsce np. dla człowieka, siedzącego w tramwaju, w czasie jazdy; *ruch złożony*, pochodzący z dwu lub więcej naraz powodów, np. ruch człowieka, który chodzi w czasie jazdy tramwaju.

Właściwie wszystkie ruchy na ziemi są złożone, gdyż sama ziemia jest w ruchu; w powyższych określeniach nie uwzględniamy ruchów ziemi. Niema też na ziemi ruchów swobodnych, gdyż ciała napotykają rozmaite tarcia i opory; pomijamy je, kiedy wpływają tylko nieznacznie na ruch ciała. Podobnież określenie ruchu jednostajnego, ruchu prostodrożnego wypada brać względnie, rozumiejąc te ruchy na krótkich odległościach.

Przykłady. Kula, wystrzelona blisko, leci prosto; w większej odległości ujawnia się zakrzywienie jej drogi. — Piłka, wyrzucona do góry, leci coraz wolniej, a wracając ku ziemi, leci coraz prędzej. — Pociąg rusza ze stacji ruchem przyśpieszonym, jakiś czas pędzi jednostajnie, a dojeżdża do stacji następnej ruchem opóźnionym. — Skazówka zegara odbywa ruch obrotowy; waga zegarowa, poruszająca skazówkę, ma ruch postępowy. — Korba maszyny do szycia ma ruch obrotowy, igła ruch postępowy (w ostatnich dwu przykładach istnieje zamiana jednego ruchu na drugi, i przeciwnie).

§ 11. Ruch jednostajny.

1. Jednostajny ruch ma miejsce, gdy ciało w równych czasach przebywa jednakowe drogi.

Droga, przebyta w ciągu jednostki czasu (sekundy, minuty, godziny), zowie się *szybkością* albo *prędkością*.

Ruchu doskonale jednostajnego nie dostrzegamy nigdzie. W przybliżeniu za jednostajny można poczytywać ruch wtedy, gdy ciało w ciągu krótkiego czasu posuwa się z szybkością jednakową; po dłuższym czasie szybkość zawsze zmienia się mniej lub więcej wyraźnie. Przy dłuższych więc ruchach, jak to bywa w rzeczywistości, rozpatrujemy *szybkość średnią*, np.

Kilometrów na godzinę ($^{km}/_{godz}$)		Metrów na sekundę ($^{m}/_{sek}$)	
Piechur	5	Wisła pod Warszawą	0,6
Cyklista	15	Wiatr zwykły	7
Koń w kłusie	12	Wiatr świeży	12
Samochód, jazda zwykła	60	Huragan	40
Pociąg osobowy	40	Koń wyścigowy	15
Pociąg kurjerski	70	Gołąb pocztowy	30
Parowiec zwykły	18	Dźwięk w powietrzu	333
Parowiec pośpieszny	40	Kula karabinowa przy wylocie	700
Torpedowiec	55	Granat dział największych	900
Aeroplan	100	Obrót ziemi na równiku	463

Księżyc dokoła ziemi	1	$^{km}/_{sek}$
Ziemia dokoła słońca	30	„
Elektryczność w drucie telegr.	17 000	„
Światło i fale elektryczne	300 000	„

2. Zależność między szybkością, czasem i drogą przebytą. Jeżeli ciało ma szybkość v (np. metrów na sekundę), to w ciągu czasu t (sekund)

1) droga $s = v \times t$ = szybkość × czas.

Stąd

2) szybkość $v = \frac{s}{t} = \frac{\text{droga}}{\text{czas}}$,

3) czas $t = \frac{s}{v} = \frac{\text{droga}}{\text{szybkość}}$.

Uwaga. *) Wszystkie te wzory należy rozumieć symbolicznie, nie zaś literalnie. A więc wzoru $s = vt$ nie odczytuje się w ten sposób, że „droga równa się szybkości pomnożonej przez czas", ale „droga mierzy się iloczynem liczb, wyrażających szybkość i czas". Wzór $v = s/t$ oznacza, że szybkość mierzy się ilorazem (stosunkiem) liczb, wyrażających drogę i czas. Wzór $t = s/v$ oznacza, że czas mierzy się ilorazem (stosunkiem) liczb, wyrażających drogę i szybkość.

Można powiedzieć krócej: droga równa się liczebnie iloczynowi szybkości przez czas; szybkość równa się liczebnie ilorazowi drogi przez czas (albo ich stosunkowi); czas równa się liczebnie ilorazowi drogi przez szybkość (albo ich stosunkowi).

Pisownia wzorów w fizyce posługuje się kombinacją liter i znaków arytmetycznych na oznaczenie pewnych jednostek fizycznych czyli miar odrębnych; znakowanie objaśnia pochodzenie i rodzaj działań dla utworzenia danej jednostki. Szybkość więc mierzy się jednostką szybkości $\left(\frac{s}{t}\right)$, nie zaś jednostką drogi ani czasu.

3. Jednostki szybkości. Szybkość można mierzyć w kilometrach na godzinę, bądź w metrach na minutę, bądź w metrach na sekundę i t. p. W nauce jednstką szybkości jest centymetr na sekundę, co oznaczamy:

$$\text{jednostka szybkości} = \frac{cm}{sek}.$$

Inne wyżej pomienione jednostki szybkości mają symbole:

$$\frac{km}{godz}, \quad \frac{m}{min}, \quad \frac{m}{sek}.$$

W żegludze morskiej jednostką szybkości jest *węzeł*, którego wartość liczebna = mila morska/godz. = 1856 : 3600 m/sek, = 0,51 m/sek, t. j. liczba mil morskich na godzinę daje liczbę węzłów (pt. tabelkę § 3).

Przykłady. 1) Ile przepłynie na Wiśle tratwa, unoszona prądem rzeki, w ciągu godziny? w ciągu minuty, w ciągu sekundy?

Odp. Ze wzoru na drogę 0,6 × 3600 = 2160 m = 2,16 km.

2) Jaka jest szybkość aeroplanu, który w ciągu 15 minut przeleciał 26 km?

Odp. Ze wzoru na szybkość 26 : 15 = (średnio) 1,733 km/min = = 1,733 : $\frac{1}{60}$ = 104 km/godz = (104 × 1000) : 3600 = 29 m/sek.

3) Ile czasu trwa przebieg światła od słońca do ziemi, jeżeli odległość tych ciał wynosi średnio 150 000 000 km?

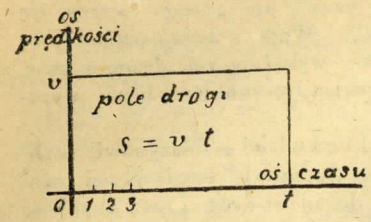
Odp. Ze wzoru na czas 150 000 000 : 300 000 = 496 sek = 8 minut 16 sekund.

4) Ile drogi dziennie robi statek, płynący z szybkością 20 węzłów?

Odp. 20 węzłów = 20 mil morskich/godz = 20 × 1,856 km/godz; droga w ciągu doby = (20 × 1,856) × 24 = 891 km.

*) Uwaga powyższa stosuje się do wielu wzorów w fizyce, które należy traktować jako określenia lub miary, np. siły, pracy, jednostek elektrycznych (pt. w działach odnośnych, jako też układ *CGS*).

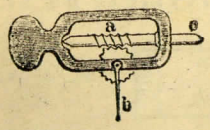
4. Wykreślenie ruchu jednostajnego. Wzajemną zależność wielkości, wyrażających ruch jednostajny, można wykreślić na osiach spółrzędnych (rys. 27), odmierzając na jednej z nich czas t, a na drugiej szybkość v i prowadząc przez punkty końcowe linje równolegle do osi. Utworzone pole prostokąta oznacza drogę przebytą.



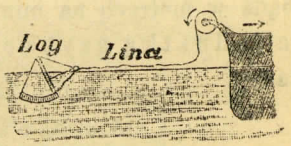
Rys. 27. Wykres (djagram) ruchu jednostajnego.

5. Praktyczny pomiar szybkości. Do kół, jak przy rowerze, maszynach, pojazdach służy *licznik obrotów*, złożony ze śruby (rys. 28) i kółka zębatego, które się nią sczepia, tak iż za każdym obrotem śruby skazówka na kółku posuwa się o jeden ząbek. Stąd odczytuje się liczbę obrotów w danym czasie, który jednocześnie obserwuje się na zegarku; obrót licznika ma miejsce wskutek przyciśnięcia go końcem c do wirującej osi koła, w kierunku tej osi.

Do statków służy t. zw. *log*, szybkościomierz okrętowy. W najprostszej postaci jest to deszczułka (rys. 29) trójkątna, obciążona z jednego boku ołowiem, tak iż pływa pionowo. Wrzuciwszy ją do wody, odwija się linę w miarę szybkości statku, tak, aby log pozostał na miejscu, t. j. aby go lina nie pociągnęła. O szybkości okrętu stanowi długość liny, odwiniętej w danym czasie, którą się odczytuje na klepsydrze czyli zegarze piaskowym.



Rys. 28. Licznik obrotów.



Rys. 29. Miernik szybkości statków (log).

Na linie są węzły w odstępach prawie 31 m$=\frac{1}{60}$ mili morskiej; ile więc węzłów sznurowych odwinie się w ciągu minuty, tyle mil morskich na godzinę wynosi prędkość statku. Stąd pochodzi nazwa *węzła* jako miary szybkości, której wartość = 0,51 m/sek, jak objaśniono powyżej, w art 3. Dokładniejszy log stanowi rodzaj wiatraczka, którego obroty liczy mechanizm kółkowy. W razie prądów wodnych wskazówki tych narzędzi stają się niedokładne.

Szybkość wiatru oznacza się za pomocą *anemometru*, wiatraczka o czterech półkulach, którego obroty liczy mechanizm kółkowy, albo z odchylenia deseczki, zawieszonej pionowo.

Szybkość prądu w rzekach oznacza się na zasadzie drogi, jaką przebywa w danym czasie ciało płynące, albo również z obrotów wiatraczka, który przywiązano do pala, wbitego w dno rzeki.

Zadania.

1. Droga z Calais do Dover wynosi 45 km, a trwa statkiem 1 godzinę 15 minut. Jaką szybkość ma statek? Odp. 19,4 węzła.

2. Pociąg ekspres wyrusza z Warszawy o godzinie 6 minut 20 wieczorem i staje w Granicy o godzinie 11 min. 40, jadąc z szybkością średnią 16 metrów na sekundę. Ile wynosi odległość tych stacji? Odp. 307 km.

3. Jaką szybkość posiada:

a) samochód, przebywający 300 km w 7 godzin 30 min.? Odp. 11 m/sek.

b) orkan, który przeniósł balon w ciągu 4 godz. 10 min. o 440 km? Odp. 29 m/sek.

c) torpedowiec, przepływający w 50 minut drogę 25 mil morskich? Odp. 30 węzłów.

d) prąd rzeki, który porwał deskę i przeniósł ją o 100 m w ciągu 75 sek? Odp. 1,3 m/sek.

4. Na wyścigach w Anglji najszybszy motocykl przebył $11\frac{1}{2}$ km w ciągu 5′ 45″; koń zaś wyścigowy 3 km w ciągu 3′ 2″. Jaki jest stosunek szybkości? Odp. Motocykl prawie 2 razy szybszy od konia.

5. Ile czasu potrzebuje:

a) pociąg błyskawiczny na przebycie 120 km, przy szybkości 25 m/sek? Odp. 1 godz. 20 min.

b) tratwa na przebycie 12 km z prądem rzeki o biegu 1,5 m/sek? Odp. 2 godz. 13 min.

6. Lotnik francuski Brindejonc des Moulinais przeleciał z Paryża do Warszawy w ciągu 14 godzin, zatrzymawszy się 2 razy po drodze: w Wanne 2 godziny i w Berlinie $3\frac{1}{2}$ godziny. Odległość powietrzna Warszawy od Paryża wynosi 1300 km. Z jaką szybkością średnią pędził lotnik? Odp. 153 km/godz (2 razy tyle co pociąg kurjerski).

7. Największy parowiec osobowy przebył drogę z Hamburga do N.-Yorku, 3647 mil morskich, w ciągu 6 dni 13 godz. 31 min.; z jaką płynął szybkością? Odp. 23,15 węzła.

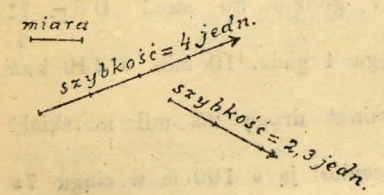
§ 12. Składanie ruchów jednostajnych.

1. Ruchy złożone. W rzeczywistości niema nigdzie ruchu prostego czyli pojedynczego; na ziemi już z tego powodu, że sama ziemia ma dwojaki ruch własny: obrót dokoła osi i obieg dokoła słońca, a nadto pewne uchybienia czyli ruchy dodatkowe. Ziemia więc odbywa ruch złożony, i to wielce zawiły.

W mechanice jednak rozpatrujemy ruch względny (§ 10), mianowicie względem ziemi i przedmiotów na niej położonych, uważając je za nieruchome, jak: podłoga, stół, szyny kolejowe i t. p. Tylko w szczególnych badaniach liczymy się z ruchem ziemi.

Skoro ciało się poruszy po nieruchomym torze, pod wpływem chwilowego bodźca, np. potrącenia lub szarpnięcia, odbywa ono ruch pojedynczy i jednostajny. Jeżeli zaś jednocześnie i tor się porusza, ciało ma ruch dwojaki, złożony z własnego jego ruchu i ruchu toru, np. posunięcie paczki w wagonie jadącym, pociągnięcie ołówkiem po papierze, który jednocześnie wpoprzek się posuwa.

Wogóle ciało posiada *ruch złożony*, gdy bierze udział naraz w dwu lub więcej ruchach jakiegobądź rodzaju. Ruch taki powstaje od składania dwu ruchów jednostajnych, albo jednostajnego ze zmiennym, bądź dwu ruchów zmiennych i t. p.



Rys. 30. Wektory szybkości.

2. Graficzne przedstawienie ruchu. Do badania ruchów złożonych zachodzi potrzeba wyobrażenia ruchu na rysunku, t. j. graficznie, za pomocą *wektora*, t. j. odcinka linji prostej, którego długość wyraża szybkość ruchu wedle dowolnej przyjętej miary, kierunek zaś ruchu oznacza strzałka.

Szybkość zowie się *wielkością kierunkową* (wektorjalną), określa ją bowiem nie sama liczba, ale i kierunek.

Na rysunku np. wykreślono dwa ruchy jednostajne o rozmaitych kierunkach i szybkościach; skoro miarka odpowiada 1 m/sek, dane ruchy mają szybkość 4 m/sek i 2,3 m/sek.

3. Zasada niezależności ruchów. Składanie wszelkich ruchów polega na założeniu, podanem przez Newtona jako jeden z wniosków jego słynnych „Zasad matematycznych filozofji przyrody" (1687):

Ruch ciała nie zależy od tego, czy układ, do którego należy ciało, jest w spoczynku, czy w ruchu. Skoro więc ciało bierze udział w kilku ruchach jednocześnie, skutek jest taki sam, jak gdyby odbywało ruchy kolejno, naprzód jeden, następnie drugi itd.

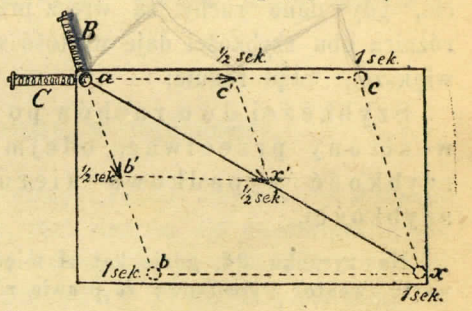
Przykłady. Spacerując po statku, który płynie spokojnie, bez kołysania, nie odczuwamy jego ruchu i chodzimy tak samo, jak wtedy, gdy statek stoi u brzegu. — Pion, zawieszony przy ścianie wagonu na stacji, nie odchyla się od ściany, gdy wagon jest w pędzie. — Ciężarek, puszczony swobodnie, pada w to samo miejsce w wagonie stojącym, zarówno jak jadącym.

4. Równoległobok szybkości. Zasadniczy przypadek ruchu złożonego daje składanie dwu ruchów jednostajnych o kierunkach różnych, ale niezmiennych; na tem opiera się roztrząsanie wielu innych ruchów, nieraz bardzo zawiłych. Dane ruchy i szybkości zowią się *składowymi*, a powstający stąd ruch i szybkość zowie się *wypadkową*.

Według zasady niezależności, szybkość wypadkowa jest taka, jak gdyby ruchy występowały kolejno jeden po drugim. Z wykreślenia wektorów danych szybkości i wektora wypadkowej powstaje równoległobok, gdzie szybkości składowe są bokami, a wypadkowa przekątnią. Stąd reguła, zwana *równoległobokiem szybkości*:

Szybkość wypadkowa dwu ruchów jednostajnych, o różnych kierunkach, wyraża się co do kierunku i wartości przekątnią równoległoboku, wystawionego na szybkościach składowych.

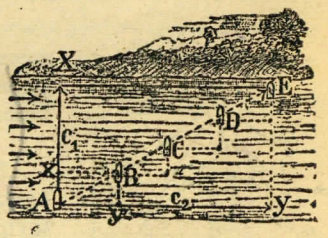
Doświadczenie. Do rogu stołu (rys. 31) przytwierdzono ukośnie dwie rurki B i C, w których mieszczą się sprężyny napięte. Sprężyna B, uderzając kulkę a, potoczy ją ruchem jednostajnym w ciągu sekundy do położenia b; sprężyna zaś C, działając również sama, potoczy kulkę w ciągu sekundy do c. Obie sprężyny, uderzając jednocześnie, popchną kulkę w ciągu sekundy do x, przyczym kulka przejdzie drogę ax = przekątni równoległoboku $abcx$.



Rys. 31. Równoległobok szybkości.

Dowód teoretyczny. W dowolnej chwili ruchu, np. po upływie $\frac{1}{2}$ sekundy, kulka przeszłaby w danym przykładzie odpowiednio drogi $ab' = \frac{1}{2}ab$ i $ac' = \frac{1}{2}ac$, pod działaniem osobnym uderzeń B i C; pod działaniem obu naraz tych uderzeń kulka znalazłaby się w punkcie x', na prostej ax, przyczym $ax' = \frac{1}{2}ax$ (wynika to z podobieństwa trójkątów $ab'x'$ i abx; wytłómaczyć bliżej).

Przykłady. Przeprawa łódką przez rzekę: przyjąwszy prędkość łódki w przybliżeniu za jednostajną, podobnież prędkość wody w rzece, objaśnić rys. 32.—Lot ptaka, zmierzającego na południe, gdy wiatr wieje ze wschodu.—Chód człowieka wpoprzek wagonu, gdy pociąg jest w biegu.

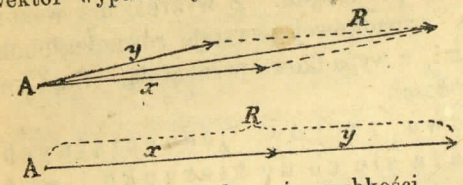


Rys. 32. Równoległobok szybkości.

5. Przypadki poszczególne. 1) Skoro kierunki obu ruchów zbliżają się coraz bardziej, czyli wektory tworzą kąt coraz mniejszy, zbliża się do nich i kierunek ruchu wypadkowego, a szybkość jego jest coraz bliższa do sumy danych szybkości (rys. 33); wreszcie gdy kierunki się zlewają, t. j. kąt wektorów = 0°, obie szybkości się dodają. Stąd reguła:

Szybkości dwu ruchów po linji prostej, o kierunku zgodnym, dodają się do siebie, a szybkość wypadkowa ma ten sam kierunek.

Na rys. 33, gdzie kąt A między wektorami x i y bardzo jest ostry, wektor wypadkowy R prawie równa się ich sumie. W dolnej zaś części rysunku, gdzie wektory zlewają się na jednej prostej,



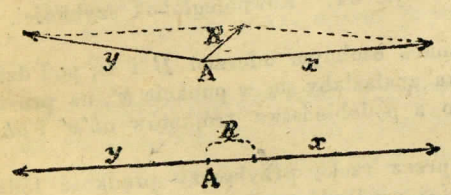
Rys. 33. Dodawanie szybkości.

szybkość wypadkowa $R = x + y$.

2) Skoro kierunki obu ruchów oddalają się od siebie, czyli wektory tworzą kąt coraz bardziej rozwarty, kierunek ruchu wypadkowego zbliża się coraz ku większemu wektorowi, a szybkość wypadkowa jest coraz bliższa do różnicy danych szybkości (rys. 34); wreszcie, gdy dane ruchy są wręcz przeciwne, t. j. kąt wektorów $= 180°$, różnica obu szybkości daje wartość wypadkowej i jej kierunek w stronę większej. Stąd reguła:

Szybkości dwu ruchów po linji prostej, skierowanych w strony przeciwne, odejmują się jedna od drugiej; szybkość wypadkowa kieruje się w stronę większej szybkości.

Na rysunku 34, gdzie kąt A między wektorami x i y jest bardzo rozwarty, wektor wypadkowy R prawie równa się ich różnicy. W dolnej części rysunku, gdzie wektory mają zwrot wręcz przeciwny,

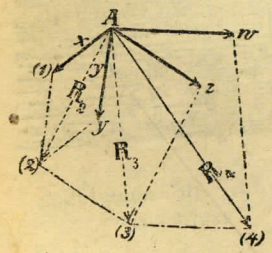


Rys. 34. Odejmowanie szybkości.

szybkosc wypadkowa $R = x - y$.

Przykłady. 1) Bieg łódki z prądem rzeki, przy wiosłowaniu zgodnie z prądem: gdy szybkość prądu wynosi 0,8 m/sek, a nadana wiosłami wynosi 2 m/sek, łódka posuwa się z szybkością $0{,}8 + 2 = 2{,}8$ m/sek, zgodnie z prądem.

2) Bieg łódki na rzece, przy wiosłowaniu przeciwko prądowi: w razie podanych wyżej szybkości łódka posuwa się z szybkością $2 - 0{,}8 = 1{,}2$ m/sek, przeciw prądowi.



Rys. 35. Składanie kilku szybkości.

6. Składanie kilku szybkości (rys. 35), o różnych kierunkach, sprowadza się do równoległoboku szybkości. Najprzód składamy dwie dowolnie obrane z danych szybkości, np. x i y, budując na nich równoległobok; stąd powstaje wypadkowa R_2. Drugi równoległobok utworzy się z szybkości z i R_2, dając nową wypadkową R_3 i t. d., aż wypadnie ogólna szybkość R_4, czyli wypadkowa dla wszystkich danych szybkości x, y, z, w.

Sposób uproszczony: szybkość y przesuwa się do końca (1) szybkości x, zachowując jej kierunek, skąd powstaje odcinek (1) (2); szybkość z przesuwa się podobnież do punktu (2), tworząc odcinek (2) (3); wreszcie szybkość w przesuwa się do punktu (3), tworząc odcinek (3) (4). Otrzymany punkt (4), połączony z A, daje prostą A (4) $= R_4$ czyli szybkość wypadkową.

W myśl Maxwella, który wprowadził do nauki pojęcie wektorów, można działania powyższe nazwać dodawaniem wektorów, czyli dodawaniem geometrycznym; wynikiem jego w danym wypadku jest wielobok A (1) (2) (3) (4), utworzony z wektorów składowych x, y, z, w i zamknięty wektorem wypadkowym A (4). Oznaczamy to symbolicznie:

$$\text{wektor wypadkowy } \overline{R_4} = \overline{x} + \overline{y} + \overline{z} + \overline{w}.$$

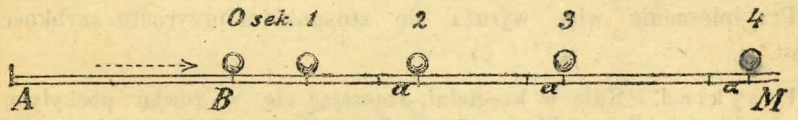
Przykład. Ruch łódki na rzece, nadany wskutek prądu rzeki, wiosłowania, wiatru, ciągnienia.

§ 13. Ruch zmienny w ogólności.

1. Ruch przyśpieszony i opóźniony. Jeżeli zmienia się szybkość ciała, czy to chwilami, czy też stale, ruch nazywa się *zmiennym* (§ 10, art. 2). Zmiany w szybkości mogą być dwojakie: powiększenie szybkości lub jej zmniejszenie; stąd ruch zmienny bywa *przyśpieszony* lub *opóźniony*.

Pospolicie szybkość ruchu wzrasta lub zmniejsza się nierówno w rozmaitych zjawiskach natury; np. woda w rzece płynie z szybkością 60 cm/sek, tuż dalej zaś 65 cm/sek, to znów 76 cm/sek i t. p. W pewnych jednak zjawiskach szybkość wzrasta lub maleje stale; taki rodzaj ruchu tutaj rozpatrujemy.

Jeżeli w równych czasach szybkość jednakowo się zmienia, ruch jest *jednostajnie zmienny* i może być dwojaki: *jednostajnie przyśpieszony*, gdy szybkość wzrasta wciąż jednakowo, lub *jednostajnie opóźniony*, gdy szybkość maleje; np. przy spadaniu ciało leci co sekunda prędzej o 981 cm na sekundę, przy wyrzuceniu w górę pionowo leci co sekunda wolniej o 981 cm na sekundę.



Rys. 36.

Na rys. 36 posiada kula, tocząca się po pomoście A M, ruch jednostajnie przyśpieszony; szybkość jej bowiem wzrasta jednakowo, począwszy od punktu B, odkąd zaczęto czas liczyć, mianowicie o a cm/sek w ciągu każdej sekundy.

2. Szybkość początkowa i końcowa. Szybkość w danej chwili, od której zaczynamy czas liczyć, zowie się początkową; szybkość późniejsza, jaką dostrzegamy w dalszym ruchu ciała, zowie się *końcową*. Nazwy te więc odnoszą się do szybkości w dwu dowolnych chwilach ruchu zmiennego, niekoniecznie zaś na początku ruchu i w końcu.

Każde ciało w chwili wprawienia go w ruch posiada szybkość początkową = O. Dla ruchu jednostajnego szybkość początkowa (c) równa się końcowej (v); dla ruchu przyśpieszonego szybkość początkowa jest mniejsza od końcowej, dla opóźnionego większa:

ruch jednostajny: $c = v$
ruch przyśpieszony: $c < v$
ruch opóźniony: $c > v$.

Szybkość bieżącą czyli szybkość w danej chwili należy rozumieć w ciągu bardzo krótkiego czasu, np. $\frac{1}{10}$ sekundy, nawet $\frac{1}{1000}$ sekundy lub mniej jeszcze. Im raptowniej wzrasta lub maleje szybkość ciała, tem krótszy należy uchwycić przeciąg czasu do oznaczenia szybkości, aby ta szybkość była zgodna z rzeczywistą w danej chwili.

Po odbiciu np. od brzegu statek w ciągu $\frac{1}{10}$ sekundy przepłynął 0,3 metra; w jakiś czas potem statek przepłynął w $\frac{1}{10}$ sekundy drogę 1,1 m. Szybkość bieżąca w pierwszej chwili, czyli szybkość początkowa $= 0{,}3 : \frac{1}{10} = 3$ m/sek, szybkość końcowa $1{,}1 : \frac{1}{10} = 11$ m/sek.

3. Przyśpieszenie. Przyrost szybkości w ciągu jednostki czasu (sekundy, minuty, godziny) zowie się *przyśpieszeniem*. Określenie to dotyczy zarówno ruchu przyśpieszonego, jak opóźnionego: pierwszy posiada przyśpieszenie dodatnie, drugi ujemne; to ostatnie, t. j. przyśpieszenie ujemne, można nazwać *opóźnieniem*, czyli ubytkiem szybkości w ciągu jednostki czasu.

Jeżeli ciało w ruchu jednostajnie zmiennym posiada szybkość początkową c, a po upływie t sekund szybkość końcową v, to

$$\text{przyśpieszenie } a = \frac{v - c}{t} = \frac{\text{przyrost szybkości}}{\text{czas}}.$$

Przyśpieszenie więc wyraża się stosunkiem przyrostu szybkości do czasu.

Przykład. Kula w kręgielni, staczając się w rowku pochyłym, ma po niejakim czasie szybkość 3 m/sek, a jeszcze po 4 sekundach szybkość 9 m/sek;

$$\text{przyśpieszenie} = \frac{9-3}{4} = 1\tfrac{1}{2} \text{ m/sek na sekundę.}$$

Ta sama kula, puszczona w rynnie pod górę, jeżeli ma w pierwszej chwili szybkość 9 m/sek, a po 4 sekundach tylko 3 m/sek,

$$\text{przyśpieszenie} = \frac{3-9}{4} = -1\tfrac{1}{2} \text{ m/sek na sekundę.}$$

Z pojęcia przyśpieszenia wynika, że należy ono do wielkości kierunkowych, podobnie jak szybkość (§ 12 art. 2) i oznacza się graficznie za pomocą wektorów (wykreślić przyśpieszenie z rys. 36).

4. Jednostki przyśpieszenia. Skoro ruch ciała przyśpiesza się lub zwalnia o jednostkę szybkości w ciagu jednostki czasu np. o 1 km/godz w ciągu 1 godziny, albo o 1 m/min w ciągu 1 minuty, albo o 1 cm/sek w ciągu 1 sekundy, oznacza to, że ciało porusza się z przyśpieszeniem równym jednostce, a mianowicie:

$$\frac{1 \text{ km/godz}}{\text{godz}} \text{ lub } \frac{1 \text{ m/min}}{\text{min}} \text{ lub } \frac{1 \text{ cm/sek}}{\text{sek}}$$

czyli inaczej

$$1\,\frac{\text{km}}{\text{godz}^2} \text{ lub } 1\,\frac{\text{m}}{\text{min}^2} \text{ lub } 1\,\frac{\text{cm}}{\text{sek}^2}.$$

Z powyższego wynika, że przyśpieszenie jest wielkością drugiego wymiaru.

Jednostką przyśpieszenia jest przyrost o jednostkę szybkości na odpowiednią jednostkę czasu; w nauce przyjęto za jednostkę przyśpieszenia przyrost szybkości o 1 cm/sek w ciągu 1 sekundy, czyli 1 cm/sek².

$$\text{Jednostka przyśpieszenia} = \frac{cm}{sek^2}.$$

Np. przyśpieszenie ciał, spadających swobodnie pod wpływem ciężkości, wynosi 981 cm/sek², czyli okrągło 10 m/sek²; oznacza to, że w ciągu każdej sekundy szybkość ciała wzrasta prawie o 10 metrów na sekundę.

C) NAUKA O DZIAŁANIU SIŁ.

(DYNAMIKA).

§ 14. Siły.

1. Prawo bezwładności (pierwsza zasada dynamiczna Newtona, 1687). Każde ciało trwa w spoczynku, bądź w ruchu jednostajnym, po linji prostej, dopóki jakaś siła zewnętrzna nie zmusi go do zmiany tego stanu.

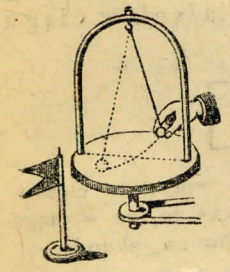
Powyższy pewnik Newtona, stanowiący podstawę mechaniki sił, czyli dynamiki, dotyczy stanu dwojakiego: 1) gdy ciało znajduje się w spoczynku, 2) gdy jest w ruchu. Żadne ciało nie może samo się poruszyć, t. j. zmienić miejsce. Nawzajem, ciało raz poruszone i pozostawione samemu sobie, bez żadnych przeszkód, nie może się zatrzymać, ani zwolnić biegu, ani przyśpieszyć, ani zmienić kierunku biegu, musi ono biedz prosto i jednostajnie, t. j. przebiegać drogę jednakową w ciągu każdej następnej sekundy. Własność ta zowie się *bezwładnością* (inercją).

W rzeczywistości istnieją zawsze przyczyny, czyli *siły*, których usunąć niepodobna, a które bądź tamują ruch ciał wszelakich, mianowicie tarcie, opór powietrza, bądź w pewnych razach tamują, w innych pobudzają ruch, np. ciężkość, sprężystość.

Możliwość ruchu wiecznego okazują ciała niebieskie; ruch ten wszakże nie jest prostolinjowy skutkiem wpływu ciążenia.

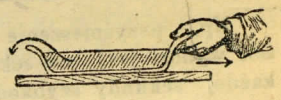
Że ciało poruszone zachowuje samo przez się ruch po linji prostej, okazuje kamień wypuszczony z procy, albo ze sznurka, na którym obracano go dokoła ręki; wyrwawszy się, kamień leci prosto w pierwszej chwili, mimo iż do tej chwili miał ruch krzywodrożny.

Przykłady na bezwładność ruchu. *) — Cyklista, rozpędziwszy rower, puszcza pedały: rower pędzi dalej.—Jadąc w powozie, pochylamy się naprzód, gdy konie raptem staną; stojąc w łódce płynącej, padamy, gdy łódka o brzeg uderzy. — Nabijanie młotka na trzonek. — Pryskanie farby z pędzla, wody z kropidła. — Wahadło zachowuje stały kierunek ruchu (płaszczyznę wahań): gdy się buja wahadło, zawieszone w ruchomej ramce (rys. 37), można ramkę obracać, a wahadło nie zboczy od pierwotnego kierunku płaszczyzny, zaznaczonego chorągiewką.



Rys. 37. Bezwładność ruchu.

W podobnym doświadczeniu na dużą skalę Foucault (1851) udowodnił, że ziemia się obraca dokoła osi; puszczając bardzo długie i ciężkie wahadło w gmachu Panteonu paryskiego, otrzymał na arenie ślady, posuwające się coraz dalej ku zachodowi, co świadczy, że arena zmienia położenie względem wahadła, inaczej wahadło kołysałoby się wciąż po tym samym śladzie.

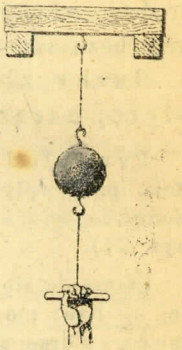


Rys. 38. Bezwładność spoczynku.

Przykłady na bezwładność spoczynku. *) — Ołówek, położony na poziomym równym papierze, pozostaje prawie na miejscu, gdy papier pociągamy po stole tam i napowrót. — Szklankę nakrywam sztywną kartką i kładę na niej pieniądz; skoro strącę kartkę, pieniądz wpada do szklanki.— Siedząc w powozie, pochylamy się w tył, gdy konie nagle ruszą. — Gdy pociągnę za prawy brzeg miski z wodą (rys. 38), przeleje się woda

*) Powyższe przykłady, zarówno jak inne w dalszym ciągu podręcznika, weźmie uczeń jako zagadnienia, które sam bliżej rozwinie i objaśni (por. uwagę na str. 2).

przez lewy brzeg miski. — Na nitce uwiązano kulę ciężką, a pod nią przywiązano taką samą nitkę; szarpnąwszy dolną nitkę, zrywa się ją, a górna nitka pozostanie cała; ciągnąc zaś powoli za dolną nitkę, zrywa się górną, a kula spada (rys. 39).



Rys. 39.

2. Siła. Skoro ciało porusza się z miejsca, albo gdy ciało, biegnące jednostajnie i prosto, skręca z drogi, biegnie coraz prędzej, wolniej, lub zatrzymuje się, znaczy to, że na ciało działa jakaś *siła*. Przeszkody, tamujące ruch ciała, np. tarcie, opór powietrza, są również siłami. Wogóle siłą nazywamy to, co wprawia w ruch ciało lub zmienia jego ruch w jakikolwiek sposób, t. j. zmienia kierunek lub szybkość ruchu.

W czem tkwi istota sił wszelkich, niewiadomo; nie wiemy np. źródła siły ciężkości, siły mięśniowej, spójności, sił magnetycznych i innych. Określamy zaś siły i oceniamy z działań, jakie one sprawiają.

Dlaczego kula, puszczona po ziemi, toczy się coraz wolniej? — Dlaczego kamień w wodzie spada wolniej, aniżeli w powietrzu? — Dlaczego piłka, puszczona po desce pochyłej, spada coraz prędzej? — Dlaczego kula armatnia zakreśla łuk w powietrzu? — Dlaczego jabłko z drzewa spada na ziemię?

3. Wpływ siły na rodzaj ruchu. Pod względem czasu trwania odróżniamy *siły chwilowe*, np. uderzenie, wybuch, oraz *siły ciągłe*, np. ciężkość, spójność. Pod siłą chwilową rozumiemy siłę, działającą przez czas niezmiernie krótki, tak iż oznaczyć go niepodobna.

Ruch jednostajny po linji prostej odbywa się wskutek bezwładności, po działaniu siły chwilowej, albo po ustaniu działania siły ciągłej. Ciało spokojne, pobudzone nagle do ruchu siłą chwilową, jako też ciało w ruchu, posuwane siłą ciągłą, po zniknięciu tej siły zachowuje ruch jednostajny, o szybkości takiej i kierunku takim, jaki miało w ostatniej chwili działania siły.

Ruch zmienny, t. j. przyśpieszony lub opóźniony, po linji prostej ma miejsce podczas działania siły ciągłej. Można bowiem uważać siłę ciągłą jako szereg nadzwyczaj częstych sił chwilowych, np. potrąceń szybko po sobie następujących; każda zaś z tych sił chwilowych nadaje ciału pewną szybkość, która dodaje się do nabytej szybkości lub odejmuje się od niej, zależnie od tego, czy siła działa w stronę ruchu, czy w przeciwną.

Często można spostrzegać ruch jednostajny, sprawiany pozornie działaniem sił ciągłych; wtedy jednak jest on objawem bezwładności, nie zaś wynikiem działania tych sił; np. łódka na stawie przy równym wiosłowaniu, pociąg w największym pędzie po torze poziomym. W tych wypad-

kach zawsze siła napotyka opór, czyli siłę przeciwną, która wzrasta wraz z szybkością ruchu, aż wreszcie siła i opór wzajemnie się znoszą czyli równoważą. Ciało, które z początku posuwało się coraz prędzej, od tej chwili posuwa się ruchem jednostajnym, zgodnie z prawem bezwładności, jak gdyby już nie działały nań żadne siły.

Ruchy złożone odbywają się pod wpływem dwu lub więcej naraz sił, czy to chwilowych czy stałych.

Przykłady. Uderzenie poziomo kijem w piłkę. — Ruch orzecha po stole pod wpływem mocnego dmuchnięcia lub potrącenia. — Wystrzał poziomy do celu. — Ruch kulki po stole, za spuszczeniem jednej sprężyny (rys. 31).

Staczanie się kuli kręglowej w rynnie. — Spuszczanie sanek z góry śnieżnej. — Rzut pionowy piłką w górę, wystrzał pionowy. — Ruch jabłka, spadającego z drzewa. — Bieg pociągu, wyruszającego ze stacji oraz dojeżdżającego.

Gra w piłkę, przy rozmaitych rzutach. — Wystrzały armatnie na dużą odległość. — Huśtanie. — Bieg konia, trzymanego na lince, dokoła areny. — Ruch kulki po stole, za spuszczeniem obu naraz sprężynek (rys. 31).

4. Cechy czyli **znamiona siły.** Działanie każdej siły okazują trzy cechy: punkt działania, kierunek i wartość czyli wielkość siły.

Punkt działania (zaczepienia, przyłożenia), czyli punkt, na który siła działa, istnieje tylko teoretycznie; w rzeczywistości jest to pewna powierzchnia, której wielkość praktycznie pomijamy, skoro jest niezmiernie mała, i stosujemy do niej nazwę „punktu", podobnie jak w rysunkach geometrycznych stosujemy ją względem kropki na papierze. Nazwa więc punktu działania odnosi się do miejsca ciągnienia, oparcia lub zetknięcia, skoro jest nieznaczne; np. punkt zawieszenia ciężaru na gwoździu, punkt uderzenia kamyka laską.

Kierunek siły jest to linja prosta, po której siła posunęłaby ciało, działając sama jedna.

Wartość czyli *wielkość* siły oznacza się w sposób dwojaki, zależnie od tego, czy siła nadaje ruch ciału, czy też mimo jej działania ciało się nie porusza, a siła wywiera tylko nacisk. Pierwszy sposób mierzenia sił nazywa się dynamicznym i ma znaczenie głównie teoretyczne, drugi statycznym i używa się powszechnie w praktyce (§§ 15 i 16).

§ 15. Dynamiczny pomiar sił.

1. Dwojakie działanie sił. Z określenia siły wypływa, że siła jest źródłem ruchu, czyli że nieodzownym wynikiem działania siły jest ruch. Istotnie, skutek każdej siły na ciało objawia się w ruchu bądź jednostajnym, gdy siła przestała działać, bądź przyśpieszonym czy opóźnionym, gdy siła działa ciągle.

Jednakże skoro występuje naraz dwie lub więcej sił, jak to ma miejsce powszechnie, ciało niekoniecznie musi się poruszać, ale może też w pewnych warunkach pozostać w spoczynku. Stan taki, gdy działanie sił znosi się wzajemnie, skutkiem czego ciało jest w spoczynku, nazywa się *równowagą*, np. sprzęty w pokoju, domy, skały. Powiadamy, że siła wywiera na ciało *nacisk* czyli *parcie*, które stanowi miarę owej siły; jest to *statyczne* działanie sił.

Pobudzanie ciała do ruchu jest działaniem *dynamicznem* siły; może ono również służyć do mierzenia sił.

Niekiedy oba działania, statyczne i dynamiczne, zachodzą jednocześnie.

Przykłady. Krople deszczu, spadając, wypierają przed sobą powietrze, a zarazem je zagęszczają; krople spadające wywierają nacisk na powietrze. — Na dłoni leży kamień, który sprawia na nią pewien ucisk; skoro prędko opuszczę rękę, kamień ciśnie słabiej, a nawet przestaje cisnąć zupełnie, jeżeli ręka opada tak samo prędko, jak kamień spada swobodnie. — Okręt żaglowy płynie pod działaniem wiatru; gdy okręt stoi na kotwicy, parcie wiatru wypręża łańcuch. — Strzała wylatuje z łuku napiętego, gdy ma przestrzeń wolną; oparta zaś końcem o ścianę, ciśnie w miejscu oparcia.

Zagadnienia. Chcę wyrwać cęgami gwóźdź z muru; urywa się główka gwoździa. Działanie mięśni w chwili oderwania i przedtem? — Rurkę z wodą zakorkowano z obu stron jednakowymi korkami, ale jeden z nich wciśnięto mocniej; za ogrzaniem para wysadza korek słabszy. Działanie pary w tej chwili na oba korki? — Pośrodku miednicy z wodą umocowano magnes w postaci sztabki, pionowo; na wodę puszczono dwa jednakowe korki, unoszące każdy po równej kulce żelaznej, przyczym kulki znajdują się w równej od magnesu odległości; jeden z korków przytrzymano nieruchomo, drugi pływa swobodnie. Wiadomo, iż magnes przyciąga żelazo. Działanie magnesu na obie kulki?

2. Siła a masa. Oceniamy zwykle masę ciała, czyli ilość materji w nim zawartą, nie podług oporu przeciw siłom, ale podług wagi ciała, a to na zasadzie, że równe masy są jednakowo ciężkie w tym samym miejscu na ziemi (§ 5). Stąd masy wyrażamy w gramach lub kilogramach, podobnie jak ciężary; jest to statyczny pomiar masy, ponieważ masa się nie porusza, działa tylko naciskiem.

Można jednak masę mierzyć dynamicznie, z przyśpieszenia, jakie masa osiąga pod działaniem siły, wychodząc z założenia, że równe masy otrzymują jednakowe przyśpieszenia od tej samej siły.

Doświadczenie (rys. 40). Na środku stołu ustawia się dwa jednakowe wózki, łącząc je sprężyną tak, aby wózki dotykały do słupków *A* i *B*, gdy sprężyna nie jest rozciągnięta. Następnie obciąża się jeden wózek masą metalową, np. kilogramem, drugi piaskiem w dowolnej ilości i odciąga się rękoma wózki w przeciwne strony na jednakową odległość od słupków. Sprężyna ciągnie oba wózki oczywiście z jednakową siłą. Puściwszy wózki,

należy zauważyć, że poruszają się one ruchem przyśpieszonym, uderzą zaś o słopki jednocześnie tylko wtedy, gdy masa piasku równa się masie metalu. Ważąc metal i piasek, można sprawdzić, że jeden i drugi ważą jednakowo, np. po 1 kg.



Rys. 40. Obrazowe przedstawienie masy i siły.

Nawzajem, wiedząc wartość masy, poruszanej przez niewiadomą siłę, można zmierzyć tę siłę. Pomiar sił na zasadzie masy i przyśpieszenia nazywa się *bezwzględnym* (absolutnym), ponieważ opiera się na jednostkach t. zw. bezwzględnych niezmiennych: masy, czasu i długości; mierzenie zaś sił ciężarem jest *względne*, ciężar bowiem ciał jest zmienny (§ 5).

3. Zależność przyśpieszenia od masy i siły. Przyśpieszenie jest w stosunku prostym do siły, a odwrotym do masy, i posiada kierunek siły. Na powyższej zależności polega dynamiczny sposób mierzenia sił, w jednostkach bezwzględnych. Stanowi ona rozwinięcie pewnika Newtona, który brzmi:

Zmiana ruchu jest proporcjonalna do siły, wywołującej ruch, i odbywa się w jej kierunku (druga zasada dynamiczna Newtona, 1687).

Wyrażoną zależność można sobie uzmysłowić w sposób następujący. Zasadniczą własnością materji jest bezwładność. Skutkiem bezwładności masa opiera się jakiejbądź zmianie w swej szybkości, czyli stawia siłom opór, zwany *oporem bezwładnym*. Przy pokonywaniu oporu bezwładnego masy doświadczenie uczy, że:

a) Większa siła nadaje tej samej masie większe przyśpieszenie.

b) Większa masa otrzymuje od tej samej siły mniejsze przyśpieszenie.

c) Skoro siła i masa wzrasta w tym samym stosunku, szybkość się nie zmienia.

Przykłady (z pominięciem tarcia i oporu powietrza). a) Wagon toczy się wolno po szynach. Przystępuje robotnik i popycha wagon; szybkość powiększa się nieznacznie. Gdy przystąpi naraz 3 robotników, którzy popychać będą wagon, każdy z siłą taką, jak pierwszy robotnik, przyrost szybkości wagonu będzie 3 razy większy.

b) Na stole leży ołówek, okrągły w przekroju, i takaż obsadka metalowa, cięższa od ołówka 2 razy. Skoro dmuchać wciąż jednakowo, na jedno i drugie, np. mieszkiem gumowym (pt.), ołówek potoczy się prędzej, niż obsadka, tak iż w każdej chwili będzie miał przyśpieszenie 2 razy większe.

c) Galileusz okazał, że ciała ciężkie spadają tak samo prędko, jak ciała lekkie, skoro niema przeszkód, a więc w próżni albo w jakiej osłonie; np. papierek i pieniądz spadają jednocześnie (bliższe szczegóły pt. „Spadek ciał"). Ziemia bowiem przyciąga pieniądz z siłą większą, niż papierek, ale ta siła porusza masę tyleż razy większą.

Doświadczenia ściślejsze do stwierdzenia zależności między siłą, masą i przyśpieszeniem podaje druga część mechaniki (pt. o przyśpieszeniu w „Mechanice szczegółowej").

4. Dynamiczna miara siły. Do pomiarów fizycznych przyjęto centymetr za jednostkę długości, sekundę za jednostkę czasu, gram za jednostkę masy; jednostką więc przyśpieszenia jest cm/sek². Stąd pochodzi jednostka siły, wprowadzona w fizyce teoretycznej i używana powszechnie w obliczeniach naukowych.

Mianowicie, z doświadczeń wynika, że siła 1 g nadaje masie 1 g przyśpieszenie 981 cm/sek². Skoro

siła p g nadaje masie m g przyśpieszenie a cm/sek²,

$$\text{przyśpieszenie } a = 981 \cdot \frac{p}{m}. \qquad \text{(I)}$$

(a w cm/sek²) (p i m w gramach).

Ażeby uogólnić wzór powyższy, t. j. uniknąć czynnika liczbowego, wypada przyjąć zamiast 1 grama inną miarę siły, mniejszą 981 razy; wtedy masa 1 grama posiędzie, zamiast 981 cm/sek², przyśpieszenie tylko 1 cm/sek². Taka jednostka siły nazywa się *dyną*.

Jednostką siły dynamiczną jest *dyna*,

siła, która nadaje masie 1 grama przyśpieszenie 1 cm/sek².

$$\text{Dyna} = \tfrac{1}{981} \text{ grama (okrągło 1 mg).}$$

Działając w ciągu 1 sekundy na ciało spoczynku, siła 1 dyny nadaje masie 1 g szybkość stałą 1 cm/sek; przyczym rozumie się, że siła przestaje działać po upływie sekundy.

Przy wyrażeniu siły w dynach, wzór I przybiera postać:

$$\text{przyśpieszenie } a = \frac{p}{m} = \frac{\text{siła}}{\text{masa}} \qquad \text{(II *)}.$$

zatym

$$\boxed{\text{siła } p = m \cdot a = \text{masa} \times \text{przyśpieszenie.}} \qquad \text{(III *)}.$$

(a w cm/sek², p w dynach, m w gramach).

*) Por. uwagę do § 11.

Tak więc, bezwzględną miarą siły jest iloczyn z masy przez przyśpieszenie.

Do obliczeń praktycznych dyna jest zbyt małą jednostką siły; poza tym mierzenie bezpośrednie sił w dynach nastręcza dużo trudności (pt. oznaczenie przyśpieszenia w mechanice szczegółowej). Dlatego do celów technicznych i handlowych stosujemy ciężarowe miary siły, mianowicie wyrażamy siły w gramach, kilogramach (§ 16).

Uzmysłowić sobie można wartość dyny, dmuchając lekko na mały okrągły orzeszek (masa 1 g) tak, aby się toczył po gładkim stole i posuwał się przytem co sekunda o 1 cm więcej. Wyrażona ciężarem, dyna wynosi tyle, co waga niniejszego kwadracika □, wyciętego z papieru.

1 gram = 981 dyn (okrągło 1000 dyn).
1 kilogram = 981 000 dyn (okrągło 1 000 000 dyn).

Tak np. ciężar człowieka wyraziłby się liczbą około 70 miljonów dyn.

Przykłady (z pominięciem tarcia i oporów). 1) Kamyk, ważący 3,5 g, wrzucono do wody; przy zanurzeniu kamyk traci na wadze, mianowicie woda unosi go do góry siłą 1,5 g (pt. „Parcie płynu"). Z jakim przyśpieszeniem kamyk spada w wodzie, jeżeli pominąć opór wody?

Rozwiązanie. Siła, z jaką tonie kamyk, wynosi 3,5—1,5 = 2 g czyli 2 × 981 = 1962 dyn; masa kamyka = 3,5 g. Zatym

$$\text{przyśpieszenie } a = \frac{1962}{3{,}5} = 563 \text{ cm/sek}^2,$$

t. j. kamyk tonący spada co sekunda prędzej przeszło o $5\frac{1}{2}$ metra na sekundę.

2) Do poziomej rury szklanej wpuszczono ziarno grochu, ważące $\frac{1}{2}$ grama; przy mocnym dmuchnięciu, groch wylatuje, przyczym nabywa w rurze przyśpieszenia 80 m/sek². Z jaką siłą powietrze wypycha ziarno grochu z rury?

Rozw. Masa grochu = $\frac{1}{2}$ g, przyśpieszenie 80 m/sek² = 8 000 cm/sek². Zatym

siła $p = \frac{1}{2} \times 8\,000 = 4\,000$ dyn
czyli 4 000 : 981 = prawie 4 gramy.

3) Wózek porusza się po gładkiej podłodze pod działaniem nakręconej sprężyny, z przyśpieszeniem 18 cm/sek². Ile wynosi masa wózka, jeżeli sprężyna wywiera ciągnienie 10 g, niezmienne w czasie krótkiego przebiegu wózka?

Rozw. Siła = 10 × 981 = 9810 dyn, zatym

$$\text{masa } m = \frac{9810}{18} = 545 \text{ gramów.}$$

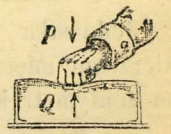
§ 16. Statyczny pomiar sił.

1. Prawo działania i oddziaływania (trzecia zasada dynamiczna Newtona, 1687). Każde działanie siły wywołuje równe mu i wprost przeciwne oddziaływanie (reakcję).

Na powyższym pewniku opiera się statyczny sposób mierzenia sił, przez zrównoważenie jednej siły za pomocą drugiej. Gdyby na ciało działała jedna tylko siła, musiałaby ciało poruszyć (§§ 14 i 15); zapobiedz poruszeniu może tylko siła równej wartości a przeciwnego kierunku, zwana *oddziaływającą*. Tę ostatnią siłę zowiemy także *oporem*. Skoro siła i opór wzajemnie się znoszą, ciało się nie porusza, czyli jest w *równowadze* (por. § 14, art. 1).

Jeżeli w życiu powszednim często nie zdajemy sobie sprawy z oddziaływania, dzieje się to z powodu sztywności ciał, która oddziaływanie ukrywa przed naszym wzrokiem i dotykiem, np. przy staniu na podłodze, pisaniu kredą, albo też z powodu niezmiernej plastyczności, bądź sypkości, np. przy grzęźnięciu w mokrej glinie, kopaniu ziemi łopatą. Wyraźnie natomiast objawia się zasada oddziaływania w ciałach sprężystych.

Przykłady. Ręka, cisnąca na poduszkę, odczuwa nawzajem ciśnienie ze strony poduszki (rys. 41). — Palce splecione odczuwają wzajemny ucisk, gdy jeden z nich usiłujemy do drugiego przycisnąć lub oderwać. — Podnoszenie; podpieranie; pociąganie za sznur. — Wzajemne przyciąganie się magnesu i żelaza. — Odskok broni przy wystrzale.



Rys. 41. Oddziaływanie.

Szczególnie wyraźnie ujawnia się oddziaływanie na wadze sprężynowej. Zawiesza się na niej ciężarek za pomocą nitki; sprężyna się wyciąga i wskazuje np. 3 g. Skoro waga jest w spoczynku, działa na koniec sprężynki w dół ciężar 3 g, a do góry napięcie sprężyste = 3 g. za przepaleniem nitki obie siły ujawniają się w ruchach: ciężarek spada, sprężyna raptownie odskakuje do góry.

2. Ciężarowa miara sił. Gdy siła sprawia nacisk lub ciągnienie w ciałach nieruchomych, wielkość nacisku lub ciągnienia stanowi ciężarową miarę siły.

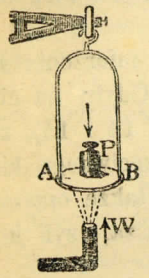
Przyczyny lub ciągnienia mogą być rozmaite: może je sprawiać wiatr, ciężar atmosfery, prężność pary, sprężystość gumy lub stali, siła mięśni, przyciągania elektryczne i magnetyczne.

Każda z tych sił może być wymierzona za pomocą innej, najdogodniej więc wartość wszelkich sił, rozmaitego pochodzenia i rodzaju, wyrazić w mierze jednej siły, mianowicie przez porównanie z siłą ciężkości.

Ciężar stanowi miarę praktyczną wszelkich sił.

Jednostką siły statyczną jest ciężar *1 kg*
lub pochodne: *1 gram*, *1 tonna*.

Np. siłę wiatru, t. j. prądu powietrza dmącego z rury W, mierzy ciężar P na szalce wagi; skoro szalka nie podnosi się ani opada (rys. 42), siła wiatru wyraża się ciężarem na wadze.



Rys. 42.
Siła = ciężar.

Siłę sprężystości drutu skręconego, np. w wadze sprężynowej (pt.), wyraża ciężar; podobnież siłę mięśni, siłę pociągową lokomotywy, przyciąganie magnesu i t. p. wyraża się w kilogramach.

3. Ciśnienie. Siła, której działanie rozpościera się na pewną powierzchnię, zowie się *naciskiem* lub *parciem*, np. książki na stół, wody na dno beczki, wiatru na żagiel. Nacisk zaś na jednostkę powierzchni, np. na 1 cm², 1 m² i t. p., zowie się *ciśnieniem*.

Tak więc, ciśnienie wyraża siła, działająca na jednostkę powierzchni.

Potocznie pod nazwą ciśnienia rozumiemy niekiedy ciśnienie ogólne, t. j. parcie na dowolną powierzchnię; w nauce zaś ciśnienie znaczy tyle co natężenie owego parcia, t. j. parcie na jednostkę powierzchni.

Z określenia wynika, że ciśnienie mierzy się stosunkiem wartości siły do wielkości pola czyli powierzchni:

$$\text{ciśnienie } p = \frac{P}{q} = \frac{\text{parcie}}{\text{pole}} = \frac{\text{siła}}{\text{powierzchnia}}.$$

Jednostka więc ciśnienia wyraża się ilorazem jednostek siły i powierzchni; mierzymy ciśnienia w kilogramach na metr kw., lub kilogramach na centymetr kw., lub w gramach na centymetr kw. i t. p. Praktyczna

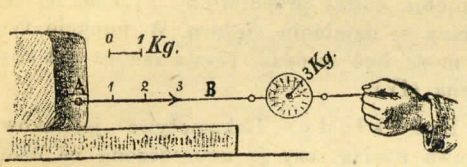
$$\text{jednostka ciśnienia} = \frac{kg}{cm^2}.$$

Wynosi ona prawie tyle, co ciśnienie powietrza na każdy cm² powierzchni ziemi, stąd zowie się w technice *atmosferą* (pt.).

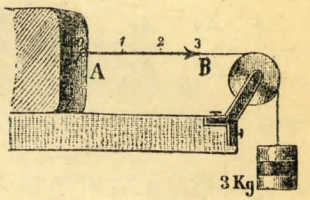
W układzie bezwzględnym za jednostkę ciśnienia służy $\frac{dyna}{cm^2}$ czyli *barja*, prawie 0,000 001 atmosfery: jednostka ta jest zbyt mała do celów praktycznych.

4. Graficzne przedstawienie siły. Z określenia siły wypływa, że siła należy do wielkości kierunkowych (§ 12, art. 2); oznaczamy ją więc wektorem, który wykazuje wszystkie trzy cechy siły: punkt działania, kierunek i wartość. Rys. 43 i 44 wyobrażają wektory dwu sił odmiennego pochodzenia, a jednakowej wartości i kierunku: siły ciągnienia ręki i ciężaru.

Przykłady. 1) Punkt A (rys. 43), gdzie przywiązano sznurek, za który ciągnie ręka, jest punktem zaczepienia siły; kierunek AB wyprężonego sznurka stanowi kierunek siły, a istniejące w sznurze ciągnienie, jakie wskazuje dynamometr (3 kg), wyraża wartość siły ręki.



Rys. 43. Wykreślenie siły.



Rys. 44.

2) Ciągnienie ręki zastępuje na rys. 44 ciągnienie ciężaru (3 kg), który sprawia oczywiście takie same działanie.

D) NAUKA O RÓWNOWADZE SIŁ.

(STATYKA)

§ 17. Siły rozbieżne o wspólnym punkcie działania.

1. Przesunięcie siły. Punkt działania każdej siły można przesunąć w jej kierunku, bez żadnego wpływu na skutek działania tej siły. Twierdzenie to oczywiście odnosi się do ciał stałych i wytrzymałych tyle, że siła nie sprawia w nich zmian wyraźnych, jak wyciągnięcia, rozerwania i t. p. Opiera się zaś na pewniku Newtona:

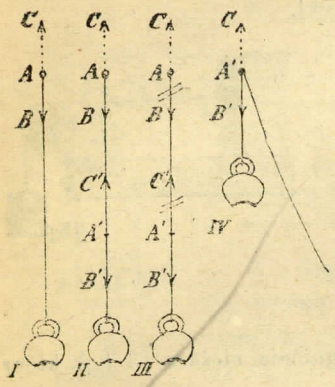
Dwie siły równe a przeciwne znoszą się wzajemnie, czy to działając na ten sam punkt ciała, czy też na dwa jakiekolwiek punkty, byleby położone na linji działania sił.

Np., przerzuciwszy sznurek przez stół tak, aby końce jego zwisały swobodnie, uczepia się na końcach równe ciężary; żaden ciężar nie przeważy.

Przesuwanie punktu działania stosuje się zarówno w praktycznym zastosowaniu sił, jak w teorji składania i rozkładania sił.

Ciężar, wiszący na długim sznurku (rys. 45), I), ma punkt działania w A, np. na gwoździu; jeżeli wektor AB daje wielkość i kierunek działania ciężaru, wektor AC równy AB stanowi oddziaływanie gwoździa. Nie zmieni się jedno ani drugie, skoro ciężar wisi na sznurze krótszym (rys. 45, IV). Można sobie bowiem wystawić dwie siły $A'B'$ i $A'C'$ równoważne

ciężarowi, a przeciwne sobie, (II), t. j. na kierunku ciężaru;



Rys. 45.

przyłożone do punktu dowolnego A' na sznurku siły te nic nie wpłyną na działanie ciężaru, po odrzuceniu zaś sił AB i $A'C'$, jako znoszących się wzajemnie (III), pozostaje siła $A'B'$, równa ciężarowi AB; zatym punkt zaczepienia został przeniesiony z A do A' bez zmiany w działaniu ciężaru. W punkcie tym A' może być gwóźdź, reszta sznura jest zbyteczna (IV).

Przykłady. Lokomotywa jednakowo posuwa pociąg, czy ją umieszczono na czele wagonów, czy z tyłu lub pomiędzy wagonami. — Waga zegarowa ciągnie tak samo, wisząc na krótkim, jak na długim łańcuchu.— Dźwigi (windy). — Pędnie pasowe (transmisje).

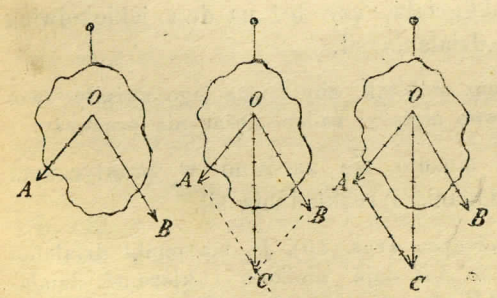
3. Równoległobok sił. Składanie sił odbywa się podobnie jak składanie ruchów.

Dwie lub więcej sił można zastąpić jedną siłą *wypadkową*, np. siłę kilku ludzi przez siłę jednego konia; siły, jakie ona zastępuje, zowią się *składowymi*. Siła, równoważąca wypadkową albo składową siłę, nazywa się *równoważną*.

Twierdzenie powyższe, zwane *zasadą niezależności sił*, stanowi naturalną podstawę do składania sił, podobnie jak zasada niezależności ruchów służy do składania szybkości (§ 12, art. 3).

Najprostszy przypadek zachodzi, gdy dwie siły mają wspólny punkt działania, który jest oczywiście punktem działania i dla siły wypadkowej. Stosuje się tu reguła, zwana *równoległobokiem sił*, odpowiednio do równoległoboku szybkości (§ 12, art. 4).

Wypadkowa dwu sił, działających na jeden punkt, wyraża się, co do wartości i kierunku, przekątnią równoległoboku, wystawionego na danych siłach.



Rys. 46.

a) Rozwiązanie graficzne, za pomocą wektorów (rys. 46). Wykreśla się wektory sił OA i OB, działających na punkt O ciała, odpowiednio do kierunków i wartości tych sił, np. $OA = 4$ kg, $OB = 5$ kg (I), poczym wystawia się na nich równoległobok i wykreśla się przekątnię OC, która jest wektorem wypadkowej, w danym wypadku $= 7$ kg (II).

Albo też przesuwa się jeden z wektorów, np. OB, do końca drugiego wektora A, zachowując jego kierunek, i zamyka się otrzymane 2 boki trójkąta trzecim bokiem OC, który stanowi wypadkową (III).

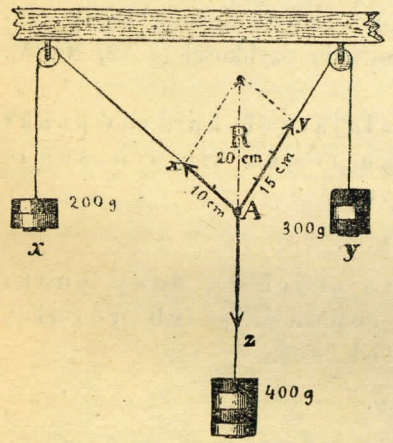
Wynika stąd, że wypadkowa jest mniejsza od sumy si składowych, a większa od ich różnicy.

b) Doświadczenie (rys. 46). Przez dwa bloczki stałe przerzuca się sznurek, obciąża się go między bloczkami ciężarem z, a na końcach ciężarami x i y. Ciężary te, odpowiednio dobrane, równoważą się wzajemnie.

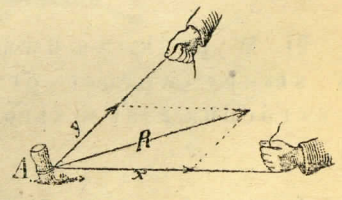
Tak więc, w jednym punkcie A mogą się równoważyć 3 siły x, y, z. Z tych 2 siły x i y powstrzymują ruch, jakiby sprawiła trzecia siła z, gdyby działała sama. Podobnie ruch siły z możnaby powstrzymać jedną siłą R, równą i przeciwnie skierowaną do z; zatym obie siły x i y działają tak samo, jak jedna siła R.

Siła więc B jest wypadkową dla x i y; siła z, znosząca ich działania, jest równoważną.

W doświadczeniu (rys. 47) ciężary x, y, z muszą być w odpowiednim stosunku, ażeby nastąpiła równowaga. Stosunek wynosi tu 2 : 3 : 4 (x=200 g, y=300 g, z=400 g); wykreśla się odpowiedni rysunek wektorjalny. Skoro wytnę np. kartkę papieru w postaci równoległoboku o kącie A i bokach przyległych długości 2 : 3 (np. 10 cm i 15 cm), i przyłożę ją tak, aby bok krótszy (10 cm) przystawał do kierunku mniejszej siły x (200 g), a dłuższy do kierunku większej, to wypadkowa ($R = 400$ g) i co do kierunku, i co do wielkości (20 cm) odpowiada przekątni równoległoboku.



Rys. 47. Siła równoważna.



Rys. 48.

Podobny wynik otrzymuje się i przy innym stosunku ciężarów; zmienia się tylko postać rownoległoboku, a stosunek 3 ciężarów równa się stosunkowi dwu boków i przekątni.

c) Teoretycznie można uzasadnić równoległobok sił jako wynik równoległoboku szybkości (§ 12, art. 4), ponieważ siły są proporcjonalne do przyśpieszeń, które ciału nadają, a zatym i do odnośnych szybkości. Mianowicie, gdyby na ciało A o masie m działały osobno siły x i y, nadałyby mu w ciągu czasu t odpowiednio przyśpieszenia (§ 13, art. 3, przy $c=0$)

$$a_1 = \frac{v_1}{t} \qquad a_2 = \frac{v_2}{t}.$$

Że zaś $x = ma_1$, $y = ma_2$, wynika

$$x : y = v_1 : v_2.$$

Przykłady. Obalanie drzewa podciętego, ściąganie statku z mielizny, wyrywanie korzenia lub kołka za pomocą sznurów, uwiązanych w jednym miejscu (rys. 48).

3. Składanie kilku sił, działających na jeden punkt, odbywa się tak samo, jak składanie szybkości (pt.). Graficznie sprowadza się do równoległoboku sił, podobnie jak tam do równoległoboku szybkości; wszystkie czynności i rozważania w myśl § 12, art. 6.

4. Siły na jednej linji prostej. Dwie siły mogą działać na jeden punkt linji prostej bądź w tę samą stronę, bądź w przeciwne strony. Jeden i drugi przypadek można uważać za szczególną postać równoległoboku sił, gdzie kąt a pomiędzy siłami wynosi 0° dla sił zwróconych w jedną stronę, bądź 180° dla sił przeciwnych; stosuje się tu rozważanie, jak przy dodawaniu i odejmowaniu szybkości (§ 12, Nr. 5). Wynika stąd:

1) Wypadkowa dwu sił, działających na dany punkt zgodnie, w jednakowym kierunku, równa się ich sumie i skierowana jest w tę samą stronę.

$$R = x + y.$$

2) Wypadkowa dwu sił, działających na dany punkt w strony wprost przeciwne, równa się ich różnicy i zwrócona jest w stronę siły większej:

$$R = x - y.$$

Doświadczenia. 1) Ciężar 5 kg i 2 kg, zawieszone jeden pod drugim na wadze sprężynowej, wyciągają sprężynę tak samo, jak jeden ciężar 7 kg.

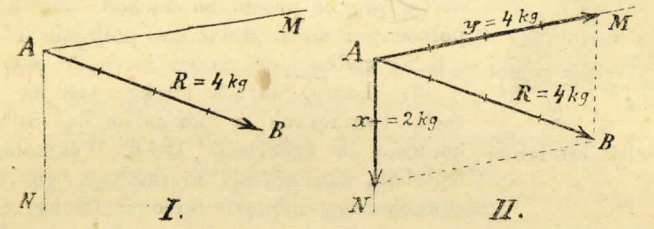
2) Ciężar 5 kg, wiszący na wadze sprężynowej, należy oprzeć na szalce wagi zwykłej, a na drugą szalkę położyć 2 kg, trzymając wagę sprężynową tak wysoko, aby waga zwykła była w równowadze; wtedy waga sprężynowa wskazuje 3 kg.

5. Rozkład siły. Każdą siłę można rozłożyć na dwie inne o wspólnym punkcie działania, skoro dane są kierunki obu sił, albo ich wartości, albo wartość i kierunek jednej z nich.

Rozkład siły podług wiadomych kierunków zachodzi bardzo często w naturze i w zastosowaniach praktycznych; mianowicie siła rozkłada się, gdy napotyka opór, którego kierunek nie jest zgodny z kierunkiem siły (rys. 50, 51, 52).

Rozwiązanie graficzne (rys. 49). Rozkład siły według danych kierunków sił składowych polega na tem, że siłę daną poczytujemy za przekątnię równoległoboku; z wykreślenia powstają wektory sił składowych jako boki równoległoboku.

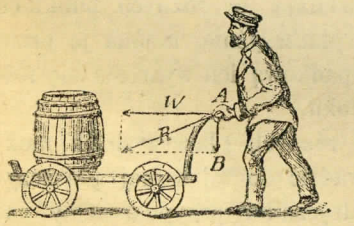
Z końca wektora danej siły R, np. = 4 kg, wyobrażonej odcinkiem



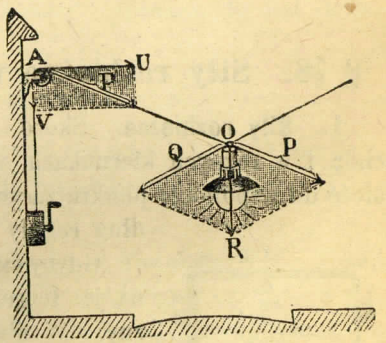
Rys. 49. Rozkład siły R.

AB (I), wykreśla się linje równoległe do danych dwu kierunków AM i AN, przez co otrzymuje się wektory $x = 2$ kg i $y = 4$ kg sił składowych (II).

Przykład 1. Skoro na ciało ruchome (rys. 50) działa siła R, rozkłada się na dwie części składowe, z których jedna W działa w kierunku ruchu i zowie się *składową kinetyczną*, druga B w kierunku doń prostopadłym, w którym ciało nie może się poruszać; ta ostatnia jest *składową statyczną*.



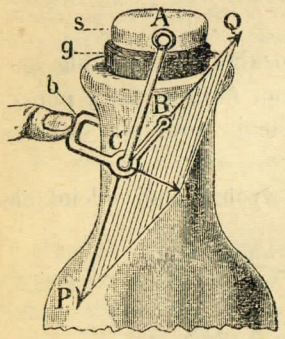
Rys. 50. Rozkład siły R.



Rys. 51. Rozkład ciężaru lampy R.

Przykład 2. Ciężar lampy (rys. 51) rozkłada się na dwie siły P i Q, sprawiające napięcia sznurów. Można zauważyć, że napięcia te będą tym znaczniejsze, im bardziej sznury zbliżają się do linji poziomej. Nadto zachodzi jeszcze rozkład siły P na ciągnienie U, usiłujące oderwać rolę A od muru, i ciągnienie V, usiłujące ją zsunąć po murze.

Przykład 3. W zacisku butelkowym (rys. 52) nacisk R palca rozkłada się na dwie siły P i Q, daleko większe niż sam nacisk R.



Rys. 52. Zacisk butelkowy.

Zadania.

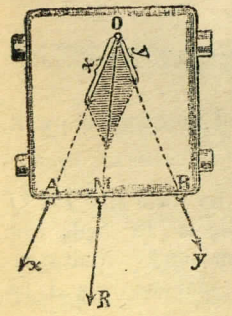
1. Za linę ciągną dwa grona ludzi w kierunkach przeciwnych, jedni siłą 20, 25, 15 i 30 kg, drudzy 18, 23, 21, 24 kg. Jaki będzie wynik? Czy można zamiast liny użyć postronka o przekroju 15 mm²? Wytrzymałość postronka=5 kg/mm². 2. Parowiec przebywa a mil morskich na godzinę, płynąc prosto na wschód: zrywa się wiatr północny i unosi statek na południe również o a mil na godzinę. W jakim kierunku statek płynie? 3. Lampa, ważąca 10 kg, wisi na dwu sznurach, tworzących z poziomem kąt 30°, oznaczyć napięcie w sznurach. Odp. Wykreślając równoległobok, zauważymy, że składają go 2 trójkąty równoboczne; napięcie więc = 10 kg.

4. Obraz zawieszono na sznurze, idącym od rogu do rogu obrazu, tak iż każda część sznura tworzy z poziomem 30°. Jakie ciągnienie znosi każda połówka sznura, jeżeli obraz waży 400 g? Odp. 400 g.

5. Do przewiezienia bryły marmurowej objętości 1 m³ potrzeba siły wynoszącej $\frac{1}{10}$ wagi marmuru; do bryły uwiązano dwie liny poziome, tworzące z kierunkiem ruchu kąt 45° na prawo i lewo. Jakiej potrzeba siły? Czy starczą liny o przekroju 1 cm²? Wytrzymałość lin wynosi 2 kg/mm², ciężar wł. marmuru = 2,7. Odp. Z konstrukcji wypada kwadrat, którego bok stanowi wektor siły x, przekątnie są wektorami sił o wartości $\frac{1}{10}$ wagi kloca; x = 191 kg; lina wytrzyma.

§ 18. Siły rozbieżne w ogólności. Moment obrotu.

1. Siły rozbieżne. Skoro dwie siły działają w różnych punktach ciała i w różnych kierunkach, w tej samej płaszczyźnie, można je przenieść do wspólnego punktu zaczepienia, a wypadkową ich wykreśla się według reguły równoległoboku.



Rys. 53.

Gdyby siły działały w różnych płaszczyznach, można je teoretycznie prowadzić do tej samej płaszczyzny. W niniejszym podręczniku przypuszczamy zawsze siły w jednej płaszczyźnie, mianowicie położone w płaszczyźnie rysunku.

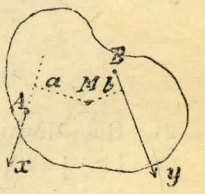
Wykreślenie. Przedłużone kierunki sił x i y (rys. 53) spotykają się w O; do punktu O przenosi się oba wektory x i y i wystawia na nich równoległobok, którego przekątnia daje wektor wypadkowej R. Tę ostatnią można, jeśli to pożądane, przenieść do punktu M na jednej linji prostej z punktami zaczepienia A i B sił danych.

2. Moment obrotu. Skoro siła działa na ciało ruchome około stałego punktu albo linji prostej, zwanej *osią*, usiłuje ona ciało obrócić. Działanie siły zależy tu od dwu czynników: od wartości siły oraz jej odległości od osi; odległość ta mierzy się prostopadłą, wystawioną od osi do kierunku siły i zowie się *ramieniem siły* (rys. 54).

Iloczyn z wartości siły i jej ramienia stanowi *moment obrotu* danej siły względem osi.

Moment obrotu = $x \,.\, a$ = siła × ramię.

Ażeby ciało utrzymać w spoczynku, trzeba je poddać drugiemu momentowi, równemu a przeciwnemu, t. j. działaniu siły, nadającej ciału obrót w przeciwną stronę i oddalonej stosownie od osi. Takie równoważące się momenty obrotu zowią się inaczej *momentami statycznymi*. Jeżeli jeden z nich przyjmiemy za dodatni, mianowicie obracający ciało zgodnie z ruchem skazówek zegarowych, drugi jest momentem ujemnym.



Rys. 54.

Tak więc, moment obrotu odgrywa podobną rolę w ruchu obrotowym, jak siła w ruchu postępowym: moment pobudza ciało do obracania się, siła do posuwania prosto.

Na punkt A ciała, ruchomego około osi M (rys. 54), działa siła x, na punkt B siła y; ramię siły x stanowi prostopadła a, spuszczona z M na kierunek x, ramię siły y stanowi b prostopadła do y. Moment by jest dodatni, moment ax ujemny.

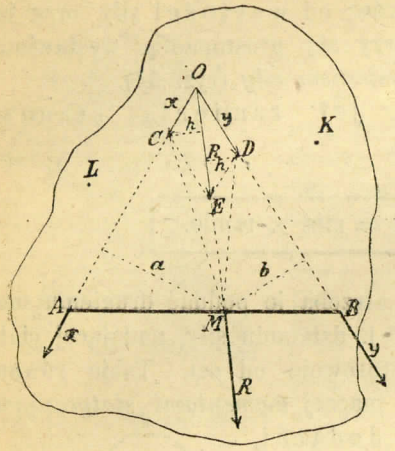
3. Prawo momentów. 1) Dla pary momentów:

Ciało jest w spoczynku, skoro momenty obu sił względem osi, przechodzącej przez kierunek wypadkowej, są równe sobie i przeciwne.

Niech siły x i y (rys. 55) dają wypadkową o kierunku OM. Jeżeli oś obrotu ciała przechodzi przez punkt M, ramionami są linje a i b, prostopadłe do kierunków x i y. Warunek równowagi ciała wyraża się wzorem:

moment jednej siły	$x \,.\, a = y \,.\, b$	moment drugiej siły.

Dowód (rys. 55). Siły x i y, działające na ciało w punktach A i B, przeniesione do wspólnego punktu O (jak w art. 1), dają wypadkową R na zasadzie równoległoboku $OCED$. Połączywszy punkty A i B, przedłuża się siłę $R = OE$ i przesuwa ją do punktu M, leżącego na prostej AB; punkt M łączy się z C i D oraz wykreśla się zeń prostopadłe a i b do kierunków danych sił x i y. Trójkąty MCO i MDO są równoważne, mają bowiem wspólną podstawę MO i równe wysokości h. Pola tych trójkątów można także wyrazić przez $OC \times \frac{1}{2} a = OD \times \frac{1}{2} b$; że zaś $OC = x$, $OD = y$, wypada $ax = by$.



Rys. 55.

Oś M może przypadać niekoniecznie na prostej AB między punktami działania sił, ale w dowolnym punkcie na kierunku wypadkowej OE (§ 17, art. 1).

2) Dla dowolnej liczby momentów:

Ciało jest w spoczynku, skoro suma algebryczna momentów względem osi, przechodzącej przez kierunek wypadkowej, równa się zeru.

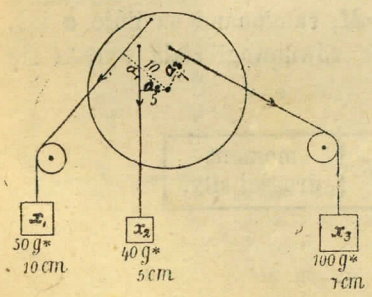
Niech siły x_1, x_2, x_3... działają odpowiednio na ramiona a_1, a_2, a_3..., przyczym momenty a_1x_1, a_2x_2 obracają ciało przeciwnie, niż obieg skazówek zegara, moment a_3x_3 zgodnie; wtedy (por. rys. 56)

$$— a_1x_1 — a_2x_2 + a_3x_3 \ldots = 0$$

albo krócej, oznaczając ogólnie sumę Σ, siłę x, ramię a:

$$\Sigma (x \cdot a) = 0.$$

Ogólniejsze to prawo momentów wynika z poprzedniego (rys. 55). Można bowiem w punkcie dowolnym K przyłożyć jakąś siłę i odpowiednio zrównoważyć jej moment przez powiększenie momentu siły x; wtedy będą działały 3 momenty. Można dalej przyłożyć nową siłę w innym punkcie L i zrównoważyć przez powiększenie momentu y; będą wtedy 4 momenty i t. d.



Rys. 56.

Doświadczenie (rys. 56). Do krążka tekturowego, osadzonego na poziomej osi, przyczepia się kilka ciężarków na niciach, przerzucając niektóre nici przez rolki czyli bloczki, aby otrzymać rozmaite kierunki sił (blok nie zmienia wartości siły, bo siły działają nań w równych odstępach od osi). Krążek się nie obróci, skoro dobrano odpowiednio ciężarki i odległości ich od osi, np. 50 g i 40 g z jednej strony osi, w odległościach 10 cm i 5 cm, a 100 g z drugiej strony, w odległości 7 cm; wtedy

$$— 50 \cdot 10 — 40 \cdot 5 + 100 \cdot 7 = 0.$$

Prawo momentów odnosi się zarówno do sił, działających w jednej płaszczyźnie (rys. 54, 55, 56), jak w różnych płaszczyznach, prostopadłych do osi, zatem równoległych do siebie; przesunięcie bowiem siły do innej płaszczyzny, z zachowaniem jej kierunku, nie zmienia momentu, skoro oba jego czynniki są te same (ax). Przy zastosowaniu zaś sił, działających w rozmaitych płaszczyznach, ukośnych względem osi, zachodzi rozkład sił według reguły równoległoboku, tak iż wszystkie siły sprowadza się do płaszczyzn prostopadłych względem osi. W ten sposób prawo momentów stanowi najogólniejszy warunek równowagi ciał, pod działaniem sił jakiegokolwiek pochodzenia, kierunku i wartości.

Przy obracaniu korby nie robi różnicy, czy się naciska koniec rączki, jej środek lub miejsce osadzenia na kole, np. pedał roweru, korba dźwigi, (windy), młynka do kawy; rozumie się tu nacisk prostopadły do korby, zatem i do osi, jak bywa zawsze w praktyce. Gdyby naciskano ukośnie, nastąpiłby rozkład siły (§ 17, art. 5), a stąd działanie słabsze (wykreślić!)

4. Przykłady sił rozbieżnych i momentów. Dźwiganie kufra za dwie antaby przez dwie osoby, przyczym ręce są skierowane ukośnie do siebie. — Ściąganie statku z mielizny przy użyciu lin, przywiązanych po bokach statku i ciągnionych ku brzegom rzeki.—Złamanie kija, ujętego za końce i naciśniętego kolanem pośrodku.

Podtrzymywanie chylącego się słupa, drzewa. — Obracanie korby w rozmaitych maszynach. — Podważanie ciężarów drągiem; (wogóle równowaga maszyn prostych typu dźwigni, pt. „Dźwignia", „Blok", „Kołowrót").

§ 19. Siły równoległe.

1. Siły równoległe można rozpatrywać jako szczególny przypadek sił rozbieżnych (§ 18, art. 1), gdy kąt pomiędzy nimi zmniejsza się do 0. Dla sił równoległych, czy to zgodnie skierowanych, czy przeciwnie, istnieje zawsze wypadkowa, którą się oznacza bądź ze wzorów, podanych w mechanice szczegółowej (pt.), bądź przez wykreślenie geometryczne. Wyjątek stanowią dwie równe a przeciwnie skierowane siły równoległe, przy których równowaga ciała jest niemożliwa, t. j. niema wypadkowej.

Punkt działania siły wypadkowej, położony na jednej linji prostej z punktami działania sił składowych, nazywa się *środkiem sił równoległych*; ma on położenie stałe, t. j. niezależne od kierunku danych sił względem linji łączącej ich punkty działania.

2. Dwie siły równoległe i zgodnie skierowane dają wypadkową, która się równa ich sumie, działa między danymi siłami w kierunku równoległym i zgodnym. Punkt działania wypadkowej można wyznaczyć na prostej, łączącej punkty działania składowych; znajduje się on w odległościach odwrotnie proporcjonalnych do wartości sił (t. j. bliżej ku sile większej).

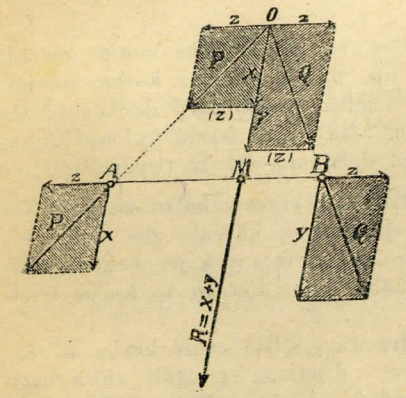
Skoro na punkty A i B (rys. 57) ciała stałego działają siły $x \downarrow\downarrow y$, to ich wypadkowa

$$R = x + y \qquad R \downarrow\downarrow x \downarrow\downarrow y.$$

Punkt M działania wypadkowej wyznacza się na prostej AB tak, aby

$$AM : BM = y : x.$$

Dowód. Połączywszy punkty zaczepienia A i B sił x i y (rys. 57) linją prostą, dodaje się do A i do B po równej i przeciwnej sile z, co nie zmienia działania sił. Powstają dwie pary sił rozbieżnych, na których wystawiamy równoległoboki i otrzymujemy wypadkowe P i Q.



Rys. 57. Składanie sił równoległych zgodnych.

Siły P i Q, jako nierównoległe i położone w tej samej płaszczyźnie, po przedłużeniu spotykają się kierunkami swymi w punkcie O; przenosimy je tam i przez O prowadzimy linję równoległą do x i y oraz równoległą do AB, a rozkładając przeniesione P i Q, otrzymujemy przy O takie same równoległoboki, jak przy A i B. Siłę P zastępują tu siły x i z, siłę Q zastępują y i z, ponieważ z i z się znoszą, pozostaje działanie dwu sił x i y na punkt O. Wypadkowa tych sił równa się ich sumie, oraz jest do nich równoległa:

$$R = x + y. \qquad R \parallel x \parallel y.$$

Przeniósłszy punkt zaczepienia wypadkowej R do punktu M na linji AB, otrzymujemy 2 pary trójkątów podobnych, jednę po lewej stronie linji OM, drugą po prawej, skąd wynika:

$$AM : MO = z : x$$
$$BM : MO = z : y$$

Z podziału zaś

$$\frac{AM}{BM} : 1 = 1 : \frac{x}{y} \text{ czyli}$$
$$AM : BM = y : x$$

t. j. odległości M od A i B są w odwrotnym stosunku do wartości sił. Z konstrukcji widać zarazem, że środek sił równoległych jest zawsze w M, jakkolwiekby się zmieniało nachylenie sił x i y względem AB.

Punkt M działania wypadkowej można oczywiście (§ 17, art 1) obrać gdziekolwiek na jej kierunku, np. O; wtedy jednak nie stosuje się doń warunek proporcjonalności, wymieniony w drugiej części twierdzenia.

3. Dwie siły równoległe, zwrócone w przeciwne strony, dają wypadkową, która się równa ich różnicy, działa poza siłą większą, równolegle, w stronę siły większej. Punkt działania wypadkowej można wyznaczyć na prostej, przechodzącej przez punkty działania składowych; znajduje się on w odległościach odwrotnie proporcjonalnych do wartości sił.

Skoro na punkty A i B (rys. 58) ciała stałego działają siły $x \downarrow\uparrow y$, przyczym $x > y$, to ich wypadkowa

$$R = x - y \qquad R \downarrow\downarrow x \downarrow\uparrow y.$$

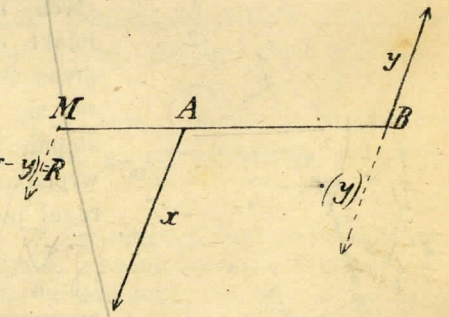
Punkt M działania wypadkowej wyznacza się na przedłużeniu prostej AB w stronę A tak, aby

$$MA : MB = y : x.$$

Dowód. Większą siłę x (rys. 58) rozkłada się na dwie siły równoległe, z których jedna $= y$ działa na punkt B, druga $R = x - y$ (ponieważ $R + y = x$) działa na punkt M, którego miejsce wypada z proporcji:

$$y : R = AM : AB$$

$$AM = AB \cdot \frac{y}{R} = AB \frac{y}{x-y}.$$

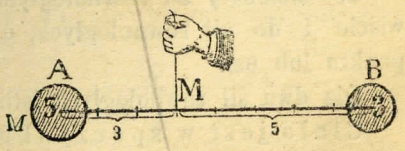


Rys. 58. Składanie sił równoległych przeciwnych.

Z tej samej proporcji wynika:

$$(y + R) : y = (AM + AB) : AM$$
$$x : y = BM : AM.$$

Wyjątkowy przypadek zachodzi, skoro obie równoległe siły x i y są równe i przeciwnie skierowane; wtedy $R = 0$, a odległość $AM = \infty$, t. j. punkt M leży w nieskończoności. Siły takie nie dadzą się zastąpić jedną siłą wypadkową; stanowią one t. zw. *parę sił* i wprawiają ciało w ruch obrotowy, gdy tymczasem jedna siła mogłaby ciału nadać tylko ruch postępowy (§ 13, art. 3).

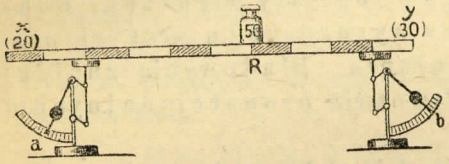


Rys. 59. Doświadczalne wyznaczenie środka sił równoległych.

4. Przykłady. 1) Składanie sił równoległych. Na końcach pręta osadzono kule A=5 kg i B=kg (rys. 59). Ażeby zrównoważyć pręt, należy go po-

dzielić na 5 + 3 = 8 równych części i zawiesić w odległości $AM = 3$ części od kuli A. Uczepiając sznur M do wagi sprężynowej, otrzymamy wyciągnięcie sprężyny równoważne 8 kg (ciężar samego pręta powinien być nieznaczny, aby go można było pominąć).

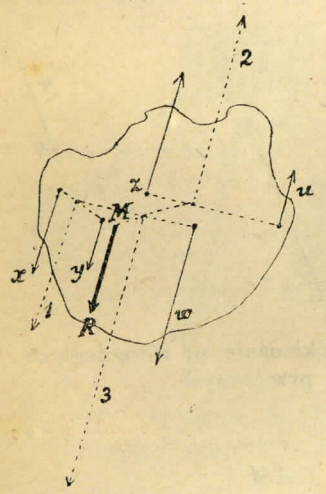
2) Rozkład siły na dwie równoległe. Na dwu ważkach listowych opiera się końce lekkiej listwy, podzielonej na 10 części (rys. 60) i uważa się wskazania obu ważek (jednakowe, np. po 10 g). Za położeniem następnie na listwie ciężarka 50 g, w odległości 6 części od x, obie ważki wskażą nowe odchylenia: lewa a 20 g, prawa b 30 g. To samo będzie po zdjęciu 50 g, a położeniu w x ciężarka 20 g, w y 30 g.



Rys. 60. Doświadczalny rozkład ciężaru R.

5. Kilka i więcej sił równoległych, zwróconych czy to zgodnie, czy przeciwnie, składa się w ten sam sposób.

Wypadkowa dowolnej liczby sił równoległych równa się ich sumie algebrycznej. Punkt działania wypadkowej wyznacza się przez składanie sił po dwie: naprzód oznacza się wypadkową dla dwu obranych sił, następnie dla dwu innych i t. d., a otrzymane wypadkowe składa się znów po dwie, podług reguł poprzednich (art. 2 i 3).



Rys. 61.

Niechaj siły x, y, z, w, u (rys. 61) działają na ciało, wszystkie równolegle do siebie, przyczym 3 siły x, y, w są zwrócone jednakowo, na dół, 2 zaś siły z, u przeciwnie. Z dwu sił x i y powstaje wypadkowa 1, równa ich sumie, a mająca punkt działania na prostej, łączącej dane punkty, w odległościach proporcjonalnych do wektorów $y : x$. Podobnież ze złożenia z i u powstaje wypadkowa 2, równa sumie tych sił; z sił 1 i w powstaje wypadkowa 3, równa sumie $1 + w$; wreszcie z dwu sił otrzymanych 2 i 3, zwróconych przeciwnie, powstaje wypadkowa R, równa różnicy sił 3 i 2, albo równa sumie algebrycznej wszystkich sił:

$$R = x + y - z + w - u.$$

6. Momenty sił równoległych. Prawo momentów stosuje się oczywiście i do sił równoległych, o ile ciało jest obracalne dokoła stałego punktu lub osi.

Dla dwu sił równoległych istnieje warunek:

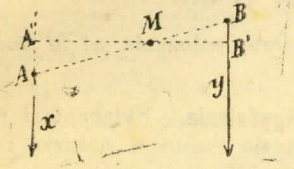
Ciało jest w spoczynku, gdy odległości sił od wypadkowej są w stosunku odwrotnym do wartości sił.

Dla sił bowiem x i y (rys. 62), działających w A i B na ciało obracalne w punkcie M, po wyprowadzeniu z M prostopadłych MA' i MB', można napisać (§ 18, art. 3):

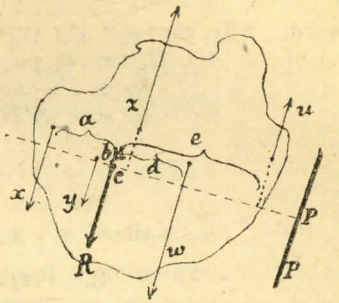
$$MA' \times x = MB' \times y$$

skąd

$$MA' : MB' = y : x.$$



Rys. 62.



Rys. 63.

Podobnież dla kilku sił równoległych momenty statyczne otrzymuje się drogą krótkiego wykreślenia, ramiona bowiem wszystkich sił przypadają na wspólnej linji prostej, poprowadzonej dowolnie, byleby prostopadłej do kierunku sił.

Momenty można liczyć, zatym i ramiona odmierzać względem dowolnego punktu (P), niekoniecznie do punktu działania wypadkowej (M, rys. 63).

Prowadząc przez punkt działania M wypadkowej linję prostopadłą do kierunku sił x, y, z, w, u, i zważywszy, że momenty względem punktu M są dla x, y, z, u ujemne, dla w dodatni, otrzymamy:

$$-xa - yb - zc + wd - ue = 0.$$

Względem zaś punktu P lub prostej PP momenty będą miały inną wartość i znaki, ale zawsze suma algebryczna momentów wszystkich sił równa się zeru.

Wypisać równanie momentów, oznaczając ramiona sił x, y, z, w, u na wspólnej linji PM, względem punktu P, mając na uwadze, że momenty sił z i u są dodatnie, zaś sił x, y, w ujemne.

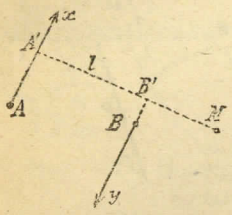
7. Moment pary sił. Dla pary sił, t. j. dwu równych sił równoległych, zwróconych w przeciwne strony, suma algebryczna momentów nie może być zerem (o ile kierunek sił nie przechodzi przez oś); nie mogą więc one się równoważyć, natomiast sprawiają obrót ciała. Stąd nazwa *moment obrotowy pary*; wyraża on się iloczynem z wartości jednej siły przez odległość między siłami:

Moment pary $= x \cdot l =$ siła $\times$ odległość sił.

Moment pary ma tę samą wartość dla każdego punktu dowolnego, czyli niezależną od położenia osi. Jak widać bowiem ze wzoru, wchodzi doń odległość obu sił od siebie, nie od osi.

Dowód. Siły równe x i y (rys. 64), działające równolegle a przeciwnie do siebie w A i B, tworzą po wyprowadzeniu z M prostopadłej $MB'A'$ do x i y moment pary $= x \times MA' - y \times MB' = x \times A'B' = xl$, przyczym oczywiście

$$xl > 0.$$



Rys. 64.

Ten sam wynik dałoby położenie osi M pomiędzy siłami x i y.

8. Przykłady i zagadnienia. Składanie i rozkład sił równoległych trafia się często w naturze i w najbliższym naszym otoczeniu.

Wszelkie ciężary w pokoju, jak meble, ludzie, wywierają na podłogę nacisk, który się udziela ścianom, rozkładając się na szereg sił pionowych, zatem równoległych do siebie— Ciężar wazonu, stojącego na stole o 3 nogach, rozkłada się na 3 siły równoległe (wykreślić!) —Ciągnienie konia, zaprzężonego do wozu; ciągnienie pary koni. — Kierat. — Uderzenie ziarn gradowych o ziemię. — Uderzenie śrócin, wystrzelonych z dubeltówki.

§ 20. Środek ciężkości.

1. Środkiem ciężkości (punktem ciężkości) nazywa się punkt, gdzie można sobie wyobrazić jakby skupiony ciężar całego ciała.

Wynika to z pojęcia o środku sił równoległych (§ 19, art. 1). Każde ciało składa się z cząstek; każda cząstka ma pewien ciężar; a kierunki wszystkich tych ciężarów, jako pionowe, są do siebie równoległe. Ze składania ciężarów cząstek powstaje wypadkowa, która wyraża ciężar całego ciała, a punkt działania tej wypadkowej jest środkiem ciężkości. Tak więc, punkt działania ciężaru ciała jest środkiem ciężkości.

Wyjaśnia to rys. 65, gdzie strzałki 1, 2, 3... stanowią wektory ciężarów poszczególnych cząstek, R wektor wypadkowej, równy sumie wektorów cząstkowych, przyłożony w punkcie S, który jest środkiem ciężkości. Linja pionowa przez środek ciężkości nazywa się *linją ciężkości*.

Środek ciężkości jest zarazem *środkiem masy*, t. j. punktem, w którym można sobie wyobrazić skupioną masę całego ciała. Ciężar bowiem każdej cząstki ciała jest wynikiem przyciągania masy tej cząstki do ziemi.

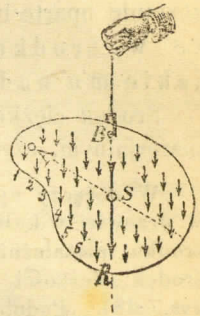
Położenie środka masy i ciężkości wtedy jest to samo, jeżeli ciało ma wymiary niewielkie, aby można było ciężary każdej cząstki uważać za siły równoległe, a odległości cząstek od ziemi za jednakowe.

2. Położenie środka ciężkości. Za poruszeniem ciała zmienia się położenie cząstek względem ziemi, ale nie zmienia się punkt działania, ani wartość i kierunek ich ciężarów, tak iż wypadkowa (R) ma zawsze ten sam kierunek i ten sam punkt działania (S). Wynika stąd:

Środek ciężkości ma miejsce stałe względem ciała.

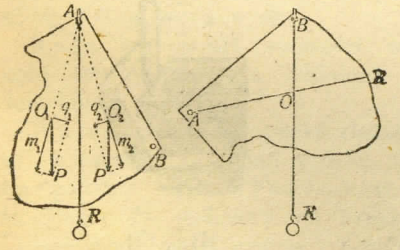
Przy zawieszeniu ciała w jednym punkcie środek ciężkości musi zawsze przypadać na linji pionowej, przechodzącej przez punkt zawieszenia, a przytym w najniższym położeniu, jakie ciało może przybrać. To samo odnosi się do ciał opartych.

Środek ciężkości dąży do zajęcia najniższego położenia. Linja zaś ciężkości przechodzi przez punkt zawieszenia lub oparcia, o ile ciało jest w spoczynku.

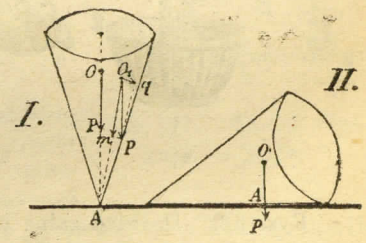


Rys. 65. Środek ciężkości wogóle.

Istotnie, gdyby w zawieszonym np. kawałku blachy (rys. 66, z lewej strony) środek ciężkości wypadł gdziekolwiek z boku od pionu AR, przechodzącego przez miejsce zawieszenia A, np. w punkcie O_1, to rozkładając siłę P, czyli ciężar ciała, otrzymamy siły m_1 i q_1; z tych siła m_1 znosi się przez opór w punkcie zawieszenia A, siła zaś q_1 pociągnie ciało na prawo, aż punkt O_1 przypadnie na pionie AR i przyjmie położenie najniższe. Taki sam rozkład zajdzie w razie przypuszczenia, że środek ciężkości znajduje się na prawo w punkcie O_2.



Rys. 66.



Rys. 67.

W przedmiocie opartym, np. stożku (rys. 67), również punkt ciężkości O musi się znaleźć na pionie, wystawionym z punktu oparcia A. Inaczej, np. gdyby był w O_1, jak widać z rozkładu ciężaru P, ciało przewróciłoby się, a linja ciężkości przeszłaby przez nowe oparcie na krawędzi stożka; przytym środek ciężkości zająłby najniższe położenie.

W rzeczywistości niepodobna tu uniknąć drgań niewidocznych, które zsuwają linję ciężkości OP, z pionu w punkcie oparcia A. Ciało się chyli i przybiera nowe położenie, zdradzając tem samem dążenie środka ciężkości ku dołowi.

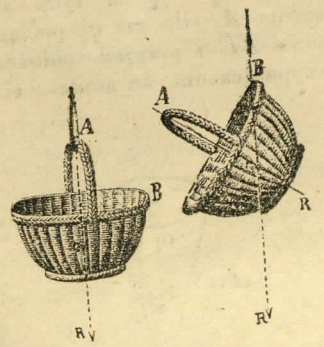
Ponieważ do środka ciężkości przenosi się ciężar wszystkich cząstek, położenie tych cząstek nie ma wpływu na położenie ciała, skoro ciało, zostanie oparte lub zawieszone w środku ciężkości. Stąd ciało, oparte w środku ciężkości, zachowuje każde położenie, jakie mu nadano.

Środek ciężkości jest punktem idealnym, matematycznym, nie zaś materjalnym, czyli fizycznym.

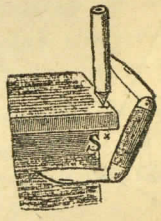
W obręczy np. drewnianej leży w jej środku, czyli w powietrzu, nie w drzewie; w kuli wydrążonej, czy w kuli pełnej, punkt ciężkości jest w jej środku, niezależnie od materjału kuli i jej napełnienia. W koszu próżnym środek ciężkości przypada we wnętrzu, t. j. w przestrzeni powietrznej (G, rys. 68). Podobnież bywa w układzie ciał różnorodnych (rys. 69, gdzie punkt ciężkości jest poniżej ołówka, w S).

3. Wyznaczanie środka ciężkości odbywa się bądź z doświadczenia, bądź na drodze teoretycznej; ostatnie stosuje się dla ciał foremnych, t. j. mających kształt matematycznie określony.

1) Doświadczalnie oznacza się punkt ciężkości przez dwukrotne zawieszenie ciała (rys. 66 oraz 68).



Rys. 68. Doświadczalne oznaczanie środka ciężkości.



Rys. 69.

Zawieszając dany przedmiot w jakimkolwiek punkcie (A), zaznacza się przedłużenie sznurka; następnie zawiesza się w innym punkcie (B) i znów zaznacza się dalszy ciąg sznurka. Oba przedłużenia spotykają się, wskazując środek ciężkości przedmiotu.

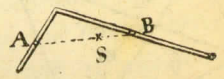
Istotnie, środek ciężkości musi się znajdować na linji pionowej pod punktem zawieszenia, tak w jednym jak w drugim wypadku. Przy powtórnem zawieszeniu ciało przybiera inne położenie, zaznaczone zaś dwie linje proste (AR i BR, rys. 66 i 68) przecinają się w jednym punkcie (O).

2) Geometrycznie wyznacza się środek ciężkości najłatwiej drogą wykreślenia.

Przykłady:

Linja prosta (materjalna, np. cienki drut prosty) ma środek ciężkości na połowie swej długości, ponieważ tyleż cząstek leży po jednej, co po drugiej stronie od środka linji.

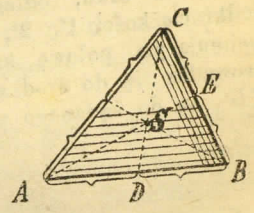
Linja łamana (np. cienki drut przegięty, rys. 70) ma środek ciężkości na prostej, łączącej środki obu części linji łamanej. Każda bowiem z tych części ma śr. ciężkości pośrodku, w A i B; ażeby oznaczyć, gdzie mianowicie leży S na linji AB, trzeba uważać A i B za punkty zaczepienia ciężarów, odpowiednich do długości każdej z tych części.



Rys. 70. Środek ciężkości drutu załamanego.

W kole punkt ciężkości leży w środku, w kwadracie, prostokącie, równoległoboku na przecięciu obu przekątni.

W trójkącie punkt ciężkości leży na przecięciu linji środkowych, t. j. łączących środek każdego boku z wierzchołkiem kąta przeciwległego (rys. 71). Jeżeli bowiem trójkąt zostanie podzielony na paski niezmiernie wąskie, a równoległe do boku AB, punkt ciężkości każdego paska leży w jego środku, zatym punkt ciężkości trójkąta musi leżeć na linji środków DC. Podobnież można podzielić trójkąt na paski równoległe do BC i otrzymać linję AE środków ciężkości każdego paska. Spotkanie S linji CD i AE stanowi środek ciężkości trójkąta. Geometrja uczy, że punkt S leży na $\frac{1}{3}$ każdej z linji środkowych.



Rys. 71. Środek ciężkości trójkąta.

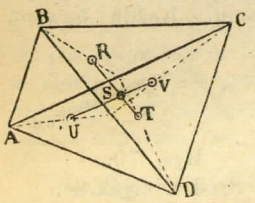
Kula ma punkt ciężkości w środku, gdyż punkt ten jest równo oddalony od całej powierzchni.

Walec prosty ma punkt ciężkości na połowie swej wysokości, t. j. linji prostej, łączącej środki obu podstaw walca. Podzieliwszy bowiem walec równolegle do podstawy na krążki o jednakowej a niezmiernie małej grubości i zaznaczywszy punkt ciężkości każdego krążka w jego środku, otrzymamy linję wysokości walca; od środka tej linji w górze i na dole będzie tyleż krążków jednakowych.

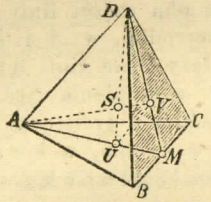
W czworokącie oznaczenie środka ciężkości jest bardziej zawiłe. Czworokąt należy podzielić na 2 trójkąty BAC i DAC (rys. 72) i oznaczyć ich środki ciężkości R i T; punkt ciężkości czworokąta musi leżeć na linji RT. Ażeby oznaczyć jego miejsce, dzieli się czworokąt na dwa inne trójkąty ABD i CBD i oznacza ich środki ciężkości U i V. Na spotkaniu linji RT i UV znajduje się środek ciężkości S czworokąta.

Ostrosłup trójścienny (piramida trójścienna) ma środek ciężkości na spotkaniu linji, łączących punkt ciężkości każdej ściany z wierzchołkiem kąta przeciwległego (rys. 73). Jeżeli U jest punktem ciężkości podstawy ABC, na linji DU leży środek ciężkości zarazem wszystkich równoległych do podstawy tabliczek, na jakie wyobrażamy sobie podzielony cały ostrosłup. Podobnież skoro V jest punktem ciężkości ściany BCD, otrzymujemy drugą linję AV środków ciężkości, w kierunku tej ściany. Obie linje AV i DU spotykają się w punkcie S, który jest środkiem ciężkości ostrosłupa. Geometrja uczy, że punkt S leży na $\frac{1}{4}$ linji ciężkości DU od podstawy ABC.

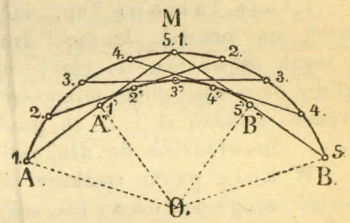
Stożek ma środek ciężkości również na prostej, łączącej wierzchołek z podstawą w odległości $\frac{1}{4}$ tej linji od podstawy.



Rys. 72. Środek ciężkości czworokąta.



Rys. 73. Środek ciężkości ostrosłupa.



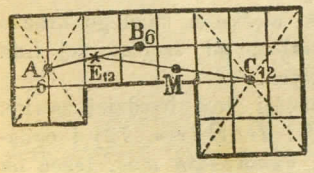
Rys. 74. Środek ciężkości łuku.

W łukach środek ciężkości daje się oznaczyć tylko w przybliżeniu. Jeżeli M jest środkiem łuku AB (rys. 74), łączy się pary punktów 11, 22, 33... na łuku, odległe od siebie o połowę AM łuku, i oznacza się ich środki ciężkości 1′, 2′, 3′... Leżą one na łuku współśrodkowym $A'B'$, obejmującym połowę kąta środkowego O. Tą drogą środek ciężkości AB sprowadza się do środka ciężkości $A'B'$; podobnież postępuje się z łukiem $A'B'$, aż do żądanego przybliżenia.

Zadania.

1. Oznaczyć środek ciężkości krzesła.

2. Drut długi na 24 cm przegięto tak, iż części jego mają długość 18 cm i 6 cm. Oznaczyć środek ciężkości.



Rys. 75.

3. Kwadrat z blachy przegięto po przekątni tak, iż obie połówki tworzą kąt 90°. Oznaczyć środek ciężkości.

4. Koło rozpędowe, wagi 95 kg, ma tuż przy obwodzie, o 2,20 m od środka ciężar dodatkowy 15 kg. O ile przesunął się wskutek tego środek ciężkości? Odp. Podzielić odległość AO (rys. 74), w stosunku 95 : 15 części.

5. Gdzie należy oprzeć tekturkę, postaci wyobrażonej na rys. 75, aby była w równowadze?

Rozw. Jak widać z ryciny, tekturkę można podzielić na 24 równe kwadraty: $3\times2 + 2\times3 + 3\times4 = 24$.

Wypadkowa dla pierwszych 6 kwadratów ma punkt oparcia w A, dla drugich 6 w B, dla trzecich 12 w C. Zamiast A i B, można mieć wypadkową ciężaru 12 kwadr. w punkcie E; wreszcie zamiast E i C wypadkową wszystkich 24 kwadr. w punkcie M.

§ 21. Równowaga ciężarów.

1. Równowaga ciał ma miejsce wtedy, gdy ciało znajduje się pod działaniem sił wzajemnie przeciwnych i równych, t. j. znoszących się wzajemnie (§ 15, art. 1). Najpospolitszą jest równowaga ciał pod wpływem siły ciężkości, czyli równowaga ciężarów.

Każde ciało dąży ku środkowi ziemi. Ażeby ciała powstrzymać od upadku, należy je zawiesić lub oprzeć na trwałej podstawie, np. wszystkie przedmioty w pokoju. Zawieszenie lub oparcie nie nadaje jeszcze ciału zupełnie trwałego położenia: środek ciężkości pod działaniem sił może zmieniać miejsce w przestrzeni. Ciało bowiem może wahać się około swego punktu zawieszenia, albo około krawędzi swej podstawy. Skoro ciało po takich poruszeniach punktu ciężkości powraca do spoczynku, oznacza to stan warunkowej równowagi.

Wogóle *równowagą* nazywa się stan spoczynku ciała, pomimo działania sił.

2. Rodzaje równowagi. Rozróżnić wypada trojaki stan równowagi ciał pod wpływem ciężkości:

1) *Równowaga stała* jest wtedy, gdy ciało po odchyleniu powraca do pierwotnego położenia, np. lampa wisząca, rozmaite sprzęty w pokoju, waga (pt. także rys. 66, 68, 77).

2) *Równowaga niestała* (chwiejna, chwilowa), gdy ciało po wychyleniu nie powraca do pierwotnego położenia. Ciało może tu chwilowo tylko być w spoczynku, np. kij postawiony na stole. Pozornie równowaga niestała może trwać dłużej, skoro ciało chwieje się około swego środka ciężkości; w rzeczywistości jest to szereg nowych położeń ciała, t. j. nowych stanów równowagi niestałej, np. kij postawiony na ręku i utrzymywany jej ruchami, cyklista na rowerze (pt. także rys. 67, I).

3) *Równowaga obojętna*, gdy ciało zachowuje każde położenie, jakie mu nadano, np. piłka na podłodze, koło na osi (pt. także rys. 67, II).

3. Warunki równowagi. Otaczają nas przeważnie ciała stojące lub leżące, t. j. spoczywające na pewnej podstawie; rzadziej spotykamy przedmioty wiszące; jedne i drugie bywają zwykle w równowadze stałej, mniej często w obojętnej.

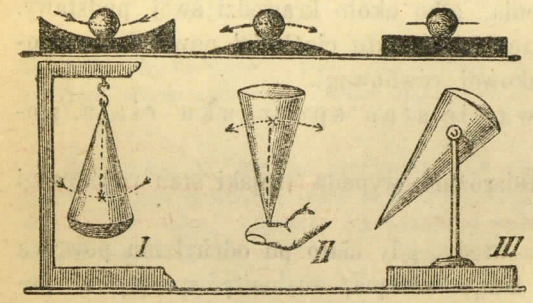
a) W najprostszym przypadku ciało opiera się lub wisi zaczepione w jednym punkcie; równowaga zachodzi wtedy, gdy punkt oparcia przypada na linji ciężkości.

Jeżeli środek ciężkości znajduje się poniżej punktu oparcia, ciało ma równowagę stałą (rys. 76, I); jeżeli wyżej punktu oparca — niestałą (II); jeżeli w samym punkcie oparcia — obojętną (III).

Przykłady. 1) Kula na powierzchni wklęsłej, wypukłej i płaskiej (rysunek 76).

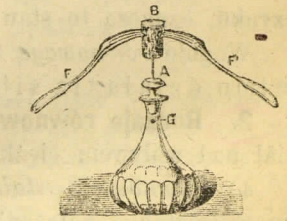
2) Stożek zawieszony wierzchołkiem, postawiony wierzchołkiem lub obracany w środku ciężkości (rys. 76).

3) Prosty sposób uzyskania na jednym przyrządzie wszystkich trzech rodzajów równowagi objaśnia rys. 77. Jeżeli wetknąć w korek igłę i dwa widelce i oprzeć całość, jak wskazuje rycina, będzie równowaga stała, bo środek ciężkości całego przedmiotu wypada poniżej ostrza igły (dlaczego?), np. w G. Wetknięcie widelców tak, aby trzonki były zwrócone ku górze, daje równowagę chwiejną (dlaczego?). Wreszcie, nadając widelcom położenie średnie, można po pewnych próbach otrzymać równowagę obojętną.



R. stała. R. niestała. R. obojętna.

Rys. 76.

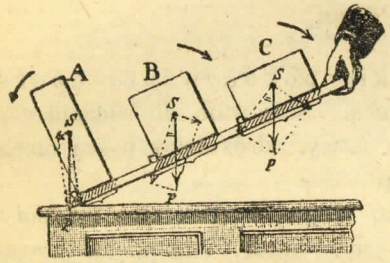


Rys. 77.

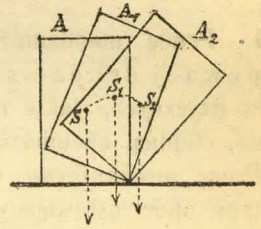
b) Ciała stojące lub leżące, wogóle opierające się na jakiejś podstawie, czyli w wielu punktach, nie leżących na linji prostej (najmniej na trzech, albowiem 3 punkty określają położenie płaszczyzny), znajdują się w równowadze stałej. Jednakże za przechyleniem ciało stojące może przejść do równowagi chwiejnej, a następnie przewrócić się, t. j. przybrać inne położenie.

Dla ciał stojących zabezpieczenie im stałego położenia czyli pewność równowagi, wymaga, by linja ciężkości przechodziła przez podstawę. Pod wyrazem „podstawa" rozumiemy figurę płaską, objętą linjami prostymi, łączącymi punkty oparcia. Ciało stoi tym pewniej, im obszerniejszą ma podstawę, im jest cięższe, oraz im niżej leży środek ciężkości.

Na rys. 78 ciała B, C pozostaną na miejscu, ciało A upadnie (objaśnić to rozkładem sił); widać tu zarazem, że ciało położone szerszą stroną stoi pewniej, niż to samo ciało, postawione na stronie węższej. Na rys. 79 ciało A odchylone do położenia A_1 stanie napowrót, odchylone do A_2 przewróci się.

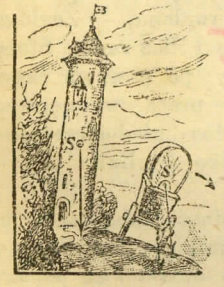


Rys. 78. Równowaga ciał, spoczywających na podstawie.



Rys. 79.

4. Ogólny warunek równowagi. Przy poruszeniu każdego ciała, czy to opartego w jednym, czy wielu punktach, środek ciężkości bądź podnosi się względem oparcia, bądź zniża się, bądź pozostaje na tym samym poziomie; zauważyć to łatwo na rys. 76 oraz 79. Dla wszelkich więc ciał można wyprowadzić ogólny warunek równowagi: skoro przy wychyleniu ciała podnosi się punkt ciężkości, równowaga jest stałą; skoro się zniża, niestałą: skoro zachowuje ten sam poziom, obojętną; rozumie się przytym warunek, że punkt oparcia nie zmienia położenia. Ogólna ta reguła wypływa ze znanej własności, że środek ciężkości dąży do najniższego położenia (§ 20, art. 2).



Rys. 80.



Rys. 81.

Zastosowania. Stojąca postawa człowieka. — Pochylenie się naprzód człowieka, gdy niesie ciężar na grzbiecie, a w tył, gdy niesie ciężar na rękach. — Słupy o szerokiej podstawie. — Świeczniki, lampy, obciążone u dołu ołowiem. — Wieża pochyła (rys. 80). — Wóz wysoko naładowany przewraca się (rys. 80), gdy taki sam wóz nisko obciążony, zniósłby podobne przechylenie. — Szklaneczki niewywrotne, o spodzie kulistym, bardzo grube u dołu; por. równowagę korka, obciążonego u dołu ołowianą półkulą (rys. 81, objaśnić).

E) NAUKA O PRACY I ENERGJI.

(ENERGETYKA).

§ 22. Praca.

1. Praca mechaniczna. Wszelkie pokonywanie oporów na pewnej drodze zowie się *pracą*. Stosownie do rodzaju czynników fizycznych, jakie biorą udział w pracy, odróżniamy pracę mechaniczną, cieplną, chemiczną, elektryczną.

Pracę mechaniczną wykonywa siła, gdy porusza ciało i napotyka przytym opór ustawiczny. Podnosząc np. ciężar, siła mięśni pracuje, przez cały bowiem czas podnoszenia ciężar naciska rękę, czyli stawia opór, przeciwdziałający podnoszeniu.

Praca objawia się w ruchu ciał, hamowanym w jakikolwiek sposób, np. bezwładnością, tarciem, oporem powietrza lub wody, ciśnieniem, uderzaniem wstecznem. Sam nacisk, choćby największy, nie jest pracą. Niema również pracy w ruchu ciała swobodnym, bez przeszkody; istnieje wtedy tylko zdolność do wykonania pracy, czyli energja (pt.).

Przykłady. Wyciąganie kubłem wody ze studni. — Przygniecenie sprężyny w materacu. — Wchodzenie na schody. — Nakręcanie zegara. — Popychanie wozu. — Zakorkowanie butelki. — Wzlot aeroplanu. — Żegluga.

Niektóre objawy pozornie świadczą o możliwości pracy bez ruchu. Stojąc np. nieruchomo lub opierając się ręką na stole, czujemy po pewnym czasie zmęczenie; tutaj zachodzi praca ukryta mięśni, czyli praca wewnętrzna: mięśnie drgają kurczowo, czyli wykonywują ruchy, choćby niedostrzegalne; nazewnątrz zaś organizmu praca ujawnia się wtedy rzadko (stoliki i ekierki wirujące).

Koło luźno wirujące nie wykonywa pracy, jeśli pominąć słabe tarcie na osi i opór powietrza; raz poruszone, obraca się dalej skutkiem bezwładności i nie potrzebuje nakładu siły. Natomiast koło, pędzące warsztat za pomocą pasa, daje pracę, wymagając ciągłego działania siły, inaczej staje niebawem.

2. Miara pracy mechanicznej składa się, zgodnie z określeniem pracy, z dwu miar: siły i długości. W praktyce za jednostkę siły przyjęto kilogram, za jednostkę długości metr; stąd powstaje praktyczna

jednostka pracy *kilogramometr* (kgm) = kg × m

t. j. praca wykonana przez siłę 1 kg na drodze 1 metra. Najprostszym przypadkiem tej jednostki jest praca podnoszenia ciężaru 1 kg na wysokość 1 m. Obojętny jest przytem rodzaj siły i postać drogi, ciało można podnosić ciągnieniem ręki, ciśnieniem pary, i t. p.; droga może być prosta, krzywa, łamana.

W obliczeniach fizycznych dyna stanowi jednostkę siły (§ 15), centymetr jednostkę długości; stąd używana w układzie bezwzględnym

jednostka pracy *erg* = dyna × cm

t. j. praca 1 dyny wzdłuż drogi 1 centymetra. Erg jest nadzwyczaj małą jednostką pracy; to też stosuje się często wielokrotność erga, zwłaszcza w dziedzinie elektryczności (pt. „Dżul").

Z podstawienia: kilogram = 981 000 dyn, metr = 100 cm, wynika, że

kilogramometr = 981 000 × 100 = 981 . 10^5 ergów.
(prawie 100 miljonów ergów)

3. Wzór pracy. Z założenia wynika, że wartość pracy jest proporcjonalna do siły działającej oraz do drogi przebytej, skoro siła jest 2, 3, 4... razy większa, praca wykonana musi być tyleż razy większa; podobnież ma się rzecz co do drogi.

Przypuszczamy tutaj, jak i we wszystkich dalszych rozważaniach, że siła działa w kierunku drogi, po jakiej ciało się posuwa.

Jeżeli więc siła P działa na drodze s, to wykonana

praca $L = P \cdot s$ = siła × droga
albo w kgm / w ergach — kg / dynach — m / cm

t. j. praca wyraża się iloczynem z wartości siły przez długość drogi.

Wzór powyższy wskazuje, że wartość pracy nie zależy od tego, czy wykonywa ją siła w ciągu czasu dłuższego lub krótszego, gdyż czas nie wchodzi do wzoru; czas wpływa tylko na skutek pracy czyli sprawność (§ 23). Skoro $s = 0$, również $L = 0$; bez ruchu więc niema pracy.

Przykłady. 1) Robotnik, wchodząc po drabinie pionowej na wysokość drugiego piętra = 10 m, podnosi tym samym ciężar własnego ciała = = 65 kg. Praca = 65 × 10 = 650 kgm, bez względu na to, czy wejście trwało pół minuty, 1 minutę lub więcej, czy odbywało się z przerwami, czy jednym ciągiem.

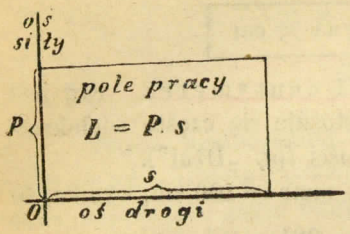
2) Tramwaj elektryczny przebył drogę od jednego przystanku do drugiego = 200 m; do poruszania tramwaju potrzeba siły 140 kg. Praca = = 140 × 200 = 28000 kgm, bez względu na czas i równość biegu.

4. Praca dodatnia i ujemna. Pracę, jaką wykonywa siła, posuwając dane ciało, zowiemy *dodatnią*; siła zaś przeciwdziałania ciała wykonywa pracę *ujemną*, t. j. ciało otrzymuje pracę. Obie prace są równej wartości: skoro jedna = Ps, druga = $-Ps$.

Dodatnia więc praca ma miejsce, gdy siła działa w stronę ruchu; ujemna, gdy siła przeszkadza ruchowi.

Przykłady. Naciąganie cięciwy łuku, a przeciwdziałanie cięciwy. — Parcie wiatru, pędzące statek, a opór wody. — Rzut piłką do góry.

5. Wykreślenie pracy (rys. 82). Praca nie da się wyobrazić wektorem, t. j. praca nie jest wielkością kierunkową.



Rys. 82. Wykres pracy.

Na jednej z osi spółrzędnych odmierza się odcinek P odpowiedni wartości siły, na drugiej odpowiedni drodze s; pole utworzonego na tych linjach prostokąta $P \cdot s$ wyraża wartość pracy.

6. Zamiana pracy (przetwarzanie, transformacja). Pracę wyraża iloczyn dwu czynników, siły i drogi; wartość więc jej pozostanie bez zmiany, skoro siła zmniejszy się, a droga powiększy się tyleż razy, albo naodwrót, siła wzrośnie, a droga się zmniejszy:

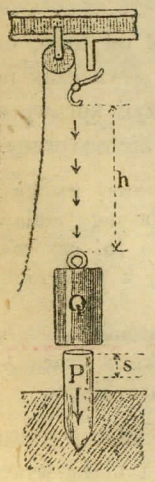
$$L = \left(\frac{P}{n}\right) \times (s \cdot n) = P \cdot s$$

albo

$$L = (P \cdot n) \times \left(\frac{s}{n}\right) = P \cdot s.$$

Przyrządy, sprawiające taką przemianę pracy, bez zmiany jej wartości, zowią się *maszynami*.

Maszyna jest przetwórcą pracy.



Rys. 83. Baba.

Liczba (n), wyrażająca, ile razy zmniejsza się wartość siły lub drogi, przy zamianie pracy, zowie się *przekładnią*.

Prosty przykład na przetwarzanie pracy stanowi t. zw. *baba* (rys. 83), ciężka kłoda, używana do wbijania pali. Spadając z wysokości kilku metrów, baba wywiera ciśnienie daleko większe, niż sam jej ciężar. Jeżeli ten ostatni $Q = 100$ kg, a wysokość spadku $h = 4$ m, to praca $L = Q \cdot h = 400$ kgm. Pracę tę otrzymuje pal, który zostaje wtłoczony w ziemię siłą P na głębokość s; skoro $s = \frac{1}{5}$ m, siła $P = L : s = 400 : \frac{1}{5} = 2000$ kg. Tutaj więc droga pala jest 20 razy mniejsza, niż baby, natomiast siła wbijania pala 20 razy większa od wagi baby. Liczba $n = 20$ jest tu przekładnią.

7. Zasada zachowania pracy. Pomijając straty nieuniknione w praktycznym zastosowaniu maszyn, np. wskutek tarcia, można ująć wynik ich działania w regułę, którą w starożytności, dla jej cennej roli praktycznej, nazwano *złotą regułą mechaniki*:

Co się zyskuje na sile, to się traci na drodze, a tym samym i na szybkości. Można więc małą siłą podźwignąć ogromny ciężar, ale bardzo nieznacznie, a zarazem ciężar podnosi się bardzo wolno. W pojęciu spółczesnym reguła złota stanowi szczególny przypadek *zasady zachowania pracy*:

praca wykonania równa się pracy włożonej.

Znaczy to, że zysk na sile zapotrzebowanej, czy też na drodze przebytej, nie jest bynajmniej zyskiem na pracy: praca po jej przetworzeniu zawsze ma wielkość taką samą, jaka była przedtem. Gdyby było inaczej, np. gdyby kosztem małej pracy można było osiągnąć większą, musielibyśmy przypuścić, że praca może powstać z niczego.

Błędne to przeświadczenie w dawniejszych czasach, przed poznaniem prawa zachowania pracy, było powodem daremnych wysiłków celem wynalezienia „perpetuum mobile", maszyny, któraby raz w ruch puszczona wiecznie pracowała, bez udziału jakiejkolwiek siły.

W mechanice zasada powyższa czyli złota reguła stosuje się nie tylko do maszyn prostych i użytych pojedyńczo, ale i do całego szeregu maszyn choćby najbardziej złożonych.

Przykład. Robotnik zapomocą korby, kół, wałów i łańcuchów otwiera upust młyński. Okazuje się, że potrzeba 8 obrotów korby, aby podnieść zastawę, ważącą 1000 kg, o 10 cm; ręka, obracająca korbę, zatacza koło o obwodzie 2,5 m. Jaką siłą robotnik obraca korbę?

Rozw. Droga s siły $P = 8 \cdot 250 = 2000$ cm
„ h ciężaru 1000 kg ... $= 10$ cm

Stąd $P \times 2000 = 1000 \times 10$
$P = 5$ kg.

§ 23. Sprawność.

1. Sprawnością (dzielnością, efektem) nazywamy pracę wykonaną w ciągu jednej sekundy. Sprawność można uważać jako skutek pracy: im krótszy jest czas wykonania tej samej pracy, tem większy jej skutek czyli sprawność. Zachodzi więc stosunek odwrotny między czasem a sprawnością.

Przykłady. Wejście na piętro wymaga tego samego nakładu pracy mięśniowej, czy się idzie wolniej, czy prędzej; wartość ogólna tej pracy zawsze wyrazi się wyniesieniem ciężaru ciała na wysokość piętra. Jednakże szybkie wchodzenie wymaga większego wysiłku, stąd męczy bardziej niż

powolne, dając natomiast lepszy skutek: przy wchodzeniu 2 razy prędszym możnaby tę samą drogę odbyć 2 razy w danym czasie, t. j. osiągnąć wynik podwójny. — Woda, sącząc się kroplami z kranu do wanny, napełni ją wreszcie, a wykona pracę taką samą, jak wlewając się strumieniem aż do napełnienia wanny, skutek jednak w ostatnim wypadku będzie nieporównanie większy.

2. Miara sprawności mechanicznej wynika z jej określenia: składa się ona z jednostki siły, długości i czasu. Skoro siłę wyrażono w kilogramach, drogę w metrach, czas w sekundach, powstaje zasadnicza praktyczna

$$\text{jednostka sprawności } \textit{kilogramometr} \text{ na } \textit{sekundę} = \frac{\text{kg} \times \text{m}}{\text{sek}}$$

t. j. praca wykonana przez siłę 1 kg na drodze 1 metra w ciągu 1 sekundy.

Do większych zaś sprawności, jakimi posiłkują się fabryki, komunikacje i t. p., służy jednostka 75 razy większa, zwana *koniem parowym* albo, wedle nowszej terminologji, *koniem mechanicznym*. Tak więc

$$\text{koń mechaniczny, koń parowy } (HP) = 75\ \frac{\text{kg} \times \text{m}}{\text{sek}}$$

t. j. 75 kilogramometrów na sekundę.

Nazwa „koń parowy" powstała stąd, że jednostka powyższa, zastosowana pierwotnie do maszyn parowych, mniej więcej odpowiada sprawności konia w zaprzęgu. Znak *HP* pochodzi od ang. Horse (koń)-Power (siła). Należy jednak mieć na uwadze, że przy długotrwałej pracy, np. całymi godzinami, sprawność konia żywego jest mniejsza od konia mechanicznego, wynosi $\frac{2}{3}$, a nawet $\frac{1}{2}$ *HP*; natomiast przy wysiłkach niedługich, jak pociągnięcie wozu pod górę, koń żywy przewyższa sprawnością konia mechanicznego.

Przykłady. Sprawność rozmaitych maszyn waha się w szerokich granicach: w małych warsztatach pracują maszyny o sprawności przynajmniej 2 do 3 *HP*, w młynach i wiatrakach 10 do kilkudziesięciu *HP*, na kolejach 200, 300 do kilkuset *HP*, na dużych okrętach 10 000 do 30 000 *HP*.— Człowiek przy dłuższej, usilnej pracy fizycznej wydaje średnio $\frac{1}{8}$ do $\frac{1}{12}$ *HP*, chwilowo nawet $\frac{1}{2}$ *HP*. Do powolnej jazdy na rowerze wystarcza na drodze równej, poziomej, $\frac{1}{10}$ *HP*; do szycia na maszynie $\frac{1}{30}$ *HP*.

W układzie bezwzględnym za jednostkę sprawności przyjęto

$$\textit{erg} \text{ na } \textit{sekundę} = \frac{\text{dyna} \times \text{cm}}{\text{sek}}$$

t. j. praca 1 dyny wzdłuż drogi 1 centymetra w ciągu 1 sekundy. Jednostka ta jest nadzwyczajnie mała; to też stosuje się często jej wielokrotność, mianowicie w dziedzinie elektryczności (pt. „wat", „kilowat").

Z uwzględnienia, że kilogramometr = 981 . 10^5 ergów, wypada, że

$$1\ HP = 75 \cdot 981 \cdot 10^5 = \text{okr. } 7\tfrac{1}{3} \text{ miljardów } \frac{\text{erg}}{\text{sek}}.$$

3. Wzór sprawności wyraża stosunek pracy do czasu, zgodnie z określeniem sprawności:

$$\text{Sprawność } K = \frac{L}{t} = \frac{\text{praca}}{\text{czas}} \text{ albo } = \frac{P \cdot s}{t} = \frac{\text{siła} \times \text{droga}}{\text{czas}}.$$

albo K w kgm/sek, L w kgm, t w sek, P w kg, s w metrach
K w erg/sek, L w ergach, t w sek, P w dynach, s w cm

W szczególności, gdy chodzi o wyrażenie sprawności w koniach mechanicznych.

$$\text{Sprawność } K = \frac{P \cdot s}{75 \cdot t}$$

(K w koniach mech., P w kg, s w metrach, t w sek)

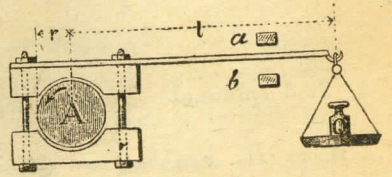
Można wyrazić sprawność względnie do szybkości, wprowadzając wzór $v = \frac{s}{t}$; skoro v podano w m/sek, P w kilogramach, to

$$\text{sprawność } K = P \cdot v \text{ kgm/sek} = \frac{P \cdot v}{75} \text{ koni mech.}$$

Przykład. Do ciągnienia roweru, na którym siedzi cyklista, potrzeba siły 3 kg (można ją oznaczyć, ciągnąc rower zapomocą dynamometru, rys. 26 lub 43). Jakiej sprawności wymaga jazda na rowerze, jeżeli cyklista przebył 1 km w ciągu 4 minut? Odp. Kilometr = 1000 m, 4 minuty = = 240 sek; stąd sprawność $K = (3 \cdot 1000) : (75 \cdot 240) = \frac{1}{6}$ *HP*.

4. Praktyczny pomiar sprawności, stosowany powszechnie do maszyn, zasadza się na tem, że bieg maszyny hamuje się zapomocą tarcia. Obecnie są w użyciu dwa sposoby oznaczania sprawności, zależnie od tego, czy dogodniej jest mierzyć sprawność na kole pędzącem, czy na wale maszyny, na którym są osadzone koła.

1) *Wędzidło Prony'ego* polega na równości momentów obrotu (§ 18 art. 3), gdzie równoważą się dwie siły: ciężar i tarcie.



Rys. 84. Wędzidło Prony'ego.

Na koniec wału maszyny A (rys. 84) nakłada się hamulec drewniany, przyciskany stopniowo śrubami, aż maszyna zwolni bieg do normalnej liczby obrotów n na minutę. Do hamulca przymocowano drążek o długości l cm, którego koniec obciąża się dotąd, aż ciężar Q kg zrównoważy tarcie, t. j. drążek waha się między oprawami a i b, nie będąc ani porywany przez obrót wału ku górze, ani przez ciężar Q ku dołowi. Jeżeli tarcie wału o hamulec wynosi P kg, a promień wału = r cm, to moment tarcia = $P \cdot r$; zatym:

$$P \cdot r = Q \cdot l \qquad P = \frac{Q \cdot l}{r}.$$

Prędkość obwodowa wału, t. j. droga, jaką obiega każdy punkt wału w ciągu sekundy

$$v = \frac{2\,\pi r \,.\, n}{60} \text{ m/sek.}$$

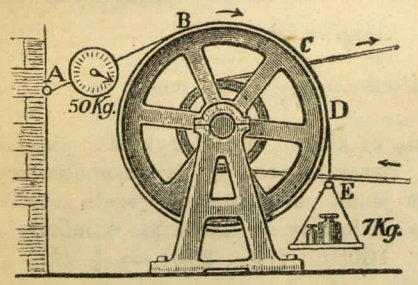
Zatym sprawność maszyny użyteczna

$$K = P \,.\, v = \frac{Ql}{r} \,.\, \frac{2\,\pi r \,.\, n}{60 \,.\, 75} = \frac{Qln \,.\, \pi}{2250} \text{ koni m.}$$

Przykład. Jeżeli maszyna robi 140 obrotów na minutę, a przytym ciężar 25 kg w odległości 90 cm od osi równoważy tarcie wędzidła na wale o średnicy 10 cm.

$$\text{sprawność } K = \frac{25 \,.\, 90 \,.\, 140 \,.\, 3{,}14}{2250} = 440 \text{ HP.}$$

2) *Hamulec sznurowy* (opaska kołowa rys. 85). Koło BCD, obracane przez jakiś silnik, np. maszynę parową, elektromotor, młyn wodny, niechaj robi n obrotów na minutę, skoro maszyna pracuje normalnie; gdy maszyna idzie luźno, koło obraca się prędzej. Opasuje się je sznurem lub pasem natłuszczonym $ABCDE$, który uczepiono w A, włączając dynamometr, a drugi koniec E obciążono tak, aby koło doprowadzić do normalnej liczby obrotów n na minntę. Jeżeli dynamometr wskazuje np. Q kg ciągniania, a na szalce leży Q' kg (przeciwciągnienia), to różnica $Q - Q'$ stanowi wielkość tarcia P.



Rys. 85. Hamulec sznurowy.

Prędkość obwodowa koła o promieniu r metrów wynosi

$$v = \frac{2\,\pi r \,.\, n}{60} \text{ m/sek.}$$

Stąd sprawność użyteczna maszyny

$$K = P \,.\, v = (Q - Q') \frac{2\,\pi r \,.\, n}{60 \,.\, 75} = (Q - Q') \frac{rn \,.\, \pi}{2250} \text{ koni par.}$$

Przykład. Jeżeli za sznur ciągnie dynamometr siłą 50 kg, ciężar na szalce siłą 7 kg, promień koła = 1,2 m, a w tych warunkach maszyna daje 48 obrotów na minutę,

$$\text{sprawność } K = (50 - 7) \frac{1{,}2 \,.\, 48 \,.\, 3{,}14}{2250} = 3\tfrac{1}{2} \text{ HP.}$$

Zadania.

(z pominięciem tarcia, oporu powietrza i t. p. przeszkód ruchu).

1. Człowiek, ważący 70 kg, wchodzi na wieżę 90 m wysokości. Ile wykonywa pracy? Odp. 6300 kgm.

2. Koń ciągnie wóz ładowny; droga wynosi 1 km, a dynamometr, wstawiony pomiędzy wóz i konia, wskazuje 45 kg. Ile wynosi praca konia? Odp. 45000 kgm.

3. Kropla wody, ważąca $\frac{1}{3}$ g, spada o $\frac{1}{2}$ m, raz na sekundę. Ile wynosi praca w ciągu doby? W ciągu roku? Odp. 5,4 kgm; 1972,3 kgm.

4. Pług przy oraniu stawia opór, do którego pokonania trzeba siły 65 kg. Ile wynosi praca pociągnięcia tego pługa w ziemi o 1 m? Ile wynosi praca podniesienia pługa w powietrzu o 1 m, jeżeli waży on 65 kg? Odp. Tu i tam praca jest jednakowa = 65 kgm.

5. Wskutek deszczów podniosła się woda w stawie o 14 cm; staw ma postać prostokątną, mierzy wszerz 68 m, wzdłuż 150 m. Jaką pracę wykonała woda deszczowa? Odp. 714 000 kgm.

6. Wtoczono 8 beczek jednakowych z ziemi na wóz, po desce pochyłej, długiej na 5 metrów; do potoczenia beczki wzdłuż deski potrzeba siły 18 kg. Ile wykonano pracy? Odp. 720 kgm.

7. Jeżeli droga w przykładzie 2-im trwa kwadrans, ile wynosi sprawność konia (zwierzęcia?) Odp. 45000 : (15 . 60 . 75) = $\frac{2}{3}$ HP.

8. Winda podnosi ciężar 60 kg w ciągu 1 minuty na wysokość 15 m; ile wynosi sprawność? Odp. 2 konie mech.

9. Kubeł piasku, ważący 50 kg, wciąga kilku ludzi, z szybkością $1\frac{1}{2}$ m na sekundę; sprawność? Odp. 1 HP.

10. Jakiej sprawności wymaga czynność w zadaniu 6-em, jeżeli wtoczenie każdej beczki trwało 12 sekund? Czy podoła tu jeden człowiek? Odp. $\frac{1}{10}$ HP; tak.

11. Jaką siłę pociągową ma koń, chodzący w kieracie, jeżeli obchodzi obwód koła o promieniu $3\frac{1}{2}$ m, 3 razy w ciągu minuty, a sprawność jego średnia wynosi $\frac{2}{3}$ HP? Odp. Ze wzoru $\frac{p\,s}{75\,t} = K$ wypada $p = 45{,}5$ kg.

12. Obliczyć w zadaniu poprzednim siłę konia na zasadzie szybkości jego obiegu. Odp. Ze wzoru $\frac{p\,v}{75} = K$ wypada $p = 45{,}5$ kg.

13. Ile wody może wypompować człowiek ze studni w ciągu godziny, skoro woda stoi na głębokości 13 m, a człowiek pracuje ze sprawnością $\frac{1}{12}$ HP? Odp. 1731 litrów.

14. Wodospad Niagary zrzuca na sekundę 15 000 m³ wody z wysokości 50 m. Jego sprawność? Odp. 10 000 000 HP.

15. Pociąg kurjerski pędzi z szybkością 16 m/sek, przyczym lokomotywa ciągnie go siłą 1500 kg. Sprawność lokomotywy? Odp. 320 HP.

§ 24. Energja.

1. Rodzaje energji. Pod nazwą *energji* rozumiemy zdolność wykonania pracy.

Odróżniamy energję ruchu czyli *kinetyczną* i energję położenia czyli *potencjalną*. Energję kinetyczną posiadają ciała poruszające się widocznie, jak pociąg w biegu, czy też drgające wewnętrznie w sposób niedostrzegalny, jak ciała ogrzane, w których przypuszczamy niezmiernie subtelne ruchy cząsteczkowe. Energję potencjalną mają ciała spoczywające, skoro się różnią położeniem, jak kamień podniesiony, bądź zmianą w ustroju wewnętrznym, jak nakręcona sprężyna.

Przy rozważaniu energji chodzi nie tylko o ilość pracy wytworzonej, ale i o rodzaj tej pracy. Stąd energja może być mechaniczną (do której zaliczamy i energję głosu), cieplną, promienistą, elektryczną, chemiczną; słowem, energja obejmuje wszystkie dziedziny fizyki i chemji.

Energja mechaniczna wywołuje skutki zewnętrzne czyli jawne, ruchowe, jak obrót ciała, posunięcie, rzut, wahanie, drganie, zatrzymanie, uderzenie; bądź skutki również jawne w ustroju wewnętrznym, jak napięcie łuku, nadęcie piłki powietrzem. Pozostałe rodzaje energji stanowią energję wewnętrzną, ukrytą; choć bowiem objawy jej działają na zmysły, istota tych objawów, drganie cząstek ciała lub eteru, nie jest dostrzegalne żadnym sposobem, np. przy rozgrzaniu ciała, rozpaleniu aż do świecenia, elektryzowaniu.

W istocie rzeczy, według teorji kinetycznej, wszelkie rodzaje energji stanowią energję mechaniczną, t. j. kinetyczną lub potencjalną; tylko że jedne z nich dotyczą mas i ruchów widocznych, inne zaś cząsteczek i ruchów niewidzialnych. Przy tarciu np. porusza się ciało, zatym występuje energja jawna, mechaniczna, która wpływa niewidzialnie na cząstki ciała, pobudzając je do drgania; w ten sposób objaśniamy rozgrzanie ciała od tarcia.

2. Miara energji. Każdy rodzaj energji ocenia się z pracy, jaką ciało wykonywa lub może wykonać. Jednostki więc pracy, jak kilogramometry lub ergi, są zarazem jednostkami do mierzenia energji.

Wartość energji nie zależy bynajmniej od kształtu drogi, przebytej przez ciało, ani od czasu jej przebycia, gdyż warunki powyższe nie wchodzą do obliczenia pracy (pt. art. 4).

Przykłady. 1) Woda deszczowa, kapiąc z dachu na ziemię z wysokości 26 m, ma tyleż energji, co woda, która wytrysnęła nagle strumieniem z rynny na tej samej wysokości. Gdy zebrało się na ziemi 5 kg wody, energja tu i tam wynosi $26 \times 5 = 130$ kgm.

2) Kula karabinowa posiada mimo nikłej swej wielkości i masy dużą energję kinetyczną, wynoszącą około 300 kgm. Znaczy to, że trafiając ciało, które stawia opór 300 kg, kula przebije ciało na głębokość 1 m; jeżeli zaś ciało daje opór 30000 kg, kula wejdzie tylko na głębokość 1 cm. Inaczej mówiąc, kula wywiera na ciało nacisk średni 300 kg w pierwszym przypadku, a 30 000 w drugim.

Gdy ciało jest w ruchu i wykonywa pracę mechaniczną, można obliczyć jej wartość, t. j. energję kinetyczną ciała, wiedząc masę ciała i szybkość ruchu. Rachunki powyższe zawiera mechanika szczegółowa (pt.).

3. Energja kinetyczna, czyli **siła żywa**, jest to zasób pracy, nagromadzonej w ciele pod postacią ruchu.

Wszelkie ciała poruszone, przezwyciężając przeszkody, wydają pracę, więc ujawniają energję kinetyczną. Jeżeli zaś ciało poruszałoby się bez przeszkody, nie okazałoby ono swej energji, ale zawierało jej zapas tem większy, im prędszy jest ruch i większa masa; zapas ten gotów się zdradzić jako praca przy wstrzymywaniu ruchu, zboczeniu, uderzeniu. Np. kula poziomo wystrzelona nie wydaje pracy (pominąwszy opór powietrza), energja jej wyzwala się dopiero za uderzeniem.

Przykłady. Masa powietrza w ruchu popycha okręty żaglowe, balony, chmury, obraca wiatraki, jako orkan przewraca domy, łamie drzewa itp.— Poruszona masa wody unosi statki, tratwy, obraca koła młyńskie, biciem fal podmywa i zwala brzegi, przyborem niszczy dobytek ludzki i t. p. — Pracę niszczącą wykonywują spadające głazy, walące się domy. — Pociąg rozpędzony usuwa przed sobą zaspy śnieżne, parowiec toruje drogę w lodzie.

Praca wykonywana zmniejsza szybkość ciała.

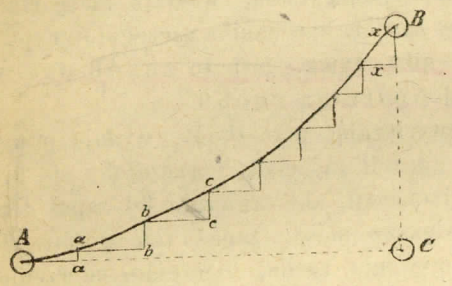
Na zasadzie bezwładności, ciało raz poruszone winno zachowywać stale prędkość końcową. Wiadomo jednak ze spostrzeżeń na każdym kroku, że prędkość się zmniejsza, aż wreszcie ciało się zatrzymuje; powodem są rozmaite przeszkody czyli opory, których pokonywanie stanowi właśnie pracę przy zatrzymaniu ciała.

Np. koło młyńskie prędzej wiruje luźno, niż gdy obraca kamienie. — Kula armatnia traci na szybkości, przebijając ścianę. — Kamień, rzucony w górę, leci coraz wolniej, bo przezwyciężа swą wagę i wykonywa pracę wznoszenia się.

4. Energja potencjalna jest to zasób pracy, nagromadzonej w ciele skutkiem zmiany położenia lub układu cząstek.

Powszechny przykład energji potencjalnej dają ciała podniesione; wartość zaś energji dla tego samego ciała zależy od wysokości podniesienia: książka, leżąca w pokoju na szafie, ma większą energję potencjalną względem podłogi, niż względem stołu, a jeszcze większą względem dna piwnicy.

Praca jest niezależna od postąci toru, po którym ciało się porusza. Przy podnoszeniu więc nie ma wpływu kierunek ani długość drogi, lecz jedynie wysokość podniesienia, t. j. odległość, mierzona pionowo od jednego położenia ciała do drugiego. Przesunięcie bowiem ciężaru poziomo nie wymaga żadnej pracy (nie uwzględniając tarcia); pracę stanowią jedynie posunięcia pionowe, przeciwko sile ciężkości, wszelkie zaś inne ruchy, pochyłe, można uważać za wypadkowe ze składania ruchu poziomego i pionowego (§ 12, art. 4).



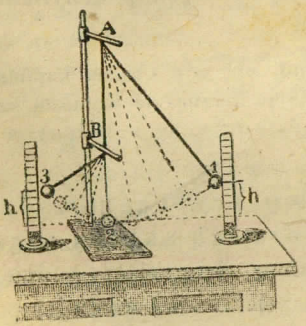
Rys. 86.

Praca np. podniesienia kuli M (rys. 86) po krzywej drodze AB jest taka sama, jak gdyby kulę podniesiono pionowo od C do B. Ruch bowiem $AB = Aa + ab + bc + \ldots x$ jest wynikiem składania geometrycznego ruchów $Aa + aa + ab + bb + bc + cc + \ldots$, gdzie odcinki poziome Aa, ab, $bc \ldots x$ nie grają żadnej roli w pracy, tylko odcinki pionowe aa, bb, $cc \ldots$ a suma tych ostatnich $= CB$.

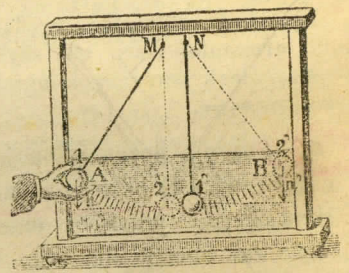
Nawzajem, spadając z danej wysokości, ciało wykona swą siłą żywą czyli energją kinetyczną znowu pracę taką samą, jaką zostało podniesione.

Miarą energji potencjalnej jest praca, włożona w jej wytworzenie.

Doświadczenie 1 (wahadło Galileusza). Pomimo hamowania nitki wahadła (rys. 87) za pomocą pręcika B, spuszczanego coraz niżej, kulka wahadła zawsze podnosi się do takiej samej wysokości h, z jakiej spada; kształt i długość drogi nie ma znaczenia.



Rys. 87. Doświadczenie Galileusza.



Rys. 88. Energja a praca.

Doświadczenie 2. Dwie równe kule z kości słoniowej A i B (rys. 88) wiszą pionowo obok siebie, dotykając się wzajemnie. Za podniesieniem do wysokości h i puszczeniem kula A uderza w B, sama zostaje unieruchomioną w położeniu 2, a swoją siłę żywą oddaje kuli B, która odskakuje na wysokość h, do położenia $2'$.

Nietylko ciało podniesione posiada pewien zasób energji, t. j. zdolność wykonania pracy; zawiera ją każde ciało, którego układ cząstek został zmieniony mechanicznie, chemicznie lub elektrycznie, np. nakręcona sprężyna, łuk napięty, żelazo od magnesu odciągnięte, wodór i tlen z rozkładu wody powstałe, nabój elektryczny.

5. Wzajemna przemiana energji mechanicznej. Zarówno w zjawiskach przyrody, jak przy użyciu maszyn i wogóle jakimkolwiek użytkowaniu sił ma miejsce przemiana energji potencjalnej na kinetyczną i nawzajem. Stwierdzają to już przytoczone wyżej przykłady w art. 3 oraz na rys. 86, 87, 88.

Energja potencjalna, uwięziona w ciałach, dąży do wyzwolenia, pod wpływem jakiegoś bodźca, t. j. działania bardzo nieznacznego, często niedostrzegalnego; działanie to zawsze jest nikłe w porównaniu ze skutkami energji, jaką wyswobadza.

Wystarczy np. zluźnić koniec sprężyny nakręconej, ażeby jej ukryta energja napięcia przeszła w ruch ciągły, jak w zegarze, bądź chwilowy, jak w pistolecie sprężynowym. Wystarczy podnieść zastawę, aby woda trysnęła ze stawu i pędziła koło młyńskie.

Nawzajem, energja kinetyczna może się nagromadzać, przekształcając się na potencjalną.

Energja np. ręki, nakręcającej sprężynę, nadaje napięcie sprężynie tym większe, im więcej pracy włożymy, a praca ta jest miarą energji. Energja spadających kropel deszczu zbiera się w stawie, podnosząc w nim poziom wody.

Wogóle ciało, które wydaje pracę, traci tym samym coraz bardziej swą zdolność do pracy, czyli swój zapas energji; natomiast wzrasta zapas energji w innym ciele, na którym praca została wykonaną. Zachodzi więc przelewanie energji z jednego ciała na inne.

6. Ogólna przemiana energji. Wszelkie zjawiska fizyczne i chemiczne polegają na przemianach energji; zjawiska zaś chemiczne nadto na przemianie materji.

Przez silne tarcie lub uderzenia ciała się rozgrzewają, zatem energja mechaniczna zamienia się tu na ciepło. Nawzajem energja cieplna przetwarza się w mechaniczną, jak np. przy opalaniu pieca, które sprawia ciąg powietrza w kominie, wrzenie wody w garnku, rozprężenie pary i stąd ruch tłoka w maszynie parowej.

Przez obracanie maszyny, zwanej prądnicą albo dynamomaszyną, powstaje energja elektryczna, która, przeniesiona po drucie do odpowiedniego motoru, wytwarza tu znów pracę mechaniczną.

Połączenia chemiczne wyzwalają ciepło, np. łączenie się wodoru z tlenem; ogrzewanie zaś tych samych połączeń sprawia ich rozkład chemiczny, np. woda rozpada się na tlen i wodór.

7. Zasada zachowania energji. Praca jest miarą energji. Skoro praca mechaniczna przy jej zamianie z jednego rodzaju na inny nie ginie, ani się zmniejsza lub powiększa, ale zachowuje całkowitą wartość (§ 22, art. 7), to samo odnosi się do energji. Zasada zachowania pracy prowadzi do zasady zachowania energji.

W każdym układzie ciał, gdzie energja ulega przemianie, suma energji potencjalnej i kinetycznej jest wielkością stałą.

Albo w wyrażeniu zwięzłem:

Energja jest niezniszczalną.

(Mayer 1842, Helmholtz 1847)

Roztrząsanie teoretyczne prawa zachowania energji zawiera mechanika szczegółowa (pt.).

Przykład. Zegar idący ujawnia energję kinetyczną; udzielamy mu zaś energji potencjalnej przez naciąganie wagi lub nakręcanie sprężyny. Waga zegarowa po naciągnięciu posiada energję potencjalną, której ubywa w miarę opadania ciężaru; zamienia się ona na energję kinetyczną mechanizmu jako to poruszanie kółek i skazówek, bicie zegara. W każdej chwili pozostała energja potencjalna wagi, wraz z całą wykonaną pracą, równa się pierwotnej energji wagi naciągniętej.

Jeżeli ciężar wagi zegarowej wynosi 2 kg, a przez nakręcanie zegara podnosi się waga 1 m, praca tu włożona, zatym i energja potencjalna, wynosi $2 \times 1 = 2$ kgm. Gdy waga opadnie do wysokości $\frac{1}{4}$ m, zachowa jeszcze $2 \times \frac{1}{4} = \frac{1}{2}$ kgm energji potencjalnej, reszta zamieniła się na energję kinetyczną kółek, skazówek, dzwonka, co razem stanowić musi $1\frac{1}{2}$ kgm.

Prawo zachowania energji dotyczy nie tylko energji mechanicznej, ale i wszelkich innych rodzajów energji przy ich wzajemnym przeobrażeniu (art. 6), jak cieplnej, chemicznej, elektrycznej. Podczas przenoszenia energji zmieniają się ciała pośredniczące, zmienia się postać energji, ale ilość energji nie ulega zmianie, chociażby energja przetwarzała się wielokrotnie, np. z mechanicznej w elektryczną (prądnica), stąd w cieplną i świetlną (lampa elektryczna) i t. d.

Energja nie może powstać z niczego, ani nie może zaginąć. Niezniszczalność energji, podobnie jak i materji, tworzącej z nią odwieczną, nieodłączną całość, jest podwaliną nie tylko fizyki, ale całej obecnej wiedzy przyrodniczej.

Najogólniej więc da się wyrazić prawo zachowania energji równaniem symbolicznym:

$$\Sigma E = P + R + G + C + S + M + E + Ch + ?$$

ΣE	suma energji
P	en. położenia
R	en. ruchu
G	głos
C	ciepło
S	światło
M	magnetyzm
E	elektryczność
Ch	en. chemiczna
?	nieznane rodzaje energji

ROZDZIAŁ III.

NAUKA O PŁYNACH (CIECZACH)

W SPOCZYNKU.

(HYDROSTATYKA)

§ 25. Własności płynów.

1. **Płyny** albo **ciecze** *) różnią się od ciał stałych wielką *ruchliwością* cząstek, która sprawia, że cząstki łatwo zsuwają się po sobie i rozdzielają; świadczy o tem rozlewanie, rozpryskiwanie. Ruchliwość cieczy tłumaczy się słabą spójnością, t. j. bardzo nieznaczną siłą wzajemnego przyciągania cząstek.

Spójność płynów ujawnia się wtedy, gdy płyn znajduje się w drobnych ilościach, np. w kroplach, okach (tłuszcz na wodzie). Przy większej masie płynów, jak je zwykle widujemy, przeważa wpływ ciężkości, wskutek której powierzchnia płynu staje się z wierzchu płaską, a z innych stron przystaje do naczynia, w jakim płyn jest zawarty, czyli przybiera kształt naczynia.

Tak więc, płyny nie posiadają własnej postaci, jakkolwiek mają własną objętość; pierwsza cecha odróżnia je od ciał stałych, druga od ciał lotnych.

2. **Powierzchnia** płynu w naczyniu pod działaniem ciężkości jest pozioma, każda bowiem cząstka dąży do najniższego położenia, i równowaga płynu staje się możliwa tylko wtedy, gdy każda cząstka powierzchni jest jednakowo oddalona od środka ziemi; z powodu olbrzymiej odległości od tego środka, powierzchnia płynu wydaje się płaska.

Tylko przy ścianach naczynia można zauważyć pewne wykrzywienie powierzchni, wskutek przylegania (pt.) płynu do ściany, np. atrament w kałamarzu, rtęć we flaszce. W obszernych zbiornikach wody w naturze, jako to większych jeziorach oraz morzach, ujawnia się wypukłość powierzchni wodnej, która stanowi, jak wiadomo, jeden z dowodów kulistości ziemi.

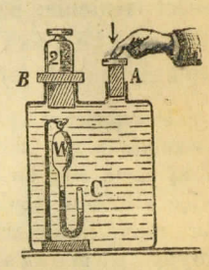
*) Dawniej pod nazwą płynów rozumiano ciecze i gazy zarazem; rozróżniano płyny ciekłe płyny lotne.

3. **Ściśliwość płynów.** Płyny są prawie nieściśliwe, t. j. objętość ich można zmniejszyć tylko bardzo nieznacznie. Po ustaniu zaś ciśnienia płyn przybiera dokładnie objętość poprzednią, jest więc doskonale sprężysty, choć w małym stopniu.

Tak np. woda pod ciśnieniem powietrza atmosferycznego, które wynosi 1 kg na każdy cm², kurczy się zaledwie o $\frac{1}{20000}$ swej objętości, inne płyny jeszcze mniej znacznie. Stąd np. na dnie rzek, jezior, oceanów, gęstość wody prawie się nie różni od gęstości na powierzchni.

Własność powyższa ma doniosłe znaczenie w życiu zwierząt i roślin wodnych (objaśnić).

Udowodnić małą ściśliwość cieczy można za pomocą przyrządu, rwanego *piezometrem* (rys. 89). Do obszernego naczynia z wodą wkłada się rurkę, zgiętą w kształcie *U* i wydętą na górnym końcu w bańkę *W*. Bańkę i część rurki napełnia się uprzednio płynem badanym, a resztę rurki rtęcią. Za naciśnięciem tłoka *A* rtęć podnosi się ku bańce *W*.



Rys. 89. Piezometr.

Spółczynnikiem ściśliwości zowie się zmniejszenie jednostki objętości, pod ciśnieniem 1 kg na 1 cm² (1 atmosfery). Wynosi on dla:

wody	alkoholu	rtęci
0,000 050	0,000 008	0,000 003

Np. 5 litrów wody poddano ciśnieniu 4 kg/cm²; strata na objętości wynosi 5 . 4 . 0,000 05 = 0,001 litra = 1 cm³.

§ 26. Ciśnienie zewnętrzne w płynach.

1. **Prawo Pascala.** Skoro na ciało stałe działa z zewnątrz ciśnienie, udziela się ono przez to ciało dalej w tym samym kierunku, jaki posiada ciśnienie zewnętrzne; np. przy wspieraniu się na kiju nacisk działa tylko w kierunku kija. W cieczy zaś, zamkniętej w naczyniu, ciśnienie, wywarte gdziekolwiek w jednem miejscu, rozchodzi się z powodu ruchliwości cząstek wszędzie, i to z jednakową siłą; np. woda w rurze, uciskana tłokiem z góry, ciśnie zarówno na dół, na dno rury, jak na jej ściany, przyczym na każdą powierzchnię, równą powierzchni tłoka, nacisk wody jest taki sam, jak na tłoku.

Ciśnienie zewnętrzne rozchodzi się w płynach jednostajnie we wszystkich kierunkach (prawo Pascala, 1653).

Należy tu rozumieć płyn, wypełniający szczelnie naczynie zamknięte i pozbawiony wagi (nieważki). W rzeczywistości płynu takiego niema, to też do ciśnienia zewnętrznego dodaje się ciśnienie ciężaru samego płynu (§ 30), czego tutaj nie uwzględniamy.

2. Kierunek i wielkość ciśnienia. a) Ciśnienie działa prostopadle do ścian naczynia.

b) Nacisk udzielony ścianie jest proporcjonalny do powierzchni ściany.

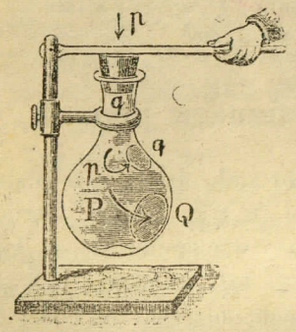
Prostopadłość ciśnienia wynika z ruchliwości płynu; gdyby bowiem ciśnienie działało ukośnie, cząstki płynu ześlizgiwałyby się po ścianie. Proporcjonalność zaś nacisku do wielkości ściany wynika z jednostajności ciśnienia: nacisk na jednostkę pola, np. 1 cm², t. j. ciśnienie wszędzie jest jednakowe; ile więc cm² mierzy ściana, tyle razy większy nacisk jej się dostaje.

Przypuśćmy płyn nieważki we flaszce (rys. 90), do której wchodzi szczelnie a bez tarcia korek q. Nacisk p, wywarty na korek, dochodzi z tą samą siłą do powierzchni q ściany, równej powierzchni korka. Jedno więc ciśnienie zewnętrzne p/q wytwarza na ścianach flaszki tyle ciśnień p/q, ile razy powierzchnia q mieści się w całej powierzchni flaszki. Płyn jak gdyby pomnaża nacisk zewnętrzny, jeżeli go przenosi na większą powierzchnię. Ściana Q otrzymuje nacisk P odpowiednio większy:

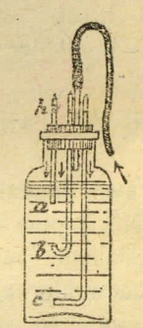
$$\left(\begin{matrix}\text{ciśnienie}\\ \text{na 1 cm}^2\ \text{ściany}\ Q\end{matrix}\right)\frac{P}{Q}=\frac{p}{q}\left(\begin{matrix}\text{ciśnienie}\\ \text{na 1 cm}^2\ \text{ściany}\ q\end{matrix}\right)$$

Stąd $$P : p = Q : q$$

t. j. naciski na całe powierzchnie Q i q są proporcjonalne do tych powierzchni.



Rys. 90. Roznoszenie ciśnienia.

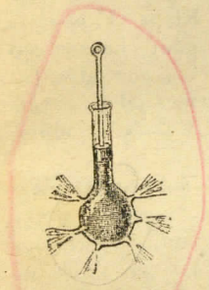


Rys. 91.

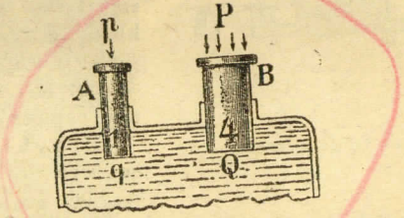
Doświadczenia. 1) Słój (Rys. 91), zamknięty szczelnie korkiem, posiada w korku 4 rurki pionowe: prostą a, skierowaną otworem na dół, zakrzywioną b ku górze i zakrzywioną c w bok; wszystkie 3 rurki są zanurzone w wodzie, czwarta zaś rurka nie dosięga wody. Skoro za pomocą rurki gumowej, nałożonej na tę ostatnią rurkę, dmuchnąć do flaszki, woda podnosi się jednakowo we wszystkich 3 rurkach, np. do h, a za silniejszem dmuchnięciem wytryśnie wszędzie jednakowo. To samo nastąpi w razie, gdy flaszkę napełniono spirytusem, naftą, rtęcią i t. p.

2) Rozchodzenie się ciśnienia i jednostajność takowego można stwierdzić mniej więcej za pomocą sikawki kulistej o kilku otworach (rys. 92). Rurę, zakończoną kulą z kilku otworami, napełnia się wodą. Za wepchnięciem tłoka woda wytryśnie na wszystkie strony, przyczym ilość wody, wylana z każdego otworu, będzie jednakowa, skoro otwory są równe. Zauważyć nadto można, że wytryski idą w kierunku promieni kuli, t. j. prostopadle do jej powierzchni.

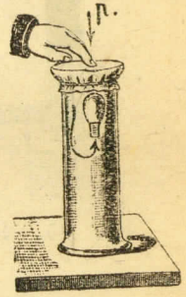
3) Proporcjonalność nacisku do powierzchni ścian naczynia okazać można za pomocą przyrządu o dwu tłokach nierównych (rys. 93), suwających się możliwie lekko, t. j. z małym tarciem. Jeżeli tłok Q ma średnicę 2 razy większą od q, zatym powierzchnię 4 razy większą, to siła p na małym tłoku równoważy siłę $P = 4p$ na dużym. Za obciążeniem np. tłoka q ciężarem = 80 g, tłok Q udźwignie 320 g; w razie mniejszego ciężaru na Q, tłok ten będzie się podnosił.



Rys. 92.



Rys. 93.



Rys. 94. Nurek Kartezjusza.

4) Własność, że ciecz roznosi ciśnienie, nawet w kierunku przeciwnym do siły cisnącej, okazuje *nurek Kartezjusza* (rys. 94).

Bańka szklana z szyjką zawiera tyle wody, że pływa swobodnie w słoju z wodą. Za naciśnięciem pęcherza, jakim owiązano słoik, woda wchodzi do bańki, a obciążając ją, zanurza głębiej, tak iż „nurek" opada na dno. Ciśnienie (z góry) na pęcherz udziela się wodzie w bańce (z dołu) i sprawia zgęszczenie w niej powietrza.

3. Prasa hydrauliczna (Brahma, 1795). Zadaniem prasy hydraulicznej jest spotęgowanie nacisku za pomocą wody, która przenosi ciśnienie z tłoka mniejszego na większy.

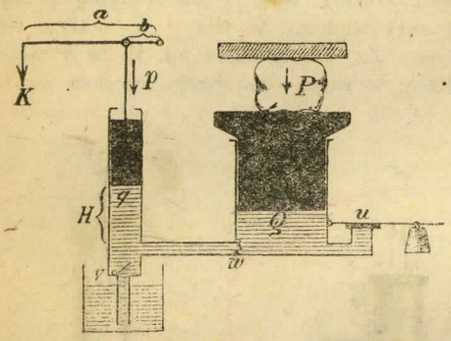
Prasa składa się w zasadzie z dwu rur (rys. 95), wąskiej (q) i szerokiej (Q), złączonych poprzeczną rurą (w). Naczynia te napełnia się wodą, bądź olejem i zamyka się z góry tłokami. Naciskając za pomocą drążka (a) mniejszy tłok (q), wywiera się na większy tłok (Q) nacisk, znakomicie spotęgowany, który służy w praktyce do podnoszenia lub tłoczenia. Nacisk ten jest proporcjonalny do kwadratu średnicy tłoków.

Mianowicie, przy średnicach D i d, ciśnienie wynosi odpowiednio:

$$\frac{P}{\pi\left(\frac{D}{2}\right)^2} = \frac{p}{\pi\left(\frac{d}{2}\right)^2} \quad \text{czyli} \quad \frac{P}{D^2} = \frac{p}{d^2},$$

skąd $P : p = D^2 : d^2$.

Całkowity ruch H tłoka q podnosi tylko bardzo nieznacznie tłok Q (złota reguła mechaniki); w celu dalszego podnoszenia tłoka Q należy nabrać znów wody do rury q. Prasa więc musi mieć zapas wody i urządzenie do wciągania takowej; rolę tę odgrywa rura ssąca z klapą V (por. „Pompa ssąco tłocząca"). Klapa bezpieczeństwa u zapobiega rozsadzeniu rury większej. Klapa V otwiera się tylko do góry, boczna zaś klapa w tylko na zewnątrz (na prawo); woda więc, jaka weszła do rur q i Q, nie może odpływać napowrót.



Rys. 95. Prasa hydrauliczna.

Przykład. Jaki nacisk można wywrzeć za pomocą prasy ręcznej, gdzie średnica wewnętrzna rur wynosi 72 cm i 6 cm, a ramiona drążka 50 cm i 10 cm, skoro na koniec drążka działa ręka siłą 20 kg? Jakie ciśnienie daje prasa?

Rozw. (por. rys. 95). Siła $K = 20$ kg, zatym momenty wynoszą: $20 \cdot 50 = p \cdot 10$; stąd $p = 100$ kg; wreszcie

$$\text{nacisk } P = 100 \cdot \left(\frac{72}{6}\right)^2 = 14\,400 \text{ kg}.$$

Ciśnienie $100 : (\pi \cdot 3^2) =$ okr. $3\frac{1}{2}$ kg/cm^2.

Zastosowania prasy hydraulicznej:

a) Podnoszenie olbrzymich ciężarów, jak budynków, mostów.

b) Wytłaczanie oliwy, olejów, soku z winogron.

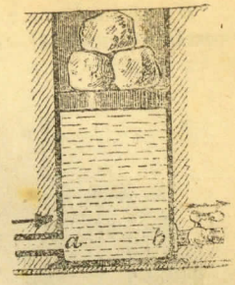
c) Wyroby prasowane: papier twardy (papier maché), bawełna i siano prasowane, sztuczne kamienie budowlane, węgiel w cegiełkach, wytłaczanie przedmiotów z blachy, tektury.

d) Próby wytrzymałości kotłów parowych, łańcuchów, szyn, cegły, kamienia i wogóle materjałów budowlanych.

4. **Akumulator hydrauliczny**, czyli **wodny**, przechowuje zapas wody pod wysokim ciśnieniem. Zawiera on w tej postaci wielki zasób energji potencjalnej, z której można korzystać każdego czasu, całkowicie lub częściowo.

Obszerny walec metalowy (rys. 96) zawiera tłok silnie obciążony. Do walca wtłacza wodę silnik parowy przez rurę (a). Za otwarciem wylotu (b) zostaje spożytkowane olbrzymie ciśnienie akumulatora do wykonania odpowiedniej pracy; rura wylotowa (b) może mieć wiele odgałęzień i zasilać ciśnieniem wiele przyrządów.

Zastosowania. W portach i przystaniach do poruszania wind hydraulicznych; w fabrykach do zginania płyt pancernych, zamiast wielkich młotów. Fabryka armat Kruppa posiada akumulator wodny, który wytwarza nacisk 5 miljonów kilogramów.



Rys. 96. Akumulator hydrauliczny.

Zadania.

1. W prasie hydraulicznej (rys. 95) $q = 2$ cm^2, $Q = 180$ cm^2, $a = 49$ cm, $b = 7$ cm. Czy można siłą $K = 24$ kg skruszyć cegłę w prasie, jeżeli szerokość cegły $= 15$ cm, długość $= 20$ cm, a wytrzymałość $= 50$ kg na cm^2? Odp. Tak.

2. Jaki musi być stosunek tłoków w prasie, aby siłą 5 kg można było zgnieść kostkę marmurową o 1 dm boku, jeżeli wytrzymałość marmuru $=$ $= 850$ kg na cm^2, a ramiona drążka wynoszą 64 cm i 8 cm? Odp. $q : Q = 1 : 2000$.

3. Tłok większy w prasie ma średnicę 0,36 m, mniejszy 18 mm; stosunek ramion drążka wynosi 1 : 12. Jaką siłą podnosi się tłok większy, skoro nacisk na koniec drążka wynosi 50 kg? Odp. 240 000 kg.

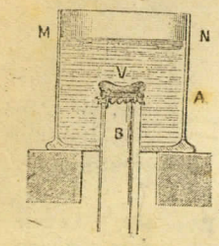
4. Tłok w akumulatorze wodnym ma 1 m średnicy i wywiera ciśnienie 100 kg na cm^2. Ile koni mechanicznych wytwarza opadnięcie tłoka o 50 cm w ciągu $\frac{1}{2}$ minuty? Odp. 698.

§ 27. Ciśnienie własne płynów.

1. **Ciśnienia wewnątrz płynu.** Wskutek własnego ciężaru każdy płyn wywiera ciśnienie na dno naczynia, gdzie się znajduje, na jego ściany i wogóle na wszelkie ciała zanurzone.

Ciśnienie rośnie wraz z głębokością powierzchni zanurzonej, a kierunek jego zawsze jest prostopadły do powierzchni. Im głębiej bowiem leży powierzchnia zanurzona, tym wyższy słup cieczy na niej spoczywa, zatym cięży bardziej. Prostopadłość zaś ciśnienia wynika z ruchliwości płynu.

Doświadczenie (rys. 97). Przez dno obszernego słoja A wsunięto szczelnie rurę B, owiązaną u góry błonką gumową V. Po wlaniu wody lub innej cieczy do słoja błona ulega wtłoczeniu; im wyżej nad nią stoi poziom wody MN, tym większa tworzy się wklęsłość V.



Rys. 97. Ciśnienie w głębi cieczy.

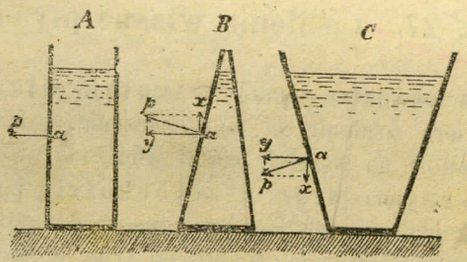
Przechylając słój, nadajemy przez to błonie pochyłe położenie; i w tym wypadku błona również zostaje wtłoczona.

2. Paradoks hydrostatyczny. Jako dno naczynia rozumiemy poziomą część powierzchni jego ścian wewnętrznych, np. płaskie dno szklanki, miednicy.

Ciśnienie płynu na dno nie zależy od kształtu naczynia. Ciśnienie więc nie zależy również od objętości naczynia, ani od ilości płynu, o ile nalano go do tej samej wysokości w rozmaitych naczyniach.

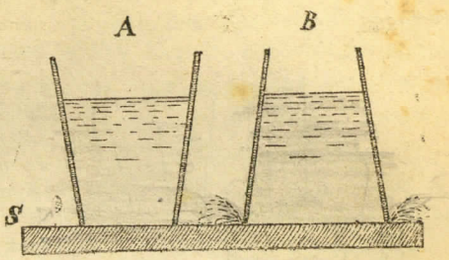
Niezależność ciśnienia od postaci naczyń nazwano *paradoksem hydrostatycznym*, wygląda bowiem na pozór nieprawdopodobnie. W naczyniach np. A, B, C (rys. 98), o jednakowych dnach i jednakowej wysokości płynu, nacisk na dno jest wszędzie jednakowy, jakkolwiek ciężar płynu w naczyniu B jest znacznie mniejszy, a w C większy, aniżeli w A.

Teoretycznie tłumaczy się paradoks rozkładem ciśnień (rys. 98). W naczyniu A o ścianach pionowych ciśnienie boczne, np. na cząstkę a ściany, nie działa na szalkę wagi, ponieważ działa poziomo; nacisk na dno równa się tu ciężarowi płynu. W naczyniu B ciśnienie p, prostopadłe do ściany w punkcie a, rozkłada się na ciśnienie pionowe x i poziome y; ostatnie nie ma wpływu na wagę, ciśnienie zaś x działa do góry, przez co ciężar płynu w B jest mniejszy, niż w A. W naczyniu C zachodzi również rozkład ciśnienia p w punkcie a, jednakże ciśnienie pionowe x jest zwrócone na dół, zatym dodaje się do ciężaru płynu; stąd waży on więcej, niż w A.



Rys. 98.

Doświadczalnie można okazać prawdziwość powyższego objaśnienia za pomocą szklanki, postaci stożkowej (rys. 99), której dno odcięto, a oba brzegi doszlifowano starannie do szklanej tafli S. Postawiwszy szklankę węższym końcem (rys. A), przyciska się ją do szkła i nalewa się wody; po odjęciu ręki woda się nie wyleje. Jeżeli zaś uczynić to samo przy odwrotnej postawie szklanki (B), woda uniesie szklankę i wytryśnie z pod jej brzegów.



Rys. 99.

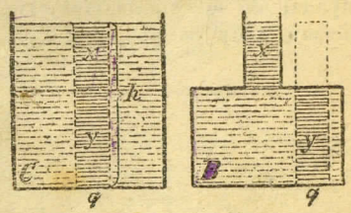
3. Ciśnienie na dno. Ciśnienie płynu działa w kierunku pionowym z góry nie tylko na dno naczynia, ale na każdą poziomą powierzchnię zanurzoną, np. na szybę trzymaną poziomo pod wodą. Takie działanie płynu zowiemy więc ogólnie *ciśnieniem pionowym*, jeśli mowa o działaniu na jednostkę powierzchni, np. na 1 cm², albo *naciskiem pionowym* (parciem na dół), jeśli na dowolną powierzchnię. Nacisk na każdą warstwę poziomą, a zatym i na dno, wyraża się ciężarem słupa cieczy, jaki na nim spoczywa.

Nacisk płynu na dno wyraża się ciężarem słupa płynu, którego podstawą jest dno, a wysokością odległość dna od powierzchni (Stevin, 1600).

Nacisk więc jest proporcjonalny do powierzchni dna, głębokości płynu i gęstości. Jeżeli pole dna wynosi q cm² (rys. 100), głębokość h cm, gęstość cieczy d, to objętość słupa, spoczywającego na dnie, wynosi $q \cdot h$ cm³, a jego ciężar czyli

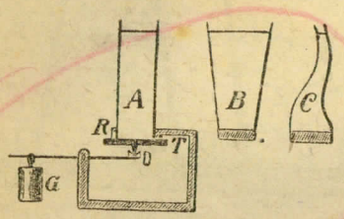
$$\text{nacisk na dno } P = q \cdot h \cdot d \text{ gramów.}$$

Dowód (rys. 100). W naczyniu walcowym C nacisk na każdą część q dna równa się, oczywiście, wadze spoczywającego na niej słupa cieczy. Skoro naczynie ma inną postać, a tę samą wysokość płynu, ciśnienie na taką samą część q pozostaje bez zmiany. Np. w naczyniu B na część q dna ciśnie słup y; że zaś ciśnienie słupa x rozchodzi się wszędzie jednostajnie, udziela się ono i części q, tak iż ogółem na q ciśnie słup $x+y=h$, t. j. o wysokości płynu w naczyniu, ciężar zaś tego słupa $= q \cdot h \cdot d$.



Rys. 100. Ciśnienie na dno.

Doświadczenie (rys. 101). Dobiera się 3 naczynia A, B, C różnej postaci, a jednakowej u dołu średnicy, tak iż każde z osobna wchodzi szczelnie do oprawy RT. Ciężar G, zawieszony na drążku, przyciska ruchomy krążek D czyli dno do naczynia A, wstawionego w oprawę. Do naczynia A nalewa się wody; okazuje się, że woda dosięgnie tylko pewnego poziomu h, dolana zaś powyżej h uchyla dno D i wypływa, aż poziom opadnie znów do h. Powtarzając to samo z innymi naczyniami B, C, przekonywamy się, że we wszystkich niezbędna jest jednakowa wysokość h (nie ilość) wody do zrównoważenia ciężarka G.



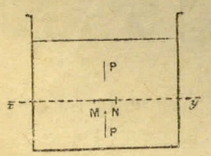
Rys. 101. Przyrząd Pascala.

Zależność nacisku cieczy od głębokości: skoro słup A wody mierzy np. 18 cm wysokości, a ciężar $G = 90$ g, to do zrównoważenia słupa 9 cm potrzeba ciężaru 45 g i t. d. Zależność od gęstości: skoro słup A wody równoważy ciężar $G = 90$ g, to taki sam słup A spirytusu o gęstości 0,8 równoważy ciężar 72 g. Zależność od powierzchni dna: skoro powyższy słup A wody i ciężar $G = 90$ g równoważą się przy wielkości dna $RT = 5$ cm², to taki sam słup A wymaga ciężaru 180 g przy wielkości dna $= 10$ cm², zastosowanego do odpowiednio większej oprawy RT.

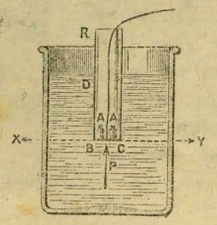
4. Powierzchnia równych ciśnień. Ponieważ ciśnienie na dno, t. j. nacisk na każdy cm² jego powierzchni, zależy w tej samej cieczy tylko od głębokości, ciśnienie ma wartość jednakową w każdym miejscu dna, czy też wogóle na każdej powierzchni poziomej, jednakowo zanurzonej. Rozumie się tutaj płyn w równowadze, pod wpływem siły ciężkości.

Ciśnienie płynu na tym samym poziomie jest wszędzie jednakowe. Taką *powierzchnię równych ciśnień (xy)* wyobraża rys. 102; każda jednostka pola *(MN)* tego poziomu musi znosić ciśnienie *(P)* z góry, równe ciśnieniu *(P)* z dołu, skoro ciecz jest w spoczynku.

Doświadczalnie przekonać się o tym można, a zarazem oznaczyć wielkość ciśnienia, za pomocą walca szklanego D (rys. 103), np. cylindra od lampy gazowej, skoro go się zamknie u dołu denkiem BC, i przytrzymując denko za sznurek, zanurzy do słoja z wodą. Denko nie tylko nie odpada, ale udźwignie ciężarki AA, które wraz z wagą denka stanowią miarę nacisku wody na poziomie xy. Skoro AA wraz z denkiem waży 200 g, za dodaniem zaś małego jeszcze ciężarka dno odpada, nacisk wody wynosi tu 200 g. Przesuwając walec D w tym samym położeniu wzdłuż płaszczyzny xy, przekonamy się, że wszędzie nacisk $P = 200$ g. Jeżeli dno $BC = 8$ cm², ciśnienie na całym poziomie xy wynosi $200 : 8 = 25$ g/cm².



Rys. 102.



Rys. 103.

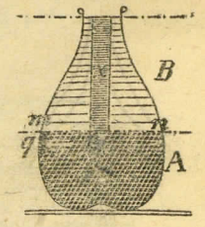
Przyrząd powyższy nadaje się też do sprawdzenia, że ciśnienie wzrasta w miarę głębokości (pt. art. 1). Przy zanurzeniu płytszym walca D denko z ciężarkami AA odpadnie, przy głębszym zanurzeniu denko się trzyma, a nadto zniesie większe obciążenie.

5. Ciśnienie boczne. W każdym płynie istnieje, prócz ciśnienia na dno, t. j. w kierunku pionowym, także ciśnienie na wszelkie powierzchnie pochyłe lub pionowe, zanurzone w płynie, np. na ściany boczne naczynia, na lejek postawiony na dnie. Działanie to płynu zowiemy *ciśnieniem bocznym*, bądź *naciskiem bocznym*, zależnie od tego, czy chodzi o siłę działającą na jednostkę powierzchni, np. 1 cm², czy na dowolną powierzchnię. Nacisk na każdą warstwę nie poziomą, a zatem i na ścianę, wyraża się ciężarem słupa cieczy, jaki na niej pionowo spoczywa.

Jak nacisk wywarty z zewnątrz, podobnież i nacisk samego ciężaru płynu na ściany działa zawsze prostopadle do ścian naczynia; inaczej cząstki płynu musiałyby się zsuwać po ścianie.

Ciśnienie boczne płynu równa się ciśnieniu na dno w tej samej głębokości.

Dowód (rys. 104). Ażeby oznaczyć ciśnienie na drobną jednostkę q na powierzchni ściany, należy sobie wyobrazić przekrój poprzeczny mn naczynia tuż nad. q Każda taka jednostka pola q na przekroju mn znajduje się pod ciśnieniem słupa x; ciśnienie to rozchodzi się i na boki, zatym i jednostka pola q na ścianie znosi to samo ciśnienie x.



Rys. 104. Ciśnienie na bok q.

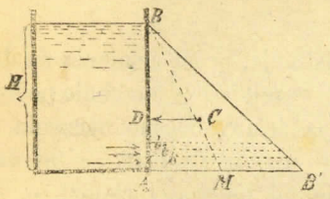
Wynika stąd, że nacisk na ściany naczynia mierzy się tak samo, jak na dno, iloczynem powierzchni ściany, głębokości i gęstości płynu; głębokość zaś ściany liczy się od jej środka ciężkości do poziomu płynu w naczyniu.

Nacisk płynu na ścianę wyraża się ciężarem słupa płynu, którego podstawą jest pole ściany, a wysokością jest odległość od środka ciężkości danej ściany do poziomu płynu:

nacisk na ścianę $P = q \cdot h \cdot d$ gramów.
(q wyrażone w cm², h w cm)

Dla naczynia o ścianach pionowych i prostokątnych łatwo oznaczyć nacisk za pomocą wykreślenia (rys. 105, przekrój). Na ścianę AB nacisk wzrasta proporcjonalnie do głębokości. Podzielmy ścianę na n równoległych poziomych pasków, bardzo wąskich, o powierzchni b, b, b... Nacisk na dolny pasek ściany równa się ciężarowi słupka cieczy o podstawie b

a wysokości $AB = H$, czyli słupka $b \,.\, H$; na następne paski nacisk jest coraz mniejszy, aż na górny pasek nacisk $= b \,.\, 0 = 0$, zatym nacisk na całą ścianę równa się ciężarowi słupa, którego objętość wyraża średnia arytmetyczna $n \,.\, b\,\frac{H+0}{2} = \frac{1}{2}\,nb\,H = \frac{1}{2}\,qH$, gdyż powierzchnia ściany $q = nb$; ciężar zaś tego słupa $= \frac{1}{2}\,qHd$. Należy zauważyć, że tutaj H oznacza całkowitą wysokość płynu.

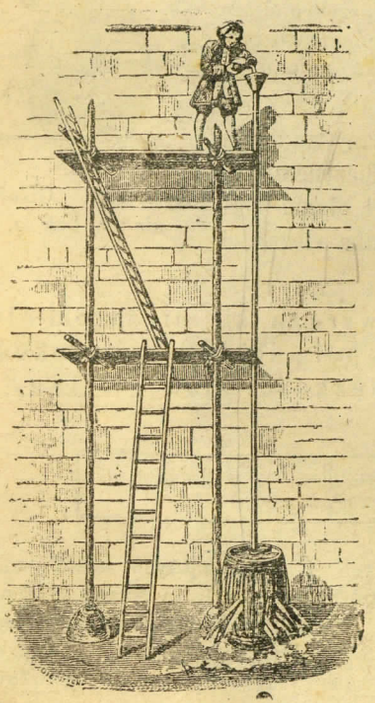


Rys. 105.

Jeżeli na każdym pasku wykreślimy poziomo długość równą głębokości paska pod powierzchnią cieczy, powstanie stąd trójkąt BAB', którego środek ciężkości C jest w odległości $CM = \frac{1}{3}\,BM$, gdzie M jest środkiem boku AB'. Punkt działania wypadkowej ciśnień na wszystkie paski przypada na poziomie punktu C, zatym w punkcie D, oddalonym od spodu A ściany o $AD = \frac{1}{3}\,AB$.

Punkt działania nacisku cieczy na ścianę pionową zowie się *środkiem ciśnień* i znajduje się na głębokości $\frac{1}{3}$ od spodu ściany. Nad tym punktem i pod nim równoważą się wzajemnie wszystkie ciśnienia na daną ścianę. Gdyby np. chodziło o wzmocnienie ściany w dużym zbiorniku, aby jej woda nie wyparła, wystarczy dać podporę zewnętrzną na wysokości $\frac{1}{3}$ ściany.

6. Zastosowania i zagadnienia. Rury wodociągowe pękają w najniższych częściach, zwykle pod ziemią położonych. — Ściany i dno okrętów muszą być szczególnie mocne, gdy okręt głęboko się zanurza. — Podpory przy zastawach młyńskich; silne zwory w szluzach. — Grube podmurówki zewnętrzne dokoła głębokich zbiorników z wodą. — Dlaczego stągiew, która nie cieknie, gdy zawiera mało wody, zaczyna sączyć wodę u spodu, gdy nalać pełno wody? — Dlaczego łódka cieknie tym bardziej, im więcej do niej wsiądzie osób?



Rys. 106.

Olbrzymie ciśnienia na dnie oceanów, które można porównać z ciśnieniem prasy hydraulicznej.

Beczka Pascala (rys. 106). Do beczki, która doskonale wytrzymywała ciśnienie wody przy całkowitym napełnieniu, Pascal przystosował rurę pionową, bardzo wąską, długości około 8 metrów. Gdy wlewano wodę do rury, woda rozsadziła beczkę, zanim doszła do wierzchu rury, jakkolwiek ilość wody w rurze wyniosła zaledwie kilka litrów. Obliczyć nacisk na dno beczki, o średnicy 70 cm, a wysokości 1 m, gdy woda w rurze doszła do wysokości 7 m ponad górne dno beczki.

Pod nazwą *prasy hydrostatycznej* używano dawniej beczki podobnej, dostatecznie wytrzymałej, do wytłaczania soków, olejów i t. p.

Zadania.

1. Flaszkę napełniono gliceryną do wysokości 22 cm; ile wynosi nacisk na dno o powierzchni 54 cm², skoro c. wł. gliceryny = 1,25? Odp. 1485 g.

2. Od piwnicy do strychu domu, wysokiego na 15 m, idzie rura, wstawiona u dołu do zbiornika, którego dno ma 1 m² powierzchni. Jaki nacisk ogólny i jakie ciśnienie na cm² znosi dno zbiornika, jeżeli zbiornik i rura są pełne wody? Odp. 15000 kg; 1,5 kg/cm².

3. Do miski nalano rtęci; ile wynosi ciśnienie na ścianę w głębokości 9 cm od poziomu, skoro c. wł. rtęci = 13,6? Odp. 122,4 g/cm².

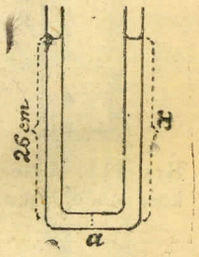
4. Naczynie w postaci stożka ściętego (rys. 99) napełniono wodą i zamknięto; promień dna większego wynosi 10 cm, mniejszego 6 cm, a wysokość naczynia 20 cm. Ile wynosi nacisk wody na dno, przy postawieniu naczynia szerszym lub węższym końcem? Odp. 6,283 kg; 2,262 kg.

5. Jak wypada zrozumieć wyrażenie Pascala, że mógłby jednym funtem wody sprawić 100 funtów ciśnienia?

6. Jakie ciśnienie panuje w najgłębszym miejscu oceanu, sięgającym 8500 m, około japońskiej wyspy Jesso?

§ 28. Naczynia zespolone.

1. Równowaga jednej cieczy. Pod mianem *naczyń zespolonych* albo *naczyń połączonych* rozumieć należy naczynia jakiejkolwiek postaci i wielkości, złączone z sobą u dołu tak, aby ciecz swobodnie mogła przepływać z jednego do drugiego. Najprostszą postać naczyń zespolonych stanowią dwie rurki pionowe, napełnione wodą lub innym płynem (rys. 107).

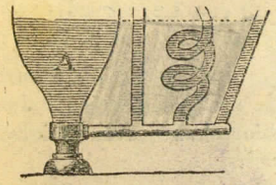


Rys. 107. Równowaga jednej cieczy.

Ciecz w naczyniach zespolonych jest w równowadze, skoro poziom cieczy w naczyniach jest jednakowy.

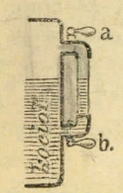
Dowód. W rurze łącznej można sobie wyobrazić przekrój pionowy a cm², na który z jednej strony działa ciśnienie $ah \,.\, d$ gramów, z drugiej $ax \,.\, d$ gramów, gdzie h i x oznacza wysokość słupów cieczy w obu naczyniach (od a do poziomu). Płyny mogą być w spoczynku tylko wtedy, gdy oba ciśnienia są równe, $ah \,.\, d = ax \,.\, d$, czyli $h = x$, t. j. wysokości cieczy są równe. Na rycinie oznaczono $h = 26$ cm.

Doświadczalnie sprawdzić można tę właściwość, napełniając naczynie (rys. 108) wodą, bądź spirytusem, rtęcią i t. p.; ciecz przepływa do połączonych z naczyniem *A* wszystkich rurek i dochodzi wszędzie do tego samego poziomu, niezależnie od kształtu i pochylenia rurek.

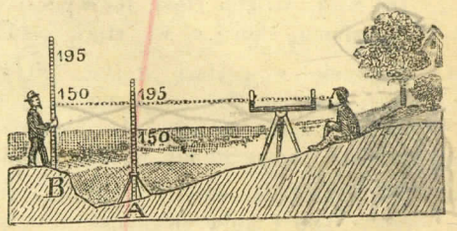


Rys. 108.

Zastosowania. a) *Wodowskaz* (rys. 109) służy do oznaczenia poziomu wody w kotłach. Składa się z pionowej rury szklanej, umieszczonej z boku kotła i połączonej z nim u góry i u dołu; poziom wody w kotle jest taki sam jak w rurze.

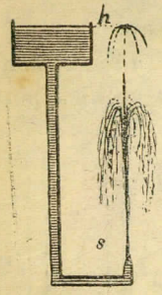


Rys. 109. Wodowskaz.



Rys. 110. Niwelacja.

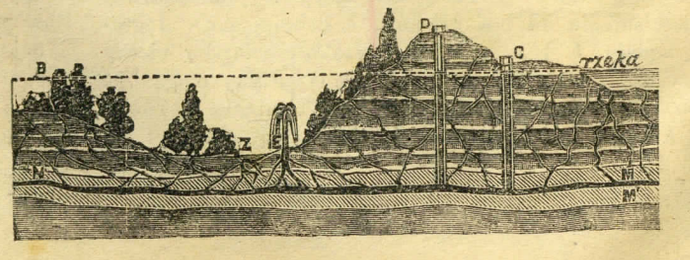
b) *Libella dwuramienna* składa się z długiej do 2 m poziomej rury blaszanej, do której przystosowano na końcach pionowe rurki szklane. Użycie przyrządu do niwelacji czyli wyznaczenia poziomu w miernictwie, kanalizacji i t. p. objaśnia rys. 110.



Rys. 111. Wysokość wodotrysku.

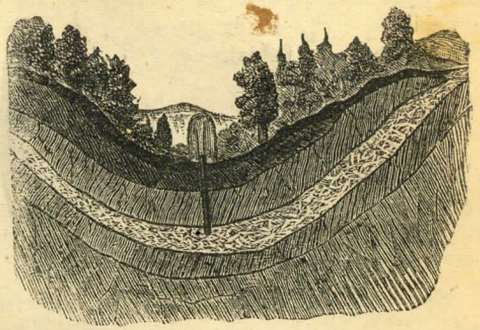
c) *Wodotryski* czyli *fontanny*. Jeżeli od spodu zbiornika (rys. 111) wodę prowadzi rura zagięta ku górze, tak iż otwór tej rury przypada niżej poziomu wody w zbiorniku, to wytrysk wody powinien dojść do wysokości (*h*) wody w zbiorniku. W rzeczywistości jednak woda zawsze bije niżej wskutek tarcia w rurach, oporu powietrza i spadających cząstek strumienia.

d) *Źródła*. Zadrzewione góry i pagórki tworzą nieraz zbiorniki wody deszczowej, skąd woda spływa po nieprzepuszczalnym pokładzie, np. gliny, ku dolinie i tam sączy się na powierzchnię w postaci *źródeł naturalnych* (*Z*, rys. 112). Jeżeli zaś woda utoruje sobie podziemną drogę szerszą i gładszą, tworzy źródło bijące czyli *zdrój* (*E*, rys. 112).



Rys. 112. Źródła i studnie.

Skoro woda dostaje się między dwa lub więcej pokładów nieprzepuszczalnych, wtedy po przebiciu wierzchnich pokładów tryska na znaczną wysokość, stanowiąc t. zw. *studnie artezyjskie* (rys. 113). Dochodzą one głębokości 200, 300, a nawet 500 metrów i zasilają zdrową, czystą wodą niektóre wielkie miasta (Paryż), a w krajach pustych, bezwodnych (Algerja południowa, na pograniczu Sahary) przyczyniają się do rozwoju roślinności i kolonizacji.



Rys. 113. Studnia artezyjska.

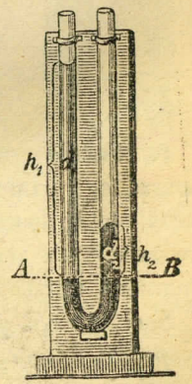
e) *Studnie zwykłe*. Woda rzek i jezior przesiąka nieraz daleko naokół, zwłaszcza w miejscowościach piaszczystych, jako woda gruntowa (podziemna, zaskórna). Po wykopaniu dołu mniej lub więcej głębokiego woda zbiera się w nim; po ocembrowaniu powstaje tu studnia (rys. 112), w której poziom wody zależy od stanu wody w rzece, jeziorze lub wodozbiorach podziemnych.

f) *Wodociągi*. Wielki zbiornik wody dla całego miasta, a w wodociągach miejscowych dla całego domu, willi, fabryki i t. p., jest tak wysoki, aby woda stała w nim wyżej od kranów wodociągowych na najwyższych piętrach; w miastach znajduje się w t. zw. wieży ciśnień. Stąd rozchodzi się woda rurami podziemnemi, dosięgając tego samego poziomu, co w zbiorniku, aż do najdalszych stron miasta. Do wieży ciśnień wtłacza się wodę pompami z rzeki, jak w Warszawie, bądź z jezior, jak w Berlinie, albo ze źródeł artezyjskich, jak w Paryżu. Starożytne akwedukty prowadziły wodę rynnami wprost z gór pobliskich.

2. Równowaga dwu cieczy Skoro naczynia zespolone zawierają ciecze o rozmaitej gęstości, nie mieszające się z sobą, np. wodę i rtęć, albo wodę i oliwę, to wysokości słupów cieczy są w odwrotnym stosunku do gęstości cieczy, t. j. ciecz lżejsza utworzy słup odpowiednio wyższy. Wysokość liczy się od poziomu zetknięcia obu cieczy.

Po wlaniu rtęci, a następnie wody do jednej z rurek, ułożą się oba płyny w ten sposób, że poziom wody będzie znacznie wyższy nad poziomem rtęci. Jeżeli wysokość jednej cieczy $= h_1$ (rys. 114), gęstość $= d_1$, wysokość drugiej cieczy $= h_2$, jej gęstość $= d_2$, to

$$h_1 : h_2 = d_2 : d_1.$$



Rys. 114. Równowaga dwu cieczy.

Dowód. Niech AB stanowi (rys. 114) poziom zetknięcia się obu płynów. Część płynu cięższego, leżąca pod tym poziomem, w zagięciu rurki, działa jak waga, gdzie na jednem ramieniu działa na każdy cm² powierzchni ciśnienie $h_1 \cdot d_1$, na drugiem $h_2 \cdot d_2$ gramów. W stanie równowagi obydwa ciśnienia są jednakowe, t. j. $h_1 \cdot d_1 = h_2 \cdot d_2$ czyli:

$$h_1 : h_2 = d_2 : d_1.$$

Zastosowanie do oznaczenia gęstości cieczy. Nalewa się do rurki w kształcie U nieco rtęci; do jednego ramienia wlewa się na powierzchnię rtęci dowolną ilość danej cieczy, do drugiego tyle wody, aby rtęć doszła do jednakowego poziomu w obu rurkach. Stosunek wysokości wody do wysokości cieczy stanowi liczebnie gęstość cieczy.

Np. słup oliwy o wysokości 22 cm, a gęstości d, równoważy słup wody 20 cm;

$$\text{zatym } 22 \cdot d = 20 \cdot 1,$$

$$\text{skąd } d = \frac{20}{22} = 0{,}91.$$

Zadania.

1. Rurki zespolone napełniono wodą i naftą, przyczym woda ma poziom o 19 cm, a nafta o 23 cm wyższy ponad poziom zetknięcia płynów. Oznaczyć gęstość nafty. Odp. 0,83.

2. Do rurek zespolonych wlano naprzód rtęć do szerszej rurki o przekroju 8 cm², następnie do węższej rurki o przekroju 2 cm² nalano 272 g wody. O ile się podniesie poziom rtęci w rurce szerszej ponad poziom zetknięcia? Czy obszerność tej ostatniej rurki wpływa na zmianę w różnicy poziomów obu płynów? Odp. 10 cm; nie.

§ 29. Pęd do góry.

1. Parcie czyli **pęd do góry**. Na każdą powierzchnię poziomą ciała zanurzonego istnieje nacisk podwójny: z góry, skutkiem ciężaru słupa cieczy, jaki spoczywa na danej powierzchni, i z dołu taki sam nacisk, dźwigający ten słup cieczy. Oba naciski muszą być jednakowe, skoro zanurzona warstwa nie podnosi się, ani opada.

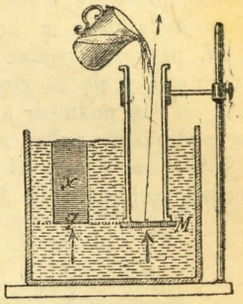
Nacisk czyli parcie płynu ku górze, równe naciskowi na dół, zowiemy *pędem do góry* albo *parciem do góry*. Parcie zaś na jednostkę powierzchni, np. na 1 cm², zowiemy *ciśnieniem do góry*.

Płyn wypiera ciało zanurzone.

Teoretycznie objaśnia to rys. 115, gdzie na warstwę q ciśnie z góry ciężar słupa x cieczy, z dołu więc musi go podtrzymywać parcie równoważne, oznaczone skazówką.

Tak więc, wielkość parcia wyraża ten sam wzór, co wielkość nacisku na dno (§ 27, art. 3):

$$\text{pęd do góry } P = q \cdot h \cdot d.$$



Rys. 115.
Pęd do góry.

Doświadczenie (rys. 115). Zamyka się walec szklany denkiem M z blachy lub szkła i zanurza się do wody, przytrzymując denko za nitkę doń uwiązaną, poczem puszcza się nitkę. Denko nie odpada, przyciska je więc do walca parcie z dołu. Za nalaniem wody do walca denko odpadnie, skoro poziom wody w walcu zrówna się z poziomem w naczyniu. Denko powinno być lekkie, aby doświadczenie wypadło dokładnie (dlaczego?)

Zamiast przez dolewanie wody można sprawdzić wielkość parcia przez obciążanie denka za pomocą ciężarków (AA, rys. 103, co jednak jest mniej dogodne i nie tak oczywiste.

2. Prawo Archimedesa. Wskutek siły wypierającej ku górze, każde ciało staje się lżejsze po zanurzeniu do płynu. Ową stratę na wadze zauważył Archimedes i dał jej wyraz w następującej zasadzie:

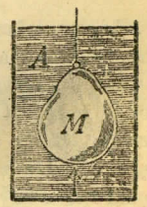
Każde ciało, zanurzone w płynie, traci na wadze tyle, ile waży płyn przez nie wyparty (prawo Archimedesa, około r. 220 przed Chr.).

Należy tu rozumieć, że ubytek ciężaru jest pozorny: ile traci ciało, tyle zyskuje na wadze płyn, do jakiego je zanurzono, tak iż w całym układzie niema zmiany. Wynika to już z zasady działania i oddziaływania (pt.); skoro ciecz wypiera ciało zanurzone, to i ciało również musi cisnąć na ciecz.

Skoro v oznacza objętość ciała, d jego gęstość, a d_1 gęstość płynu, to:

ciężar ciała $p = v \cdot d$

pęd do góry $p_1 = v \cdot d_1$ (= strata na ciężarze).



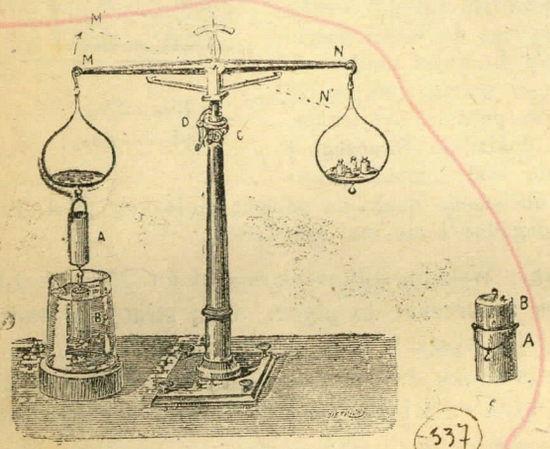
Rys. 116.

Dowód rozumowany. Wyobraźmy sobie (rysunek 116), że ciało M zostało zastąpione masą cieczy tej samej, jaka jest w naczyniu, i ta ciecz zachowuje postać i objętość M. Puszczona swobodnie, masa M spadłaby własnym ciężarem; wewnątrz zaś cieczy otaczającej zostaje ona w zawieszeniu, podtrzymywana przez ciśnienia okoliczne. Ciśnienia te więc muszą sprawiać parcie ogólne, które równoważy masę M, zatym równa się ciężarowi tej masy M cieczy.

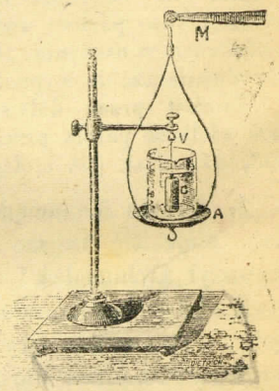
Sprawdzenie doświadczalne odbywa się na *wadze hydrostatycznej* (rys. 117), o krótkich szalkach, opatrzonych haczykami pod spodem.

Przystosowuje się pełny walec metalowy B do próżnego A (rys. 117) tak, aby pierwszy wsuwał się szczelnie wewnątrz drugiego, jak to wskazuje rycina dodatkowa z boku. Oba walce zawiesza się na jednej z szalek, np. M, przyczym walec próżny znajduje się nad pełnym; na drugiej szalce N równoważy się je ciężarkami. Po zanurzeniu pełnego walca do wody, szalka M się podnosi; ażeby przywrócić równowagę, trzeba napełnić wodą całe wydrążenie walca A.

Takie same wyniki daje walec szklany, kościany, gumowy i t. p., i to w rozmaitych płynach, jak w spirytusie, nafcie, glicerynie, oleju i t. p.



Rys. 117. Przyrząd Archimedesa.



Rys. 118.

Ażeby okazać, że z ciężaru ciała zanurzonego nic nie ginie w rzeczywistości, stawia się na jednej z szalek wagi, np. M (rys. 118), szklankę z wodą i równoważy się ją ciężarkami na drugiej szalce. Zanurza się do wody walec C, zawieszony nieruchomo na haczyku V odpowiedniej podstawki; wtedy szalka M opada, zdradzając przez to, że wodzie przybyło ciężaru. Do zrównoważenia potrzeba na drugą szalkę położyć ciężar równy ciężarowi wody, mającej objętość wałeczka C.

3. Przykłady. 1) Klucz żelazny waży 46,2 g; zawieszony zaś na wadze hydrostatycznej tak, iż zanurza się w wodzie, waży 40,2 g. Ciężar właściwy żelaza

$$d = \frac{46{,}2}{46{,}2 - 40{,}2} = 7{,}7.$$

2) Kryształ soli waży w powietrzu 26,66 g, zawieszony zaś w benzynie o gęstości 0,71 waży 18,06 g. Ciężar właściwy soli

$$d = \frac{26{,}66}{26{,}66 - 18{,}06} \cdot 0{,}71 = 2{,}2.$$

3) Pręt szklany waży w powietrzu 36,4 g; zawieszony w wodzie, jak w 1-ym przykładzie, waży 22,4 g; zawieszony w oleju lnianym, waży 23,2 g. Ciężar właściwy oleju

$$d = \frac{36{,}4 - 23{,}2}{36{,}4 - 22{,}4} = 0{,}94.$$

Zadania.

1. Ile waży ciężar kilogramowy pod wodą, jeżeli jest wyrobiony: a) z żelaza; b) z mosiądzu (c. wł. 8,4)? Odp. 861 g; 881 g.

2. Wagę zwykłą zanurzono do wody. Co się stanie z szalkami, gdy jednę obciążyć 79,59 g ołowiu (c. wł. 11,37), a drugą 101,5 g szkła kryształowego (c. wł. 2,9)? Odp. Szalka ze szkłem się podniesie.

3. Ile szkła trzeba dołożyć do wagi poprzedzającej, aby zrównoważyć ołów? Odp. 9,28 g.

4. Grzebień kościany waży w powietrzu 18,2 g, a zawieszony na nitce tak, aby zanurzał się cały w wodzie, waży tylko 4,2 g; ile wynosi ciężar właściwy kości, jeśli pominąć znikomą wagę nitki? Odp. 1,3.

5. Zawieszono na wadze laseczkę cyny, używanej do lutowania, tak iż cyna zanurza się całkowicie do wody, przyczym waży 57,6 g; zanurzona podobnież do benzyny, waży 60,4 g; ciężar cyny w powietrzu wynosi 66,9 g. Jaki jest ciężar wł. cyny? benzyny? Odp. 7,2; 0,7.

§ 30. Pływanie.

1. Warunek pływania. Przy zanurzeniu ciała do płynu mogą zajść 3 wypadki:

a) ciało tonie, t. j. spada na dno, skoro ciężar ciała jest większy, niż parcie płynu, t. j. ciężar wypartego płynu;

b) ciało jest w zawieszeniu, t. j. utrzymuje się w każdym miejscu płynu, całkowicie zanurzone, skoro oba te ciężary są jednakowe;

c) ciało pływa, t. j. unosi się na powierzchni płynu, wystając z niego częściowo, skoro ciężar ciała jest mniejszy od ciężaru płynu w objętości całego ciała.

Oznaczając ciężar ciała przez p, ciężar płynu w tej samej objętości przez p_1, można napisać, że ciało

tonie,	w zawieszeniu,	pływa,
gdy $p > p_1$	gdy $p = p_1$	gdy $p < p_1$.

Wszystkie pomienione przypadki są wynikiem oczywistym prawa Archimedesa. Można je wyrazić inaczej, mianowicie porównaniem ciężarów właściwych ciała i płynu (albo gęstości), zważywszy, iż są to ciężary równych objętości: 1 cm³ ciała i 1 cm³ płynu. Oznaczając ciężar właściwy ciała przez d, a płynu przez d_1, można napisać, że ciało

tonie,	w zawieszeniu,	pływa,
gdy $d > d_1$	gdy $d = d_1$	gdy $d < d_1$.

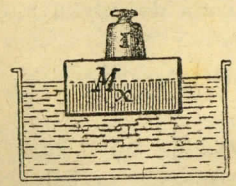
Np. drzewo bukowe pływa po wodzie, a tonie w spirytusie, gdyż ciężar wł. buku = 0,85, wody 1, spirytusu 0,8; żelazo i ołów pływają po rtęci, gdyż c. wł. żelaza = 7,7, ołowiu 11,3, rtęci 13,6; złoto i platyna toną we wszystkich płynach, gdyż mają ciężary wł. 19,3 i 21,5.

Płyny układają się warstwami, w porządku swych ciężarów gatunkowych, najcięższy płyn na spodzie; np. rtęć, woda i oliwa tworzą warstwy w porządku wymienionym, t. j. oliwa na wierzchu. Ta sama jednak oliwa, wlana do nafty, opada na dno, bo ciężar wł. oliwy = 0,93, nafty 0,83.

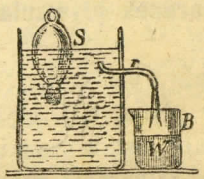
2. Głębokość zanurzenia. Przy pływaniu ciało zanurza się tym głębiej w rozmaitych płynach, im dany płyn jest gatunkowo lżejszy. Mianowicie:

Ciało pływające zanurza się tyle, że waga cieczy, wypartej częścią zanurzoną, równa się wadze całego ciała. Np. płyn wyparty częścią x (rys. 119) waży tyle, co całe ciało M wraz z ciężarem I.

Doświadczenie (Alkhazini 1121). Waży się szklaneczkę B wraz z pływakiem S (rys. 120); następnie wpuszcza się pływak do naczynia, napełnionego wodą aż do rurki odpływowej r, przyczym woda wyparta W spływa do szklaneczki. Wtedy waga szklaneczki z wodą równa się wadze szklaneczki z pływakiem.



Rys. 119. $M + I = x$.



Rys. 120. $S = W$.

Głębokość zanurzenia ciała można oznaczyć z gęstości ciała i cieczy. Skoro ciało o objętości V i gęstości d zanurza się tylko częścią v, to ciężar wypartej cieczy o gęstości d_1 wynosi $v \cdot d_1$, a ciężar ciała wynosi $V \cdot d$, tak iż:

$$V \cdot d = v \cdot d_1$$
$$v : V = d : d_1$$

objętość zanurzona tak się ma do całej objętości ciała, jak gęstość ciała do gęstości płynu.

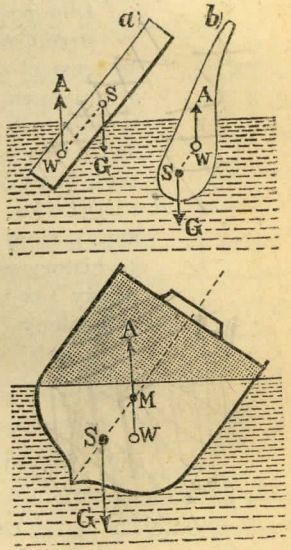
Np. korek o gęstości 0,25 zanurza się tylko czwartą częścią w wodzie. Żelazo o gęstości 7,7, pływając po rtęci, której gęstość = 13,6, zanurza się przeszło połową, mianowicie 7,7 : 13,6 = 0,56 swej objętości.

3. Pływanie ciał wydrążonych. Ciało gatunkowo cięższe od płynu może po nim pływać, skoro jest wydrążone, wtedy bowiem wypiera płyn nie tylko objętością swej masy, ale i wydrążenia; wskutek tego parcie płynu może zrównoważyć wagę ciała.

Ciała pełne, bez wydrążeń, o gęstości mniejszej od 1, pływają po wodzie, ponieważ ciężar każdego cm³ ciała < 1 g podtrzymuje woda swem parciem = 1 g na cm³ objętości.

Ciała o ciężarze właściwym większym od jedności pływać mogą po wodzie tylko w razie odpowiedniego wydrążenia, np. okręty żelazne, pancerniki.

Każda tonna (1000 kg) odpowiada 1 m³ wypartej wody czystej; w wodzie morskiej wypada obciążenie nieco większe, mianowicie 1030 kg na 1 m³ pojemności statku.



Rys. 121.

4. Równowaga ciał pływających. Na każde ciało pływające działają dwie równe pionowe siły, przeciwnie skierowane: waga samego ciała G w jego środku ciężkości S (rys. 121), oraz parcie płynu A w środku ciężkości W płynu wypartego, czyli *środku ciśnień*.

Ciało pływające przybiera takie położenie, że jego środek ciężkości (S) i środek ciśnień płynu (W) przypadają na jednej linji pionowej.

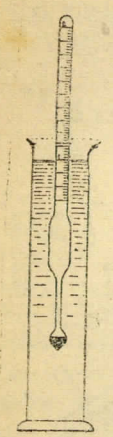
Skoro S leży ponad W, ciało ma równowagę chwiejną, t. j. przewraca się, np. ołówek pionowo zanurzony.

Skoro S leży poniżej W, ciało ma równowagę stałą, t. j. po odchyleniu powraca do stałego położenia, np. areometry (rys. 122 i 123).

Tak więc, pewność równowagi ciała pływającego wymaga, aby środek ciężkości ciała przypadał głębiej niż cieczy. Jednakże ciało zachowa równowagę i wtedy (jak widać z rys. 121), gdy W leży na równi z S, a nawet wyżej, z warunkiem, aby punkt zwany *metacentrum*, t. j. punkt przecięcia M linji parcia z linją środkową ciała, przypadł ponad środkiem ciężkości S.

5. Areometry czyli **próbki do płynów** są to pływaki szklane, wskazujące ciężar właściwy płynów (gęstość), bądź ilość ciał rozpuszczonych w wodzie czy w innym płynie, względem ilości roztworu, t. j. odsetek ciała rozpuszczonego.

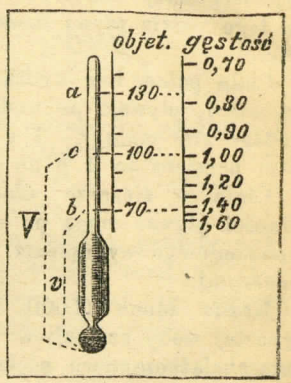
Areometr ma kształt rurki u dołu wydętej i obciążonej tak, aby pływała w położeniu pionowym (rys. 122 i 123). Zanurza się tym głębiej, im lżejszy jest płyn, po którym pływa.



Rys. 122. Areometr w użyciu.

Stosownie do przeznaczenia, rozróżniamy dwa rodzaje areometrów: gęstościowe i odsetkowe (procentowe).

Oba przyrządy tu opisane są to *areometry podziałkowe* czyli areometry o stałej wadze, a zmiennem zanurzeniu, nie posługują się bowiem ciężarkami; dawniejsze zaś *areometry wagowe*, czyli areometry o stałej objętości (Nicholsona i Fahrenheita), mają obecnie znaczenie tylko historyczne. Do podziałkowych należy też areometr Beaumégo, podzielony na szczególne „stopnie", dziś nie posiadające racji bytu.



Rys. 123. Podziałka areometru.

a) *Areometry gęstościowe* (densymetry) mają podziałkę, wskazującą bezpośrednio gęstość względną płynów. Są to najprostsze i najdogodniejsze narzędzia do oznaczania ciężaru właściwego płynów w większej ilości, z dokładnością zupełnie wystarczającą w technice. Podziałkę ustanawia się bądź doświadczalnie, bądź z obliczenia.

Zwykle osobne areometry służą do płynów lżejszych i cięższych gatunkowo od wody; w jednym podziałka idzie z dołu do góry, t. j. cyfra 1 stoi około *b* (rys. 123), w drugim odwrotnie, cyfra 1 około *a*. Podziałka zawiera się w granicach 0,70 do 1,00, oraz 1,00 do 2,00; są to bowiem najniższe i najwyższe ciężary wł. płynów (z wyjątkiem bromu i rtęci, do których areometry się nie nadają).

Droga doświadczalna do wyznaczania podziałki polega na przygotowaniu szeregu roztworów o wiadomej gęstości, np. 1,10, 1,20, 1,30 itd., i zaznaczeniu miejsca, do jakiego się zanurza areometr w każdym roztworze.

Drogą obliczenia można łatwiej otrzymać podziałkę. W tym celu oznacza się doświadczalnie w cm³ tylko objętość v i V areometru do początku i do środka szyjki (np. do *b* i *c* na rys. 123). Jeżeli w wodzie areometr zagłębia się objętością V, w innej cieczy, o gęstości d, objętością v, to v cm³ cieczy waży tyleż, co V cm³ wody (= ciężarowi areometru):

$$v \,.\, d = V \,.\, 1 \qquad \text{stąd } d = \frac{V}{v},$$

t. j. gęstość cieczy równa się odwrotnemu stosunkowi zanurzonych objętości areometru.

Dzieląc odległość *ab* na równe części, otrzymuje się areometr objętościowy (wolumetr), wskazujący zanurzoną objętość, skąd oblicza się gęstość płynu. Zwykle jednak obliczone gęstości wypisuje się wprost na areometrze, jak widać z tabelki.

Jeżeli np. objętość do *b* (zanurzenie w płynie) = 70 cm³, a do *c* (w wodzie) = 100 cm³, to gęstość płynu = 100 : 70 = 1,43. W płynie lżejszym względem wody areometr zanurzy się np. do *a* = 130 cm³; gęstość tu wynosi 100 : 130 = 0,77 (por. nierówność podziałki na rysunku).

b) *Areometry odsetkowe* wskazują bądź stosunek dwu cieczy zmieszanych, wyrażający ilość gramów jednej z cieczy na 100 gramów roztworu, bądź zawartość w odsetkach ciała stałego w roztworze. Do każdego roztworu służy osobny areometr: alkoholometry stosują się do oznaczania mocy spirytusu; salinometry do oznaczania zawartości soli; sacharymetry do cukru; acydymetry do kwasów; laktometry do mleka. Podziałka na każdym z nich wyznacza się z doświadczenia, według dobranego szeregu roztworów o wiadomej zawartości odsetkowej.

Uwaga. Na ciężar właściwy cieczy wpływa temperatura, t. j. stopień ogrzania, daleko znaczniej, niż na ciężar wł. ciał stałych, gdzie tylko w oznaczeniach bardzo dokładnych należy się z nią liczyć. W areometrach błąd wskutek rozszerzalności płynu od ciepła może dochodzić kilku %. Zwykle podziałka areometrów stosuje się do temperatury pokojowej (15—17° C.).

Zależność ciężaru właściwego od temperatury uwzględnia dział o cieple (pt. Rozszerzalność).

5. Zastosowania. Pływanie okrętów, łódek, tratew. — Pasy korkowe do pływania; pierścienie ratunkowe z blachy, wypełnione powietrzem. — Pęcherz pływny ryb, jego zmiany w zależności od zanurzenia. — Mosty pontonowe. — Beczki sygnałowe na mieliznach, w przystaniach; pływające latarnie morskie.

Balast na okrętach; umieszczenie maszyn, węgla, towarów na spodzie statku. — Składanie masztów i usuwanie rzeczy z pokładu w czasie gwałtownej burzy.

Dlaczego trudno zanurzyć się głęboko do wody, gdy się wetchnie do płuc dużo powietrza? — Dlaczego łatwo zanurzyć się, wyciągając ręce do góry? — Dlaczego statki, wpływające z morza do rzeki, zanurzają się głębiej?

Zadania.

1. Jak głęboko zanurza się w wodzie sześcian blaszany, wydrążony, o 1 dm boku i 100 g wagi, bez obciążenia, oraz napełniony do połowy naftą o gęstości 0,8? Odp. 1 cm, 5 cm.

2. Kula drewniana wagi 1600 g pływa: a) po wodzie; b) po oliwie o gęstości 0,85. Ile wypiera każdej z tych cieczy? Odp. 1600 cm³; 1882 cm³.

3. Człowiek waży 71 kg; ma objętość 70 dm³, gdy nabierze do płuc wietrza. Czy zanurzy się całkowicie w wodzie morskiej o gęstości 025? Odp. Nie.

4. Góra lodowa wystaje z wody na 10 m. Jak głęboko tkwi w wodzie, ając tu kształt prostopadłościanu, jeżeli gęstość lodu = 0,92, a wody mor- iej = 1,025? Odp. 87,6 m.

5. Posąg marmurowy, ważący 540 kg, spadł do wody. Ile trzeba doń zywiązać drzewa sosnowego, aby podźwignęło posąg i wraz z nim wypły- ło, jeżeli gęstość marmuru wynosi 2,7, sośniny 0,66? Pomija się wagę objętość sznurów.

Rozw. Niezbędna objętość drzewa x dm³ wraz z objętością marmuru 40 : 2,7 = 200 dm³ wypierają (x + 200) dm³ wody, która swym par- em (x + 200) kg ma udźwignąć wagę marmuru 540 kg wraz z wagą drze- a x . 0,66 kg; czyli

$$x + 200 = 540 + 0{,}66\ x.$$

Stąd x = 1000 dm³; potrzeba więc co najmniej 1 metra sześć. drzewa.

6. Jaką wielkość powinna mieć deska sosnowa, gruba na 5 cm, aby lywając po wodzie, mogła utrzymać na sobie człowieka, ważącego 75 kg? ięża wł. sośniny = 0,66. Odp. Przynajmniej 441 dm², a więc np. metr szerokości i 4,41 m długości.

7. W naczyniu z naftą pływa kula wydrążona, ważąca 80 g, o ze- nętrznej średnicy 10 cm, czyli objętości 523 cm³. Ile ziarnek śrutu agi po $\frac{1}{10}$ g, trzebaby wrzucić do kuli, aby ją zanurzyć całkowicie d afty (c. wł. 0,8)? Odp. 3389.

§ 31. Siły cząsteczkowe w płynach. *)

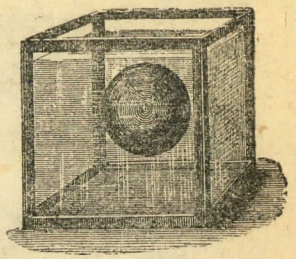
1. **Postać płynu pod wpływem jego spójności** (por. § 8). Każd płyn pod wpływem własnej spójności dąży do skupienia się w kształci kuli. W warunkach powszednich przeszkadza takiemu skupieniu sił ciężkości: w masie płynu, jaką zwykle spotykamy, cząstki wyższe cisn swym ciężarem na niżej położone i płyn się rozlewa. Za zmniejszenie się masy nacisk ten maleje, tak iż stać się może znikomym wobec sił spójności, i płyn przybiera mniej lub więcej dokładnie postać kulistą.

Stąd krople rozmaitych płynów są tym bardziej podobne do kulek im są mniejsze; np. kropla wody na końcu igły, kropelka rtęci na stole ziarna śrutu, które stanowią krople stopionego ołowiu, zastygłe prz spadaniu do wody.

Można wpływ ciężkości usunąć jeszcze w inny sposób, mianowici równoważąc ciężar danego płynu przez wlanie go do większej ilości innego, równie gęstego płynu, któryby się z nim nie dał zmieszać; płyn tak zrównoważony przybiera kształt kuli, unoszącej się w masie płyn otaczającego.

*) Wszelkie zjawiska tu opisane dotyczą płynów niedziałających chemicznie siebie ani na ciała, z jakiemi się stykają.

Doświadczenie Plateau (1843, rys. 124). Do naczynia szklanego o ścianach płaskich nalewa się mieszaninę wody ze spirytusem tak dobraną, aby posiadała gęstość taką jak oliwa (spirytus jest względnie lżejszy od oliwy, woda cięższa od oliwy); mała ilość oliwy, wpuszczona wewnątrz tej mieszaniny, utworzy w niej kulę.



Rys. 124.

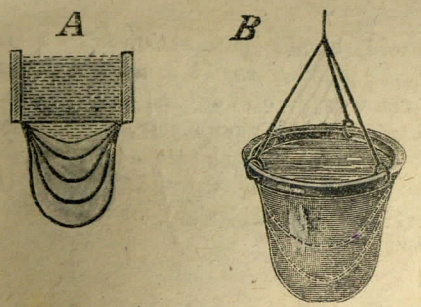
2. **Błonka powierzchowna.** Tworzenie kropel każe przypuszczać, że na powierzchni płynu istnieje pewien stan napięcia, którego brakuje wewnątrz płynu; zowiemy je *napięciem powierzchownym*. Sprawia ono ciśnienie ku wnętrzu kropli i wogóle ku wnętrzu wklęsłości, jaką płyn tworzy; ciśnienie to, skierowane prostopadle do powierzchni, zowie się *ciśnieniem powierzchownym*. Skutkiem tego płyn dąży do ściągnięcia swej masy tak, aby powierzchnia była jak najmniejsza.

Napięcie na powierzchni wklęsłej jest mniejsze, na wypukłej większe, niż na powierzchni płaskiej. Im wypuklejsza jest powierzchnia, t. j. im mniejszy jej promień, tym silniej działa napięcie powierzchowne, zatym i ciśnienie ku wnętrzu tej wypukłości.

Zewnętrzna przeto warstwa płynu zachowuje się jak błona sprężysta i nosi miano *błonki powierzchownej*. Podobnie zachowuje się balonik gumowy, napełniony płynem lub gazem.

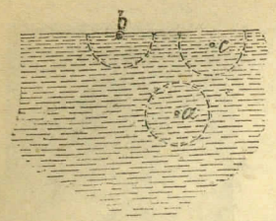
Podobieństwo takie łatwo zauważyć, porównywając kroplę, która stopniowo narasta u wylotu rurki (rys. 125 *A*, w powiększeniu), z woreczkiem gumowym, który powoli napełnia się płynem (rys. 125 *B*); tu i tam wzrasta ciężar płynu, a przeciwdziała mu napięcie błonki płynnej, względnie błonki gumowej.

Gdy kropla oderwie się wreszcie od rurki, skupia się w postaci kuli, jako bryły, która posiada najmniejszą powierzchnię ze wszystkich brył o równej objętości.



Rys. 125.

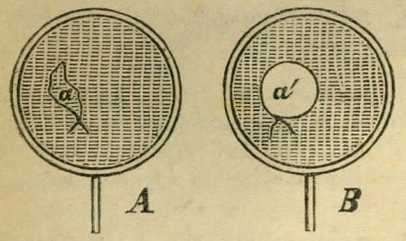
Teoretyczne uzasadnienie błonki powierzchownej. Wszystkie cząstki płynu przyciągają się wzajemnie z jednakową siłą. Naokoło każdej cząstki można sobie wyobrazić pewien obszar przyciągania, niezmiernie mały, postaci kulistej, t. zw. *sferę spójności*, gdzie działanie cząstek wzajemnie się równoważy, np. w sferze dokoła cząstki *a* (rys. 126). Tylko przy powierzchni płynu cząstki nie podlegają równemu przyciąganiu na wszystkie strony, bo nad nimi brakuje sfery spójności, czy to częściowo, jak dla cząstki *c*, czy całkowicie, jak dla *b*. Cząstki więc w takiej warstwie powierzchownej, mającej grubość równą promieniowi sfery, przyciągają się mocniej, tak iż warstwa posiada większą gęstość, a zatym i trwałość, stanowiąc t. zw. błonkę powierzchowną.



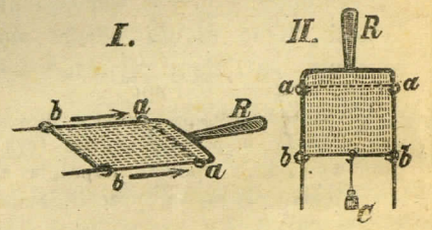
Rys. 126.

Grubość błonki da się oznaczyć najlepiej dla baniek mydlanych; wynosi około 0,06 μ., czyli 0,000 06 mm.

Doświadczenia. 1) Kółko z drutu zanurza się do wody mydlanej; po wyjęciu pozostaje w nim błonka mydlana. Skoro na niej położyć ostrożnie pętelkę nicianą (*a*, rys. 127), zmoczoną również w mydlinach, a następnie przerwać błonę wewnątrz pętelki, ta ostatnia przybiera postać kółka (*a'*). Błonka mydlana ściąga się więc tak, iż posiada najmniejszą powierzchnię.



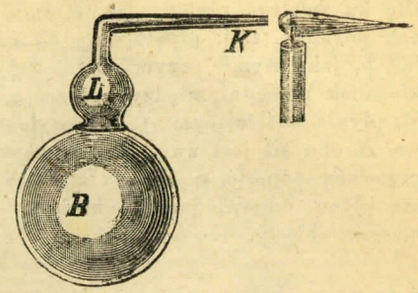
Rys. 127.



Rys. 128.

2) Rozciągliwość błonki powierzchownej, a zarazem jej wytrzymałość łatwo sprawdzić za pomocą ramki drucianej z rączką *R* (rys. 128), gdzie 3 boki są stałe, czwarty przesuwany na uszkach, np. od *aa* do *bb*. Umoczywszy ramkę w mydlinach, zauważymy, że po wyjęciu błonka ściągnie drucik ruchomy od położenia *bb* do *aa* (I), podobnie, jakby to sprawiła błonka gumowa. Jeżeli ramkę ustawić pionowo (II), można drucik obciążyć małym ciężarkiem *C*, rozciągając ją aż do rozerwania.

3. Ciśnienie powierzchowne i jego wzrost w miarę zmniejszania się powierzchni okazuje doświadczenie z bańką mydlaną (rys. 129). Po wydęciu bańki *B*, za pomocą małego lejka *L*, zwróconego szerszą stroną na dół i opatrzonego wąskim kolankiem *K*, zbliża się wylot *K* do świecy zapalonej. Płomień się odchyla, i to coraz bardziej w miarę skurczenia się bańki; za pomocą bardzo małej, umiejętnie wydętej bańki można świecę zadmuchnąć.

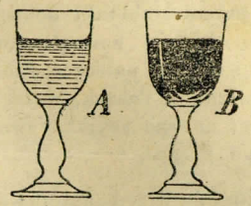


Rys. 129.

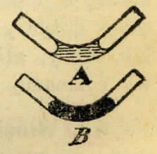
Zastosowania. Pływanie igły po wodzie; zauważyć objętość wody, wypartej naciskiem igły. — Burzliwe, nawet wybuchowe wrzenie roztworów mydlanych i ługowych, rozczynów kleju.

Niszczące działanie fal morskich na brzegi, tamy, ściany okrętu i t. p. polega nie tylko na energji kinetycznej wody, ale zarazem na energji potencjalnej błony powierzchownej. Jak przy rozerwaniu się pęcherza jego strzępki rozlatują się lub uderzają, dając pracę mechaniczną, podobnież, tylko słabiej, działa zerwanie błony powierzchownej; zawiera ona energję potencjalną, która zamienia się na kinetyczną.

3. Zwilżanie. Płyny w zetknięciu z ciałami stałymi zwykle przystają do nich; należy więc przypuścić, że między cząstkami ciał stałych i płynów zachodzi przyciąganie silniejsze od spójności płynu. Takie przyciąganie ciał różnorodnych na powierzchni zetknięcia zowie się *przyleganiem* (przyczepnością, adhezją, por. § 8, art. 2); płyn więc zwilża ciała, gdy przyleganie jest większe od spójności; ciała stają się mokre. Np. woda, spirytus, nafta zwilżają prawie wszystkie ciała, rtęć zwilża metale. Stąd powierzchnia płynów zakrzywia się nieco ku górze przy ścianie naczynia (rys. 130 A).



Rys. 130.

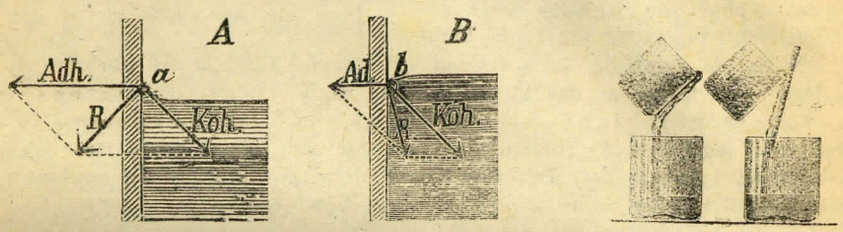


Rys. 131.
Menisk.

Niektóre ciecze nie zwilżają ciał stałych, z którymi się stykają, tak iż ciała pozostają suche; przyjmujemy tutaj, że spójność jest większa od przylegania. Np. woda nie przystaje do powierzchni tłustych, jak parafiny, łoju; rtęć nie przystaje do szkła, drzewa, papieru, skóry, kamienia itp. Powierzchnia płynów niezwilżających zaokrągla się ku dołowi przy ścianach naczynia (rys. 130 B).

Zakrzywiona powierzchnia płynu koło ścian naczynia zowie się *meniskiem*; bywa on wklęsły lub wypukły, zależnie od tego, czy płyn zwilża ściany lub nie. W naczyniach bardzo wąskich, jak flakonikach, rurkach, menisk tworzy powierzchnię półkulistą, i to przy jakimkolwiek położeniu rurki (rys. 131).

Przyleganie czyli adhezję można uważać jako skierowaną nazewnątrz siłę przyciągania między płynem a ścianą (rys. 132); spójność czyli kohezję jako siłę ku wnętrzu płynu. Na ścianie pionowej musi mieć przyleganie kierunek poziomy, t. j. prostopadły do ściany, spójność zaś dla danej cząstki *a* lub *b*, jako wynik przyciągania wszystkich cząstek sąsiednich, musi mieć kierunek pośredni między pionem a poziomem, t. j. 45° względem poziomu. W płynie zwilżającym (*A*) przyleganie przeważa tak dalece, że wypadkowa *R* obu sił jest zwrócona na zewnątrz; w płynie zaś niezwilżającym (*B*) przeważa spójność, stąd wypadkowa *R* prowadzi ku wnętrzu płynu. Powierzchnia płynu, odpowiednio do kierunku siły *R* w danym miejscu, tworzy dla *a* menisk wklęsły, dla *b* wypukły.



Rys. 132. Zasada zwilżania.

Rys. 133.

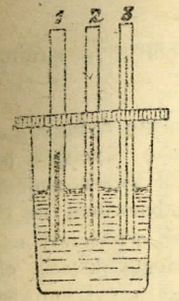
Skutkiem zwilżania trudno przelać wodę, spirytus, wino, mleko lub inną ciecz zwilżającą z jednej szklanki do drugiej (rys. 133) bez rozlania, ciecz bowiem spływa po ścianie zewnętrznej. Natomiast daje się to wykonać, zlewając ciecz po szklanej pałeczce lub łyżce (prawa strona rysunku). To samo dotyczy wylewania z flaszek, zwłaszcza płynów tłustych lub nielotnych, jak oliwy, gliceryny; zawsze szyjka zewnątrz staje się mokrą i płyn stopniowo rozmazuje się po flaszce.

4. Włoskowatość. Siły cząsteczkowe sprawiają, że w rurkach o bardzo wąskim kanale, zwanych *włoskowatymi*, ciecz stoi wyżej lub niżej, aniżeli w naczyniu szerokim, połączonym z tymi rurkami. Zjawisko to zowie się *włoskowatością*.

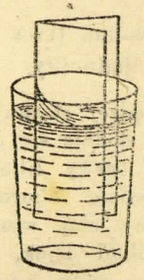
Ciecz zwilżająca wznosi się w rurkach, ciecz niezwilżająca stoi niżej w rurkach, niż w naczyniu szerokim; w obu zaś objawach różnica między poziomem cieczy w rurce i w naczyniu jest w odwrotnym stosunku do średnicy wewnętrznej rurki: im rurka jest węższa, tym ciecz w niej stoi odpowiednio wyżej, gdy zwilża rurkę, zaś niżej, gdy nie zwilża rurki (rys. 134 i 136).

Zjawiska włoskowatości występują nie tylko w rurkach, ale we wszelkich wąskich szczelinach; woda np. wznosi się między kartkami książki wpół otwartej, przytym najwyżej u grzbietu książki (rys. 135).

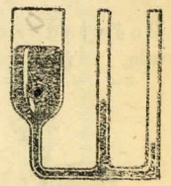
Rurki włoskowate mogą mieć otwór zaledwie widoczny, np. $\frac{1}{10}$ mm, aż do kilku mm. Jeżeli woda w rurce o średnicy 1 mm (rys. 134, rurka 1)



Rys. 134. Woda w rurkach szklanych.



Rys. 135.



Rys. 136. Rtęć w rurkach szklanych.

wznosi się do wysokości 30 mm, to w rurce (2) o średnicy 0,5 mm wznosi się na 60 mm, w rurce (3) o średnicy 0,2 mm na 150 mm.

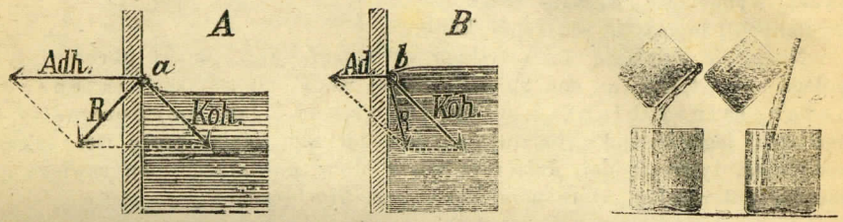
Włoskowatość daje się łatwo wytłómaczyć ciśnieniem powierzchownym (art. 2), które na powierzchni wypukłej działa silniej, na wklęsłej zaś słabiej, niż na płaszczyźnie. Stąd w razie płynu zwilżającego przeważa ciśnienie po stronie poziomu płynu w naczyniu, i wpędza płyn do rurek; w razie zaś płynu niezwilżającego przeważa ciśnienie w rurkach, ściągając ich menisk ku dołowi.

Znaczenie włoskowatości w przyrodzie i zastosowaniach. Ciała wybitnie dziurkowate zawierają splot wąziutkich rurek włoskowatych, w których woda lub inna ciecz zwilżająca podnosi się do znacznej wysokości.

Tłómaczy to zawilgocenie murów, wznoszenie się nafty w knocie, atramentu w bibule. — Przewieszając pasemko bawełny przez brzeg kieliszka, można wodę z kieliszka całkowicie wysączyć. — Korzenie roślin wsysają wodę z ziemi przez włośniki, t. j. mikroskopijne włoskowate zakończenia korzeni. — Nieprzemakalność tkanin wełnianych lub bawełnianych osiąga się przez słabe, niedostrzegalne ich natłuszczenie roztworem parafiny lub innej materji, której woda nie zwilża. — Wata hygroskopijna, odtłuszczona.

5. Dyfuzja. Pomiędzy stykającymi się dwoma płynami istnieje przyleganie, które może być większe od spójności płynów; wtedy płyny mieszają się z sobą w każdym stosunku, np. woda ze spirytusem (wódka), z kwasem octowym (ocet), spirytus z terpentyną. Gdy zaś przeważa spójność, płyny się nie mieszają, a skłócone rozdzielają się po ustaniu, np. woda od oliwy, rtęć od wszelkich cieczy.

Przyleganie czyli adhezję można uważać jako skierowaną nazewnątrz siłę przyciągania między płynem a ścianą (rys. 132); spójność czyli kohezję jako siłę ku wnętrzu płynu. Na ścianie pionowej musi mieć przyleganie kierunek poziomy, t. j. prostopadły do ściany, spójność zaś dla danej cząstki *a* lub *b*, jako wynik przyciągania wszystkich cząstek sąsiednich, musi mieć kierunek pośredni między pionem a poziomem, t. j. 45° względem poziomu. W płynie zwilżającym (*A*) przyleganie przeważa tak dalece, że wypadkowa *R* obu sił jest zwrócona na zewnątrz; w płynie zaś niezwilżającym (*B*) przeważa spójność, stąd wypadkowa *R* prowadzi ku wnętrzu płynu. Powierzchnia płynu, odpowiednio do kierunku siły *R* w danym miejscu, tworzy dla *a* menisk wklęsły, dla *b* wypukły.



Rys. 132. Zasada zwilżania.

Rys. 133.

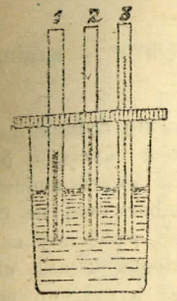
Skutkiem zwilżania trudno przelać wodę, spirytus, wino, mleko lub inną ciecz zwilżającą z jednej szklanki do drugiej (rys. 133) bez rozlania, ciecz bowiem spływa po ścianie zewnętrznej. Natomiast daje się to wykonać, zlewając ciecz po szklanej pałeczce lub łyżce (prawa strona rysunku). To samo dotyczy wylewania z flaszek, zwłaszcza płynów tłustych lub nielotnych, jak oliwy, gliceryny; zawsze szyjka zewnątrz staje się mokrą i płyn stopniowo rozmazuje się po flaszce.

4. Włoskowatość. Siły cząsteczkowe sprawiają, że w rurkach o bardzo wąskim kanale, zwanych *włoskowatymi*, ciecz stoi wyżej lub niżej, aniżeli w naczyniu szerokim, połączonym z tymi rurkami. Zjawisko to zowie się *włoskowatością*.

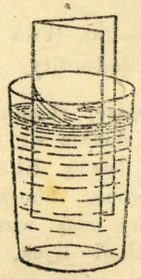
Ciecz zwilżająca wznosi się w rurkach, ciecz niezwilżająca stoi niżej w rurkach, niż w naczyniu szerokim; w obu zaś objawach różnica między poziomem cieczy w rurce i w naczyniu jest w odwrotnym stosunku do średnicy wewnętrznej rurki: im rurka jest węższa, tym ciecz w niej stoi odpowiednio wyżej, gdy zwilża rurkę, zaś niżej, gdy nie zwilża rurki (rys. 134 i 136).

Zjawiska włoskowatości występują nie tylko w rurkach, ale we wszelkich wąskich szczelinach; woda np. wznosi się między kartkami książki wpół otwartej, przytym najwyżej u grzbietu książki (rys. 135).

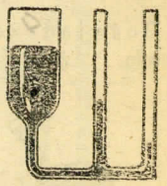
Rurki włoskowate mogą mieć otwór zaledwie widoczny, np. $\frac{1}{10}$ mm, aż do kilku mm. Jeżeli woda w rurce o średnicy 1 mm (rys. 134, rurka 1)



Rys. 134. Woda w rurkach szklanych.



Rys. 135.



Rys. 136. Rtęć w rurkach szklanych.

wznosi się do wysokości 30 mm, to w rurce (2) o średnicy 0,5 mm wznosi się na 60 mm, w rurce (3) o średnicy 0,2 mm na 150 mm.

Włoskowatość daje się łatwo wytłómaczyć ciśnieniem powierzchownym (art. 2), które na powierzchni wypukłej działa silniej, na wklęsłej zaś słabiej, niż na płaszczyźnie. Stąd w razie płynu zwilżającego przeważa ciśnienie po stronie poziomu płynu w naczyniu, i wpędza płyn do rurek; w razie zaś płynu niezwilżającego przeważa ciśnienie w rurkach, ściągając ich menisk ku dołowi.

Znaczenie włoskowatości w przyrodzie i zastosowaniach. Ciała wybitnie dziurkowate zawierają splot wąziutkich rurek włoskowatych, w których woda lub inna ciecz zwilżająca podnosi się do znacznej wysokości.

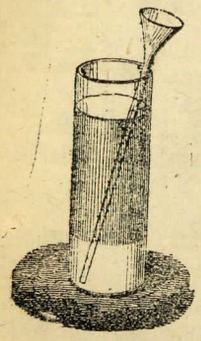
Tłómaczy to zawilgocenie murów, wznoszenie się nafty w knocie, atramentu w bibule. — Przewieszając pasemko bawełny przez brzeg kieliszka, można wodę z kieliszka całkowicie wysączyć. — Korzenie roślin wsysają wodę z ziemi przez włośniki, t. j. mikroskopijne włoskowate zakończenia korzeni. — Nieprzemakalność tkanin wełnianych lub bawełnianych osiąga się przez słabe, niedostrzegalne ich natłuszczenie roztworem parafiny lub innej materji, której woda nie zwilża. — Wata hygroskopijna, odtłuszczona.

5. Dyfuzja. Pomiędzy stykającymi się dwoma płynami istnieje przyleganie, które może być większe od spójności płynów; wtedy płyny mieszają się z sobą w każdym stosunku, np. woda ze spirytusem (wódka), z kwasem octowym (ocet), spirytus z terpentyną. Gdy zaś przeważa spójność, płyny się nie mieszają, a skłócone rozdzielają się po ustaniu, np. woda od oliwy, rtęć od wszelkich cieczy.

Mieszają się płyny nawet wtedy, gdy są pozostawione w zupełnym spokoju i ułożone zgodnie z ich gęstością, t. j. płyn cięższy na spodzie. Takie samorzutne mieszanie się płynów nazywa się *dyfuzją* czyli *przenikaniem*; tłómaczy się ono słabym, ale ustawicznym ruchem cząsteczkowym cieczy, przyczyną zaś tego ruchu jest ciepło (pt. „Istota ciepła".

Dyfuzja zachodzi bardzo wolno, trwa całymi miesiącami, zanim ciecze zmieszają się na roztwór jednolity.

Doświadczenie. Najprędzej stosunkowo odbywa się dyfuzja kwasów z wodą. Ażeby ją uwidocznić, dodaje się do wody trochę wyciągu lakmusowego, barwy liljowej, która od kwasu zmienia się na czerwoną. Skoro wodą tak zabarwioną na liljowo napełnimy słój wysoki i powoli wpuścimy na dno, przez długi lejek, roztwór jakiegoś kwasu, cięższy względem wody, np. octu lub kwasu cytrynowego, na spodzie będzie płyn czerwony, a granica obu płynów wyraźna (rys. 137). Stopniowo barwa czerwona rozpościera się ku górze, aż cały roztwór w słoju będzie jednakowo czerwony.



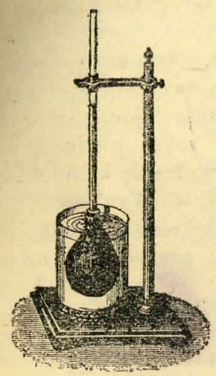
Rys. 137. Dyfuzja.

Znaczenie dyfuzji. Woda słona z morza przenika wgłąb rzek nieraz na dużą odległość ich ujścia.—Zanieczyszczenia miejskie, wylewane do rzeki poza miastem, w dół rzeki, przenikają powoli w górę ku miastu.

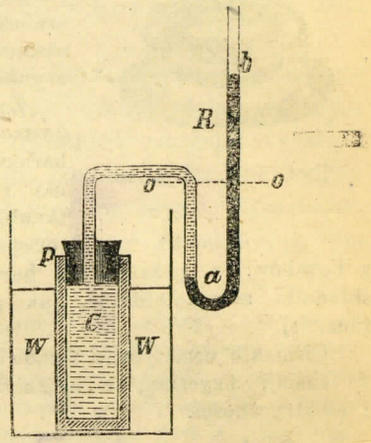
6. Osmoza. Płyny zdolne do dyfuzji mieszają się również samorzutnie, skoro zostaną rozdzielone ścianą dziurkowatą, jak pęcherzem, papierem pergaminowym, skórą, pianką (gliną, słabo wypaloną). Mieszanie się cieczy poprzez warstwę stałą nazywa się *osmozą* albo *przesiąkaniem*.

Jeden z płynów, mianowicie rzadszy, przesiąka przez błonę obficiej i wywołuje w drugim płynie *ciśnienie osmotyczne*, które się oznajmia wyprężaniem błony lub podnoszeniem słupa cieczy i bywa nieraz bardzo znaczne. Ciśnienie osmotyczne ma dużo podobieństwa do ciśnienia gazów (prężności, pt.); wzrasta ono w miarę ogrzania oraz stężenia roztworu, t. j. ilości ciał, rozpuszczonych w cieczy. Wielkość ciśnienia osmotycznego można oznaczyć z wysokości słupa rtęciowego, jaki ciśnienie to podnosi w rurce; rurka zawiera dany roztwór (np. cukru), oddzielony od rozpuszczalnika (np. wody) sztywną błoną półprzepuszczalną, t. j. przepuszczającą tylko wodę, a nieprzesiąkliwą dla roztworu.

Doświadczenia. 1) Długą rurę szklaną owiązano na dolnym końcu szczelnie pęcherzem i napełniono pęcherz roztworem jakiej soli kolorowej, np. niebieskim roztworem koperwasu miedziowego (siarczanu miedzi). Po zanurzeniu pęcherza do wody roztwór po dłuższym czasie zacznie się w rurze podnosić, pęcherz wypełnia się bardziej (rys. 138), a zarazem woda w kubku nabiera barwy niebieskawej. Gdyby rurkę zamknięto, pęcherz mógłby ulec rozsadzeniu.



Rys. 138. Osmoza.



Rys. 139. Ciśnienie osmotyczne.

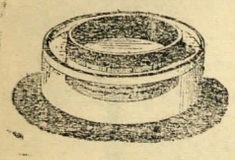
2) Do naczynia z wodą W (rys. 139) wstawia się piankę półprzepuszczalną P, napełnioną szczelnie roztworem 1% cukru C' i zatkaną korkiem, do którego wstawiono rurkę kolankową R. Rurka zawiera pierwotnie rtęć do równego poziomu oo, pozostałą zaś część rurki wypełnia roztwór cukru. Po dłuższym czasie rtęć znacznie się podniesie, tak iż różnica poziomów czyli słup ab wyniesie 50 cm. Gdyby zamiast cukru wzięto saletrę w 1% roztworze, ciśnienie osmotyczne podniosłoby rtęć do 178 cm, t. j. na wysokość człowieka. Liczby te odpowiadają ciśnieniom $\frac{2}{3}$ oraz $2\frac{1}{3}$ atmosfery (pt.); przy mocniejszych roztworach ciśnienie dochodzi kilkunastu atmosfer, można je więc porównać z ciśnieniem silnej pompy wodnej.

Półprzepuszczalność pianki osiąga się przez napełnienie jej roztworem siarczanu miedzi ($Cu\,SO_4$) i zanurzenie do roztworu cjanku żółtego, żelazo-potasowego ($K_4\,Fe\,Cy_6$), przez co w porach pianki tworzy się osad cjanku żelazo-miedziowego, przepuszczający tylko wodę. Błony wogóle przepuszczają oba płyny, tylko z rozmaitą szybkością.

Osmozie podlegają prawie wszystkie zdolne do zmieszania się materje płynne, jako to: kwasy, alkohole, etery i t. p., oraz roztwory *krystaloidów*, czyli ciał zdolnych do tworzenia kryształów, jak sole, kwasy krystaliczne, cukry i t. p.; nie przesiąkają zaś wcale, albo słabo, nieliczne materje bezkształtne, lepkie, przeważnie organicznego pochodzenia, zwane *koloidami*, np. klej, białko, guma, krochmal, kauczuk,

żywice, żelatyna. Na tej własności można oddzielić jedne od drugich, wlewając ich mieszaninę do naczynia, zamkniętego błoną i zanurzonego do wody lub innego rozpuszczalnika. Rozdział taki zowie się *djalizą*.

Doświadczenie. Do djalizy nadaje się obszerne, płaskie naczynie w rodzaju sita (rys. 140), którego dno stanowi papier pergaminowy. Naczynie to wpuszcza się do większej misy, zawierającej wodę czystą, i wlewa doń rozczyn gumy arabskiej, zaprawiony solą kuchenną. Po dłuższym czasie sól przejdzie de miski, guma zostanie w naczyniu wewnętrznym.



Rys. 140. Djaliza.

Znaczenie osmozy. Osmoza sprawia przedostawanie się soków przy trawieniu z kanału pokarmowego do krwi (objaśnić bliżej). — Odżywianie roślin przesiąkaniem soku roślinnego przez tkanki (objaśnić). — Przyrządzanie kompotów, konserw, nalewek owocowych. — Wyciąganie cukru z buraków: z pokrajanych buraków wyługowuje się ciepłą wodą cukier, składniki zaś koloidalne, jak gumy, białko i t. p., pozostają w masie buraczanej.

Ciśnienie osmotyczne stanowi padstawę teorji roztworów, omawianej w chemji fizycznej, a zarazem daje przyczynek do nauki o gazach i elektryczności.

7. Roztwory (rozczyny). Wiele materji stałych, zwłaszcza soli, rozpuszcza się w wodzie lub w innych płynach, czyli znika pozornie śród płynu otaczającego. Ciało stałe rozpada się na cząstki, które tak się mieszają z cząstkami płynu, że wszystko razem stanowi płyn jednostajny, gęstszy od poprzedniego.

Teoretycznie tłumaczymy rozpuszczanie ciał przewagą siły przylegania nad spójnością, skutkiem czego odrywają się cząstki ciała i przechodzą do płynu.

Rozpuszczanie więc polega na przejściu ciała stałego w jednolitą płynną mieszaninę, zwaną *roztworem*, np. cukier, soda, ałun, wapno itp. w wodzie, wosk i żywice w terpentynie. Płyn rozpuszczający zowie się *rozpuszczalnikiem*. Należy odróżniać rozpuszczanie od topienia (pt.), gdzie ciało przechodzi w stan płynny pod wpływem ciepła, bez udziału jakiejkolwiek cieczy, np. masło lub wosk na ogniu.

Nie tylko ciała stałe, ale płyny i gazy mogą również rozpuszczać się w płynach, np. spirytus i kwas octowy w wodzie, oleje w benzynie, powietrze i dwutlenek węgla w wodzie (pt. „Siły cząsteczkowe" w nauce o gazach).

Rozpuszczalność ciał stałych ma pewną granicę: w płynie można rozpuścić dane ciało do pewnej określonej ilości, poza którą dalsze dodawanie ciała byłoby bezcelowe, pozostałoby ono bowiem w postaci stałej, widocznej. Roztwór, zawierający najwyższą ilość ciała, w danym stanie ogrzania (temperaturze), zowie się *nasyconym*.

Rozpuszczanie odbywa się w każdej temperaturze, t. j. zarówno na zimno, jak za ogrzaniem; jednakże w miarę ogrzewania wzrasta zwykle ilość ciała, potrzebna do nasycenia, czyli roztwór staje się bardziej *stężony*. Za oziębieniem roztworu nasyconego na gorąco, albo przy ulatnianiu się rozpuszczalnika, pewna ilość ciała rozpuszczonego osiada znów w postaci stałej, prawidłowej, krystalicznej; niektóre zaś materje nie krystalizują, lecz pozostają jako masa bezkształtna; stąd podział na krystaloidy i koloidy (pt. 6).

Krystalizacja polega zwykle na rozpuszczeniu na gorąco nadmiaru ciała, t. j. ilości znacznie większej, niż płyn zimny zdoła rozpuścić, i następnym ostudzeniu. Po oddzieleniu kryształów pozostaje roztwór nasycony na zimno, zawierający tym mniejszą ilość ciała, im jest zimniejszy (wyjątki są nieliczne). Wogóle obecność w płynie kryształów, które się nawet przy długim staniu lub mieszaniu nie rozpuszczają, stanowi dowód, że roztwór jest nasycony.

Doświadczenie. Do litra wody wsypano 3 kg saletry i ogrzano do wrzenia; pozostało nierozpuszczone 530 g, zatym roztwór nasycony, wrzący, zawiera 2470 g saletry w 1000 g wody. Zlawszy ten roztwór, pozostawiono go dłuższy czas w pokoju, do zupełnego ostudzenia; wtedy osiadło w kryształkach 2260 g saletry, w roztworze pozostało jeszcze 210 g. Po ochłodzeniu w lodzie wykrystalizowało jeszcze 80 g, pozostało w roztworze 130 g saletry.

Ilość ciał rozpuszczonych wyraża się w odsetkach wagowych względem roztworu, t. j. ile części ciała rozpuszczonego przypada na 100 części roztworu, na wagę; np. syrop cukrowy 40% zawiera 40 g cukru oraz 60 g wody w 100 g syropu. To samo odnosi się do rozpuszczonych płynów i gazów; np. ocet 3% zawiera 3 g kwasu octowego oraz 97 g wody w 100 g octu; amoniak 10% zawiera 10 g gazu amoniakalnego (NH_3) oraz 90 g wody w 100 g roztworu.

Przy rozpuszczaniu ciał zachodzą objawy energji cząsteczkowej, polegające na zmianie objętości, oziębianiu się roztworu, zdolności przewodnictwa elektrycznego (pt. „Ciepło topnienia"; „Elektroliza"). Szczegółową teorję roztworów podaje chemja fizyczna.

ROZDZIAŁ IV.

NAUKA O GAZACH

W SPOCZYNKU.

(AEROSTATYKA)

§ 32. Własności gazów.

1. Gazy czyli **ciała lotne** różnią się od innych ciał w tym, że nie posiadają własnej postaci ani objętości; gaz wypełnia każdą przestrzeń, jaką mu zaofiarowano. Pod mianem objętości gazów należy rozumieć przestrzeń, jaką gaz zajmuje w zamknięciu sztucznym, np. w balonie lub w rurze pod pewnym ciśnieniem.

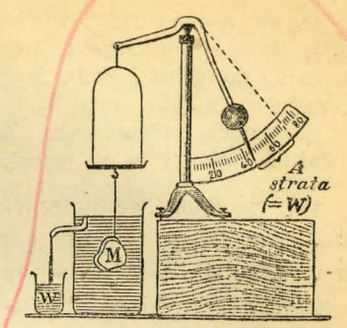
Powyższa cecha gazów jest wynikiem braku spójności (gazy posiadają spójność praktycznie znikomą); cząstki gazów są ruchliwe w stopniu daleko wyższym, niż cząstki płynów. Dążność gazu do rozchodzenia się w przestrzeni zowie się *rozprężliwością*.

Przykłady: Rozpływanie się dymu, pary w powietrzu.—Gaz świetlny, sącząc się z kranu, napełnia wonią cały pokój.

2. Ściśliwość gazów. Gazy są w najwyższym stopniu ściśliwe, a zarazem doskonale sprężyste. Np. do rury, napełnionej jakimś gazem i zamkniętej tłokiem, można tłok wepchnąć tak, iż objętość gazu zmniejszy się 10, 100 i więcej razy; skoro siła tłocząca przestanie działać, gaz powróci do poprzedniej objętości, jaką miał w danych warunkach.

Zastosowania: Piłki nadymane powietrzem. — Poduszki i materace powietrzne. — Obręcze pneumatyczne do rowerów i powozów. — Wiatrówka.

3. Ciężar właściwy gazów. Wszelkie gazy odznaczają się nader małym ciężarem właściwym. Do oznaczenia tegoż waży się dużą flaszkę, opróżnioną z powietrza (rys. 141), a następnie tę samą flaszkę, napełnioną jakimś gazem; różnica stanowi ciężar danego gazu, a odniesiona do objętości flaszki, daje ciężar jednostki objętości czyli ciężar właściwy gazu. Z podobnych ważeń wypada, że w warunkach normalnych *)



Rys. 141. Ważenie powietrza.

1 litr powietrza waży 1,293 grama (okrągło 1,3 g).

Wynika stąd, że 1 metr sześcienny powietrza waży 1,293 kg (okrągło 1,3 kg).

Zwykle wyraża się ciężary właściwe gazów, przyjmując c. wł. powietrza = 1.

Waga 1 litra gazu w gramach		Ciężar właściwy względem powietrza	
Powietrze	1,293	1	1
Chlor	3,159	2,47	okr. $2\frac{1}{2}$
Dwutlenek węgla . . .	1,977	1,53	okr. $1\frac{1}{2}$
Wodór	0,089	0,0693	okr. $\frac{1}{14}$
Tlen	1,424	1,106	okr. $1\frac{1}{10}$
Gaz świetlny, średnio . .	0,503	0,39	okr. $\frac{2}{5}$
Para wodna (przy 100°) .	0,806	0,623	okr. $\frac{5}{8}$

Tabelka wskazuje, że najlżejszym z gazów jest wodór, 14 razy lżejszy od powietrza. Powietrze jest 773 razy lżejsze od wody, gdyż litr wody waży 1 kg, litr powietrza 1,293 g; stąd 1000 : 1,293 = 773.

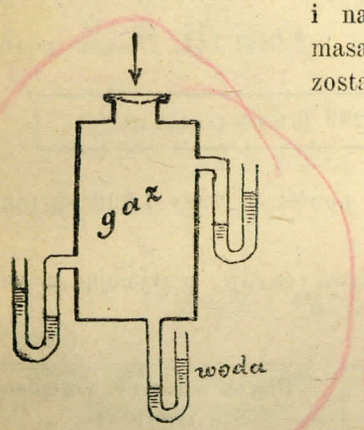
Oprócz ważenia, istnieje inny jeszcze sposób oznaczania ciężaru właściwego gazów; polega on na szybkości wypływu (pt. „Wypływ gazów").

4. Prawo Pascala, o jednostajnym roznoszeniu ciśnienia zewnętrznego na wszystkie strony, stosuje się w zupełności do gazów; wynika to z niezmiernej ruchliwości cząstek gazowych.

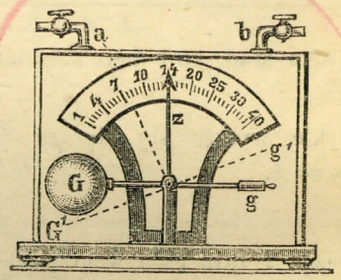
*) Warunki normalne stanowią: temperatura 0°, oraz średnie ciśnienie atmosfery 1,033 kg/cm² (pt. poniżej).

Doświadczenie. Do szczelnego naczynia, np. puszki blaszanej (rys. 142), dorabia się szyjkę oraz kilka rurek w kształcie litery U i napełnia się rurki do połowy wodą, szyjkę zaś owiązuje się pęcherzem. Woda stoi początkowo w obu ramionach każdej rurki na jednakowym poziomie, jako w naczyniach zespolonych. Za naciśnięciem pęcherza woda podnosi się w każdej rurce, i to na jednakową wysokość.

Od ciśnienia wewnętrznego gazów, zwanego *prężnością*, i jego działania na ściany wypada odróżnić *ciężar* gazów, czyli nacisk, skierowany tylko na dół, pionowo, i stanowiący skutek siły ciężkości. Np. w wiatrówce w miarę zgęszczenia powietrza wzrasta ciśnienie na kulkę i na ściany lufy, ilość zaś cząstek czyli masa powietrza, a zatym i ciężar jego pozostaje bez zmiany.



Rys. 142.



Rys. 143. Dazymetr.

5. Prawo Archimedesa stosuje się również do gazów, ponieważ gazy, jak i ciecze, są ciałami ciężkimi i ruchliwymi, a wskutek tego istnieje w nich pęd do góry, podobnie jak w cieczach. Zatym każde ciało w powietrzu traci tyle na wadze, ile waży powietrze w objętości takiej jak ciało.

Do stwierdzenia, że ciała tracą część wagi w powietrzu i wogóle w gazach, służy *dazymetr*, zwany też *baroskopem* (rys. 143). Składa się z małej ważki, gdzie zamiast szalek, jedno ramię kończy się bańką szklaną G, drugie wałeczkiem mosiężnym g; oba te ciężarki równoważą się w powietrzu. Skoro przyrząd umieścimy pod kloszem i wyciągniemy z ostatniego powietrze, kulka G przeważy, t. j. ważka przyjmie położenie $G'g'$. Dowodzi to, iż rzeczywista (w próżni) waga bańki G jest większa, niż waga wałeczka g; w powietrzu zaś bańka, jako mająca większą objętość, straciła na wadze więcej, niż wałeczek.

Ubytek wagi w powietrzu sprawia pewne skutki, ważne pod względem naukowym lub praktycznym:

a) Wszelkie ważenia ciał w powietrzu są niedokładne.

Niedokładność, jaką popełniamy przy ważeniu, nie uwzględniając prawa Archimedesa, jest tak nieznaczna, że zwykle się ją pomija. Np. człowiek, ważący 60 kg, wypiera swym ciałem około 60 litrów powietrza, zatym waży o $60 \cdot 1{,}3 = 78$ gramów mniej, niż w rzeczywistości, t. j. niż w próżni.

b) Balony wznoszą się w powietrzu na tej samej zasadzie, na jakiej wypływa np. korek, zanurzony na dno wody.

Ciało jednak, pływające w wodzie, trzyma się wciąż na jej powierzchni; pływające zaś w powietrzu jest w stanie zawieszenia: wznosząc się z ziemi, dochodzi tylko do takiej wysokości, aż waga ciała zrówna się z wagą wypartego powietrza. Gęstość bowiem wody w całej masie jest prawie jednakowa, z powodu małej ściśliwości wody, gęstość zaś powietrza ubywa w miarę wyniesienia.

Balony mają zwykle powłokę z tkaniny jedwabnej, napojonej wernikserm; napełnia się je wodorem (Charles 1783) lub gazem świetlnym (Green 1825). Pierwszy balon, wynaleziony przez braci Montgolfier (1783), napełniono ogrzanym powietrzem.

Jeżeli B jest wagą całego balonu, t. j. gazu, powłoki i ciężarów, jakie balon ma dźwigać, P stanowi wagę wypartego przez balon powietrza, równoważną pędowi do góry, to

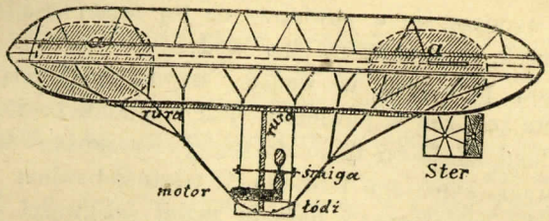
$$\text{siła wzlotu } S = \overset{\uparrow}{P} - \overset{\downarrow}{B} = \left\{\begin{array}{c}\text{waga powietrza}\\ \text{wypartego}\end{array}\right\} - \left\{\begin{array}{c}\text{waga balonu}\\ \text{z gazem}\end{array}\right\}.$$

Największa wysokość wzlotu balonu z ludźmi sięga $10\frac{1}{2}$ km (Süring i Berson 1901). Mniejsze balony, bez ludzi, zaopatrzone w przyrządy, notujące automatycznie spostrzeżenia, dosięgły wysokości 37 km; balony takie przyczyniają się coraz więcej do badania atmosfery.

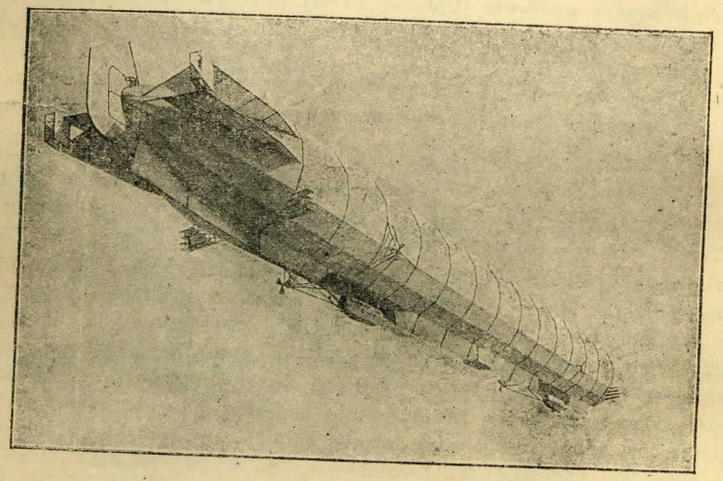
Dawniejsze balony miały postać kulistą; do siatki sznurowej, obejmującej balon, przytwierdzano łódkę lub kosz dla żeglarzy powietrznych. Wznoszenie balonu osiągano przez wyrzucanie balastu, np. piasku, którego zapas musiano zabierać; opadanie zaś balonu osiągano wypuszczaniem gazu przez odpowiednią klapę. Taki balon jest zdany na łaskę wiatrów; użytek więc jego jest bardzo ograniczony.

Od lat kilkunastu zaczęto budować *sterowce* czyli balony, których lotem można kierować. Pierwsze udatne próby wykonali Renard i Krebs we Francji (1885); następnie wsławił się Brazylijczyk Santos Dumont okrążeniem wieży Eiffla (1901); najnowsze wreszcie ulepszenia rozwiązały sprawę kierowania balonami o tyle, że przy niewielkim wietrze odbywa się nieraz balonem wędrówki na odległość kilkudziesięciu mil i wylądowuje w miejscach z góry oznaczonych (Zeppelin i Parseval w Niemczech). Jednakże przy cokolwiek silniejszym wietrze lub deszczu podróże balonowe natrafiają na trudności nieprzezwyciężone; pod tym względem ustępują znacznie aeroplanom (pt.).

Balon Zeppelina (rys. 144), zwany pospolicie *Zeppelinem*, ma postać podobną do cygara, t. j. walca, zakończonego śpiczasto, aby łatwiej pruł powietrze; wewnątrz zawiera lekkie a mocne rusztowanie z glinu (aluminium) i stali, u spodu łódź, silnik i zbiornik zgęszczonego gazu. Silnik obraca *śmigę*, t. j. rodzaj wiatraka, który pędzi balon naprzód; na końcu



Rys. 144. Balon sterowy Zeppelina: zasada budowy.

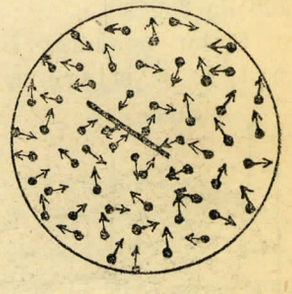


Rys 145. Balon Zeppelina: wygląd rzeczywisty.

balonu znajduje się *ster*, poruszany sznurami z łodzi. Do wznoszenia się i opadania balonu służą małe baloniki *aa*, umieszczone wewnątrz jego powłoki, jeden na przodzie, drugi w tyle, i połączone rurami z kompresorem, t. j. zgęszczaczem gazu w łodzi; zależnie od napełnienia jednego lub drugiego balonika, bądź obu naraz baloników, wznosi się cały balon pochyło lub poziomo, przy wyciąganiu zaś gazu z baloników do kompresora balon opada; może więc dowolnie szybować ku górze lub ku dołowi, bez wypuszczania gazu i balastu. Ster służy do kierowania balonem na prawo i lewo, za pomocą ruchomych płaszczyzn pionowych; drugi ster, złożony z płaszczyzn poziomych, pozwala balonowi szybko nachylać się przodem lub tyłem, a przez to opuszczać się lub wzbijać (por. rys. 145).

System Zeppelina należy do s z t y w n y c h, posiadających wiązania metalowe, na których rozpięto powłokę, a stąd ma postać określoną, mało zmieniającą się po opróżnieniu z gazu. W systemie zaś Parsevala, w i o t k i m, balon w stanie próżnym jest zmięty, nabiera zaś kształtu po napełnieniu; jest on bardziej narażony na zniszczenie przy wzbijaniu się i szybowaniu; ale jest daleko lżejszy i daje się przewozić bez napełnienia. Zeppeliny osiągają szybkość do 80 km na godzinę, Parsevale do 55 km/godz. Długość balonów dochodzi do 140 m, przy średnicy 14 m; silniki balonowe, poruszane benzyną, mają sprawność do 300 koni parowych.

6. Kinetyczna teorja gazów. Ażeby wytłumaczyć rozprężliwość oraz ciśnienie gazów, przypuszczamy, że cząstki gazów są w ciągłym ruchu, że mkną w kierunkach rozmaitych, ale zawsze prosto, przyczym spotykają się rzadko, wskutek znacznych stosunkowo przestworów międzycząstkowych, w porównaniu z wielkością samych cząstek. Przy spotkaniu cząstki gazu odskakują od siebie nakształt kul sprężystych. Uderzając zaś o ściany naczynia, cząstki wywierają ciśnienie, zależne od liczby uderzeń; podobnież cisną na każdą powierzchnię z różnych stron (przedstawia to obrazowo rys. 146).



Rys. 146.

W miarę zgęszczania gazu, maleją przestwory między cząstkami, i uderzenia stają się częstsze; stąd wzrasta prężność gazu. Jeżeli gazu nie zamknięto szczelnie, to cząstki, trafiając jedna za drugą do otworu, uchodzą na zewnątrz.

Teorja ruchu cząsteczkowego, zwana *kinetyczną*, wyjaśnia w sposób prosty i ogólny zasadnicze własności gazów. Ujęta we wzory matematyczne, stanowi podwalinę współczesnej fizyki teoretycznej w poglądach na budowę materji, oraz na istotę ciepła (pt.). Obecnie uczeni starają się zastosować teorję kinetyczną względem płynów i ciał stałych.

Zadania.

1. Ile waży powietrze w pokoju, którego długość wynosi 7 m, szerokość 5 m, a wysokość $3\frac{1}{2}$ m? Odp. 158,6 kg.

2. Składnik sprzedał głowę cukru, ważącą 20 kg. Kto traci skutkiem ważenia cukru na powietrzu: kupujący, czy sprzedający, i ile?

Rozw. Ciężar wł. cukru = 1,6, zatym objętość głowy = 20 : 1,6 = = 12,5 dm^3; objętość odważników żelaznych, którymi zważono cukier = = 20 : 7,7 = 2,6 dm^3. Cukier wypiera powietrza o 12,5 — 2,6 = 9,9 dm^3 więcej niż żelazo, zatym traci na wadze 9,9 . 1,3 = okr. 13 g. Taką nadwyżkę dostaje kupujący darmo.

3. Jaką różnicę sprawia ważenie złota na powietrzu, i na czyją korzyść?

4. Balon, mieszczący 950 m^3 gazu świetlnego, waży bez gazu, wraz z balastem, 340 kg. Ilu może zabrać ludzi?

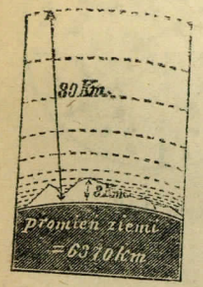
Rozw. Siła wzlotu na każdy 1 m^3 gazu = 1,3 — 0,5 = 0,8 kg; zatym siła wzlotu balonu = 950 . 0,8 — 340 = 420 kg, co wystarcza do uniesienia 6 ludzi.

5. Ilu potrzeba ludzi do utrzymania balonu przy ziemi, bez balastu, jeżeli balon zawiera 800 m^3 wodoru, waży wraz z przyborami 510 kg, siła zaś ciągnienia człowieka wynosi 22,5 kg? Odp. 20.

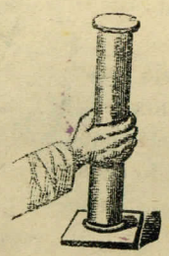
§ 33. Ciśnienie atmosfery.

1. Atmosfera ziemska. Kulę ziemską otacza ocean powietrzny, *atmosfera*, której wysokość można ocenić z rozmaitych spostrzeżeń na 200 do 300 km.

Ciężar powietrza i ściśliwość sprawia, iż gęstość powietrza maleje w miarę wyniesienia. Wyobraźmy sobie atmosferę, podzieloną na warstwy poziome (rys. 147); najniższa warstwa dźwiga ciężar wszystkich pozostałych, ku górze zaś cięży coraz mniejszy słup powietrza. Stąd w górach powietrze jest daleko rzadsze, niż w nizinach, tak iż na znacznych wysokościach nie starczy powietrza do oddychania.



Rys. 147.



Rys. 148.

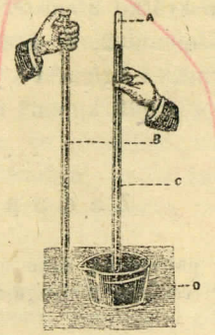
Ciężar powietrza objawia się w *ciśnieniu atmosfery* na powierzchnię ziemi i wszelkie na niej ciała. Ciśnienie to, podobnie jak w płynach, działa we wszelkich kierunkach.

Przykłady. Szklankę, lub walec, napełniony wodą i szczelnie pokryty tekturką, można odwrócić do góry dnem bez obawy, że woda się wyleje (rys. 148). — Rurka gumowa, z której ustami wciągniemy powietrze, zatkawszy jej koniec przeciwny, spłaszczy się nakształt taśmy.

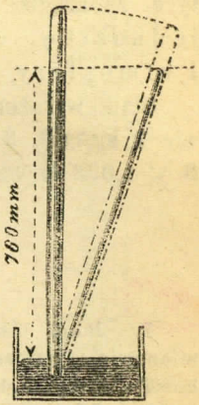
2. Pomiar ciśnienia atmosfery (doświadczenie Torricellego, 1643). Rurę szklaną, długą prawie na metr i na końcu zatopioną, napełnia się całkowicie rtęcią, zatyka otwór palcem, i odwróciwszy, zanurza się otworem do miseczki z rtęcią (rys. 149). Po odjęciu palca rtęć opada w rurce tak, iż pozostały jej słup ma wysokość 76 cm (średnio). Wnosimy stąd, że słup rtęci, wysoki na 76 cm, równoważy ciśnienie atmosfery. Przestrzeń w rurce ponad rtęcią jest całkowicie pozbawiona powietrza; otrzymała ona miano *próżni Torricellego.*

Wyjaśnienie. Gdyby się rtęć z rurki wylała, musiałaby się w miseczce podnieść; skoro się nie podnosi, musi jej przeciwdziałać pewna siła równoważna. Rolę tej siły spełnia ciśnienie atmosferyczne.

Doświadczalnie można to stwierdzić, wpuszczając powietrze do rurki z góry; do tego celu dogodną jest rurka z kranem. Rtęć wtedy opada do poziomu, jaki ma w miseczce.



Rys. 149. Doświadczenie Torricellego.



Rys. 150. Pomiar ciśnienia atmosfery.

W razie pochylenia rurki (rys. 150) rtęć posuwa się w niej, a próżnia się zmniejsza tak, iż wreszcie rurka napełnia się całkowicie. Uderzenie rtęci o sklepienie rurki powinno być donośne, metaliczne, jeżeli próżnia jest dokładna.

Należy zauważyć, że pochylanie rurki nie zmienia bynajmniej poziomu rtęci w rurce, t. j. wysokości jej słupa ponad poziom w naczyniu, jak to wyjaśnia rysunek 150.

Ciśnienie atmosfery wyraża się niekiedy wysokością słupa *wody*, zamiast rtęci; ponieważ woda jest 13,6 raza lżejsza od rtęci, słup wodny wyniesie 76 × 13,6 = 1033 cm = 10,33 m. Tak więc

1 atmosfera = 760 mm rtęci = $10\frac{1}{3}$ m wody

Jest to ciśnienie *normalne*, panujące na powierzchni mórz, średnie z wielu spostrzeżeń w ciągu roku; ciśnienie bowiem atmosfery nie jest stałe, ale waha się w ciągu dnia aż do kilkunastu mm powyżej lub poniżej normy, a w ciągu roku aż do kilkudziesięciu milimetrów.

3. Wartość ciśnienia atmosfery. Z wysokości słupa rtęciowego, jaki równoważy ciśnienie atmosfery, można obliczyć wartość tego ciśnienia, czyli nacisk, jaki wywiera powietrze atmosferyczne na 1 cm^2. Wynosi on tyle, co waga słupa rtęci o 1 cm^2 przekroju i 76 cm wysokości, czyli

$$1 \cdot 76 \cdot 13{,}6 = 1033 \text{ g} = 1{,}033 \text{ kg}.$$

Tak więc

1 atmosfera = 1,033 kg/cm^2.

Za jednostkę ciśnienia (pt.) wogóle przyjęto 1 kg/cm², czyli ciśnienie bardzo mało różniące się od 1 atmosfery; z tego powodu w praktyce zaokrągla się ciśnienie 1 atmosfery do 1 kg/cm², tak iż za jednostkę ciśnienia uchodzi praktycznie ciśnienie 1 atmosfery, zwane krótko *atmosferą*.

Stąd wyrażenie: ciśnienie 2, 3, 4 atmosfer" i t. d. oznacza: ciśnienie 2 kg/cm², 3 kg/cm², 4 kg/cm² i t. d. (dokładnie 2 × 1,033 kg/cm², 3 × 1,033 kg/cm², 4 × 1,033 kg/cm² i t. d.).

Zadania.

1. Jakie ciśnienie panuje na dnie najgłębszego z jezior w Królestwie, mianowicie jeziora Wigierskiego w Augustowskiem, mierzącego 54 m głębokości? Odp. 5,4 atm.

2. Gdyby, zamiast rtęci, użyć gliceryny do doświadczenia Torricellego, jakiej długości rura byłaby niezbędna? Ciężar wł. gliceryny = 1,24. Odp. Około 9 m, gdyż sam słup gliceryny wyniósłby 8,33 m; doświadczenie więc byłoby możliwe tylko w sali, wysokiej przeszło na 2 piętra.

3. Stół jadalny ma szerokość 110 cm, a długość 150 cm; jaką siłą ciśnie nań atmosfera? Odp. 16500 kg.

4. Obliczyć ogólny nacisk atmosfery na kuli ziemskiej, czyli ciężar powietrza otaczającego ziemię, skoro powierzchnia ziemi wynosi okrągło 500 miljonów km². Odp. $5 \cdot 10^{18}$ kg, czyli 5 tryljonów kilogramów.

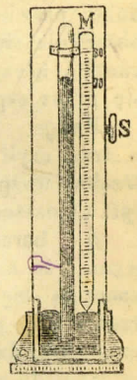
§ 34. Barometry.

1. Zmienność ciśnienia atmosferycznego. Zależnie od stanu pogody i od wyniesienia danej miejscowości ponad poziom morza, ciśnienie atmosfery bywa rozmaite.

Zachodzi więc konieczność oznaczania, jakie ciśnienie panuje w danej chwili, a to ze względów zarówno naukowych, jak praktycznych. Ciśnienie powietrza bowiem ma wpływ na różne zjawiska fizyczne, jak rozszerzalność gazów, wrzenie wody, powstawanie opadów atmosferycznych itp.; ciśnienie powietrza służy w topografji do pomiarów hypsometrycznych: oznaczania wysokości danego miejsca względem innych lub względem poziomu morza.

2. Barometr jest narzędziem do oznaczania ciśnienia atmosfery. W jednych barometrach ciśnienie to równoważy ciężar słupa rtęciowego, w innych sprężystość rurki lub blaszki metalowej; stąd barometry można podzielić na dwa rodzaje: *rtęciowe* i *sprężynowe*.

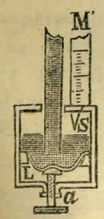
3. Barometry rtęciowe. a) *Barometr naczyniowy*, w najprostszej postaci, stanowi przyrząd Torricellego, opatrzony stałą podziałką (rys. 151); początek czyli zero podziałki liczy się od poziomu rtęci w naczyniu. Poziom ten, w razie rurki bardzo wąskiej (2 do 3 mm), bardzo mało się podnosi lub opada, przy niewielkich zmianach ciśnienia, np. zależnych od pogody. Jeżeli rura barometryczna ma otwór większy, to wahania rtęci w rurze zmieniają wyraźnie poziom w naczyniu; wypada tu urządzić skalę przesuwaną (*M*, rys. 151) i doprowadzać ją za każdą obserwacją do zetknięcia z poziomem (za pomocą śrubki *S*).



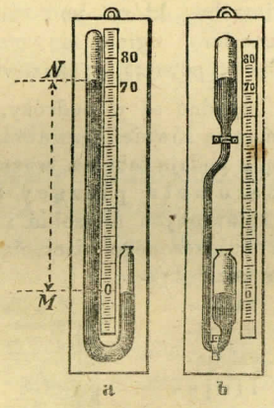
Rys. 151. Barometr naczyńkowy.

Barometr Fortina (rys. 152) ma podziałkę nieruchomą, natomiast dno naczynia, skórzane, można podnosić i obniżać śrubką *a*, przez co doprowadza się poziom rtęci do początku skali, t. j. do ostrza *S*.

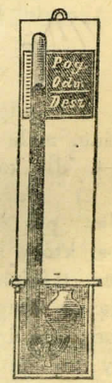
b) *Barometr lewarowy* składa się z rurki dwuramiennej w kształcie U, której ramię krótsze, otwarte (rys. 153 a), odgrywa taką rolę, jak naczynie w barometrze poprzednim; na rtęć w tym ramieniu ciśnie atmosfera, a ciśnienie jej mierzy się różnicą poziomów w obu rurkach. Tutaj rtęć opada w jednym ramieniu, a podnosi się w drugim tyleż, i podziałkę wypada przesuwać, aby jej 0 przypadło na poziomie rtęci w dolnym ramieniu.



Rys. 152. Naczynie Fortina.



Rys. 153. Barometr lewarkowy.


Rys. 154. Barometr domowy.

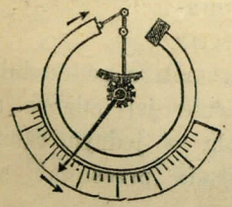
Ażeby uniknąć obniżenia rtęci skutkiem włoskowatości, a przytym ograniczyć się na małej ilości rtęci, robi się rurę barometryczną tak, aby miała przekrój znaczny na końcach, np. 10 mm, a środkową część włoskowatą (rys. 153 b).

c) Najpospolitszy w użyciu domowym jest *barometr naczyniowo-lewarowy* (rys. 154), posiadający w ramieniu krótszym rozszerzenie w kształcie gruszki, a rurkę bardzo wąską; stąd przy zmianach pogody poziom rtęci dolny prawie się nie zmienia, a 0 podziałki można uważać jako stałe. Stąd obserwuje się stan rtęci tylko w jednym miejscu, u góry; dolny koniec rurki i naczyńka są zamknięte w pudełku, ciśnienie zaś atmosfery udziela się przez szpary.

Uwaga. Przy odczytywaniu wysokości słupa rtęciowego w każdym barometrze, czyli krócej wysokości barometru, albo stanu barometru, trzeba uwzględniać wpływ temperatury, wprowadzając odnośną poprawkę (pt. „Rozszerzalność" w nauce o cieple); poprawka ta może wynosić kilka mm.

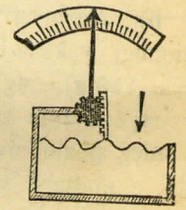
4. Barometry sprężynowe czyli *aneroidy* mają tę wyższość nad rtęciowymi, że mogą być dowolnej wielkości, działają w każdym położeniu i odznaczają się znaczną wrażliwością na zmiany ciśnienia. Podziałka ich sporządza się przez porównanie z barometrem rtęciowym i wymaga co pewien czas sprawdzenia, gdyż sprężystość metalów z czasem słabnie.

a) *Aneroid Bourdona* (rys. 155) składa się z rurki metalowej o przekroju eliptycznym (⬭) i cienkich ścianach, zgiętej w kształcie obrączki i szczelnie zalutowanej. Jeden koniec rurki jest nieruchomy, drugi wolny posuwa skazówkę. Powierzchnia zewnętrzna pierścienia przeważa nad wewnętrzną, przeto za zwiększeniem ciśnienia rurka się zwija, za zmniejszeniem rozwija.



Rys. 155. Aneroid Bourdona.

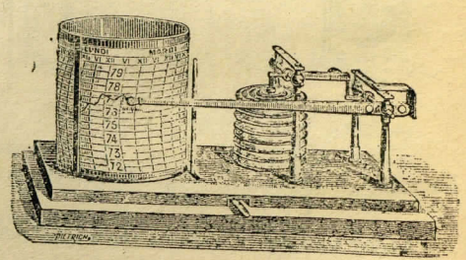
b) *Aneroid Vidi'ego* (rys. 156) zamiast rurki posiada puszkę metalową o cienkim falistym wierzchu, który pod ciśnieniem atmosfery ugina się mniej lub więcej, poruszając skazówkę.



Rys. 156. Aneroid Vidi'ego.

Aneroidy szczególnie dogodne są w podróży, jako narzędzia łatwo przenośne, małe i lekkie. Wymagają również poprawek co do temperatury; poprawki te dla każdego przyrządu podaje tabelka, wyznaczona drogą doświadczalną.

c) *Barograf* czyli barometr piszący Richarda (rys. 157) zawiera kilka puszek płaskich, ustawionych na sobie i połączonych, tak iż tworzą stos, który się kurczy od zwiększonego ciśnienia, a wydłuża za zmniejszeniem ciśnienia. Ruchy te udzielają się długiej skazówce, za pomocą paru drążków; skazówka kończy się piórkiem niewysychającym, które kreśli falistą linję ciśnienia na walcu papierowym, odpowiednio podzielonym i obracającym się na osi pionowej za pomocą mechanizmu zegarowego. Linje (łuki) pionowe na papierze oznaczają godziny, linje poziome oznaczają ciśnienia,



Rys. 157. Barometr piszący.

odpowiadające milimetrom słupa rtęciowego na zwykłym barometrze; po całkowitym obrocie, który trwa tydzień, papier się zdejmuje i na jego miejsce zakłada się nowy o takiej samej podziałce.

5. Mierzenie wysokości barometrem (Pascal i Perier 1648). W miarę wyniesienia, barometr wskazuje ciśnienie coraz mniejsze. Z obliczenia i spostrzeżeń wynika, że barometr opada o 1 mm, za wzniesieniem o $10\frac{1}{2}$ m.

Liczba $10\frac{1}{2}$ m dotyczy niewielkich wysokości nad poziom morza; im wyżej, tym powietrze jest rzadsze, tak iż trzeba się wznieść o 11, 12, 13 ... m, aby barometr opadł o 1 mm (por. rys. 147).

Dowód. Barometr można uważać za rodzaj naczyń połączonych, gdzie słup rtęci równoważy słup powietrza. Każdemu milimetrowi rtęci odpowiada słup powietrza o tylu mm wysokości, ile razy rtęć jest od powietrza gęstszą. Gęstość rtęci = 13,6, gęstość powietrza względem wody = $\frac{1}{773}$, stąd gęstość rtęci względem powietrza = 13,6 : $\frac{1}{773}$ = okrągło 10500. Za opadnięciem rtęci o 1 mm słup powietrza zmniejsza się o 10500 mm = 10,5 m.

W Warszawie średni stan barometru = 750 mm; wyniesienie więc miasta nad poziom morza stanowi prawie 110 m.

Pomiary bezpośrednie za pomocą balonów dały następujące wyniki:

wysokość w kilometrach	1	2	3	4	5	10
stan barometru w mm	674	597	529	463	406	200

Polegając na zasadzie, że ciśnienia maleją w postępie arytmetycznym, odpowiednie im zaś gęstości powietrza ubywają w postępie geometrycznym, można dojść do wzoru ogólnego na oznaczenie wysokości barometrem; wzór ten wymaga użycia logarytmów i stosuje się zwykle do znacznych wyniosłości. Dla niewielkich wyniesień nad poziom morza, np. do kilkuset metrów, jak w Królestwie Polskim, daje wystarczającą dokładność wzór Babineta:

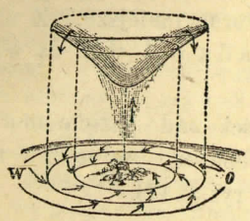
$$\text{wyniesienie } H = 16\,000\,\frac{B - b}{B + b} \text{ metrów}$$

gdzie b oznaczą stan barometru na dole, B na wyżynie.

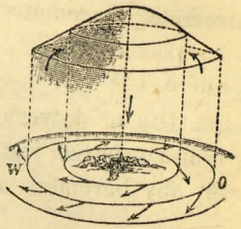
6. Przewidywanie pogody z barometru. Wysokość barometru w tym samym miejscu zmienia się ustawicznie, tak iż codzień, a nawet co godzina można zauważyć pewien spadek lub podniesienie. Wahania te nie przekraczają 2 do 3 cm poniżej i powyżej normy; w Warszawie np. stan barometru wynosi od 72 do 78 cm.

Skoro barometr w danym miejscu opada poniżej stanu średniego, zapowiada to niebo chmurne, deszcz lub śnieg; skoro się podnosi, należy się spodziewać pogody. Im raptowniejsze są wahania barometru, tym prędzej zachodzi zmiana pogody. Spotykane powszechnie napisy na barometrze: pogoda, odmiana, deszcz i t. p., mają znaczenie wątpliwe już z tego względu, że nie sam stan barometru, ale jego ruchy stanowią o pogodzie.

Wyobraźmy sobie ponad każdym miejscem ziemi słup powietrza n o r m a l n e g o, któreby wywierało takie samo ciśnienie, jak powietrze, istniejące rzeczywiście nad tym miejscem. Jeżeli w miejscu A (rys. 158) panuje *zniżka* barometryczna (minimum), t. j. najmniejsze ciśnienie, słup powietrza musi



Rys. 158.
Zniżka barometryczna.



Rys. 159.
Zwyżka barometryczna.

tu być najniższy; naokoło tego miejsca ciśnienia postępują, a wysokości słupów rosną. W innym miejscu B (rys. 159) niech ciśnienie będzie największe na całą okolicę czyli *zwyżka*, (maksymum); wysokość słupów powietrznych zmienia się przeciwnie, t. j. maleje od środka do obwodu. W ten sposób powstałaby idealna, zredukowana czyli s p r o w a d z o n a p o w i e r z c h n i a a t m o s f e r y, odpowiadająca stanowi barometru.

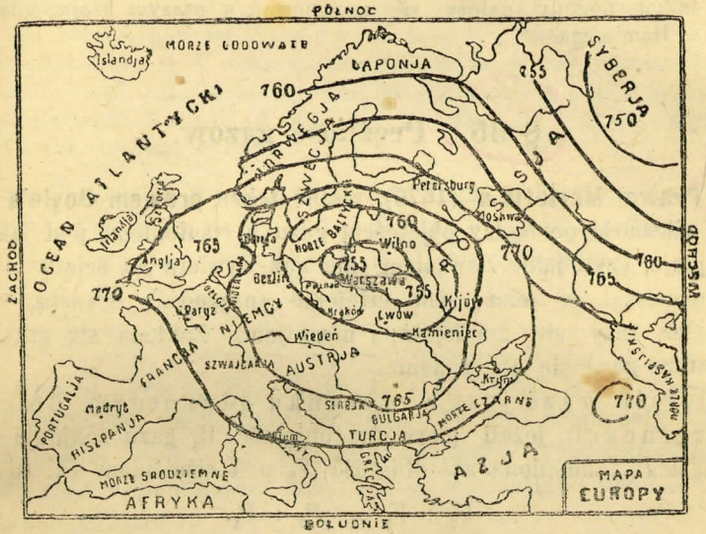
Łatwo zauważyć, że w miejscu zniżki powietrze musi dążyć wprost do góry, tworząc p r ą d w s t ę p u j ą c y, a do tego miejsca przypływa powietrze nad ziemią ze wszystkich stron. Do miejsca zwyżki natomiast napływa z góry powietrze, tworząc p r ą d z s t ę p u j ą c y, i z tego miejsca odpływa nad ziemią we wszystkich kierunkach.

Taki układ wiatrów dośrodkowy zowie się *cyklonem*, a odśrodkowy *antycyklonem*. Gdyby ziemia była w spoczynku, wiatry w cyklonach i antycyklonach wiałyby prosto, w kierunku promieni; obrót ziemi sprawia zboczenie, wskazane na rycinach.

Powietrze wstępujące w cyklonie dochodzi do warstw zimnych atmosfery, gdzie wilgoć powietrza się skrapla i zachmurza niebo, a następnie sprowadza opady. Powietrze spływające z góry w antycyklonie pochodzi z warstw zimnych, zawiera mało pary i nie zaciąga się chmurami, gdyż opada ku dolnym warstwom cieplejszym; stąd niebo tu jest pogodne.

Z zestawienia spostrzeżeń, dokonywanych jednocześnie w całej sieci stacji, można nakreślić mapkę meteorologiczną, z której w przybliżeniu da się określić stan pogody w różnych miejscowościach, a stąd można wnosić o dalszym jej przebiegu. Podstawę takiej mapy stanowią *izobary*, linje jednakowego ciśnienia, otrzymane z połączenia punktów na ziemi, gdzie barometr wskazuje w danej chwili jednakową liczbę mm, obliczoną względem poziomu morza. Są to linje krzywe, przeważnie zamknięte, mniej lub więcej do kół zbliżone. Pośrodku istnieje zniżka (rys. 160) lub zwyżka barometryczna. W miejscach zniżek panuje zwykle zachmurzenie lub słota, w miejscach zwyżek pogoda i cisza; od jednej izobary do drugiej wieją wiatry, zawsze ku miejscom niższego ciśnienia, i to tym mocniej, im gęściej idą izobary (dlaczego?).

Zniżki barometryczne, zwiastuny niepogody, postępują zwykle w Europie z zachodu ku wschodowi, i przybywają z oceanu Atlantyckiego. Zwyżki idą mniej prawidłowo.



Rys. 160. Mapa meteorologiczna.

Za powszechną przyczynę cyklonów i wogóle wiatrów uchodzi nierówne rozgrzanie ziemi pod działaniem promieni słońca, a stąd rozszerzanie się powietrza; pozatym jednak zachodzą tu zawiłe i niezupełnie jeszcze zbadane zjawiska atmosferyczne.

Zadania.

1. O ile się podniesie rtęć w dolnym ramieniu barometru lewarowego (rys. 197 a), jeżeli w górnym opadnie o 1 cm, a oba ramiona są równej średnicy?

2. O ile się podniesie rtęć w naczyniu barometru (rys. 151), mającym 40 mm średnicy, jeżeli rurka ma 8 mm średnicy, a rtęć w niej opadła o 22 mm? R o z w. Naczynie jest 40 : 8 = 5 razy szersze w średnicy, czyli $5^2 = 25$ razy obszerniejsze w przekroju, niż rurka; rtęć w nim podniesie się o $\frac{1}{25}$ tej wysokości, o jaką spadła w rurce, zatym o 25 : 25 = = 1 mm.

3. Czy można zauważyć różnicę ciśnienia na barometrze domowym (rys. 154), przeniósłszy go z parteru na trzecie piętro? Wysokość piętra = = 4 m.

4. Najwyższym budynkiem na ziemi jest wieża Eiffla w Paryżu, wysoka na 300 m. O ile mm wskazuje barometr mniej na szczycie wieży, niż u podstawy? O d p. 28,6 mm.

5. Jaką wysokość ma nad poziom morza największa wyniosłość w Królestwie Polskim, Łysa Góra w grzbiecie Świętokrzyskim, jeżeli średnie ciśnienie wynosi tam 703 mm? Odp. 760 — 703 = 57 mm; 10,5 . 57 = = okr. 600 m.

6. Jakiej pogody należy się spodziewać w naszym kraju, gdy zniżka istnieje w Hamburgu?

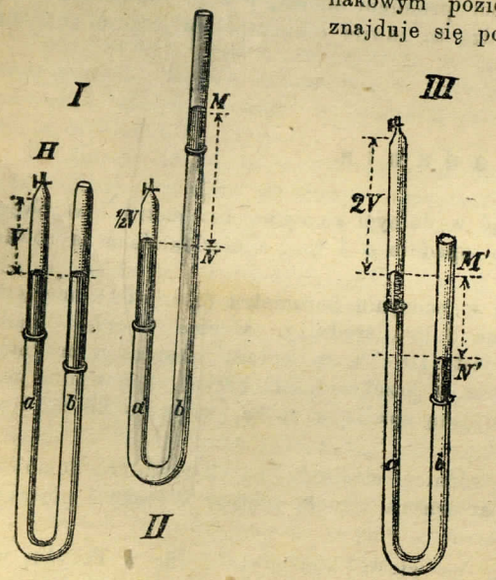
§ 35. Prężność gazów.

1. Prawo Mariotte'a (1676), zwane także **prawem Boyle'a** (1662), wyraża zależność pomiędzy objętością gazu a ciśnieniem, pod jakim gaz się znajduje, czyli jakie nawzajem sam gaz wywiera na ściany naczynia, t. j. prężnością: w miarę jak ciśnienie (prężność) wzrasta, objętość gazu tyleż razy się zmniejsza, i nawzajem. Zakłada się przytym, że temperatura gazu się nie zmienia.

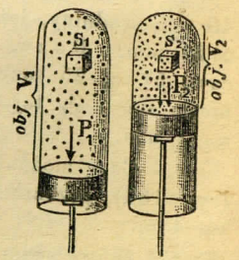
Objętość gazu jest w stosunku odwrotnym do ciśnienia (prężności); jeżeli pierwotna objętość V_1 gazu znajduje się pod ciśnieniem P_1, zmieniona zaś objętość V_2 pod ciśnieniem P_2, to

$$V_1 : V_2 = P_2 : P_1.$$

Doświadczalnie okazać można ten stosunek za pomocą dwu prostych rurek szklanych: zamkniętej *a* i otwartej *b* (rys. 161), połączonych u dołu rurką gumową. Skoro napełnimy rurki rtęcią tak, aby stała na jednakowym poziomie (*I*), objętość V powietrza znajduje się pod ciśnieniem atmosfery. Za podniesieniem rurki *b* (*II*), powietrze w *a* będzie pod ciśnieniem atmosfery, zwiększonym o słup rtęciowy *MN*. Jeżeli ten słup wynosi 76 cm = = 1 atm., ciśnienie gazu = = 2 atm., a objętość = $\frac{1}{2}$ *V*.



Rys. 161.



Rys. 162.

Podobnież za podniesieniem rurki *b* wyżej, aż objętość V zmniejszy się do $\frac{1}{3}$ V, słup rtęci *MN* wyniesie 152 cm = 2 atm., gaz posiędzie prężność 2 + 1 = 3 atm. i t. d.

Dla okazania słuszności prawa Mariotte'a przy ciśnieniach, mniejszych od 1 atmosfery, spuszczamy rurkę *b* (rys. 161, *III*), aż objętość V gazu się podwoi; różnica poziomów rtęci wyniesie wtedy 38 cm = *M'N'*. Zatym prężność gazu w obj. 2 V wraz ze słupkiem 38 = $\frac{1}{2}$ atm. równoważy ciśnienie 1 atm., czyli gaz znajduje się pod ciśnieniem $\frac{1}{2}$ atm. Podobnież za spuszczeniem rurki *b* niżej, aż objętość V gazu się potroi, odpowiednia prężność gazu wyniesie $\frac{1}{3}$ atm. i t. d.

Prawo Mariotte'a można wyrazić ogólniej, mianowicie, że dla danej masy gazu iloczyn z objętości gazu przez odpowiednią prężność gazu jest wielkością stałą (constans):

$$P \times V = \text{const.}$$

Z proporcji bowiem $V_1 : V_2 = P_2 : P_1$ wynika $P_1 \times V_1 = P_2 \times V_2$; podobnież dla nowej objętości V_3 pod ciśnieniem V_3 będzie $P_1 \times V_1 = P_3 \; V_3$ i t. d. Wogóle więc, liczba wyrażająca jakąkolwiek prężność P gazu, pomnożona przez liczbę, wyrażającą odnośną objętość, daje iloczyn jednakowy. *)

Np. 200 cm³ powietrza pod ciśnieniem atmosfery skurczy się do 100 cm³, pod ciśnieniem 2 atmosfer do 50 cm³ od 3 atmosfer i t. d.; 200 × 1 = = 100 × 2 = 50 × 4 i t. d.

2. Gęstość gazu a prężność. Objętość każdego gazu jest w stosunku odwrotnym do jego gęstości, bo im większy obszar gaz zajmuje, rozszerzając się, tym mniej cząstek zawiera każdy cm³ gazu. Zatym gęstość gazu jest proporcjonalna do ciśnienia (prężności), t. j. w miarę jak wzrasta ciśnienie, tyleż razy powiększa się gęstość gazu. Jeżeli pod ciśnienien P_1 gaz posiada gęstość d_1, a pod zmienionym ciśnieniem P_2 inną gęstość d_2, to

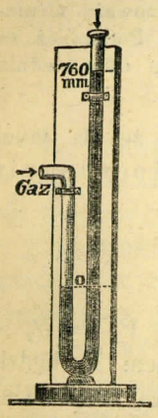
$$d_1 : d_2 = P_1 : P_2.$$

Dowód (rys. 162). Gdy ciśnienie wzrośnie n razy, objętość gazu = $1/n$; stąd każdy centymetr sz. zawierać będzie n razy więcej cząstek, niż poprzednio, zatym gęstość gazu, czyli masa w 1 cm³, będzie n razy większa.

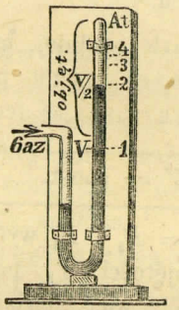
3. Manometry służą do mierzenia prężności gazu lub pary, znacznie wyższej lub niższej od ciśnienia atmosferycznego; w ostatnim wypadku mają też nazwę *wakumetrów* (od łac. „vacuum" = próżnia). Urządzenie manometrów polega bądź na zastosowaniu prawa Mariotte'a, lub na ciśnieniu barometrycznym. Podobnie jak barometry, istnieją manometry rtęciowe lub sprężynowe czyli metalowe.

*) Pod ciśnieniem bardzo znacznym, np. powyżej 50 atmosfer, zachodzą pewne uchybienia od prawa Mariotte'a, tak iż objętość gazu kurczy się zwykle bardziej, niż wymaga proporcjonalność.

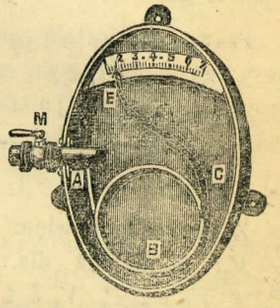
a) *Manometr rtęciowy otwarty* (rys. 163) składa się z rury w kształcie litery *U*, której ramię krótsze podlega badanemu ciśnieniu, dłuższe ciśmieniu atmosfery. Przewyżkę ciśnienia badanego nad atmosferycznym mierzy wysokość słupa rtęciowego w rurze dłuższej; jażeli np. słup wynosi 760 mm, przewyżka = 1 atm, a prężność gazu = 2 atm.



Rys. 163.
Manometr otwarty.



Rys. 164.
Manometr zamknięty.



Rys. 165.
Manometr Bourdona.

b) *Manometr rtęciowy zamknięty* (rys. 164) ma kształt podobny, ale ramię dłuższe zalutowane; powietrze, zawarte w tym ramieniu, zagęszcza się pod ciśnieniem gazu lub pary w drugim ramieniu. Miarą ciśnienia jest tutaj zmniejszenie objętości powietrza. Różnica poziomów, wobec wysokich ciśnień, nie bierze się pod uwagę, daje bowiem błąd nieznaczny (objaśnić podziałkę).

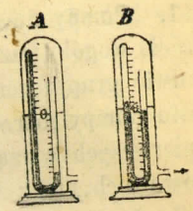
Manometry sprężynowe są urządzone na sposób aneroidów; ciśnienie wszakże, poruszające skazówkę, działa nie ze strony zewnętrznej, jak w aneroidach, ale doprowadza się wewnątrz rurki lub puszki sprężystej.

Manometr Bourdona (rys. 165) składa się z płaskiej spiralnej rurki (*B*), umocowanej jednym końcem (*A*), a drugim połączonej ze skazówką (*E*), gaz lub parę wpuszcza się otwarciem kranu (*M*) do rurki, przez co rurka się rozkręca i posuwa skazówkę. Podziałkę sporządza się przez porównanie z manometrem rtęciowym.

4. Wakumetr (rys. 166) czyli *manometr do próżni* jest właściwie skróconym barometrem lewarkowym; rtęć wypełnia tutaj początkowo (*A*) całe ramię zamknięte (dlaczego?). Za połączeniem otwartej rurki wakumetru z naczyniem, w którym rozrzedzono powietrze, rtęć w zamkniętej rurce wakumetru opada tym niżej, im znaczniejsze jest rozrzedzenie; przy doskonałym wyciągnięciu powietrza poziom rtęci zrównałby się w obu rurkach. Stopień rozrzedzenia powietrza lub innego

gazu wyraża się bądź w milimetrach słupka rtęciowego, o jaki rtęć stoi wyżej w rurce zamkniętej wakumetru (rys. 166 *B*), bądź w atmosferach.

Jeżeli np. różnica słupków rtęci z obu stron zera wynosi 20 mm, mówimy, że rozrzedzono powietrze do 20 mm rtęci. Ponieważ atmosfera równoważy 760 mm rtęci, słupek 20 mm odpowiada ciśnieniu $20 : 760 = \frac{1}{38}$ atmosfery.



Rys. 166. Wakumetr.

Istnieją wakumetry sprężynowe, urządzone jak manometry (rys. 165).

Zastosowanie manometrów. Manometry sprężynowe stanowią narzędzia niezbędne przy każdej maszynie parowej, kotłach o wysokim ciśnieniu; przy zgęszczaniu i skraplaniu gazów, wyrobie wód mineralnych, wody sodowej, przy większych lampach gazonaftowych i spirytusowych, przy pompach wodnych do rozrzedzania powietrza (aspiratorach).

Manometry rtęciowe i wakumetry służą głównie do pomiarów naukowych, do sprawdzania manometrów sprężynowych; te bowiem ostatnie z biegiem czasu dają wskazania mniej dokładne, z powodu zmian w sprężystości rurki. Wakumetr rtęciowy używa się jako wskaźnik rozrzedzenia przy pompach powietrznych, przy opróżnianiu lampek elektrycznych, rurek do promieni Roentgena.

Manometr otwarty (rys. 163), napełniony wodą zamiast rtęci, używa się często do pomiaru drobnej różnicy ciśnienia ponad atmosferę. Ponieważ atmosfera równoważy słup wody 10,33 m, każdy centymetr słupka wodnego w manometrze odpowiada prawie $\frac{1}{1000}$ atmosfery. Tak np., ciśnienie gazu świetlnego w rurach miejskich równoważy 5 do 6 cm wody w manometrze.

Zadania.

1. Ile waży litr powietrza w Warszawie przy średnim ciśnieniu 750 mm i temperaturze normalnej (0°)? Odp. $1{,}293 \cdot \frac{750}{760} = 1{,}276$ g.

2. W wiatrówce zgęszczono powietrze tłokiem z 550 do 110 cm^2; barometr wskazuje 720 mm. Jaki nacisk działa w lufie na kulkę, w której powierzchnia, podległa ciśnieniu, wynosi 2 cm^2?

Rozw. Prężność = 5 . 72 = 360 cm rtęci, przewyżka nad ciśnieniem zewnętrznym = 288 cm; siła = 288 . 2 . 13,6 = 7833 g. = 7,833 kg.

3. Najdoskonalsze pompy powietrzne (rtęciowe) opróżniają naczynia tak, że wakumetr wskazuje różnicę poziomów rtęci 0,0008 mm. Ile wynosi rozrzedzenie, wyrażone w atmosferach? Odp. $0{,}0008 : 760 =$ okr. $\frac{1}{1000000}$ atm.

4. Dzwon nurkowy zanurzono w morzu na 16 m. Jaką część pojemności dzwona wypełni woda, jeżeli gęstość jej = 1,03? Rozw. Ciśnienie atm. = 10,33 : 1,03 = 10 m wody morskiej; powietrze w dzwonie ma prężność 1,6 + 1 = 2,6 atm., zatym zajmie tylko $1 : 2{,}6 = \frac{5}{13}$ dzwona, resztę zajmie woda, t. j. $\frac{8}{13}$ dzwona, jeżeli niema dopływu powietrza.

§ 36. Pompy powietrzne.

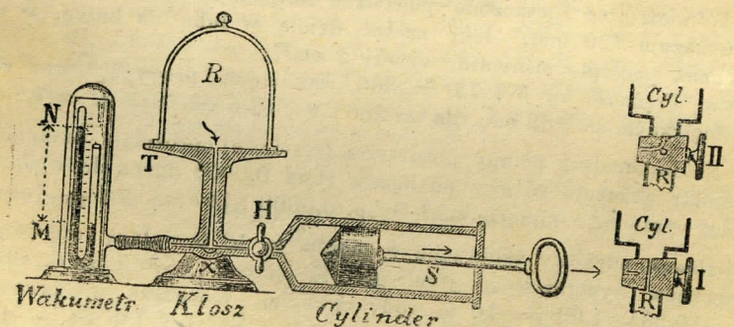
1. Pompy powietrzne służą do rozrzedzania lub zgęszczania powietrza i wogóle gazów; dwojakiemu ich przeznaczeniu odpowiada podział na dwie grupy: pompy rozrzedzające oraz pompy zgęszczające. Nadto pompy rozrzedzające można podzielić na tłokowe i rtęciowe; w pierwszych wyciąganie powietrza odbywa się za pomocą ruchów tłoka, w ostatnich przez wypieranie powietrza za pomocą rtęci.

Żadna pompa nie może dać próżni doskonałej, to jest przestrzeni bezwzględnie pozbawionej powietrza. Wyraz *próżnia* ma znaczenie względne, jako przestrzeń o wysokim rozrzedzeniu, t. j. o małej pozostałości powietrza, bądź innego gazu lub pary, w porównaniu z ilością pierwotną.

Słuszność tego poglądu łatwo stwierdzić rozumowaniem. Pomijając nawet rozmaite niedokładności przyrządów, należy zauważyć, że za każdym ruchem tłoka lub rtęci usuwa się część powietrza, inna zaś część pozostaje w naczyniu, wypadłoby więc wykonać nieskończenie wielką ilość ruchów, aby czyniu opróżnić.

2. Pompa rozrzedzająca. Pompa tłokowa, zwana *maszyną pneumatyczną* (Guericke 1636), składa się w części zasadniczej z walca czyli cylindra, w którym porusza się tłok i który łączy się naprzemian to ze zbiornikiem, gdzie powietrze się rozrzedza, to z atmosferą, za pomocą kranów lub klapek (wentyli).

a) *Pompa kranowa* (rys. 167) ma tłok pełny, t. j. bez otworu; przy wylocie walca posiada kran trójdzielny (*H*), o dwu kanałach wzajemnie prostopadłych (*I*, *II*). Do pompy należy zwykle płaski talerz metalowy (*T*), do którego przystaje szczelnie klosz (*R*), z boku zaś dołączony wakumetr (*MN*).



Rys. 167. Maszyna pneumatyczna.

Działanie. Skoro tłok dotyka dna, łączymy (jak w *I*) kranem dzwon z walcem i wyciągamy tłok. Powietrze skutkiem rozprężliwości wpada do walca i wypełnia go, w dzwonie więc powietrze się rozrzedza. Następnie przekręcamy kran (jak w *II*), aby dzwon oddzielić od walca, a jednocześnie połączyć ten ostatni z atmosferą, i wtłaczamy tłok do dna, wypędzając w ten sposób powietrze z walca, z wyjątkiem drobnej luki, t. zw. przestrzeni szkodliwej *s*, wewnątrz tłoka oraz między tłokiem a dnem walca, gdzie zawiera się powietrze atmosferyczne. Dalej następuje znów przekręcenie kranu *I* i wyciągnięcie tłoka, przyczem powietrze rozrzedza się w tym samym stosunku i t. d.

W wakumetrze rtęć na razie się nie porusza (dlaczego?), następnie opada za każdym ruchem tłoka, aż wreszcie zatrzymuje się na pewnej wysokości (*MN*), wskazując granicę rozrzedzenia dla danej maszyny; dalsze pompowanie byłoby bezużyteczne. Granicę tę osiąga się wtedy, gdy powietrze w kloszu ma taką samą prężność, jak w walcu, który się napełnił powietrzem rozprężonem z przestrzeni szkodliwej.

Przyrząd opisany daje przy dobrej budowie rozrzedzenia do 4 mm, lub co najwyżej do 2 mm rtęci, co odpowiada okrągło $\frac{1}{200}$ do $\frac{1}{400}$ atm.

Ponieważ praca wyciągania tłoka jest uciążliwa, wymaga bowiem w końcu pokonywania całego prawie ciśnienia atmosferycznego (1 kg na cm² tłoka), często mają zastosowanie pompy dwutłokowe, gdzie ciśnienie to wzajemnie się znosi, a nadto rozrzedzenie idzie podwójnie szybko. Maszyny te jednak są bardziej skomplikowane i w działaniu mniej pewne.

Rozrzedzenie powietrza w kloszu zależy od liczby ruchów tłoka i od wielkości klosza w stosunku do walca. Za pierwszym wyciągnięciem tłoka, powietrze zawarte w kloszu objętości R rozszerza się o objętość walca S; prężność więc jego wynosi część $\frac{R}{R+S}$ prężności atmosferycznej, którą przyjmujemy $= 1$. Po drugim ruchu prężność znów zmniejsza się $\frac{R}{R+S}$ razy, czyli wynosi $\left(\frac{R}{R+S}\right)^2$ i t. d., po n ruchach

$$\text{prężność końcowa } p = \left(\frac{R}{R+S}\right)^n \text{ atmosfery.}$$

Zatym prężność spada w postępie geometrycznym.

Teoretycznie rozrzedzanie może się ciągnąć bez granic.

Im mniejszy jest klosz w porównaniu z walcem, tym prędzej idzie rozrzedzanie. Ułamek bowiem

$$\frac{R}{R+S} = \frac{1}{1+\frac{S}{R}}$$

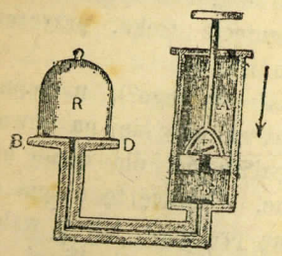
zmniejsza się tym bardziej, im stosunek S/R więcej wzrasta.

Praktyczna granica rozrzedzenia wyraża się stosunkiem s/S, t. j. przestrzeni szkodliwej s do objętości walca S. Skoro bowiem powietrze, zawarte w s, pod ciśnieniem atmosfery rozszerzy się do S, prężność jego stanie się s/S częścią prężności pierwotnej $= 1$, a musi być równą prężności powietrza rozrzedzonego w kloszu, czyli praktycznie

$$\text{prężność końcowa } p = \frac{s}{S}.$$

Przykład. Niech zbiornik B ma objętość 4 ltr, walec S obj. 1 ltr; pierwszy ruch tłoka daje rozrzedzenie $\frac{4}{5}$, drugi $(\frac{4}{5})^2$, trzeci $(\frac{4}{5})^3$ i t. d. Po 20 ruchach prężność powietrza wynosi $(\frac{4}{5})^{20}$ = około $\frac{1}{100}$ prężności powietrza zwykłego. Jeżeli przytym przestrzeń szkodliwa s = 10 cm³ czyli $\frac{1}{100}$ walca S, dalsze pompowanie byłoby bezcelowe, co można zauważyć na wakumetrze MN.

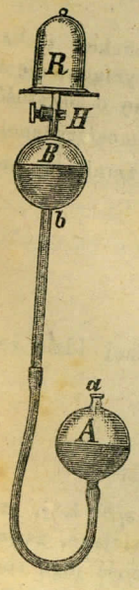
b) *Pompa wentylowa* w najprostszym urządzeniu, jakie wyobraża rys. 168 (manometr tu usunięto), posiada dwie klapki, jednę nad otworem w tłoku, drugą na spodzie walca; obie otwierają się tylko na zewnątrz (do góry na rysunku). Przy wpychaniu tłoka, dolna klapka się zamyka, górna otwiera (dlaczego?), jak to wyobraża rysunek; powietrze więc, wyparte tłokiem, uchodzi do atmosfery. Przy wyciąganiu tłoka dolna klapka się otwiera, górna zamyka (dlaczego?) i wtedy do walca wpada powietrze z klosza, który szczelnie przystaje do talerza metalowego i połączony jest z walcem za pomocą rury. Powtarzając tę czynność, można osiągnąć względną próżnię, mianowicie rozrzedzenie do kilku mm rtęci.



Rys. 168.

Pompa wentylowa jest dogodniejsza i prędsza w działaniu, gdyż nie wymaga otwierania kranów, to też ma powszechne zastosowanie.

W najnowszej konstrukcji usunięto przestrzeń szkodliwą przez wprowadzenie do walca oleju, który wypełnia szczeliny. Taka *pompa olejowa* Geryka daje rozrzedzenie do 0,0002 mm rtęci; mniejszej prężności osiągnąć niepodobna w skutek parowania oleju.



Rys. 169. Zasada pompy Geisslera.

3. Pompy rtęciowe służą do osiągnięcia próżni dokładniejszej, zbliżonej do próżni Torricellego, jakiej maszyny tłokowe dać nie są w stanie. Jedne z nich posiłkują się próżnią barometryczną, inne wypływem rtęci.

a) *Pompa barometryczna* Geisslera (1855) polega na wprowadzaniu powietrza do próżni barometrycznej (rys. 169). Składa się z dwu naczyń A i B, połączonych rurą gumową. Najpierw ustawia się A cokolwiek wyżej nad B i wlewa tyle rtęci, przy otwartym kranie trójdzielnym H (jak na rys. 147, I i II) doszła do H. Zamknąwszy kran, spuszcza się A tak, aby otwór a był od szyjki b przynajmniej o 76 cm niżej. Rtęć opada do wysokości barometrycznej, a w B powstaje próżnia Torricellego. Wtedy łączy się kranem zbiornik R z próżnią; następuje pierwsze rozrzedzenie. Powietrze, jakie weszło do B, usuwa się przez połączenie B z atmosferą, przekręcając odpowiednio kran H, i podniesienie A powyżej B. Następnie łączy się znów B z R, spuszcza się A i t. d.

Ponieważ wypompowywanie tą drogą odbywa się bardzo wolno, rozrzedza się zwykle powietrze najpierw za pomocą jakiejś pompy tłokowej lub aspiratora, poczym dopiero stosuje się pompę rtęciową.

b) *Pompa z wypływem cieczy*, Sprengla, polega na wypływie rtęci lub innej cieczy wąskim strumieniem, który, dzieląc się w rurce na krople, porywa pęcherzyki powietrza z rury bocznej, prowadzącej do zbiornika (rys. 170). Skoro rtęć wyczerpuje się w górnym lejku, przelewa ją się z dolnego naczynia znów do lejka, co się odbywa przez podnoszenie automatyczne, tak iż aparat działa bez przerwy.

Najnowsze pompy rtęciowe obywają się całkiem bez kranów, zamykają się zaś naciskiem rtęci, przez co usuwa się wszelkie przestrzenie szkodliwe oraz parowanie tłuszczu, zwilżającego krany. Tą drogą osiągnięto próżnię do 0,000 004 mm rtęci czyli około 0,000 000 005 atmosfery.


Rys. 170. Zasada pompy Sprengla.



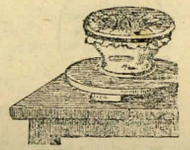
Rys. 171. Aspirator.

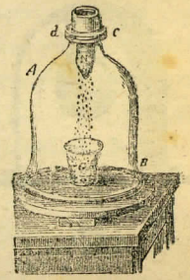
Zamiast rtęci w pompie Sprengla, do słabych rozrzedzeń można użyć strumienia wody, np z kranu wodociągowego. Podobny przyrząd, powszechny w pracowniach naukowych i technicznych, zowie się *aspiratorem* (rys. 171).

4. Doświadczenia i zastosowania. a) Doświadczenia. Ciśnienie atmosfery okazują następujące doświadczenia:

1) Rtęć podnosi się w rurze, połączonej z pompą powietrzną, za każdym ruchem tłoka coraz wyżej, nie dochodzi jednak do wysokości barometrycznej w danej chwili (dlaczego?).

2) Pęcherz, którym zawiązano otwór słoja, pęka z hukiem, skoro ze słoja wyciągamy powietrze (rys. 172).

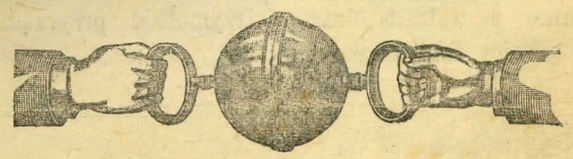

Rys. 172.



Rys. 173. Deszcz rtęciowy.

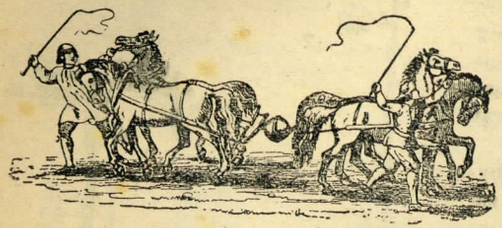
3) *Deszcz rtęciowy* (rys. 173), zdradzający dziurkowatość drzewa, skóry i t. p.: słój szczelnie przystający do talerza pompy zamyka się u góry korkiem drewnianym lub skórzanym, wydrążonym na wierzchu; po nalaniu rtęci do wydrążenia, przesiąka ona i spada w drobnych kropelkach, skoro powietrze w słoju rozrzedzamy.




Rys. 174. Półkule magdeburskie.

4) Klosz trzyma się talerza tak mocno, że go zdjąć niepodobna, skoro powietrze znacznie rozrzedzono.

5) *Półkule magdeburskie* (rys. 174) są to półkule metalowe, wydrążone, szczelnie przystające do siebie; po opróżnieniu ich z powietrza, trzeba dużego wysiłku, aby półkule rozerwać. Półkule o średnicy 70 cm wytrzymały ciągnienie 16 koni, w historycznym doświadczeniu Ottona v. Guericke (1654, w Ratysbonie, rys. 175).



Rys. 175. Doświadczenie Guerickego.

Rozprężliwość powietrza stwierdzają doświadczenia:

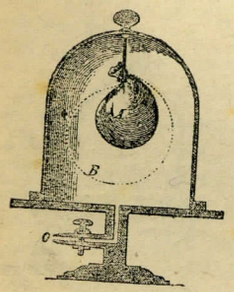
1) Zmięty balonik kauczukowy rozdyma się pod kloszem (rys. 176).

2) Zwiędłe jabłko wygładza się pod kloszem.

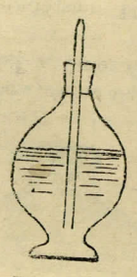
3) Z wody, jako też z drzewa zanurzonego uchodzą pęcherzyki powietrza.

4) Płyn wytryska z flaszki, w połowie napełnionej i zatkanej korkiem, przez który przechodzi rurka do dna (rys. 177).

Inne doświadczenia, dotyczące pewnych zjawisk mechanicznych (spadek w próżni), cieplnych (wrzenie w próżni), głosowych (dźwięk w próżni) itp. podają odnośne rozdziały niniejszej książki.



Rys. 176.



Rys. 177.

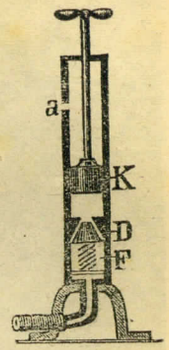
b) U ż y t k i t e c h n i c z n e pompy rozrzedzającej.

Opróżnianie lampek elektrycznych, rurek do promieni Roentgena i t. p. — Zgęszczanie mleka przez odparowywanie w próżni (konserwy mleczne), syropu cukrowego, stężanie olejów, gliceryny i t. p. płynów, rozkładających się przy zwykłym gotowaniu; w próżni zaś płyny te wrą przy słabym ogrzaniu. — Dystylacja rtęci, słabo ogrzanej, w próżni.

5. Pompa zgęszczająca. Pompa do rozrzedzania, kranowa (rys. 167), może służyć do zgęszczania powietrza lub innych gazów, skoro się otwiera i zamyka krany przeciwnie, niż przy wyciąganiu powietrza (objaśnić).

W pompie zgęszczającej istnieje również p r z e s t r z e ń s z k o d l i w a pomiędzy dnem walca a tłokiem; wielkość tej przestrzeni w porównaniu z walcem oraz wytrzymałość przyrządu na ciśnienie stanowi o granicy zagęszczenia gazów.

Powszechnie używa się *pompy wentylowej*, jako dogodniejszej, niż kranowa. Składa się ona również z walca metalowego, opatrzonego tłokiem; na spodzie walca jest klapka, otwierająca się do wewnątrz (ku dołowi na rys. 178), t. j. w stronę zbiornika, np. bani, gdzie ma być powietrze zgęszczane; walec posiada z boku otwór (a), blisko górnego końca. Za wepchnięciem tłoka powietrze się zgęszcza, otwiera klapkę i przechodzi do zbiornika. Przy wyciągnięciu klapka się zamyka (dlaczego?), a skoro tłok podniesie się ponad otwór (a), do walca wpada powietrze atmosferyczne. Powtarzając te ruchy, wtłacza się do zbiornika coraz więcej powietrza lub innego gazu, z którym połączymy otwór (a); stopień zgęszczenia, czyli prężność mierzy się przez połączenie z manometrem (rys. 164, 165) i wyraża się w atmosferach.



Rys. 178. Pompa zgęszczająca.

Pompa zgęszczająca wymaga znacznej siły do poruszania tłoka, tak iż przy wysokim zgęszczeniu albo przy większych wymiarach tłoka nie wystarcza siła człowieka.

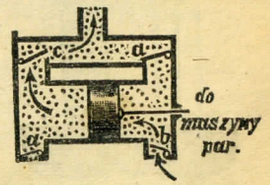
Z g ę s z c z e n i e w tej pompie, podobnie jak rozrzedzenie w maszynie pneumatycznej (rys. 167), zależy od ilości ruchów tłoka oraz wielkości zbiornika w stosunku do walca; zależność ta wszakże wyraża się inaczej. Za pierwszym wepchnięciem tłoka, powietrze zawarte w walcu objętości S (rys. 167) wchodzi do przestrzeni R, prężność więc powietrza wzrasta $\frac{R+S}{R}$ razy, zatym względem atmosfery o prężności $= 1$ nowa prężność wynosi $\frac{R+S}{R} = 1 + \frac{S}{R}$. Po drugim ruchu mieści się w zbiorniku R powietrze, któreby pod ciśnieniem atmosfery miało objętość $R + 2S$, więc prężność staje się $= \frac{R+2S}{R} = 1 + 2\frac{S}{R}$; po trzecim ruchu prężność $= 1 + 3\frac{S}{R}$ i t. d., wreszcie po n ruchach teoretycznie

$$\text{prężność końcowa } P = 1 + n\frac{S}{R} \text{ atmosfer.}$$

Prężność więc wzrasta w postępie arytmetycznym. Ze wzoru wynika, że zgęszczanie odbywa się tym prędzej, im mniejszy jest zbiornik R w porównaniu z walcem S, wtedy bowiem wzrasta tym bardziej ułamek S/R.

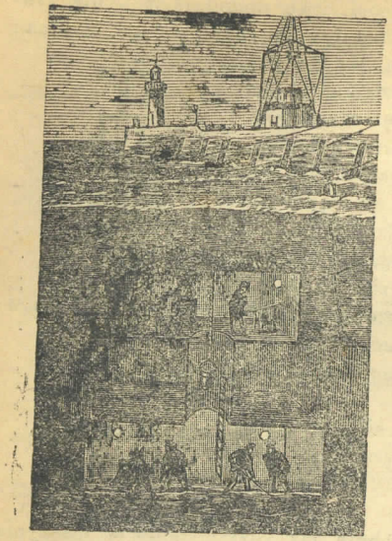
Praktyczna granica zgęszczenia nadchodzi wtedy, gdy prężność powietrza zgęszczonego w przestrzeni szkodliwej zrówna się z prężnością w zbiorniku.

Z a s t o s o w a n i a p o m p y z g ę s z c z a j ą c e j. Hamulce pneumatyczne w pociągach (Westinghouse). — Kompresory do wytwarzania t. zw. wiatru w wielkich piecach oraz do wtłaczania powietrza przy wyrobie stali Bessemera. — Zgęszczanie gazów i skraplanie: tlen zgęszczony, kwas węglowy (bezwodnik) płynny, powietrze płynne. — Wyrób wód mineralnych i napojów musujących. — Nadymanie obręczy gumowych w rowerach i powozach. — Wiatrówki. — Poczta rurowa w miastach. — Dzwonki pneumatyczne.



Rys. 179. Zasada silnika o zgęszczonym powietrzu.

Silniki o ścieśnionym powietrzu; rys. 179 wyobraża walec roboczy maszyny, używanej do wiercenia tunelów. Podobne silniki służą do



Rys. 180. Dzwon nurkowy.

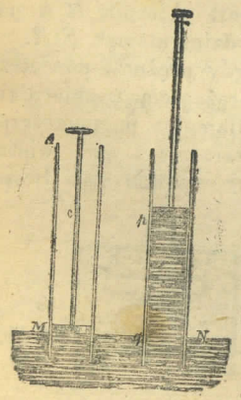
pędzenia torped pływających. Wogóle powietrze ścieśnione stanowi coraz powszechniejszy sposób przenoszenia energji na odległość. — Zasilanie powietrzem robotników przy robotach podziemnych, np. w głębokich kopalniach, oraz podwodnych, jak w kesonach do budowy mostów, dzwonie nurkowym (rys. 180).

§ 37. Pompy wodne i lewary.

1. Zasada pompy wodnej. Pod nazwą *pompy* rozumiemy urządzenie do czerpania wody lub innej cieczy ze zbiornika, oraz do podnoszenia jej na dowolną wysokość.

Pompa składa się z walca metalowego lub drewnianego, zamkniętego tłokiem. Niech tłok styka się z powierzchnią wody, przy pionowym zanurzeniu rury w wodzie (rys. 181); podczas wyciągania tłoka podnosi się wraz z nim woda w rurze, pod ciśnieniem atmosfery, i może dojść do wysokości $10\frac{1}{3}$ m (§ 33, art. 4); jest to granica wznoszenia się wody we wszelkich pompach. Dalej tłok wznosiłby się, pozostawiając pod sobą próżnię (względną).

Wysokość $10\frac{1}{3}$ m ma znaczenie teoretyczne, w rzeczywistości bowiem żaden tłok nie zamyka rury zupełnie szczelnie, a nadto woda paruje i para jej posiada pewną prężność; stąd słup wody w pompach wypada zawsze niższy od 10 metrów. Do pompowania wody wyżej służą urządzenia dodatkowe; w zależności od nich odróżniamy pompy ssące i tłoczące.

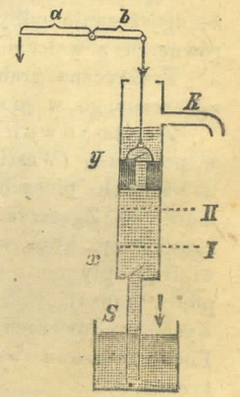


Rys. 181.

Istnieją nadto *pompy wirowe*, oparte na działaniu siły odśrodkowej (pt.).

2. Pompa ssąca (rys. 182) służy do wyciągania wody z rzeki, studni lub innego zbiornika. Składa się z walca pionowego, w którym posuwa się tłok wydrążony i opatrzony klapką (y). Walec łączy się rurą węższą (S) ze zbiornikiem wody i posiada na spodzie klapkę (x), otwieraną do góry; woda wypływa przez górną rurę (R).

Za wyciągnięciem tłoka, ciśnienie atmosfery pędzi wodę do rury, klapka dolna (x) się podnosi i woda wchodzi do walca na



Rys. 182. Pompa ssąca.

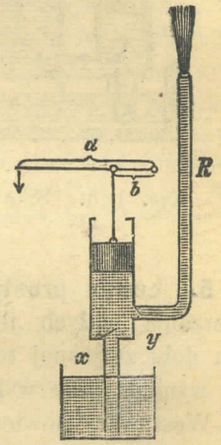
pewną wysokość (I). Za spuszczeniem tłoka, woda ciężarem własnym zamyka klapkę (x), a pozostałe nad wodą powietrze pod naciskiem tłoka otwiera ujście (y) w tłoku i wychodzi na zewnątrz.

Podobnież za drugim podniesieniem tłoka wchodzi do walca nowa ilość wody i dosięga większej wysokości (II). Za spuszczeniem, tłok wypycha resztę powietrza, a następnie wodę na zewnątrz, tak, iż woda wzbiera nad tłokiem. Przy dalszym wyciąganiu tłoka woda podnosi się wraz z nim, a doszedłszy do wylotu (R), wylewa się pod wpływem własnego ciężaru.

3. Pompa tłocząca (ssąco-tłocząca, rys. 183) służy do wyciągania wody oraz do otrzymania wytrysku w jakimbądź kierunku; w ostatnim wypadku zowie się *sikawką*. Od poprzedniej różni się w tym, że tłok ma pełny, bez klapki, a rura odpływowa bierze początek u dołu walca i zawiera klapkę (y), otwieraną na zewnątrz.

Za wyciągnięciem tłoka, przewaga ciśnienia atmosferycznego, podobnie jak w pompie ssącej, pędzi wodę do walca. Za spuszczeniem tłoka zamyka się klapka dolna (x), od ciężaru wody i przewagi ciśnienia z góry, a otwiera się boczna klapka (y) i woda wypływa przez rurę boczną (R).

Łatwo zauważyć, że tak pompa tłocząca, jak ssąca, daje wypływ niejednostajny, przerywany; dla otrzymania równego strumienia potrzeba połączenia pompy tłoczącej z banią Herona (rys. 184).

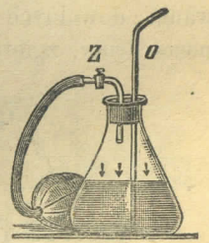


Rys. 183. Pompa tłocząca.

4. Bania Herona (150 r. przed Chr.) daje wytrysk cieczy pod działaniem ścieśnionego powietrza. Składa się z naczynia jakiejkolwiek postaci (rys. 184), szczelnie zamkniętego; przez korek przechodzi rura odpływowa (O), sięgająca prawie do dna, krótsza zaś rura (Z) łączy naczynie z pompą zgęszczającą. W miarę zgęszczania powietrza lub innego gazu w bani, płyn wytryska rurą (O) na odpowiednią wysokość.

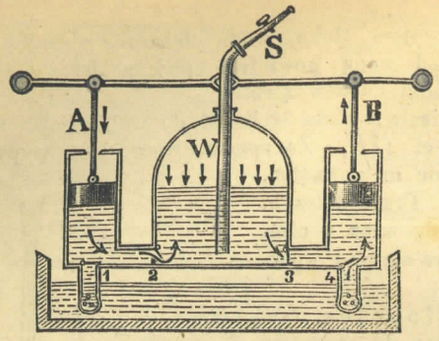
Przykład. Niech piłka gumowa sprawia przewyżkę ciśnienia = 50 mm rtęci ponad ciśnienie atmosfery, czyli $50 \times 13{,}6 = 680$ mm wody; woda z rury wytryśnie na 68 cm.

Zastosowania. Tryskawka używana w pracowniach chemicznych. — Fontanny pokojowe. — Syfon do wód gazowych.



Rys. 184. Bania Herona.

Połączenie dwu pomp tłoczących z banią Herona stanowi *sikawkę strażacką* (rys. 185). Skoro przewyżka ciśnienia w bani wynosi p atmosfer, woda bije strumieniem na 10 p metrów wysokim (teoretycznie). Objaśnić działanie według rysunku; dlaczego strumień wody jest nieprzerwany?



Rys. 185. Sikawka strażacka.



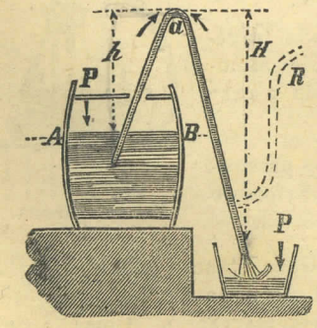
Rys. 186. Lewar prosty.

5. Lewar prosty (rys. 186) stanowi przyrząd do czerpania i odmierzania małych ilości płynu. Składa się z rurki w środku wydętej, a u dołu zwężonej tak, aby bańki powietrza i krople płynu nie mogły się wymijać przy wylocie.

Wessawszy powietrze ustami, przy zanurzeniu lewara w płynie, napełnia się go tym płynem. Następnie, zamyka się szybko palcem górny otwór, poczym można lewar wyjąć z płynu. Ciśnienie rozrzedzonego powietrza (x) + ciśnienie słupa wody (y) = ciśnieniu atmosfery. Po odjęciu palca ciecz wypływa pod działaniem własnego ciężaru.

Lewar prosty używa się do brania próbek cieczy, np. w winiarniach, laboratorjach. Mały lewarek szklany z podziałką na cm³ zowie się *pipetką* i używa się powszechnie w praktyce chemicznej do ścisłego odmierzania objętości płynów.

6. Lewar zgięty czyli dwuramienny (rys. 187) służy do przelewania dowolnych ilości płynów z naczynia wyższego do niższego. Ma postać rury, zgiętej kolankowato; krótsze ramię wstawia się do zbiornika z płynem. Za napełnieniem rury płynem, ten ostatni leje się ustawicznie, dopóki poziom w obu naczyniach się nie zrówna; przyczynę wylewania płynu stanowi przewyżka ciśnienia wskutek różnicy poziomów płynu w obu naczyniach.



Rys. 187. Lewar dwuramienny.

Objaśnienie. W najwyższym przekroju a rurki panuje: z lewej strony, ciśnienie atmosfery P, zmniejszone o ciśnienie słupka cieczy h; ze strony prawej, ciśnienie atmosfery P, zmniejszone o ciśnienie słupka H. Różnica obu tych sił wynosi:

$$(P - h) - (P - H) = H - h.$$

Zatym z lewej strony przeważa ciśnienie $H - h$, pędzące ustawicznie płyn do naczynia niższego; jak widać z rysunku, należy ono od wzniesienia płynu jednego nad drugim. Szybkość wypływu zmniejsza się w miarę jak ubywa płynu w AB, różnica bowiem $H - h$ maleje.

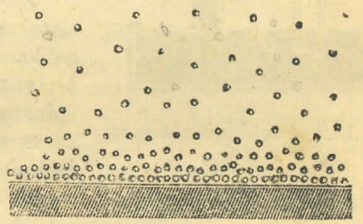
Użycie. Zanurzywszy rurkę krótszym końcem do płynu, wciąga się raptownie ustami powietrze z końca dłuższego, otwartego; jak tylko ciecz przejdzie poniżej poziomu AB, należy usta odjąć. Do płynów szkodliwych stosuje się lewar z rurką bezpieczeństwa R, przez którą wciąga się płyn.

Lewar można sporządzić najdogodniej z rurki kauczukowej, przewieszonej przez brzeg naczynia. — Lewarem jest kolanko pod zlewem kuchennym i klozetowym; zebrana w nim woda zamyka rurę, tłumiąc woń przykrą. — Zapomocą lewaru zlewa się wodę z akwarjów; naftę, spirytus i t. p. z beczek i gąsiorów; roztwory ustałe, przezroczyste, z osadów lub mętów na dnie naczyń w pracowniach chemicznych, aptekach i t. p.

§ 38. Siły cząsteczkowe gazów. *)

1. Przyleganie. Gazy posiadają spójność praktycznie znikomą, t. j. nie ujawniają wzajemnego przyciągania między cząstkami. Natomiast okazują przyleganie do ciał stałych i płynnych, połączone z zagęszczeniem gazu.

Skoro zagęszczenie gazu ma miejsce na powierzchni ciał stałych, zowie się *adsorbcją* i stanowi objaw pospolity. Np. na szkle trzyma się zawsze warstewka zgęszczonego powietrza i pary wodnej (niewidzialna, t. j. nie sprawiająca potnienia szkła); warstwa taka z trudnością ulatnia się nawet w próżni.



Rys. 188. Przyleganie gazu.

Wyjaśnia to obrazowo rys. 188, w powiększeniu milionowym.

Niewidzialna warstewka przylegającego powietrza sprawia, iż chuchnięcie wywołuje na szkle wizerunki. Gdy nakreślę rysunek niewidzialny patyczkiem na szybie, albo przyłożę do niej pieniądz i zaraz go odejmę, a następnie chuchnę na szybę, ukazuje się na szybie rysunek lub odbicie monety; dotknięcie bowiem ściera warstewkę powietrza ze szkła, a wtedy para z oddechu skrapla się w postaci rosy inaczej na szkle czystym, aniżeli na szkle nietkniętym, gdzie już istnieje warstewka pary i powietrza.

*) Wszystkie opisane tu zjawiska dotyczą gazów, nie działających chemicznie na siebie ani na inne ciała, z jakimi się stykają.

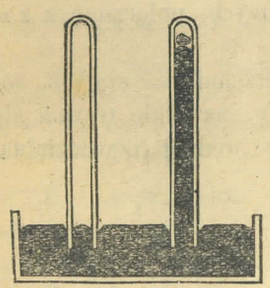
2. Pochłanianie gazów odbywa się zarówno przez ciała stałe, jak przez ciecze. Gaz wnika w masę ciał stałych, jak gdyby rozpuszczając się w nich, przyczym zagęszcza się się tak silnie, że objętość ciał stałych zaledwie cokolwiek się zmienia; prężność zaś gazu zmniejsza się niezmiernie, tak, iż niekiedy wytwarza się niemal próżnia. Takie wchłanianie gazu w ciała stałe zowią się *okluzją*.

Szczególnie silną okluzją odznaczają się metale oraz węgiel, jedne w stanie zimnym, inne po rozżarzeniu. Wskutek pochłaniania ciała zawsze rozgrzewają się, tak, iż przy gwałtownym pochłanianiu gazu ciało rozpala się do czerwoności, np. platyna w zetknięciu ze strumieniem wodoru lub pary spirytusowej. Przez długotrwałe żarzenie ciała można usunąć gaz pochłonięty.

Platyna pochłania w stanie zimnym do 900 objętości wodoru, pallad około 400, przyczym rozszerza się tylko o $\frac{1}{10}$ swej objętości. Tlen pochłaniają metale silnie rozgrzane; np. srebro ogrzane prawie do rozżarzenia wchłania około 5 objętości tlenu, złoto 40, platyna 70 objętości. Żelazo pochłania głównie tlenek węgla (czad).

Materje dziurkowate, zwłaszcza organiczne, pochłaniają duże ilości gazów. Węgiel drzewny wchłania 90 objętości amoniaku, 35 dwutlenku węgla; jeszcze większą zdolność chłonącą posiada węgiel w proszku i torf.

Doświadczenie (rys. 189). Do wanienki, napełnionej rtęcią, zanurza się rurkę napełnioną amoniakiem gazowym, tak aby rtęć doszła w rurce do tegoż poziomu, co w naczyniu. Następnie, wpuszcza się do rurki kawałek węgla drzewnego, który przedtym wyżarzono, aby go pozbawić gazów pochłoniętych. Rtęć szybko wznosi się w rurce, świadcząc o obfitym pochłonięciu amoniaku, a zarazem o znacznym spadku jego prężności.



Rys. 189. Pochłanianie gazu.

Zastosowania. Zapalniczki spirytusowe: siateczka z cienkiego drutu platynowego albo gąbka platynowa (dziurkowata, subtelna masa platyny) mieści się nad knotkiem, napojonym spirytusem; za odsłonięciem knotka platyna rozżarza się wskutek okluzji, zapalając spirytus.— Dawniejsze zapalniczki wodorowe (krzesiwo Döbereinera), gdzie gąbka platynowa zapala strumień wodoru, wywiązujący się z flaszki. — Samozapalacze do gazu świetlnego, oparte na tej samej własności. — Samozapalanie się miału węglowego, nagromadzonego w kopalniach, stąd pożary. — Sączenie się czadu (tlenku węgla) z pieca przez rozpalone rury i blachy żelazne. — Odwanianie domowych ubikacji zapomocą proszku torfowego.

3. Rozpuszczanie gazów, zwane *absorbcją*, polega na pochłanianiu ich przez ciecze, przyczym gazy zachowują prężność dość znaczną; objętość zaś cieczy powiększa się bardzo niewiele. Rozpuszczaniu towarzyszy rozgrzanie się cieczy, tym silniejsze, im prędzej i obficiej gaz się rozpuszcza.

Ilość gazu rozpuszczonego zależy od właściwości danego płynu, od temperatury i ciśnienia; im zimniejszy jest roztwór, oraz im większemu podlega ciśnieniu, tym więcej gazu pochłania.

Roztwór, zawierający najwyższą ilość gazu w danych warunkach, zowie się *nasyconym*; za ogrzaniem roztworu, jako też za osłabieniem ciśnienia gaz ulatuje stopniowo w postaci baniek, z szumem, jeżeli zjawisko odbywa się prędko, np. w wodzie sodowej, winie szampańskim. Aby zupełnie wypędzić gaz z roztworu, trzeba roztwór silnie gotować albo zastosować opróżnianie przez czas dłuższy zapomocą maszyny pneumatycznej. Największą rozpuszczalnością w wodzie odznacza się amoniak i chlorowodór, słabiej rozpuszcza się dwutlenek węgla, najmniej zaś powietrze (pt. poniżej).

Objętość gazu, rozpuszczonego w jednostce objętości płynu, np. w 1 litrze, nazywa się *spółczynnikiem rozpuszczalności*. Ilość wagowa gazu rozpuszczonego wzrasta proporcjonalnie do ciśnienia; ponieważ jednak objętość gazu kurczy się tyleż razy, przeto spółczynnik rozpuszczalności ma wartość stałą, t. j. niezależną od ciśnienia, a zmniejsza się tylko za ogrzaniem.

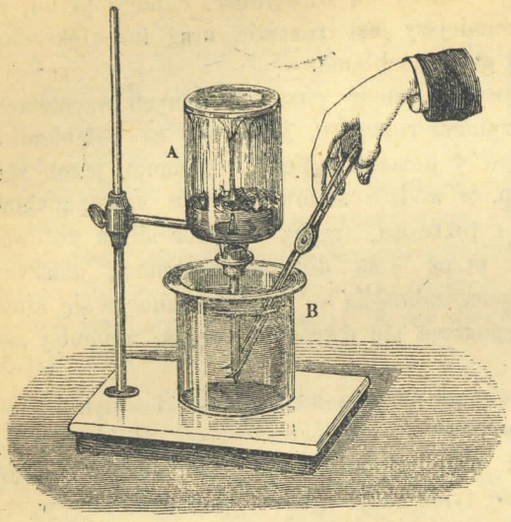
Objętość gazu rozpuszczonego nie zależy od ciśnienia (prawo Henry'ego).

Z mieszaniny gazów każdy składnik rozpuszcza się proporcjonalnie do swego ciśnienia, częściowego, t. j. ciśnienia, jakieby posiadał, gdyby sam wypełniał daną przestrzeń.

Spółczynnik rozpuszczalności w wodzie, przy 0°, wynosi: dla azotu 0,024, tlenu 0,049, dwutlenku węgla 1,8, chlorowodoru 500, amoniaku 1300.

Przykład na rozpuszczalność mieszaniny gazów. Powietrze zawiera w 1 litrze prawie $\frac{4}{5}$ litra azotu i $\frac{1}{5}$ tlenu; zatym ciśnienie azotu, rozprężonego na cały litr, wyniosłoby $\frac{4}{5}$ atmosfery, tlenu $\frac{1}{5}$ atmosfery. Woda pochłania z tej mieszaniny $\frac{4}{5}$. 0,024 ltr azotu + $\frac{1}{5}$. 0,049 ltr tlenu = = 0,0192 ltr azotu + 0,0098 ltr tlenu = 0,029 ltr powietrza; spółczynnik więc rozpuszczalności powietrza wynosi 0,029, czyli litr wody zawiera 29 cm^3 powietrza. Widać stąd zarazem, że pozpuszczone powietrze jest prawie 2 razy obfitsze w tlen, niż powietrze atmosferyczne: w roztworze wodnym stosunek tlenu do azotu wynosi przeszło 1 : 2, w atmosferze 1 : 4.

Doświadczenie (rys. 190). Niezmierną rozpuszczalność amoniaku w wodzie można okazać, odwróciwszy flaszkę, napełnioną tym gazem, nad wanienką, pełną wody. Przy zetknięciu wody z gazem, woda wchłania go tak gwałtownie, że flaszka prawie się opróżnia, a woda wpada do niej strumieniem. Dla efektu flaszkę zatyka się korkiem z wąską rurką, którą się raptownie otwiera pod wodą, np. krusząc koniec rurki szczypcami, jak wskazuje rysunek.



Rys. 190. Pochłanianie gazu.

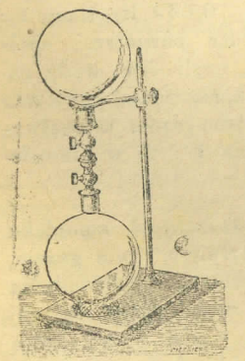
Zastosowania. Oddychanie istot wodnych powietrzem rozpuszczonym.—Wody gazowe, limoniady i inne napoje musujące, nasycone dwutlenkiem węgla; wino, piwo, kwas, kefir; kąpiele gazowe.— Handlowy amoniak czyli roztwór tegoż gazu w wodzie, kwas solny czyli roztwór chlorowodoru, formalina czyli roztwór aldehydu mrówkowego i t. p. — Pochłanianie gazów i pary przez roztopioną masę wulkaniczną (magmę) i gwałtowne ich wywiązywanie z lawy przy wybuchach.

4. Dyfuzja. Z powodu wielkiej ruchliwości, gazy mieszają się z sobą bardzo prędko, i to w ilościach nieograniczonych. Mieszanie się gazów w zetknięciu bezpośrednim nazywamy *dyfuzją* albo *przenikaniem*.

Przestrzeń, zajętą przez pewien gaz (lub parę), zapełnia inny gaz tak, jak gdyby była próżną (prawo Daltona).

Wynika stąd, że prężność mieszaniny gazów równa się sumie częściowych prężności każdego gazu, t. j. prężności, jakąby gaz posiadał, gdyby sam zajmował całą przestrzeń mieszaniny.

W powietrzu np. pod dowolnym ciśnieniem p, azot stanowi prawie $\frac{4}{5}$ objętości, tlen $\frac{1}{5}$, zatym azot ma prężność $p_1 = \frac{4}{5}\,p$, tlen $p_2 = \frac{1}{5}\,p$, razem $p_1 + p_2 = p$.



Rys. 191. Dyfuzja.

Doświadczenie Bertholleta (rys. 191). Banię szklaną z kranem napełnia się wodorem, drugą taką samą banię napełnia się dwutlenkiem węgla, poczym ustawia się pierwszą nad drugą, jak na rysunku, łącząc wyloty szczelnie z sobą, i otwiera się krany. Po upływie kilku godzin przenikną się gazy wzajemnie; pomimo, iż dwutlenek węgla, znacznie cięższy od wodoru, mieścił się w dolnej bani, gazy utworzą jednolitą mieszaninę. Można to sprawdzić chemicznie, np. pochłaniając dwutlenek węgla ługiem sodowym.

Podobne doświadczenie wykonać można dogodniej z parą kolorową, np. bromu. Napełniając dolną banię czerwono-brunatną parą bromową, np. przez wpuszczenie kilkunastu kropel bromu, a górną banię powietrzem, dostrzeżemy niebawem rozpościeranie się barwy czerwonej ku górze, aż nastąpi jednakowe zabarwienie w obu baniach.

5. Osmoza. Gazy mieszają się prędko również i wtedy, gdy są oddzielone od siebie błoną lub ścianą dziurkowatą. Takie mieszanie się gazów rozdzielonych nazywamy *osmozą* albo *przesiąkaniem*. Pomiędzy osmozą gazów a dyfuzją niema zasadniczej różnicy; nie istnieją bowiem błony półprzepuszczalne, któreby jeden tylko gaz przepuszczały.

Gaz lżejszy przesiąka prędzej przez ściany dziurkowate; np. wodór uchodzi z flaszki przez korek prędzej, niż wsącza się do niej powietrze. Wyjątek stanowi przesiąkanie przez błony koloidalne, które same gaz pochłaniają, bo wtedy szybkość osmozy zależy od okluzji; np. przez błonę gumową przechodzi dwutlenek węgla prędzej, niż lżejsze od niego powietrze, gdyż kauczuk wchłania ten gaz obficie.

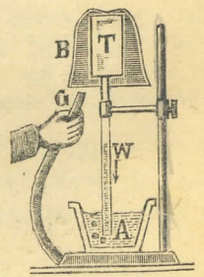
Szybkość przesiąkania gazów jest w stosunku odwrotnym do pierwiastka kwadratowego z gęstości gazów (prawo Grahama). Prawo powyższe jest wynikiem prędkości wypływu gazów (pt. „Ruchy gazów"). Np. wodór miesza się z powietrzem przez ścianę dziurkowatą przeszło dwa razy prędzej, niż gaz świetlny.

Wodór jest 14,4 razy lżejszy od powietrza, gaz świetlny 2,5; stąd szybkość osmozy wodoru jest

$$\sqrt{14{,}4} : \sqrt{2{,}5} = 3{,}8 : 1{,}6 = 2{,}4$$

t. j. 2,4 razy większa, niż gazu świetlnego.

Doświadczenie (rys. 192). Skoro rurę pionową W zakończono w górze kubkiem piankowym T, i po nakryciu go kloszem B wpuszczono do tego ostatniego gaz świetlny przez rurkę G, to z wody naczynia A wydobywają się bańki gazowe; gaz sączy się obficiej do T, niż przesiąka zeń powietrze na zewnątrz. Po zdjęciu klosza woda podnosi się w rurze W; gaz uchodzi z T prędzej, niż powietrze przesiąka do wnętrza.



Rys. 192. Osmoza.

Zastosowania. Balony nie mogą się unosić długo w powietrzu, tracą bowiem gaz wskutek przepuszczalności tkaniny; balon, napełniony gazem świetlnym unosi się dłużej, niż napełniony wodorem. — Baloniki gumowe psują się rychło przez nasiąkanie zarazem dwutlenkiem węgla. — Wentylacja naturalna mieszkań przez ściany, nieoklejone obiciem, ani malowane olejno; zwykły mur przepuszcza u nas w porze zimniejszej na objętość powietrza mniejwięcej tyle w ciągu godziny, ile wynosi jego objętość. — Przyrządy ostrzegawcze o nagromadzeniu gazów wybuchowych w kopalniach, bądź gazów duszących, jak dwutlenku węgla. — Na dyfuzji polega jednostajny skład powietrza wszędzie na kuli ziemskiej.

Zadania.

1. Ile gazu zawiera syfon litrowy wody sodowej, nasycony pod ciśnieniem 5 atmosfer? Odp. 9 litrów, odmierzone pod zwykłym ciśnieniem atmosfery, przy 0^0; na wagę 18 gramów.

2. Wodę zimną, nasyconą powietrzem przy 0^0, zawartą w kociołku 4 litrowym, przegotowano mocno i długo. Ile z wody ujdzie powietrza? ile w nim jest azotu i tlenu? Odp. 116 cm^3; w tym 39 cm^3 tlenu, 77 cm^3 azotu.

3. Woda składa się z wodoru i tlenu w stosunku 1 : 8 na wagę. Gdyby rozłożono wodę całkowicie i zatrzymano gazy w objętości wody, jakie powstałoby ciśnienie? (Nie uwzględniamy tu uchybienia od prawa Boyle-Mariotta przy wysokim ciśnieniu). Odp. 1851 atm, w tym wodór 1234, tlen 617 atm.

4. Flaszkę napełniono w połowie wodą przegotowaną i ostudzoną do 0^0, poczym wpuszczono dwutlenek węgla, który zajął pozostałą połowę flaszki, pod ciśnieniem atmosferycznym, i flaszkę zakorkowano szczelnie. Ile gazu pochłonęła woda? jaką ma prężność gaz pozostały?

Rozw. Objętość gazu v = objętości wody. Jeżeli x oznacza objętość gazu pochłoniętego, to pozostało gazu $v - x$; prężność gazu wyrazi się stosunkiem $\frac{v-x}{v}$. Spółczynnik rozpuszczalności gazu = 1,8; ilość gazu rozpuszczonego = spółczynnik × objętość wody × prężność, czyli

$$x = 1{,}8 \cdot v \cdot \frac{v-x}{v},$$

skąd $x = 0{,}63\ v$, t. j. gazu rozpuści się 0,63 danej objętości, prężność zaś wyniesie 0,37 atm.

ROZDZIAŁ V.

NAUKA O CIEPLE.

(KALORYKA)

A) STAN CIEPLNY.

§ 39. Ciepło a temperatura.

1. Pojęcie ciepła. Pod nazwą *ciepła* rozumiemy ten rodzaj energji, który nam daje wrażenie ciepła lub zimna, a we wszelkich ciałach sprawia zmiany objętości lub zmiany w stanie skupienia.

Przyczyną wspólną tak jednego, jak drugiego jest jeden tylko rodzaj energji, zwany ciepłem; „zimno" jako energja nie istnieje: najzimniejsze ciała zawierają jeszcze pewną ilość ciepła.

Wrażenie ciepła lub gorąca otrzymujemy, skoro przy dotknięciu ciepło przechodzi z danej materji do naszego ciała; wrażenie chłodu lub zimna, jeżeli ciepło ręki uchodzi z ciała naszego do materji dotkniętej.

Np. ręka, zanurzona do wody gorącej, a następnie do letniej, odczuwa zimno; przy zanurzeniu najpierw do wody zimnej, woda letnia wydaje się gorącą. Od wysokiego gorąca lub zimna doznajemy uczucia bólu. Tak więc, pojęcie ciepła i zimna jest względne i nie da się dokładnie ocenić dotykiem.

Ciepło wpływa na objętość ciał, powiększając ją lub zmniejszając, zależnie od tego, czy ciepła przybywa lub ubywa. Wreszcie ciepło może zmieniać stan skupienia ciał: stałe przemienić na płynne, te zaś na gazowe, lub przeciwnie. O tych zmianach pt. „Rozszerzalność", „Topienie" i „Parowanie".

2. Istota ciepła. Ciepło stanowi jedną z postaci energji, która zamienia się w wielu objawach na pracę mechaniczną i nawzajem, sama powstaje na koszt pracy mechanicznej; przykłady stanowią maszyny parowe, ciepło wskutek tarcia i t. p.

Spółczesna *mechaniczna teorja ciepła* każe przypuszczać, że cząstki wszelkiej materji są w ciągłym ruchu drgającym, niesłychanie szybkim; wahają się one w różne strony, około położenia równowagi. Skoro ciało się ogrzewa, energja ruchu cząstek się wzmaga; za oziębieniem zaś maleje. Parowanie płynu, t. j. przejście w stan lotny, polega na tym, że cząstki nabierają ruchu postępowego po linjach prostych, a drogi swobodne cząstek znacznie się powiększają (por. „Kinetyczną teorję gazów").

Przy zamianie pracy na ciepło, np. w czasie tarcia lub uderzenia, ruch całej masy zmienia się na ruch cząstek.

Ruch cząsteczkowy ciała pobudza do drgania cząstki eteru, skąd powstaje tak zwana *energja promienista* (pt.); nawzajem energja, zawarta w promieniach, padając na ciała, wprawia cząstki meterji w ruch drgający.

3. Temperaturą zowie się stopień ogrzania ciała; inaczej, pewien stan ciała, wywołany ciepłem, wskutek czego ciało zawiera pewien zasób energji.

Należy odróżniać pojęcie ciepła od temperatury. Ilość ciepła w ciele zależy oczywiście od temperatury i rośnie wraz z nią, podobnie, jak ilość (masa) gazu w naczyniu zależy od ciśnienia. Na zawartość ciepła wpływają wszakże jeszcze inne czynniki: masa ciała, rodzaj materji, podobnie jak na ilość gazu w naczyniu wpływa, obok ciśnienia, wielkość naczynia i rodzaj gazu.

Wynika stąd, że ciała mogą mieć temperaturę jednakową, a zawierać nierówną ilość ciepła; nawet ciało o temperaturze wyższej może być uboższe w ilość ciepła, t. j. energję cieplną.

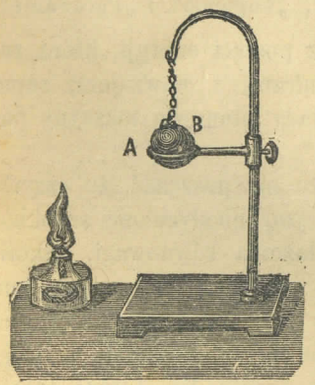
Np. woda, nalana z samowaru do szklanki, ma tę samą temperaturę, co woda w samowarze, zawiera jednak mniej ciepła. — Płomień świecy jest gorętszy od pieca rozgrzanego, a jednak piec zawiera więcej ciepła.

4. Zmiana objętości ciał wskutek ciepła jest najdogodniejszym środkiem do wyznaczenia temperatury. Skoro temperatura wzrasta, objętość ciał się powiększa; gdy temperatura spada, objętość się zmniejsza.

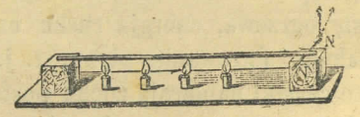
Wszelkie ciała rozszerzają się za ogrzaniem, a kurczą za oziębieniem (ogólne prawo rozszerzalności).

Doświadczenia. 1) Rozszerzalność ciała stałego stwierdza przyrząd Renaldiniego (1660, rys. 193). Kula mosiężna przechodzi ściśle przez obrączkę; za ogrzaniem kuli lub za oziębieniem obrączki, kula nie da się przez nią przesunąć.

Skoro chodzi o rozszerzalność tylko w jednym kierunku, np. wydłużenie pręta metalowego, czy też szklanego, węglowego i t. p. prosty przyrząd da się urządzić według rys. 194. Pręt opiera się lewym końcem nieruchomo, prawym leży na drucie *NN*, zagiętym haczykowato ku górze, tak iż odgrywa rolę skazówki; za ogrzaniem pręta, skazówka posuwa się tu na prawo, tym bardziej, im silniej ogrzewamy; przy stygnięciu skazówka się cofa, t. j. porusza się tutaj na lewo.



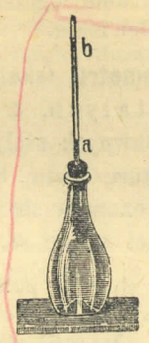
Rys. 193.



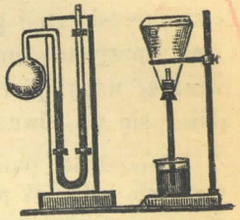
Rys. 194.

Rozszerzalność ciała stałego.

2) Rozszerzalność płynów można okazać przez ogrzewanie ich w pełnej flaszce z wąską szyjką lub rurką (rys. 195). Każdy płyn, jak nafta, spirytus, olej i in., ogrzewany w ten sposób, podnosi się w rurce, co zarazem świadczy, że płyn rozszerza się bardziej, niż szkło flaszki. Gdyby taką flaszkę z zimnym płynem ogrzać raptownie, np. wstawiając do gorącej wody, płyn w rurce na razie opadnie, następnie dopiero zacznie się wznosić (dlaczego?).



Rys. 195.
Rozsz. płynu.



Rys. 196.
Rozszerzalność gazu.

3) Do okazania rozszerzalności gazów służy podobna flaszka (rys. 196), zanurzona otworem do wody. Za ogrzaniem, choćby od dotknięcia ręką, wydobywają się z flaszki pęcherzyki powietrza; następnie, gdy flaszka stygnie, woda wchodzi do niej. Dogodniejsza do tego celu jest bańka szklana z rurką, w kształcie *U*, napełniona wodą lub rtęcią, do tegoż poziomu w obu ramionach rurki (rys. 196); za ogrzaniem powietrza lub innego gazu w bańce, poziom w rurkach zmienia się odpowiednio.

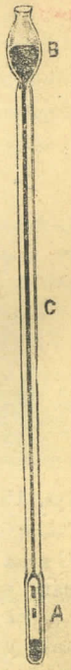
§ 40. Termometry.

1. Termometry (niewłaściwie „ciepłomierze") są narzędziami do oznaczania temperatury. Wskazania ich polegają na rozszerzalności jakiegoś metalu, albo też płynu lub gazu; stosownie do tego, termometry można podzielić na metalowe, płynowe oraz gazowe; najdogodniejsze są termometry napełnione płynem.

2. Termometr rtęciowy, najpospolitszy, polega na rozszerzaniu się rtęci, która mieści się w małej bańce, w miarę zaś ogrzewania posuwa się w rurce włoskowatej, spojonej z bańką.

Urządzenie. Rurkę termometryczną trzeba przedewszystkim wypróbować, czy ma otwór wszędzie jednakowej miary. W tym celu wpuszcza się kroplę rtęci, która w rurce utworzy słupek; długość tego słupka powinna być wszędzie jednakowa, skoro go w rurce przesuwamy. Czynność ta nazywa się kalibrowaniem.

Rurka posiada na jednym końcu bańkę postaci kulistej lub walcowej, na drugim zaś mały lejek (rys. 197). Po napełnieniu lejka rtęcią ogrzewa się bańkę, aby usunąć część powietrza; za oziębieniem wchodzi rtęć do rurki i częściowo do bańki. Wtedy ogrzewa się mocniej, aż do zagotowania



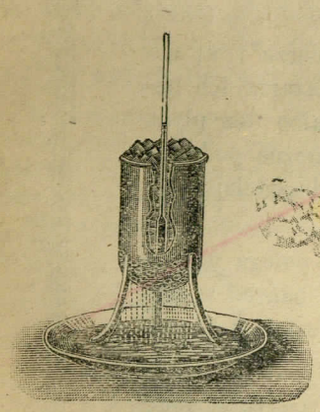
Rys. 197.
Napełnienie termometru.

rtęci; para rtęci wypiera całkiem powietrze, tak, iż po oziębieniu rtęć wypełnia cały termometr. Wreszcie odcina się lejek, a nadmiar rtęci usuwa się przez odpowiednie ogrzanie, rurkę zaś zamyka się ostatecznie, zatapiając jej koniec w płomieniu.

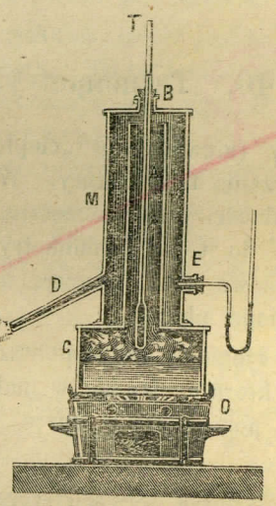
3. Podziałka termometru (skala) wymaga przedewszystkim przyjęcia dwu punktów stałych, t. j. oznaczenia dwu miejsc, gdzie zatrzymuje się rtęć przy pewnych stałych temperaturach. Za niższy punkt stały przyjęto temperaturę lodu topniejącego, za wyższy temperaturę wrzącej wody; pierwszy oznacza się liczbą 0, drugi liczbą 100 i odstęp dzieli się na równe części zwane *stopniami* (znak °).

Oznaczanie punktów stałych polega na zasadzie, że zarówno podczas topnienia lodu, jak podczas wrzenia wody temperatura się nie zmienia (przyczyny tego wyjaśniają §§ 45 i 46).

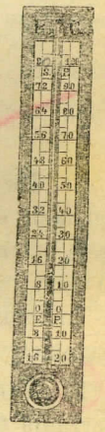
Oznaczenie punktu 0° (Hooke). Zanurza się termometr do lodu lub śniegu, w temperaturze pokojowej, przyczym lód mieści się w kubku blaszanym o dnie przedziurawionym, aby woda z lodu powstająca mogła odpływać (rys. 198). Po niejakim czasie rtęć opadnie do pewnego poziomu w rurce i zatrzyma się tutaj stale, aż do stopnienia lodu.



Rys. 198. Oznaczenie 0°.



Rys. 199. Oznaczenie 100°.



Rys. 200. Termometr z podziałką Celsjusza i Réaumure'a.

Oznaczanie punktu 100° (Huyghens). Zanurza się termometr do pary wody wrzącej; rtęć podnosi się do pewnej wysokości i pozostaje na niej przez cały ciąg wrzenia wody. Ponieważ ciśnienie atmosfery wpływa na pukt wrzenia, należy baczyć, aby ciśnienie było normalne, t. j. 760 mm rtęci; w przeciwnym razie wprowadzić odnośną poprawkę (por. tabelkę w § 46, art. 5). Przyrząd do ścisłego wykonania całej czynności składa się z puszki blaszanej o podwójnych ścianach *A* i *M* (rys. 199), ażeby

powietrze zewnętrzne nie ochładzało pary. Puszka wewnętrzna mieści termometr badany *T*, nad wodą, zawartą w kociołku *C*; z boku zaś puszki zewnętrznej wystaje rurka *D* jako wylot dla pary, oraz manometr *E*; kociołek ustawia się na ognisku *O*. Umieszczenie termometru w parze, zamiast w wodzie, ma na celu uniknięcie niedokładności, jakaby mogła powstać wskutek zanieczyszczeń wody i wpływu naczynia na temperaturę wrzenia wody (por. § 46).

W podobny sposób odbywa się sprawdzanie termometrów już podzielonych na stopnie; sprawdzanie to jest potrzebne ze względu, że szkło termometru zmienia się cokolwiek z biegiem czasu, zwłaszcza przy silniejszych zmianach temperatury.

Podziałka termometryczna nie ogranicza się oczywiście na stopniach między 0° i 100°, ale może się ciągnąć dalej w obie strony. Stopnie poniżej 0° zowiemy zwykle *stopniami zimna* i oznaczamy znakiem ujemnym przed cyfrą (np. — 8°); stopnie powyżej 0° nazywamy *stopniami ciepła*. Należy wszakże pamiętać, że są to tylko wyrażenia potoczne, zamiast określeń: stopnie ponad 0° i poniżej 0°.

Podziałka na 100°, wprowadzona przez Celsjusza (1742) rozpowszechniła się wszędzie, gdzie wprowadzono miary metryczne. W nauce zawsze wyraża się temperatury w stopniach Celsjusza, oznaczając je literą *C*, np. 37° *C*, albo podając bez litery.

W Polsce do użytku domowego służą termometry o podziałce *Réaumura* (1730). Punkt topnienia lodu oznaczono tu również 0, punkt zaś wrzenia wody liczbą 80, tak iż 80 stopni *R* zajmuje na podziałce tę samą długość, co 100 stopni *C*, zatym $4^0\ R = 5^0\ C$, albo $1^0\ R = \frac{5}{4}^0\ C$ (por. rys. 200).

W Anglji i Ameryce Północnej utrzymuje się dotąd podziałka *Fahrenheita*; zerem oznaczono w niej punkt, dokąd opada rtęć w mieszaninie lodu z solą kuchenną, a który leży o 32 stopnie *F* poniżej punktu topnienia czystego lodu; punkt wrzenia wody oznaczono liczbą 212. Stąd $212^0 - 32^0 = 180^0\ F$ zajmuje tę samą długość, co $100^0\ C$, czyli $9^0\ F = 5^0\ C$, albo $1^0 F = \frac{5}{9}^0\ C$.

4. Granice wskazówek termometru rtęciowego. Rtęć marznie w temperaturze — 40° *C*, a wrze około 360° *C*; termometr więc rtęciowy daje się używać tylko w granicach tych temperatur. Wyjątkowe termometry ze szkła trudnotopliwego, wypełnione azotem ponad rtęcią i wytrzymałe na ciśnienie, wskazują temperatury do 600° *C*.

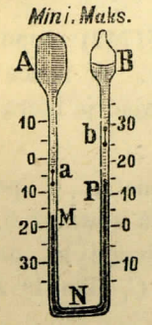
Sposób oznaczania wyższych temperatur polega na rozszerzalności gazów, w t. zw. termometrze gazowym (pt.).

Do niższych temperatur od — 40° służy często *termometr spirytusowy*, t. j. napełniony spirytusem, zabarwionym dla lepszej wyrazistości. Termometr taki nadaje się i do wskazywania zwykłej temperatury powietrza; że jednak spirytus rozszerza się niejednostajnie w wyższych temperaturach ponad 0°, należy jego podziałkę urządzić przez porównanie z termometrem rtęciowym.

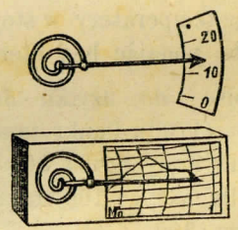
5. Termometr maksymalny i minimalny wskazuje temperaturę najwyższą i najniższą, jaka panowała w pewnym przeciągu czasu, np. w ciągu doby.

Najzwyklejszą postać tego przyrządu stanowi *termometr Sixa* (rys. 201). Jest to termometr spirytusowy A, gdzie spirytus posuwa słupek rtęci MNP; słupek ten pod ciśnieniem pary spirytusowej, zawartej w bańce, trzyma się w ciągłym zetknięciu ze spirytusem w A. Za ogrzaniem spirytus się rozszerza i za pośrednictwem rtęci popycha pręcik żelazny b; za oziębieniem spirytus się kurczy, rtęć się cofa i popycha pręcik a, tak, iż b wskazuje temperatutę najwyższą, a najniższą. Po obserwacji sprowadza się oba pręciki do zetknięcia ze rtęcią zapomocą wstrząsania termometru lub zapomocą magnesu.

Termometry maksymalne i minimalne używają się na stacjach meteorologicznych, jako też do badania temperatur w głębi wody i ziemi. Do maksymalnych należy termometr lekarski, rtęciowy, oparty na rozdzieleniu słupka rtęciowego pęcherzykiem powietrza.



Rys. 201. Termometr maksymalny i minimalny.



Rys. 202. Termograf.

6. Termograf czyli termometr piszący należy do rzędu termometrów metalowych, opartych na rozszerzalności metalów od ciepła. Kreśli on samodzielnie ciągły przebieg temperatury na wstędze papierowej, przesuwanej mechanizmem zegarowym, podobnie, jak w barometrze piszącym (rys. 157).

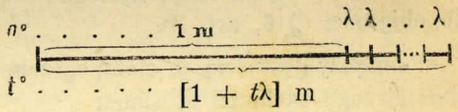
Skoro zlutowano w całej długości dwie wstęgi metalowe, wyrobione z różnych metalów, np. cynku i żelaza, to z powodu większej rozszerzalności cynku niż żelaza wstęga się zgina lub skręca za ogrzaniem. Zgięcie to jest w pewnej zależności od temperatury i może być zaznaczone za pośrednictwem skazówki, opatrzonej piórkiem, na obracającym się walcu (rys. 202). Powstaje stąd ząbkowana linja temperatury, znacząca jej przebieg w ciągu całego dnia lub tygodnia.

Termograf jest zarazem termometrem maksymalnym i minimalnym.

§ 41. Rozszerzalność ciał stałych i płynów.

1. Spółczynnik rozszerzalności jest to przyrost jednostki długości, powierzchni lub objętości ciała za ogrzaniem o 1° C. Pierwszy, t. j. przyrost w jednym kierunku, zowie się *spółczynnikiem linjowym* (znak λ), ostatni, t. j. przyrost objętości, *spółczynnikiem sześciennym* (znak α). *)

Jeżeli pręt długości 1 m ogrzano o 1°, stanie się dłuższy o λ; przy ogrzaniu o 2°, wydłuży się o 2λ i t. d.; przy t^0 o $t\lambda$. Zatym całkowita długość danej jednostki, np. 1 metra, przy t^0 wyniesie $1 + \lambda t$ metrów, co łatwo wywnioskować z rys. 203.



Rys. 203. Rozszerzalność linjowa.

Skoro ciało zamiast 1 m posiada długość l_0 przy 0°, to przy t^0 długość ciała

$$l_t = l_0\ (1 + \lambda t).$$

Wzór powyższy wypływa również z określenia spółczynnika

$$\lambda = \frac{l_t - l_0}{l_0 \,.\, t} = \frac{\text{przyrost długości}}{\text{długość pierw.} \times \text{przyrost temp.}}$$

Podobnież można wyprowadzić wzór na objętość v_t ciała ogrzanego do t^0, skoro wiadoma jest objętość v^0 tego ciała przy 0°, oraz jego spółczynnik sześcienny α:

$$v_t = v_0\ (1 + \alpha t).$$

Wzór powyższy wypływa również z określenia spółczynnika

$$\alpha = \frac{v_t - v_0}{v_0 \,.\, t} = \frac{\text{przyrost objętości}}{\text{objętość pierw.} \times \text{przyrost temp.}}$$

Wyrażenie $(1 + \alpha t)$, względnie $(1 + \lambda t)$ otrzymało nazwę *dwumianu rozszerzalności.*

Między obu spółczynnikami zachodzi prosty stosunek: spółczynnik sześcienny równa się potrójnemu spółczynnikowi linjowemu:

$$\alpha = 3\lambda.$$

*) Spółczynnik rozszerzalności powierzchniowej, t. j. przyrost na jednostce powierzchni ciała, za ogrzaniem o 1°, nie ma prawie zastosowania w fizyce.

Dowód. Jeżeli ciało ma postać sześcianu o krawędzi 1 dm przy 0^0, to przy 1^0 długość krawędzi wyniesie $1 + \lambda$ dm, a objętość ciała $(1+\lambda)^3 = 1 + 3\lambda + 3\lambda^2 + \lambda^3$ dm sześc. Ponieważ λ jest bardzo małym ułamkiem (por. tabelkę), można wyrazy $3\lambda^2$ i λ^3 opuścić prawie bez błędu; przyrost więc objętości α wyniesie 3λ.

2. Wpływ temperatury na gęstość ciał. Skoro objętość ciał powiększa się za ogrzaniem, gęstość ciał, a więc i ciężar właściwy musi się zmniejszać tyleż razy, gęstość bowiem jest w stosunku odwrotnym do objętości (§ 6, art. 3).

Pomiędzy gęstością d_t ciała, ogrzanego o t^0, a gęstością d_0 tegoż ciała zimniejszego zachodzi stosunek

$$\frac{d_0}{d_t} = 1 + \alpha t \qquad \text{albo } d_t = \frac{d_0}{1 + \alpha t}.$$

Dowód. Niech masa ciała $m = v_0 \cdot d_0$, gdzie v_0 oznacza objętość przy 0^0, d_0 gęstość przy 0^0. Za ogrzaniem taż sama masa $m = v_t \cdot d_t$, gdzie v_t i d_t stanowią objętość i gęstość przy dowolnej temperaturze t. Zatym

$$v_0 \cdot d_0 = v_t \cdot d_t \text{ czyli } \frac{d_0}{d_t} = \frac{v_t}{v_0}.$$

Z podstawienia $v_t = v_0 (1 + \alpha t)$ wynika

$$d_t = \frac{d_0}{1 + \alpha t}.$$

3. Wartość spółczynnika rozszerzalności. Ciała stałe rozszerzają się bardzo nieznacznie, tak iż spółczynnik ich stanowi zaledwie stutysiączne części pierwotnej długości. Bardziej rozszerzają się płyny, przeciętnie kilkanaście lub kilkadziesiąt razy więcej niż ciała stałe, jak widać z załączonej tabelki.

Spółczynniki rozszerzalności (średnie):

ciał stałych (lin.) λ		płynów (sześć.) α	
Szkło	0,000 009	Rtęć	0,00 018
Platyna	0,000 009	Woda (nierówno)	0,00 040
Żelazo	0,000 012	Kwas siarczany	0,00 060
Miedź	0,000 017	Terpentyna	0,00 090
Srebro	0,000 019	Spirytus	0,00 100
Cynk	0,000 029	Eter	0,00 150

Spółczynnik nie ma wartości stałej, ale rośnie wraz z temperaturą; szczególnie zmienia się dla płynów. Wzory poprzednie odnoszą się tylko do niewielkich zmian temperatury, przyczym dla spółczynnika przyjmuje się wartość średnia między 0^0 a 100^0, względem zaś ciał łatwotopliwych, bądź ulatniających się za miernem ogrzaniem, spółczynnik oznacza się dla temperatury pokojowej między 15^0 — 16^0.

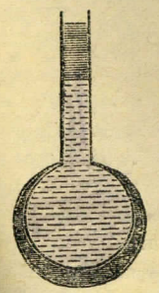
W ciałach krystalicznych różnoosiowych spółczynnik ma inną wartość w każdym kierunku. Podobnież w ciałach o budowie włóknistej, jak drzewo, albo wyciągniętych sztucznie, jak rura kauczukowa; kauczuk nawet kurczy się za ogrzaniem, w kierunku swej długości.

Najbardziej jednostajnie z płynów rozszerza się rtęć, zwłaszcza w granicach powszechnej używalności termometrów, od — 25^0 do 100^0. Wogóle zaś rozszerzalność płynów wzrasta, im bardziej temperatura ich zbliża się do punktu wrzenia; np. woda ma spółczynnik między 99^0 a 100^0 większy prawie 10 razy, niż woda między 9^0 a 10^0. Tłomaczy to, czemu płyny lotniejsze rozszerzają się więcej (por. tabelkę).

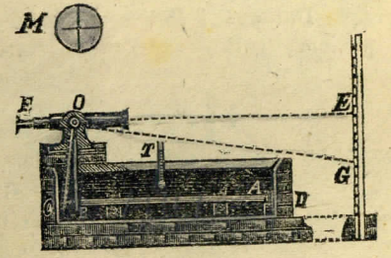
Osobliwość posiadają niektóre stopy metaliczne (aljaże), że się rozszerzają znikomo, tak iż można ich rozszerzalność praktycznie pominąć, np. stop żelaza z niklem, zwany *inwar* (od łac. „invariabilis", niezmienny); stąd użytek na podziałki najściślejsze, nonjusze, kątomiary.

4. Pozorna rozszerzalność płynów. Płyn w naczyniu okazuje rozszerzalność pozorną, ponieważ za ogrzaniem rozszerza się nie tylko płyn, lecz i naczynie; wskutek tego rozszerzalność pozorna jest mniejsza od rzeczywistej, mianowicie o rozszerzalność naczynia (rys. 204).

Np. rtęć w szklanej rurce ma spółczynnik rozszerzalności pozorny = =0,000 15; dla szkła spółczynnik $(3\lambda) = 0{,}000\ 03$, zatym spółczynnik rzeczywisty rtęci = 0,000 18.



Rys. 204.



Rys. 205. Przyrząd Lavoisiera-Laplace'a.

5. Oznaczanie spółczynnika rozszerzalności. a) Dla ciał stałych. Najprostszy sposób, podany przez Lavoisiera i Laplace'a (1778), polega na odczytywaniu wydłużenia pręta przez lunetę na oddalonej podziałce. Luneta zawiera celownik *M*, t. j. dwie nitki poprzeczne, skrzyżowane pod kątem prostym i służące do nastawiania jej ściśle na punkt żądany.

Pręt AB (rys. 205) leży w kąpieli olejowej w ten sposób, że koniec A jest przytwierdzony nieruchomo, koniec zaś B opiera się o drążek BO, na którym prostopadle umocowano lunetę, obracalną około osi O. Długość pręta $AB = l$ zmierzono w temperaturze zwykłej t przed ogrzaniem w kąpieli. Za ogrzaniem w oleju do temperatury t', jaką wskazuje termometr T, pręt się wydłuża i popycha drążek do położenia CO; przez to luneta się nachyla, tak iż na odległej podziałce zamiast punktu E, wskazuje teraz punkt G. Zatym

$$BC : OB = EG : OE.$$

Stąd wydłużenie

$$BC = \frac{OB \times EG}{OE}.$$

Spółczynnik zaś rozszerzalności otrzymamy, zgodnie z określeniem, dzieląc to wydłużenie $BC = x$ przez długość pręta l i przez liczbę stopni $(t' - t)$, czyli

$$\text{spółczynnik } \lambda = \frac{x}{l\,(t' - t)}.$$

Przykład. Pręt cynkowy, mający długość 462 mm przy 15°, ogrzano do 90°. Odległość $OE = 6$ m, drążek OB ma długość 200 mm; odchylenie EG wyniosło 30 mm.

Stąd wydłużenie pręta $= (200 \times 30) : 6000 = 1$ mm.

Spółczynnik rozszerzalności cynku $= 1 : 462\ (90 - 15) = 0{,}000\,029$.

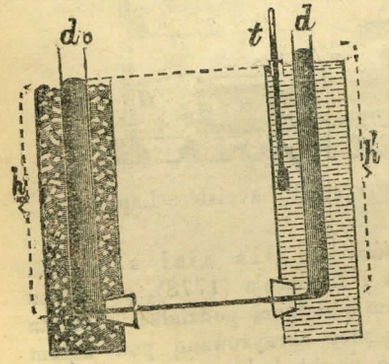
b) Dla płynów. Oznaczanie rzeczywistego spółczynnika rozszerzalności odbywa się bezpośrednio metodą Dulonga i Petita (1816), opartą na różnicy gęstości płynu w rurkach zespolonych, skoro w jednej z nich płyn ogrzewamy; stąd pochodzi różnica w wysokości płynów (§ 28, art. 2). Wysokość słupów płynu odmierza się za pomocą *katetometru*, t. j. lunety przesuwanej w położeniu ściśle poziomym, na pionowym słupie, podzielonym na milimetry, z nonjuszem.

Przyrząd Dulonga i Petita składa się z dwu rur pionowych, złączonych u dołu poziomą rurką włoskowatą (rys. 206), aby uniknąć przewodzenia ciepła. Rurki napełnia się badanym płynem, np. rtęcią, poczym jednę z nich ochładza się lodem, drugą ogrzewa się w gorącym oleju do wiadomej temperatury t; lód i olej mieszczą się w puszkach, obejmujących rurki aż do poziomu rtęci. Jeżeli gęstość rtęci przy 0° jest d, przy t^0 zaś d', to $d = d'\,(1 + \alpha t)$, gdzie α jest dla rtęci spółczynnikiem rzeczywistym rozszerzalności (§ 41, art. 2). Odpowiednie wysokości rtęci niech będą h_0 i h'; wtedy $h_0 : h' = d' : d$, czyli

$$h_0 : h' = d' : d'\,(1 + \alpha t)$$

albo $h_0 : h' = 1 : (1 + \alpha t)$

a stąd spółczynnik $\alpha = \dfrac{h' - h_0}{h_0 t}$.

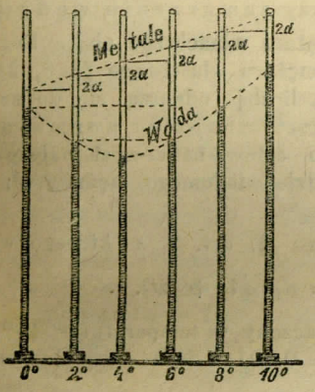


Rys. 206.
Przyrząd Dulonga-Petita.

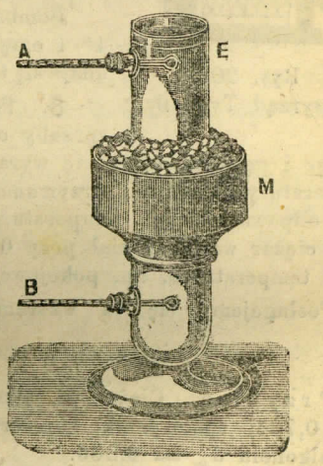
Tą drogą oznaczony spółczynnik rzeczywisty dla rtęci wynosi 0,00018. Ustaliwszy raz na zawsze tę wielkość, można obliczyć spółczynnik rozszerzalności naczynia szklanego w kształcie bańki, napełnionego rtęcią, skoro oznaczymy pozorną rozszerzalność rtęci w tym naczyniu. Odtąd dane naczynie może służyć nawzajem do obliczania rzeczywistej rozszerzalności wszelkich płynów, jeżeli w nim oznaczymy rozszerzalność pozorną płynów. Metoda powyższa stosuje się obecnie, jako dogodniejsza, zamiast podanej na rys. 206. Naczynie do tego celu, z szyjką włoskowatą, podobne do piknometru (rys. 15), ale bez korka, t. j. stanowiące jednę całość, nosi miano *dilatometru*.

6. Wyjątkowa rozszerzalność wody. Woda posiada przy 4° C. największą gęstość, a więc najmniejszą objętość. Stąd przyjęto temperaturę wody 4° przy ustanowieniu jednostki masy, t. j. grama, oraz przy oznaczaniu gęstości ciał względem wody. Począwszy od 4°, woda zarówno ogrzewana, jak oziębiana, powiększa się w objętości, przytym bardzo niejednostajnie.

Np. szereg słupków wody o różnej temperaturze: 0, 2, 4, 6, 8, 10°, zawarty w rurkach połączonych, miałby wysokość, a więc i objętość rozmaitą, jak wskazuje rys. 207, gdzie linja dolna kropkowana wskazuje nierówny przebieg rozszerzalności (w skali powiększonej): np. woda przy 8° ma taką samą objętość, jak prz 0°. Metal w tych warunkach rozszerzałby się jednostajnie, jak oznacza linja górna.



Rys. 207. Niejednostajna rozszerzalność wody.



Rys. 208. Największa gęstość wody.

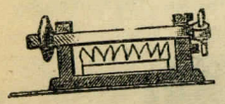
Doświadczenie Hopego (rys. 208). Wysokie naczynie szklane w postaci walca posiada dwa termometry A i B, oprawione poziomo, jak wskazuje rysunek; pośrodku zaś naczynie jest objęte okrągłą rynną blaszaną, do której się nakłada lodu.

Po napełnieniu naczynia wodą o temperaturze pokojowej, np. 15°, dolny termometr zaczyna opadać, aż rtęć zatrzyma się na 4°. Wtedy zaczyna opadać górny termometr, przytym temperatura zniża się stopniowo aż do 0°; dolny wskazuje wciąż 4°. Woda więc o 4° jest gatunkowo cięższa zarówno względem wody cieplejszej, jak względem zimniejszej niż 4° C.

Znaczenie tej wyjątkowej właściwości wody w przyrodzie polega na tym, że jeziora, stawy głębokie, rzeki nie zamarzają do dna. Woda na powierzchni, oziębiana do 4°, opada na dno, z dołu zaś wypływa ku górze woda cieplejsza; ta, stygnąc do 4°, znów opada i t. d., aż cała masa wody ostygnie do 4°. Następnie temperatura na powierzchni może spaść do 3°, 2°, 1°, przyczym te warstwy zimniejsze, jako lżejsze, pozostają już na wierzchu; wreszcie za oziębieniem do 0°, woda marźnie, a lód trzyma się również tylko na powierzchni. W ten sposób natura zabezpiecza zwierzęta wodne od zagłady.

7. Siła rozszerzalności ciał stałych i cieczy jest nadzwyczaj wielka, tak iż rozsadza lub zgina najpotężniejsze przeszkody. Miarą tej siły jest ciągnienie, potrzebne do wydłużenia ciała o tyleż, co przez ogrzewanie (por. „Sprężystość" § 9, art. 5).

Doświadczenie Tyndalla (rys. 209). Jeżeli sztabę stalową, rozgrzaną silnie, umocowano w grubej podstawie za pomocą kołka z lanego żelaza, to sztaba, kurcząc się przy ostyganiu, rozrywa kołek, który pęka z łoskotem.



Rys. 209.
Przyrząd Tyndalla.

Bomba żelazna, napełniona szczelnie wodą przy 4° i oziębiona, ulega rozsadzeniu. Pewniej wszakże udaje się ten wynik przy zamarzaniu wody (§ 45).

8. Poprawka ciężaru właściwego ciał. Rozmaite sposoby oznaczania ciężaru właściwego §§ 6, 29, 30, a więc i gęstości, która się wyraża tą samą liczbą, odnoszą się do zwykłej temperatury pokojowej; otrzymane liczby są przeto mniejsze od normalnych, t. j. odpowiadających temperaturze 0°. Do celów naukowych należy obliczyć ciężar właściwy ciał przy 0°, na zasadzie wiadomego ciężaru wł. przy innej temperaturze, np. pokojowej.

Posługujemy się tu wzorem niniejszego §, art. 2, z którego wynika

$$\text{ciężar wł. normalny } d_0 = d_t\ (1 + \alpha t).$$

Przykład. Ciężar wł. alkoholu, oznaczony w temperaturze 15°, wynosi 0,794; spółczynnik rozszerzalności = 0,001. Stąd normalny ciężar wł. alkoholu $d_0 = 0{,}806$.

9. Poprawka słupa barometrycznego. Wymierzona w temperaturze t^0 wysokość rtęci h_t w barometrze jest $(1 + \alpha t)$ razy większa od wysokości h_0, mierzonej przy 0°, ponieważ gęstość rtęci jest tyleż razy mniejsza; spółczynnik $\alpha = 0{,}00018$. Zatym

$$\text{wysokość sprowadzona } h_0 = \frac{h_t}{1 + 0{,}00018\ t}.$$

Jeżeli podziałka milimetrowa barometru nie jest zrobiona na metalu, którego rozszerzalność można pominąć, jako znikomo małą (np. inwar, art. 3), należy jeszcze sprowadzić długość podziałki do 0°. Każdy mm podziałki jest przy t^0 dłuższy $(1 + \lambda t)$ razy od rzeczywistej długości 1 mm, t. j. przy 0°; zatym wysokość rtęci, mierzona podziałką rzetelną, byłaby $(1 + \lambda t)$ razy większa. Tak więc,

$$\left.\begin{matrix}\text{wysokość sprowadzona rtęci}\\ \text{z poprawką podziałki}\end{matrix}\right\} \quad h_0 = h_t \frac{1 + \lambda t}{1 + 0{,}00018\ t}.$$

W rzeczywistości poprawka barometryczna może wynosić do kilku mm, w cieplejszej porze roku lub w krajach cieplejszych.

10. Przykłady i zastosowania. Szpary między szynami, luźne przytwierdzenie końców szyn. — Paczenie się i pękanie drzewa; odstawanie blachy na dachu. — Nabijanie obręczy żelaznych na gorąco. — Pękanie szklanek od gorąca, szkiel w lampach. — Wyjmowanie korka szklanego z ciasnej szyjki przy pomocy ogrzewania. — Umacnianie murów sztabami żelaznymi, wpuszczonymi w stanie gorącym. — Luźne obmurowanie kotłów. — Termometry rtęciowe, metalowe. — Druty, wtopione w szkło lampek elektrycznych, są wyrobione z metalu o spółcz. 0,000009, np. z platyny (dlaczego?). — Strany instrumentów muzycznych odstrajają się, t. j. zmieniają ton, bądź pękają skutkiem nadmiernego wyprężenia, kurcząc się przy oziębieniu.

§ 42. Rozszerzalność gazów.

1. Prawo Gay Lussaca (1802). Gazy posiadają jednakową rozszerzalność, o spółczynniku $\alpha = \frac{1}{273}$. Prawo to odnosi się do gazów pod ciśnieniem stałym, t. j. nie zmieniającym się w czasie ogrzewania gazu.

Z zestawienia spółczynnika $\frac{1}{273} = 0{,}00366$ z tabelką poprzedzającą wynika, iż gazy rozszerzają się stokrotnie lub więcej w porównaniu do ciał stałych. Stąd rozszerzalność naczyń, mieszczących gazy, można pominąć w doświadczeniach zwykłych (por. rys. 210).

Prawo Gay Lussaca stosuje się ściśle do gazów trwałych, t. j. nie skraplających się od ciśnienia w temperaturze zwykłej, np. wodór, powietrze i jego składniki: azot, tlen, argon. Dla innych gazów spółczynnik jest cokolwiek większy, mianowicie tym większy, im łatwiej gaz się skrapla; dopiero w wyższych temperaturach, dalekich od punktu skroplenia, spółczynnik staje się równym = 0,00 366 dla wszystkich gazów.

Uchybienia od prawa Gay Lussaca są zresztą nieznaczne, jak widać z załączonej tabelki; to też pomija się je przy zwykłych obliczeniach.

Spółczynniki rozszerzalności gazów między 0° a 100°:

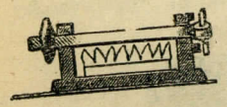
Wodór	0,00 366	Tlenek węgla . .	0,00 367
Powietrze, Azot, Tlen . . .	0,00 367	Dwutlenek węgla .	0,00 371
		Cyjan.	0,00 388
		Dwutlenek siarki .	0,00 390

Po napełnieniu naczynia wodą o temperaturze pokojowej, np. 15°, dolny termometr zaczyna opadać, aż rtęć zatrzyma się na 4°. Wtedy zaczyna opadać górny termometr, przytym temperatura zniża się stopniowo aż do 0°; dolny wskazuje wciąż 4°. Woda więc o 4° jest gatunkowo cięższa zarówno względem wody cieplejszej, jak względem zimniejszej niż 4° C.

Znaczenie tej wyjątkowej właściwości wody w przyrodzie polega na tym, że jeziora, stawy głębokie, rzeki nie zamarzają do dna. Woda na powierzchni, oziębiana do 4°, opada na dno, z dołu zaś wypływa ku górze woda cieplejsza; ta, stygnąc do 4°, znów opada i t. d., aż cała masa wody ostygnie do 4°. Następnie temperatura na powierzchni może spaść do 3°, 2°, 1°, przyczym te warstwy zimniejsze, jako lżejsze, pozostają już na wierzchu; wreszcie za oziębieniem do 0°, woda marźnie, a lód trzyma się również tylko na powierzchni. W ten sposób natura zabezpiecza zwierzęta wodne od zagłady.

7. Siła rozszerzalności ciał stałych i cieczy jest nadzwyczaj wielka, tak iż rozsadza lub zgina najpotężniejsze przeszkody. Miarą tej siły jest ciągnienie, potrzebne do wydłużenia ciała o tyleż, co przez ogrzewanie (por. „Sprężystość" § 9, art. 5).

Doświadczenie Tyndalla (rys. 209). Jeżeli sztabę stalową, rozgrzaną silnie, umocowano w grubej podstawie za pomocą kołka z lanego żelaza, to sztaba, kurcząc się przy ostyganiu, rozrywa kołek, który pęka z łoskotem.



Rys. 209.
Przyrząd Tyndalla.

Bomba żelazna, napełniona szczelnie wodą przy 4° i oziębiona, ulega rozsadzeniu. Pewniej wszakże udaje się ten wynik przy zamarzaniu wody (§ 45).

8. Poprawka ciężaru właściwego ciał. Rozmaite sposoby oznaczania ciężaru właściwego §§ 6, 29, 30, a więc i gęstości, która się wyraża tą samą liczbą, odnoszą się do zwykłej temperatury pokojowej; otrzymane liczby są przeto mniejsze od normalnych, t. j. odpowiadających temperaturze 0°. Do celów naukowych należy obliczyć ciężar właściwy ciał przy 0°, na zasadzie wiadomego ciężaru wł. przy innej temperaturze, np. pokojowej.

Posługujemy się tu wzorem niniejszego §, art. 2, z którego wynika

$$\text{ciężar wł. normalny } d_0 = d_t\ (1 + \alpha t).$$

Przykład. Ciężar wł. alkoholu, oznaczony w temperaturze 15°, wynosi 0,794; spółczynnik rozszerzalności = 0,001. Stąd normalny ciężar wł. alkoholu $d_0 = 0{,}806$.

9. Poprawka słupa barometrycznego. Wymierzona w temperaturze t^0 wysokość rtęci h_t w barometrze jest $(1 + \alpha t)$ razy większa od wysokości h_0, mierzonej przy 0°, ponieważ gęstość rtęci jest tyleż razy mniejsza; spółczynnik $\alpha = 0{,}00018$. Zatym

$$\text{wysokość sprowadzona } h_0 = \frac{h_t}{1 + 0{,}00018\ t}.$$

Jeżeli podziałka milimetrowa barometru nie jest zrobiona na metalu, którego rozszerzalność można pominąć, jako znikomo małą (np. inwar, art. 3), należy jeszcze sprowadzić długość podziałki do 0°. Każdy mm podziałki jest przy t^0 dłuższy $(1 + \lambda t)$ razy od rzeczywistej długości 1 mm, t. j. przy 0°; zatym wysokość rtęci, mierzona podziałką rzetelną, byłaby $(1 + \lambda t)$ razy większa. Tak więc,

$$\left.\begin{array}{l}\text{wysokość sprowadzona rtęci}\\ \text{z poprawką podziałki}\end{array}\right\}\ h_0 = h_t\,\frac{1 + \lambda t}{1 + 0{,}00018\ t}.$$

W rzeczywistości poprawka barometryczna może wynosić do kilku mm, w cieplejszej porze roku lub w krajach cieplejszych.

10. Przykłady i zastosowania. Szpary między szynami, luźne przytwierdzenie końców szyn. — Paczenie się i pękanie drzewa; odstawanie blachy na dachu. — Nabijanie obręczy żelaznych na gorąco. — Pękanie szklanek od gorąca, szkiel w lampach. — Wyjmowanie korka szklanego z ciasnej szyjki przy pomocy ogrzewania. — Umacnianie murów sztabami żelaznymi, wpuszczonymi w stanie gorącym. — Luźne obmurowanie kotłów. — Termometry rtęciowe, metalowe. — Druty, wtopione w szkło lampek elektrycznych, są wyrobione z metalu o spółcz. 0,000009, np. z platyny (dlaczego?). — Struny instrumentów muzycznych odstrajają się, t. j. zmieniają ton, bądź pękają skutkiem nadmiernego wyprężenia, kurcząc się przy oziębieniu.

§ 42. Rozszerzalność gazów.

1. Prawo Gay Lussaca (1802). Gazy posiadają jednakową rozszerzalność, o spółczynniku $\alpha = \frac{1}{273}$. Prawo to odnosi się do gazów pod ciśnieniem stałym, t. j. nie zmieniającym się w czasie ogrzewania gazu.

Z zestawienia spółczynnika $\frac{1}{273} = 0{,}00366$ z tabelką poprzedzającą wynika, iż gazy rozszerzają się stokrotnie lub więcej w porównaniu do ciał stałych. Stąd rozszerzalność naczyń, mieszczących gazy, można pominąć w doświadczeniach zwykłych (por. rys. 210).

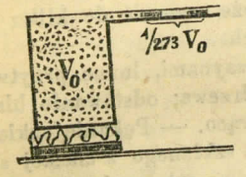
Prawo Gay Lussaca stosuje się ściśle do gazów trwałych, t. j. nie skraplających się od ciśnienia w temperaturze zwykłej, np. wodór, powietrze i jego składniki: azot, tlen, argon. Dla innych gazów spółczynnik jest cokolwiek większy, mianowicie tym większy, im łatwiej gaz się skrapla; dopiero w wyższych temperaturach, dalekich od punktu skroplenia, spółczynnik staje się równym = 0,00 366 dla wszystkich gazów.

Uchybienia od prawa Gay Lussaca są zresztą nieznaczne, jak widać z załączonej tabelki; to też pomija się je przy zwykłych obliczeniach.

Spółczynniki rozszerzalności gazów między 0° a 100°:

Wodór	0,00 366	Tlenek węgla . .	0,00 367
Powietrze		Dwutlenek węgla .	0,00 371
Azot . .	0,00 367	Cyjan.	0,00 388
Tlen		Dwutlenek siarki .	0,00 390

2. Objętość i prężność gazu ogrzanego. Gaz można ogrzewać, dając mu się swobodnie rozszerzać, np. w naczyniu z wąską szyjką, do której wpuszczono kroplę rtęci (rys. 210); jest to rozszerzalność przy stałym ciśnieniu. Albo też ogrzewanie może się odbywać przy stałej objętości, np. w naczyniu szczelnie zamkniętym, gdzie gaz rozszerzać się nie może.



Rys. 210. α dla gazów.

Przy niezmiennym ciśnieniu objętość v_0 gazu o temperaturze 0^0 powiększa się za ogrzaniem do t^0 według wzoru ogólnego (§ 41), tak iż objętość przy t^0

$$v_t = v_0 (1 + \alpha t).$$

Przy niezmiennej objętości, prężność (ciśnienie) gazu ogrzanego rośnie w tym samym stosunku. Jeżeli przy 0^0 prężność gazu jest p_0, to prężność przy t^0

$$p_t = p_0 (1 + \alpha t).$$

Dowód. Gdyby się gaz rozszerzał, posiadłby przy t^0 objętość $v_0 (1 + \alpha t)$, pozostając pod ciśnieniem pierwotnym p_0. Ażeby następnie gaz ścieśnić do pierwotnej objętości v_0, czyli $(1 + \alpha t)$ razy mniejszej, trzeba aby ciśnienie było tyleż razy większe; zatym prężność gazu tak ścieśnionego musi być $(1 + \alpha t)$ razy większa od pierwotnej prężności p_0.

3. Matematyczne wyrażenie prawa Gay Lussaca. Oznaczając przez v i v' objętości gazów przy odpowiednich temperaturach t i t', otrzymamy:

$$v = v_0 (1 + \alpha t). \qquad v' = v_0 (1 + \alpha t').$$

Stąd $$\frac{v}{v'} = \frac{1 + \alpha t}{1 + \alpha t'}.$$

Objętości gazów mają się do siebie, jak odpowiednie dwumiany rozszerzalności.

Podobnież oznaczając przez p i p' prężności w temperaturach t i t', otrzymamy:

$$p = p_0 (1 + \alpha t). \qquad p' = p_0 (1 + \alpha t').$$

Stąd $$\frac{p}{p'} = \frac{1 + \alpha t}{1 + \alpha t'}.$$

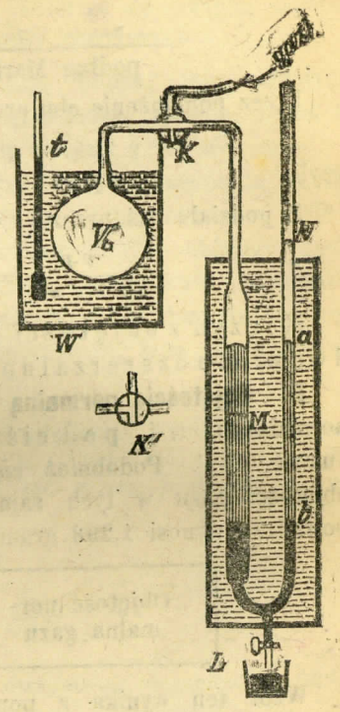
Prężności gazów mają się do siebie, jak odpowiednie dwumiany rozszerzalności.

4. Oznaczanie spółczynnika α. Gay Lussac posługiwał się prostym przyrządem, złożonym ze zbiornika gazu z wąską rurką poziomą, w której przesuwał się słupek rtęci, za ogrzaniem zbiornika. Zasadę tego przyrządu podaje rys. 210; wyniki jednak nie są wystarczająco dokładne.

Sposób Regnault'a polega na użyciu manometru rtęciowego. Gaz wchodzi z większego zbiornika do bani, z rurką włoskowatą, zawartej w lodzie i mającej wtedy objętość zanurzoną V_0 (rys. 211). Banię w tym celu opróżniono, poczym połączono ją ze zbiornikiem za pomocą kranu trójdzielnego K, nadając mu położenie K'. Do bani dołącza się manometr otwarty MN, napełniony rtęcią i zawarty w naczyniu z wodą, aby miał temperaturę jednostajną w czasie doświadczenia; równość poziomów Aa*) osiąga się przez wypuszczanie rtęci kranikiem L. Zastępując następnie lód gorącą wodą lub olejem w kąpieli W, wywołuje się rozszerzenie gazu; rtęć spada w lewym ramieniu, np. do M, w prawym podnosi się do N. Aby wyrównać ciśnienie, wypuszcza się rtęć przez L, poczym poziom spada do Bb. W tym czasie kąpiel W ma ustaloną temperaturę t. Objętość więc gazu powiększyła się o AB; niech ten przyrost objętości $= v$ podług podziałki na rurze M. Wtedy $V_t = V_0 (1 + \alpha t)$; że zaś $V_t = V_0 + v$, wynika

$$v = V_0 \alpha t$$

i stąd $$\alpha = \frac{v}{V_0 t}.$$



Rys. 211. Przyrząd Regnault'a.

Pomiary ściślejsze wymagają uwzględnienia rozszerzalności szkła, różnicy temperatury w manometrze podczas doświadczenia, zmian w ciśnieniu barometrycznym i t. p.

Przykład. Bania z gazem ma objętość $V_0 = 819$ cm³; gdy ogrzano ją do 76^0, przyrost objętości AB wyniósł 228 cm³.

$$\alpha = 228 : (819 \cdot 76) = 0{,}00\,366.$$

5. Prawo Mariotte'a-Gay Lussaca. Jeżeli zmienia się zarazem ciśnienie i temperatura gazu, należy uwzględnić stosunki, wyrażone w obu prawach, Mariotte'a (§ 35) i Gay Lussaca.

Niech ciśnienie (prężność) będzie najpierw stałe $= p$, a temperatura z t zmieni się na t_1:

przy temp. t objętość gazu $v = v_0 (1 + \alpha t)$
„ „ t_1 „ „ $V = v_0 (1 + \alpha t_1)$

podług Gay Lussaca $v : V = (1 + \alpha t) : (1 + \alpha t_1)$

*) Na rycinie opuszczono literę A przy lewej rurce naprzeciw a, oraz literę B naprzeciw b.

Niech odtąd temperatura będzie stała $= t_1$, a ciśnienie z p zmieni się na p_1:

pod ciśnieniem p objętość gazu $= V$
" " p_1 " " $= v_1$

podług Mariotte'a $V : v_1 = p_1 : p$

Przez pomnożenie obu proporcji znika objętość pośrednia V i wypada:

$$v : v_1 = p_1 (1 + \alpha t) : p (1 + \alpha t_1)$$

czyli $$v p (1 + \alpha t_1) = v_1 p_1 (1 + \alpha t).$$

Z podziału zaś przez $(1 + \alpha t_1) \cdot (1 + \alpha t)$ wynika:

$$\frac{v p}{1 + \alpha t} = \frac{v_1 p_1}{1 + \alpha t_1} = \text{const.}$$

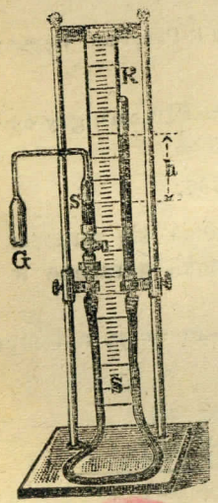
Iloczyn z objętości i ciśnienia gazu, podzielony przez dwumian rozszerzalności, ma wartość stałą.

6. Objętością normalną V_0 nazywa się objętość gazu w warunkach normalnych, t. j. pod ciśnieniem 760 mm rtęci i w temperaturze 0° C. Podobnież *ciężarem normalnym* zowie się ciężar danej objętości gazu w tych samych warunkach; np. normalny ciężar 1 litra powietrza wynosi 1,293 grama.

Objętość normalna gazu	$V_0 = \frac{v}{1 + \alpha t} \cdot \frac{p}{760}$.

Wzór ten wynika z poprzedniego przy odpowiedniej zmianie liter i wartości: zamiast v_1 będzie V_0, $p_1 = 760$, $t_1 = 0$.

Wzór powyższy ma szerokie zastosowanie przy pomiarach objętości gazów w badaniach fizycznych i chemicznych.



Rys. 212.
Termometr gazowy.

7. Termometr gazowy (rys. 212) służy do oznaczania temperatury bardzo wysokiej lub niskiej, jakiej rtęć płynna nie znosi, jako też do sprawdzania dokładności termometrów rtęciowych i innych. Polega na powiększaniu się prężności gazu z miarą wzrostu temperatury.

Naczynie porcelanowe G zawiera powietrze lub inny gaz pod ciśnieniem atmosfery, skoro rtęć w obu rurkach stoi na jednakowym poziomie. Za ogrzaniem gaz się rozszerza i posuwa rtęć w rurce szklanej. Podnosząc tę rurkę sprowadza się rtęć do pierwotnej objętości. Ze wzoru na prężność, mianowicie $p_t = p_0 (1 + \alpha t)$, wypada

$$t = \frac{p_t - p_0}{p_0 \alpha}.$$

Wartość p_0 stanowi ciśnienie barometryczne w danej chwili, $p_t =$ ciśn. barom. + słup rtęci h.

Termometry powietrzne wskazują temperaturę pieców, płomienia. Do temperatur nadzwyczaj niskich, przy których powietrze się skrapla, napełnia się termometr *helem* (helium, gazowy pierwiastek chemiczny).

8. Temperatura bezwzględna (absolutna). Podług teorji kinetycznej (pt.), w miarę oziębiania gazu ruch cząsteczkowy słabnie, przez co zmniejsza się siła żywa cząstek; tłómaczy to spadek prężności gazu.

Przypuszczając, że prężność gazu maleje w miarę oziębiania według wzoru $p_t = p_0 (1 + \alpha t)$, łatwo obliczyć, że w temperaturze — 273° C gaz straciłby zupełnie prężność, to jest nie wywierałby żadnego zgoła ciśnienia na ściany naczynia; teoretyczny ruch cząsteczkowy przestałby istnieć. Stan taki byłby *zimnem bezwzględnym*, czyli temperaturą *zera bezwzględnego*; jest to więc najniższa temperatura, jaką można teoretycznie przypuścić.

Oznaczając przez τ temperaturę zera bezwzględnego, wynika z założenia we wzorze $p_t = p_0 (1 + \alpha\tau)$, że $p_t = 0$, t. j. prężność przy τ^0 znika. W takim razie $p_0 (1 + \alpha\tau)$ również musi być zerem; ponieważ prężność gazu p_0 przy 0° C nie jest zerem, więc:

$$1 + \alpha\tau = 0$$

$$\tau = -\frac{1}{\alpha} = -273.$$

Najniższa temperatura, jaką dotychczas otrzymano, dochodzi — $268\frac{1}{2}^0$ (por. skraplanie gazów).

Temperatura liczona od punktu — 273° C, zowie się *temperaturą bezwzględną* (T). Oczywiście $T = t + 273$, t. j. temperaturę bezwzględną otrzymuje się, dodając 273° C do zwykłej temperatury Celsjusza.

Liczenie temperatur od zera bezwzględnego ułatwia rachunki i objaśnia teoretycznie wiele spraw fizycznych.

Prawo Gay Lussaca i pochodne dadzą się prościej i oczywiściej wyrazić przy uwzględnieniu T:

1) $$\frac{v}{v_1} = \frac{1 + \alpha t}{1 + \alpha t_1} = \frac{1/\alpha + t}{1/\alpha + t_1} = \frac{273 + t}{273 + t_1} = \frac{T}{T_1}.$$

Objętości gazów mają się do siebie, jak ich temperatury bezwzględne (prawo Gay Lussaca).

2) Podobnież $$\frac{p}{p_1} = \frac{T}{T_1}.$$

Prężności gazów mają się do siebie, jak ich temperatury bezwzględne.

3) Podobnież $\frac{v\,p}{T} = \frac{v_1 p_1}{T_1} = \text{const.}$

Stąd prawo połączone Mariotte'a-Gay Lussaca brzmi:

Iloczyn z objętości i ciśnienia gazu, podzielony przez jego temperaturę bezwzględną, ma wartość stałą.

4) Objętość normalna gazu:

$$V_0 = \frac{v}{1+\alpha t} \cdot \frac{p}{760} = \frac{v}{1+\frac{T-273}{273}} \cdot \frac{p}{760} = v \cdot \frac{273}{T} \cdot \frac{p}{760}$$

lub krócej $V_0 = 0{,}359\,\frac{v\,p}{T}$.

Zadania.

1. Sprowadzić do objętości normalnej:
   a) 11 ltr. powietrza o ciśnieniu 720 mm i temp. 27,3° C.
   Odp. 9,474 ltr.
   b) 1450 m³ wodoru o tem. 27° i ciśnieniu 700 mm.
   Odp. 1215 m³.
2. Ile waży powietrze w pokoju na 8 m długim, na 5 m szerokim i na 4 m wysokim, przy temperaturze 15° i ciśnieniu 750 mm? Odp. 195 kg.
3. Flaszkę objętości 19 ltr zakorkowano przy tem. 27° i ciśnieniu 720 mm. Ile powietrza uszło z flaszki, skoro ją otworzono na górze, gdzie panuje ciśnienie 680 mm i temperatura 0° C.? Odp. Waga powietrza w objętości 19 ltr wynosi na dole 21,180 g, na górze 21,981 g, nic więc z flaszki nie ujdzie, natomiast przybędzie 0,801 g powietrza.
4. Chemik zebrał w wannie pneumatycznej 1520 cm³ dwutlenku węgla nad rtęcią przy 87° C i 740 mm ciśnienia, przyczym rtęć w rurze z gazem stała o 14 cm wyżej, niż w naczyniu. Oznaczyć prężność gazu, objętość normalną i wagę. Odp. 600 mm, 910 cm³, 1,8 g.

B) RUCH CIEPŁA.

§ 43. Ciepło właściwe.

1. **Pojemność cieplna.** Każde ciało ma pewną *pojemność cieplną*, t. j. zawiera pewien zasób energji pod postacią ciepła. Najzimniejsze nawet ciała na ziemi zawierają coś ciepła; żadne bowiem nie dochodzi temperatury zera bezwzględnego, przy której nie byłoby wcale ciepła w ciałach (por. § 42, art. 8).

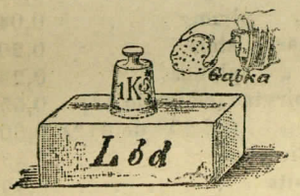
Skoro ciało się rozgrzewa, mówimy, że mu przybywa ciepła; jeżeli stygnie, mówimy, że ciepła ubywa.

Rozmaite ciała zawierają niejednakową ilość ciepła, pomimo jednakowej masy ciał i temperatury. Np. piasek, kamienie zawierają zwykle więcej ciepła, niż metale; jeszcze więcej zawierają rozmaite płyny.

Z badań, przeprowadzonych dla wszelkich materji stałych i płynnych wynika, że największą pojemność cieplną posiada woda.

Porównanie. Gąbka, bibuła, kreda pochłaniają pewną ilość wody, mają więc pewną pojemność względem wody i przytym rozmaitą; gąbka np. pochłania więcej wody niż bibuła o równej masie, ta zaś więcej niż kreda.

Doświadczalnie łatwo stwierdzić rozmaitą pojemność ciał jednakowo rozgrzanych i jednakowo ciężkich. Brylka żelaza, wagi 1 kg, ogrzana np. na blasze kuchennej, a następnie postawiona na tafli lodu (rys. 213), wytopi z niej nie tyle wody, co np. kamień, o tej samej masie i temperaturze; przekonać się można, zbierając wodę gąbką.



Rys. 213.



Rys. 214. Doświad. Tyndalla.

Doświadczenie Tyndalla najlepiej okazuje różnice w cieple właściwym metalów (rys. 214). Kilka kulek, np. żelazną, mosiężną, ołowianą, jednakowej wagi, ogrzewa się we wrzącej wodzie, czyli do 100° C, poczym kładzie się je równocześnie na cienkim krążku woskowym; kulka żelazna najpierw przetopi wosk na wylot, później kulka mosiężna, ołowiana zaś zagłębi się tylko częściowo.

2. **Kalorją** (ciepłostką) zowie się ilość ciepła, potrzebna do ogrzania 1 kg wody o 1° C. Kalorja jest miarą ciepła, czyli jednostką do oznaczania ilości ciepła; służy do pomiarów praktycznych i zowie się inaczej *kalorją wielką* czyli *kilogramową*.

Do mniejszych ilości ciał, jakie spotyka się w badaniach naukowych, stosuje się *kalorję małą*, ilość ciepła, ogrzewającą 1 gram wody o 1° C; kalorja ta zowie się inaczej *gramową* albo *gramostopniem* i stanowi $\frac{1}{1000}$ kalorji wielkiej.

3. **Ciepło właściwe** ciała stanowi ilość ciepła, potrzebna do ogrzania 1 kg ciała o 1° C. Ciepło właściwe zatym możnaby nazwać „pojemnością cieplną właściwą".

Z określenia tego oczywista, że ciepło właściwe wody = 1; że zaś woda ma większe ciepło właściwe od wszelkich innych materji (z wyjątkiem wodoru), przeto ciepło ich wyrażają zawsze ułamki. Najmniejsze ciepło właściwe posiadają metale, zwłaszcza cięższe. Płyny mają zwykle większe ciepło właściwe, niż ciała stałe.

Wartość ciepła właściwego wzrasta przy temperaturach wyższych, tak iż np. do ogrzania ciała od 200 do 201° zużywa się więcej ciepła, niż od 0° do 1°. Na tej zasadzie w określeniu kalorji i ciepła właściwego przyjęto ogrzanie od 15° do 16°, jako temperatury zwykłej w pracowni fizycznej. Szczególniej wzrasta ciepło właściwe około temperatury topliwości; ciała zaś w stanie stopionym mają większe ciepło właściwe, niż te same ciała w postaci stałej.

Ciepło właściwe materji stałych i płynnych:

Woda	1,00	Ołów stały	0,031
Lód (od —10° do - 9°)	0,50	„ płynny . . .	0,040
Drzewo, średnio . .	0,55	Siarka stała. . . .	0,20
Kamienie pospolite, śr.	0,20	„ płynna . . .	0,23
Szkło	0,19	Spirytus (od 0° do 1°)	0,55
Żelazo	0,111	„ (od 20° do 21°)	0,60
Cynk, mosiądz . . .	0,094	Gliceryna	0,55
Srebro	0,057	Nafta	0,49
Rtęć	0,033	Benzyna	0,40

4. Ilość ciepła (Q), udzielaną ciału lub oddawaną, można wyrazić wzorem ogólnym, skoro wiadoma jest masa ciała m (kg), temperatura pierwotna t i końcowa t', pojemność właściwa c, średnia między t i t'.

1 kg wody ogrzany o 1° pochłania 1 kal.
1 kg ciała poj. wł. c „ 1° „ c „
1 kg „ „ „ c ogrz. od t^0 do t' „ $c\,(t' - t)$ „
m kg „ „ „ c „ od t^0 do t' „ $m(t' - t)c$ „

Ilość ciepła $Q = m\,(t' - t)\,c$ kalorji.

Chcąc wyrazić całkowitą ilość ciepła, jaką ciało zawiera w danej chwili, należy liczyć temperatury od zera bezwzględnego, t. j. od —273° C.

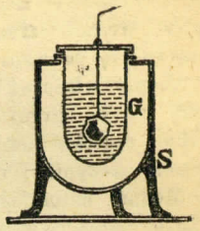
Przykłady. 1) Ile potrzeba ciepła na ogrzanie bryły żelaznej, ważącej 27 kg, od 0° do 43°?

Odp. $27 \cdot 43 \cdot 0{,}11 = 127{,}71$ kal.

2) Staw, mieszczący 5000 m³ wody, okazuje wieczorem temperaturę 20°, nazajutrz zaś rano tylko 13°. Ile ciepła stracił w ciągu nocy?

Odp. $5000 \cdot 1000 \cdot (20 - 13) = 35\,000\,000$ kal.

5. Oznaczanie ciepła właściwego ciał stałych i płynnych dokonywa się metodą mieszania czyli zetknięcia ciała ogrzanego z zimnym, albo metodą topienia lodu. Naczynia, służące do pomiaru ciepła, otrzymały miano *kalorymetrów*. Zwykle używamy *kalorymetru wodnego*, (rys. 215), t. j. kubka mosiężnego lub srebrnego o cienkich ścianach, starannie polerowanych; kubek ten jest zawarty w innym naczyniu również polerowanym, dla uniknięcia straty ciepła przez promieniowanie (pt.).



Rys. 215. Kalorymetr wodny.

Metoda mieszania (Regnault). Ciało o masie m_1 kg ogrzewa się do temperatury t_1 (w kąpieli wodnej lub powietrznej) i wrzuca do kalorymetru (rys. 215), zawierającego m_2 kg wody o temperaturze t_2. Ciało oddaje swe ciepło wodzie dotąd, aż zrówna się temperatura wody i ciała, stając się równą t; zatym ilość ciepła, jaką ciało traci, równa się ilości, jaką woda zyskuje:

$$\underset{\text{strata ciała}}{m_1\,(t_1 - t)\,c} = \underset{\text{zysk wody.}}{m_2\,(t - t_2)} \text{ kal.}$$

Stąd ciepło właściwe średnie między t i t' wynosi

$$c = \frac{m_2\,(t - t_2)}{m_1\,(t_1 - t)}.$$

Pojemność cieplną kalorymetru tutaj pominięto, jest ona bowiem bardzo nieznaczna w porównaniu z pojemnością wody. Przy pomiarach ściślejszych należy ją uwzględnić, jak również stratę ciepła przez kalorymetr podczas ostygania ciała.

Metoda topienia lodu (Lavoisier i Laplace), polegająca na wrzuceniu ciała ogrzanego do lodu, obecnie wyszła z użycia, jako mało dokładna; część bowiem wody, powstałej z lodu, przylega do lodu i pozostaje w jego szczelinach.

6. Ciepło właściwe gazów ma wartość dwojaką dla każdego gazu, zależnie od tego, czy gaz rozszerza się swobodnie, czy nie rozszerza się wcale. W pierwszym przypadku, t. j. przy niezmiennym ciśnieniu, gaz wykonywa pewną pracę, stąd potrzebuje więcej ciepła, niż ta sama ilość gazu przy niezmiennej objętości.

Zamykając gaz w naczyniu, aby się nie mógł rozszerzać, oszczędza się, jak wykazuje doświadczenie, około 41% ciepła, tak iż

$$\text{stosunek } k = \frac{c_p}{c_v} = \frac{\text{ciepło wł. przy stałym ciśn.}}{\text{ciepło wł. przy stałej obj.}} = 1{,}41.$$

Pomiar ciepła właściwego gazów nastręcza pewne trudności, ponieważ gazy, jako materje lekkie, posiadają masę nieznaczną, zawierają więc bardzo mało ciepła w tej objętości, jaka nadaje się do badania.

Ciepło właściwe c_p gazu o stałym ciśnieniu oznaczamy, prowadząc wiadomą masę gazu przez rurę spiralną, którą stale ogrzewa woda wrząca. Stąd gaz o wiadomej temperaturze przechodzi przez inną rurę spiralną, zanurzoną w wodzie zimnej kalorymetru, i oddaje tu swe ciepło. Obliczenie dokonywa się ze wzoru na metodę mieszania.

Ciepło właściwe c_v gazu o stałej objętości nie da się doświadczalnie oznaczyć; przy ogrzewaniu bowiem gazu, zamkniętego w naczyniu, zaledwie drobna cząstka ciepła idzie na ogrzanie samego gazu, główna zaś ilość rozgrzewa naczynie i rozprasza się stąd naokoło.

Można natomiast oznaczyć odmienną drogą (por. „Mechaniczny równoważnik ciepła") stosunek $k = c_p : c_v$, który ma wartość stałą prawie dla wszystkich gazów i wynosi 1,41; stąd już oblicza się c_v.

Rodzaj gazu	Ciepło właściwe przy		Stosunek
	st. ciśn. c_p	st. obj. c_v	$k = c_p : c_v$
Powietrze	0,237	0,168	1,41
Tlen	0,217	0,154	1,41
Azot	0,244	0,173	1,41
Wodór	3,409	2;416	1,41
Para wodna	0,475	0,364	1,31

7. Zastosowania. a) Temperaturę mieszaniny ciała gorącego z zimnym można oznaczyć ze wzoru na ciepło właściwe (art. 5, a), jeżeli go się uogólni, obierając zamiast wody jakikolwiek inny płyn. Niech jedno ciało posiada masę m_1 kg, temperaturę t_1 i ciepło wł. c_1, drugie masę m_2, temp. t_2 i masę c_2; jeżeli temp. mieszaniny po wyrównaniu będzie t, to

$$m_1 (t_1 - t) c_1 = m_2 (t - t_2) c_2$$

skąd

$$\text{temp. miesz. } t = \frac{m_1 c_1 t_1 + m_2 c_2 t_2}{m_1 c_1 + m_2 c_2}.$$

b) Wysokie temperatury, które przechodzą granice wskazówek zwykłego termometru, można wyznaczać metodą kalorymetryczną. W tym razie chodzi o wyznaczenie wartości t_1 z ostatniego równania, gdzie wszystkie pozostałe ilości, zatym i temperatura mieszaniny są wiadome. Np. temperaturę lawy płynącej, płomienia lampy, ogniska w piecu można oznaczyć za pomocą kulki platynowej, którą się trzyma w danym źródle ciepła przez czas dłuższy, a następnie wrzuca do zimnej wody lub rtęci. Należy wszakże pamiętać, iż sposób ten daje tylko wyniki przybliżone, gdyż c nie ma wartości stałej, a w temperaturach wyższych różni się dość znacznie.

c) Klimat morski różni się od lądowego głównie wskutek wysokiej pojemności cieplnej wody. Olbrzymie zbiorniki wody, jakiemi są morza, ogrzewają się bardzo niewiele w ciągu lata, w zimie zaś równie mało stygną; stąd łagodność i jednostajność morskiego klimatu.

Zadania.

1. Ile ciepła traci masa szkła, ważąca $\frac{1}{4}$ kg, jeżeli z 900° temperatura jej spada do 16°? Odp. 44,2 kal.

2. Ile potrzebaby ciepła do ogrzania powietrza od 0° do 1° w sali, długiej na 15 m, szerokiej na 9 m i wysokiej na 6 m, gdyby nie było wentylacji i innych strat ciepła? Odp. Objętość powietrza $= 15 . 9 . 6 = 810$ m³, waga $= 810 \times 1{,}3 = 1053$ kg; $Q = 4242$ kal.

3. Ile zimnej wody o temp. 10° trzeba dolać do wanny, zawierającej 70 kg wody gorącej, o temp. 50°, aby otrzymać temperaturę zwykłej kąpieli ciepłej 35°? Odp. 42 kg.

4. Kowal wrzucił bryłę żelazną, rozżarzoną do 600°, mierzącą na objętość 1 dm³, do kubła z wodą, której objętość wynosi 10 ltr, a temperatura 10°. Jaka będzie temperatura ostateczna wody? Odp. 23,4°, pomijając drobne błędy skutkiem parowania i znikomego rozkładu wody.

5. Kostkę żelazną i złotą, równej objętości, ogrzano o 1° C. Która z nich pochłania więcej ciepła? Odp. Pierwsza.

6. Ile wydłuża się pręt żelazny mający 1 m długości, a 1 cm² w przekroju, skoro mu udzielono 10 kalorji? Odp. 1,5 mm.

7. Chcąc oznaczyć temperaturę pieca domowego, umieszczono między węglami kulkę platynową, a gdy się rozżarzyła do temperatury ogniska, wrzucono kulkę do kalorymetru o 650 g wody przy 16° C. Kulka platynowa waży 138 g; woda w kalorymetrze ogrzała się do 26°; ciepło właściwe platyny średnie w tych warunkach wynosi 0,04. Odp. Temp. pieca wynosi okrągło 1200° C.

§ 44. Ruch ciepła.

1. Sposoby roznoszenia ciepła. Jakkolwiek ciepło nie jest materją („fluidem" w dawniejszym pojęciu), energja cieplna przenika z jednych ciał do innych, czyli zmienia miejsce w przestrzeni; stąd można mówić o ruchu ciepła, o prądzie ciepła.

Ciepło rozchodzi się w sposób trojaki: przez przewodnictwo, unoszenie i promieniowanie. Jakąkolwiek drogą to się odbywa, zawsze ciepło dąży od ciała cieplejszego do zimniejszego, nigdy zaś odwrotnie; wyrażenia w rodzaju „zimno dochodzi, chłód przenika" i t. p. są bezzasadne i znaczą tyle, co „ciepła ubywa". Przepływać może np. zimna woda, chłodne powietrze, wogóle jakaś materja, nie zaś „zimno", które jako przeciwstawienie ciepła, nie istnieje wcale.

Jeżeli np. lód sprawia pozornie zimno dokoła, wyziębia ciała otaczające, dzieje się to w ten sposób, że one oddają mu swe ciepło. Kamień w dotknięciu ręką wydaje się zimny, zabiera bowiem ciepło ręki.

Podobnie jak woda płynie zawsze z góry na dół, t. j. od wyższego poziomu do niższego, jak gaz uchodzi z miejsc o ciśnieniu większym do miejsc o mniejszym, i ciepło dąży zawsze z ciał o temperaturze wyższej do ciał o niższej.

Przepływ ciepła trwa dotąd, dopóki temperatura ciał się nie wyrówna, t. j. jedno ostygnie, drugie ogrzeje się do tej samej temperatury. Teoretycznie ruch cząsteczkowy ciała cieplejszego słabnie, ruch ciała zimniejszego się wzmaga, aż cząstki obu ciał osiągną jednakowe drgania.

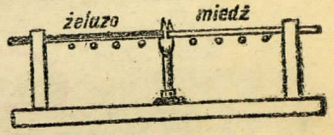
Porównanie. Gdyby kamień młyński, szybko wirujący, zetknąć z kamieniem, powolniej obracającym się na tej samej osi, pierwszy zwolniłby ruchu, drugi przyśpieszył, i oba kamienie osiągnęłyby tę samą szybkość.

2. Przewodnictwo polega na rozchodzeniu się ciepła o jednej cząstki ciała do drugiej, sąsiedniej, czyli przez masę ciał, tak iż wszystkie pośrednie cząstki kolejno się ogrzewają.

Istnieją *dobre i złe przewodniki ciepła*, czyli krócej przewodniki i nieprzewodniki. Przekonywają o tym powszednie spostrzeżenia: np. gwóźdź lub szczypce żelazne rozgrzewają się mocno aż do końca, skoro drugi koniec ich będzie w ogniu; drzazgę zaś lub papier można spalić prawie do końca, nie odczuwając gorąca, gdy trzymamy w ręku te ciała.

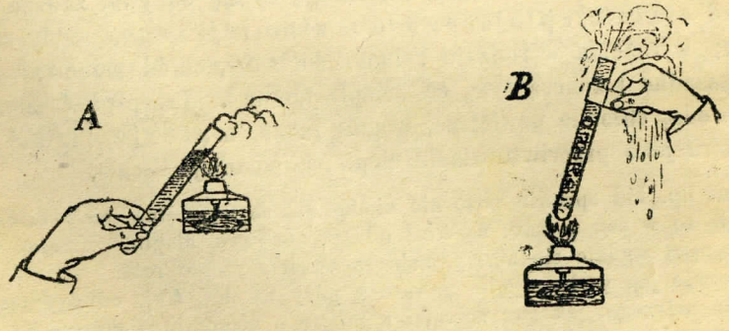
Z doświadczeń ściślejszych (rys. 222 i 223) wynika, że ciała stałe są najlepszymi przewodnikami ciepła, zwłaszcza metale. Płyny (z wyjątkiem rtęci) są złymi przewodnikami ciepła, najgorzej zaś przewodzą ciepło gazy i pary; przytym przewodnictwo gazu lub pary nie zależy od ich prężności, t. j. czy gaz jest rozrzedzony lub ścieśniony do pewnego stopnia.

Porównać można przewodnictwo rozmaitych ciał stałych na przyrządzie rys. 216, gdzie do jednakowych prętów, wyrobionych z tych ciał, przylepiono w równych odstępach kulki woskowe. Za ogrzaniem spojenia obu prętów, np. miedzi i żelaza, kulki odpadają kolejno wskutek stopienia, przytym pierwej od miedzi niż od żelaza.



Rys. 216.
Przewodnictwo ciał stałych.

Przewodnictwo płynów badamy najłatwiej, ogrzewając próbówkę, napełnioną płynem (rys. 217 *A*) i trzymaną pochyło tak, aby górny jej koniec był objęty płomieniem. Woda np. zagotuje się w górnej połowie próbówki, na dnie zaś pozostanie zimną, tak, iż nawet lód, przytrzymany na dnie próbówki, nie stopnieje.

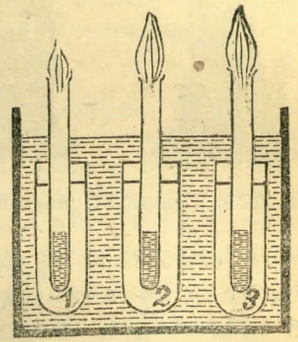


Rys. 217. Przewodnictwo płynów.

Jeżeli zaś ogrzejemy próbówkę (rys. 217 *B*) od spodu, woda zagotuje się w całej swej masie wskutek unoszenia ciepła (pt. poniżej).

W podobny sposób można stwierdzić przewodnictwo gazów, ogrzewając np. próbówkę napełnioną powietrzem; koniec jej można roztopić, gdy drugi koniec będzie zimny.

Doświadczenie Kundta (rys. 218) służy do porównania zdolności przewodzącej gazów, zarówno pod zwykłym ciśnieniem, jak rozrzedzonych. Kilka wąskich próbówek, zawierających nieco eteru, oprawiono szczelnie każdą do szerszej próbówki, zawierającej gaz pożądany. Np. próbówka 1 zawiera powietrze, 2 wodór pod ciśnieniem normalnym, 3 wodór silnie rozrzedzony. Próbówki zanurza się w naczyniu z ciepłą wodą, wskutek czego eter ogrzewa się tak, iż parę jego można zapalić u wylotu rurek; otrzymuje się w 1 płomień krótki, a 2 i 3 znacznie większy, a przytym w obu ostatnich jednakowy.



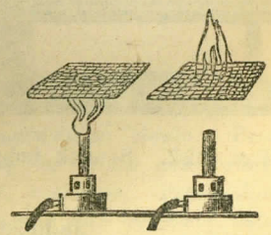
Rys. 218. Przewodnictwo gazów.

Doświadczenie Leidenfrosta (rys. 219) wykazuje złe przewodnictwo pary. Na rozpaloną do czerwoności blaszkę metalową puszcza się kroplę wody; woda długo się nie ulatnia, natomiast kręci się żywo na blasze, gdyż między blachą a wodą powstaje warstewka pary, chroniąca je od zetknięcia. Jeżeli metal będzie mniej rozgrzany, np. do 200°; kropla wody ulatnia się natychmiast (dlaczego?).

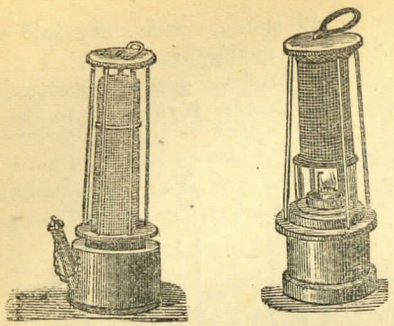

Rys. 219
Przewodnictwo pary.

Zastosowania. a) Złych przewodników: Okręcanie słomą drzewa. — Powłoka śnieżna na polach (znaczenie?). — Podwójne okna, drzwi; kasy ogniotrwałe.— Rączki drewniane do szczypców, samowarów i t. p. — Pakunki wojłokowe lub azbestowe przy rurach i kotłach parowych. — Wpływ kamienia kotłowego. — Ubiory zimowe wełniane, watowane, futra. — Upierzenie ptaków.

b) Dobrych przewodników: Kotły, rondle, patelnie miedziane. — Kolby miedziane do lutowania. — Metal lub kamień w chłodnym powietrzu wydaje się zimniejszy od drzewa, ponieważ prędzej odbiera ciepło naszemu ciału; przeciwnie, rozgrzany na słońcu wydaje się cieplejszy, niż drzewo (dlaczego?).


Rys. 220.
Siatka tłumi płomień.

Na dobrym przewodnictwie polega własność siatki metalowej, że płomień jej nie przenika. Skoro np. płomień gazu przetniemy gęstą siatką (rys. 220), ciepło tak obficie rozprasza się przez siatkę dokoła, że nad nią gaz się nie pali. Nawzajem, jeżeli najpierw puścimy strumień gazu, następnie go zapalimy nad siatką, to pod nią nie będzie płomienia. Na tej zasadzie polega *lampa bezpieczeństwa* Davy'ego (rys. 221), chroniąca górników od wybuchu gazów kopalnianych: lampa pali się w latarni z siatki drucianej, tak iż wybuch gazów może nastąpić tylko wewnątrz siatki, i lampa gaśnie.



Rys. 221. Lampa bezpieczeństwa.

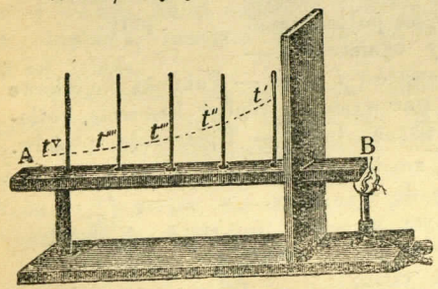
3. Spadek temperatury w przewodnikach. Przepływ ciepła w metalach przypomina przepływ wody w rurach; odbywa się jednak znacznie wolniej i z ogromną stratą, tak iż do końca długich przewodników, np. prętów metalowych, dochodzi zaledwie drobna część ciepła, jakie działa na koniec przeciwny. Jeszcze wolniej przepływa ciepło w cieczach.

Podobnie jak przy wypływie wody zachodzi spadek ciśnienia w rurze, przy rozchodzeniu się ciepła w przewodniku zachodzi *spadek temperatury*: jest to różnica temperatur w dwu miejscach na 1 cm odległości. Niech odległość pomiędzy dwoma termometrami, wpuszczonymi do pręta AB (rys. 222), wynosi l cm, a temperatury t_1 i t_2; wtedy

$$\text{spadek temperatury} = \frac{t_1 - t_2}{l}.$$

W doświadczeniu rys. 222 linja *ttt*... nie jest prosta, jak wymaga proporcjonalność, ale nieco zakrzywiona, z powodu rozpraszania się ciepła w powietrzu.

Woda, dążąc od wyższego poziomu do niższego, tworzy prąd, przyczym wielkość czyli wydatek prądu zależy od ciśnienia płynu (zatym od różnicy poziomów) i od oporu w rurze (zatym właściwości tej rury).



Rys. 222. Spadek temperatury.

Ciepło w przewodniku tworzy również rodzaj prądu, przyczym *prąd cieplny* rozumiemy jako ilość ciepła, przepływającą w ciągu sekundy; miarę tego prądu stanowi liczba kalorji, przepływająca w ciągu sekundy.

$$\text{Jednostka prądu cieplnego} = \frac{kal.}{sek.}$$

Prąd cieplny jest proporcjonalny do spadku temperatury, oczywiście w warunkach idealnych, gdyby zupełnie usunąć rozpraszanie ciepła. Im więcej zatym różni się temperatura na obu końcach pręta, oraz im pręt jest krótszy, tym więcej ciepła przezeń przepływa.

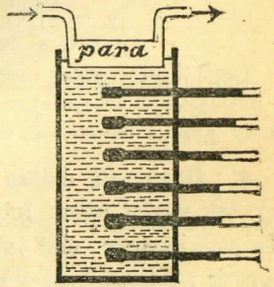
$$\text{Prąd cieplny} = k \times \text{spadek temperatury}.$$

Spółczynnik k jest liczbą zależną od rodzaju materji; stanowi on przewodnictwo danej materji. Stąd *przewodnictwo właściwe* jest to ilość ciepła, przechodząca na sekundę przez 1 cm², przy spadku temperatury 1° C na 1 cm długości przewodnika.

Wartość prądu cieplnego, wyrażającą przewodnictwo właściwe, można oznaczyć np. za pomocą przyrządu rys. 223, ogrzewając wodą wrzącą pręty metalowe, zanurzone drugim końcem w lodzie. Każdy gram stopionego lodu odpowiada pewnej ilości ciepła (80 małych kalorji); jeżeli np. jeden z prętów jest żelazny, drugi miedziany, to pierwszy z nich wytopi $6\frac{1}{2}$ razy mniej lodu, niż ostatni. Gdyby pomienione ciała miały tylko 1 cm długości i przekroju 1 cm², a różnica temperatury na końcach wynosiła 1° C, to w żelazie prąd cieplny wyniósłby 0,16, w miedzi 1,02 kalorji na sekundę.



Rys. 223. Prąd cieplny.



Rys. 224.

Dla płynów służy do oznaczenia przewodnictwa przyrząd, wyobrażony na rys. 224. Wysokie naczynie kalorymetryczne, napełnione badanym płynem, mieści kilka termometrów poziomych; płyn ogrzewa się z góry, przez zanurzenie w nim puszki o stałym przepływie pary. W ten sposób unika się unoszenia i mieszania się płynu, jakie zachodzi w razie ogrzewania od spodu (pt. „Konwekcja").

Doświadczenia podobne wykazują, że pierwsze miejsce pod względem przewodnictwa trzyma srebro (por. tabelkę); miedź mało ustępuje srebru. Z innych materji stałych węgiel najlepiej rozprowadza ciepło. Tkaniny organiczne, drzewo, słoma, papier, pierze należą do złych przewodników; miejsce pośrednie zajmuje szkło, glina, porcelana, kamienie. Przewodnictwo zależy do pewnego stopnia od temperatury; w ogóle zaś liczebnie daje się oznaczyć tylko w przybliżeniu niewielkim.

Załączona tabelka podaje ilość kalorji, przepływającą przez ciało o przekroju 1 cm² i długości 1 cm, w ciągu 1 sekundy, skoro różnica temperatury wynosi 1° C.

Przewodnictwo właściwe.
(w kalorjach na cm^3 i sekundę)

Srebro	1,15	Korek	0,0007
Miedź	1,04	Śnieg	0,0005
Mosiądz	0,27	Drzewo sosn. poprzecz.	0,0001
Żelazo przy 0°	0,21	Piasek	0,0001
„ „ 100°	0,16	Bawełna, wata	0,0004
Ołów	0,08	Rtęć	0,015
Piaskowiec	0,006	Nafta	0,0044
Wapień	0,005	Woda	0,0012
Lód	0,005	Spirytus	0,0005
Szkło	0,002	Wodór	0,00032
Cegła	0,0017	Powietrze	0,00006

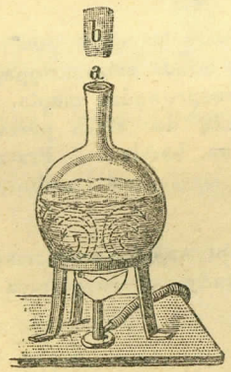
Dogodniej bywa nieraz wyrazić przewodnictwo względne ciał w odsetkach, przyjmując przewodnictwo srebra, jako najwyższe = 100; wtedy przew. żelaza = 14, ołowiu 7, wody $\frac{1}{10}$, powietrza $\frac{1}{200}$ i t. d.

4. **Unoszenie ciepła** czyli **konwekcja** jest to rozchodzenie się ciepła wskutek ruchu płynu lub gazu, a zatym wraz z materją. Za ogrzaniem bowiem gęstość ciał się zmniejsza, stąd ciecz lub gaz wypływa na wierzch z otaczającej go masy zimniejszej; na to miejsce przypływają cząstki sąsiednie, tak iż powstaje ciągły prąd cieczy lub gazu, a stąd nieraz krążenie ciepła, które jest właściwie krążeniem materji ogrzanej.

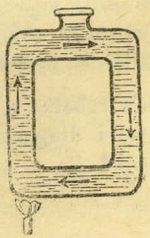
Doświadczenia. 1) Za ogrzaniem próbówki (rys. 217 *B*), od dołu, woda w niej wkrótce się zagotuje.

2) W naczyniu obszernym, np. w garnku, w kolbie (rys. 225), prądy wodne można okazać, dodając trocin do wody ogrzewanej: woda pośrodku się podnosi, przy ścianach opada, powierzchnię bowiem i ściany chłodzi otaczające powietrze.

3) Krążenie wody ogrzanej w rurze (rys. 226), zamkniętej w sobie, skoro ją się ogrzewa z jednej strony, np. z lewej na rysunku.

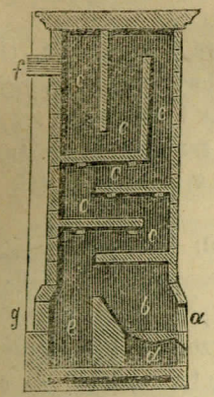


Rys. 225.

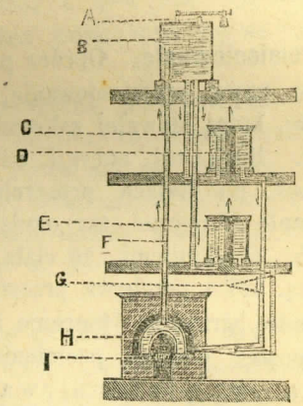


Rys. 226.

Inne objawy i zastosowania konwekcji. Prądy powietrza w pokoju koło pieca rozpalonego można okazać za pomocą papierowego wiatraczka (węża). — Ciąg powietrza w piecu (rys. 227).



Rys. 227.
Piec pokojowy w przekroju.



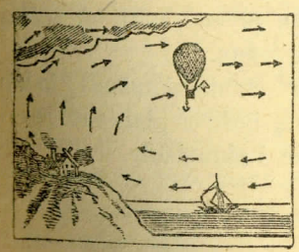
Rys. 228.
Kaloryfer wodny.

Ogrzewanie centralne wodą gorącą za pomocą *kaloryferów*; zasadę urządzenia objaśnia rys. 228. Woda gorąca z kotła *H* dąży do zbiornika *B* ponad piętrem najwyższym, stamtąd rozchodzi się do kaloryferów *D*, *E* itd., poczym wyziębiona wraca rurami *G* do kotła.

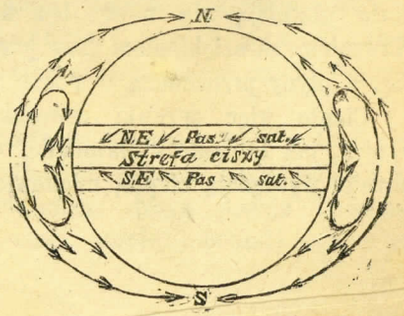
We drzwiach uchylonych z pokoju do chłodnej sieni, płomień świecy zwraca się u góry w stronę sieni, na dole w stronę pokoju. — Prądy morskie (Golfstream). — Ogrzewanie powietrzne. — Wentylatory. — Szkła w lampach.

Wiatr nadbrzeżny (rys. 229) wieje za dnia od strony morza, ponieważ ląd rozgrzewa się mocniej, niż woda. W nocy przeciwnie, wiatr ma kierunek od lądu ku morzu, ponieważ ziemia ostyga prędzej, niż woda, tak iż staje się zimniejsza od tej ostatniej.

Pasaty (wiatry alizejskie, rys. 230) czyli wiatry stałe, mają również źródło w nierównym ogrzewaniu ziemi od słońca. Pod równikiem powietrze silnie rozgrzane wznosi się i dąży ku strefom umiarkowanym;



Rys. 229. Przebieg wiatrów nadbrzeżnych.



Rys. 230. Przebieg pasatów.

nawzajem, prąd zimniejszego powietrza płynie ku równikowi. Stąd na obu półkulach wieją wiatry od zwrotników do równika. Jednakże wiatry te, wskutek obrotu ziemi, doznają odchylenia ku zachodowi, tak iż na północnej półkuli wieje wiatr z północo-wschodu, na południowej z południo-wschodu.

5. Promieniowanie. Oprócz przewodnictwa i unoszenia, ciepło rozchodzi się przez promieniowanie, t. j. odrębny rodzaj energji, zwanej *promienistą*, którą dawniej zaliczano do ciepła i nazywano *ciepłem promienistym*. Ruch tej energji odbywa się zarówno w próżni, jak nawskroś ciał, po linjach prostych czyli promieniach; tak rozchodzi się np. ciepło słoneczne, żar ogniska.

Obecnie przyjmujemy, że ciała ogrzane lub świecące wydają energję promienistą, która przebywa przestrzeń nieograniczoną, a trafiając ciała, sprawia znów ogrzanie, świecenie i t. p. Ciepło tutaj przeobraża się w inną postać energji, promienistą, t. j. przestaje być ciepłem. Stąd nauka o t. zw. promieniowaniu ciepła należy do odrębnego działu fizyki, obejmującego wszelkie objawy energji promienistej (pt.).

Teoretycznie biorąc, ruch drgający, bezładny, cząstek materjalnych przechodzi w ruch falowy eteru (pt.), który wypełnia zarówno próżnię, jak najmniejsze pory międzycząstkowe; fale zaś eteru, padając na ciała, pobudzają ich cząstki do ruchu.

C) ZMIANY STANU SKUPIENIA.

§ 45. Topnienie i krzepnięcie.

1. Rodzaje zmian pod wpływem ciepła. Podział ciał na stałe, płynne i lotne dotyczy temperatury zwykłej, w jakiej żyjemy. Za ogrzaniem dość silnym ciała stałe przechodzą w stan płynny, czyli topią się, a płyny przechodzą w stan lotny, czyli ulatniają się; niektóre zaś ciała stałe ulatniają się nawet bez stopienia, np. lód, kamfora, jod, węgiel. Nawzajem, za oziębieniem gazy przechodzą w stan płynny, czyli skraplają się, a płyny przechodzą w postać stałą, czyli krzepną.

Ciepło więc sprawia czworakie zmiany w stanie skupienia, jedne z nich, jak topienie i ulatnianie, zużywają pewną ilość ciepła; inne przeciwnie, wywiązują ciepło, mianowicie krzepnięcie i skraplanie.

2. Topnieniem zowie się przemiana ciała stałego na płynne wskutek ogrzewania. Jeżeli podobna zmiana skupienia zachodzi przy udziale płynu, zowie się *rozpuszczaniem*. Np. cukier topi się nad płomieniem świecy, a rozpuszcza się w wodzie, w obu zaś wypadkach cukier przechodzi w stan płynny; podobnież wosk topi się na ogniu, a rozpuszcza się w terpentynie.

Krzepnięcie stanowi przemianę odwrotną, płynu na ciało stałe, wskutek oziębienia. Skoro krzepnięcie odbywa się w temperaturze 0° lub niżej, otrzymuje miano *zamarzania*; skoro zaś ma miejsce w ten sposób, że z roztworu osiada ciało stałe, zowie się *krystalizacją*. Np. masło, parafina roztopiona krzepnie za oziębieniem; woda, rtęć zamarza; sól, saletra krystalizuje po rozpuszczeniu w wodzie na gorąco i ostudzeniu albo odparowaniu wody.

3. Prawa topnienia. 1) Każde ciało stałe można ogrzać tylko do pewnej temperatury, zwanej *punktem topliwości*; jest on zarazem temperaturą krzepnięcia, czyli *punktem krzepnięcia* danego ciała.

2) Podczas topnienia ciało nie podlega żadnym zmianom temperatury, jakkolwiekby je ogrzewano lub oziębiano. Ciepło idzie tutaj na pokonanie spójności, czyli na rozluźnienie cząstek ciała stałego; praca cieplna zamienia się na energję potencjalną cząstek i nagromadza się w płynie.

Z wyjątkiem ciał, rozkładających się chemicznie od gorąca, jak np. drzewo, guma, wszelkie ciała można stopić przez odpowiednie ogrzanie. Dotychczas tylko węgiel opiera się stopieniu, przynajmniej pod zwykłym ciśnieniem. Przejście z jednego stanu do drugiego zwykle odbywa się raptownie, t. j. ciało jest albo stałe, albo wyraźnie płynne. Niektóre tylko materje przechodzą pośredni stan ciastowaty, nawpół stały, np. masło, wosk, żelazo.

Na tej właściwości żelaza polega spajanie rozpalonego do białości żelaza od uderzeń młota; czynność ta zowie się spawaniem (szwejsowaniem).

4. Ciepło topnienia, zwane dawniej *ciepłem utajonym* (gdyż nie ujawnia się zmianami temperatury), jest to ilość ciepła, niezbędna do stopienia 1 kg ciała; przyczym rozumie się, że ciało ogrzane uprzednio do punktu topliwości.

Należy odróżniać ciepło topnienia od temperatury topliwości. Pierwsze wyraża się w kalorjach i stanowi pewien zasób energji, potrzebny do przemiany ciała stałego na ciecz; drugą podaje termometr w stopniach, oznaczając pewien stan ciała, stopień ogrzania jego w czasie topnienia.

Ciało może mieć wysoki punkt topliwości, a małe ciepło topnienia, t. j. trzeba silnego ogrzania, by zaczęło się topić, ale na samo stopienie zużywa się ciepła niewiele, np. dla rozmaitych metali; albo przeciwnie, ciało zaczyna się topić przy słabym ogrzaniu, ale na jego stopienie potrzeba dużej ilości ciepła, np. dla lodu (por. tabelkę).

Temperatura topliwości i ciepło topnienia.

Materja	Temp. topl.	Ilość ciepła	Materja	Temp. topl.	Ilość ciepła
Platyna . . .	1750°	27 kal.	Cyna	230°	13,3 kal.
Żelazo (surowiec)	1200°	33 „	Siarka	111°	9,4 „
Srebro	1000°	21 „	Wosk	65°	42 „
Cynk	420°	28 „	Lód	0°	80 „
Ołów	330°	5,8 „	Rtęć	—39°	2,8 „

5. Oznaczanie ciepła topnienia (ciepła utajonego) uskutecznia się za pomocą kalorymetru (rys. 258). Ciało o masie m_1 kg, ogrzane powyżej punktu topliwości do temperatury t_1, stygnie za wrzuceniem do m_2 kg wody o temp. t_2, na razie do punktu krzepnięcia, czyli punktu topliwości t; następnie, krzepnąc, oddaje ciepło utajone topnienia, wreszcie ostyga do temperatury ostatecznej mieszaniny t_3.

Oznaczając c_1 ciepło właściwe ciała w stanie stopionym, c w stanie stałym, u ciepło utajone, otrzymamy równanie:

$$m_1 c_1 (t_1 - t) + m_1 u + m_1 c (t - t_3) = m_2 (t_3 - t_2)$$

z którego się wyznacza poszukiwane ciepło topnienia u.

6. Zmiana objętości. Gdy ciało się topi, objętość jego wzrasta cokolwiek; w czasie krzepnięcia objętość się zmniejsza. Wyjątek stanowi lód, surowiec i kilka rzadszych materji.

Woda rozszerza się przy zamarzaniu prawie o $\frac{1}{10}$ swej objętości, tak iż z 10 litrów wody wypada około 11 litrów lodu.

Rozszerzalność wody w chwili powstawania lodu odgrywa rolę wybitną w przyrodzie i życiu codziennym: stąd lód, jako lżejszy, pływa po wodzie (kra, lodowce podbiegunowe); stąd pękanie i rozsypywanie się skał, gdy woda marznie w porach kamienia; pękanie rur wodociągowych i gazowych w zimie; pękanie od mrozu butelek z sokami, winem.

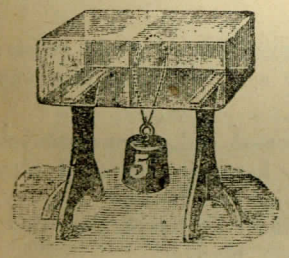


Rys. 231.

Doświadczalnie można okazać siłę rozszerzalności marznącej wody, napełniwszy wodą kulę żelazną i zaśrubowawszy jej otwór; kula, wystawiona na mróz, ulega rozsadzeniu (rys. 231).

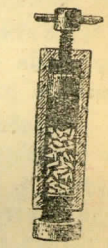
7. Zmiany punktu topliwości. a) Pod zwiększonym ciśnieniem ciała wogóle topią się w wyższej temperaturze. Podwyższenie to zresztą punktu topliwości jest bardzo nieznaczne, tak iż przy ciśnieniach zwykle praktykowanych nie daje się prawie zauważyć, np. przy zmianach ciśnienia barometrycznego od pogody, od wzniesienia.

Podwyższenie punktu topliwości od ciśnienia można zrozumieć w ten sposób, że ciało, topiąc się, rozszerza się zarazem, musi więc pokonywać ciśnienie zewnętrzne. Ciała zaś wyjątkowe, jak lód, który przeciwnie kurczy się przy topnieniu, mają niższy punkt topliwości pod naciskiem.



Rys. 232.
Zmarzanie lodu.

Osobliwa ta własność lodu sprawia zmarzanie kawałków lodu pod ciśnieniem; naciskane bowiem miejsca topnieją i zlewają się, a pozbawione następnie ucisku, zamarzają na nowo. W ten sposób lód staje się jak gdyby plastyczny, daje się urabiać w dowolne kształty.



Rys. 233.

Doświadczenia. 1) Odłam lodu można przeciąć drutem, przewieszonym przezeń i obciążonym; części jednak rozdzielone zmarzają na nowo po przejściu drutu (rys. 232). Lód taje od ciśnienia.

2) Napełnia się rurę żelazną lodem potłuczonym, kładzie się na wierzch kulę i przez zakręcenie śruby wywiera się nacisk na lód (rys. 233). Po wyjęciu śruby kula się znajdzie na spodzie rury, a lód utworzy masę jednolitą, z dokładnym odciskiem kuli (doświadczenie Moussona, rys. 233).

Inne przykłady. Robienie gałek ze śniegu, ustawianie bałwanów; przy dłuższym ugniataniu powstaje z kuli śnieżnej lód jednostajny. — Tworzenie się lodowców w górach wskutek zmarzania warstw śnieżnych pod ciężarem warstw na nich osiadających; zsuwanie się lodowców po stokach gór. — Odciskanie monet na lodzie.

b) Stopy metalów topią się łatwiej, niż ich składniki, wzięte osobno. Przed stopieniem zwykle miękną i przechodzą w stan półpłynny, ponieważ metale składowe tworzą z sobą związki o rozmaitych punktach topliwości i stopienie ich zachodzi kolejno.

Lut, czyli metal do lutowania, topi się około 180° C, chociaż cyna i ołów, z jakich się składa, mają wyższe punkty topliwości. — Metal Wooda, złożony z 4 części bizmutu, 2 ołowiu, 1 cyny, 1 kadmu, topi się przy 65°, np. w gorącej wodzie, jakkolwiek najłatwiej topliwy z metalów składowych, cyna topi się przy 230°.

8. Krzepnięcie. W czasie krzepnięcia wywiązuje się ciepło, mianowicie uwalnia się tyle ciepła, ile go zużyto na stopienie danego ciała. Np. ciepło topliwości lodu wynosi 80 kalorji, t. j potrzeba 80 kalorji do stopienia 1 kg lodu; nawzajem, przy zamarzaniu wody wywiązuje się ciepło w ilości również 80 kalorji.

Szybki ruch cieczy utrudnia zamarzanie; np. woda w rzekach o bystrym prądzie okrywa się lodem dopiero na mrozie kilkostopniowym, wodospady nie zamarzają całkowicie w ciągu zimy.

W myśl teorji ciepła, zachodzi podczas krzepnięcia zamiana energji potencjalnej, nagromadzonej w płynie przy topnieniu, napowrót na energję kinetyczną.

Roztwory wodne mają niższy punkt zamarzania, niż woda czysta; np. woda morska marznie około — $2\frac{1}{2}^0$ C, roztwór soli kuchennej nasycony marznie przy — 8° C.

Podobna zniżka punktu krzepnięcia dotyczy również ciał, rozpuszczonych w innych płynach. Przytym w słabych roztworach krzepnie najprzód płyn czysty, t. j. rozpuszczalnik, a roztwór przez to staje się bardziej stężony, punkt krzepnięcia się obniża; wreszcie roztwór dochodzi do nasycenia, wtedy wydziela się i ciało rozpuszczone wraz z krzepnącym płynem.

Na tej zasadzie polega wydzielanie soli z wody morskiej w krajach zimnych, np. na pobrzeżach oceanu Lodowatego. — Porty morza Północnego są dłużej wolne od lodu. niż morza Baltyckiego, z powodu większej zawartości soli. — Usuwanie śniegu z szyn tramwajowych przez posypywanie solą.— Czyszczenie okien zamarzniętych przy pomocy soli.

Dla roztworów słabych obniżenie punktu zamarzania jest proporcjonalne do ilości materji rozpuszczonej, a zarazem do ciśnienia osmotycznego (pt.). Na tej zasadzie pomiar ciśnienia osmotycznego, który bywa mozolny i mało dokładny, zastępuje się przez oznaczenie zniżki punktu zamarzania. Zniżka ta jest dla danego płynu odwrotnie proporcjonalna do wagi cząsteczkowej materji. Obie powyższe zależności mają doniosłe znaczenie dla teorji roztworów w chemji fizycznej.

Przechłodzenie. Ciecz spokojną, zwłaszcza w wąskim naczyniu, można oziębić znacznie poniżej punktu krzepnięcia; za wstrząśnieniem jednak ciecz tak przechłodzona krzepnie raptownie, przyczem temperatura jej podnosi się do normalnego punktu krzepnięcia.

Przykłady. Wodę można w rurce przechłodzić do — 10°; po wrzuceniu zaś okrucha lodu lub trąceniu rurki woda nagle marznie i okazuje temperaturę 0°. — Podobnież dają się przechłodzić roztwory soli glauberskiej, natronu czyli utrwalacza fotograficznego, octanu sodowego i t. p.; za wrzuceniem jednak do takiego przesyconego roztworu kryształka tej samej soli, wywołujemy naglą krystalizację soli, połączoną ze znacznym rozgrzaniem. — Siarka stopiona może ostygnąć do temperatury pokojowej, pozostając płynną; z wstrząśnięciem jednak krzepnie natychmiastowo, a temperatura jej podskakuje do punktu topliwości 111°. — W roślinach przechłodzeniem soków w naczyniach włoskowatych można objaśnić wytrzymałość ich do pewnego stopnia na mrozy.

Wszystkie powyższe zjawiska dowodzą wyzwalania się ciepła przy każdej zamianie płynu w ciało stałe: przy krzepnięciu, zamarzaniu, krystalizacji.

9. Mieszaniny oziębiające. Rozpuszczanie ciała stałego w płynie polega na przemianie ciała w stan płynny, zużywa więc również pewną ilość ciepła na pokonanie spójności. Stąd roztwór oziębia się tymbardziej, im prędzej ciało się rozpuszcza i im większe ma ciepło topnienia, czyli ciepło rozpuszczania.

Na tej właściwości polegają mieszaniny oziębiające, służące do wyrobu lodów, wytwarzania sztucznego lodu, skraplania gazów mniej opornych i t. p.

Powszechnie używa się mieszaniny śniegu albo lodu (3 części) z solą zwyczajną (1 cz.), która oziębia o 17° C, np. temperatura 10° C spada do — 7° C.

Inne mieszaniny praktyczne:

10 cz. śniegu z 7 cz. chlorku wapnia (obniżenie temp. o 55°).
8 cz. soli glauberskiej z 5 cz. kwasu solnego (obniżenie 27°).

10. Znaczenie wysokiego ciepła „utajonego" wody. W krajach zimnych i umiarkowanych, gdzie wody na zimę zamarzają, uwalniają one ogromną ilość ciepła do atmosfery; lody zaś i śniegi, tając na wiosnę, zabierają przez to z promieni słonecznych również znaczną ilość energji. Jedno i drugie wpływa łagodząco na zmiany temperatury, zabezpiecza bowiem od raptownego nastania tęgich mrozów na jesieni, a upałów na wiosnę. Póki wody nie okryją się całkowicie lodem, temperatura powietrza nie może spaść znacznie poniżej 0°; póki zaś nie spłyną lody i śniegi, powietrze nie może się ogrzać znacznie ponad 0°.

Okłady z lodu. — Połykanie kawałków lodu. = Chłodzenie lodem produktów spożywczych. — Lody. — Dlaczego w czasie śnieżycy nie bywa silnych mrozów?

Zadania i zagadnienia.

1. Co zawiera więcej ciepła: woda w stągwi, gdzie termometr wskazuje 0°, czy równej wagi bryła lodu 0°? Co posiada wyższą temperaturę?

2. Jaką temperaturę osiągnie mieszanina 1 kg wody wrzącej (100°) z 1 kg śniegu (0°)? Odp. 10°.

3. Ile lodu trzeba dodać do 300 g wody o temp. 22°, aby ją ostudzić do 10°? Odp. 45 g.

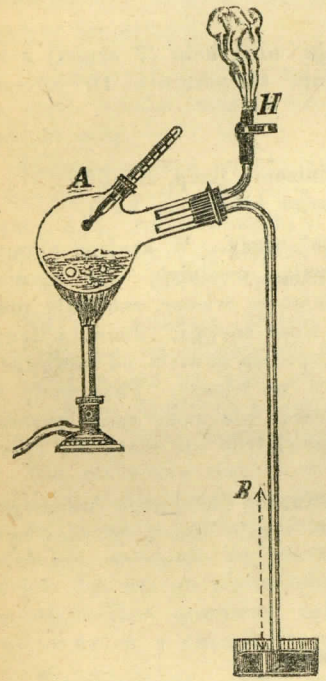
4. Ile węgla drzewnego wypadnie spalić na stopienie 60 kg ołowiu o temp. 20°, jeżeli 1 kg węgla wydaje 7000 kalorji, z których 70% marnuje się w otoczeniu?

Rozw. Na ogrzanie ołowiu od 20° do 330° zużywa się 60 . (330—20) . . 0,03=558 kal., na stopienie idzie 60 . 5,8=348 kal., ogółem 906 kal. Węgiel wydaje użytecznych 0,3 . 7000=2100 kal. z 1 kg; wyjdzie więc węgla 906 : 2100=0,43 kg.

§ 46. Ulatnianie i skraplanie.

1. Ulatnianiem zowie się przemiana cieczy w stan lotny czyli parę. Skoro zachodzi niewidzialnie, tylko na powierzchni cieczy, zowie się *parowaniem*; skoro zaś burzliwie, w całej masie cieczy, *wrzeniem* lub *gotowaniem*.

Z roztworów ciał stałych w cieczy ulatnia się tylko ciecz sama, ciało zaś rozpuszczone pozostaje w naczyniu.



Rys. 234.

2. Prawa wrzenia (pod niezmiennym ciśnieniem). 1) Każdy płyn można ogrzać tylko do pewnej temperatury, zwanej *punktem wrzenia*.

2) Podczas wrzenia temperatura nie ulega żadnej zmianie, jakkolwiekby ciecz ogrzewano.

Na wrzenie, zarówno jak i parowanie, zużywa się ciepło w ilości oznaczonej, a dla każdego płynu odmiennej. Ilość ciepła, potrzebna do wyparowanie 1 kg wrzącego płynu, zowie się *ciepłem parowania* (dawniej zwano je *ciepłem utajonym*); płyn zamienia się w parę o tej samej temperaturze.

Ciepło tu nie sprawia ogrzewania, ponieważ idzie na pracę mechaniczną: pokonanie spójności cząstek, nadanie im pewnej siły żywej (por. kinetyczną teorję gazów), tudzież na pokonanie ciśnienia powietrza.

Punkt wrzenia należy rozumieć jako temperaturę, przy której prężność pary pokonywa ciśnienie atmosfery.

Doświadczenie (rys. 234). W kolbie z wylotem H i rurą B, zanurzoną do rtęci, gotuje się płyn jakikolwiek. Termometr wskazuje punkt wrzenia, rtęć zaś w rurze stoi na tym samym poziomie, co w miseczce, świadcząc, że prężność pary = ciśnieniu atmosfery.

Temperatura wrzenia i ciepło parowania.

(pod ciśnieniem normalnym)

Rodzaj materji	Temp. wrzenia	Ciepło parow.
Eter zwykły	35°	90 kalorji
Spirytus	79°	210 „
Woda	100°	537 „
Kwas siarczany	320°	122 „
Rtęć	357°	62 „
Cynk	1000°	—
Srebro	2000°	—

3. Parowanie. Płyn paruje tym szybciej, im wyższą ma temperaturę i większą powierzchnię, jakoteż im słabsze jest ciśnienie zewnętrzne; nadto parowanie zależy od właściwości płynu.

Przykłady. Nalewa się jednakową ilość wody, spirytusu, eteru, każdą z osobna, do jednakowych miseczek; najpierw ulotni się eter, później spirytus, w końcu woda. — Doświadczenie to można wykonać prędzej, maczając paski bibuły w każdej z tych cieczy. — Eter lub benzyna, ogrzane, prędzej się ulotnią, niż zimne. — Kropla wody, wpuszczona do klosza, napełnionego suchym powietrzem, długo się w nim trzyma, zanim wyparuje; wpuszczona do klosza o powietrzu mocno rozrzedzonym, ulatnia się prędko.

Niektóre ciecze parują w stanie zimnym nadzwyczaj powolnie, np. rtęć, gliceryna. Kwas siarczany zimny (poniżej 30°) wcale nie paruje, nawet w próżni.

4. Skraplanie. Za oziębieniem pary do temperatury wrzenia płynu lub poniżej, para tego płynu skrapla się czyli przechodzi w stan płynny. Przy skraplaniu wywiązuje się ciepło w tej samej ilości, jaka była zużyta na wyparowanie płynu w danej temperaturze. Innemi słowy, ciepło parowania uwalnia się przy skraplaniu.

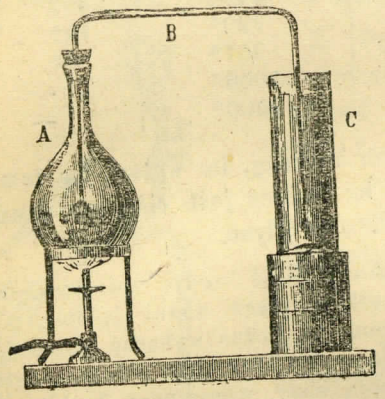
Stąd ciepło parowania można również nazwać ciepłem skraplania; jest ono ciepłem utajonym, gdyż nie ujawnia się w zmianach temperatury, na termometrze, ani w dotknięciu, przy skraplaniu energja potencjalna przechodzi w równoważną energję kinetyczną.

5. Oznaczanie ciepła parowania (ciepła utajonego pary). Parę powstałą z wygotowania m_1 kg cieczy, o temperaturze wrzenia t_1, wpuszcza się do kalorymetru (rys. 235), mieszczącego m_2 kg wody o temp. t_2. Podczas skraplania para oddaje swe ciepło utajone u, a następnie ciecz utworzona, o cieple właściwem c_1, stygnie do temperatury ostatecznej t mieszaniny. Z równania:

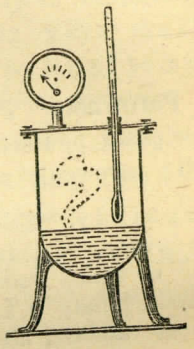
$$m_1 u + m_1 c_1 (t_1 - t) = m_2 (t - t_2)$$

wyznacza się ciepło poszukiwane u.

Dla pary wodnej ciepło parowania można oznaczyć sposobem uproszczonym Blacka (rys. 235). Wprowadza się parę wody wrzącej do dużej ilości wody zimnej, odważonej w kalorymetrze C, i oznacza się przybytek wody i temperatury. Np. do 9 kg wody o temperaturze 0° wpuszczono tyle pary, że przybyło wody 1 kg., a temperatura wynosi 63,7°; woda więc kalorymetru, w ilości ogólnej 10 kg, otrzymała $63,7 \times 10 = 637$ kalorji. Że zaś na ogrzanie 1 kg wody w kolbie A od 0° do 100° poszło 100 kalorji, reszta $637 - 100 = 537$ kalorji pochodzi ze skroplenia pary. Zatym skroplenie 1 kg pary wydaje 537 kalorji.



Rys. 235. Para oddaje ciepło.



Rys. 236. Kocioł Papina.

5. Zmiany punktu wrzenia normalnego. a) Wpływ ciśnienia. Ciecz wrząca przemienia się raptownie na parę, która musi pokonywać ciśnienie zewnętrzne. Im większe jest to ciśnienie, tym wyższy być musi punkt wrzenia; nawzajem, obniża się on za zmniejszeniem ciśnienia.

Zwykle zmiany ciśnienia atmosferycznego wpływają już wyraźnie na czuły termometr, zanurzony do wrzącej wody. Należy to mieć na uwadze przy sporządzaniu podziałki termometru.

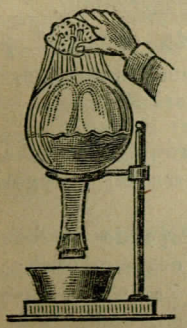
Wrzenie pod zwiększonym ciśnieniem stosuje *kocioł Papina* (1650, rys. 236). Jest to naczynie z grubej blachy, dobrze uszczelnione i opatrzone klapą bezpieczeństwa (na rysunku pominiętą), t. j. zamknięciem ruchomym, regulującym ciśnienie; naciskając klapę mocniej lub słabiej, można zmieniać punkt wrzenia wody.

Do kociołka przystosowano nadto manometr i termometr; w ten sposób wyznacza się zależność między temperaturą wrzenia a ciśnieniem (por. tabelkę).

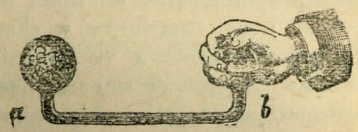
W praktycznym użyciu przyrząd ten służy do wyciągania części pożywnych z kości, do rozgotowania chrząstek i innych części zwierzęcych na klej, jako warnik gałganów w papierniach i t. p. W postaci odmiennej stanowi kocioł parowy, część zasadniczą maszyn parowych (pt.).

Wrzenie pod zmniejszonym ciśnieniem. 1) Woda, spirytus, eter gotują się za słabym ogrzaniem, a nawet przy zwykłej temperaturze pokojowej, skoro je umieścimy pod kloszem maszyny pneumatycznej i wyciągamy powietrze.

1) Flaszkę, do połowy napełnioną wodą, ogrzewa się do zagotowania wody, i zatkawszy korkiem, odwraca się dnem do góry (rys. 237). We flaszce pozostała nad wodą tylko para wodna, powietrze bowiem zostało usunięte w czasie wrzenia. Przy nagłym oziębianiu z góry, np. mokrą gąbką, para się skrapla, ciśnienie spada i woda zaczyna się znowu gotować.



Rys. 237.



Rys. 238. War Franklina.

3) *War Franklina* (rys. 238) polega na podobnej zasadzie, a ma tę dogodność, że jest zawsze gotów do użycia. Bańki a i b są do połowy napełnione spirytusem, rura zaś łączna całkowicie; powietrze z baniek usunięto raz na zawsze. Za ujęciem b ręką para pędzi spirytus do a, gdzie następuje gwałtowne wrzenie.

4) Na wyżynach woda wrze przy temperaturze tym niższej, im znaczniejsze jest wyniesienie. Na tej zasadzie można oznaczyć wysokość danej miejscowości nad poziomem morza. Np. na szczycie Mont Blanc, 4800 m wysokości, gdzie barometr wskazuje 417 mm, punkt wrzenia wody=84° C. Dla niewielkich wyniesień, jak w naszym kraju, punkt wrzenia wody obniża się średnio o $\frac{1}{286}$° C na 1 m wysokości. W Warszawie woda gotuje się zwykle przy 99,6° C, gdyż średnie wyniesienie miasta = 110 m.

Punkt wrzenia wody pod ciśnieniem:

720 mm	98,5°	1 atm	100°
730 „	98,3°	2 „	121°
740 „	98,3°	3 „	134°
750 „	99,6°	4 „	144°
760 „	100,0°	5 „	152°
770 „	100,4°	10 „	180°
780 „	100,8°	15 „	199°

Nawzajem, tabelka niniejsza podaje prężność pary wodnej przy temperaturach wymienionych.

b) Zawartość soli lub innych ciał stałych w roztworze podnosi punkt wrzenia. Im większe jest stężenie roztworu, tym jest wyższa temperatura wrzenia; nadto zależy temperatura wrzenia od rodzaju materji rozpuszczonej. Np. woda morska wrze przy 104° C, roztwór soli nasycony przy 110° C, roztwór potażu przy 135°. Para jednak posiada temperaturę taką, jakąby miał wrzący czysty rozpuszczalnik.

Podwyższenie punktu wrzenia objaśnia fakt, że prężność pary nad roztworem jest mniejsza, niż nad czystym rozpuszczalnikiem, przy tej samej temperaturze.

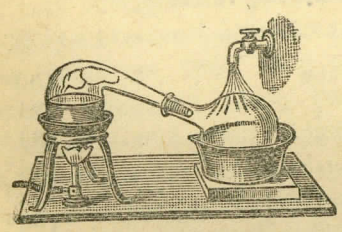
Podobnie jak obniżenie punktu zamarzania, również zwyżka punktu wrzenia jest proporcjonalna do ilości materji rozpuszczonej i stanowi ważny przyczynek do teorji roztworów w chemji fizycznej.

c) *Przegrzanie* (zwłoka we wrzeniu). Wodę zupełnie pozbawioną powietrza można przegrzać, w naczyniach starannie oczyszczonych, o kilka i więcej stopni ponad jej zwykły punkt wrzenia. Za wrzuceniem jednak okruchów metalu, albo piasku, bądź za wstrząśnieniem, woda nagle zaczyna kipieć. Objaśnia się to ścisłym przyleganiem wody do ścian naczynia: para musi wtedy posiąść większą prężność, aby oderwać cząstki płynu od ściany, zarówno jak od siebie: dodatek ciał obcych lub poruszenie ułatwia to zadanie.

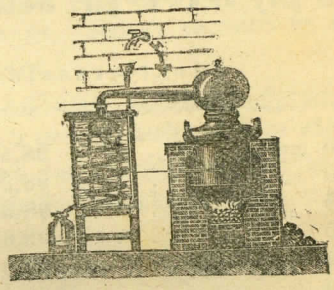
Oleje, roztwory mydła okazują zjawisko przegrzania w stopniu jeszcze wyższym, tak iż gotują się nader burzliwie.

6. Zastosowania parowania i wrzenia. *Gotowanie* zwykle ma na celu bądź wyciąganie części pożywnych, środków leczniczych, barwików i t. p., bądź rozmiękczanie, jak owoców, jarzyn, korzeni i t. p., bądź usuwanie powietrza rozpuszczonego, np. z wody.

Dystylacja (przekraplanie, przepędzanie), służy do oczyszczenia płynu od wszelkich ciał stałych w nim zawartych, t. j. rozpuszczonych, jakoteż zawieszonych, czyli mętów, albo też do oddzielenia płynu lotniejszego od mniej lotnego; w ostatnim wypadku ulatniający się płyn poddaje się ponownie dystylacji kilka razy, stąd dystylacja zowie się cząstkową.



Rys. 239. Dystylacja doświadczalna.



Rys. 240. Dystylacja techniczna.

Najprostszy przyrząd dystylacyjny (rys. 239) składa się z *retorty*, wstawionej szyjką do kolby (odbieralni), którą oziębia się wodą płynącą; tutaj skrapla się para, wytworzona przez gotowanie cieczy w retorcie.

W urządzeniach na większą skalę używa się kotła miedzianego, zwanego *alembikiem* (rys. 240), skąd para idzie przez rurę, zanurzoną w zimnej wodzie i zwiniętą spiralnie, zwaną *wężownicą*.

Dystylacja stosuje się na szeroką skalę w chemji i farmacji do otrzymania wody chemicznie czystej, czyli *dystylowanej*; w gorzelniach do pędzenia spirytusu z okowity, dalej do rozdzielenia produktów, zawartych w ropie naftowej, jako to benzyny, nafty, olejów i t. p.

Ogrzewanie. parowe (centralne) polega na rozprowadzaniu pary z kotła rurami po całym gmachu, statku lub pociągu; para skroplona powraca znowu do kotła.

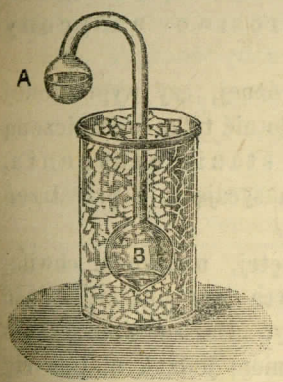
Wysychanie: Suszenie grzybów, owoców. — Uwiąd roślin, owoców. — Wysychanie kałuż. — Osiadanie soli na dnie jezior, stąd pokłady solne w kopalniach, na stepach. — Tworzenie się sopli wapiennych w jaskiniach, czyli stalaktytów.

7. Zimno wskutek parowania. Parowanie płynu przy zwykłej temperaturze pochłania ciepło, podobnie jak gotowanie tegoż płynu. Ciepło to płyn pobiera z otoczenia i z własnego swego zasobu, oziębia się mniej lub więcej wyraźnie.

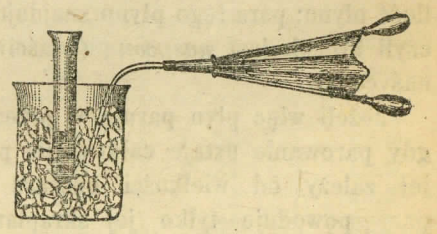
Na tej zasadzie polegają różne środki oziębiające i zamrażające.

Doświadczenie Wollastona (rys. 241). Za pomocą własnego parowania można wodę zamrozić. Przyrząd do tego celu, zwany *krjoforem*, składa się z dwu baniek szklanych, złączonych rurką; powietrze z przyrządu wypędzono raz na zawsze, przez zagotowanie wody i jednoczesne zalutowanie. Skoro dolna bańka zostanie zanurzona do mieszaniny oziębiającej, np. lodu z solą, para wodna w bańce skrapla się tak szybko, że z górnej bańki powstaje obficie wciąż zapas pary, woda w niej się oziębia, aż wreszcie zamarza.

Znaczenie w przyrodzie. Wysokie ciepło utajone pary wodnej przyczynia się do złagodzenia upałów w krajach morskich podzwrotnikowych, gdzie parowanie odbywa się szybko. — Chłodniejszy klimat obszarów leśnych i miejscowości błotnistych, w porównaniu do sąsiednich miejscowości, ubogich w lasy i wody.



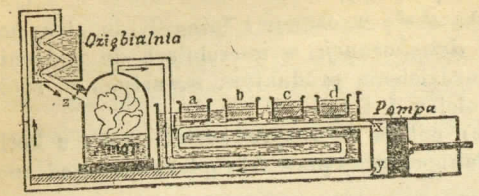
Rys. 241. Krjofor.



Rys. 242. Zamrażanie eterem.

Zastosowania. 1) Zamrażanie za pomocą eteru (rys. 242). Do szklanki wstawia się próbówkę z wodą i wnętrze szklanki dokoła próbówki wypełnia się watą. Po zwilżeniu waty eterem wdmuchuje się powietrze koło próbówki; po kilku minutach woda marznie.

2) *Lodownie sztuczne* korzystają z parowania amoniaku płynnego w próżni. Pompa wyciąga amoniak w postaci gazu ze zbiornika, zawierającego stężony roztwór tego gazu (rys. 243). Wskutek rozprężenia amoniak się ochładza, a prowadzony rurami przez ciecz oporną na zamarzanie, np. roztwór soli kuchennej, ochładza ją coraz bardziej, tak iż temperatura zniża się do —20° C. Woda, wstawiona do tej kąpieli w płaskich formach *a*, *b*, *c*, d, zamarza prędko. Amoniak przy tej czynności nie uchodzi, gdyż pompa wtłacza go znów do zbiornika, oziębiając przed wejściem do tegoż. Stąd pochodzi sztuczny l ó d t a f l o w y.



Rys. 243. Lodownia sztuczna.

3. *Zamrażalnie* produktów spożywczych, jako to mięsa, ryb i t. p., oraz *chłodnie* w browarach posiłkują się solanką, oziębioną w sposób poprzedni; solanka ta krąży rurami w odnośnych pomieszczeniach. Dzięki zimnu sztucznemu przechowują w krajach cieplejszych, zwłaszcza w Stanach Zjednoczonych i Australji, mięso świeże całemi miesiącami, oraz przewożą mięso, mleko, owoce na okrętach i kolejach (wagony-oziębialnie).

§ 47. Własności pary.

1. Stan nasycenia. Wytwarzanie się pary w przestrzeni zamkniętej ma pewne podobieństwo do rozpuszczania się ciała stałego w płynie.

W danym płynie, przy stałej temperaturze, można rozpuścić ograniczoną ilość ciała stałego, przyczym powstaje r o z t w ó r n a s y c o n y (por. § 31, art. 7).

Podobnież w danej przestrzeni, czy to próżnej, czy wypełnionej jakimś gazem, przy stałej temperaturze, można ulotnić tylko ograniczoną ilość płynu; para tego płynu znajduje się wtedy w s t a n i e n a s y c e n i a, czyli krócej: jest *nasyconą* (właściwie para jest nasycającą, a przestrzeń nasyconą).

Jeżeli więc płyn paruje w przestrzeni zamkniętej, nadchodzi chwila, gdy parowanie ustaje całkowicie; para wtedy nasyca dany obszar, a ilość jej zależy od wielkości obszaru i temperatury. Dalsze wpuszczanie pary powoduje tylko jej skraplanie. Za ogrzaniem jednak ulatnia się nowa ilość płynu; jeżeli go niema w zapasie tyle, ile wymaga wielkość obszaru i temperatura, to parę zowiewy *nienasyconą*.

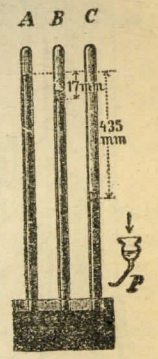
Jeżeli w jakimkolwiek naczyniu po dłuższym czasie pozostaje choć trochę cieczy, świadczy to najlepiej, że para w naczyniu jest w stanie nasycenia.

2. Prężność pary nasyconej. Para, wypełniająca pewną przestrzeń, sprawia ciśnienie, czyli posiada pewną prężność, którą można oznaczyć za pomocą barometru lub manometru. Para każdego płynu posiada inną, właściwą sobie prężność, przy danej temperaturze.

Za ogrzaniem wzrasta znacznie prężność pary każdego płynu; podczas zaś wrzenia płynu w otwartym naczyniu para jej osiąga prężność równą 1 atmosferze = 1,033 kg/cm².

D o ś w i a d c z e n i e. Do małych ciśnień służy barometr, do którego próżni wpuszcza się kroplami ciecz, przeznaczoną do ulotnienia. Mała kropelka dostając się do próżni, ulatnia się natychmiast; dalsze krople parują wolniej, aż wreszcie pozostają w stanie płynnym na powierzchni rtęci.

Prowadząc to doświadczenie w trzech rurkach, pozostawia się w rurce *A* (rys. 244) próżnię Torricellego niezmienioną, do rurki *B* wpuszcza się kroplami wodę pipetką *P*, do *C* wpuszcza się podobnież eter, aż część płynu pozostanie nad rtęcią; wtedy przestrzeń w *B* i *C* jest nasycona parą. Jeżeli temperatura powietrza wynosi 20° C, rtęć w *B* opadnie o 17 mm, w *C* o 435 mm poniżej wysokości barometrycznej *A*; liczby te oznaczają prężność pary: 17 mm rtęci dla wody, 435 mm dla eteru (prężność pary rtęciowej w *A* pomija się, jako znikoma).



Rys. 244. Prężność pary.

Za ogrzaniem *B* i *C* rtęć opadnie; ażeby poziom jej opadł do poziomu w naczyniu, trzeba *B* ogrzać do 100°, *C* do 35°; są to punkty wrzenia wody i eteru.

Wnioski:

1) Ciecz w próżni ulatnia się natychmiastowo.

2) Prężność pary rozmaitych cieczy jest niejednakowa, wogóle tym większa, im niższy punkt wrzenia ma ciecz badana.

3) Prężność pary rośnie wraz z temperaturą.

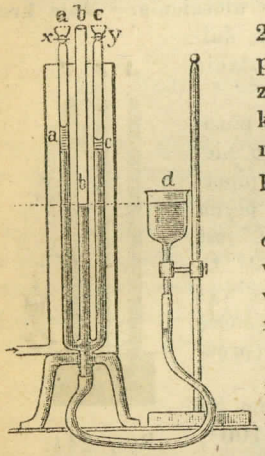
P r ę ż n o ś ć p a r y w o d n e j m i ę d z y 0° — 100°.

(w milimetrach słupa rtęciowego).

Temp.	Prężność mm	Temp.	Prężność mm	Temp.	Prężność mm
0°	4,6	10°	9,1	20	17,4
1	4,9	11	9,8	21	18,5
2	5,3	12	10,4	22	19,6
3	5,7	13	11,1	23	20,9
4	6,1	14	11,9	24	22,2
5	6,5	15	12,7	25	23,5
6	7,0	16	13,5	30	31,5
7	7,5	17	14,4	40	54,9
8	8,0	18	15,3	50	92,0
9	8,6	19	16,3	100	760,0

3. Różnica między parą nasyconą i nienasyconą. Para nasycona nie podlega prawu Gay Lussaca; prężność jej rośnie daleko prędzej, niż temperatura bezwzględna. Nie podlega ona również prawu Mariotte'a, t. j. prężność jej zależy tylko od temperatury, nie zależy zaś bynajmniej od objętości.

Wogóle, w stanie nasycenia para posiadada najwyższą prężność, możliwą dla danej temperatury.



Rys. 245.

Doświadczenie. Trzy rurki *a*, *b*, *c* (rys. 245), połączone między sobą, napełniono rtęcią za pomocą podnoszonego naczynia *d*; rurki *a* i *c* są z góry zamknięte, rurka *b* otwarta. W *a* znajduje się kilka cm³ wody, w *c* tylko parę kropel. Wszystkie rurki są u góry zawarte w komorze parowej, którędy przepływa para wodna o temperaturze 100° C.

Za ogrzaniem w ten sposób prężność w rurkach *a* i *c* rośnie z początku jednostajnie; wkrótce w *c* woda ulatnia się zupełnie, tak iż para nie jest tu w stanie nasycenia. Odtąd powiększa się prężność w rurce *a* wydatnie, w rurce *c* tylko nieznacznie.

Skoro *a* i *c* osiągnęły temperaturę wrzenia wody na otwartym powietrzu, t. j 100°, rtęć w *a* i *b* stoi na równej wysokości, w *c* wyżej; prężność więc nasyconej pary wodnej przy 100° = 1 atmosferze, nienasycona posiada mniejszą prężność.

Wreszcie za podniesieniem naczynia *d* i zmniejszeniem wskutek tego objętości pary w *a* i *c*, poziomy w *a* i *b* są względem siebie niezmienne, różnica zaś między *b* i *c* się zmienia.

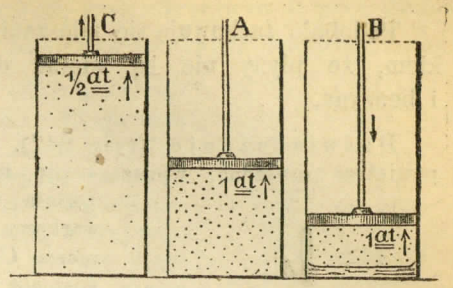
Para nienasycona podlega prawu Mariotte'a, jako też prawu Gay Lussaca, czyli zachowuje się jak gaz doskonały.

Naczynie *d* można dalej podnieść tak, iż para w *c* stanie się znowu nasyconą (oznaka: *a* i *c* mają poziom jednakowy); wtedy za ochłodzeniem część pary w *c* się skrapla, za ogrzaniem para w *c* przechodzi w stan nienasycony.

W stanie nasycenia para posiada tyle tylko ciepła, ile potrzeba do utrzymania jej w stanie lotnym.

Przykład. Pod tłokiem o 1 m² pola (rys. 246) zamknięto parę nasyconą o tem. 100°; pary tej niech będzie 1 m³, zatym tłok stoi na wysokości 1 m, pary waży 0,6 kg, posiada zaś prężność 1 atmosfery. Skoro się tłok podniesie na 2 m (jak w *C*), para przechodzi w stan nienasycony; ponieważ zaś obecnie przypada 0,6 kg na objętość 2 m³, prężność spada do $\frac{1}{2}$ atm, przy 3 m³ do $\frac{1}{3}$ atm i t. d.

Za spuszczeniem tłoka do dawnego położenia, walec zawiera znów parę nasyconą. Za tłoczeniem dalszym do $\frac{1}{2}$ m³ (*B*); przestrzeń może przyjąć tylko 0,3 kg pary; tutaj jest para w stanie nasycenia, a na dnie walca zbiera się 0,3 kg wody powstałej ze skroplenia.



Rys. 246.

4. Całkowita ilość ciepła (*L*), niezbędna do wyparowania pewnej ilości płynu, mającego 0° i ogrzewanego do t^0 (przyczym powstaje para o temperaturze t^0), składa się z dwu części: 1) ciepła potrzebnego do ogrzania płynu od 0° do t^0, 2) ciepła parowania (utajonego).

Pierwszą część oblicza się na zasadzie ciepła właściwego płynu; druga otrzymuje się z odjęcia tej ilości od całkowitej ilości ciepła, zużytej na wyparowanie wraz z ogrzaniem.

Regnault na zasadzie wielu doświadczeń wyprowadził dla wody wzór następujący:

$$L = 606{,}5 + 0{,}305\ t.$$

Wzór ten dla innych cieczy ma postać i liczby odmienne. Ze wzoru dla wody wynika, że za ogrzaniem od 0°

do	0°	ciepło całk.	L =	606,5	kal.,	c. parow.	U =	606,5 kal.
„	50°	„ „		622	„	„		572 „
„	100°	„ „		637	„	„		537 „
„	200°	„ „		668	„	„		464 „

Tak więc, ciepło parowania wody nie ma wartości stałej, ale maleje za podwyższeniem temperatury. Korzystna ta właściwość stosuje się w maszynach parowych, działających wysoką prężnością pary.

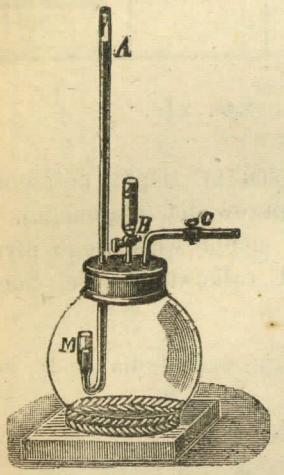
5. Mieszanina gazu i pary. Parowanie płynu w powietrzu lub w atmosferze innego gazu odbywa się daleko wolniej, niż w próżni; jednakże ilość płynu ulotnionego jest taka sama, bez względu, czy tenże paruje w próżni, czy w gazie pod dowolnym ciśnieniem. Prężność zaś gazu powiększa się o prężność danej pary. Wyrażają to prawa Daltona (1803, por. § 38, art. 4):

1) Ilość pary nasyconej w danej przestrzeni, przy danej temperaturze, jest zawsze jednakowa, t. j. nie zależy od rodzaju i ciśnienia gazu, jaki przestrzeń wypełnia.

2) Prężność mieszaniny gazu i pary równa się sumie częściowych prężności każdego składnika, t. j. prężności, jakieby posiadał gaz i para, gdyby każde z osobna wypełniało dany obszar.

Podobnie zachowują się mieszaniny par rozmaitych płynów, z warunkiem, że płyny nie są zdolne do mieszania się z sobą, np. woda i benzyna.

Doświadczenie (rys. 247). W dużej bani szklanej, zawierającej powietrze osuszone, wpuszcza się tyle wody z lejka B, aby część jej pozostała w stanie nieulotnionym. Barometr lewarkowy MA, który z początku wskazywał ciśnienie C suchego powietrza, np. 740 mm, podnosi się o 17 mm, skoro temperatura gazu wynosi 20° C; ciśnienie więc obecnie = 757 mm.



Rys. 247.

Gdyby rozrzedzono powietrze suche, zaraz na początku, za pomocą kranu C, ciśnienie byłoby mniejsze, np. 120 mm; po wpuszczeniu wody aż do nasycenia powietrza w bani, ciśnienie wzrasta również o 17 mm, czyli wynosi 137 mm. Przy wpuszczeniu wody do przestrzeni zupełnie opróżnionej ciśnienie=17 mm.

Podobne wyniki daje parowanie innych cieczy, czy to w powietrzu, czy w innych gazach.

6. Gęstość pary. Jak ciężar właściwy gazów (§ 32, art. 3), podobnież i gęstość pary przyjęto wyrażać względem powietrza; jest to więc gęstość względna, przyczym gęstość powietrza = 1. Zatym gęstość pary stanowi stosunek danej masy (wagi) pary do masy (wagi) powietrza w tej samej objętości, przy jednakowej temperaturze i ciśnieniu.

Gęstość pary ma wartość stałą, czyli niezależną od temperatury i ciśnienia, ponieważ gęstość bezwzględna, t. j. masa 1 cm³ powietrza, jak i pary, zmienia się jednakowo przy zmianach ciśnienia i temperatury, a więc stosunek obu gęstości nie ulega zmianie.

Jeżeli powietrze i para zajmują równe objętości, każda v cm³ pod ciśnieniem p mm, para waży m g, powietrze M g, to

$$\text{gęstość pary } d = \frac{m}{M}.$$

Ażeby oznaczyć wagę (masę) danego powietrza, korzystamy ze wzoru (§ 42, art. 6):

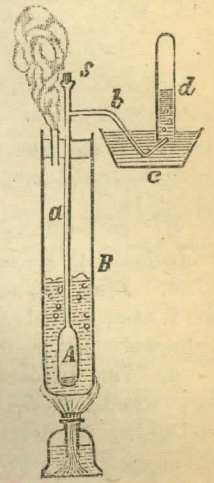
$$\text{Objętość normalna powietrza} = \frac{v \cdot p}{(1 + \alpha t) \cdot 760} \text{ cm}^3.$$

$$\text{Stąd waga tegoż powietrza } M = 0{,}001293 \cdot \frac{v \cdot p}{(1 + \alpha t) \cdot 760} \text{ gram.}$$

$$\text{Zatym gęstość pary } d = \frac{m}{0{,}001293} \cdot \frac{(1 + \alpha t) \cdot 760}{v \cdot p}.$$

Dla wody gęstość pary wynosi 0,623, czyli okrągło = $\frac{5}{8}$; para wodna jest więc prawie 2 razy lżejsza od powietrza w równej objętości.

Oznaczanie gęstości pary odbywa się najdogodniej sposobem Meyera (rys. 248). Długa rura szklana a, zakończona u dołu bańką A, u góry lejkiem s, posiada wylot beczny b, który prowadzi do wanienki rtęciowej c. Rura mieści się w kąpieli parowej lub płynnej B, napełnionej materją, której temperatura musi być wyższa od punktu wrzenia danej materji; np. skoro jest spirytus w bańce A, kąpiel B zawiera wodę wrzącą.



Rys. 248.
Przyrząd Meyera.

Napełniwszy rtęcią wanienkę c i menzurkę d, kąpiel zaś B odpowiednią cieczą, ogrzewa się tę ostatnią do wrzenia, aż temperatura się ustali, a pęcherzyki powietrza, skutkiem rozprężenia w rurze Aa, przestaną uchodzić z wanienki c. Wtedy podsuwa się rurkę b pod menzurkę c, otwiera się lejek s i wpuszcza odważoną ilość m danej materji, poczym natychmiast lejek należy zamknąć. Materja szybko zamienia się na parę, która wypiera z rury a równą objętość powietra. Przez wylot b powietrze dostaje się do wanienki i menzurki, gdzie zajmuje objętość v cm³, odpowiednią ciśnieniu barometrycznemu p i temperaturze t, jakie tu panują. W ten sposób pozyskuje się doświadczalnie wszystkie wartości, wchodzące do wzoru na gęstość pary.

Należy zauważyć, że płyny gatunkowo lekkie mogą mieć większą gęstość pary, niż płyny cięższe, tak iż stosunek między gęstościami rozmaitych płynów a gęstościami ich pary jest zgoła inny. Np. spirytus jest znacznie lżejszy od wody, a para jego jest 2½ raza cięższa od pary wodnej; jeszcze cięższa jest para eteru, jakkolwiek eter jest prawie najlżejszy z płynów.

Gęstość pary ciał stałych i płynnych:

(powietrze = 1)

Woda	0,623	Fosfór	4,42
Spirytus	1,61	Terpentyna	5,01
Siarka	2,20	Rtęć	6,97
Eter	2,58	Jod	8,71

7. Zależność między objętością płynu a pary, z niego powstałej, oblicza się na zasadzie wiadomej gęstości pary.

Woda w postaci pary pod ciśnieniem normalnym zajmuje objętość 1666 razy większą; np. litr wody, wygotowany przy 100°, wytwarza 1666 litrów pary.

Ciężar 1 m³ pary wodnej przy 100° wynosi 0,6 kg.

Wyjaśnienie, Metr sześcienny powietrza normalnego waży 1,293 kg, zaś powietrza przy 100° C waży $1{,}293 : (1 + \alpha \cdot 100) = 0{,}95$ kg. Metr sz. pary wodnej przy 100° C waży $0{,}95 \times \frac{5}{8} = 0{,}6$ kg. Zatym 0,6 kg wody, czyli na objętość 0,6 litra wody zamienia się w 1000 litrów pary; stąd z 1 litra wody pawstaje $1000 : 0{,}6 = 1666$ litrów pary.

Zadania.

1. Przestrzeń w kotle, zajęta przez parę, wynosi 5 m³, prężność pary = = 5 kg na 1 cm² (t. j. 5 atmosfer). Ile kg pary mieści kocioł? Odp. 13,32 kg.

2. Do 20 kg wody o temp 15° wpuszczono 1,5 kg pary wodnej o ciśnieniu 2 kg na cm². Do ilu stopni woda się ogrzeje? Odp. 58,8°.

3. Przy wybuchu kotła prężność pary wodnej spada nagle z 10 atm do 1 atm; kocioł zawiera 4 kg pary. Ile ciepła uwalnia się w czasie wybuchu? Odp. 97,3 kal.

4. Ile litrów pary nasyconej powstaje z 2 kg wody, jeżeli prężność pary wynosi 2, 5, 10 atmosfer? Odp. 1775, 751, 392 ltr.

§ 48. Wilgotność powietrza.

1. **Wilgotność atmosfery** stanowi zawartość w niej pary wodnej w większej lub mniejszej ilości. Morza, rzeki, jeziora parują ustawicznie i sprawiają, że powietrze atmosferyczne nigdzie nie bywa zupełnie suche. Jeżeli mówimy o suszy w powietrzu, rozumiemy przez to małą zawartość wilgoci. Do najsuchszych miejsc na ziemi należą obszary stepowe i zwłaszcza wielkie pustynie (Sahara, Gobi).

2. **Wilgotność względna i bezwzględna**. Rozróżniamy wilgotność dwojaką: względną i bezwzględną.

Stosunek ilości pary wodnej, zawartej w powietrzu, do ilości pary możliwej, t. j. pary, którąby nasyciła powietrze w danej temperaturze, zowie się wilgotnością *względną*. Stosunek ten wyraża się w odsetkach.

Ilość pary w 1 metrze sześc. powietrza, wyrażona w gramach, zowie się wilgotnością *bezwzględną*.

Zamiast oznaczania ilości pary (na wagę), stanowiącej o wilgotności powietrza, dogodniej bywa posiłkować się jej prężnością, która w myśl prawa Mariotte'a jest proporcjonalna do ilości pary w 1 m³, t. j. do gęstości pary (ciężaru właściwego).

Jeżeli 1 m³ powietrza w temperaturze t_1 zawiera m_1 kg pary, a w temp. t_2 zawiera m_2 kg, zaś p_1 i p_2 oznaczają odpowiednie prężności to

$$m_1 : m_2 = p_1 : p_2.$$

Tak więc, wilgotność względną można określić jako stosunek prężności pary, zawartej w powietrzu, do prężności pary nasycającej. Wilgotność zaś bezwzględną można wyrazić przez prężność pary, w milimetrach słupa rtęciowego.

3. **Znaczenie obu rodzajów wilgotności**. Powietrze może być względnie bardzo wilgotne, t. j. bliskie nasycenia, choć zawiera małą ilość pary; nawzajem, może być względnie suche przy dużej zawartości pary. Np. w lecie podczas upałów silne parowanie wód przysparza atmosferze pary, a jednak powietrze jest stosunkowo suche, ponieważ ilość pary daleką jest od nasycenia. Stąd przedmioty mokre schną wtedy prędko. W zimie parowanie jest słabe, ale przy niskiej temperaturze powietrza drobna ilość pary wystarcza do nasycenia. Stąd powietrze może przyjąć tylko nieznaczną ilość pary; przedmioty mokre wysychają bardzo powolnie.

Wilgotność względna ma wpływ doniosły w przyrodzie i zastosowaniach, tak iż wypada ją systematycznie wyznaczać. Przyrządy do pomiaru wilgotności otrzymały miano *hygrometrów* lub *psychrometrów* (wilgociomierzy); wskazujące tylko przybytek lub ubytek wilgoci stanowią *hygroskopy*. Z wilgotnością bezwzględną liczymy się rzadko, głównie tylko w badaniach naukowych.

W Polsce wilgotność bezwzględna wynosi w środku zimy, przy średniej temperaturze — 4°, około 3 g na m³; w lecie. przy 18°, prawie 10 g na m³. Powietrze więc w lecie jest bezwzględnie 3 razy przeszło wilgotniejsze niż w zimie. Prężność tej pary, nienasyconej, wynosi odpowiednio w obu porach roku prawie 3 mm i 10 mm rtęci. Że jednak prężność pary nasyconej przy — 4° wynosi 3,4 mm, przy 18° zaś 15,3 mm, wilgotność względna wypada odpowiednio $3 : 3{,}4 \times 100 =$ około 90%, oraz $10 : 15{,}3 \times 100 = 66\%$. Powietrze więc w lecie jest względnie suchsze.

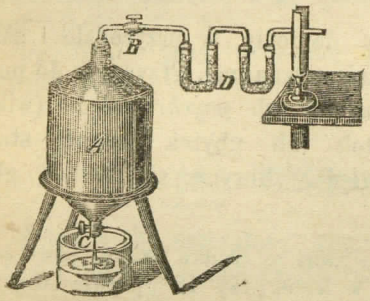
4. **Rosienie** (potnienie). Za wniesieniem ciała zimnego do powietrza cieplejszego, albo za oziębieniem ciała wilgoć zawarta w powietrzu skrapla się na powierzchni ciała, tworząc powłokę z drobnych, prawie niewidzialnych kropelek. Zjawisko to zowie się *rosieniem* lub *potnieniem*, a temperatura, w której się ono zaczyna, *temperaturą rosienia* (punktem rosy).

Punkt rosienia jest oczywiście temperaturą nasycenia, t. j. temperaturą, w której para zawarta w powietrzu wystarcza do jego nasycenia.

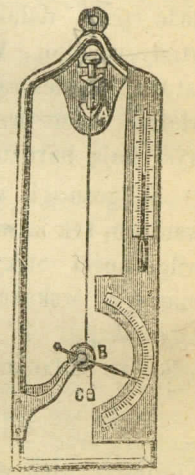
Przykłady. Potnienie karafki z zimną wodą po wniesieniu do pokoju. — Potnienie szyb w zimie; zamarzanie szyb, skoro temperatura szkła spadnie poniżej 0°. — Opary na szkle, na metalach błyszczących, powstające za chuchnięciem i znikające niebawem.

5. Oznaczanie wilgotności. a) Wilgotność bezwzględną oznacza się na drodze chemicznej, przez pochłanianie pary, zawartej w danej objętości powietrza, za pomocą chlorku wapniowego, bądź kwasu siarczanego, fosforowego i t. p. Zważywszy obraną materję najprzód w stanie suchym, następnie po nabraniu wilgoci z powietrza, otrzymuje się bezwzględną ilość wody, zawartą w odmierzonej objętości powietrza.

Przyrząd do tego celu (rys. 249) składa się z *aspiratora*, t, j. dużego zbiornika blaszanego A, napełnionego wodą, którą się wypuszcza, otwierając kran C. Wtedy powietrze atmosferyczne przepływa przez rurki pochłaniające D, napełnione chlorkiem wapnia i zważone, i pozostawia tam swą wilgoć. Objętość powietrza, jakie przeszło przez rurki, równa się objętości wylanej wody.



Rys. 249. Hygrometr chemiczny.



Rys. 250.
Hygrometr Saussure'a.

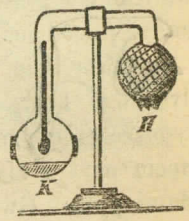
b) Wilgotność względną oznacza się za pomocą hygrometru lub psychrometru. Z kilku odmian tych przyrządów najdokładniejszy jest hygrometr Daniella w odmianie Regnaulta, używany do badań w pracowni fizycznej: polega on na oznaczaniu temperatury rosienia.

Inne przyrządy polegają bądź na *hygroskopijności* ciał, t. j. zmianie ich długości lub kształtu od wilgoci, np. hygrometr Saussure'a, bądź na różnicy w temperaturze suchego i wilgotnego termometru, jak w psychrometrze Augusta.

Hygrometr włosowy Saussure'a (rys. 250) wskazuje bezpośrednio wilgotność względną; polega na wydłużaniu się włosa w powietrzu wilgotniejszym, a kurczeniu w powietrzu suchszym. Włos ludzki, oczyszczony z tłuszczu i zawieszony końcem A, okręca się drugim końcem B na bloczku i wypręża ciężarkiem C. Za wydłużeniem włosa ciężarek opada, za skurczeniem podnosi się, poruszając skazówkę. Podziałkę sporządza się przez porównanie z innym hygrometrem, np. Daniella.

Jeżeli chodzi o przybliżone oznaczenie wilgotności, można zaznaczyć tylko punkt 0 (suszy) i 100% (nasycenia) i łuk między niemi podzielić na 100 równych części; odpowiadają one mniej więcej odsetkom wilgotności (błąd o kilka %). Punkt 0 oznacza się, umieszczając hygrometr pod kloszem, wraz z jakąś materją suszącą, np. kwasem siarczanym; punkt 100, przy umieszczeniu hygrometru wraz z wodą w nadmiarze. Niedokładność przyrządu pochodzi stąd, że wydłużenie włosa nie wzrasta w tym samym stosunku, jak wilgotność. Nadto włos z biegiem czasu traci zdolność wchłaniania wilgoci, tak iż przyrząd wymaga zmian i poprawek. Nie należy też zaniedbywać poprawki na rozszerzalność włosa od ciepła, którą podaje odnośna tabelka dla każdego przyrządu.

Hygrometr Daniella (rys. 251) składa się z dwu baniek szklanych, połączonych rurą kolankową; jedna z baniek zawiera termometr i jest napełniona eterem, druga jest próżna. Tę ostatnią bańkę ochładza się przez polewanie eterem; w celu szybszego parowania eteru jest ona owinięta muślinem. Para eteru skrapla się w bańce oziębianej, powodując szybkie parowanie eteru w drugiej bańce, która przez to również się oziębia, tak iż wkrótce na jej ścianie zewnętrznej osiada rosa wodna. Temperatura t_1, jaką w tej chwili wskazuje termometr, zanurzony w eterze, jest punktem rosienia. Drugi termometr wskazuje temperaturę t_2 powietrza zewnętrznego. Wziąwszy z tabelki prężność pary wodnej w temp. t_1 i t_1, otrzymamy stosunek obu prężności, który pomnożony przez 100 stanowi wilgotność względną.



Rys. 251.
Hygrometr Daniella.

Im większą różnicę temperatury wskazują termometry, tym powietrze dalsze jest od stanu nasycenia, t. j. suchsze. W powietrzu, nasyconym wilgocią, temperatura w bańce z eterem nie obniża się w chwili rosienia.

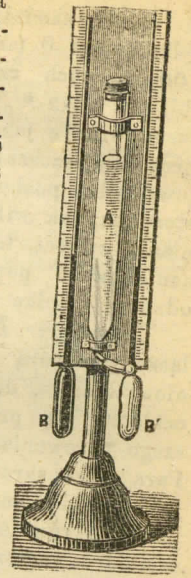
Przykład. Jeżeli punkt rosienia $t_1 = 14^0$, a temperatura powietrza $t_2 = 20^0$, to prężność pary odnośne będą 11,9 i 17,4 mm; zatym

$$\text{wilgotność względna} = \frac{11{,}9}{17{,}4} \times 100 = 68\%.$$

Hygrometr Daniella daje pewien błąd wskutek złego przewodnictwa szkła, tak iż w chwili rosienia termometr wewnętrzny wskazuje temperaturę cokolwiek wyższą od punktu rosienia. Regnault ulepszył przyrząd Daniella, zastępując bańki szklane przez naparstki srebrne o lśniącej powierzchni, które dokładniej dają zauważyć punkt rosienia. Nadto zamiast niedogodnego skrapiania eterem, oziębia się przyrząd, łącząc rurkę przewodnią między bańkami z aspiratorem (rys. 249, A).

Psychrometr Augusta (rys. 252) jest to wilgociomierz, polegający na różnicy temperatury dwu termometrów przez zwilżanie jednego z nich wodą. Z dwu jednakowych termometrów jeden jest owinięty gazą, którą się macza w wodzie; mokry ten termometr oziębia się tym bardziej, im powietrze jest suchsze, ponieważ wtedy woda paruje znaczniej. Tablica, ułożona z doświadczenia, podaje wilgotność względną powietrza, według oznaczonej temperatury mokrego termometru i różnicy obudwu termometrów. Przyrząd ten używa się powszechnie na stacjach meteorologicznych; jest on mniej ścisły od poprzedniego, zwłaszcza w zimie, gdy parowanie jest bardzo słabe.

Hygroskopy polegają na wrażliwości struny lub zwitka papieru, które się skręcają od suszy, a rozkręcają od wilgoci, poruszając skazówkę. Inne polegają na zmianie kolorów albo objętości ciał wskutek wilgoci. Narzędzia takie w mowie potocznej otrzymały niewłaściwie miano barometrów; wskazują bowiem zmiany wilgoci, nie zaś ciśnienia. Wnoszenie z nich o przyszłej pogodzie jest wątpliwe, nie dają bowiem pojęcia o rozkładzie wiatrów, od czego zależą zmiany pogody.



Rys. 252. Psychrometr.

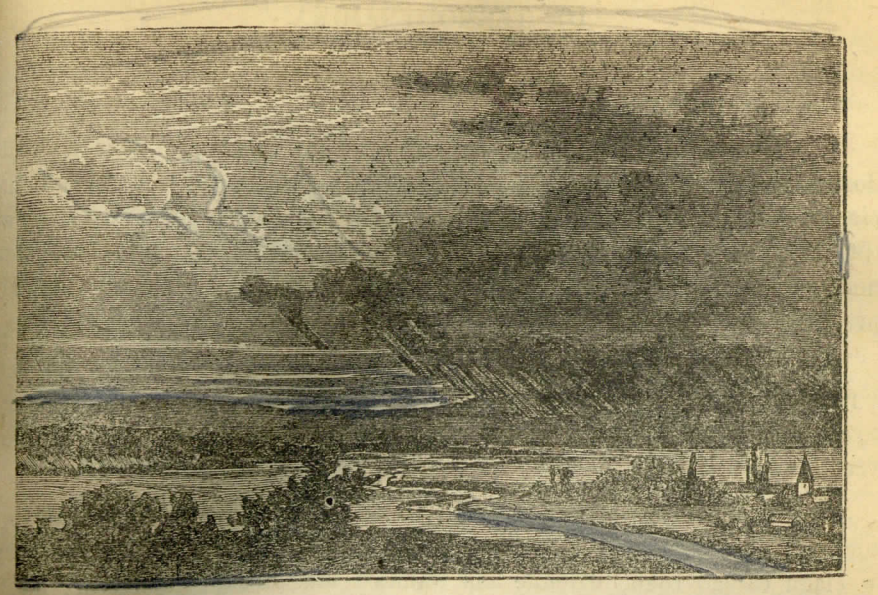
6. Opady atmosferyczne. Para wodna w atmosferze skrapla się za oziębieniem, przybierając postać rozmaitych opadów: mgły, chmur, deszczu, śniegu, rosy, szronu, gradu. Nauka o opadach atmosforycznych stanowi jeden z głównych działów meteorologji, czyli nauki o pogodzie.

Na tworzenie się opadów atmosferycznych duży wpływ ma kurz, unoszący się w powietrzu; jest nawet przypuszczenie, że wogóle opady powstają dzięki zetknięciu pary z ciałem stałym, chociażby najmniejszymi śladami pyłu. Gwałtowne wstrząśnienia powietrza również sprzyjają opadom.

Przykłady. Obfitsze deszcze i mgły w miarę rozwoju miast fabrycznych. — Chmury i deszcz ulewny przy wybuchach wulkanów. — Niezwykłe zmiany pogody po katastrofach wulkanicznych; popiół wulkaniczny unosi się w atmosferze całemi tygodniami i rozsiewa się na wielkie obszary. — Wywoływanie deszczu za pomocą wystrzałów armatnich: specjalne armaty „deszczowe" o lejkowatych wylotach.

Powstawanie opadów. *Mgła* składa się z drobniutkich, prawie mikroskopijnych kropelek wody; tworzy się wskutek zmieszania powietrza zimnego z cieplejszym, albo od zetknięcia prądu wilgotnego powietrza z zimną powierzchnią ziemi, lub zimnego powietrza z ciepłą wodą.

Chmury (rys. 253) różnią się od mgły tylko wysokością, w jakiej powstają. W miejscach zniżki barometrycznej (§ 34, art. 6) para, wznosząc się, ulega skropleniu i tworzy chmury kłębiaste, czyli obłoki, najczęściej widywane w naszym klimacie, zwłaszcza w lecie. Chmury te przy prędszych ruchach powietrza przechodzą często w deszczowe, nieokreślonej postaci, gęste, ciemne chmury, zniżające się prawie do ziemi. Mogą też chmury powstawać wskutek opadania powietrza zimnego i zetknięcia z dolnymi wilgotnemi warstwami; mają one wygląd długich smug poziomych, nisko nad ziemią rozpostartych, np. $\frac{1}{2}$ km do 1 km, i nazywają się chmurami warstwowymi. Na znacznych wysokościach, 8 do 10 km, widać czasami lekkie przejrzyste obłoczki, podobne do puchu, zwane pierzastymi; składają się z igiełek lodowych, a występując w dniu upalnym, zwiastują niepogodę. Oprócz pomienionych, głównych postaci chmur, bywają często kształty pośrednie, np. kłębiasto-warstwowe, kłębiasto-pierzaste itp.


Rys. 253. Rozmaite kształty chmur.

Deszcz pochodzi stąd, że utworzone w powietrzu większe kropelki wody nie mogą się unosić i spadają z początku wolno i ukośnie, podtrzymywane prądami powietrza; im niżej, tym krople stają się większe, wskutek dalszego skraplania pary na ich powierzchni, a zarazem nabierają większej szybkości. Deszcz kroplisty, ulewa, pochodzi zawsze z wielkiej wysokości; bywa tylko w dni gorące lub w strefie gorącej. W krajach zimnych deszcz pada gęsty, w drobnych kropelkach, często tylko mży.

Śnieg ma pochodzenie podobne jak deszcz, gdy powietrze ochładza się poniżej 0°.

Rosa w postaci dużych kropel wodnych osiada na zimnej powierzchni ziemi, skoro z nią styka się powietrze cieplejsze a wilgotne. Zwykle bywa przy niebie czystym, wtedy bowiem ziemia najsilniej promieniuje.

Szron jest rosą zmarzniętą.

Grad składa się z nieforemnych bryłek lodowych, zawierających w środku rdzeń śnieżny. Pochodzenie gradu niezupełnie jeszcze wyjaśniono; wiadomo, iż ma związek z elektrycznością atmosferyczną. Grad bywa tylko w ciepłej porze dnia i w ciepłych krajach.

D) TERMODYNAMIKA.

§ 49. Źródła ciepła.

1. **Słońce** promieniuje na wszystkie strony olbrzymią ilość energji; dosięgając ziemi, energja promienista przeistacza się głównie na ciepło, i stąd nazywano ją do niedawna ciepłem promienistym (pt. „Promieniowanie"). Jakkolwiek tylko drobna część promieni słonecznych pada na ziemię, wytwarza ona ilość ciepła tak znaczną, że przy niej wszystkie inne źródła ciepła na ziemi mają wartość znikomą.

Na powierzchni ziemi słońce nietylko podtrzymuje życie zwierzęce i roślinne, ale zarazem jest twórcą powszechnych zjawisk atmosferycznych, jak wiatry i opady, a stąd wszelkich wód bieżących, jak źródła, rzeki, wodospady, prądy morskie (objaśnić!).

Ciepło słoneczne przenika wgłąb ziemi nie dalej niż na kilkadziesiąt metrów; przeważnie w głębokości 25 m niema już zmian temperatury w ciągu całego roku, dzienne zaś wahania nie sięgają głębiej niż na 2 metry.

Istnieje więc na powierzchni ziemi warstwa usłoneczniona, a pod nią powierzchnia stałej temperatury, gdzie w ciągu dnia i nocy, w ciągu lata i zimy temperatura trzyma się niewzruszenie na tej samej wysokości; temperatura ta jest charakterystyczna dla każdej miejscowości i równa się średniej rocznej temperaturze powietrza, np. w Warszawie wynosi okrągło 6° C, w Paryżu 11,5° C.

Ilość ciepła, jakie wytwarzają promienie słońca, padając na ziemię w ciągu 1 minuty, wynosi przeciętnie 3 kalorje gramowe na każdy cm^2 powiarzchni ziemi; ilość ta mogłaby stopić w ciągu roku warstwę lodu, grubą na 33 m, gdyby ta pokrywała całą kulę ziemską.

Temperatura słońca wynosi w grubym przybliżeniu 6000 do 7000° C; musi ona być wyższa od temperatury wszelkich ognisk ziemskich, skoro na słońcu nawet metale takie jak żelazo istnieją w stanie pary rozpalonej (por. „Linje Fraunhofera"). Mimo olbrzymiej straty ciepła słońce ostyga tak powolnie, że w badaniach astrofizycznych zaledwie zdołano to zauważyć. Muszą więc stratę wyrównywać ciągłe źródła ciepła, jak kurczenie się słońca, spadek meteorytów i innych mas kosmicznych wskutek przyciągania słońca, wewnętrzne przemiany chemiczne i promieniotwórcze (pt.).

2. **Ciepło wewnętrzne ziemi** ujawnia się w wulkanach, w źródłach gorących, w głębokich kopalniach, tunelach; studniach artezyjskich.

Wiercenie skorupy ziemskiej przekonywa, że temperatura wszędzie wzrasta, w miarę pogłębienia począwszy od powierzchni temperatury niezmiennej (pt. wyżej). Przyrost ten bywa rozmaity dla każdej miejscowości, stosownie do warunków geologicznych, np. może wynosić 1° C przy pogłębieniu termometru o 11 m, gdzieindziej zaś przy pogłębieniu aż do 115 m, średnio temperatura wzrasta przy różnicy głębokości o 34 m. Jednakże przyrost temperatury nigdzie nie jest proporcjonalny do głębokości; ani zależności te nie są ustalone, to też niepodobna stąd wnosić o temperaturze i postaci wnętrza ziemi.

W tunelu Gotardzkim temperatura wynosi 31° C pod warstwą skalną 1700 m; w otworze świdrowym na Śląsku, o głębokości 1716 m, panuje temperatura 56°; w Anglji dokopano się węgla w takiej głębokości, że temperatura dochodzi 45°, tak iż musiano zaprzestać dalszego pogłębiania.

Na zasadzie przyrostu temperatury w głębi ziemi przypuszczenie płynnego, stopionego jądra ziemi, otoczonego cienką skorupą, nie może się ostać choćby dlatego, że ciała topią się pod wielkim ciśnieniem w temperaturze daleko wyższej, niż na powierzchni; we wnętrzu zaś ziemi panuje olbrzymi nacisk pokładów zewnętrznych, jakie na nim ciążą.

3. **Działania chemiczne** odbywają się zawsze w połączeniu ze zmianami cieplnymi; jedne z nich wywiązują ciepło i zowią się egzotermicznymi, inne pochłaniają je i zowią się endotermicznymi. Np. wytwarzanie tlenu wymaga ciągłego ogrzewania materjału, jak tlenku rtęciowego, chloranu potasowego i t. p.; otrzymywanie zaś acetylenu, przeciwnie, wyzwala dużo ciepła, tak iż rozgrzewają się materje działające, karbid i woda.

Najpowszechniejszą reakcją egzotermiczną jest *palenie* się ciał w powietrzu; stanowi ono najważniejsze ze sztucznych źródeł ciepła. Paleniem zowiemy chemiczne łączenie się ciała płonącego z tlenem powietrza, przy wywiązywaniu ciepła i światła. Główniejsze materjały opałowe zawierają węgiel i wodór, tak iż ze spalenia ich powstają niewidzialne produkty lotne: dwutlenek węgla i para wodna.

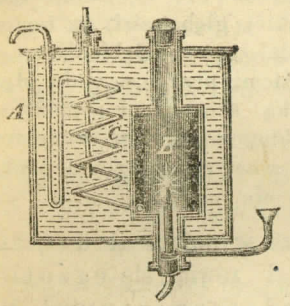
Ciepłem spalenia pewnej materji nazywa się ilość ciepła, wyrażona w kalorjach, a wywiązana ze spalenia 1 kg materji.

Należy odróżniać od ciepła spalenia temperaturę spalenia; ta ostatnia zależy, obok właściwości materji, od szybkości przepływu tlenu, oraz jego zawartości w otoczeniu. W powietrzu, gdzie tlen stanowi tylko $\frac{1}{5}$ ogólnej masy, palenie wywiązuje niższą temperaturę, aniżeli w czystym tlenie; ilość zaś ciepła przy spaleniu 1 kg ciała jest tu i tam jednakowa.

Np. wodór w czystym tlenie stwarza temp. 2500°, w powietrzu około 1600°; węgiel w piecu zwykłym 1400°, przy silnym zaś dopływie powietrza 1800°. Najwyższą temperaturę na drodze chemicznej osiąga się przy spalaniu *termitu* Goldschmidta, mieszaniny sproszkowanego glinu (aluminium) z tlenkiem żelazowym; temperatura dochodzi 3000°. W ogóle zaś najwyższą temperaturę sztuczną wytwarza prąd elektryczny w łuku Volty (pt.), do 3500°, a przy udziale czystego tlenu do 4000°.

Ciepło spalenia 1 kg materji:

Wodór	34 400 kal.	Spirytus	7 000 kal.
Nafta, benzyna .	12 000 „	Drzewo, torf .	od 3 000 „ do 5 000 „
Gaz świetlny . .	11 000 „	Siarka	2 300 „
Węgiel kamienny .	8 000 „		



Rys. 254.
Kalorymetr Rumforda.

Dla materji złożonych z wielu związków, jak nafta, gaz, drzewo, węgiel kamienny, należy rozumieć ciepło średnie z wielu próbek, gdyż skład chemiczny, a więc i ciepło spalania bywa rozmaite; w drzewie i torfie nadto ma duży wpływ na ciepło spalenia niejednakowa zawartość wody, zależna od wysuszenia tych materji.

Oznaczanie ciepła spalania (rys. 254) odbywa się w przyrządzie Rumforda, kalorymetrze tak urządzonym, aby przezeń przechodziły produkty spalenia, oddając tu swe ciepło; produkty te wychodzą oziębione do temperatury kalorymetru. Ciało, przeznaczone do spalenia, waży się i po rozżarzeniu umieszcza się w komorze B, przez którą przepuszcza się tlen, od spodu; stąd gazy wytworzone idą wężownicą C przez wodę kalorymetru A, gdzie termometr wskazuje podwyższenie temperatury.

Jeżeli ciało waży m g i posiada ciepło spalenia x kalorji, woda w kalorymetrze waży M g, i ogrzała się od temperatury t do t', to

$$m\,x = M\,(t' - t)$$

skąd wypada ciepło spalenia x.

Na rysunku wyobrażono spalanie gazu świetlnego; w tym razie masę gazu oznaczamy z jego objętości, jaką wskazuje gazomierz (pt.), sprowadzając tę objętość do warunków normalnych.

4. Ciepło zwierzęce, czyli ciepło wytwarzane w organizmie zwierząt i człowieka, jest wynikiem zawiłych procesów chemicznych i fizycznych, jakie mają miejsce w ich ciele.

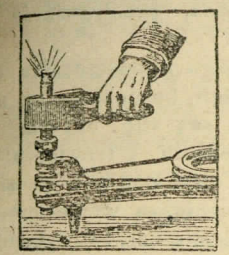
Głównym źródłem tego ciepła jest *oddychanie* czyli proces pochłaniania tlenu we krwi; mniejszą rolę odgrywa *trawienie* pokarmów.

5. Praca mechaniczna w jakiejkolwiek postaci wytwarza ciepło. Powszechnie daje się to zauważyć przy uderzeniu, tarciu i zgęszczeniu. Im twardszy jest materjał, a uderzenie silniejsze, tem prędzej rozgrzewa się ciało. Od tarcia grzeją się wyraźnie ciała stałe, słabiej daleko płyny, dla gazów zaś rozgrzanie od tarcia zaledwie daje się zauważyć. Natomiast zgęszczenie gazów, o ile zachodzi dość prędko, rozgrzewa je znacznie.

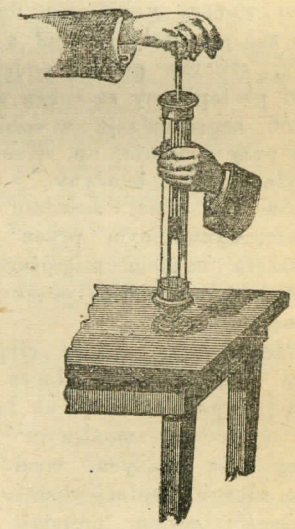
Nawzajem ciepło przeistacza się w odpowiednich warunkach na pracę mechaniczną. Na tej przemianie polegają wszelkie silniki cieplne (pt.), t. j. maszyny, wytwarzające pracę użyteczną kosztem ciepła spalenia.

Przykłady. 1) Doświadczenie Tyndala. Do wirówki zakłada się rurkę metalową napełnioną spirytusem lub eterem, zamyka się korkiem i ścisnąwszy rurkę w drewnianych kleszczach, szybko się obraca; wkrótce płyn zagrzeje się tak, że para jego wysadzi korek (rys. 255).

2) *Krzesiwo powietrzne* (rys. 256) składa się z rurki o grubych ścianach, zamkniętej na jednym końcu i opatrzonej tłokiem, do którego przyczepiono kawałek hubki. Skoro tłok raptownie zostanie wepchnięty, hubka się zapala.



Rys. 255.
Ciepło tarcia.



Rys. 256.
Ciepło zgęszczenia.

Inne przykłady. Uderzając mocno i często młotem kawałek żelaza, można go rozżarzyć. — Kula ołowiana, wystrzelona z fuzji, topi się i rozpryskuje, skoro uderzy o twardą powierzchnię. — Świder grzeje się mocno przy wierceniu. — Źle smarowane osie rozgrzewają się aż do rozżarzenia. — Zapalanie zwykłych zapałek od potarcia. — Od silnego wstrząsania rtęci we flaszce rozgrzewa się cokolwiek jedna i druga. — Krzesanie iskier uderzaniem krzemienia o stal, albo uderzaniem podków końskich o bruk. — Krzesiwka kieszonkowe.

6. Łączność wszystkich źródeł ciepła. Przemiana jednego rodzaju ciepła na inny zachodzi ustawicznie, zarówno w przyrodzie, jak i w zjawiskach sztucznie wywołanych. Zachodzi również wzajemna przemiana ciepła na pracę mechaniczną i naodwrót, pracy na ciepło.

Roztrząsając wszystkie wymienione źródła ciepła, dochodzimy do wniosku, że stanowią one objawy przeistaczania się i nagromadzania ciepła słonecznego: we wszystkich pierwotnym źródłem jest słońce.

Ciepło we wnętrzu ziemi można uważać jako pozostałość wielkiego zasobu ciepła, zachowanego w kuli ziemskiej, bryle, która tworzyła niegdyś ze słońcem jednę całość, zanim została odeń oderwaną, podobnie jak inne planety układu słonecznego.

Zródła chemiczne ciepła pochodzą od słońca czy to bezpośrednio, jako z materji wziętych ze słońca, czy też pośrednio, przez nagromadzenie ciepła na tle procesów życiowych. Wiadomo, iż rośliny pod wpływem promieni słońca, wchłaniają dwutlenek węgla, z którego wydzielają tlen, węgiel zaś pozostały, wespół z wodorem i tlenem, wessanymi z ziemi w postaci wody, stwarza główną podstawę tkanki roślinnej, błonnik (celulozę). Czynności protoplazmy są także w związku z promieniowaniem słońca. W ten sposób nagromadzają w sobie rośliny energję cieplną słońca; zasób ten oddają przy spalaniu, np. drzewa, węgla lub ich produktów sztucznych, np. spirytusu, gazu, benzyny.

Na tej samej zasadzie powstaje ciepło zwierzęce, na koszt oddychania tlenem, wyzwolonym przez rośliny, oraz trawienia pokarmów roślinnych; zwierzęta bowiem mięsożerne żywią się istotami roślinożernymi. I w tej dziedzinie ma miejsce przekształcanie się, rzec można, przetrawianie ciepła słonecznego.

Mechaniczne źródła ciepła dają objaw dalszego przeistaczania ciepła, które pierwotnie od słońca bierze początek. Jeżeli bowiem pracę mechaniczną wykonywa człowiek lub zwierzę, zawdzięcza swą siłę fizyczną procecom życiowym, możliwym głównie dzięki oddychaniu i trawieniu; jeżeli pracę daje maszyna, musi być opalana węglem, drzewem i t. p. zbiornikiem energji cieplnej słońca. (Silniki elektryczne nie są wyjątkiem, elektryczność bowiem powstaje kosztem pracy mechanicznej lub chemicznej, pt. „Ogniwa galwaniczne" i „Prądnice").

§ 50. Ciepło jako praca.

1. Energja cieplna. Ciepło, pochodzące z jakiegokolwiek źródła, naturalnego czy sztucznego, zamienia się z łatwością na pracę mechaniczną; ciepło więc stanowi pewien rodzaj energji (Robert Mayer, 1842, por. § 39, art. 2).

Pogląd dawniejszy, że ciepło polega na zawartości pewnej substancji nieważkiej czyli fluidu, zwanego *cieplikiem*, nie może się ostać wobec faktu, że przez tarcie czy uderzanie można wydobyć z każdego ciała, choćby najdrobniejszego, nieograniczone ilości ciepła, że zatym ów cieplik byłby w zapasie nieskończenie wielkim, nie dającym się nigdy wyczerpać, co jest sprzeczne z rzeczywistością.

Według współczesnej *teorji kinetycznej*, ciepło jest energją mechaniczną cząstek: ruch cząsteczkowy ciała rozgrzanego, niedostrzegalny, przy zamianie w pracę przechodzi w ruch całych ciał, ruch widoczny, a ciało się rozgrzewa.

Szczególnie dokładnie opracowano pod względem teoretycznym kinetyczną teorję gazów (pt.), tak iż oznaczono prędkość ruchu cząsteczkowego i drogę swobodną cząstek, czyli średnią drogę, jaką cząstka odbywa do spotkania się z innymi cząstkami. Prędkość średnia cząstek wynosi przy 0° dla wodoru 1839 m/sek, tlenu 461, pary wodnej 613, pary rtęciowej 184 m/sek.

Zamianę ciepła w naturze bezpośrednio na pracę stanowią ruchy powietrza, a stąd wiatry, spowodowane ogrzewaniem ziemi od słońca, jako też parowanie wód i stąd chmury, deszcze, lodowce, w dalszym następstwie źródła, rzeki, wodospady.

Przykład zamiany ciepła sztucznego wprost na pracę dają *silniki powietrzne*, t. j. działające wskutek ogrzewania powietrza w walcu zamkniętym. Prężność powietrza ogrzanego rośnie tak, iż przezwycięża ciśnienie atmosfery, tarcie tłoka i pokonywa opory zewnętrzne; tłok się porusza, obracając koła i połączone z nimi narzędzia. W maszynie parowej rolę pośrednika pomiędzy ciepłem a pracą odgrywa para wodna, której prężność rośnie w miarę ogrzewania.

2. Mechaniczny równoważnik ciepła. Pomiędzy ciepłem zużytym a pracą wytworzoną i nawzajem istnieje ścisły stosunek: dana ilość ciepła odpowiada zawsze jednakowej ilości pracy.

Ciało ogrzane zawiera zasób pracy, która za oziębieniem ujawnia się w rozmaity sposób, np. przez poruszanie ciał. Nawzajem, skoro jakaś praca mechaniczna marnuje się i ginie na pozór bez śladu, zamienia się ona w odpowiednią ilość ciepła. Miarą pracy jest kilogramometr (kgm), miarą ciepła kalorja; pewnej ilości kalorji odpowiada ściśle określona ilość kilogramometrów i odwrotnie.

Z licznych doświadczeń Mayera Joule'a, Hirna i in. wynika, że jedna kalorja jest równoważna pracy 427 kilogramometrów:

$$1 \text{ kalorja} = 427 \text{ kgm.}$$

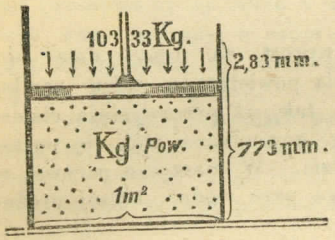
Liczba ta zowie się *mechanicznym równoważnikiem ciepła*; jest to wartość pracy mechanicznej, jaką wytwarza jednostka ciepła.

Nawzajem, jednostka pracy, kilogramometr, wydaje $\frac{1}{427}$ kalorji; ta ostatnia liczba zowie się *termicznym równoważnikiem pracy mechanicznej*.

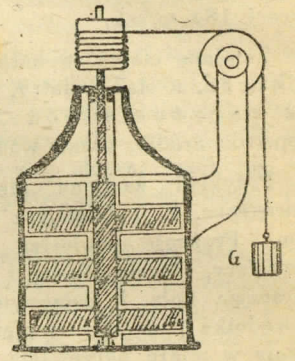
Np. ciepło, którym można ogrzać 3 kg wody o 10°, czyli 30 kalorji, jest równoważne pracy $30 \times 426 = 12780$ kgm, t. j. pracy podniesienia ciężaru 12780 kg na wysokość 1 m, albo 1278 kg na 10 m i t. d.

3. Wyznaczenie mechanicznego równoważnika ciepła. a) Sposób Mayera polega na ogrzewaniu gazu w cylindrze z tłokiem, który podnosząc się, wykonywa pracę. Mianowicie, ciepło właściwe powietrza przy stałej objętości = 0,168, przy stałym ciśnieniu = 0,237; różnica 0,069 kalorji idzie na pracę rozszerzenia 1 kg powietrza za ogrzaniem o 1°.

Niech tłok (rys. 257) ma pole 1 m^2 i może się poruszać bez tarcia. Objętość 1 kg powietrza pod tłokiem wynosi 1 : 1,293 = 0,773 m^3, zatym tłok stoi na wysokości 0,773 m od dna walca. Po ogrzaniu o 1° objętość zwiększy się o $\frac{1}{273}$ czyli o 0,773 : 273 = 0,002 832 m^3, czyli tłok podniesie się o 0,002 832 m. Pokonywając nacisk atmosfery = 10 333 kg, tłok wykonywa pracę 0,002 832 × 10 333 = 29,3 kgm, a zużywa na to ciepła 0,069 kal. Stąd 1 kal. może wykonać pracę 29,3 : 0,069 = = 425 kgm.



Rys. 257.
Praca wykonana przez ciepło.



Rys. 258.
Ciepło wykonane przez pracę.

b) Sposób Joule'a (rys. 258) polega na rozgrzaniu wody w kalorymetrze skutkiem tarcia, jakie w niej wywołuje wiatraczek, obracany spadającym ciężarem. Np. ciężar 213 kg, uwiązany do wiatraczka, ogrzewa 4 kg wody o 0,25°, skoro spada o 2 metry; stąd praca wynosi 213 × 2 = = 426 kgm, ilość ciepła 4 × 0,25 = 1 kal., równoważnik więc = 426 kgm.

c) Sposób Hirna posługuje się spadkiem ciężkiego młota na kowadło, na którym położono kawał ołowiu. Młot ważył 350 kg, kowadło 941 kg, ołów 2,91 kg, młot podniesiono o 1,166 m; po uderzeniu młot odskoczył do wysokości 0,087 m, kowadło do 0,102 m, ołów zaś rozgrzał się wskutek uderzenia o 7,1°; ciepło wł. ołowiu = 0,032.

Praca L = 350 (1,166 — 0,087) — 941 × 0,102 = 281,7 kgm; ilość ciepła Q = 2,91 × 7,1 × 0,032 = 0,66 kal. Mech. równoważnik = = $L : Q$ = 427 kgm.

Wogóle wartości równoważnika mechanicznego ciepła, otrzymane różnymi drogami, wahają się między 424 a 429 kgm; średnia wartość tegoż wynosi 427 kgm.

4. Zjawiska odwracalne i nieodwracalne. Znaczna część zjawisk odbywa się w ten sposób, że możliwy jest odwrotny przebieg zjawiska. Do takich zjawisk, zwanych *odwracalnymi*, należą np. topienie i krzepnięcie, parowanie i skraplanie, rozpuszczanie i wydzielanie, zgęszczenie gazu i rozprężenie, łączenie się i rozkład chemiczny.

Inne zjawiska mogą przebiegać tylko w jednę stronę, tak iż ciało nie może powrócić do stanu pierwotnego, np. temperatury, gęstości, położenia, bez udziału nowych czynników. Zjawiska takie *nieodwracalne* stanowi np. przewodzenie ciepła, które może się odbywać tylko ku ciału zimniejszemu; tarcie, które rozgrzewa ciało, gdy tymczasem rozgrzanie tegoż ciała nie sprawi tarcia; wypływ swobodny gazu, przyczym gaz nie powróci już do zbiornika.

Praca mechaniczna, wytwarzając ciepło, daje przykład zjawiska odwracalnego, jednakże z ograniczeniem pewnym co do ilości: praca zamienia się w całości na ciepło, to ostatnie zaś tylko częściowo oddaje pracę. Nawet w maszynie idealnej, t. zw. *cyklu Carnota*, układzie niewykonalnym, gdzieby praca wydawała ciepło i nawzajem, bez żadnych strat na tarcie i rozpraszanie, tylko część ciepła zwraca się w postaci pracy mechanicznej. Skoro bowiem ciepło, powstałe kosztem pracy, wytwarza nawzajem pracę, musi ono przechodzić do ciała zimniejszego (chłodnicy) i ogrzewa je, a ta część ciepła już nie powróci, nie wykona więc pracy mechanicznej.

Ciepło, wytwarzające pracę mechaniczną, musi mieć temperaturę wyższą od otoczenia; im większa jest różnica między temperaturą ciepła dostarczonego a temperaturą ciepła pozostałego, tem korzystniejsza jest praca ciepła.

Wydajnością danego układu, np. silnika (motoru), zowie się stosunek ciepła, przemienionego w pracę, do ciepła dostarczonego. Oznaczając wydajność przez w, ciepło dostarczone przez Q_1, a ciepło pozostałe przez Q_2, wyrazimy ciepło spożytkowane różnicą $Q_1 - Q_2$; zatym

$$\text{wydajność } w = \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1}.$$

Rachunek wykazuje, że zastępując stosunek ilości ciepła Q_1 Q_2 stosunkiem odpowiednich temperatur bezwzględnych T i T', otrzymamy najwyższą (maksymalną) wydajność w_m, możliwą teoretycznie, ze wzoru:

$$w_m = \frac{T_1 - T_2}{T_1}.$$

Najwyższa wydajność pracy mechanicznej silnika wyraża się stosunkiem różnicy temperatur bezwzględnych ciepła dostarczonego i pozostałego, do temperatury ciepła dostarczonego (zasada Carnota, 1824).

Przykład. Jeżeli powietrze w walcu, opatrzonym tłokiem, ogrzano do 400°, a po wykonaniu pracy, t. j. poruszeniu tłoka, temperatura wynosi 20°, czyli bezwzględnie 673° i 293°, to

$$\text{wydajność} = \frac{673 - 293}{673} = 0{,}56.$$

Przy słabym ogrzaniu powietrza, np. do 200°,

$$\text{wydajność} = \frac{473 - 293}{473} = 0{,}38.$$

Widać stąd, że im większa jest różnica temperatur, a więc im większa prężność gazu lub pary w silniku, tym znaczniejsza jest wydajność silnika. Pomijamy tu straty praktyczne, skutkiem tarcia, oporów szkodliwych, przewodnictwa.

5. Prawa termodynamiki. Mechaniczna teorja ciepła, czyli termodynamika, przyjmuje dwa zasadnicze twierdzenia, zdobyte na drodze doświadczalnej, a następnie rozwinięte teoretycznie. Twierdzenia te opierają się na wyłuszczonych powyżej pracach Meyera co do mechanicznego równoważnika ciepła i Sadi-Carnota co do cyklu termodynamicznego; ostatnio sformułowali je Clausius i Thomson.

1) Przy zamianie ciepła na pracę mechaniczną i odwrotnie, zachodzi stały stosunek między ilością ciepła i pracy (pierwsza zasada termodynamiki).

Niech L oznacza pracę mechaniczną, Q odpowiednią ilość ciepła:

$$\frac{L}{Q} = \text{const.}$$

Jeżeli L wyrażono w kilogramometrach, Q w kalorjach, wypada $L/Q = 427$.

Zasada powyższa jest oczywiście poszczególnym wypadkiem zasady zachowania energji (§ 24, art. 7).

2) Zamiana ciepła na pracę może się odbywać tylko wtedy, gdy źródło ciepła ma wyższą temperaturę od ciał otaczających (druga zasada termodynamiki).

Skoro bowiem we wzorze Carnota założymy $T_1 = T_2$, wypada wydajność = 0, t. j niema żadnej pracy.

Całkowita zmiana ciepła na pracę miałaby miejsce przy $T_2 = 0$, gdy wydajność = 1; należałoby przeto utrzymywać otoczenie w temperaturze zera bezwzględnego, przytym temperatura ta musiałaby pozostawać niezmienną, pomimo dopływu ciepła z ciała ogrzanego, bo pracę wykonywa prąd ciepła, pod wpływem różnicy temperatur $T_1 - T_2$; jest to warunek niemożliwy.

Fakt, że nie cała ilość ciepła zamienia się na pracę mechaniczną, nie stoi w sprzeczności z pierwszym prawem termodynamiki; dotyczy ono bowiem tej ilości ciepła, która przeistoczyła się w pracę. Pierwsze prawo odnosi się do stosunków ilościowych pracy i ciepła, drugie objaśnia o jakości energji, t. j. zestawia oba rodzaje energji, przekształconą i pozostałą; suma jednej i drugiej zawsze jest stała, zgodnie z zasadą niezniszczalności energji.

6. Rozpraszanie energji. Wszelkie rodzaje energji zamieniają się na ciepło; w przyrodzie istnieje właśnie dążność do ciągłej takiej zamiany.

Ruch ciał napotyka zawsze opory, przez co praca tego ruchu przeobraża się na ciepło. Palenie się ciał wydaje ciepło; elektryczność wydaje również ciepło (ogrzewanie elektrycznością, piorun); podobnież głos, który polega na ruchu falowym materji; wszelkie promieniowanie ulega pochłonięciu w ciałach i daje ciepło.

Rozchodząc się w przestrzeni wszechświata, ciepło ulega rozproszeniu. W ten zposób zmniejsza się ustawicznie zapas energji użytecznej, t. j. zdolnej do wykonania pracy; zanika bowiem różnica temperatury, konieczny warunek pracy, w myśl drugiego prawa termodynamiki. Jakkolwiek więc ilość energji trwa w bezmiarze świata, zmienia się stopniowo jej jakość i rozmieszczenie. Dla olbrzymiego nawet układu ciał, jak słońce i planety, ciągłe takie rozpraszanie energji prowadzi do kresu, którym musi być ostatecznie wyrównanie temperatury, a stąd zanik wszelkich zjawisk fizycznych i chemicznych, a tymbardziej życiowych. Przyroda dąży zwolna a niezachwianie do takiego końca, do zupełnej zagłady życia, do bezwzględnej ciszy i spoczynku. Na tym tle powstaje przewidywanie „końca świata", oparte na zasadzie naukowej, ale nie uwzględniające możliwości innych, nieznanych nam czynników.

Zadania.

1. Lampa spala w ciągu wieczora 125 g nafty. Ile wywiązuje ciepła? Odp. 1500 kal.

2. Motor o sprawności 8 koni miesza 40 kg wody w ciągu 1 minuty. O ile ogrzeje się woda, jeżeli całkowita praca motoru zużyje się na tarcie wody? Odp. 2,08° C.

3. Na ogrzanie 3 kg wody od 16° do 48,5° spalono 18 g gazu świetlnego. Ile wynosi wydajność cieplna gazu? Odp. 0,42, czyli 42%.

4. Pociąg wagi 1000 ton jedzie po szynach 1 km długości; tarcie = $= \frac{1}{100}$ ciężaru. Obliczyć tarcie, pracę tarcia i ciepło wytworzone. Odp. 10 000 kg, 10 000 000 kgm, 23 474 kal.

5. Ognisko pali się na otwartym powietrzu, przy 20° mrozu; spalono 16 kg drzewa, o wartości opałowej 4000 kalorji na kg; temperatura ogniska wynosi 1000°. Ile energji rozproszyło się w powietrzu?
Odp. 427 . 4000 (1273 — 253) : 1273 = okr. 1 369 000 kgm.

§ 51. Skraplanie gazów.

1. Zgęszczenie gazu. Podczas zagęszczania gazu, czyli zmniejszania jego objętości przez nacisk zewnętrzny, odbywa się przemiana pracy mechanicznej na ciepło; wywiązuje się więc ciepło, w ilości odpowiedniej do włożonej pracy.

Rozgrzanie zachodzi również przy rozpuszczaniu gazów w płynach i pochłanianiu przez ciała stałe; jest to bowiem zgęszczenie pod wpływem sił cząsteczkowych.

Gaz rozgrzewa się w skutek zgęszczenia, czy to pod naciskiem zewnętrznym, czy też w skutek absorbcji i okluzji.

Niech 1 kg powietrza mieści się w walcu o 1 m² przekroju, zamkniętym tłokiem, pod ciśnieniem normalnym, w temperaturze dowolnej. Nacisk atmosfery wynosi 10 333 kg na powierzchnię tłoka. Za wciśnięciem tłoka o 1 mm, praca przezeń wykonana = 0,001 . 10 333 = 10,333 kgm, co odpowiada ilości ciepła 10 333 : 427 = 0,024 kal. Ilość ta ogrzeje 1 kg powietrza o 0,024 : 0,168 = 0.14° C.

Przykłady. Przy nadymaniu obręczy gumowych pompka znacznie się rozgrzewa. — Rozpuszczanie amoniaku w wodzie rozwija tyle ciepła, że chcąc przyrządzić roztwór dość mocny, trzeba go ochładzać zewnętrznie, gaz bowiem na gorąco mało się rozpuszcza. — Rozżarzenie platyny w skutek pochłaniania wodoru, bądź pary spirytusowej; stąd zapalniczki. — Krzesiwo powietrzne (§ 56).

2. Prężność gazu przy zgęszczeniu można odróżnić dwojaką, zależnie od tego, czy naczynie, mieszczące gaz, rozprasza ciepło, czy też jest dla ciepła nieprzepuszczalne.

a) *Prężność izotermiczna* ma miejsce w naczyniu przepuszczalnym dla ciepła. Podczas zgęszczania gazu ciepło wywiązane uchodzi bezustannie, tak iż temperatura gazu wcale się nie zmienia.

Praktycznie stan taki można osiągnąć, wpychając bardzo powolnie tłok do walca, wyrobionego z dobrego przewodnika ciepła, np. cienkiej blachy.

Do zgęszczenia izotermicznego stosuje się prawo Boyle-Mariotte'a, przytoczone w dziale o gazach. Jeżeli prężność pierwotna będzie p_1, następna p_2, a objętości odpowiednie v_1 i v_2, to

$$p_1 : p_2 = v_2 : v_1 \quad \text{(Mariotte)}.$$

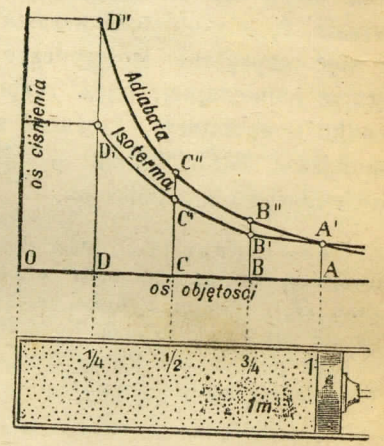
b) *Prężność adjabatyczna* ma miejsce w naczyniu szczelnym, tak, iż z niego nic ciepła nie uchodzi; stąd gaz się rozgrzewa.

Prężność rośnie tutaj nie tylko skutkiem zmniejszenia objętości, ale i skutkiem ogrzania, wywołanego tłoczeniem gazu; musi zatym być większa, niż wynika z prawa Mariotte'a. Zgęszczenie adjabatyczne wyraża proporcja:

$$p_1 : p_2 = v_2^k : v_1^k \quad \text{(Poisson)}.$$

t. j. prężność jest w stosunku odwrotnym do k-ej potęgi objętości (prawo Poissona). Wykładnik k stanowi wiadomy stosunek $C_p : C_v$ ciepła właściwego przy stałym ciśnieniu i stałej objętości (§ 43).

Graficznie można wyrazić prawa Mariotte'a i Poissona, znacząc objętości na osi poziomej (rys. 259) i wystawiając w każdym z punktów zaznaczonych linje pionowe, o długości równej ciśnieniu tu istniejącemu. Powstaje w ten sposób linja krzywa; otrzymana według prawa Boyle-Mariotte'a zowie się *izotermą* (A' B' C' D'), otrzymana z prawa Poissona zowie się *adjabatą* (A'' B'' C'' D'').



Rys. 259. Wykres zgęszczenia.

Przykład. Niech w walcu znajduje się tłok w miejscu A, przyczym walec mieści 1 m³ powietrza pod ciśnieniem 1 atm, czyli $AA' = 1$. Przy położeniach tłoka B, C, D, objętość v_2 wyniesie oczywiście $\frac{3}{4}$, $\frac{1}{2}$, $\frac{1}{4}$. Zatym prężność:

według Mariotte'a w $B = \frac{4}{3}$, w $C = \frac{4}{2}$, w $D = \frac{4}{1}$

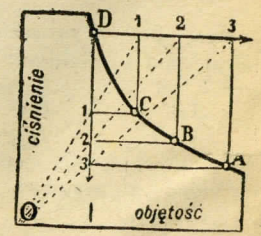
według Poissona „ $= (\frac{4}{3})^k$ „ $(\frac{4}{2})^k$ „ $(\frac{4}{1})^k$.

Jeżeli więc $AA' = 1$, $BB' = 1{,}33$, $CC' = 2$, $DD' = 4$,

to $AA'' = 1$, $BB'' = 1{,}5$ $CC'' = 2{,}7$, $DD'' = 7{,}1$.

Widać stąd, jak dalece przyrost ciśnienia w zgęszczeniu adjabatycznym jest większy, niż w izotermicznym.

Konstrukcja geometryczna. Jeżeli krzywa Mariotte'a ma przechodzić przez D (rys. 260), przeprowadza się przez D linję poziomą i pionową, którą następnie przecina się promieniami z O wychodzącymi O-1-1, O-2-2, O-3-3... Każda para punktów numerowanych pozwala wykreślić prostokąt o wierzchołku D; przeciwległe wierzchołki C, B, A prostokątów określają kształt linji Mariotte'a.



Rys. 260.
Linja Mariotte'a.

§ 51. Skraplanie gazów.

1. Zgęszczenie gazu. Podczas zagęszczania gazu, czyli zmniejszania jego objętości przez nacisk zewnętrzny, odbywa się przemiana pracy mechanicznej na ciepło; wywiązuje się więc ciepło, w ilości odpowiedniej do włożonej pracy.

Rozgrzanie zachodzi również przy rozpuszczaniu gazów w płynach i pochłanianiu przez ciała stałe; jest to bowiem zgęszczenie pod wpływem sił cząsteczkowych.

Gaz rozgrzewa się w skutek zgęszczenia, czy to pod naciskiem zewnętrznym, czy też w skutek absorbcji i okluzji.

Niech 1 kg powietrza mieści się w walcu o 1 m² przekroju, zamkniętym tłokiem, pod ciśnieniem normalnym, w temperaturze dowolnej. Nacisk atmosfery wynosi 10 333 kg na powierzchnię tłoka. Za wciśnięciem tłoka o 1 mm, praca przezeń wykonana = 0,001 . 10 333 = 10,333 kgm, co odpowiada ilości ciepła 10 333 : 427 = 0,024 kal. Ilość ta ogrzeje 1 kg powietrza o 0,024 : 0,168 = 0.14° C.

Przykłady. Przy nadymaniu obręczy gumowych pompka znacznie się rozgrzewa. — Rozpuszczanie amoniaku w wodzie rozwija tyle ciepła, że chcąc przyrządzić roztwór dość mocny, trzeba go ochładzać zewnętrznie, gaz bowiem na gorąco mało się rozpuszcza. — Rozżarzenie platyny w skutek pochłaniania wodoru, bądź pary spirytusowej; stąd zapalniczki. — Krzesiwo powietrzne (§ 56).

2. Prężność gazu przy zgęszczeniu można odróżnić dwojaką, zależnie od tego, czy naczynie, mieszczące gaz, rozprasza ciepło, czy też jest dla ciepła nieprzepuszczalne.

a) *Prężność izotermiczna* ma miejsce w naczyniu przepuszczalnym dla ciepła. Podczas zgęszczania gazu ciepło wywiązane uchodzi bezustannie, tak iż temperatura gazu wcale się nie zmienia.

Praktycznie stan taki można osiągnąć, wpychając bardzo powolnie tłok do walca, wyrobionego z dobrego przewodnika ciepła, np. cienkiej blachy.

Do zgęszczenia izotermicznego stosuje się prawo Boyle-Mariotte'a, przytoczone w dziale o gazach. Jeżeli prężność pierwotna będzie p_1, następna p_2, a objętości odpowiednie v_1 i v_2, to

$$p_1 : p_2 = v_2 : v_1 \quad \text{(Mariotte)}.$$

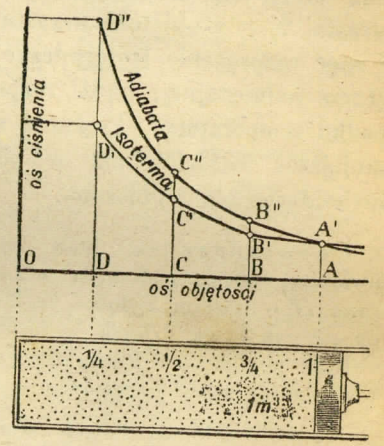
b) *Prężność adjabatyczna* ma miejsce w naczyniu szczelnym, tak, iż z niego nic ciepła nie uchodzi; stąd gaz się rozgrzewa.

Prężność rośnie tutaj nie tylko skutkiem zmniejszenia objętości, ale i skutkiem ogrzania, wywołanego tłoczeniem gazu; musi zatym być większa, niż wynika z prawa Mariotte'a. Zgęszczenie adjabatyczne wyraża proporcja:

$$p_1 : p_2 = v_2^k : v_1^k \quad \text{(Poisson)}.$$

t. j. prężność jest w stosunku odwrotnym do k-ej potęgi objętości (prawo Poissona). Wykładnik k stanowi wiadomy stosunek $C_p : C_v$ ciepła właściwego przy stałym ciśnieniu i stałej objętości (§ 43).

Graficznie można wyrazić prawa Mariotte'a i Poissona, znacząc objętości na osi poziomej (rys. 259) i wystawiając w każdym z punktów zaznaczonych linje pionowe, o długości równej ciśnieniu tu istniejącemu. Powstaje w ten sposób linja krzywa; otrzymana według prawa Boyle-Mariotte'a zowie się *izotermą* (A' B' C' D'), otrzymana z prawa Poissona zowie się *adjabatą* (A'' B'' C'' D'').



Rys. 259. Wykres zgęszczenia.

Przykład. Niech w walcu znajduje się tłok w miejscu A, przyczym walec mieści 1 m³ powietrza pod ciśnieniem 1 atm, czyli $AA' = 1$. Przy położeniach tłoka B, C, D, objętość v_2 wyniesie oczywiście $\frac{3}{4}$, $\frac{1}{2}$, $\frac{1}{4}$. Zatym prężność:

według Mariotte'a w $B = \frac{4}{3}$, w $C = \frac{4}{2}$, w $D = \frac{4}{1}$

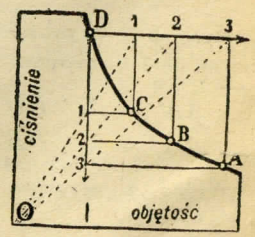
według Poissona „ $= (\frac{4}{3})^k$ „ $(\frac{4}{2})^k$ „ $(\frac{4}{1})^k$.

Jeżeli więc $AA' = 1$, $BB' = 1{,}33$, $CC' = 2$, $DD' = 4$,

to $AA'' = 1$, $BB'' = 1{,}5$ $CC'' = 2{,}7$, $DD'' = 7{,}1$.

Widać stąd, jak dalece przyrost ciśnienia w zgęszczeniu adjabatycznym jest większy, niż w izotermicznym.

Konstrukcja geometryczna. Jeżeli krzywa Mariotte'a ma przechodzić przez D (rys. 260), przeprowadza się przez D linję poziomą i pionową, którą następnie przecina się promieniami z O wychodzącymi O-1-1, O-2-2, O-3-3... Każda para punktów numerowanych pozwala wykreślić prostokąt o wierzchołku D; przeciwległe wierzchołki C, B, A prostokątów określają kształt linji Mariotte'a.

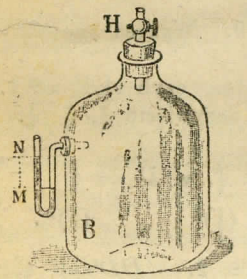


Rys. 260.
Linja Mariotte'a.

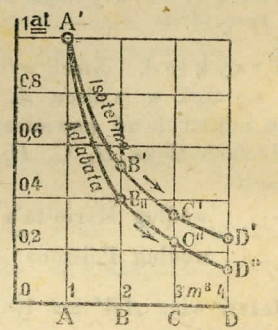
Pole figury tą drogą powstałej łatwo obliczyć na zasadzie regułu Simpsona (§ 4, art. 2). Wyraża ono pracę, zużytą na zgęszczenie, gdy tłok przeszedł z położenia jednej linji pionowej do drugiej. Praca w adjabatycznym zgęszczeniu jest oczywiście większa, niż w izotermicznym: różnica obu prac, podzielona przez 427, stanowi ciepło wywiązane podczas zgęszczenia.

3. Rozprężenie (ekspansja). Skoro gaz się rozszerza, wykonywając pracę, t. j. pokonywając jakiś opór, oziębia się wskutek tego. Prężność gazu może się zmniejszać w sposób dwojaki: 1) gdy tylko objętość wzrasta, 2) gdy objętość wzrasta i zarazem temperatura spada. Istnieje więc rozprężenie izotermiczne, przy podtrzymywanej sztucznie temperaturze jednostajnej, bądź rozprężenie adjabatyczne, przy naturalnym spadku temperatury. Prężność w ostatnim wypadku musi się oczywiście zmniejszać bardziej, niż w pierwszym; stosują się tu również prawa Boyle-Mariotte'a i Poissona.

Doświadczenie. Pod kloszem B (rys. 261) zgęszczono cokolwiek powietrze, tak iż manometr wodny wskazuje różnicę MN. Za otwarciem kranu H o wąskim wylocie, na kilka sekund, zachodzi podwójne zjawisko; gaz się cokolwiek oziębia wskutek rozszerzenia, manometr zaś spada do równych poziomów. Po zamknięciu kranu gaz ociepla się stopniowo, tak iż manometr znów się podnosi.



Rys. 261.
Rozrzedzenie oziębia gaz.



Rys. 262.
Wykres rozprężenia.

Rys. 262 wyobraża rozprężenie izotermiczne i adjabatyczne 1 m³ powietrza pod ciśnieniem 1 atm. do objętości 4 m³; wypada tutaj:

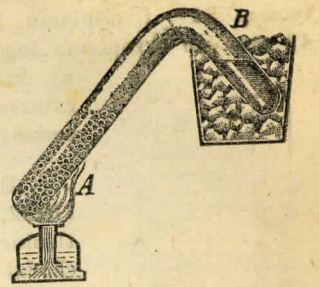
$$AA' = 1, \quad BB' = 0{,}5 \quad CC' = 0{,}33, \quad DD' = 0{,}25$$
$$AA'' = 1, \quad BB'' = 0{,}38, \quad CC'' = 0{,}21, \quad DD'' = 0{,}14.$$

Widać z rysunku, że praca w drugim rozprężeniu jest mniejsza, niż w pierwszym.

4. Skraplanie gazów osiąga się przez samo oziębianie, albo przez samo ściskanie gazu, albo jednym i drugim środkiem jednocześnie.

Przeważnie gazy dają się skroplić za pomocą ciśnienia, bez potrzeby ochładzania; niektóre zaś skraplają się już własną prężnością, jaką rozwijają przy wywiązywaniu się w naczyniu zamkniętym, np. chlor, amoniak, gaz siarkawy (dwutlenek siarki).

Tą drogą skroplił Faraday (1823, rys. 263) kilka gazów, ogrzewając materję, z której gaz się wywiązuje, w jednym końcu rurki kolankowej AB. W temperaturze zwykłej ciśnienie wynosi: dla chloru około 5 atmosfer, amoniaku 7. dwutlenku węgla 53 atm. Celem prędszego i obfitszego skroplenia można zanurzyć drugie ramię B rurki w lodzie.



Rys. 263.
Zasada skraplania.

Wiele gazów skrapla się już za pomocą oziębienia, pod zwykłym ciśnieniem atmosfery, np. gaz siarkawy (dwutlenek siarki) przy — 9° C, amoniak przy — 34°, dwutlenek węgla przy — 79°.

Ponieważ osiągnięcie bardzo niskich temperatur nastręcza dużo trudności, do gazów bardziej opornych stosuje się oziębianie połączone ze ściskaniem, które się uskutecznia za pomocą pompy tłoczącej lub prasy hydraulicznej. W ten sposób skroplono wszystkie gazy bez wyjątku.

5. Stan krytyczny materji. Przeszkodą, która do niedawna tamowała skroplenie gazów oporniejszych, była nieświadomość co do istnienia *temperatury krytycznej*, powyżej której żadnym ciśnieniem niepodobna gazu skroplić.

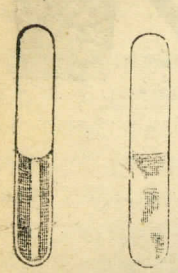
Materja, mająca temperaturę wyższą od krytycznej, jest *gazem trwałym* (doskonałym), np. powietrze atmosferyczne; mająca zaś temperaturę niższą da się skroplić samym ciśnieniem, stąd można ją nazwać *gazem nietrwałym*, np. para wszelkich cieczy, amoniak, chlor w warunkach zwykłych.

Płyny mogą istnieć w granicach od punktu krzepnięcia do temperatury krytycznej, przy której zatracają swą powierzchnię i ulatniają się zupełnie, bez względu na ciśnienie choćby największe. Temperatura krytyczna więc stanowi *punkt wrzenia bezwzględnego*.

Ciśnienie, istniejące w czasie skraplania gazu w temperaturze krytycznej, zowie się *ciśnieniem krytycznym*; objętość w tych warunkach zowie się *objętością krytyczną*.

W stanie krytycznym materja nie jest płynną ani lotną; jest to stan przejściowy, który świadczy o ciągłości stanu płynnego i gazowego.

Tak np. woda istnieje między 0° a 365° C, gdyż przy 0° woda zamarza, temperatura zaś krytyczna wody wynosi 365°, przyczym para wodna posiada ciśnienie krytyczne 200 atm. Dwutlenek węgla ma temperaturę krytyczną 31° i ciśnienie krytyczne 73 atm; w temperaturze 13° wystarcza 49 atm. do skroplenia tego gazu, a przy 0° tylko 35 atmosfer. Skroplony dwutlenek węgla ulatnia się bezwzględnie w temperaturze 31°, żadne ciśnienie nie zdoła powstrzymać tej zmiany.



Rys. 264. Stan krytyczny.

Doświadczenie Cagniard de Latour'a (1822, rys. 264). Rurkę, do połowy napełnioną dwutlenkiem węgla płynnym, ogrzewa się ciepłem ręki; nadchodzi chwila, kiedy powierzchnia, tworząca menisk wklęsły, staje się płaską, płyn staje się coraz mniej widoczny, aż granica między płynem a jego parą zanika całkowicie, przy ogrzaniu do 31°. Wtedy bowiem gęstość pary zrówna się z gęstością cieczy, a cała zawartość rurki staje się jednostajną. Powód takiego stanu przejściowego polega na wzrastaniu ilości pary, zatym i jej gęstości, podczas ogrzewania, a jednocześnie na zmniejszaniu się gęstości płynu, skutkiem rozszerzalności wciąż postępującej.

Temperatury i ciśnienia krytyczne.

Gaz	Temperatara krytyczna	Ciśnienie krytyczne	Punkt wrzenia pod ciśn. atm.
Hel	— 267°	2 atm.	— 268½°
Wodór.	— 234°	15 „	— 243°
Azot	— 146°	33 „	— 194°
Powietrze	— 140°	39 „	— 190°
Tlen	— 118°	50 „	— 182°
Dwutlenek węgla (CO_2) . .	+ 31°	73 „	— 79°
Amoniak	+ 131°	113 „	— 34°
Gaz siarkawy (SO_2) . . .	+ 156°	79 „	— 9°
Eter	+ 195°	40 „	+ 35°
Spirytus	+ 244°	62 „	+ 79°
Woda.	+ 365°	200 „	+ 100°

Jak widać z tabelki, najtrudniej skrapla się *hel*, którego punkt wrzenia krytyczny wynosi — 267°, a pod ciśnieniem normalnym — 268½°. Hel jest gazem, dostrzeżonym niedawno na słońcu (grec. helios = słońce), a następnie dopiero wykrytym na ziemi, gdzie się trafia w bardzo drobnych ilościach.

Temperatura — 268½° różni się zaledwie o 4½° od zera bezwzględnego, czyli najniższej teoretycznie możliwej temperatury (§ 42, art. 8). Należy jednak zauważyć, że podobne liczby są tylko w niewielkim przybliżeniu dokładne (stąd różna wartość u autorów), gdyż oznaczanie temperatur i ciśnień krytycznych ma do zwalczania wpływy uboczne. Podobnież liczba — 273 ma tylko przybliżoną wartość, jako punkt zera bezwzględnego, ponieważ spółczynnik α nie jest stały (§ 42, art. 1).

6. Praktyczne skraplanie gazów. Doświadczenia Latoura nie były swego czasu należycie wyświetlone, skutkiem czego napróżno próbowano skroplić gazy takie, jak powietrze, azot, tlen, wodów, metan, za pomocą największych ciśnień, do 3000 atmosfer (Natterer).

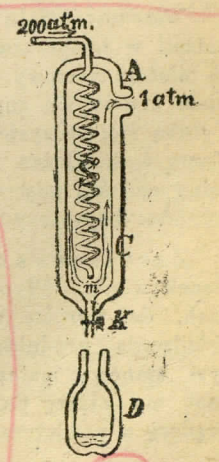
Dopiero Andrews (1869) wskazał konieczność oziębiania gazu poniżej temperatury krytycznej. Stosując tę wskazówkę, Cailletet w Paryżu i Pictet w Genewie, niezależnie od siebie i prawie jednocześnie (1877) doprowadzili tlen, azot i powietrze do stanu skroplenia, tak iż powstała mgła. Stanowczego zaś skroplenia tych gazów dokonali Wróblewski i Olszewski w Krakowie (1883), tak iż zdołali zebrać je w stanie płynnym i opisać własności.

Sposób kolejnego chłodzenia, jakim posługiwali się nasi uczeni, polegał na przyrządzaniu szeregu kąpieli oziębiających coraz zimniejszych. Płynny dwutlenek węgla, wrzący pod zwykłym ciśnieniem, wytwarza temperaturę — 79°. Wtłoczony do tej kąpieli gazowy etylen ulega skropleniu; następnie płynny etylen, wpuszczony do przestrzeni o słabym ciśnieniu (20 mm rtęci), wrze gwałtownie i oziębia się do — 140° C. Powietrze pod ciśnieniem 39 atm. skrapla się przy takim oziębieniu.

Podobnież można dalej wpuścić płynne powietrze do przestrzeni o silnym rozrzedzeniu i osiągnąć kąpiel poniżej — 200°, a oziębiając nią wodór silnie zagęszczony, można przez rozprężanie tegoż osiągnąć temperaturę —243°, tak iż wodór się skrapla (Devar w Londynie, 1898). Wreszcie najtrwalszy z gazów, hel, skrapla się po oziębieniu w kąpieli wodorowej i rozprężeniu, w temperaturze — 267° (Kamerlingh-Onnes w Lejdzie, 1908); w tych ostatnich pracach posługiwano się kolejno kąpielami ze skroplonego chlorku metylu, etylenu, powietrza, wodoru, Wszystkie jednak sposoby kolejnego chłodzenia mają znaczenie raczej naukowe; dla techniki są one zbyt mozolne i kosztowne.

Sposób ciągłego chłodzenia przez samo rozprężanie, bez pomocy płynnych kąpieli oziębiających, praktykuje się obecnie na wielką skalę do skraplania gazów; jest to metoga Lindego (1896), ulepszona przez Hampsona (1900).

Do skraplania powietrza służy powszechnie *przyrząd Hampsona* (rys. 265); składa się z rury miedzianej, skręconej w gęstą wężownicę S i wpuszczoną do naczynia o ścianach podwójnych C, aby uniknąć ogrzewania zewnętrznego. Powietrze pod ciśnieniem 200 atmosfer wpada do wężownicy, uchodzi zaś przez przez wąski wylot m na jej spodzie i stamtąd wzdłuż całej wężownicy, aż do otworu A, gdzie wydostaje się do atmosfery. Przez rozprężenie w m powietrze się ochładza



Rys. 265. Skraplanie powietrza.

i dalej chłodzi wężownicę, tak iż nowy zapas powietrza przepływa już przez rurę oziębioną; rozprężając się, stygnie coraz bardziej, chłodzi dalej rurę i t. d., aż wreszcie temperatura spada do krytycznej, a powietrze się skrapla przy *m*. Stąd wypuszcza się je od czasu do czasu, otwierając kran *K*, do odpowiedniego naczynia *D*.

Przechowywać można powietrze płynne przez parę dni w otwartych *flaszkach Dewara* (*D*), o ścianach podwójnych, wysrebrzonych i doskonale opróżnionych w przestrzeni między ścianami. Zamykać flaszki nie można, gdyż wtedy ustałoby parowanie, które oziębia płynne powietrze i przeszkadza mu w zamianie na stan gazowy; stąd zamknięcie groziłoby rozsadzeniem flaszki.

7. Własności gazów skroplonych są takie same, jak wogóle własności płynów; główna różnica polega na niskiej temperaturze krytycznej oraz jeszcze niższym punkcie wrzenia i zamarzania.

Gazy po skropleniu stanowią ciecze ruchliwe, o gęstości bliskiej do zwykłych cieczy: np. gęstość powietrza płynnego jest mało co większa niż wody. Niektóre posiadają kolor swoisty, jakkolwiek powstają z gazu bezbarwnego; np. tlen płynny jest błękitny. Można je przelewać, jakkolwiek z dużą stratą wskutek parowania.

Prawie wszystkie gazy zdołano zamrozić, czyli zamienić na ciała stałe; wyjątek dotąd stanowi hel, służy przeto do termometru gazowego.

Skroplone gazy stanowią znakomite środki oziębiające, gdyż parując silnie pod zwykłym ciśnieniem, pochłaniają dużo ciepła. Znajdują się one w stanie ciągłego, acz powolnego wrzenia, którego temperatura jest stała, jak dla każdej cieczy (§ 46, art. 2); stąd np. powietrze płynne ma stale temperaturę — 190°, dwutlenek węgla — 79°.

Własności wielu ciał są w temperaturze płynnego powietrza zgoła inne, aniżeli w temperaturze powszedniej. Rtęć zamrożona daje się obrabiać, tak iż młotek rtęciowy wbija gwoździe w deskę. Guma twardnieje, za uderzeniem kruszy się zupełnie; ołów nabiera twardości żelaza. Kwiaty kruszeją i tłuką się; soczyste zaś owoce stają się sprężystymi, odskakują jak piłki. Energja chemiczna słabnie tak, iż kwasy nie działają na metale, np kwas solny na sód, gdy w warunkach zwykłych gwałtownie je rozpuszczają. Życie zamiera: najwytrzymalsze na mróz bakterje giną.

Zastosowwania praktyczne głównie ma powietrze skroplone i dwutlenek węgla. Płynny dwutlenek węgla służy do nasycania piwa w browarach, de wyrobu win i napojów musujących. Powietrze płynne służy do chłodzenia produktów spożywczych w specjalnych zamrażalniach. Poza tym stanowi materjał do wyrobu tlenu za pomocą dystylacji cząstkowej: azot ma niższy punkt wrzenia, niż tlen (por. tabelkę), ulatnia się więc prędzej z powietrza ciekłego, pozostawiając powietrze coraz w tlen bogatsze.

8. Różnica pomiędzy gazem a parą. Gaz oziębiony poniżej temperatury krytycznej, można uważać za parę w stanie nienasyconym, czyli przegrzanym. Np. gaz węglowy czyli gazowy dwutlenek węgla w zwykłej temperaturze można uważać za parę płynnego dwutlenku węgla. Para wodna w temp. ponad 365° C. jest gazem, spirytus powyżej 244°.

Przy dalszym ochładzaniu, aż do normalnego punktu wrzenia, każda para przechodzi chwilowo w stan nasycony, poczym skrapla się stopniowo, jeżeli temperatura wciąż spada.

Skroplony gaz lub parę, t. j. ciecz, można wreszcie przez dalsze oziębienie doprowadzić do krzepnięcia, t. j. do postaci stałej.

Gazem jest ciało powyżej punktu krytycznego; parą jest to samo ciało lotne poniżej punktu krytycznego.

Prężność pary nasyconej rośnie raptownie przy niewielkim nawet ogrzaniu; prężność gazu rośnie daleko słabiej. Ażeby np. podnieść prężność gazu o 1 atmosferę, trzeba go ogrzać o 273°; tymczasem para wodna (pt.), daje ten sam wynik już za ogrzaniem o 10°, a nawet o 5° (tabelkę); stąd zastosowanie pary do motorów.

Zestawienie temperatury i stanu skupienia:

Temp. krytyczna		Temp. (wrzenia)		Temp. topliwości	
Gaz (trwały)	Para (przegrz.)	Para (nasyc.)		Płyn	ciało stałe

9. Graficzne przedstawienie stanu gazu i pary. Prawo Mariotte'a-Gay Lussaca, przy liczeniu temperatury od zera bezwzględnego, daje wzór (§ 42, art. 8, wzór 3):

$$\frac{v\,p}{T} = \frac{v_1\,p_1}{T_1} = \text{const.}$$

zwany *równaniem gazów doskonałych*, wyraża bowiem stan fizyczny gazu w zależności od 3 zasadniczych danych: objętości, ciśnienia i temperatury. Oznaczając *const.* przez R, wzór powyższy można napisać:

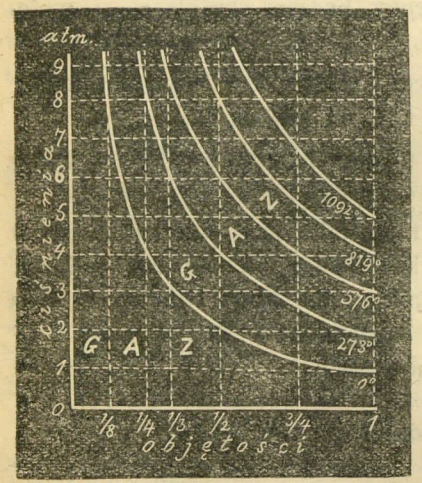
$$v \,.\, p = T \,.\, R.$$

W tej postaci stanowi on t. zw. *równanie Clapeyrona*.

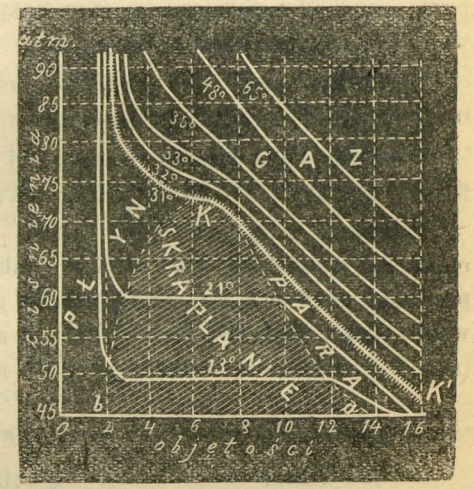
Wartość stałej R wynika z założenia, że gaz pierwotnie ma wiadome warunki normalne: temperaturę 0°, objętość v_0, ciśnienie p_0, skoro więc $v_1 = v_0$, $p_1 = p_0$, $T = 273$,

$$\text{stała } R = \frac{v_0 \,.\, p_0}{273}.$$

Wykreślenie zmian gazu, pozostającego wciąż w stanie trwałym, odbywa się na osiach spółrzędnych (rys. 266), na zasadzie czynników iloczynu $p\,v$ dla każdej temperatury t (liczonej zwyczajnie). Na rysunku oznaczono izotermy w odstępach co 273°, gdy dla objętości = 1 wzrasta ciśnienie stopniowo o 1 atmosferę. Izotermy mają przebieg prawidłowy (hyberbole równoboczne), o ile gaz jest daleki od punktu skroplenia.



Rys. 266. Zmiany w stanie gazowym.



Rys. 267. Przejście od stanu gazowego do płynnego.

Wykreślenie przemiany gazu na ciecz okazuje podobieństwo do poprzedniego tylko w temperaturach wyższych, dalekich od krytycznej. Np. dla dwutlenku węgla (rys. 267) izotermy 65° i 48° nie różnią się prawie od typu gazowego; dopiero izotermy 35°, a bardziej jeszcze 33° i 32° wyginają się nieforemnie, świadcząc, że objętość zmniejsza się bardziej, niż ciśnienie wzrasta (uchybienie od prawa Boyle-Mariotte'a).

Izoterma 31° jest *linią krytyczną* (*KK'*), poniżej której gaz staje się parą nienasyconą, możliwą do skroplenia od dalszego nacisku. Przy 21° idzie skraplanie pod siśnieniem 60 atm., przy 13° pod ciśnieniem 49 atm.; podczas skroplenia temperatura i ciśnienie trwa bez zmiany, tylko objętość znacznie się zmniejsza, jak widać z wykresu. W dalszym przebiegu, t. j. po skropleniu, izotermy 21° i 13° idą raptownie do góry, okazując, że małe skurczenie płynu jest połączone z ogromnym wzrostem ciśnienia.

Punkt K, gdzie spotyka się linja pary Ka z linją płynu Kb jest *punktem krytycznym*, cała zaś krzywa bKa zowie się *linją skraplania*. Wewnątrz niej, w obszarze zacieniowanym, istnieje stan przejściowy, para nasycona pomieszana z płynem, bez żadnej widocznej granicy (por. wyżej doświadczenie Latoura).

Zadania.

1. Pod tłokiem mieści się 1 m³ powietrza o temp. 0° i prężności 5 atmosfer. Powietrze ogrzano do 100°, przytrzymując tłok, następnie dano mu się rozszerzyć izotermicznie do objętości 5 m³. Ile wynoszą ciśnienia przy 1, 2, 3, 4, 5 m³? Odp. 6,83; 3,415; 2,277; 1,707; 1,366 atm.

2. 20 litrów powietrza o prężności 1 atm. rozszerza się do obj. 100 ltr: a) izotermicznie, b) adjabatycznie. Ile wykonywa pracy w każdym przypadku? Odp. a) 333 kgm, b) 245 kgm.

§ 52. Silniki cieplne.

1. Silniki cieplne czyli **motory termiczne** są to wszelkie urządzenia do przemiany ciepła na pracę mechaniczną.

Najczęściej przemiana taka odbywa się za pośrednictwem pary wodnej o wysokiej prężności; tego rodzaju urządzenia stanowią *silniki parowe*. Inny rodzaj silników posiłkuje się perjodycznymi wybuchami materji łatwo zapalnych, jak gaz, benzyna, nafta, spirytus: są to *silniki wybuchowe* czyli *spalinowe*. Trzeci rodzaj silników korzysta bezpośrednio z prężności ogrzanego powietrza, stąd zowią się one *silnikami powietrznymi*.

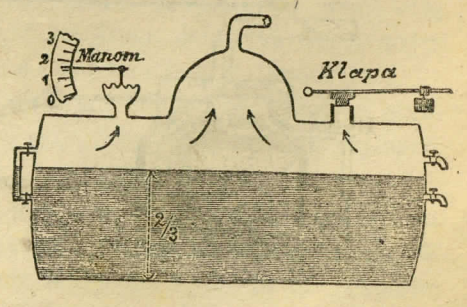
2. Silnik parowy czyli **maszyna parowa** składa się z trzech części zasadniczych:

1) części, dostarczającej ciepła, czyli *paleniska*, gdzie spala się węgiel, drzewo, torf lub nafta;

2) części, wytwarzającej parę pod wysokim ciśnieniem, mianowicie *kotła* znacznej wielkości.

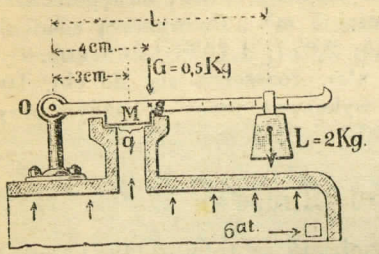
3) części roboczej, gdzie para wykonywa pracę użyteczną; część tę stanowi *walec* czyli *cylinder parowy* z przyborami do kierowania pary i przenoszenia ruchu na koła.

3. Kocioł parowy (rys. 268) ma zwykle postać walcową; składa się z grubej blachy żelaznej. Poziom wody w kotle ocenia się z *wodowskazu*; nadto kocioł posiada *krany* do wypuszczania wody i pary. Im większą ma kocioł powierzchnię ogrzewalną, tym skuteczniej wytwarza parę. Płomień i gazy gorące z paleniska puszcza się w tym celu nie wprost do komina, ale przez cały szereg rur płomiennych, idących wzdłuż kotła i zanurzonych w wodzie. Kocioł taki nazywa się *rurowym* (por. lokomotywę, rys. 271).



Rys. 268. Kocioł parowy.

Para ma ujście przez *klapę bezpieczeństwa*, którą można przycisnąć dowolnie i w ten sposób regulować prężność pary. Prężność tę wskazuje *manometr*; wynosi ona w rozmaitych rodzajach kotłów zwykle od kilku do kilkunastu atmosfer.



Rys. 269. Klapa bezpieczeństwa.

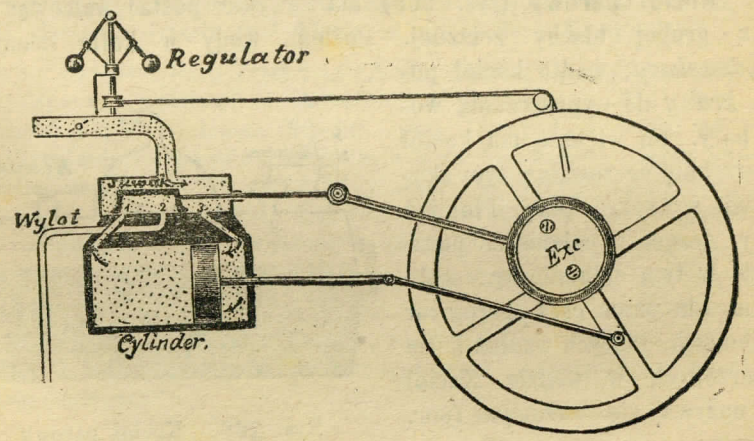
Klapa bezpieczeństwa (*M*, rys. 269) do kotłów parowych jest osadzona na drążku, obracalnym na osi *O*; naciskowi pary *q* przeciwdziała ciężar *L*, przesuwany na drążku: im większa jest prężność pary, tym dalej odsuwa się ciężar *L*.

Przykład. Klapa ma się otwierać pod ciśnieniem pary, wynoszącym 6 atmosfer, t. j. 6 kg na każdy cm² klapy. Ciężar drążka $G = 0{,}5$ kg; odległość środka ciężkości *S* od osi $O = 4$ cm; powierzchnia klapy $q=2$ cm²; odległość jej środka *M* od osi $O=3$ cm. Gdzie należy zawiesić ciężar $L = 2$ kg?

Rozw. Równanie momentów daje: $L \cdot l + G \cdot 4 = P \cdot 3$; ponieważ nacisk pary $P = 2 \cdot 6 = 12$ kg, to $Ll = 34$; stąd $l = 17$ cm.

4. Cylinder parowy Watta (rys. 270) stanowi walec żelazny o grubych ścianach, z tłokiem i urządzeniem do wpuszczania pary naprzemian to z jednej, to z drugiej strony tłoka. W tym celu ściana posiada dwa kanały, łączące kocioł z cylindrem, oraz między nimi wylot dla pary, prowadzący na otwarte powietrze lub do *chłodnicy* czyli *kondensatora*, gdzie para się skrapla. Do kierowania pary służy *suwak* (szyber, stawidełko), nasada metalowa wydrążona, przesuwana po zewnętrznej ścianie walca, tak iż zamyka naprzemian kanały. Suwak mieści się w *komorze parowej* cylindra, połączonej stale z kotłem.

Działanie. Za wpuszczeniem pary przez kanał 3, tłok się posuwa, mianowicie na lewo podług rys. 270; powietrze zaś, jakie napełniało walec, wychodzi przez kanał 1, suwak i kanał 2. Przez ten czas suwak porusza



Rys. 270. Główne części maszyny parowej.

się na prawo, tak iż otwiera kanał 1, a zamyka 3, i para wpada teraz z lewej strony, popychając tłok na prawo; zużyta zaś para wychodzi kanałem 3, suwakiem i kanałem 2 na zewnątrz. Następnie suwak się cofa, jak na rysunku i t. d. Ruchy tłoka są przeciwne, a skoki, t. j. drogi przebyte za jednym ruchem, są znacznie większe, niż skoki suwaka. Sprawia to *mimośród* (ekscentryk, *Exc*), t. j. tarcza, obracająca się na osi, która nie przechodzi przez jej środek.

Ruch postępowy tłoka, to jest po linji prostej, zamienia się na obrotowy za pomocą *krzyżulca* i *korby* (podobnie jak ruch pedału w kołowrotku, tokarni, maszynie nożnej do szycia). W motorach nieruchomych krzyżulec obraca w ten sposób *koło rozpędowe*, które wskutek bezwładności sprawia obrót jednostajny. Silniki, posuwające się własną siłą, np. lokomotywy, parowce, nie potrzebują kół rozpędowych; rolę ich spełnia masa całej maszyny, będąca w ruchu.

Skrajne położenie tłoka stanowią t. zw. *punkty martwe*, gdzie trzon korbowy staje w linji prostej z trzonem tłokowym, tak iż w tych położeniach żadne ciśnienie pary nie mogłoby maszyny poruszyć.

Motory nieruchome posiadają nadto *regulator kulkowy* (odśrodkowy), którego kulki przy nazbyt szybkim biegu motoru podnoszą się tak, iż pociągają klapkę i tłumią dopływ pary.

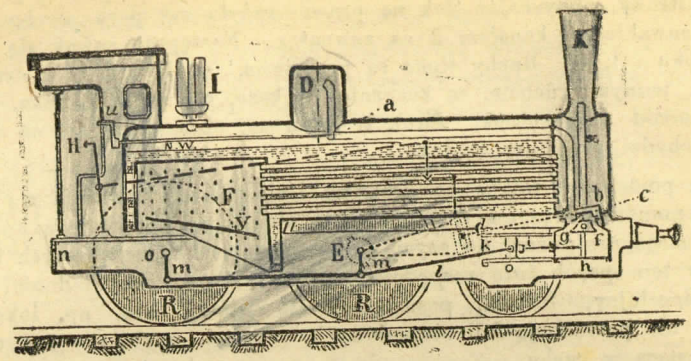
5. Wzmianka historyczna. Opisane części wprowadził mechanik szkocki James Watt (1763), zwłaszcza zaś przez wynaleziony przezeń kierownik szybrowy uczynił maszynę parową motorem rzeczywiście praktycznym.— Pierwsze jednak motory parowe zjawiły się już na początku 18 stulecia (Newcoman 1705); używano ich w Anglji do pompowania wody. — Papin zbudował kocioł parowy i cylinder parowy, gdzie ruch powrotny tłoka odbywał się pod ciśnieniem atmosfery, w skutek oziębienia cylindra (1688). — Fulton zbudował pierwszy statek parowy (1807), a Stephenson pierwszą lokomotywę (1814).

6. Podział maszyn parowych. Para zużyta z cylindra może wychodzić wprost na otwarte powietrze, w maszynach, o t. zw. wysokim ciśnieniu, albo też do chłodnicy, gdzie ulega skropleniu, w maszynach o niskim ciśnieniu.

W nowszych maszynach para nie działa jednostajnie przez całą drogę tłoka, ale tylko pewną część tej drogi, dalej zaś działa swym rozprężeniem; są to t. zw. silniki z rozprężeniem (ekspansyjne).

Wreszcie można parę po wykonaniu pracy w jednym cylindrze przeprowadzić do drugiego, stąd do trzeciego, ażeby wyzyskać jak najzupełniej jej prężność; stosują to silniki sprzężone.

a) Maszyny o wysokim ciśnieniu wypuszczają parę wprost w powietrze, tak iż para musi pokonywać ciśnienie atmosfery. Prężność pary w kotle wynosi tutaj zwykle nie mniej niż 6, aż do 15 atmosfer; ciśnienie użyteczne, t. j. poruszające tłok, jest mniejsze o 1 atmosferę.



Rys. 271. Lokomotywa

Do takich maszyn należy *lokomotywa* czyli *parowóz* (rys. 271). Zawiera ona kocioł rurowy o kilkuset rurach płomiennych. Ruch tłoka obraca koła pędzące (korbowe), na których osiach spoczywa ciężar maszyny. Dla uniknienia punktów martwych, ruch tłoków w obu walcach różni się o $\frac{1}{4}$ łazy, t. j. korby stoją do siebie prostopadle, tak iż skoro jeden tłok dochodzi do dna, drugi znajduje się pośrodku walca.

Lokomotywy posiadają sprawność od kilkudziesięciu koni, np. na kolejkach podjazdowych, do kilkuset koni parowych, jak na kolejach większych, zwłaszcza w pociągach pośpiesznych oraz towarowych.

b) Maszyny o niskim ciśnieniu wpuszczają parę zużytą do chłodnicy, gdzie para się skrapla, tak iż po jednej stronie tłoka powstaje względna próżnia (ciśnienie 0,1 do 0,2 atm.); stąd nawet przy 1 atm. ciśnienia pary w kotle maszyna może pracować. W maszynach z kondensacją ciśnienie zwykle nie przekracza 3 do 6 atmosfer.

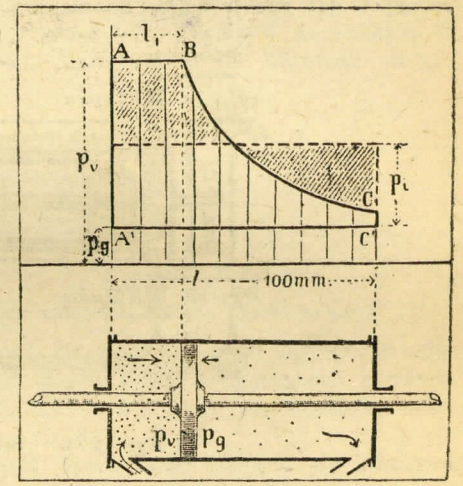
Niedogodność maszyn z chłodzeniem pary stanowi potrzeba dużego zapasu wody; przez pochłanianie bowiem pary woda prędko się ogrzewa, tak iż trzeba ją usuwać za pomocą pompy, a dostarczać wody zimnej. Stąd maszyny o niskim ciśnieniu mają zastosowanie tam, gdzie woda jest tuż obok, w znacznej obfitości, np. na statkach parowych, w fabrykach dobrze w wodę zaopatrzonych.

c) Maszyny z rozprężeniem czyli ekspansją zamykają dopływ pary do walca w chwili, gdy tłok odbył część drogi, np. $\frac{1}{4}$ całkowitego skoku. Dalszą pracę tłoka, do końca tego skoku, sprawia rozprężenie pary; prężność więc spada stopniowo od chwili zatrzymania pary do punktu martwego. Tutaj do obliczenia sprawności maszyny wchodzi średnia prężność pary podczas całego skoku tłoka.

Pole S wykresu $A'ABCC'$ (rys. 172) oblicza się według reguły Simpsona (§ 4, art. 2). Z podziału tego pola S przez skok l tłoka $A'C'$ wypada wysokość p_i prostokąta równoważnego, czyli:

$$\text{średnia prężność } p_i = \frac{S}{l} = \frac{\text{pole wykresu}}{\text{skok tłoka}}.$$

Przeciwciśnienie pary w chłodnicy wynosi na wykresie 0,2 atm., w ciągu całego skoku tłoka; stąd linja $A'C'$ jest równoległa do linji zera. Przebieg ciśnienia p w ciągu całkowitego skoku l wyraża na drodze l_1 linja prosta, na pozostałej krzywa Mariotte'a; stosunek $l_1 : l$, zwany *napełnieniem*, charakteryzuje rozprężenie.



Rys. 272.
Cylinder z rozprężeniem pary

d) Maszyny sprzężone (compound) posiadają po kilka walców tak połączonych, że para z pierwszego po wykonaniu pracy idzie do drugiego, obszerniejszego, następnie, poruszywszy w nim tłok, przechodzi do walca jeszcze większego; czasami stąd jeszcze do czwartego.

Maszyny tego rodzaju bywają zwykle znacznych wymiarów, np. motory okrętowe, i zowią się także maszynami o podwójnej, potrójnej lub poczwórnej ekspansji. Dają one znaczną oszczędność na paliwie, to też stosuje się je wszędzie, gdzie pozwala na to pomieszczenie.

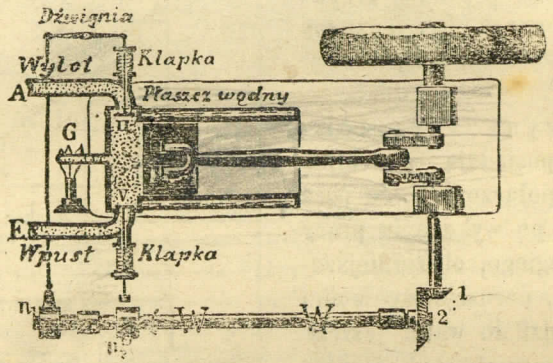
e) Najnowszy typ maszyn parowych stanowią *turbiny parowe*, które stosują nie prężność pary, ale energję kinetyczną wypływu pary; bliższy opis w dziale aerodynamiki (pt.).

7. Silniki spalinowe, czyli **wybuchowe**, obchodzą się zupełnie bez kotła; działanie ich polega na wessaniu do walca jakiejś lotnej mieszaniny wybuchowej, która zapalona porusza tłok prężnością gazów, wytworzonych przy wybuchu.

Tu, należą silniki gazowe, naftowe, benzynowe, spirytusowe. Prężność pary tych ciał, zmieszanej z powietrzem, jest w chwili spalenia bardzo znaczna (20 do 30 atm.), i temperatura odpowiednio wysoka, stąd przy małych wymiarach motory spalinowe są bardzo silne; sprawność posiadają daleko większą, niż motory parowe tej samej wagi i wymiarów (teoretycznie wynika to z zasady Carnota, § 57, art. 4).

Niedogodność silników wybuchowych polega na tym, że same ruszyć nie mogą, t. j. do wprawienia ich w ruch trzeba w pierwszej chwili obcego popędu, np. siłą ręki lub elektryczną.

Zasadę działania silników wybuchowych najlepiej objaśnia *silnik gazowy* (rys. 273), który wynalazł Lenoir (1860), a ulepszył Otto (1865). Tłok, poruszając się naprzód, wciąga do walca gaz świetlny, zmieszany z powietrzem, za pomocą rury E i klapki v (I ruch tłoka). Cofając się następnie, tłok zagęszcza tę mieszaninę gazów i pędzi ją do *świecy* czyli rurki rozżarzonej G (II ruch), gdzie mieszanina się zapala i sprawia wybuch w całej



Rys. 273. Silnik gazowy.

masie gazów; produkty stąd wytworzone pędzą swą prężnością tłok znów naprzód (III ruch). W tej chwili tłok wykonywa pracę użyteczną na zewnątrz; poruszone zaś koło rozpędowe obraca się dalej bezwładnością, przez co tłok się cofa i wypycha produkty wybuchu przez klapkę u (IV ruch). Motor taki zowie się c z t e r o t a k t o w y m; jego 4 f a z y stanowią: wessanie, zgęszczenie, wybuch, wyrzucenie.

Zapalanie gazów w silnikach ruchomych, np. benzynowych do samochodów i aeroplanów, odbywa się za pomocą iskry elektrycznej; *świeca* składa się tu z rurki, zawierającej dwa druciki, połączone z przyrządem elektrycznym.

Silniki spalinowe mają lepszą wydajność od parowych, zamieniają bowiem prawie $\frac{1}{3}$ ciepła na pracę użyteczną, ale mimo to praca ich kosztuje drożej, ponieważ spalają materje znacznie droższe od węgla. Mają szerokie zastosowania do mniejszych fabryk, warsztatów, drukarni, do oświetlenia elektrycznego, nadewszystko zaś jako lekkie motory przenośne, do samochodów, motocyklów, łódek motorowych, balonów, aeroplanów. Zwłaszcza motory benzynowe, których waga spadła dzisiaj do 2, a nawet do $1\frac{1}{2}$ kg na sprawność każdego konia parowego, umożliwiły człowiekowi latanie mechaniczne oraz kierowanie balonami. W miarę wyczerpywania się w ziemi zasobów węgla i nafty, mają przyszłość motory spirytusowe.

8. Sprawność silników. Miarą sprawności wszelkich silników jest *koń mechaniczny* = 75 kgm na sekundę, zwany także *koniem parowym*. Sprawność wyraża wzór ogólny (§ 23, art. 3).

$$\text{sprawność } K = \frac{P \cdot v}{75} = \frac{\text{siła} \times \text{szybkość}}{75}.$$

(sprawność w *HP*, siła w kg, szybkość w m/sek)

W zastosowaniu do maszyn parowych, siła $P = p \cdot Q$ jest iloczynem ze średniej prężności pary przez pole tłoka; szybkość średnią v tłoka wyraża droga na 1 minutę, podzielona przez 60. Ponieważ za każdym obrotem koła tłok daje skok podwójny $2\,l$, to przy n obrotach droga na minutę $= 2\,l \cdot n$,

$$\text{czyli } v = \frac{2\,l \cdot n}{60} = \frac{n \cdot l}{30}.$$

Tak więc, sprawność parowego silnika

$$K = \frac{p \cdot Q}{75} \cdot \frac{n \cdot l}{30} = \frac{p \cdot Q \cdot n \cdot l}{2250} \text{ koni par.}$$

(p wyrażone w atm., Q w cm², l w metrach, n = liczba obrotów na min.)

Pod p rozumiemy c z y n n ą prężność pary, t. j. po odjęciu przeciwciśnienia, jakie istnieje z przeciwnej strony tłoka: w maszynach z chłodnicą przeciwciśnienie jest bardzo małe, 0,1 do 0,2 atm.; bez chłodnicy stanowi okrągło 1,1 atm.

Powyższa sprawność ma wartość teoretyczną i zowie się *sprawnością wskazaną* (indykowaną, K_i); nie uwzględnia się tu bowiem strat wskutek tarcia, oporów szkodliwych i rozpraszania ciepła. Sprawność rzeczywista, czyli *sprawność użyteczna* (efektywna K_e) jest o 20% do 40% mniejsza; oznacza się ją praktycznie za pomocą specjalnego hamulca (§ 23, art. 4). Stosunek tej ostatniej do pierwszej zowie się *wydajnością mechaniczną* (η):

$$\eta = \frac{K_e}{K_i} = 0{,}6 \text{ do } 0{,}8.$$

9. Wydajność ekonomiczna silników jest to stosunek ciepła dostarczonego maszynie do ciepła zamienionego w pracę (§ 50, art. 4). Wydajność ta jest bardzo mała, wynosi w najlepszych silnikach parowych, o potrójnej ekspansji, zaledwie 16 do 17%; w benzynowych 25 do 30%.

Najwyższa możliwa teoretycznie wydajność wyraża się wzorem Carnota $\frac{T_1 - T_2}{T_1}$, z którego można obliczyć, że gdyby się dało podnieść temperaturę pary w maszynie aż do krytycznej 365°, wydajność ekonomiczna byłaby przeszło 50%, a mechaniczna do 40%.

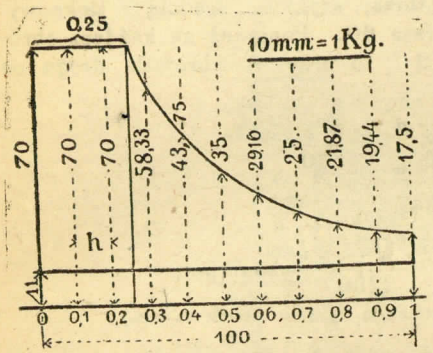
P r z y k ł a d y. 1) Najbardziej ekonomiczne maszyny parowe zużywają $\frac{1}{2}$ kg węgla na konia i godzinę. Ilość ciepła dostarczona $= 0{,}5 \cdot 8000 =$ $= 4000$ kalorji. Ilość ciepła spożytkowana w postaci pracy mechanicznej wynosi $(75 \cdot 3600) : 427 = 632$ kalorje. Zatym

$$\text{wydajność ekonomiczna} = \frac{632}{4000} = 16\%.$$

2) Duży silnik benzynowy spala $\frac{1}{4}$ litra benzyny na konia i godzinę; wynosi to na wagę $\frac{1}{4} . 0,7 = 0,175$ kg. Ciepło dostarczone $= 0,175 . 12\,000 = 2100$ kalorji. Ciepło spożytkowane na pracę $= 637$ kal., zatym

$$\text{wydajność ekonomiczna} = \frac{632}{2100} = 30\%.$$

Zadania.



Rys. 274.

1. Ile koni wytwarza silnik parowy o walcu 400 mm średnicy, skoku 800 mm i 100 obrotach na minutę, jeżeli napełnienie $l_1 : l = 0,25$, prężność całkowita $= 7$ atm., przeciwciśnienie $= 1,1$ atm., średnica trzona tłokowego $= 65$ mm, wydajność mechaniczna $= 0,8$?

Rozw. Średnie ciśnienie p_i wypada z wykresu (rys. 274), którego długość $= 100$ mm, a na wysokość 1 kg $= 10$ mm skali. Dla rozmaitych położeń tłoka rzędne ciśnienia wynoszą: dla 0,3 rzędna $= \frac{25.70}{30} =$ $= 58,33$ mm, dla 0,4 rzędna $= \frac{25.70}{40} = 43,75$ mm i t. d.

Z reguły Simpsona wypada stąd średnia wysokość $= \frac{h}{3.100} .$ $. [70 + 4 . (70 + 58,33 + 35 + 25 + 19,43) + 2 . (70 + 43,75 + 29,16 + 21,87) + 17,5] = 41,6$ mm. Po odjęciu 11 mm, odpowiednio do przeciwciśnienia 1,1 atm., wypada teoretycznie $p_i = 3,06$; uwzględniając zaś stratę prężności 10%, wypada 3,06. $0,9 = 2,754$ atm. Zatym sprawność wskazana

$$K_i = \frac{(40^2 - 6,5^2)\,\pi/_4 . 2,754 . 100 . 0,8}{2250} = 119,8 \text{ koni p.}$$

Przy wydajności 80%, sprawność użyteczna

$$K_e = 0,8 . 119,8 = 96 \text{ koni par.}$$

2. Ile wynosi sprawność tej samej maszyny, jeżeli zastosowano do niej chłodnicę, gdzie prężność pary pozostałej wynosi 0,2 atm., wydajność zaś mechaniczna spada do 78%?

Rozw. Rzędna ciśnienia 0,2 atm. stanowi na wykresie 2 mm, stąd

$$p_i = \frac{41,6-2}{10} . 0,9 = 3,564 \text{ atm. zamiast poprz. } 2,754.$$

$$K_i = \frac{3,564}{2,754} . 119,8 = 155 \text{ koni p.}$$

$$K_e = 0,78 . 155 = 121 \text{ koni par.}$$

3. Ile wody potrzebuje maszyna do chłodnicy na każdego konia i godzinę, jeżeli dopływa woda o temp. 15°, a odpływa o 40° C. Ciepło utajone pary, odpowiadające prężności końcowej 1,75 atm., wynosi okr. 600 kalorji.

Rozw. Ciepło, jakie oddaje para $=$ ciepłu, jakie pobiera woda. Niech x oznacza ilość kg wody na godzinę i konia; ilość pary na konia i godzinę $= 9,8$ kg.

$$9,8 . (600 - 40) = (40 - 15) . x$$

$$x = \frac{9,8 . 560}{25} = 220 \text{ kg.}$$

4. Do cylindra parowego wchodzi para o prężności 10 atm., t. j. o temperaturze 180°, uchodzi zaś w powietrze o temp. 103°. Jaka jest wydajność maszyny?

Rozw. Wydajność teoretyczna maszyny, ze wzoru Carnota, wynosi:

$$\frac{(180 + 273) - (103 + 273)}{180 + 273} = \frac{1}{6}.$$

Wydajność rzeczywista $= 0,6 . \frac{1}{6} =$ okr. 10%.

ROZDZIAŁ VI.

MECHANIKA SZCZEGÓŁOWA

I UZUPEŁNIENIA MECHANIKI OGÓLNEJ.

Mechanika szczegółowa rozważa szczególnie przypadki równowagi i ruchu, jako też szczególne objawy energji mechanicznej, poruszone zasadniczo w mechanice ogólnej.

Poza tym rozdział niniejszy zawiera pewne wiadomości, wyłączone z mechaniki ogólnej, początkowej (rozdział II), posiłkujące się trygonometrją, bądź dotyczące trudniejszych pojęć i rozważań matematycznych.

A) UKŁAD BEZWZGLĘDNY I WYMIARY WIELKOŚCI FIZYCZNYCH.

§ 53. Układ C. G. S.

1. Jednostki zasadnicze. Fizyka teoretyczna prowadzi do wniosku, że wszelkie zjawiska fizyczne polegają na ruchu (§ 1, art. 5). Podczas ruchu ciało lub jego cząstki, które posiadają pewną masę, odbywają w pewnym czasie określoną drogę; wszelkie zatym wielkości fizyczne można wyrazić za pomocą 3 jednostek zasadniczych, zwanych *bezwzględnymi*: jednostki masy, długości i czasu. Zespół tych jednostek oraz pochodnych stanowi t. zw. układ jednostek bezwzględnych, czyli krócej *układ bezwzględny* (absolutny).

Masę oznaczamy przez ważenie ciał, długość wymierzamy podziałką metryczną, czas oznaczamy za pomocą zegara dokładnego (chronometru).

Zarówno w życiu powszednim, jak w technice, posługujemy się zazwyczaj metrem jako miarą długości, kilogramem jako jednostką masy (i wagi zarazem), godziną jako jednostką czasu; jest to więc układ: metr-kilogram-godzina. Niekiedy bywa w użyciu układ: metr-gram-sekunda i inne.

Do celów naukowych przyjęto układ: centymetr-gram-sekunda, zwany w skróceniu *układem CGS.*

Centymetr stanowi $\frac{1}{100}$ metra pierwotnego (§ 3, art. 1).

Gram jest to masa wody w objętości 1 cm³ (§ 5, art. 5).

Sekunda stanowi $\frac{1}{86400}$ średniej doby słonecznej; inaczej sekunda $= \frac{1}{60}$ minuty, minuta $= \frac{1}{60}$ godziny, godzina $= \frac{1}{24}$ doby.

Dobą słoneczną zowiemy okres czasu od południa do następnego południa, t. j. najwyższego położenia słońca nad poziomem. Ponieważ okresy te nie zupełnie są jednakowe, z powodu że słońce w pozornym swym obiegu dokoła ziemi posuwa się cokolwiek wolniej ku wiośnie, a prędzej ku jesieni, przyjęto średnią wartość czasu dziennego pod nazwą średniej doby słonecznej.

2. Wymiary wielkości fizycznych. Z pomienionych 3 wielkości pierwotnych, powstają wielkości pochodne, których zależność od pierwotnych wyrażają symbole, zwane *wymiarami.* Wymiar oznacza, jakie wielkości zasadnicze wchodzą do danej wielkości pochodnej, oraz jakie działania należy na nich wykonać. Działania mogą tu stanowić: mnożenie, dzielenie, potęgowanie i pierwiastkowanie. Nadto wymiar pozwala przejść od jednego układu jednostek do innego.

Do oznaczenia wymiarów wielkości zasadniczych przyjęto symbole: L jako wymiar długości (od łac. Longitudo), M wymiar masy (Massa), T wymiar czasu (Tempus). Stąd wymiar szybkości oznacza się L/T albo LT^{-1} (droga : czas), wymiar przyśpieszenia LT^{-2} (droga : kwadrat czasu) i t. d.; przyśpieszenie więc jest wielkością pierwszego wymiaru względem długości, a mniej drugiego względem czasu.

Wzory wymiarowe mają duże znaczenie teoretyczne, wyjaśniając pochodzenie i wzajemny stosunek wielkości fizycznych; można np. stąd wykazać, że światło jest co do istoty swej zjawiskiem natury elektrycznej (pt. „Pole elektromagnetyczne").

3. Przegląd wymiarów z zakresu mechaniki. Podane dotąd w niniejszej książce wielkości z dziedziny mechaniki można wyrazić za pomocą wymiarów następujących:

długość	$= L$	jednostka	$= cm$
powierzchnia	$= L^2$	„	cm^2
objętość	$= L^3$	„	cm^3
masa	$= M$	„	g
czas	$= T$	„	sek
szybkość	$= LT^{-1}$	„	$cm.\ sek^{-1}$
przyśpieszenie	$= LT^{-2}$	„	$cm.\ sek^{-2}$.

Gęstość wyraża się liczebnie stosunkiem masy do objętości (§ 6, art. 3);

gęstość $= ML^{-3}$ jednostka $= g.\ cm^{-3}$.

Siła wyraża się iloczynem masy i przyśpieszenia (§ 15, art. 4), czyli $M\ .\ LT^{-2}$;

siła $= LMT^{-2}$ dyna $= cm.\ g\ sek^2$.

Ciśnienie wyraża się ilorazem siły przez powierzchnię (§ 16, art. 3), czyli $LMT^{-2} : L^2$;

ciśnienie $= L^{-1}MT^{-2}$ $\frac{\text{dyna}}{\text{cm}^2}$ (barja) $= cm^{-1}\ g.\ sek^{-2}$.

Praca, a zarazem i energja, wyraża się iloczynem siły i długości, t. j. drogi (§ 22, art. 2), czyli $LMT^{-2}\ .\ L$;

praca (energja) $= L^2\ MT^{-2}$ erg $= cm^2\ .\ g.\ sek_{-2}$.

Sprawność wyraża się stosunkiem pracy do czasu (§ 23, art. 2), czyli $L^2MT^{-2} : T$;

$$\text{sprawność} = L^2MT^{-3} \qquad \frac{\text{erg}}{\text{sek}} = cm^2 \,.\, g.\ sek.$$

Wymiary innych wielkości i jednostek fizycznych uwzględniają w miarę potrzeby następne rozdziały podręcznika.

4. Zmiana układów. Ażeby przejść od jednego układu do innego, należy do wymiaru danej wielkości wprowadzić stosunek jednostek w obu układach.

Przykład. Szybkość jazdy na rowerze, wyrażoną w układzie praktycznym liczbą 15 kilometrów na godzinę, wyrazić w układzie bezwzględnym *CGS*.

$$\frac{\text{km}}{\text{cm}} = 100\,000 \qquad \frac{\text{godz}}{\text{sek}} = 3600.$$

$$\text{Szybkość} = 15 \,.\, LT^{-1} = 15 \,.\, \left(\frac{\text{km}}{\text{cm}}\right) \,.\, \left(\frac{\text{godz}}{\text{sek}}\right)^{-1}.$$

$$\text{Szybkość} = 15 \,.\, 100\,000 \,.\, \tfrac{1}{3600} = 15 \,.\, 27{,}77 = 416 \text{ cm/sek}.$$

5. Techniczna jednostka masy. W układzie praktycznym *m-kg-sek* wypada za jednostkę masy obrać taką wartość masy, której siła 1 kg nadaje przyśpieszenie 1 m/sek^2; zowie się ona *techniczną jednostką masy*. Ma ona częste zastosowanie w obliczeniach większych ilości pracy i energji; wartość tej jednostki, którą oznaczamy w skróceniu *tjm*, wynosi 9,81 kg.

tjm = 9,81 kg (okrągło 10 kg).

Wartość jednostki technicznej wynika ze stosunku układów *m-kg-sek* i *CGS*, uwzględniając je we wzorze na wymiar siły $P = LMT^{-2}$:

$$\left(\frac{\text{kg}}{\text{dyna}}\right) = \left(\frac{\text{m}}{\text{cm}}\right) \,.\, M \,.\, \left(\frac{\text{sek}}{\text{sek}}\right)^{-2} \text{ czyli } 981\,000 = 100 \,.\, M \,.\, 1.$$

Stąd $M = 9810$ g $= 9{,}81$ kg.

Dyna = $\frac{1}{981}$ gr. (jako siły).

kg (siła) = 981000 dyn.

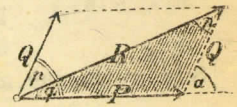
B) SIŁA I PRACA.

§ 54. Składanie sił. Praca sił.

1. Składanie sił o wspólnym punkcie działania odbywa się według zasady równoległoboku, wyłuszczonej w § 17, art. 2.

a) Oznaczenie wartości i kierunku wypadkowej.

Niech dwie siły P i Q, złożone według zasady równoległoboku dają wypadkową R, która zamyka z wektorem P kąt q, z wektorem zaś Q kąt p; wektory tworzą kąt $\alpha = p + q$, jak widać z rys. 275. Z trójkąta RPQ wynika:



Rys. 275.

$$R = \sqrt{P^2 + Q^2 + 2\ PQ\ \cos\ \alpha} \qquad \text{(I)}$$

czyli wartość wypadkowej R.

W tymże trójkącie zachodzą stosunki

$$P : Q : R = \sin p : \sin q : \sin \alpha. \qquad \text{(II)}$$

Obliczając ze wzoru I wartość R i podstawiając do II, otrzymujemy kierunek wypadkowej, t. j. kąt p, względnie kąt q:

$$\sin p = \frac{P}{R} \,.\, \sin \alpha \qquad \sin q = \frac{Q}{R} \,.\, \sin \alpha.$$

Szczególne przypadki. 1) Gdy $\alpha = 0$: dwie siły na linji prostej, zwrócone w tę samą stronę.

$$R = P + Q \qquad \sin p = 0.$$

Wypadkowa równa się sumie danych sił (§ 17, art. 4).

2) Gdy $\alpha = 90^0$:

$$R = \sqrt{P^2 + Q^2} \qquad \sin p = \frac{P}{R}.$$

3. Gdy $\alpha = 180^0$: dwie siły wprost przeciwne, o różnej wartości.

$$R = P - Q \qquad \sin p = 0.$$

Wypadkowa równa się różnicy danych sił.

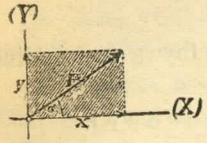
4) Gdy $\alpha = 180^0$, a przytym $P = Q$: dwie siły równe i wprost przeciwne.

$$R = 0.$$

Siły znoszą się wzajemnie.

b) Wartość sił składowych, w przypadku dwu sił wzajemnie prostopadłych.

Przy wiadomym nachyleniu α danej siły wypadkowej względem jednej z osi spółrzędnych (X, rys. 276), składowe są rzutami wypadkowej na osi X i Y; czyli

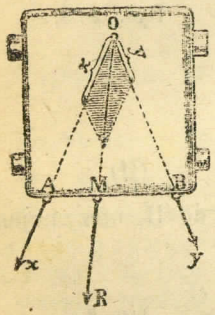


Rys. 276.

$$x = P \cdot \cos\alpha \qquad y = P \cdot \sin\alpha.$$

2. Składanie sił o różnych punktach działania. Poprzednie zależności stosują się i w ogólnym wypadku, gdy dwie siły działają rozbieżnie na dwa dowolne punkty, czy też równolegle.

Siły rozbieżne x i y (rys. 277, jak w § 18, art. 1), działające na punkty A i B, po przesunięciu ich punktów działania do wspólnego punktu O, składają się według zasady równoległoboku.



Rys. 277.

Niech wzajemne nachylenie sił, czyli kąt $\alpha = \sphericalangle AOB = \sphericalangle AOM + \sphericalangle BOM$; wtedy wypadkowa ma wartość

$$R = \sqrt{x^2 + y^2 + 2xy \cdot \cos\alpha}.$$

Kierunek wypadkowej wyraża

$$\sin \sphericalangle AOM = \frac{y}{R} \cdot \sin\alpha.$$

Szczególny przypadek. Gdy $\alpha = 0$: dwie siły równoległe, zgodnie skierowane (§ 19, art. 2).

$$R = P + Q \qquad \sin \sphericalangle AOM = 0 \qquad \sphericalangle AOM = 0.$$

Wypadkowa równa się sumie danych sił i ma kierunek do nich równoległy.

Tak więc, rozmaite przypadki składania sił (§§ 17, 18, 19) dają się niniejszym uogólnić.

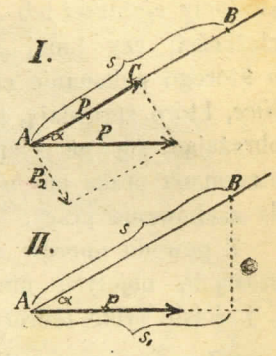
3. Wartość pracy. Przy wykonywaniu pracy siła może działać w kierunku ruchu, bądź pod dowolnym kątem względem tegoż. Pierwszy warunek, jako najkorzystniejszy, stosuje się przeważnie; wartość pracy wyraża wtedy wzór (§ 22, art. 3): $L = P\,s$.

W ogólnym określeniu pracy należy uwzględnić kąt, jaki tworzy kierunek siły z torem, po którym ciało się posuwa. Ma to np. miejsce przy popychaniu taczek, przy holowaniu statków z brzegu. Wartość pracy wyraża ogólnie wzór:

$$L = P \cdot s \cos\alpha$$

praca = siła × rzut drogi na siłę.

Dowód. Niech siła P (rys. 278, I) porusza ciało po stałym torze, na drodze $AB = s$, która tworzy kąt α z kierunkiem siły. Z rozkładu siły P powstają składowe P_1 P_2; ostatnia, jako prostopadła do toru. nie może przesunąć ciała A wzdłuż toru, nie spełnia więc żadnej pracy. Składowa kinetyczna $P_1 = AC = P\cos\alpha$ daje na drodze s pracę $L = P\cos\alpha \cdot s = P \cdot s\cos\alpha$ (por. rys. 278, II).



Rys. 278.

Przypadki poszczególne. 1) Gdy $\alpha = 0^0$, $\cos\alpha = 1$; wtedy $L = Ps$, czyli maximum pracy dodatniej ma miejsce przy działaniu siły w kierunku ruchu i w jego stronę, np. przy podnoszeniu ciała pionowo.

2) Gdy $\alpha = 90^0$, $\cos\alpha = 0$; wtedy $L = 0$, czyli pracy niema, skoro siła działa prostopadle do toru, np. przy ruchu obrotowym.

3) Gdy $\alpha = 180^0$, $\cos\alpha = -1$; wtedy $L = -Ps$, czyli praca jest ujemną, gdy siła działa przeciw ruchowi. Siłę tutaj zowiemy oporem, stąd nazwa *praca oporu*, np. skoro prąd rzeki unosi człowieka, płynącego pod wodę, tak iż mimowoli płynie on z prądem.

C) MASZYNY PROSTE.

Maszyny w ogólności. Przyrządy do przemiany pracy jednego rodzaju na inny, bardziej użyteczny w praktyce, zowiemy *maszynami*. Są one pośrednikami w działaniu sił, przenosząc działanie sił na rozmaitą odległość, czyli zmieniając ich punkt działania, jako też kierunek i wartość sił.

Maszyny stanowią wielką dogodność w zastosowaniu sił, gdyż pozwalają osiągnąć większą szybkość, bądź pokonać znaczny opór za pomocą małej siły, bądź zmienić kierunek działania na dogodniejszy.

Jeżeli maszyna wydaje energję mechaniczną kosztem innej energji, np. ciepła lub elektryczności, nazywa się *silnikiem* albo *motorem*.

Rozróżniamy maszyny proste i złożone.

Maszyny proste stanowią: dźwignia, blok, kołowrót, równia pochyła, klin, śruba. Z tych blok i kołowrót można pod względem teoretycznym uważać za odmiany dźwigni, zaś klin i śrubę za odmiany równi. W zasadzie więc istnieją 2 typy maszyn prostych: dźwignia i równia. Maszyny typu dźwigni są obracalne i stosują prawo momentów. Działanie wszelkich maszyn polega na prawie zachowania pracy; nawzajem, z warunków równowagi maszyn prostych można wyprowadzić prawo zachowania pracy.

W stanie równowagi działają na maszynę przynajmniej 2 siły; dla odróżnienia jednę z nich zowiemy *siłą*, drugą zaś, przeciwdziałającą, zowiemy *ciężarem* lub *oporem*, zależnie od tego, czy chodzi o pokonanie ciężkości, czy innej siły. Rozumiemy tu *opór pożyteczny* czyli taki, o którego pokonanie chodzi; w rzeczywistości istnieją nadto *opory szkodliwe*, które sprawiają, że pewna część pracy włożonej się marnuje, przeobrażając się na ciepło, t. j. rozgrzewa maszynę bezużytecznie, stąd otrzymana praca mechaniczna jest zawsze mniejsza, niż wypada z zasady zachowania pracy.

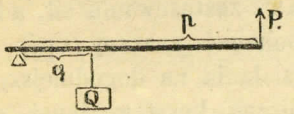
Z powodu oporów szkodliwych również i warunki równowagi maszyn prostych, objętych niniejszym rozdziałem, należy uważać jako idealne, t. j. ścisłe tylko teoretycznie.

Głównym oporem szkodliwym jest tarcie; daje się ono uczuwać nieznacznie na dźwigni, zwłaszcza w postaci wagi, silniej na blokach i kołowrotach, najbardziej zaś na klinach i śrubach, tak iż do ich poruszenia potrzeba siły znacznie większej od teoretycznej.

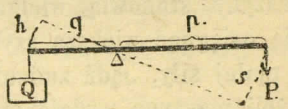
§ 55. Dźwignia.

1. Dźwignią zowie się pręt sztywny, obracający się około punktu lub krawędzi, zwanej — *osią* i poddany działaniu przynajmniej dwu sił zewnętrznych. Dźwignia więc stanowi przykład działania momentów.

Do rozważań posługujemy się *dźwignią matematyczną*, którą sobie wyobrażamy jako nieważką linję, opartą w jednym punkcie; przy uwzględnieniu ciężaru i wymiarów dźwigni, jak to ma miejsce w wielu zastosowaniach, zowiemy ją *dźwignią fizyczną*. Zależnie od tego, czy

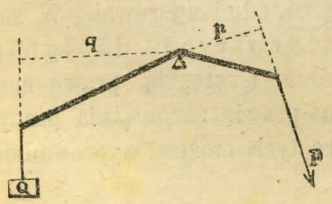


Rys. 279. Dźwignia matematyczna.



Rys. 280.

dźwignia matematyczna ma postać linji prostej lub łamanej, odróżniamy dźwignię *prostą* (rys. 279, 280) lub *kątową* (rys. 281).



Rys. 281.
Dźwignia matematyczna.

Ramionami dźwigni są ramiona obu sił, t. j. (prostopadłe) odległości siły i ciężaru od osi. Stosownie do położenia ramion, a zatym i sił względem osi, rozróżniamy dwa rodzaje dźwigni:

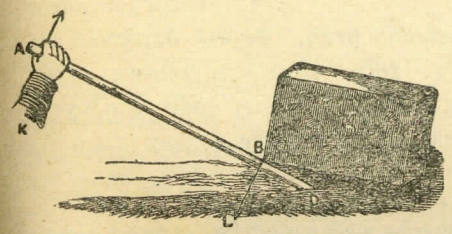
a) *Dźwignia jednoramienna* ma ramiona obydwu sił po jednej stronie osi, a siły zwrócone w strony przeciwne (rys. 279).

b) *Dźwignia dwuramienna* ma ramię każdej siły z innej strony osi, a siły zwrócone w tę samą stronę (rys. 280, 281).

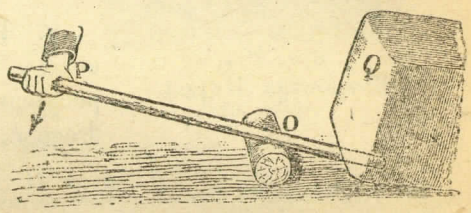
Przykłady. a) Ręka; taczki; szczypce do węgli; dziadek do orzechów; kij bez podkładki, którym podważamy ciężar ku górze, jak na rys. 282.

b) Waga zwykła; szczypce do karbowania; nożyczki; kij wsparty na podkładce i podważający ciężar, gdy ręka ciśnie ku dołowi, jak na rys. 283.

(Nakreślić i objaśnić zasadniczo wszystkie dane przykłady).



Rys. 282.
Dźwignia jednoramienna.



Rys. 283
Dźwignia dwuramienna.

2. Warunek równowagi. Wogóle dźwignia wtedy tylko może być w spoczynku, gdy wypadkowa obu sił przypada na osi obrotu, wówczas bowiem znosi ją opór osi. Warunek powyższy wypływa z prawa momentów.

Dźwignia jest w równowadze, gdy moment siły jest równy momentowi oporu (rys. 279, 280, 281).

$$P \cdot p = Q \cdot q.$$

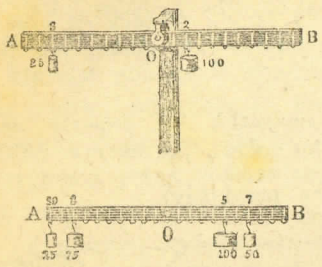
Powyższą zależność można wyrazić za pomocą proporcji; poznana jeszcze w starożytności, na długo przed wykryciem prawa momentów, zowie się ona *prawem dźwigni*.

$$P : Q = q : p.$$

Siły są w stosunku odwrotnym, niż ramiona dźwigni (*prawo Archimedesa*, 287 — 212 przed Chr.).

W wypadku kilku sił stosuje się oczywiście także prawo momentów, które tutaj brzmi: dźwignia jest w równowadze, gdy suma momentów sił jest równa sumie momentów oporów.

Doświadczenie (rys. 284). Sprawdzenie doświadczalne prawa Archimedesa, czy też prawa momentów na dźwigni o siłach równoległych, dokonywa się na drążku AB, podzielonym na centymetry i obracającym się powyżej środka ciężkości O; ciężar drążka znosi się tutaj, równowaga zaś jest stała (§ 21, art. 2, 3). Ciężarek np. 25 g, zawieszony w odległości 8 cm od osi, równoważy 100 g w odległości 2 cm. Albo też ciężarki 25 g o 10 cm + 75 g o 8 cm od osi z jednej strony równoważą z drugiej 50 g o 7 cm + 100 g o 5 cm.



Rys. 284.
Równowaga dźwigni.

3. Równość prac. Skoro dźwignia się obraca (rys. 280), siła P przebywa swym punktem działania drogę s, opór Q odbywa drogę h, tak, iż ma miejsce praca:

$$P \cdot s = Q \cdot h$$

t. j. praca siły = pracy oporu (prawo zachowania pracy, por. § 22, art. 7).

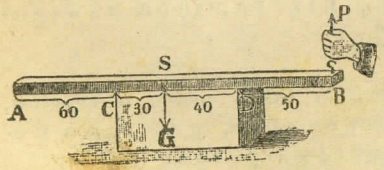
Zatym, ile się zyskuje na sile, tyle się traci na drodze (złota reguła Archimedesa); natomiast nic się nie zyskuje na pracy.

Równość $Ps = Qh$ wynika z uwzględnienia własności geometrycznej łuków; mianowicie, że długość łuków jest proporcjonalna do ich promieni, skoro łuki zamykają równe kąty. Zatym $h : s = q : p$; że zaś $P : Q = q : p$, wypada $P : Q = h : s$ czyli $Ps = Qh$.

W zastosowaniach dźwigni chodzi zwykle o zyskanie na sile, to też ramię siły bywa dłuższe od ramienia oporu (przykłady art. 1). Niekiedy jednak zależy na zyskaniu prędkości, i wtedy ramię siły bywa krótsze, np. nożyczki do papieru, samotrzask, ręka przy rzucaniu, proca. Taki rodzaj dźwigni bywa używany najczęściej do rzucania i zowie się dźwignią rzutową; dla odróżnienia można nazwać inne rodzaje dźwigni, gdzie chodzi o zysk na sile, dźwignią naciskową.

4. Dźwignia fizyczna. Ciężar dźwigni fizycznej poczytuje się za siłę pionową, przyłożoną do środka ciężkości dźwigni.

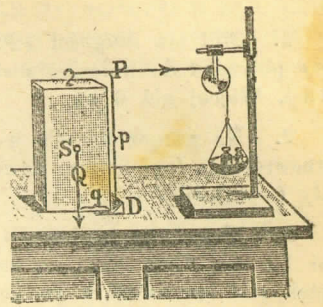
Przykłady. 1) Unoszenie ciężarów. Pręt żelazny AB (rys. 285), ważący 8 kg, a długi na 180 cm leży na pace CD, szerokiej na 70 cm, tak iż koniec A wystaje o 60 cm poza C. Jakiej trzeba siły, aby unieść pręt za koniec B?



Rys. 285.
Dźwignia fizyczna.

Rozw. Pręt obraca się koło C, skoro się go podnosi za B; stanowi przeto dźwignię jednoramienną. Moment obrotu siły P = momentowi siły G, czyli $P \cdot 120 = 8 \cdot 30$; stąd $P = 2$ kg. Siła większa niż 2 kg uniesie pręt AB.

2) Przewracanie ciężarów. Oznaczyć siłę, któraby obaliła pudełko, ważące 400 g, a postawione jak na rys. 286, przyczym wysokość pudełka wynosi 120 mm, szerokość 72 mm, głębokość 48 mm.



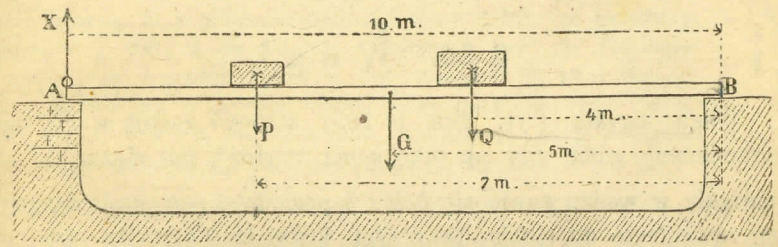
Rys. 286.

Rozw. Należy obrócić pudełko około krawędzi D; siła P będzie najmniejsza, skoro jej ramię będzie najdłuższe, zatym trzeba siłę P zaczepić u góry pudełka. Siła $Q = 400$ g, odległość $q = 36$ mm, odległość $p = 120$ mm; $P \cdot 120 = 400 \cdot 36$, stąd $P = 120$ g, t. j. siła większa niż 120 g przewróci pudełko.

3) Obciążenie murów, słupów. Belka AB (rys. 287), długości 10 m, a wagi 200 kg, dźwiga dwa ciężary: $P = 120$ kg w odstępie 3 m od A i $Q = 280$ kg w odstępie 4 m od B. Ile wynosi obciążenie muru w A i B?

Rozw. Ciągnąc do góry za A siłą x, można unieść belkę wraz z ciężarami, przyczym belka staje się dźwignią jednoramienną, mającą oś w B (dynamometr wskazałby wtedy odnośne obciążenie w A).

$$x \cdot 10 = P \cdot 7 + G \cdot 5 + Q \cdot 4$$
$$x \cdot 10 = 120 \cdot 7 + 200 \cdot 5 + 280 \cdot 4 = 2960$$
$$x = 296 \text{ kg}.$$



Rys. 287.

Unosząc zaś belkę za B siłą y, otrzymuje się dźwignię jednoramienną z osią A. Stąd:

$$y \cdot 10 = P \cdot 3 + G \cdot 5 + Q \cdot 6$$
$$y \cdot 10 = 120 \cdot 3 + 200 \cdot 5 + 280 \cdot 6 = 3040$$
$$y = 304 \text{ kg}.$$

Próba: $x \uparrow + y \uparrow = 600$ kg; $P \downarrow + G \downarrow + Q \downarrow = 600$ kg.

Zadania.

1. Stół ma długości 120 cm; odległość nóg stołu wynosi 90 cm. Jakiej siły potrzeba do uniesienia stołu za jeden z końców, jeżeli stół waży 14 kg? Odp. Więcej niż 6 kg.

2. Na poręcz krzesła u góry działa siła pozioma, usiłująca je w tył przewrócić. Jaki rodzaj dźwigni stanowi tu krzesło i gdzie są przyłożone siły (wykreślić).

3. Wagon tramwajowy o ciężarze 1,4 ton ma długość 5 m, a odległość osi 1,6 m. Czy może go unieść dwu ludzi za którykolwiek z końców, jeżeli siła człowieka w podnoszeniu wynosi 75 kg?

4. Dwaj robotnicy niosą na kiju 3 m długości ciężar 100 kg, oddalony od jednego z nich o 1,8 m. Ile dźwiga każdy? Odp. 60 i 40 kg.

5. Na wale AB, długim na 2 m, osadzono dwa koła pasowe X i Y o ciężarze 120 i 160 kg, tak iż $AX = 60$ cm, $BY = 90$ cm. Jakie ciśnienie wywierają koła w łożyskach wału? Odp. 156 kg i 124 kg.

6. Belka AB, długości 10 m, o przekroju 16 × 24 cm i gęstości 0,5, opiera się końcami na murze, przyczym spoczywa na niej ciężar $G = 600$ kg o 3 m od A, oraz ciężar $Z = 400$ kg o 4 m od B. Ile wynosi nacisk na każdy koniec belki? Odp. 676 kg i 516 kg.

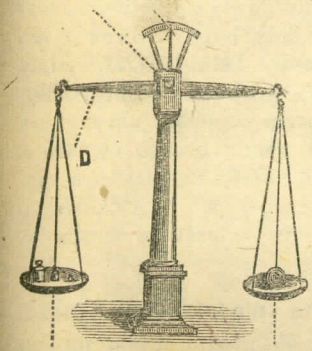
§ 56. Wagi.

1. Waga zwykła (rys. 288 i 289) stanowi zastosowanie dźwigni równoramiennej, gdzie siła ma taką samą wartość, jak ciężar.

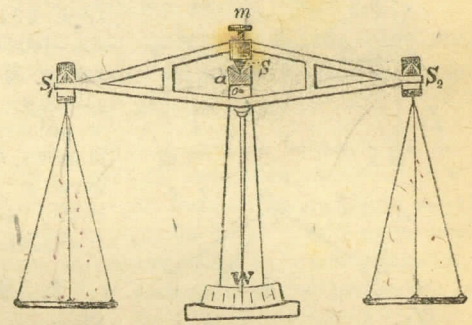
Dźwignia w wadze zowie się *belką* i posiada 3 *osi* stalowe, pryzmatyczne, równoległe do siebie, przyczym krawędź pryzmatu środkowego (S), na dół zwrócona, stanowi oś teoretyczną dźwigni, czyli oparcie belki; krawędzie zaś osi bocznych (S_1 i S_2), zwrócone do góry, stanowią miejsca działania siły i ciężaru, służąc do zawieszenia *szalek*. Nadto waga posiada *skazówkę*, przytwierdzoną pośrodku belki, prostopadle do niej, i zwróconą do góry lub na dół; przy równowadze wagi belka ma mieć położenie poziome, skazówka więc pionowe, przyczym trafia na środek odpowiedniej podziałki.

Waga przy poziomym położeniu belki powinna mieć równowagę stałą, zatym środek ciężkości belki winien przypadać na linji pionowej, poniżej osi oparcia; nadto waga powinna być dokładną i w miarę potrzeby czułą.

W pospolitych wagach handlowych szalki są zawieszone na haczykach (rys. 288). Wagi delikatniejsze, np. chemiczne, posiadają panewki agatowe, t. j. oś środkowa spoczywa na podkładce agatowej a (rys. 289), szalki wiszą na strzemiączkach, z których każde mieści u góry wkładkę agatową ponad osią S_1 i S_2; zmniejsza to znacznie tarcie, przez co waga staje się czulszą.



Rys. 288. Waga handlowa.



Rys. 289. Waga chemiczna.

Do odważania miligramów i ich części, których ciężarki są tak drobne, że je trudno ująć, służy *konik* (rys. 290) z drutu, ważący 0,01 g i przesuwany wzdłuż belki. Skoro się konik znajduje na końcu belki, nad osią boczną, t. j. pionowo nad S_2, waży tyleż, co położony na szalce, t. j. 0,01 g = 10 mg. Położony zaś na ramieniu belki o $\frac{1}{10}$ jego długości od osi S daje moment 10 razy mniejszy, t. j. działa jak 1 mg na szalce. Przy podziale więc belki na 10 części odważa się konikiem miligramy, przy podziale na 100 części odważa się dziesiąte części miligrama.



Rys. 290. Konik.

2. Warunki dokładności wagi. Dokładną waga zowie się wtedy, gdy wskazuje rzeczywisty ciężar ciała. Sprawdza się to przez ważenie ciała po jednej stronie wagi, a następnie po drugiej; w obu ważeniach nie powinno być różnicy.

Dokładność wagi wymaga:

a) Aby oba ramiona belki były równej długości.

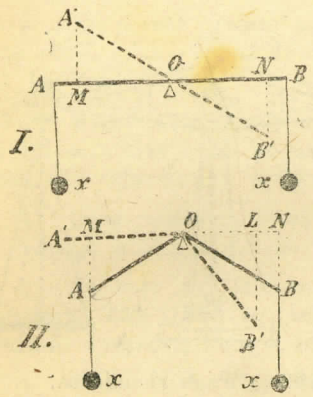
Wynika to z prawa dźwigni: gdyby które kolwiek ramię było dłuższe, musiałby na nie działać ciężar mniejszy. Równoramienność belki sprawdza się przez obciążenie równymi ciężarami; skazówka powinna stanąć pionowo, podobnie jak przy szalkach próżnych.

b) Aby oba ramiona belki były jednakowo ciężkie, a zatym i szalki jednakowo ciężkie.

Wtedy bowiem środek ciężkości belki przypada na linji pionowej pod osią, zgodnie z warunkiem równowagi, przy poziomym położeniu belki.

c) Aby krawędzie wszystkich trzech osi leżały na linji prostej, t. j. aby belka stanowiła dźwignię prostą.

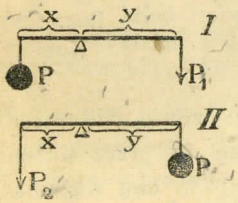
Skoro osi A, O, B przypadają na linji prostej (rys. 291, I), momenty są równe w każdym położeniu belki; ramię $AO = BO$, podobnież ramię $MO = NO$. W przeciwnym razie, to jest gdyby belka stanowiła dźwignię kątową AOB (rys. 291 II), momenty byłyby równe tylko dla jednego położenia belki AOB, gdzie ramię $MO = NO$; przy nachyleniu belki, jak to się dzieje podczas ważenia, naprzykład w położeniu $A'OB'$ ramię lewego ciężaru x stanowi linja $A'O$, ramię zaś prawego ciężaru x linja LO, mniejsza od $A'O$; zatym równe ciężary dałyby nierówne momenty, i ważenie byłoby fałszywe.



Rys. 291.

3. Ważenie na niedokładnej wadze. Skoro waga okaże się niedokładną, można mimo to ważyć na niej ciała z całą dokładnością, mianowicie w sposób dwojaki:

a) Tarowaniem. Ciało kładzie się na jednę z szalek, a drugą obciąża śrutem lub kamyczkami, aż do równowagi, czyli taruje się; następnie ciało zastępuje się ciężarkami. Waga tych ciężarków odpowiada ściśle wadze ciała, gdyż oba działają na to samo ramię belki.



Rys. 292.

b) Ważeniem podwójnym. Ciało waży się na lewej szalce, kładąc na prawą stosowny ciężar P_1 (rys. 292); następnie przekłada się ciało na prawo i równoważy na lewej szalce ciężarem P_2. Rzeczywisty ciężar ciała P stanowi średnią geometryczną obu ciężarów.

Mianowicie:

I ważenie daje $P \cdot x = P_1 \cdot y$

II „ „ $P \cdot y = P_2 \cdot x$

z pomnożenia wypada:

$$P^2 = P_1 \cdot P_2$$

stąd $$P = \sqrt{P_1 \cdot P_2}$$

Praktycznie zastępuje się średnią geometryczną $\sqrt{P_1 \cdot P_2}$ przez średnią arytmetyczną $\frac{1}{2}(P_1 + P_2)$, którą obliczyć daleko łatwiej, a która prawie się nie różni od geometrycznej, jeżeli P_1 i P_2 niewiele się różnią od siebie, jak to ma miejsce w rzeczywistości.

4. Warunki czułości wagi. Waga jest czuła, skoro jej skazówka odchyla się od małej nadwyżki na jednej z szalek, np. za położeniem małego skrawka papieru. Bezwzględną miarę czułości stanowi nadwyżka, odchylająca skazówkę o jednę działkę, przy próżnych szalkach; czułość względną wyraża przy obciążeniu szalek równymi ciężarami, stosunek nadwyżki odchylającej do obciążenia szalki. Na dobrej wadze czułość mało się zmienia przy rozmaitym obciążeniu. Każdą wagę można obciążać do pewnej granicy; pod wpływem większego ciężaru belka może uledz trwałemu zgięciu, i waga staje się niedokładną.

Wagi do analizy chemicznej mają zwykle czułość bezwzględną do 0,1 miligrama, obciążenie najwyższe 100 g, czułość względną 0,0001 : 100 = $= \frac{1}{1\,000\,000}$. Wyjątkowo czułe przyrządy, używane do sprawdzania odważników, wskazują nadwyżkę 0,005 mg przy obciążeniu 1 kg, czyli mają czułość $\frac{1}{200\,000\,000}$. Żadne inne narzędzie miernicze, jako to miary długości, kątów i t. p., nie jest w stanie wykazać tak małego błędu w pomiarach (por. § 2, art. 4, oraz § 5, art. 3).

Waga jest najdokładniejszym dziełem rąk ludzkich.

Waga jest tym czulsza:

a) Im belka jest dłuższa, ponieważ im dłuższe jest ramię, tym mniejsza siła je odchyla (prawo dźwigni).

b) Im belka jest lżejsza, gdyż wtedy tarcie jest mniejsze, oraz masa mniejsza do poruszenia.

W rzeczywistości jednak unika się belek zbyt długich, gdyż wraz z długością rośnie ciężar belki, a zarazem tarcie i giętkość, tak iż czułość raczej maleje. Lekkość belki osiąga się przez wydrążenia i wycięcia (rys. 289).

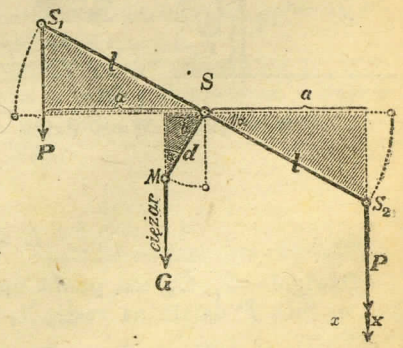
c) Im środek ciężkości belki jest wyżej, t. j. bliżej do osi obrotu (ale zawsze pod tą osią, pt. art. 1), wtedy bowiem mniejszy wypada moment obrotu.

W wagach do celów naukowych istnieje urządzenie do podnoszenia i obniżania środka ciężkości (o na rys. 289, śrubką m), przez co zmienia się czułość wagi w pewnych granicach.

Teoretycznie warunki czułości wynikają z prawa momentów.

Należy oznaczyć nadwyżkę x (rys. 293), odchylającą skazówkę o jednę działkę (pomijając tarcie i niedoskonałą sztywność belki). Ciężar G belki można sobie wyobrazić jako siłę, przyłożoną do środka ciężkości M, w odstępie d poniżej osi. Za obciążeniem jednej szalki nadwyżką x, belka się pochyla, a punkt M się podnosi, tak iż układ ten można uważać za dźwignię, której warunek równowagi jest:

$$(P + x) \cdot a = P \cdot a + G \cdot b.$$



Rys. 293.

Stąd $$x = \frac{G \cdot b}{a}.$$

Ponieważ $b = d \cdot \sin \alpha$, zaś $a = l \cdot \cos \alpha$

$$x = \frac{G \cdot d}{l} \cdot \operatorname{tg} \alpha.$$

Oznaczając przez z długość skazówki, δ długość jednej działki, oraz zważywszy, iż dla małego odchylenia $\operatorname{tg} \alpha = \frac{\delta}{z}$, można napisać:

$$x = \frac{G \cdot d}{l} \cdot \frac{\delta}{z}.$$

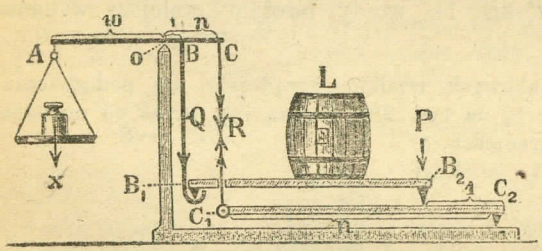
Czułość bezwzględna wagi jest tym większa, im x jest mniejsze, czyli czułość jest w odwrotnym stosunku do G i d, a prostym do l; nadto czułość wzrasta z długością z skazówki, a zmniejsza się w miarę powiększenia długości δ działki.

Przykład. Waga ma belkę długości $2\ l = 200$ mm, ciężar jej $G = 360$ g; długość skazówki $z = 180$ mm, a jednej działki $\delta = 2$ mm; środek ciężkości leży o $d = 0{,}25$ mm poniżej osi. Jaka jest bezwzględna czułość wagi?

Odp. $$x = \frac{360 \cdot 0{,}25}{100} \cdot \frac{2}{180} = \frac{1}{100}\ \text{g}.$$

Nadwyżka $\frac{1}{100}$ g odchyli skazówkę o jednę działkę; zatem waga jest czuła do 0,01 g, skoro niema obciążenia szalek.

5. Wagi pomostowe służą do ważenia dużych przedmiotów, jako to pak, beczek, tłomoków, węgla, zboża i t. p., za pomocą niewielkich ciężarów. Najwięcej używaną jest *waga dziesiętna* (decymalna), na której przedmioty odważa się za pomocą ciężaru, wynoszącego $\frac{1}{10}$ ich wagi. Składa się w zasadzie z dźwigni dwuramiennej i dwu dźwigni jednoramiennych, z których górna tworzy pomost (rys. 294).



Rys. 294. Waga dziesiętna.

Na pomoście $B_1\ B_2$ stawia się przedmiot L, którego ciężar rozkłada się na 2 części nacisk P i ciągnienie Q, tak iż gdziekolwiek stoi przedmiot, zawsze

$$L = P + Q.$$

Dźwignia $C_1\ C_2$ ma punkt oparcia w C_2, a długość ramion w stosunku $1 : n$. Siła P działa na ramię 1, ciągnienie R na ramię n, tak iż:

$$P \cdot 1 = R \cdot n.$$

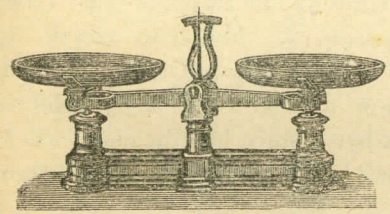
Dźwignia AC ma punkt oparcia w O, a ramiona z jednej strony w stosunku $OB : OC = 1 : n$, t. j. w stosunku takim jak na dźwigni $C_1\ C_2$, z drugiej $AO : OB = 10 : 1$; siła x działa na ramię 10, siły Q i R na ramiona 1 i n, tak iż:

$$x \cdot 10 = Q \cdot 1 + R \cdot n$$

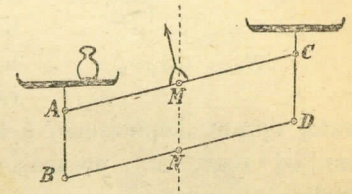
stąd $$x \cdot 10 = Q + P = L.$$

$$x = \tfrac{1}{10}\ L.$$

Pomost $B_1\ B_2$ pomimo wahań wagi zachowuje **położenie poziome**. Jeżeli bowiem koniec B_2 opadnie np. o 1 cm, to punkt C_1 opadnie o n cm, podobnie jak C, zatym B i B_1 o 1 cm; oba więc końce pomostu opadają jednakowo.



Rys. 295. Waga talerzykowa.



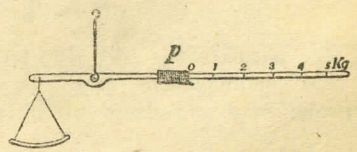
Rys. 296.

6. Waga talerzykowa czyli **angielska** (Roberwala, rys. 295 i 296) składa się z dwu belek równoległych jednakowej długości, złączonych z sobą ruchomo, tak iż tworzą równoległobok. Oś M belki górnej przypada na linji pionowej z osią N dolnej; stąd oś boczna lewa A przypada zawsze pionowo nad B, oraz oś boczna prawa C pionowo nad D, niezależnie od nachylenia belek; talerzyki więc zachowują stale położenie poziome. Przesunięcie przedmiotów na talerzykach nie ma znaczenia, gdyż ciężar ich udziela się całkowicie osiom A i C, równo odległym od linji pionowej MN, przy jakimkolwiek nachyleniu AC. W punktach A, B, M, N, C, D należy rozumieć osi stalowe pryzmatyczne, podobnie jak w wadze rys. 289. Wobec tylu osi i połączeń waga podlega tarciu, które ją czyni mało czułą; jest ona jednak dogodniejsza w użyciu od wagi o szalkach wiszących.

7. Przezmiany (bezmiany) służą do ważenia przedmiotów za pomocą jednego tylko odważnika t. j. bez zmiany odważników.

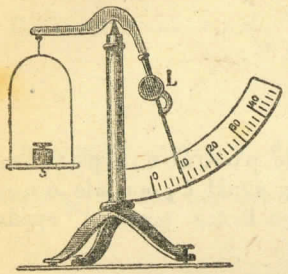
Przezmian prosty czyli *waga rzymska* służy do śpiesznego ważenia artykułów spożywczych i t. p., gdzie nie chodzi o wielką dokładność. Polega na zasadzie, że ten sam ciężar przesuwany po dźwigni, daje wartość momentu tym większą, im dalej od osi (rys. 297).

Do ważenia kładzie się ciało na szalkę; moment obrotu rośnie w miarę obciążenia szalki: ażeby go zrównoważyć, przesuwa się stopniowo po belce stały ciężar P, aż belka ustawi się poziomo. Podziałka na ramieniu ciężaru wskazuje odrazu wagę ciała w kilogramach. Odstępy między kreskami podziałki są równe. (Dowód?).



Rys. 297.
Waga rzymska (przezmian).

Przezmian kątowy czyli *waga listowa* służy do ważenia drobnych ciężarów, zwłaszcza listów. Polega na tym, że moment zmienia się w miarę pochylenia belki wskutek rozmaitych ciężarów. Wielkość ciężaru podaje wprost na skali łukowej skazówka, przytwierdzona do pochyłej drugiej strony belki (rys. 298).



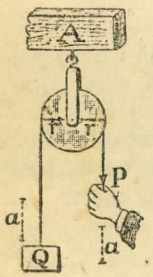
Rys. 298.
Waga listowa.

§ 57. Bloki.

1. Blok stanowi krążek, zwykle drewniany lub metalowy, obracający się łatwo na osi i mający na obwodzie rowek do umieszczenia sznura lub łańcucha. Oś spoczywa często w nożycach, t. j. widełkowatej oprawie, opatrzonej hakiem. Blok bywa stały lub ruchomy, zależnie od tego, czy obracając się, pozostaje na miejscu, czy też jednocześnie się posuwa.

a) Na bloku stałym (rys. 299) siła i ciężar działają na obwodzie. Do równowagi jego trzeba, aby

siła = ciężarowi.



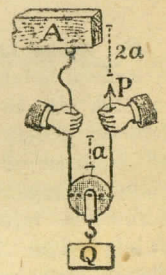
Rys. 299.
Blok stały.

Dowód. Łącząc punkty zaczepienia siły P i oporu Q z osią, otrzymujemy dźwignię równoramienną, gdzie każde ramię r jest promieniem bloka, zatym

$$P = Q.$$

b) Na bloku ruchomym (rys. 300) siła działa na obwód, ciężar na oś bloka. Do równowagi trzeba, aby

siła = $\frac{1}{2}$ ciężaru.



Rys. 300.
Blok ruchomy.

Przekładnia więc, czyli stosunek ciężaru do siły (por. § 20, art. 5), wyraża się dla bloka ruchomego zawsze liczbą 2.

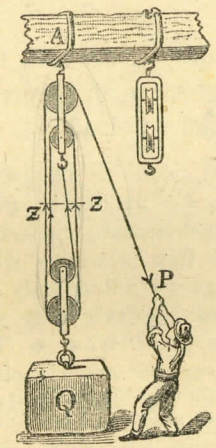
Dowód. Ciężar Q, wisząc na dwu sznurach, w odstępie r od każdego, rozkłada się na 2 równe części; zatym

$$P = \tfrac{1}{2}\ Q, \text{ czyli } Q = 2\ P.$$

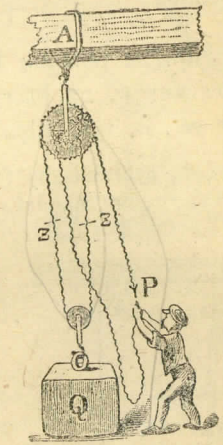
2. Wielokrążek jest to połączenie kilku bloków ruchomych i stałych w celu zmniejszenia siły, potrzebnej do podniesienia ciężaru. Najwięcej używane są dwa rodzaje wielokrążków, zwykły i różnicowy.

a) *Wielokrążek zwykły* czyli *kluba* (rys. 301) zawiera tyleż bloków ruchomych, ile stałych, przyczym wszystkie bloki ruchome są osadzone we wspólnej oprawie, a bloki stałe w drugiej podobnej oprawie. Przy ogólnej liczbie n bloków, ciężar Q rozkłada się na n sznurów, zatym:

$$P = \frac{Q}{n} \qquad \text{przekładnia} = n.$$



Rys. 301.



Rys. 302.

b) *Wielokrążek różnicowy* (rys. 302) składa się z dwu kół trybowych, spojonych z sobą sztywno i obracających się na wspólnej osi; przyczym różnica w wielkości tych kół jest nieznaczna; przez koła przerzucono łańcuch bez końca, jak wskazuje rycina, tak iż obejmuje on zarazem blok ruchomy, zawieszony poniżej. Ciężar Q wisi na bloku, rozkładając się na połowy $z + z = Q$; z tych jedna siła $z = \frac{1}{2}\ Q$ działa w odległości promienia R od osi, druga w odległości r, siła zaś podnosząca P działa w odległości R od osi. Stąd momenty

$$P \cdot R + \tfrac{1}{2}\ Q \cdot r = \tfrac{1}{2}\ Q \cdot R$$

czyli

$$P = \tfrac{1}{2}\ Q\ \frac{R-r}{R}.$$

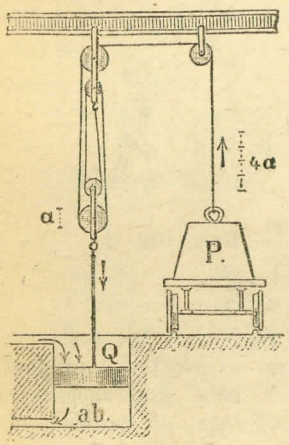
Im mniejsza jest różnica promieni $R - r$ kół trybowych, oraz im większy wymiar koła R, tem korzystniej działa wielokrążek. Np. skoro $R = 10$ cm, $r = 9$ cm, wypada $P = \frac{1}{20}\ Q$, przekładnia $= 20$.

3. Równość prac (złota reguła) ujawnia się w sposób szczególnie prosty w blokach i wielokrążkach:

Blok stały	ciężar Q przebywa drogę		a
	siła $P = Q$ „	„	a.
Blok ruchomy	ciężar Q przebywa drogę		a
	siła $P = Q/2$ „	„	$2a$.
Kluba	ciężar Q przebywa drogę		a
	siła $P = Q/n$ „	„	$n \cdot a$.

Jeżeli np. za pomocą kluby wypada podnieść ciężar o a, trzeba każdy z n sznurów, na których wisi ciężar, skrócić o a; skrócenie ogólne wypadnie $n \cdot a$, tyle więc sznura trzeba z kluby zwinąć.

4. Dźwig hydrauliczny (winda hydrauliczna) stanowi odwrotny użytek wielokrążka, gdzie chodzi nie o zysk na sile, ale na drodze przebywanej, t. j. na szybkim podnoszeniu ciężaru.



Rys 303.
Winda hydrauliczna.

Woda naciska tłok z wielką siłą (Q, rys. 303), popychając go na dół o mały odstęp (a); ciężar (P) podnosi się tyle razy wyżej ($4a$), niż tłok opada, ile jest bloków w klubie (4). Ponieważ łatwo otrzymać wysokie ciśnienie wody, można podnosić tą drogą ciężary prędko i praktycznie.

Przykład. Jaki ciężar podniesie winda hydrauliczna o 4 blokach, pod ciśnieniem wody 3 kg/cm², jeżeli tłok ma średnicę 60 cm?

Rozw. Pole tłoka $= 30^2 \cdot 3{,}14 = 2826$ cm².
Nacisk ogólny $= 2826 \cdot 3 = 8478$ kg.
Ciężar podnies. $= \frac{1}{4} \cdot 8478 = 2119$ kg.

Zastosowania bloków i wielokrążków obracają się głównie około podnoszenia ciężarów, oraz w celu zmiany kierunku siły na inny, dogodniejszy, np. ciągnienia na dół zamiast do góry.

Zadania.

1. Nakreślić wielokrążek o 6 blokach ruchomych. a) Jakiej siły potrzeba do podźwignięcia kloca marmurowego $\frac{1}{10}$ m³ objętości? b) Ilu na to potrzeba ludzi, jeżeli każdy pracuje siłą 30 kg? c) Czy starczy sznur gruby na 8 mm, jeżeli wytrzymałość wynosi 1 kg na mm²? d) Każdy ruch rąk pociąga sznur w 10 sek o 84 cm; o ile podnosi się ciężar? e) W jakim czasie ciężar zostanie podniesiony o 7 m?

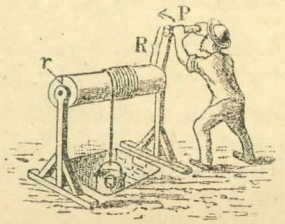
Odp. 45 kg; 2 ludzi; tak; 14 cm; okr. w 8 minut.

2. Jaki ciężar podźwignie winda hydrauliczna o 6 blokach w klubie, przy ciśnieniu wody $= 4$ kg/cm² i tłoku 40 cm średnicy?

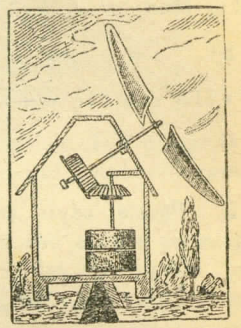
Odp. 838 kg.

§ 58. Kołowrót i koła trybowe.

1. Kołowrót składa się z koła, osadzonego na wale, albo dwu kół różnej średnicy, obracających się naokoło wspólnej osi. Ciężar działa zwykle na sznur lub łańcuch, nawinięty na wale, siła zaś działa na obwód koła.

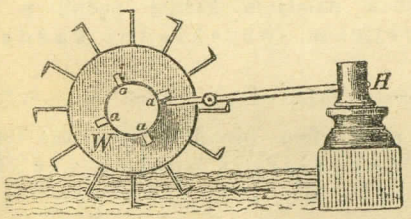


Rys. 304.
Dźwig ręczny (winda ręczna).

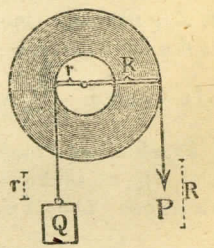


Rys. 305.
Wiatrak.

Zresztą urządzenie i postać kołowrotu bywa rozmaita, zależnie od sił stosowanych. Jeżeli kołowrót ma człowiek obracać, koła zastępuje korba (winda, rys. 304) albo szprychy (ster okrętowy); w wiatraku siła obracająca działa na skrzydła (rys. 305), w młynie wodnym na łopatki (rys. 306). Kołowrót, poruszany przez inne koła, sczepia się z nimi za pomocą pasa lub zębów na obwodzie.



Rys. 306. Młot hydrauliczny.



Rys. 307. Kołowrót.

2. Warunek równowagi. Siła jest mniejsza od ciężaru tyle razy, ile razy promień wału jest mniejszy od promienia koła. Mówiąc krócej, stosunek sił na kołowrocie równa się odwrotnemu stosunkowi promieni (rys. 307):

$$P : Q = r : R.$$

Dowód (rys. 307). Łącząc punkty działania siły P i ciężaru Q z osią, otrzymuje się momenty $P \cdot R = Q \cdot r$, skąd $P : Q = r : R$.

Sumę promieni $R + r$ można także uważać jako długość dźwigni dwuramiennej, skąd wypada ten sam warunek równowagi.

Wnioski. Z proporcji $P : Q = r : R$ wynika:

1) $$P : Q = 2r : 2R$$

t. j. siła ma się do ciężaru, jak średnica wału do średnicy koła; oraz

2) $$P : Q = 2\pi r : 2\pi R$$

t. j. siła ma się do ciężaru, jak obwód wału do obwodu koła.

Ostatnie dwie zależności mają znaczenie praktyczne, gdyż łatwiej nieraz zmierzyć średnicę lub obwód koła, osadzonego na osi, niż jego promień.

3. Pędnie czyli **transmisje.** Połączenie dwu lub więcej kołowrotów za pomocą sznura bez końca, łańcucha lub pasa bez końca, albo też za pomocą sczepienia zębów stanowi *pędnię* (transmisję); pierwsza zowie się *pasową* (rys. 308), druga *trybową* (ryc. 309).

Pędnie służą powszechnie do przenoszenia ruchu w urządzeniach fabrycznych i komunikacyjnych, a zarazem do rozdzielania ruchu jednej maszyny pomiędzy wiele maszyn pomniejszych, za pomocą długiego wspólnego wału, np. w warsztatach. Przenosząc ruch małego koła na większe, zyskuje się na sile, traci zaś na szybkości, t. j. małą siłą prędko obraca się koło mniejsze (rys. 309, II), duży zaś ciężar podnosi się wolno, np. w windzie. Przeciwnie, przenosząc ruch z dużego koła na małe, zyskuje się na szybkości, traci się zaś na sile, t. j. znaczną siłą obraca się koło powoli, mniejsze zaś kółko wiruje prędko, np. w maszynie do szycia, tokarni, krążku szlifierskim (rys. 308).

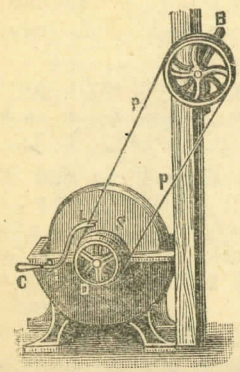
Zważywszy, iż stosunek ciężaru do siły zowie się przekładnią (§ 20, art. 5), określić można krótko warunek działania każdej pędni: przekładnia ogólna równa się iloczynowi przekładni każdego kołowrotu: $\frac{Q}{P} = n_1 \cdot n_2 \cdot n_3 \ldots$

Przekładnię można też wyrazić stosunkiem promieni, ponieważ tenże równa się stosunkowi ciężaru do siły; przekładnia ogólna jest stosunkiem iloczynu promieni kół do iloczynu promieni wałów: $\frac{Q}{P} = \frac{R_1 \cdot R_2 \cdot R_3}{r_1 \cdot r_2 \cdot r_3} \ldots$

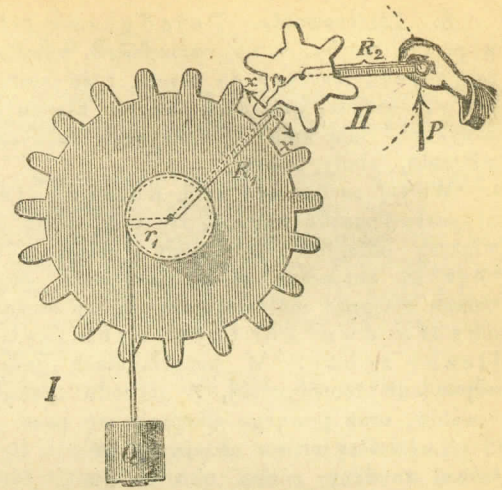
Dowód (rys. 309). Niech siła P działa na korbę R_2, t. j. promień koła, którego wałem jest tryb o promieniu r_2, ciężar Q działa na wał o promieniu r_1, należący do koła zębatego o promieniu R_1. Gdy oba kołowroty się równoważą, istnieją w punkcie ich sczepienia dwie siły x i x równe i przeciwne. Zatym

I kołowrót $Q r_1 = x R_1$

II „ $P R_2 = x r_2$.



Rys. 308. Pędnia pasowa.



Rys. 309. Pędnia trybowa.

Z podziału

$$\frac{Q r_1}{P R_2} = \frac{R_1}{r_2}$$

wypada

$$\frac{Q}{P} = \frac{R_1 R_2}{r_1 r_2}.$$

Wyrażając przekładnię $n_1 = \frac{R_1}{r_1}$, $n_2 = \frac{R_2}{r_2}$, można napisać krócej

$$\frac{Q}{P} = n_1 \cdot n_2.$$

Podobnież da się wyprowadzić przekładnia dla większej liczby kół trybowych lub pasowych.

Przykłady (liczby wzięte z wymiarów rycin, powiększone 10-krotnie).

1) Promień (rys. 307) $r = 6$ cm, $R = 15$ cm, siła $P = 6 : 15 = \frac{2}{5}$ ciężaru R.

2) Podobnież (rys. 309) ze stosunku $R_1 : r_1 = 28$ cm $: 7$ cm, oraz $R_2 : r_2 = 27$ cm $: 9$ cm, wypada: przekładnia $= 4 \times 3 = 12$, czyli siła $= \frac{1}{12}$ ciężaru.

4. Równość prac (złota reguła) ujawnia się przy obracaniu kołowrotu w ten sposób, że gdy punkt działania siły P przejdzie za jednym obrotem drogę równą obwodowi koła ($2\pi R$, rys. 307), ciężar Q przejdzie drogę równą obwodowi wału ($2\pi r$).

Praca siły $P \cdot 2\pi R = Q \cdot 2\pi r$ praca ciężaru.

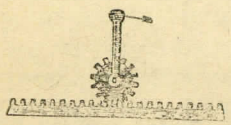
Stąd $$P \cdot R = Q \cdot r$$

zgodnie z prawem momentów.

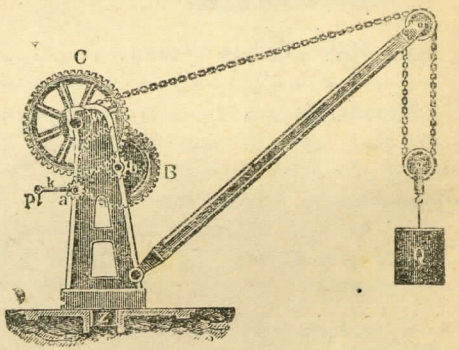
5. Zastosowania. Pojedynczy kołowrót ma powszechne zastosowanie w postaci korby, w najrozmaitszych urządzeniach domowych i technicznych, np. młynki, maszyny do szycia, kołowrotki, dalej klucze do nakręcania zegarów, narzędzi grających, zwykłe klucze do drzwi i t. p. — Inne pospolite przykłady dają koła w maszynach fabrycznych, pojazdach, koła młyńskie, wiatraki, windy, rolety.

Więcej zastosowań mają połączenia kołowrotów czyli pędnie, przyczym pasowe używają się tam, gdzie chodzi o przenoszenie ruchu na większą odległość, np. kilku i nawet kilkudziesięciu metrów. Pędnie trybowe są konieczne w mechanizmach zegarowych, gdyż za pomocą trybów można osiągnąć matematycznie ścisły stosunek liczby obrotów: szybkość obrotu dwu kół trybowych jest w odwrotnym stosunku do liczby zębów. W przekładniach pasowych liczba obrotów nigdy nie odpowiada teoretycznej, z powodu nieuniknionych błędów w wymiarze kół i wałów, oraz pewnego ślizgania się pasa.

Koła trybowe nadają się do łatwej zamiany ruchu obrotowego na postępowy, przez sczepienie z prętem trybowym czyli *kremaljerą* (rys. 310), np. w aparatach fotograficznych, kolejach górskich.



Rys. 310. Kremaljera.



Rys. 311. Wielki dźwig towarowy.

Połączenie pędni trybowej z pasową (łańcuchową) stosuje się w rowerze. Zaznaczyć wypada, że tutaj wyraz „przekładnia" ma znaczenie specjalne: wyraża on w calach angielskich średnicę idealnego koła, pojedynczego, któreby zastępowało rzeczywiste koło roweru wraz z jego pędnią trybową. Mianowicie, średnica koła w rowerze, a właściwie jego obręczy gumowej, wynosi 28 cali (okr. 70 cm). Jeżeli kółko pedałowe posiada zębów 54, tylne 18, stosunek 54 : 18 = 3; za jednym obrotem pedału koło roweru daje 3 obroty, a t. zw. „przekładnia" = $3 \times 28 = 84$ cale. Znaczy to, że gdyby w rowerze usunięto łańcuch i tryby, a poruszano go pedałem, osadzonym wprost na szprychach koła, należałoby dać temu kołu średnicę 84 cali (dawniejsze bicykle), by za jednym obrotem pedału przebyć drogę taką samą, jak na danym rowerze. Skoro 84 cale = $2r$, czyli $2\pi r$ = = 264 cale, za każdym obrotem pedału rower posuwa się o 264 cale = = okr. 6,6 metra.

Najpotężniejsze pędnie, w połączeniu z blokami, stanowi dźwig okrętowy, kolejowy, składowy, typu wyobrażonego na rys. 311, używany do podnoszenia ciężkich towarów, a nawet całych wagonów i statków.

Zadania.

1. Dźwig ręczny (winda) ma promień wału $r = 10$ cm, długość korby $R = 1$ m. Jaki ciężar podźwigną dwaj robotnicy, gdy każdy ciągnie siłą 45 kg? Odp. 900 kg.

2. Ile wynosi przekładnia, wyobrażona na rys. 308, 310? Odp. Odmierzywszy R_1, r_1, R_2, r_2 w milimetrach, otrzymamy okr. $^1/_2$, 4.

3. Dźwig okrętowy, którego mechanizm podnoszący wyobraża rys. 117, porusza maszyna parowa w ten sposób, że na ramię $k = 1$ m działa siła $P = 200$ kg, koła zaś trybowe mają średnice $a = 0{,}4$ m, $b = 0{,}5$ m, $B = 1{,}8$ m, $C = 2{,}5$ m, wał $w = 0{,}8$ m. Jaki ciężar Q, zawieszony na bloku ruchomym, udźwignie winda?

Odp. $Q = 200 \cdot \frac{1 \cdot 1{,}8 \cdot 2{,}5 \cdot 2.5}{0{,}2 \cdot 0{,}4 \cdot 0{,}5 \cdot 0{,}8} \cdot 2 = 140\,600$ kg czyli przeszło 140 ton.

4. Cyklista jedzie po gładkiej drodze poziomej, robiąc pedałem po 28 obrotów na minutę; długość pedału wynosi 18 cm, kółko pedałowe ma zębów 55, tylne 22, średnice tych kółek wynoszą odpowiednio 20 i 8 cm, średnica obręczy 70 cm. Do pędzenia roweru potrzeba siły pociągowej 3 kg. a) Jaki nacisk średni wywiera cyklista na pedał? b) Ile wynosi sprawność? c) Ile obrotów wykona pedał na drodze z Warszawy do Wawra, mierzącej 9 km?

Rozw. a) Niech p oznacza siłę nacisku na pedał, x siłę działającą na łańcuch, zatym i na obwód kółka pedałowego; skoro siła pociągowa na obręczy = 3 kg, wynikają równości $x \cdot 4 = 3 \cdot 35$ oraz $x \cdot 10 = p \cdot 18$, stąd $p = 14{,}6$ kg.

b) Sprawność wynosi $\frac{14{,}6 \cdot 2\pi \cdot 0{,}18 \cdot 28}{60 \cdot 75} = 0{,}1$ HP.

c) Droga przebyta za jednym obrotem pedału $= \frac{55}{22} \cdot 2\pi \cdot 0{,}35 =$ $= 5{,}5$ m, zatym liczba obrotów $= 9000 : 5{,}5 = 1636$.

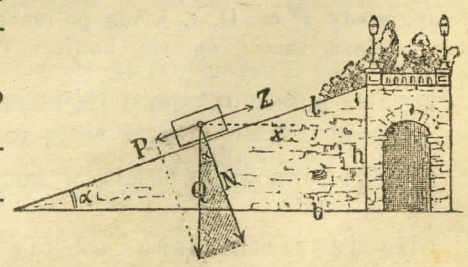
§ 59. Równia pochyła.

1. Równią pochyłą zowie się każda płaszczyzna nachylona do poziomu, t. j. tworząca z nim kąt ostry.

W przekroju, na wykresie równię pochyłą wyobraża (rys. 312) przeciwprostokątna w trójkącie *bhl*, gdzie bok przyprostokątny poziomy b zowie się *podstawą*, pionowy h *wysokością*, a sama przeciwprostokątna l *długością* równi.

Stosunek wysokości do długości $\frac{h}{l}$ nazywa się *spadkiem* równi pochyłej. Z konstrukcji wynika, że

spadek $\frac{h}{l} = \sin \alpha$.



Rys. 312. Rozkład ciężaru Q.

Na drogach publicznych spadek bywa podawany w postaci ułamka $^1/_n$; np. spadek $^1/_{200}$ oznacza, że droga obniża się o 1 m na 200 m długości. Na kolejach spadek wskazują zwykle 2 liczby: górna oznacza długość toru pochyłego, dolna jego spadek w postaci ułamka dziesiętnego; w danym przykładzie liczby odnośne będą $^{200}/_{0,005}$.

2. Warunek równowagi. Odróżniamy dwa główne przypadki równowagi sił na równi, mianowicie zrównoważenie ciała siłą równoległą do długości równi, albo siłą równoległą do podstawy.

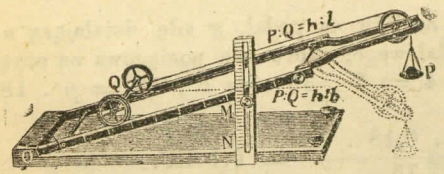
a) Siła równoważna działa w kierunku długości.

Siła jest mniejsza od ciężaru tyle razy, ile razy wysokość równi od jej długości (rys. 313):

$$P : Q = h : l.$$

Dowód. Ciężar Q, jako działający ukośnie względem równi, rozkłada się (§ 15, art. 5) na dwie siły, z których jedna N, prostopadła do równi, znosi się jej oporem, druga P, równoległa do długości równi, usiłuje ciało zsunąć. Z podobieństwa trójkątów, utworzonych z linji l, b, h i Q, N, P, wynika $P : Q = h : l$.

Doświadczenie (rys. 313). Para kółek Q, dosyć ciężkich, ale toczących się łatwo po szynach pochyłych, tak iż tarcie można pominąć, równoważy się ciałem P na szalce, jak wskazuje rycina. Jeżeli spadek, t. j. stosunek $MN : MO$, wynosi 12 cm : 45 cm = 4 : 15, a waga kółek 600 g, ciało P wraz z szalką ważyć musi 160 g, gdyż 160 : 600 = 4 : 15.



Rys. 313. Równowaga ciężarów na równi pochyłej.

Wynika stąd, że siła ($Z = P$), równoważąca ciężar, jest tym mniejsza, im równia jest mniej spadzista:

$$\text{siła } P = Q \cdot \frac{h}{l} = \text{ciężar} \times \text{spadek}$$

$$\text{albo } P = Q \cdot \sin \alpha.$$

Szczególne przypadki. 1) Gdy $\alpha = 0$, równia ma kierunek poziomy; wtedy $P = 0$, t. j. nie potrzeba żadnej siły do udźwignięcia danego ciężaru, znosi on się bowiem całkowicie w skutek nacisku prostopadłego.

2) Gdy $\alpha = 90^0$, równia ma kierunek pionowy; wtedy $P = Q$, t. j. siła jest równa ciężarowi, gdyż niema nacisku na równię.

b) Siła równoważna działa w kierunku równoległym do podstawy równi.

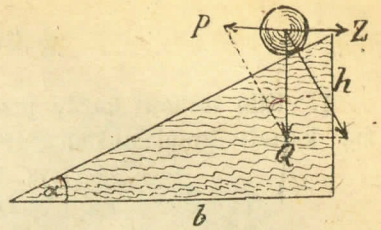
Siła jest mniejsza od ciężaru tyle razy, ile razy wysokość jest mniejsza od podstawy (rys. 314).

$$P : Q = h : b.$$

Dowód. Z rozkładu ciężaru Q na dwie siły: poziomą P i prostopadłą do równi, która się znosi oporem równi, oraz z podobieństwa trójkątów o bokach P, Q i b, h wynika $P : Q = h : b$.

Stąd $$P = Q \cdot \frac{h}{b}$$

albo $$P = Q \cdot \operatorname{tg} \alpha.$$



Rys. 314.

Ponieważ $\sin \alpha < \operatorname{tg} \alpha$, działanie siły jest korzystniejsze w poprzednim przypadku (art. 2-a), t. j. gdy siła działa w kierunku długości równi; stosuje się przeto powszechnie.

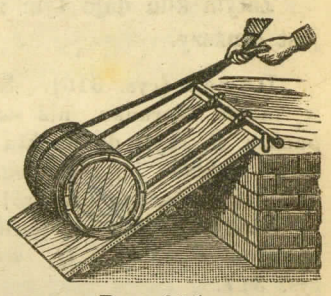
3. Równość prac. Praca siły na równi, przy posuwaniu ciężaru na całą jej długość, jest równa pracy ciężaru, który przez to się podniósł na wysokość równi:

$$P \cdot l = Q \cdot h.$$

Dla równi więc, podobnie jak dla wszystkich innych maszyn, istnieje złota reguła mechaniki i tutaj zysk na sile jest równoważny stracie na drodze.

4. Przykłady i zastosowania. Praktycznie równię pochyłą stanowi deska pochylona, drabina oparta, dach, droga pod górę idąca, kierunek schodów, powierzchnia wody w rzekach.

Często stosuje się równię w postaci deski albo pary drążków do wtaczania beczek, przyczym beczkę opasuje się sznurami (rys. 315); zarazem stosuje się tu zasada bloka ruchomego (objaśnić).



Rys. 315.

Zadania.

1. Nakreślić 3 równie pochyłe o jednakowej podstawie, a różnej wysokości, wraz z rozkładem siły na każdej.

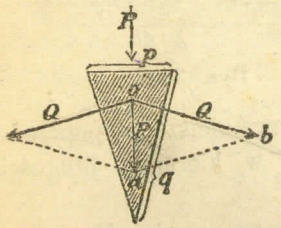
2. Na równi pochyłej leży ciężar 740 g, którego tarcie wynosi 8% wagi. Oznaczyć wartość siły równoważnej i ciśnienia, jeżeli $l : b : h = 5 : 4 : 3$, a w innym wypadku 37 : 35 : 12.

3. Pociąg wagi 250 ton jedzie pod górę o spadku 2%. Jakiej siły trzeba do utrzymania go na szynach, jeżeli tarcie wynosi $\frac{1}{2}$% wagi pociągu? Odp. 6250 kg.

4. Jakiej siły wymaga wtoczenie beczki po desce pochyłej (rys. 315), jeżeli beczka waży 68 kg, a deska tworzy kąt 30^0 z poziomem. Odp. Przeszło 17 kg.

§ 60. Klin.

1. Klin stanowi każdy przedmiot ostro zakończony. Pospolicie klin ma kształt graniastosłupa trójściennego, którego przekrój poprzeczny (rys. 316) jest trójkątem równoramiennym. Ściana (p), na którą działa siła (P), zowie się *grzbietem*; ściany (q), gdzie działa opór lub ciężar (Q), są *bokami* klina.



Rys. 316. Klin.

Przykłady. Dłuto, nóż, brzytwa, nożyce, igła, siekiera, kawał drzewa, ścięty ukośnie i używany do rozłupywania drzewa lub podważania ciężkich przedmiotów, jak mebli, kloców, skrzyń itp.

Klin można uważać teoretycznie jako dwie równie pochyłe, złączone z sobą podstawami; wysokość każdej jest połową grzbietu ($\frac{1}{2}\ p$), długość równi jest bokiem klina (q).

2. Warunek równowagi. Siła jest mniejsza od oporu tyle razy, ile razy grzbiet klina jest mniejszy od boku (rys. 316):

$$P : Q = p : q.$$

Zatym klin daje tym większy zysk na sile, im jest cieńszy oraz im jest dłuższy.

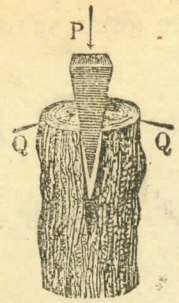
Dowód (rys. 316). Siła P, napotykając opory na bokach klina, t. j. w innym kierunku, niż sama działa, ulega rozkładowi; przesuwając siłę do punktu O, czyli do punktu przecięcia się obu kierunków oporów, otrzymuje się z rozkładu jej równoległobok, a w nim trójkąt $o\,a\,b$, podobny do trójkąta, stanowiącego przekrój klina. Stąd proporcja $P : Q = p : q$.

Ażeby się klin nie poruszał, musi napotykać na obu bokach opory równoważne siłom Q i Q, wynikającym z rozkładu siły P; uwidocznia to rys. 317.

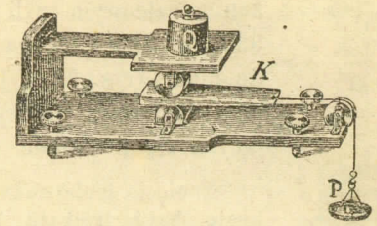
Z proporcji $P : Q = p : q$ wynika

$$\frac{P}{p} = \frac{Q}{q}$$

t. j. stosunek siły do wymiaru grzbietu jest taki sam, jak stosunek oporu do wymiaru boku, albo inaczej, że 1 cm² grzbietu otrzymuje tyleż siły, co 1 cm² boku. Że zaś siła przypadająca na powierzchnię 1 cm² zowie się ciśnieniem (§ 14, art. 3), rzec można, iż na klinie ciśnienia są wszędzie jednakowe. Natomiast nacisk ogólny siły na grzbiet klina jest mniejszy, niż na boki: mała siła na grzbiecie sprawia duży nacisk na boki, skoro klin jest cienki a długi.



Rys. 317. Klin w użyciu.



Rys. 318. Równowaga ciężarów na klinie.

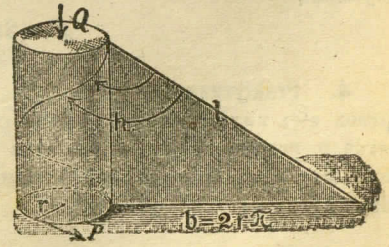
Doświadczenie (rys. 318). Klin drewniany K wsuwa się możliwie gładko pomiędzy dwa wałki, obracalne na osiach; ciężar P na szalce ciągnie klin, za pomocą sznura, przerzuconego przez blok stały, na bok zaś klina ciśnie ciężar Q. Skoro ciężar P wraz z szalką waży np, 125 g, ciężar Q wraz z deszczułką i wałkiem, na których spoczywa, waży 1000 g, a klin mierzy 2 cm grubości, przy 16 cm długości, cały przyrząd jest w równowadze, gdyż 125 : 1000 = 2 : 16.

3. Równość prac siły i oporu polega na tem, że gdy klinem pokonywa się opór, np. przy rozłupywaniu drzewa (rys. 317), i siła P posunie klin na całą jego długość q (rys. 316), to droga oporu Q wynosi tyle, co grubość klina p, t. j. drzewo na tyle się rozszczepia. Praca więc siły wynosi $P \cdot q$, praca oporu $Q \cdot p$, i oczywiście

$$P \cdot q = Q \cdot p.$$

§ 61. Śruba.

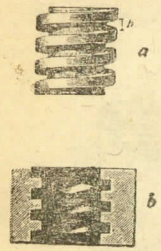
1. Pochodzenie śruby. W zasadzie teoretycznej śruba jest równią pochyłą, nawiniętą na walec. Można to uzmysłowić, okręcając wałek (rys. 319) papierem, wyciętym w kształcie trójkąta prostokątnego i przyłożonym tak, aby podstawa (b) trójkąta równała się obwodowi ($2\pi r$) walca, wysokość zaś (h) przystała do boku (tworzącej) walca.



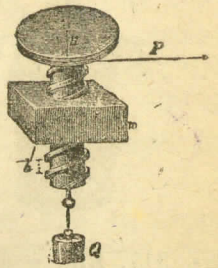
Rys. 319. Pochodzenie śruby.

Linja śrubowa czyli *spiralna* na walcu tworzy długość (l) równi pochyłej; *krok śruby*, t. j. odstęp między skrętami linji śrubowej, stanowi wysokość równi (h).

W wykonaniu praktycznym nacina się wzdłuż linji śrubowej na walcu rowek czyli *gwint* zewnętrzny (rys. 320, *a*); taki sam gwint wewnętrzny nacina się w odpowiednim wydrążeniu walcowym czyli *mutrze* (rys. 320, *b*). Skoro śruba wkręca się do mutry (rys. 321), jest ona układem dwu równi pochyłych, ślizgających się po sobie długościami.



Rys. 320. *a*) śruba, *b*) mutra.



Rys. 321. Śruba z główką i mutrą.

Nacięcia śrubowe tworzą w przekroju kąty trójkąta ⋁ lub czworokąta ⊓, stąd nazwy: *gwint ostry* albo *tępy*. Pierwsze nadają się zwłaszcza do przykręcania przedmiotów, np. pospolite śrubki do drzewa i metalu, oraz do mierzenia, np. mikrometr; drugie do poruszania, np. imadło, prasa śrubowa (rys. 322), śruba bez końca (rys. 323).

2. Warunek równowagi. Siła jest mniejsza od oporu tyle razy, ile razy krok śruby jest mniejszy od jej obwodu (rys. 319):

$$P : Q = h : 2\pi r.$$

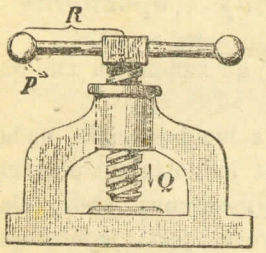
Dowód teoretyczny wypływa z zasady równi pochyłej. Śrubę bowiem obraca siła P styczna do obwodu, t. j. równoległa do podstawy b równi; wzdłuż osi śruby, t. j. wysokości h równi, działa opór lub ciężar Q. Stosuje się tu więc § 59, art. 2-b, skąd wynika $P : Q = h : b$; że zaś $b = 2\pi r$, przeto $P : Q = h : 2\pi r$.

Doświadczalne stwierdzenie warunku równowagi można wykonać tylko w grubym przybliżeniu, gdyż tarcie nie da się osłabić dostatecznie nawet w najlepszych modelach śruby.

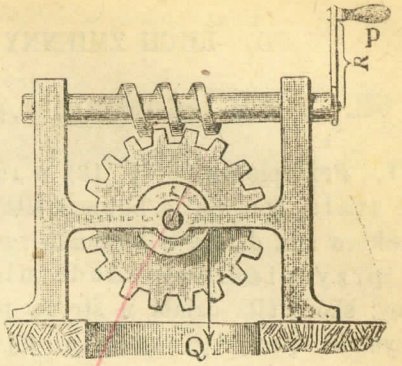
3. Równość prac siły i oporu polega na tym, że gdy śruba podnosi np. za jednym obrotem ciężar Q (rys. 319 i 321) o wysokość kroku h, wtedy siła P robi drogę równą obwodowi $2\pi r$. Stąd prace wynoszą

$$P \cdot 2\pi r = Q \cdot h.$$

4. Praktyczna postać śruby. Śruba rzadko znajduje zastosowanie sama przez się; zwykle śruba posiada *główkę* lub rękojeść, która stanowi kołowrót o promieniu r; stąd droga siły znacznie się powiększa, zatym wartość siły się zmniejsza, tak iż śruba, połączona w ten sposób z kołowrotem, daje ogromny zysk na sile.



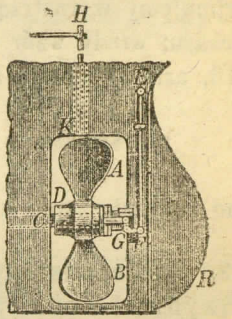
Rys. 322. Prasa śrubowa.



Rys. 323. Śruba bez końca.

Zastosowania. Śrubki do drzewa lub metalu, za pomocą których się przykręca różne przedmioty. — Świder do drzewa. — Grajcarek czyli korkociąg. — Śruby regulacyjne w różnych narzędziach, np. w nożycach, lornetce, mikroskopie. — Imadło. — Prasa śrubowa (rys. 322). — Śruba bez końca (rys. 323).

Śmiga aeroplanu i podobna do niej śruba okrętowa (rys. 324); rysunek wyobraża tylną część statku, zanurzoną w wodzie: na osi C wiruje śruba AB, pędząca statek, R stanowi ster.



Rys. 324. Śruba okrętowa.

Przykład 1. W prasie śrubowej (rys. 322) $R = 20$ cm, $h = 5$ mm, siła na rączce $P = 10$ kg; zatym ciśnienie na końcu śruby:

$$Q = \frac{P \cdot 2\pi R}{h} = \frac{10 \cdot 2 \cdot 3{,}14 \cdot 20}{0{,}5} = 2512 \text{ kg}.$$

Przykład 2. Koło zębate (rys. 323) o promieniu $r = 3$ cm, mające na obwodzie zębów $n = 150$, sczepia się ze śrubą bez końca, poruszaną korbą o promieniu $R = 24$ cm. Ile wynosi przekładnia (stosunek ciężaru do siły)?

Rozw. Na jeden obrót koła korba musi zrobić 150 obrotów; stąd

$$Q : P = 2\pi R : 2\pi r$$

$$\text{(przekładnia)} \quad \left(\begin{matrix}\text{droga}\\ \text{siły}\end{matrix}\right) \quad \left(\begin{matrix}\text{droga}\\ \text{ciężaru}\end{matrix}\right)$$

$$Q : P = nR : r = 1200.$$

D) RUCH ZMIENNY W SZCZEGÓLNOŚCI.

§ 62. Ruch jednostajnie przyśpieszony i opóźniony.

1. Przyśpieszenie (§ 13) w ruchu jednostajnie zmiennym ma wartość stałą, sprawia je bowiem siła stała.

Skoro siła działa w kierunku ruchu, zgodnie z biegiem ciała, nadaje mu przyśpieszenie dodatnie, a ruch jest jednostajnie przyśpieszony; skoro siła działa w stronę przeciwną, czyli stanowi opór, ciało otrzymuje przyśpieszenie ujemne, a ruch jest jednostajnie opóźniony.

W wielu zjawiskach przyrody, jako też zastosowaniach, zmiany przyśpieszenia są tak drobne, że uchylają się od zwykłego spostrzeżenia; w takim razie przyśpieszenie poczytujemy jako stałe, a ruch za jednostajnie przyśpieszony, przynajmniej w czasie dostatecznie krótkim. Np. ciała spadają ruchem jednostajnie przyśpieszonym, gdyż siła przyciągania ziemi wzrasta niezmiernie mało podczas spadania ciała.

Jeżeli zaś zachodzi ruch niejednostajnie zmienny, to jest przyśpieszenie co chwila wzrasta lub ubywa wyraźnie, w takim razie przyjmujemy w roztrząsaniach *przyśpieszenie średnie* w danym przeciągu czasu; wtedy wzór na przyśpieszenie ruchu jednostajnie zmiennego (§ 13, art. 3) nadaje się i dla każdego ruchu niejednostajnego:

$$\text{przyśpieszenie } a = \frac{v - c}{t} = \frac{\text{przyrost szybkości}}{\text{czas}},$$

gdzie przyśpieszenie a wyraża się w $\frac{cm}{sek^2}$ lub jednostkach pochodnych.

2. Oznaczenie szybkości i drogi w ruchu jednostajnie zmiennym. a) Szybkość końcowa (§ 13, art. 2). Jeżeli ciało ma już nadaną pewną szybkość początkową c, i pod działaniem siły stałej otrzymuje przyśpieszenie a, to szybkość końcowa ciała wynosi:

w końcu	1	sekundy	. . . .	$c \pm a$
„ „	2	„	. . . .	$c \pm 2a$
„ „	3	„	. . . .	$c \pm 3a$
. . . . .			. . . .	. . . .
„ „	t	„	. . . .	$c \pm at$

Szybkość końcowa $v = c \pm at$.

Szybkość rzeczywista jest to szybkość z jaką by się ciało zaczęło poruszać, gdyby od tego punktu ruchem jednostajnym.

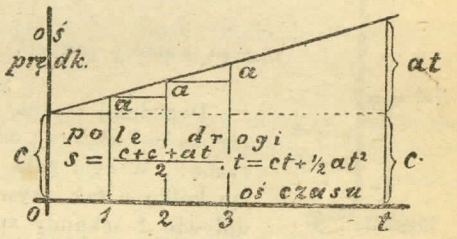
Znak + stosuje się do ruchu przyśpieszonego, znak — do ruchu opóźnionego..

b) Droga. Ciało w ruchu jednostajnie przyśpieszonym w ciągu t sek. przejdzie tyle drogi, ileby przeszło, biegnąc jednostajnie z szybkością średnią między obu szybkościami, początkową i końcową, to jest szybkością $\frac{c+v}{2}$; zatym przebywa drogę:

$$s = \frac{c+v}{2} \cdot t = \frac{c + c \pm at}{2} \cdot t = ct \pm \tfrac{1}{2} at^2.$$

Droga $s = ct \pm \frac{1}{2} at^2$

3. Wykreślenie ruchu jednostajnie przyśpieszonego. Odcina się na jednej z osi (rys. 325) czas, na drugiej prędkość, i wyprowadza się równoległe linje prędkości końcowych po 1″, 2″, 3″... t″; wtedy z połączenia końców ostatnich linją prostą wypada trapez, którego pole wyraża drogę przebytą. Wzrost tej drogi w zależności od czasu widać na wykresie.



Rys. 325.

4. Oznaczenie przyśpieszenia. Wartość przyśpieszenia wyraża się stosunkiem siły do masy, na zasadzie drugiego prawa dynamicznego Newtona (§ 15, art. 3 i 4):

$$\text{przyśpieszenie } a = \frac{p}{m} = \frac{\text{siła}}{\text{masa}}.$$

Skoro siłę wyrażono w dynach, masę w gramach, przyśpieszenie wypada w cm/sek²; zatym gdy $p = 1$ dyna, $m = 1$ gram, $a = 1$ cm/sek² (określenie dyny, str. 49).

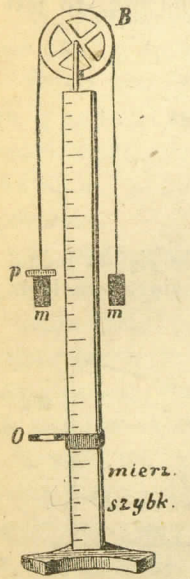
Gdy $p = 1$ gram, $m = 1$ gram, przyśpieszenie = 981 cm/sek²; stąd wartość dyny w mierze ciężarowej wynosi $\frac{1}{981}$ grama.

Siła 1 g nadaje masie 1 g przyśpieszenie 981 cm/sek².

Podobnież siła 1 kg nadaje masie 1 kg przyśpieszenie 9,81 m/sek².

Doświadczalnie oznacza się wartość przyśpieszenia zwykle w ruchu pionowym, przy spadaniu ciał pod wpływem ciężkości, odpowiednio hamowanym, gdyż spadek swobodny odbywa się tak prędko, że trudno jego przebieg zaznaczyć. Można też otrzymać tę samą wartość w jakimkolwiek innym ruchu, np. poziomym, przy udziale innej siły, np. sprężystości.

a) Przyśpieszenie w ruchu pionowym oznacza się najdokładniej na *przyrządzie Atwooda* (maszynie spadkowej), której najprostszą postać wyobraża rys. 326. Na słupie, wysokim przeszło na 2 m, mieści się kółko B, obracające się nader lekko; przez rowek na obwodzie kółka przerzucono sznur z ciężarami mm. Skoro ciężary są równe, nie poruszają się wcale; za trąceniem zaś poruszają się ruchem jednostajnym (dlaczego?). Po dodaniu zaś do jednego z nich ciężarka p, wszystkie 3 masy zostają w ruch wprawione. Siłą pędzącą jest p, masa poruszana $= m + m + p$ gramów opada ruchem jednostajnie przyśpieszonym. Na podziałce słupa odczytuje się drogi, przebyte w ciągu 1, 2, 3 ... sekund; daje to przyśpieszenie a.



Rys. 326. Maszyna Atwooda.

Siła 1 g nadaje masie 1 g przyśpieszenie x cm/sek²
„ p „ „ 1 „ $p \cdot x$ „
„ p „ „ $m+m+p$ „ $a = \frac{px}{m+m+p}$ „

stąd wartość przyśp. $x = a \cdot \frac{2m+p}{p}$ cm/sek².

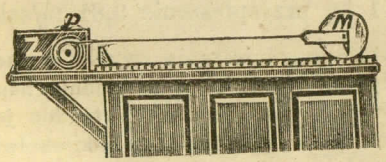
Dogodniej można oznaczyć przyśpieszenie a na zasadzie szybkości końcowej, od chwili zakończenia pierwszej sekundy ruchu. W tym celu zatrzymuje się nadwyżkę p, ustawiając kółko o tak wysoko, aby zatrzymanie nastąpiło po upływie 1 sekundy spadania; ciężar m przechodzi swobodnie przez kółko i opada dalej ruchem jednostajnym (prawo bezwładności), z szybkością równą liczebnie przyśpieszeniu.

Do liczenia sekund służy część dodatkowa w maszynie Atwooda, mianowicie wahadło zegarowe (pominięte na rycinie) tak urządzone, że każde jego wahnięcie trwa ściśle 1 sekundę i daje się słyszeć dzwonkiem.

Doświadczenie wykazuje dla x wartość 981 cm/sek², przy jakiejkolwiek zmianie ciężarów m i p. Np. gdy $m = 489{,}5$ g, $p = 2$ g, to $a = 2$ cm/sek²; stąd $x = 2 \cdot (2 \cdot 489{,}5 + 2) : 2 = 981$.

Zgodność wyników doświadczalnych z wynikami obliczonymi za pomocą wzoru na przyśpieszenie świadczy zarazem o prawdziwości tegoż wzoru, t. j. proporcjonalności siły do masy i przyśpieszenia.

b) Przyśpieszenie w ruchu poziomym. Na długim stole (rys. 327) przytwierdzono parę szyn gładkich, na których stoi wózek dwukołowy o masie M (podobny jak na rys. 313), podziałka na jednej z szyn wskazuje drogi, jakie wózek przebywa pod wpływem siły poruszającej p. Siłę tę daje sprężyna, zawarta w mechanizmie zegarowym Z; można ją poczytywać w przybliżeniu za stałą, skoro sprężyna rozkręca się bardzo nieznacznie w czasie ruchu wózka.



Rys. 327.

Za pomocą czułego dynamometru (rys. 26 lub 43) należy oznaczyć tarcie T wózka, t. j. siłę potrzebną do utrzymywania go w ruchu jednostajnym, podobnież siłę p sprężyny. Oznaczając przez x przyśpieszenie masy 1 g pod wpływem siły 1 g, zaś przez a przyśpieszenie, z odczytanej drogi na podziałce szyny, oraz wiadomego czasu, otrzymamy

$$a = \frac{(p - T) \cdot x}{M} \qquad \text{i stąd } x = a \cdot \frac{M}{p - T}$$

Zadania.

1. Człowiek popycha wagon, ważący 5 ton, siłą 70 kg. Ile wynosi przyśpieszenie? Odp. 14 cm/sek².

2. Kula, ważąca 20 g, podlega w lufie broni palnej przy wylocie parciu 30 kg (średnio). Jakiego nabywa przyśpieszenia? Jaką drogę przebywa w ciągu $\frac{1}{200}$ sek? Odp. 14715 m/sek²; 18,4 cm.

3. Meteoryt, ważący 10 kg, leciał w ciągu minuty przez atmosferę, przyczym szybkość jego zmalała z 1000 m na 400 m/sek. Jaki opór napotkał w powietrzu? Odp. 10,2 kg.

4. Wagon kolejowy, ważący 8000 kg, posiada już szybkość 0,4 m/sek; czterej robotnicy popychają go, każdy siłą 70 kg. Jakie przyśpieszenie otrzyma wagon? Jaką szybkość osiągnie po 10 sek? Odp. 34,3 cm/sek²; 383 cm/sek.

5. Na machinie Atwooda zawieszono z lewej strony 401 g, z prawej 399 g; oznaczyć przyśpieszenie i drogę w ciągu 10 sek. Odp. 2,45 cm/sek²; 1,225 m.

6. Pociąg, ważący 200 ton, ciągnie siła 18 ton; oznaczyć przyśpieszenie i drogę po 6 sek. Odp. 0,88 m/sek²; 15,89 m.

§ 63. Spadek swobodny ciał.

1. Spadek pod wpływem siły ciężkości. W skutek ciężkości wszystkie ciała spadają w kierunku pionowym, czyli ku środkowi ziemi *).

Powietrze wpływa na szybkość i czas spadania, jakoteż na sam rodzaj ruchu ciała spadającego; działa tu tarcie powietrza i opór powietrza, które się zgęszcza przed ciałem spadającym. Obie przyczyny zwalniają spadek tym bardziej, im większą powierzchnią ciało pruje powietrze; dlatego ciała gatunkowo lekkie spadają wolniej, niż ciężkie. Opór powietrza wzmaga się w miarę wzrastania szybkości, aż staje się równym wadze ciała; od tej chwili ciało spada ruchem jednostajnym, np. krople deszczu.

*) Uchybienia od pionu, w skutek obrotu ziemi, można zauważyć przy spadaniu ciał z wielkiej wysokości.

Spadek ciał pod wpływem li tylko siły ciężkości, bez żadnej przeszkody, czyli *spadek swobodny* zachodzi w próżni, bez żadnego zetknięcia z innymi ciałami. Jeżeli ciało jest drobnych wymiarów, a ciężkie, przytym postaci okrągłej lub śpiczastej, np. kulka ołowiana lub szydło, i spada z niewielkiej wysokości, wtedy opór powietrza nie daje się zauważyć, i spadek uważamy praktycznie jako swobodny.

Spadek ciał jest tylko poszczególnym przypadkiem ruchu zmiennego; zasługuje wszakże na bliższe roztrząsanie ze względu na częstość zjawisk tego rodzaju oraz ich zastosowania.

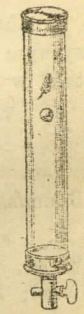
Wszystkie ciała spadają swobodnie jednakowo prędko.

Przykłady. Arkusz blachy, puszczony rogiem na dół, spada prędzej, niż na płask, poziomo. — Papier, zmięty w gałkę, spada prędzej, niż rozpostarty. — Kreda, korek, papierek i piórko, położone na kajecie i puszczone, spadają razem z kajetem (rys. 328; dlaczego?).

Doświadczenie Newtona. Rura pionowa (rys. 329), opróżniona z powietrza, mieści u góry piórko i pieniądz. Oba te przedmioty, spuszczone jednocześnie, lecą obok siebie przez całą długość rury.



Rys. 328.



Rys. 329. Spadek w próżni.

2. Przyśpieszenie ciężkości. Spadek swobodny ciał odbywa się zawsze ruchem jednostajnie przyśpieszonym, ponieważ siła przyciągania ziemskiego działa bezustannie i jednakowo przez cały ciąg spadania ciała, z nieznacznej wysokości. Dotyczy to zarówno ciał spadających pionowo, jak ciał, staczających się po płaszczyźnie pochyłej; różnica polega tylko na szybkości, która bywa największa, gdy ciało spada wprost pionowo, a zmniejsza się w miarę pochylania płaszczyzny, po której ciało się toczy.

Spadając swobodnie, nabiera każde ciało stałego przyśpieszenia, które wynosi u nas i w ogóle w Europie środkowej 981 cm/sek² (okrągło 10 metrów na sekundę); liczba ta zowie się przyśpieszeniem ruchu ciał spadających albo krócej *przyśpieszeniem ciężkości* i oznacza się literą g (od łac. gravitas = ciężkość).

przyśpieszenie ciężkości $g = 981$ cm/sek².
(w Paryżu)

Na równiku $g = 978^{cm}/_{sek^2}$, na biegunach 983 cm/sek².

*) Niewłaściwe przeto bywa stosowanie wymowy francuskiej (*że* zamiast *gis*).

Wartość g na ziemi odnosi się do poziomu morza. W miarę wyniesienia wartość g się zmniejsza, zresztą tak nieznacznie, że w doświadczeniach nie czyni to różnicy (por. § 5, art. 4).

Na innych bryłach niebieskich przyśpieszenie spadku ciał wielce się różni od ziemskiego: na słońcu wynosi 27120 cm/sek², na księżycu 185 cm/sek².

3. Natężenie ciężkości. Uwzględniając we wzorze ogólnym przyśpieszenia $a = \frac{p}{m}$, że a jest przyśpieszeniem ciężkości $= g$, a p jest wagą ciała, można napisać ten wzór w postaci $g = \frac{p}{m}$, to jest stosunek wagi ciała do masy jest stały, czyli przyśpieszenie spadku jest dla wszystkich ciał to samo.

Waga ciał jest proporcjonalna do ich masy (por. § 5, art. 6). Większa masa ma wagę tyleż razy większą, otrzymuje więc to samo przyśpieszenie, musi też spadać równie prędko; w ten sposób uzasadnia się teoretycznie prawo spadania (art. 1).

Wzór $g = \frac{p}{m}$ służy do oznaczenia wagi ciała, skoro wiadoma jest masa ciała:

ciężar p (w dynach) $= m \cdot g$ (w gramach) = masa × przyśp. ciężkości (w cm/sek²).

Siła, z jaką ziemia w danym miejscu przyciąga jednostkę masy, zowie się *natężeniem ciężkości*, jest to więc ciężar masy jednego grama.

Z założenia we wzorze $p = mg$, że $m = 1$, wynika

$$p = g$$

natężenie ciężkości w danym miejscu równa się liczebnie przyśpieszeniu ciał spadających swobodnie.

Stąd zmienność ciężaru tego samego ciała w rozmaitych miejscach na ziemi; największa różnica, stosownie do wartości g, wynosi na równiku prawie — 0,002, na biegunach prawie + 0,003 względem normalnej wagi tegoż ciała, t. j. w Paryżu.

4. Prawa spadku swobodnego. Do spadku ciał swobodnych mają zastosowanie ogólne wzory na ruch jednostajnie przyśpieszony, z uwzględnieniem, że szybkość początkowa $c = 0$, przez co wyrazy c i ct znikają; poza tym przyśpieszenie dowolne a zastępuje się przyśpieszeniem ciężkości g:

I. Szybkość spadania $v = gt$.

II. Droga przebyta $s = \frac{1}{2} gt^2$

Nadto można wyrazić szybkość końcową ciał spadających w zależności od drogi przebytej; rugując ze wzoru I czas t i podstawiając do II, otrzymamy $s = \frac{1}{2}\, g \cdot \frac{v^2}{g^2} = \frac{v^2}{2\,g}$, skąd

III. | szybkość końcowa $v = \sqrt{2\,g\,.\,s}$ |

Ostatni wzór ma częste zastosowanie w mechanice szczegółowej, zwłaszcza zaś w hydrodynamice i aerodynamice.

Wzory I i II stanowią treść następujących dwu twierdzeń, zwanych prawami spadku ciał (Galileusz, około 1600):

1) Szybkości rosną jak czasy spadania, t. j. proporcjonalnie (wzór I).

2) Drogi, przebyte od początku spadania, rosną jak kwadraty czasów (wzór II).

Z powyższych wzorów wypływają nadto wnioski dalsze:

3) Drogi, przebyte w ciągu kolejnych sekund, rosną jak liczby nieparzyste. Jest to wynik wzoru II, gdyż suma t liczb nieparzystych $1 + 3 + 5 \ldots + (2t - 1) = t^2$.

4) Droga, przebyta w ciągu pierwszej sekundy, równa się liczebnie połowie przyśpieszenia. Gdy $t_1 = 1$, $s_1 = \frac{1}{2}\, g$.

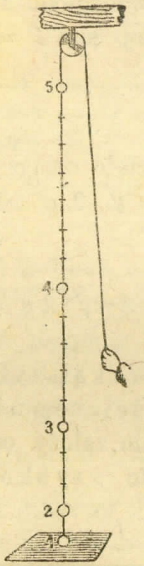
5) Szybkość w końcu pierwszej sekundy równa się liczebnie przyśpieszeniu. Gdy $t_1 = 1$, $v_1 = g$.

6) Przyrost dróg w ciągu kolejnych sekund równa się liczebnie przyśpieszeniu. Mianowicie $s_1 = \frac{1}{2}\, g$; $s_2 = 3 \,.\, \frac{1}{2}\, g$; $s_3 = 5 \,.\, \frac{1}{2}\, g \ldots$; przyrost wynosi zawsze $2 \,.\, \frac{1}{2}\, g = g$.

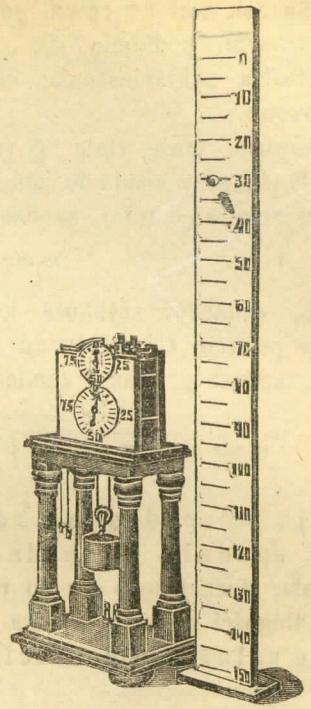
Doświadczalnie można sprawdzić powyższe prawa bezpośrednio, t. j. bez zwolnienia spadku, jaki sprawia maszyna Atwooda, za pomocą sznura, obciążonego kulami ołowianymi w odstępach (od dołu, rys. 330) proporcjonalnych do liczb $1^2 : 2^2 : 3^3 \ldots$; np. kula druga od 1-ej, t. j. od ziemi, o 3 m, kula 3-a od 1-ej o 12 m; kula 4-a od 1-ej o 27 m itd. Zawiesza się sznur u szczytu wysokiej ściany lub wieży, tak, aby dolna kula dotykała ziemi, i puszcza się go u góry; wtedy słychać uderzenie kul w równych odstępach czasu. Opór powietrza nie ma tu wyraźnego znaczenia, tak, iż można go pominąć.

Historyczne to doświadczenie wykonał Galileusz na pochyłej wieży w Pizie.

Sposób kinematograficzny pozwala obecnie sprawdzić prawa swobodnego spadania łatwiej i dokładniej. Całe urządzenie składa się z trzech części: wysokiego słupa, opatrzonego podziałką, chronografu i kinematografu (na rys. 331 przedstawiono dwa pierwsze przyrządy). Chronograf wskazuje czas z dokładnością do $\frac{1}{1000}$ sekundy; na górnej tarczy odczytuje się części sekundy od 1 do 100 tysięcznych, na dolnej dziesiąte części sekundy. Nastawiwszy ten zegar na 0, puszcza go się w ruch,



Rys. 330.
Doświadczenie Galileusza.



Rys. 331.

a jednocześnie i kulkę ołowianą, dając jej spadać wzdłuż podziałki; w czasie spadku fotografuje się kulę w kilku położeniach za pomocą kinematografu. Z zestawienia dróg przebytych, podług fotografji, oraz czasów odnośnych, podług chronografu, wynikają podane wyżej zależności.

Poniższa tabelka ułatwia orjentowanie się co do szybkości, przyśpieszenia, dróg przebytych i t. p., dotyczących spadku ciał (z dokładnością do 0,1 m).

Sekundy	Szybkości końcowe w m/sek	Drogi w ciągu każdej sekundy w metrach	Drogi od początku spadania w metrach
1	$1 \times 9{,}8 = 9{,}8$	$1 \times 4{,}9 = 9{,}9$	$1^2 \times 4{,}9 = 4{,}9$
2	$2 \times 9{,}8 = 19{,}6$	$3 \times 4{,}9 = 14{,}7$	$2^2 \times 4{,}9 = 19{,}6$
3	$3 \times 9{,}8 = 29{,}4$	$5 \times 4{,}9 = 24{,}5$	$3^3 \times 4{,}9 = 44{,}1$
4	$4 \times 9{,}8 = 39{,}2$	$7 \times 4{,}9 = 34{,}3$	$4^2 \times 4{,}9 = 78{,}4$
5	$5 \times 9{,}8 = 49{,}0$	$9 \times 4{,}9 = 44{,}1$	$5^2 \times 4{,}9 = 122{,}5$
„	„ „ „	„ „ „	„ „ „
„	„ „ „	„ „ „	„ „ „
t	$9{,}8 \times t$	$4{,}9 \times (2t - 1)$	$4{,}9 \times t^2$.

5. Spadek ciał po równi pochyłej odbywa się ruchem jednostajnie przyśpieszonym, podobnie jak spadek swobodny, różni się tylko mniejszą wartością przyśpieszenia; ciało więc stacza się wolniej, niżby spadało pionowo.

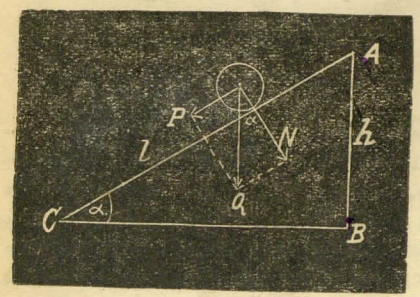
Mianowicie, masę ciała Q (rys. 332) przy swobodnym spadaniu porusza siła Q, przy spadaniu zaś po równi pochyłej siła $P = Q \cdot \sin\alpha$; przyśpieszenie więc tutaj, zamiast g, stanowi

$$a = g \cdot \sin\alpha.$$

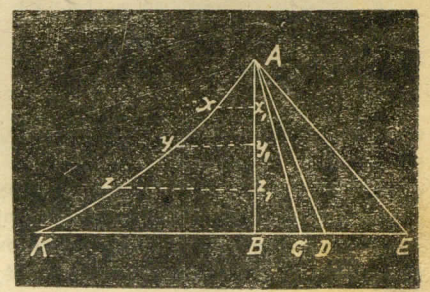
Ażeby oznaczyć szybkość końcową v, jaką ciało osiąga u podstawy równi, w punkcie C, należy do wzoru (III) $v = \sqrt{2gs}$ podstawić $g \sin\alpha$ zamiast g, oraz l zamiast s:

$$v = \sqrt{2g\sin\alpha \cdot l} = \sqrt{2g\frac{h}{l} \cdot l} = \sqrt{2gh}.$$

Ciało w spadku po równi osiąga taką szybkość, jak gdyby spadało swobodnie z wysokości równi. Szybkość więc ciała, staczającego się po równi pochyłej, nie zależy od pochyłości ani od długości równi. Wynika stąd zarazem, że szybkość spadania nie zależy od postaci toru.



Rys. 332.



Rys. 333.

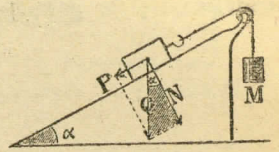
Np. na równiach AC, AD, AE (rys. 333) szybkość spadania w punktach C, D, E jest jednakowa, równa szybkości w punkcie B, przy spadku pionowym, swobodnym. To samo dotyczy spadania ciał po dowolnym krzywym torze AK; można bowiem tor podzielić na dowolnie małe odcinki proste Ax, xy, yz... zK, na każdy z tych odcinków ciało wpada z szybkością, jakąby miało przy ruchu swobodnym w punktach x_1, y_1, z_1, ... K.

W rozważaniach powyższych nie uwzględniamy tarcia; można je pominąć przy staczaniu się np. kuli po gładkiej, twardej powierzchni, z niewielkiej wysokości, aby opór powietrza nie opóźniał spadku wyraźnie. W rzeczywistości ciała, zsuwając się po pochyłościach, napotykają tarcie, z którym wypada się liczyć.

Przykład (z uwzględnieniem tarcia). Bryła Q (rys. 334) wagi 200 g. podtrzymywana cokolwiek przeciwwagą $M = 50$ g, zsuwa się po równi pochylonej o 30°; tarcie = 0,15 nacisku. Oznaczyć drogę w ciągu 6 sekund.

Rozw. Rozkład sił:

siła zsuwająca $P = Q \cdot \sin 30^0 = 100$ g
nacisk $N = Q \cdot \cos 30^0 = 173$ g
tarcie $T = 0{,}15\ N = 26$ g.



Rys. 334. Spadek po równi pochyłej.

Oznaczenie przyśpieszenia:

masa poruszana $= Q + M = 250$ g
siła poruszająca $= P - T - M = 24$ g

przyśpieszenie $a = \frac{981 \cdot 24}{250} = 94$ cm/sek².

Szybkość końcowa $v = at = 564$ cm/sek.
Droga przebyta $s = \frac{1}{2}at^2 = 1692$ cm.

6. Rzut pionowy na dół. Jeżeli ciało otrzyma z góry uderzenie pionowe, nadające mu szybkość początkową c, spadek odbywa się według wzorów ogólnych:

$$\text{(I) } v = c + gt; \qquad \text{(II) } s = ct + \tfrac{1}{2}gt^2.$$

7. Rzut pionowy do góry. W razie wyrzucenia ciała pionowo do góry, można na zasadzie wzorów powyższych oznaczyć wysokość, jakiej ciało dosięgnie, oraz czas na to potrzebny. Działa tu przyśpieszenie ujemne $-g$. Skoro prędkość początkowa $= c$, to prędkość i droga po t sekundach wynosi:

$$\text{(I) } v = c - gt. \qquad \text{(II) } s = ct - \tfrac{1}{2}gt^2.$$

Jeżeli t wyraża czas wznoszenia się ciała do punktu najwyższego, t. j. do chwili zatrzymania się ciała, gdy $v = 0$, to:

czas wznoszenia się $t = \frac{c}{g}$	wysokość rzutu $h = \frac{c^2}{2g}$

Wniosek 1. Ciało od punktu najwyższego wzniesienia spada pod wpływem ciężkości przez t_1 sekund, przebiega więc drogę $\frac{1}{2}gt_1^2$ = wysokości rzutu $\frac{c^2}{2g}$; stąd czas spadania $t_1 = \frac{c}{g}$, czyli $t = t_1$.

Czas wznoszenia się równa się czasowi spadania.

Wniosek 2. Prędkość końcowa przy spadaniu $v = gt$; z podstawienia $t = \frac{c}{g}$, wypada $v = c$.

Ciało spada z taką samą szybkością, z jaką wylatuje z danego miejsca.

Stąd np. kula wystrzelona pionowo, spadając, jest prawie tak samo niebezpieczną, jak wystrzelona poziomo; szybkość jej, zatym i siła uderzenia, zmniejsza się do pewnego stopnia wskutek oporu powietrza.

Zadania.

1. Ile drogi przebywa ciało spadające w ciągu 6 sekund?

2. Ze szczytu wieży, wysokiej na 100 m, spada cegła. Ile czasu leciała? Z jaką szybkością końcową? Odp. 4,5 sek.; 44 m/sek.

3. Z jaką szybkością trzeba wyrzucić pionowo w górę pieniądz, aby zaledwie dotknął sufitu, odległego od ręki o 4 m? Odp. 8,8 m/sek.

4. Dom czteropiętrowy ma wysokość 20 m. Z jaką szybkością trzeba cisnąć pionowo kamień, aby doleciał do szczytu dachu? Odp. 19,8 m/sek.

5. Po jakim czasie spadający kamień ma szybkość taką, jak człowiek idący (5 km/godz), jak dźwięk (333 m/sek)? Odp. $\frac{1}{6}''$, $34''$.

6. Kulę z karabinu wystrzelono pionowo z szybkością początkową 600 m/sek. Jakiej dosięgłaby wysokości, gdyby nie było oporu powietrza? Odp. 18 km.

7. Kropla wody spada z rynny co $\frac{1}{4}$ sek. Jaki jest odstęp między 4 kroplami, spadającymi w ciągu sekundy? Odp. 0,312 m; 0,94 m; 1,56 m; 2,19 m.

8. Po ziemi ciągnie się płótno z szybkością 1 m/sek. Na płótno kapie woda, raz na sekundę, z wysokości 5 m. Jaki odstęp na płótnie mają ślady kropel? Odp. 1 m.

9. Chłopiec spuszcza się na saniach z góry śniegiem okrytej, o spadku $\frac{1}{10}$; tarcie stanowi 2% ciężaru sanek, wynoszącego wraz z ciężarem chłopca 100 kg. Jaka jest wartość siły zsuwającej? Ile wynosi przyśpieszenie i droga w ciągu minuty, pomijając opór powietrza? Odp. 3g; 0,3 m/sek²; 540 m.

E) ZMIANY W RUCHU CIAŁ.

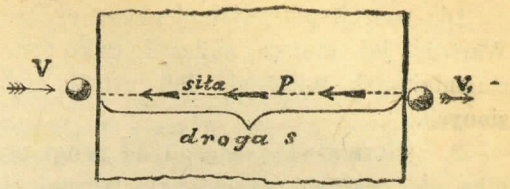
§ 64. Energja mechaniczna.

1. Wartość energji kinetycznej. Gdy ciało w ruchu napotyka opór, czyli wykonywa pracę, zmniejsza się szybkość ruchu (§ 24, art. 3). Na tej zasadzie oblicza się wartość energji kinetycznej; miarą energji jest praca wykonana, jednostką naukową erg, praktyczną kilogramometr.

Niech kula wystrzelona posiada masę M (rys. 335) oraz szybkość v w chwili uderzenia o ścianę, którą ma przebić; ściana ma grubość s, przyczym szybkość kuli wylatującej spada do v_1. Opór wzdłuż drogi niech będzie P. Można pracę na drodze s wyrazić w sposób dwojaki:

1) Według wzoru $P \cdot s$, t. j. praca = siła × droga.

2) Według wzorów na ruch. Kula w ścianie posiada ruch jednostajnie opóźniony, na który służą wzory, przy szybkości początkowej v, końcowej v_1:



Rys. 335. Kula traci na szybkości.

I) $P = m \cdot a$ (§ 15, art. 4)

II) $v_1 = v - at$ (§ 62, art. 2)

III) $s = t \cdot \frac{v + v_1}{2}$.

We wzorze $P \cdot s$ podstawiamy zamiast P wartość I, zamiast s wartość III.

$$P \cdot s = m \cdot a \cdot \tfrac{1}{2} t \cdot (v + v_1).$$

Podstawiając dalej z II wzoru $at = v - v_1$, otrzymujemy:

$$P \cdot s = \tfrac{1}{2} m (v + v_1)(v - v_1) = \tfrac{1}{2} mv^2 - \tfrac{1}{2} mv_1^2.$$

Wyraz $\frac{1}{2} mv^2$, połowa iloczynu z masy i kwadratu szybkości, zowie się, podług Leibnitza, *siłą żywą*, a w nowszej terminologji *energją kinetyczną*.

Tak więc równanie oznacza:

$$P \cdot s = \tfrac{1}{2} mv^2 - \tfrac{1}{2} mv_1^2$$

praca wykonana = strata na sile żywej.

W razie całkowitego wyczerpania siły żywej, t. j. zatrzymania ciała, we wzorze poprzedzającym $v_1 = 0$; zatym

$$\text{praca } P \cdot s = \tfrac{1}{2} mv^2 = \text{siła żywa}$$

albo inaczej: siła żywa, t. j. energja kinetyczna, mierzy się całkowitą pracą, jaką ciało poruszone może wykonać.

Gdyby siła P działała w kierunku przeciwnym, niż na rys. 335, to jest zgodnie z biegiem kuli, popychając ją, wypada we wzorze powyższym zmienić znak przy P na $-$; lub zamiast tego, uwzględniając, że tutaj $v_1 > v$, kula wylatuje z większą szybkością, niż uderza, można napisać:

$$P \cdot s = \tfrac{1}{2} mv_1 - \tfrac{1}{2} mv^2$$

praca włożona = przyrost siły żywej.

Dla energji potencjalnej niema ogólnego wzoru, jak dla kinetycznej. Wartość jej można obliczyć tylko w razie, gdy znane są prawa sił, zmieniających położenie lub ustrój ciała, np. dla energji ciał podniesionych.

2. Niezależność energji od drogi przebytej. Ze wzoru $\frac{1}{2} Mv^2$ wynika, że wartość energji kinetycznej nie zależy od postaci toru i długości drogi, przebytej przez ciało, ani od oporu, ani od czasu przebycia. Należy tylko wiedzieć, ile wynosi wartość siły żywej na początku i w końcu ruchu badanego bez względu, czy ruch trwa chwilę tylko, czy choćby jak najdłużej.

Przykład 1. Kula armatnia, wagi 19,62 kg, lecąc w powietrzu, traci na szybkości: z 500 m/sek szybkość spada po krótkim czasie na 400 m/sek. Ile pracy wykonała kula w tym czasie, prując powietrze?

Rozw. Masa kuli wynosi 19,62 : 9,81 = 2 tjm;

siła żywa na początku $= \frac{1}{2} mv^2 = \frac{1}{2} \cdot 2 \cdot 500^2 = 250\,000$ kgm
" " w końcu $= \frac{1}{2} mv_1^2 = \frac{1}{2} \cdot 2 \cdot 400^2 = 160\,000$ kgm

różnica = praca wykonana = 90 000 kgm.

Pozostałe 160 000 kgm stanowi pracę, jaką kula może jeszcze wykonać, np. za uderzeniem.

Przykład 2. Pocisk armatni, wagi 12 kg, uderza w ziemię z szybkością 600 m/sek. Energja kinetyczna?

Rozw. Masa pocisku 12 : 9,81 = 1,223 tjm. Energja $= \frac{1}{2} mv^2 = \frac{1}{2} \cdot 1{,}223 \cdot 600^2 = 220\,140$ kgm.

3. Zasada zachowania energji. Wzajemna przemiana energji kinetycznej na potencjalną lub naodwrót odbywa się ustawicznie, przyczym suma energji potencjalnej i kinetycznej jest wielkością stałą (por. § 24, art. 7).

Ciało, ważące P kg, ma w chwili rzutu na wysokość H tylko energję kinetyczną $\frac{1}{2} mv^2$. W chwili najwyższego wzniesienia przechodzi ona całkowicie w energję potencjalną równą pracy podniesienia PH; uwzględniając $m = \frac{P}{g}$, $v = \sqrt{2gH}$, otrzymamy

$$\frac{1}{2} mv^2 = \frac{1}{2} \cdot \frac{P}{g} \cdot 2gH = P \cdot H.$$

W każdej chwili biegu kamienia suma obu energji jest niezmienna:

Skoro ciało spada do wysokości h nad ziemią, przebiegło ono drogę $H-h$ i posiadło prędkość $\sqrt{2g(H-h)}$;

energja potencjalna . . . . . $= P \cdot h$

energja kinetyczna $= \frac{1}{2} \cdot \frac{P}{g} \cdot 2g(H-h) = P \cdot (H-h)$

suma . . . . . $= P \cdot H.$

Zadania

1. Jaką siłą młot wbija gwóźdź w drzewo, na głębokość 3 cm, jeżeli waży 2 kg, a porusza się z szybkością 6 m/sek²? Rozw. Masa młota wynosi 2 : 9,81 = 0,204 tjm, energja kin. $\frac{1}{2} \cdot 0{,}204 \cdot 6^2 = 3{,}67$ kgm. Całkowita praca = energja kinetyczna + praca ciężaru młota; $P \cdot 0{,}03 = 3{,}67 + 2 \cdot 0{,}03$, skąd $P = 124$ kg. Nacisnąwszy więc gwóźdź ciężarem 124 kg, możnaby go tak samo wtłoczyć w drzewo, jak za pomocą uderzenia.

2. Jakiej sile średniej podlega kula karabinowa w lufie przy wystrzale, jeżeli długość lufy wynosi 72 cm, kula waży 20 g, a wylatuje z szybkością 600 m/sek? Odp. $P \cdot 72 = \frac{1}{2} \cdot 20 \cdot (60000)^2 = \frac{1}{2} \cdot 10^9$ dyn = = 510 kg.

3. Cyklista rozpędziwszy się na rowerze do szybkości 4 m/sek, puszcza pedały, jadąc wciąż po ulicy poziomej, gdzie tarcie i opór powietrza stanowią razem średnio $\frac{1}{160}$ ciężaru; rower waży 16 kg, cyklista 64 kg. W jakiej odległości się zatrzyma? Odp. Masa wynosi (16 + 64) : 9,81 = = 8,16 tjm; zatym $\frac{1}{160} \cdot s = \frac{1}{2} \cdot 8{,}16 \cdot 4^2$, skąd droga $s = 130$ m.

Obliczyć energję kinetyczną (siłę żywą):

4. Wisły pod Warszawą, gdzie szerokość jej wynosi 500 m, średnia głębokość 2 m, szybkość prądu 0,6 m na sekundę. Rozw. Przekrój poprzeczny rzeki wynosi 500×2 m², ilość wody na sekundę $500 \times 2 \times 0{,}6 = 600$ m³, masa m tej wody 600 000 kg : 9,81 = okrągło 60 000 tjm. Stąd $\frac{1}{2} mv^2 = \frac{1}{2} \cdot 60\,000 \cdot (0{,}6)^2 = 10\,800$ kgm.

5. Wagonu osobowego, który waży 7000 kg i biegnie z szybkością 7 m na sekundę. Odp. 17 150 kgm.

6. Człowieka, idącego zwykłym krokiem, 1,4 m/sek, a ważącego 75 kg. Odp. 7,5 kgm.

7. Wiatru o szybkości 10 m/sek, dmącego w żagiel o powierzchni 20 m². Rozw. W braku żagli, przez równą im powierzchnię 20 m² przechodziłoby na sekundę $10 \times 20 = 200$ m³ powietrza $= 200 \times 1{,}3 = 260$ kg, z szybkością 10 m/sek; stąd en. kin. = 1300 kgm.

Obliczyć pracę wykonaną przez:

8. Wagon, który waży 7000 kg, a zmienia szybkość wskutek hamowania z 7 m/sek na 2 m/sek. Odp. 15 750 kgm.

9. Masę deszczu, która wynosi 5000 kg, a przy spadaniu na ziemię zamiast szybkości pierwotnej 141 m/sek posiada tylko szybkość 1 m/sek. Odp. Okr. 5 000 000 kgm.

10. Wiatr w zadaniu 7-ym, gdy porusza statek z szybkością 6 m/sek. Rozw. Tutaj wchodzi do obrachunku tylko szybkość wiatru względem statku = 10 — 6 = 4 m/sek; stąd praca = 84 kgm.

§ 65. Pęd i popęd.

1. Popęd. Skoro na jakąś masę działa siła ciągła przez pewien czas, masa zostaje wprawiona w ruch przyśpieszony, przyczym powiadamy, że masa otrzymała pewien *popęd* (impuls). Zależy on od wartości siły i od czasu jej działania, i jest do nich w stosunku prostym. Popęd więc można określić jako miarę skutku siły; zalicza się on do wielkości kierunkowych (§ 12, art. 2), zależy bowiem od kierunku siły.

Jeżeli siła $= P$, a czas $= t$, to

$$\text{popęd} = P \times t = \text{siła} \times \text{czas}.$$

2. Pęd. Ciało, poruszające się jednostajnie, posiada pewną *ilość ruchu* czyli *pęd*; stanowi on miarę ruchu, zależy zaś od szybkości ruchu i od masy ciała, i jest do nich wprost proporcjonalny. Pęd jest również wielkością kierunkową, jako zależny od szybkości.

Jeżeli masa ciała $= m$, a szybkość $= v$, to

$$\text{pęd} = m \times v = \text{masa} \times \text{szybkość}.$$

3. Wzajemna zależność pędu i popędu. Posiadając ruch jednostajny, ciało pędem swym udziela popędu ciałom napotkanym. Nawzajem, popęd, nadany pewnemu ciału, wprawia inne ciało w ruch jednostajny, wytwarzając w nim pęd odpowiedni. Pomiędzy pędem a popędem zachodzi następująca prosta zależność: zużyty popęd jest równoważny wywołanemu przezeń pędowi, czyli krócej

$$m \cdot v = P \cdot t$$
$$\text{pęd} = \text{popęd}.$$

Dowód. Jeżeli siła P działa przez t sek., powstaje stąd popęd Pt, który nadaje masie m ruch jednostajnie przyśpieszony, przyczym:

$$\text{przyśpieszenie } a = \frac{P}{m}, \quad \text{prędkość końcowa } v = at.$$

Rugując a z ostatniego wzoru, otrzymujemy:

$$a = \frac{v}{t} = \frac{P}{m}, \quad \text{czyli } Pt = mv.$$

Przykład. Z armaty o masie m_1 wystrzelono kulę o masie m_2; parcie P gazów prochowych działa przez jednakowy czas t zarówno na kulę, jak na armatę, obydwa więc ciała otrzymują równy popęd Pt. Skutkiem tego popędu kula wylatuje z szybkością nabytą v_2, armata zaś odskakuje

w tył z szybkością v_1. Pęd kuli $m_2 v_2$ = pędowi armaty $m_1 v_1$, bo każdy z nich $= Pt$; że zaś masa m_1 armaty jest daleko większa od masy m_2 kuli, odskok armaty ma szybkość v_1 daleko mniejszą od szybkości v_2 kuli, mianowicie $v_1 : v_2 = m_2 : m_1$.

Zastosowania. Bronie ręczne, np. strzelby, rewolwery, szarpią przy wystrzale tym słabiej, im są cięższe; wtedy bowiem, przy tym samym popędzie Pt, szybkość odskoku jest mniejsza. Opierając broń mocno o ramię, doznajemy bardzo słabego wstrząśnienia, bo wtedy bierze udział w ruchu masa naszego ciała.

Młot lekki, a prędko poruszany, uderza równie skutecznie, jak młot cięższy, a poruszany odpowiednio wolniej; podobnież siekiera, kilof górniczy.— Straszliwe działanie pocisków wystrzelonych tłomaczy się zarazem ich wielką szybkością i masą.

Im krócej trwa uderzenie, zatym im twardszą jest powierzchnia ciała, tym większa jest siła uderzenia; przy tym samym bowiem pędzie mv krótszy czas t uderzenia wymaga większej siły P. — Pociski armatnie niszczą łatwiej ściany murowane i kamienne, niż nasyp ziemny. — Sprężyny przy buforach wagonów osłabiają uderzenie.

Zadania.

(z pominięciem tarcia).

1. Pociąg kolei żelaznej, wagi 240 ton, ruszywszy z miejsca, nabrał po 4 sekundach szybkości 0,6 m/sek. Ile wynosi siła pociągowa lokomotywy?

Odp. Masa pociągu m = 240000 kg : 9,81 = okr. 24000 tjm;

$$P = \frac{24000 \cdot 0{,}6}{4} = 3600 \text{ kg}.$$

2. Wagon kolejowy, ważący 16 ton, biegnie po szynach z szybkością 5 m/sek. Jakiej potrzeba siły do zatrzymania go w ciągu 10 sekund?

Rozw. Siła musi być tak wielka, aby mogła w ciągu 10″ wytworzyć w kierunku przeciwnym pęd=5 × 1600, gdyż masa wagonu = 16000 kg : : 9,81 = okr. 1600 tjm.

$$P = \frac{1600 \cdot 5}{10} = 800 \text{ kg}.$$

3. Największe działa oblężnicze wyrzucają pociski wagi 900 kg, a średnicy 42 cm, z szybkością 700 m/sek. Ile wynosi ciśnienie średnie gazów prochowych, jeżeli przelot pocisku w lufie trwa $\frac{1}{100}$ sek?

Odp. Masa pocisku = 900 : 9,81 = okr. 90 tjm.

$$\text{Siła } P = \frac{90 \cdot 700}{0{,}01} = 6\,300\,000 \text{ kg}.$$

$$\text{Ciśnienie} = \frac{P}{\pi r^2} = \frac{6\,300\,000}{3{,}14 \cdot (21)^2} = \text{okr. } 4550 \text{ atmosfer}.$$

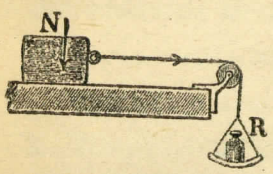
§ 66. Przeszkody ruchu.

1. Niemożliwość ruchu wiecznego, po linji prostej, wynika stąd, że istnieją zawsze *przeszkody ruchu*, na których przezwyciężanie wyczerpuje się energja kinetyczna, bądź siły uboczne.

Można odróżnić trzy główne rodzaje przeszkód: tarcie, uderzenie i opór środka. Uważamy je jako siły, przeciwdziałające ruchowi, i mierzymy jako takie, t. j. w kilogramach, gramach, dynach.

2. Tarcie jest to przeszkoda ruchu, jaka zachodzi przy posuwaniu się jednego ciała po drugim. Powodem tarcia jest chropowatość powierzchni ciał, choćby dla oka najgładszej.

Do pokonania tarcia potrzeba siły. Skoro ciało posuwa się lub toczy po powierzchni innego ciała, obie powierzchnie ulegają częściowemu, zwykle niedostrzegalnemu, ścieraniu i wtłaczaniu. Wygładzenie powierzchni i smarowanie tłuszczem zmniejsza tarcie, nie może go jednak zniweczyć.



Rys. 336. Pomiar tarcia.

Tarcie rozmaitych powierzchni można uważać za małą skalę tego, co się dzieje, gdy wóz jedzie po kamienistej drodze (tarcie ciał twardych) albo po grząskim błocie (tarcie ciał miękkich); wstrząśnienia i opór w drodze zużywają pracę siły pociągowej.

3. Wielkość tarcia. Ciężar, potrzebny do poruszenia ciała na poziomej powierzchni, wyraża wielkość tarcia (rys. 336). Stąd wyprowadził Coulomb następujące prawa (1781):

a) Tarcie rośnie wraz z naciskiem ciała na jego podstawę, czyli wraz z ciężarem ciała.

Liczba, wyrażająca, jaka część ciężaru idzie na pokonanie tarcia, nazywa się *spółczynnikiem tarcia*; stanowi ona ułamek właściwy, zwykle nieznaczny.

Jeżeli T oznacza wielkość tarcia, N nacisk normalny czyli prostopadły do powierzchni, f spółczynnik tarcia, to $f = \frac{T}{N}$.

Tarcie $T = f \,.\, N$ = spółczynnik $\times$ nacisk.

Przykład 1. W sankach siedzą 2 osoby; sanki ważą 50 kg, osoby po 75 kg. Jakiej siły potrzeba do poruszenia sanek po lodzie, gdy spółcz. tarcia = 0,02?

Rozw. $N = 50 + 2 \,.\, 75 = 200$ kg; $\quad f = 0{,}02.$

$T = 0{,}02 \,.\, 200 = 4$ kg.

Przykład 2. Wóz wagi 700 kg, z 4 osobami, po 75 kg, ciągnie koń siłą 50 kg. Ile wynosi spółczynnik tarcia?

Rozw. $N = 700 + 4 \,.\, 75 = 1000$ kg; $\quad T = 50$ kg.

$$f = \frac{50}{1000} = 0{,}05.$$

b) Tarcie nie zależy od wielkości powierzchni zetknięcia (przy posuwaniu ciał). Jeżeli bowiem powierzchnia zetknięcia stanie się n razy większą, to nacisk na jednostkę powierzchni będzie n razy mniejszy.

c) Tarcie zależy od materjału ciał i chropowatości powierzchni, jako też od smaru, zwilżającego powierzchnię.

d) Tarcie ciał jednorodnych jest większe, niż różnorodnych.

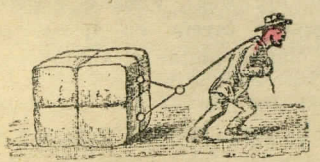
Np. metal na metalu ma współczynnik tarcia (średnio) na sucho 0,18, po naoliwieniu 0,12; skóra na żelazie odpowiednio 0,28 i 0,12; drzewo na drzewie na sucho 0,4; żelazo na lodzie 0,02.

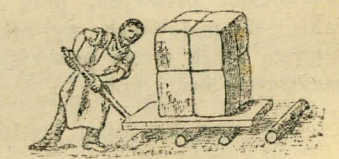
Po za tym, tarcie ciała poruszonego jest mniejsze, niż ciała spoczywającego, tak iż mniej siły potrzeba do utrzymania ciała w ruchu, niż do ruszenia go z miejsca. Tarcie ciał jednorodnych jest większe, niż różnorodnych.

4. Rodzaje tarcia. Odróżnić można tarcie dwojakie:

1) Tarcie w posuwaniu (ślizganiu), jeżeli ciało porusza się po powierzchni innego ciała, dotykając go wciąż tą samą stroną, czyli ma ruch tylko postępowy.

Przykłady. Posunięcie książki po stole, paki po ziemi (rys. 337).— Zsunięcie się pudelka, kawałka kredy z pochyłej deski. — Ściąganie rękawiczek. — Odkorkowanie butelki. — Sanna.


Rys. 337. Tarcie w posuwaniu.


Rys. 338. Tarcie w toczeniu.

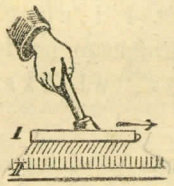
2) Tarcie w toczeniu, jeżeli ciało, posuwając się po powierzchni innego, obraca się wskutek tarcia, czyli ma ruch postępowy i obrotowy jednocześnie.

Przykłady. Wszelkie wozy, wagony kolejowe. — Przesuwanie ciężaru na wałkach (rys. 338). — Magle. — Osie kulkowe w rowerach.

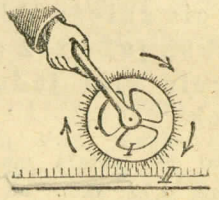
Tarcie w toczeniu jest znacznie mniejsze, niż w posuwaniu. Dlatego wszędzie, gdzie chodzi o jak najlżejsze przesuwanie ciał, opiera się je na kołach, wałkach lub kulach.

Np. spółczynnik tarcia kół żelaznych na szynach żelaznych = 0,01, na stalowych 0,004; na dobrym bruku 0,03, na szosie 0,05.

Ażeby sobie uzmysłowić różnicę obu rodzajów tarcia, można przyrównać chropowatość powierzchni do szczotki, którą posuwamy (rys. 339), albo toczymy (rys. 340) po innej szczotce: w pierwszym wypadku musi się uginać szczecina na całej powierzchni, w drugim tylko jej pojedyńcze włoski.



Rys. 339.



Rys. 340.

5. Znaczenie tarcia. Tarcie odgrywa dużą rolę w życiu i zastosowaniach technicznych, zarówno pożyteczną, jak szkodliwą.

a) Pożytek tarcia. Bez tarcia byłoby niemożliwe chodzenie i jazda, trzymanie przedmiotów, przykręcanie śrub, wiązanie sznurów, przenoszenie ruchu maszyn za pomocą pasów, piłowanie, gra na instrumentach smyczkowych, hamowanie wozów i pociągów. Np. brak tarcia zewnętrznego sprawiłby, że koła lokomotywy obracałyby się na osiach, aleby się nie toczyły; człowiek, stąpając, ślizgałby się ustawicznie i t. p.

b) Szkodliwość tarcia występuje wszędzie, gdzie chodzi o zachowanie energji kinetycznej; tarcie zużywa część energji przy obracaniu kół na osiach, przy sczepianiu kół trybowych, przy ruchach tłoka w pompach, silnikach parowych, przy wahaniach np. wagi, wahadła zegarowego, huśtawki. W podobnych wypadkach zaliczamy tarcie do t. zw. *oporów szkodliwych*; praca tarcia przemienia się na ciepło, nieraz w sposób wyraźny, np. grzanie się osi i kół.

6. Opór środka (opór środowiska). Skoro ciało porusza się w powietrzu, wodzie i wogóle w ośrodku płynnym lub gazowym, doznaje oporu, który hamuje mniej lub więcej ruch ciała. Opór ten zowie się *oporem ośrodka*; składają się nań tarcie i uderzanie cząstek materji, np. powietrza, wody, o powierzchnię ciała.

Opór ośrodka wzrasta w miarę zwiększania się szybkości ciała, i to w wyższym stopniu, niż rośnie szybkość; na pokonanie więc tego oporu potrzeba ogromnego nakładu pracy, jeżeli ciało pędzi bardzo prędko. Dla ruchów niezbyt szybkich opór ośrodka rośnie proporcjonalnie do kwadratu szybkości.

Nadto opór ośrodka zależy od postaci ciała i od gęstości ośrodka, nie zależy zaś od masy ciała.

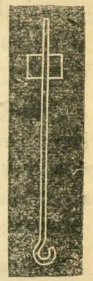
Skoro ciało posuwa się ruchem przyśpieszonym, opór wzrasta dotąd, aż zrównoważy siłę pędzącą, ciało zaś dalej posuwa się ruchem jednostajnym; tak odbywa się spadek deszczu w powietrzu, kamienia w wodzie. Zrównoważenie takie następuje tym prędzej, im ciało jest gatunkowo lżejsze i stosunkowo większą ma powierzchnię: kurz, pierze, śnieg, kropelki mgły i chmury tracą przyśpieszenie spadku już przy małych szybkościach, czyli opadają powoli, gdy tymczasem krople deszczu, ziarna gradu muszą osiągnąć znaczną szybkość.

Dla powierzchni płaskiej opór powietrza można wyrazić wzorem:

$$R = \frac{d}{g} \sin \alpha \, . \, Q \, . \, v^2$$

gdzie R stanowi opór powietrza w kg, d ciężar wł. powietrza w warunkach bieżących, g przyśpieszenie ciężkości, Q powierzchnia ciała w m^2, α kąt nachylenia powierzchni, v szybkość względna ciała.

Doświadczenie. Ażeby stwierdzić, że opór środowiska rośnie jak kwadrat szybkości, robi się pływak z drutu D i korka K, podług rys. 341; pływak powinien się zanurzać w wodzie prawie całkowicie. Następnie obciąża się go kawałkiem drutu, np. 3 cm długości, skutkiem czego przyrząd tonie w wysokiej konewce z wodą, np. w ciągu 8 sekund. Jeżeli zamiast drucika 3 cm obciążyć pływak drutem 12 cm długości, czyli 4 razy cięższym, zatonie on w tej samej głębokości w ciągu 4 sekund, t. j. 2 razy prędzej.



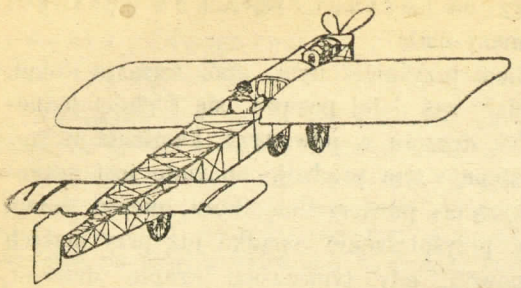
Rys. 341.

Przykłady. a) Szkodliwość oporu ośrodka. Odczuwamy parcie powietrza bardzo słabe przy chodzeniu, mocniejsze w biegu, jeszcze większe przy prędkiej jeździe na rowerze. — Opór powietrza wstrzymuje bieg pociągu; opór wody wstrzymuje bieg statku. — Pociski armatnie padają bliżej, niż je wycelowano. — Strumień wody w fontannach i sikawkach bije nie tak wysoko, jak wypada z ciśnienia.

Dla zmniejszenia oporu ośrodka nadaje się kształt śpiczasty łodziom, okrętom, balonom, lub zaokrąglony, jak lokomotywom i wagonom pociągów pośpiesznych. Postać strzały, pocisków karabinowych i działowych. Postać ryb.

b) Użyteczność oporu ośrodka. Pływanie, wiosłowanie, pędzenie statków za pomocą kół z łopatkami lub śruby Archimedesa (rys. 323). — Lot ptaków, latawce, spadochrony, aeroplany.

Najnowsze i najważniejsze ze sztucznych zastosowań oporu powietrza stanowią *aeroplany* (płatowce, samoloty rys. 342). Aeroplan składa się z jednej lub dwu płaszczyzn (stąd nazwy: jednopłat, dwupłat), lekkich a sztywnych, np. płócien, rozpiętych na drucianym rusztowaniu, posiada ster, oraz motor, obracający śmigło, t. j. rodzaj wiatraka; całość spoczywa na kółkach. Wprawiając śmigło w szybkie wirowanie, lotnik rusza z miejsca, przyczym najprzód toczy się po ziemi, aż nabierze dostatecznej szybkości; wtedy opór powietrza unosi aparat, i przez umiejętne pochylanie



Rys. 342. Aeroplan.

aeroplan może się wzbić stopniowo aż do paru tysięcy metrów (lot Chaveza przez Alpy). Wzlot aeroplanu korzysta z zasady równi pochyłej (§ 59); im ukośniej wznosi się aparat, tym mniejszą siłą się utrzymuje. Wogóle zaś lot aeroplanów wymaga znacznej szybkości, przynajmniej 60 km na godzinę, a stąd i wielkiej sprawności maszyn (30, 50 i więcej koni mechanicznych).

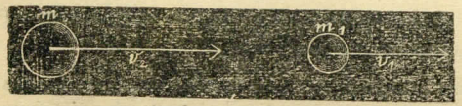
Praktyczny aeroplan zbudowali najpierw bracia Wright w Ameryce (1907). Pierwszą udatną podróż aeroplanem odbył francuz Blériot, w lecie 1909 r., przelatując nad morzem z Calais do Dover. Największą zaś szybkość osiągnął Brindejonc des Moulinais w locie okólnym, z Paryża do Warszawy, mianowicie do 215 km na godzinę (1913). Aeroplany więc stanowią najszybszy środek komunikacji.

7. Uderzenie. Pod nazwą *uderzenia* rozumiemy zetknięcie dwu ciał, gdy jedno z nich lub oba naraz są w ruchu. Uderzenie może być prosto lub ukośne, zależnie od tego, czy jego kierunek jest prostopadły lub nie do powierzchni uderzonej. Gdy kierunek uderzenia przechodzi zarazem przez środek ciężkości uderzonego ciała, uderzenie zowiemy środkowym (centralnym).

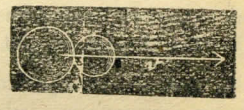
Zasadniczy przypadek, jaki tu roztrząsamy, stanowi proste środkowe uderzenie kul. Zachodzi przy tym zjawisku składanie pędów, przyczym inaczej przebiega uderzenie ciał sprężystych, niż ciał niesprężystych. Szczególny przypadek stanowi uderzenie kuli o powierzchnię nieruchomą i niezmienną, czego wynikiem jest odbicie kuli.

Odróżniamy tedy 3 przypadki: 1) uderzenie kul niesprężystych, 2) uderzenie kul sprężystych, 3) odbicie kuli od powierzchni stałej.

1) **Uderzenie kul niesprężystych.** Niech dwie kule o masach m_1 i m_2 poruszają się z szybkościami zgodnymi v_1 i v_2 (rys. 343); skoro $v_2 > v_1$, kule się uderzą, przyczym się spłaszczą i tak zmienione dalej już razem posuwają się jako jedno ciało, z szybkością v (rys. 344).



Rys. 343. Przed uderzeniem.



Rys. 344. Po uderzeniu.

Kula m_1 zyskała na szybkości $v - v_1$, kula m_2 straciła $v_2 - v$; w niezmiernie krótkim czasie uderzenia t można uważać $\frac{v-v_1}{t}$ jako przyśpieszenie masy m_1, a $\frac{v_2-v}{t}$ jako przyśpieszenio masy m_2. Ponieważ obie siły uderzenia, $m_1 \frac{v-v_1}{t}$ i $m_2 \frac{v_2-v}{t}$ są równe (§ 16, art. 1), wynika

$$m_1 (v - v_1) = m_2 (v_2 - v)$$

czyli

$$(m_1 + m_2)\, v = m_1 v_1 + m_2 v_2.$$

Pęd po uderzeniu równa się sumie pędów przed uderzeniem.

$$\text{Szybkość końcowa } v = \frac{m_1 v_1 + m_2 v_2}{m_1 + m_2}$$

Szczególne przypadki. a) Gdy $m_1 = m_2$, to

$$v = \frac{v_1 + v_2}{2}.$$

b) Gdy $m_1 = m_2$, a kula m_1 posuwa się w kierunku przeciwnym do m_2, czyli v_1 jest ujemne, to

$$v = \frac{v_2 - v_1}{2}.$$

c) Gdy $m_1 = m_2$, a kula m_1 jest w spoczynku, czyli $v_1 = 0$, to

$$v = \tfrac{1}{2} v_2.$$

Równości powyższe oznaczają, że gdy kula niesprężysta uderzy drugą takąż kulę równie ciężką, poruszają się dalej obie razem z szybkością średnią arytmetyczną obu szybkości.

d) Gdy masa m_1 jest nieporuszalna, czyli $m_1 = \infty$, $v_1 = 0$, to

$$v = 0.$$

Kula niesprężysta, gdy uderzy o takąż ścianę, zatrzymuje się, nie odskakując wcale.

2) **Uderzenie kul sprężystych.** Przebieg uderzenia kul sprężystych rozpada się na dwie fazy: w pierwszej kule płaszczą się jak poprzednio, aż osiągną wspólną szybkość v, w drugiej przybierają kształt pierwotny, cisnąc na siebie taką samą siłą, jaka je spłaszczyła.

Wynika stąd, że kule odskoczą od siebie. Kula nacierająca straci jeszcze raz tyle na szybkości, ile straciła w chwili spłaszczenia, kula zaś popchnięta zyska jeszcze raz tyle. Strata więc ogólna szybkości kuli m_2 wynosi $2 (v_2 - v)$, zysk ogólny kuli m_1 wynosi $2 (v - v_1)$. Oznaczając nowe szybkości kul m_1 i m_2 przez V_1 i V_2, otrzymamy:

$$V_1 = v_1 + 2 (v - v_1) = 2 v - v_1$$
$$V_2 = v_2 - 2 (v_2 - v) = 2 v - v_2.$$

Różnica szybkości obu kul jest taka sama przed uderzeniem; jak po uderzeniu, mianowicie

$$2v - v_1 - (2v - v_2) = v_2 - v_1.$$

Ponieważ $v = \frac{m_1 v_1 + m_2 v_2}{m_1 + m_2}$, wynikają szybkości końcowe:

$$V_1 = \frac{2 m_2 v_2 + (m_1 - m_2) v_1}{m_1 + m_2}$$

$$V_2 = \frac{2 m_1 v_1 + (m_2 - m_1) v_2}{m_1 + m_2}.$$

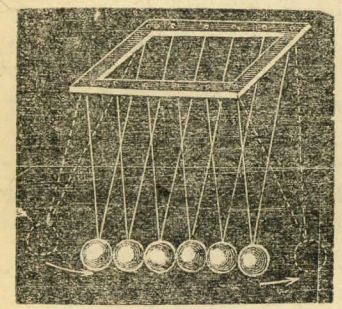
Szczególne przypadki. a) Gdy $m_1 = m_2$, to

$$V_1 = v_2 \qquad V_2 = v_1.$$

Kule sprężyste, jednakowo ciężkie, wymieniają wzajemnie swe szybkości po uderzeniu.

b) Gdy $m_1 = m_2$ oraz $v_1 = 0$, to

$$V_1 = v_2 \qquad V_2 = 0.$$



Rys. 345. Przyrząd Mariotte'a.

Kula sprężysta, uderzając o takąż kulę, równie ciężką, a będącą w spoczynku, oddaje jej własną szybkość, a sama się zatrzymuje. Tak samo przenosi się uderzenie przez cały szereg kul jednakowych, stykających się z sobą i ustawionych na jednej linji prostej. Po odchyleniu pierwszej kuli, gdy ta spadając uderzy sąsiednią wszystkie kule pozostają w spokoju, tylko ostatnia odskakuje (doświadczenie Mariotte'a rys. 345).

c) Gdy $m_1 = \infty$, oraz $v_1 = 0$, to

$$V_1 = 0 \qquad V_2 = -v_2.$$

Kula sprężysta, uderzając prostopadle o ścianę, odbija się wstecz z tą samą szybkością.

d) Gdy $m_2 > m_1$, oraz $v_1 = 0$, to

$$V_1 = \frac{2 m_2 v_2}{m_1 + m_2} \qquad V_2 = \frac{(m_2 - m_1) v_2}{m_1 + m_2}$$

czyli $V_1 > V_2$.

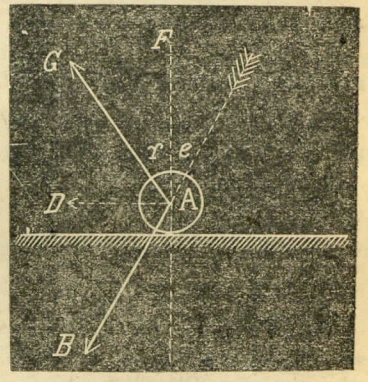
Skoro kula cięższa uderzy o lżejszą, która jest w spoczynku, obie poruszają się dalej w tym samym kierunku, przyczym kula lżejsza porusza się prędzej, niż cięższa.

e) Gdy $m_1 > m_2$, oraz $v_1 = 0$, to

$$V_1 = \frac{2 m_2 v_2}{m_1 + m_2} \qquad V_2 = -\frac{(m_1 - m_2) v_2}{m_1 + m_2}.$$

Skoro kula lżejsza uderzy o cięższą, która jest w spoczynku, odbije się wstecz od niej, a kula cięższa porusza się dalej w tym samym kierunku.

3) **Odbicie kul** stanowi szczególny wynik uderzenia ciał sprężystych. *Odbiciem* nazywamy w mechanice zmianę kierunku ruchu przy uderzeniu ciał. Najpospolitsze zjawisko stanowi odbicie kuli od ściany płaskiej: pod jakim kątem została kula rzucona, pod takim samym kątem odskakuje, przytym w tej samej płaszczyźnie, prostopadłej do ściany.



Rys. 346. Odbicie kuli.

Kąt padania równa się kątowi odbicia, a oba kąty leżą w płaszczyźnie prostopadłej do ściany (prawo odbicia kul, rysunek 346).

Niech kula A trafia ukośnie ścianę, przyczym AB jest wektorem szybkości. Z rozkładu AB na składową prostopadłą AC i równoległą AD do ściany, wynika, że AC wywołuje przeciwną szybkość $AF = AC$ (III zasada dynamiczna, § 16, art. 1). Szybkość AF składa się z AD w wypadkową AG, przyczym widać z konstrukcji (przy wykreśleniu prostokątów $ACBD$ i $AFGD$), że kąt $e = r$.

8. **Prawo zachowania energji.** Przy pokonywaniu wszelkich przeszkód ruchu, energja mechaniczna zamienia się całkowicie na ciepło. Na tym polega w fizyce oznaczanie mechanicznego równoważnika ciepła, za pomocą tarcia lub uderzenia (sposób Joule'a i Hirna, § 50 art. 3). Energja ruchu całego ciała zamienia się na energję cząstek; ilość energji kinetycznej nie ulega zmianie.

Pędy zachowują się tak przy uderzaniu ciał sprężystych, jak niesprężystych. Siła żywa jednak w jej objawie zewnętrznym, t. j. energja kinetyczna w ruchu widzialnym, zachowuje się tylko przy uderzeniu ciał sprężystych, przy niesprężystych zaś przechodzi w ciepło.

Stąd kula sprężysta, np. gumowa, odbija się od ściany na równą wysokość (w przybliżeniu, z powodu niedoskonałej sprężystości), nie okazując rozgrzania, kula nie sprężysta, np. ołowiana, nie odbija się prawie, natomiast rozgrzewa się tak, iż wystrzelona np. z pistoletu, roztapia się, gdy trafi w płytę żelazną.

Zadania.

1) Oznaczyć współczynnik tarcia:

a) wozu, ważącego 1300 kg, jeżeli dynamometr, włączony między wóz a konia, wskazuje 26 kg? Odp. 0,02

b) ciężaru kilogramowego, który stoi na stole i do posunięcia wymaga siły 220 g? Odp. 0,22.

2. Jakiej potrzeba siły:

a) do ciągnienia po szynach tramwaju, ważącego 2000 kg, z 30 osobami, ważącemi po 75 kg, jeżeli spółczynnik tarcia=0,01? Odp. 42,5 kg.

b) do ciągnienia wagonu towarowego, ważącego 4 tonny, przy spółczynniku tarcia 0,01? Odp. 40 kg.

3. Dlaczego osie wag czułych, kółek zegarkowych, igieł magnesowych itp. opiera się na twardym kamieniu, np. agacie, rubinie?

4. Hamulec sznurowy na kole o promieniu 2 m (rys. 85) wymaga obciążenia 10 kg na szalce, a dynamometr wskazuje 110 kg; koło daje 50 obrotów na minutę. Sprawność? Odp. 13,9 koni mech.

5. Dlaczego pociągi towarowe wymagają ciężkich lokomotyw?

6. Dlaczego po lodzie jeździ się sankami, choć tarcie w posuwaniu jest większe od tarcia w toczeniu? Odp. Tarcie osi byłoby większe niż kół, wóz więc ślizgałby się.

F) RUCH KRZYWODROŻNY.

Pod mianem *ruchów krzywodrożnych* rozumiemy ruchy, w których kierunek co chwila się zmienia, tak iż tor tworzy linję krzywą (§ 10, art. 2). Należą tu rzuty ukośne i poziome, obrót dokoła osi, ruch wahadłowy.

Wszelkie ruchy krzywodrożne stanowią poszczególne przypadki ruchów złożonych. Ażeby uprzytomnić sobie pochodzenie rozmaitych ruchów, należy zważyć, że ciało, poruszone jakąkolwiek siłą, biegnie, po ustaniu działania siły, ruchem prostym i jednostajnym (prawo bezwładności). Ciało pod działaniem siły ciągłej, o stałym kierunku, ma ruch prosty a niejednostajny, t. j. przyśpieszony lub opóźniony (pt).

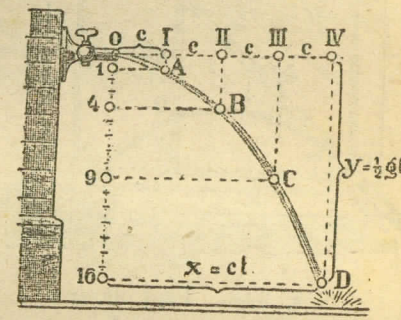
Gdy z dwu sił jedna przestanie działać na ciało, a druga działa dalej, nadają one ciału, zależnie od kierunku działania, ruch prosty a zmienny, np. rzut pionowy, (pt.), albo ruch *krzywodrożny*, jednostajny lub zmienny; do takich należą pospolicie ruchy w przyrodzie i w zastosowaniach sił.

§ 67. Rzuty.

1. Rodzaje rzutów. Odróżniamy rzut pionowy, który może się odbywać do góry lub na dół, rzut poziomy, oraz rzuty ukośne, w dowolnych kierunkach. Pierwsze dwa rodzaje można uważać jako szczególne przypadki rzutów ukośnych.

Rzuty pionowe, jako przyczynek do spadku ciał swobodnego, czyli ruchu prostodrożnego, objaśniono w § 63, art. 6 i 7.

2. Rzut poziomy. Ciało, rzucone w kierunku poziomym, zbacza stopniowo ku ziemi pod wpływem ciężkości i zakreśla linję krzywą, zwaną *parabolą* (rys. 347).



Rys. 347. Rzut poziomy.

Wykreślić ją można doświadczalnie, wyznaczając punkty, gdzie ciało znajduje się po 1, 2, 3.... sek, gdyby najprzód tylko spadało pionowo ruchem jednostajnie przyśpieszonym, a następnie tylko leciało poziomo ruchem jednostajnym (lub naodwrót):

po upływie	droga pozioma	droga spadku	miejsce
1 sek.	$O\text{-}I = c$	$I\text{-}A = 1 \times 4{,}9$ m	A
2 „	$O\text{-}II = 2c$	$II\text{-}B = 4 \times 4{,}9$ m	B
3 „	$O\text{-}III = 3c$	$III\text{-}C = 9 \times 4{,}9$ m	C
.	.	.	.
.	.	.	.
.	.	.	.
t „	$x = ct$	$y = \frac{1}{2} gt^2$	D

Rugując t z wartości x i y, otrzymamy

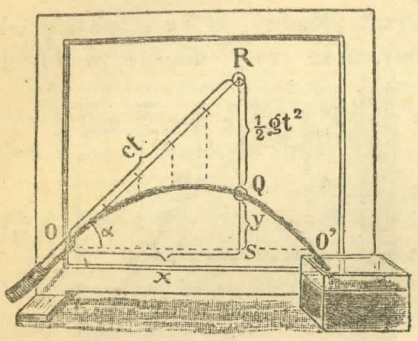
$$y = \frac{g}{2} \cdot \left(\frac{x}{c}\right)^2. \qquad \text{(równanie paraboli)}$$

W rzeczywistości obie spółrzędne zmniejszają się skutkiem oporu powietrza, tak iż droga staje się bardziej stroma (*krzywa balistyczna*).

Przykłady. Strumień wody, tryskający z rury poziomej (rys. 347).— Strzelanie do celu widocznego na linji poziomej. Np. szybkość kuli c = = 400 m/sek; do celu odległego o 40 m, leci kula $\frac{1}{10}$ sek, W tym czasie spadek kuli wynosi 5 cm, należy więc mierzyć o 5 cm wyżej.

3. Rzut ukośny należy również do ruchów złożonych, gdyż ciało leci jednostajnie pod kątem a do poziomu, zwanym *elewacją*, z prędkością początkową c, jednocześnie zaś podnosi się lub spada ruchem zmiennym. Tor ma i tutaj kształt paraboli.

Z rozważań wynika, że najdalej poleci ciało, wyrzucone pod kątem 45° do poziomu.



Rys. 348. Rzut ukośny.

Wyznaczenie drogi (rysunek 348). Gdyby ciało biegło prosto przez t sek, doszłoby do punktu R. Spadając przez t sek z punktu R, dosięga ciało punktu Q, tak iż $RQ=\frac{1}{2}gt^2$. Z trójkąta ORS wypada wartość obu spółrzędnych x i y:

$$x = ct\cos\alpha \qquad y = ct\sin\alpha - \tfrac{1}{2}gt^2.$$

Wynika stąd: a) że punkt S jednostajnie biegnie poziomo z szybkością $c\cos\alpha$; b) że punkt Q wznosi się pionowo ruchem jednostajnie opóźnionym z szybkością początkową $c\sin\alpha$. Za podstawieniem tej wartości na szybkość początkową, zamiast c, do wzorów na czas wznoszenia pionowego $t=\frac{c}{g}$ i wysokość rzutu pionowego $h=\frac{c^2}{2g}$ (§ 63, art. 7), wypada

$$\text{czas wznoszenia się ukośnego } t=\frac{c\sin\alpha}{g}$$

$$\text{wysokość rzutu ukośnego } h=\frac{c^2\sin^2\alpha}{2g}.$$

Dalekość rzutu jest tą wartością x, dla której $y=0$; wtedy $ct_1\sin\alpha = \frac{1}{2}gt_1^2$, skąd $t_1=\frac{2c\sin\alpha}{g}$. Zatym czas całego ruchu równa się podwójnemu czasowi wznoszenia się, czyli

czas wznoszenia się = czas spadania.

Wynika stąd, że ciało posiada w punktach O i O' tę samą szybkość v. Zatym i w rzucie ukośnym, podobnie jak w pionowym (§ 63, art. 7) ciało spada z tą samą szybkością, z jaką wylatuje.

Tłomaczy to niszczącą siłę uderzenia pocisków armatnich, gdy rażą spadając.

Podstawiając wartość t_1 do wzoru $x_1=ct_1\cos\alpha$, otrzymamy

$$\text{dalekość rzutu } D=\frac{2c^2\sin\alpha\cos\alpha}{g}=\frac{c^2\sin 2\alpha}{g}.$$

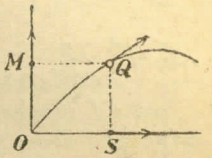
Największa dalekość rzutu bywa przy $\sin 2\alpha=1$, czyli gdy $\alpha=45^0$. Jednakowa dalekość rzutu bywa przy α i $(90-\alpha)$, gdyż $\cos\alpha=\sin(90-\alpha)$.

Przykłady. Strzelanie z armat do przedmiotów bardzo odległych, często niewidocznych po za wałem, murem, górami. — Gra w palanta, w kółko (serso), lawn tennis, rzucanie z procy.

4. Szybkość nabyta. Ciało wyrzucone ukośnie, np. kula wystrzelona, ma w punkcie Q drogi, po upływie t sekund, szybkość (rys. 349)

w kierunku poziomym $v_1=c\cdot\cos\alpha$

„ pionowym $v_2=c\cdot\sin\alpha-gt$.



Rys. 349.

Składając te szybkości według reguły równoległoboku, otrzymamy szybkość wypadkową w kierunku stycznej $v=\sqrt{v_1^2+v_2^2}$.

Zadania.

(z pominięciem oporu powietrza).

1. Rzucono kamień po przez dom, z szybkością początkową 40 m/sek i elewacją 60°. Gdzie znajdzie się kamień po 2″, po 5″? Ile wynosi czas wznoszenia się (t), wysokość rzutu (h) i dalekość rzutu (D)? Odp. $x_2=40$; $y_2=49{,}6$; $x_5=100$; $y_5=48{,}2$; $t=3{,}5''$; $h=60{,}5$ m; $D=139{,}2$ m.

2. Chcę trafić o 50 m do celu piłką przy szybkości początkowej 31,3 m/sek. Jakiej potrzeba elewacji? Odp, 15°.

3. Armata wyrzuca pocisk z szybkością 400 m/sek i elewacją 30°. W jakiej odległości spadnie pocisk? Odp. Okr. 14 km.

§ 68. Ruch obrotowy.

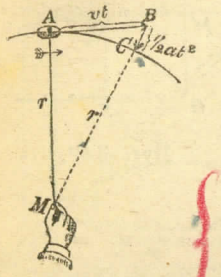
1. Pochodzenie ruchu obrotowego. Ciało, posiadające ruch jednostajny po linji prostej, pod wpływem przyciągania innego ciała o większej masie, zbacza tak, iż krąży dokoła tego ostatniego po torze zamkniętym. Punkt, który ciało obiega naokoło, zowie się *środkiem ruchu*, a ruch zowie się *środkowym*.

Gdy ciało krąży dookoła punktu nieruchomego, zatacza okręg koła, np. w przybliżeniu ruch kamienia obracanego na sznurku dokoła ręki; stąd ruch zowie się *kołowym*. Ruch kołowy stanowi więc szczególny przypadek ruchu środkowego i zowie się także ruchem *obrotowym*, *osiowym*, *wirowym*; jest to pospolity objaw ruchu, np. obrót każdego koła na osi stałej.

Siła przyciągająca ciała, nazywa się *dośrodkową*; wyraża ją np. napięcie sznurka. Wywołuje ona, w myśl trzeciej zasady Newtona (pt.), ciągnienie równe w przeciwną stronę, dążące do oddalenia ciała od środka, w kierunku promienia, czyli *siłę odśrodkową*, np. to samo napięcie sznurka, ciągnące rękę.

2. Wartość siły dośrodkowej i jej przyśpieszenia. Ruch kołowy należy do złożonych; podobnie jak rzut ukośny, składa się z dwu ruchów.

a) Ciało posiada szybkość stałą v, któraby je w ciągu t sek posunęła o drogę $AB = vt$ (rys. 350) w kierunku stycznej.



Rys. 350.

b) Siła dośrodkowa pobudza ciało do spadku, który w tym samym czasie t wyniósłby $BC = \frac{1}{2}\,at^2$ ku środkowi M.

Obydwa ruchy wydają tor łukowy AC.

Siła dośrodkowa jest proporcjonalna do masy ciała i kwadratu szybkości, a odwrotnie proporcjonalna do promienia toru.

Dowód. Według znanego twierdzenia $AB^2 = BM^2 - AM^2 = (BC+r)^2 - r^2 = BC\ (BC+2r)$, czyli w przybliżeniu, ponieważ odcinek BC jest bardzo mały, $AB^2 = BC \cdot 2r$. Za podstawieniem odnośnych wartości $(vt)^2 = \frac{1}{2}\,at^2 \cdot 2r$; stąd

przyśpieszenie dośrodkowe $a = \dfrac{v^2}{r}$.

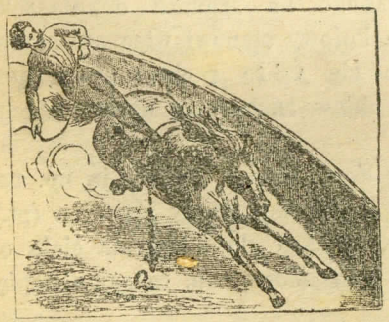
Ponieważ $a = \dfrac{P}{m}$ (§ 15, art. 4)

$$\text{siła dośrodkowa } P = \frac{mv^2}{r} = \frac{\text{siła żywa}}{\text{promienia}}. \qquad (I)$$

(P wyrażone w kg, m w tjm, v w m/sek, r w metrach)

Siłę dośrodkową dogodniej bywa wyrazić przez czas obiegu ciała, zamiast przez szybkość; mianowicie, jeżeli całkowity obieg s ciała trwa T sek, to $s = vT = 2\pi r$, zatym szybkość $v = \dfrac{2\pi r}{T}$, przyśpieszenie $a = \dfrac{4\pi^2 r}{T^2}$,

$$\text{siła dośrodkowa } P = \frac{4\pi^2 r \cdot m}{T^2}. \qquad (II)$$


Rys. 351. Pochylenie dośrodkowe.

3. Siła odśrodkowa jest w każdej chwili równa i przeciwna sile dośrodkowej, wyraża się więc takim samym wzorem. Nie jest to bowiem właściwie siła odrębna, wywołująca ruch, ale opór, wywołany działaniem siły dośrodkowej.

Skoro przestanie działać siła dośrodkowa, znika również jej opór, czyli siła odśrodkowa, a ciało zachowuje wtedy ruch jednostajny po linji prostej, w kierunku, jaki miało ostatniej chwili (prawo bezwładności), w tym wypadku po linji stycznej, czyli prostopadle do promienia. Tak np. kamień, wyrwawszy się ze sznurka w punkcie A poleci po $AB \perp AM$ (rys. 350).

Zadanie (rys. 351). Koń wagi 220 kg biegnie dokoła areny cyrkowej, o promieniu 20 m, z szybkością 8 m/sek. Oznaczyć wartość siły odśrodkowej i pochylenie ku środkowi, niezbędne do utrzymania równowagi.

Rozw. Ciężar konia $Q = 220$ kg $= \dfrac{220}{9{,}81} =$ okr. 22 tjm.

Siła odśrodkowa $= \dfrac{22 \cdot 8^2}{20} = 70{,}4$ kg.

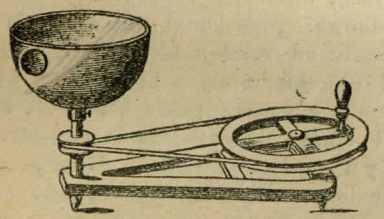
Koń musi przeciwdziałać temu ciągnieniu na zewnątrz przez stosowne pochylenie się ku środkowi, tak aby wypadkowa jego ciężaru i ciągnienia przechodziła przez punkt oparcia. Jeżeli kąt pochylenia względem pionu $= \alpha$, to

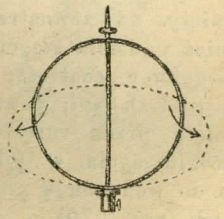
$$\operatorname{tg}\alpha = \frac{P}{Q} = \frac{70{,}4}{220} = 0{,}32.$$

Stąd nachylenie $\alpha = 18^\circ$.

4. Działanie siły odśrodkowej można okazać za pomocą *wirówki* czyli *centryfugi*. W najprostszej postaci ręcznej (rys. 352) składa się ona z dwu kół, z których większe, obracane za korbę, pędzi za pośrednictwem sznura kółko mniejsze, kółko to nabiera szybkiego ruchu wirowego, do kilkunastu obrotów na sekundę. Osadzając na osi małego kółka rozmaite przybory dodatkowe, można stwierdzić działanie siły odśrodkowej: jej kierunek, wpływ masy ciała, szybkości obrotu i promienia toru.

Powszechnie wykonywa się z wirówką następujące doświadczenia:

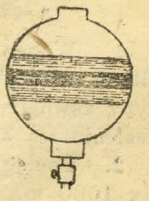

Rys. 352.
Wirówka.


Rys. 353. Spłaszczenie wirującej obręczy.

1) W wirującej misce (rys. 352) kulka podnosi się tym wyżej, im prędzej wiruje, a z dwu kulek ta, która jest cięższa, podniesie się wyżej (dlaczego?).

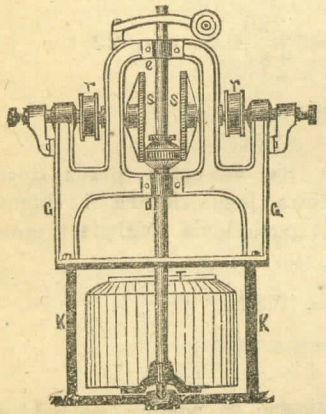
2) Obręcz okrągła (rys. 353), wirując dokoła swej średnicy, spłaszczy się mocno (dlaczego?).

3) Przy obracaniu bani, mieszczącej rtęć i wodę, ułożą się one w ten sposób (rys. 354), że rtęć zajmie pas kuli środkowy, woda dwa pasy przyległe (dlaczego?).

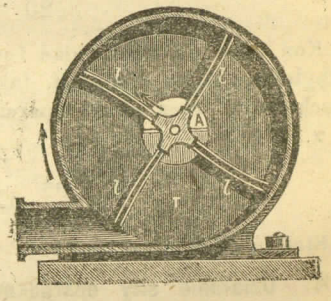

Rys. 354.

Przykłady. Siła odśrodkowa tłómaczy bryzganie błota z kół w kierunku stycznym; pękanie kamieni młyńskich w czasie obrotu; wywracanie wozów na zakrętach; wyskakiwanie z szyn pociągów na łukach.

Siła odśrodkowa obrotu ziemi spowodowała spłaszczenie ziemi, w epoce, gdy ziemia była w stanie płynnym. — Obecny rozkład wód w oceanach, mianowicie nagromadzenie ich na równiku, jako też zmniejszanie się ciężaru ciał w miarę zbliżenia do równika jest wynikiem działania siły odśrodkowej (objaśnić).



Rys. 355. Centryfuga do cukru.



Rys. 356. Wentylator.

Zastosowania. *Centryfugi* do wydzielenia soku z buraków, śmietanki z mleka (wyrób masła), miodu z plastrów; do osuszania mokrych przedmiotów. Budowę centryfugi do cukru objaśnia rys. 355. W zbiorniku walcowym KK mieści się bęben T z blachy dziurkowanej, obracany szybko za pomocą kół trybowych SS; sok z miazgi buraczanej, wrzuconej do bębna, wyciągnięty na zewnątrz siłą odśrodkową, przechodzi do naczynia KK. Podobnież oddziela się cukier krystaliczny od resztek melasy.

Wentylator centrefugowy (rys. 356) składa się z bębna r, w którym wiruje wiatrak $llll$; powietrze, porwane z zewnątrz przez otwór A, zostaje wypchnięte przez rurę B. Przyrząd służy do odświeżania powietrza, do podniecania ognia w piecach (maszyny wiatrowe). — *Pompy* centryfugowe do wody mają podobne urządzenie. — *Regulator* kulkowy do maszyn parowych (rys. 270).

Zadania.

1. Wagon kolejowy o ciężarze 7000 kg biegnie po łuku o promieniu 200 m z szybkością 7 m na sek. Obliczyć siłę odśrodkową i wyniesienie szyny zewnętrznej, przy szerokości toru 1,435 m. Odp. P=175 kg; wyniesienie = 36 mm.

2. Pociąg wpada z szybkością 11 m/sek na most o promieniu krzywizny 1000 m. O ile lżejszy jest każdy kg masy pociągu w chwili przebiegania pośrodku mostu? Odp. Okr. o 12 g.

§ 69. Moment bezwładności.

1. Szybkość kątowa. W ruchu postępowym wszystkie cząstki ciała posiadają tę samą szybkość v. W ruchu obrotowym cząstki mają szybkość rozmaitą, mianowicie tym większą, im dalej od osi się znajdują, t. j. proporcjonalną do promienia r.

Ponieważ wszystkie cząstki zamykają swym ruchem obrotowym równocześnie jednakowe kąty, mierzymy tu *szybkość kątową* ω, którą wyraża łuk, jaki zakreśla cząstka, odległa na jednostkę od osi, w ciągu sekundy. W odległości r jednostek od osi

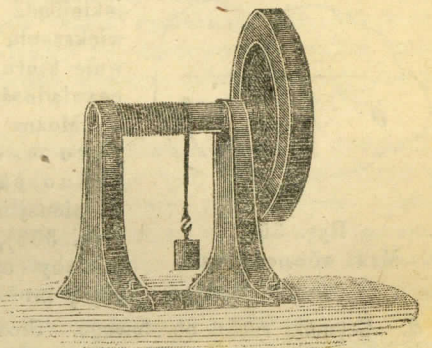
$$\text{szybkość obrotu } v = r \cdot \omega = \text{promień} \times \text{szybkość kątowa.}$$

Wzór powyższy dotyczy obrotu jednostajnego, jaki posiada np. bąk wirujący, w pierwszych sekundach po puszczeniu; koła rowerów, powozów, wagonów, samochodów w pełnym biegu, po torze poziomym; pędnie i koła rozpędowe maszyn fabrycznych, śmiga aeroplanu, śruba okrętowa.

Oczywiście, obrót taki można uważać za jednostajny tylko w przybliżeniu (por. § 11). Nadto rozumieć należy, że wyrażenie „obrót jednostajny" nie oznacza ruchu jednostajnego; obrót bowiem jest ruchem złożonym, posiada przyśpieszenie dośrodkowe (§ 68).

2. Przyśpieszenie kątowe. W ruchu postępowym wszystkie cząstki ciała mają przyśpieszenie jednakowe a; stąd miarą siły, działającej na ciało, jest iloczyn masy ciała przez przyśpieszenie (§ 15, art. 4): $p = m \cdot a$.

W ruchu obrotowym przyśpieszenie cząstek tego samego ciała zależy od ich odległości względem osi; należy tu rozumieć *przyśpieszenie kątowe* γ, to jest przyrost szybkości kątowej na sekundę. Przyśpieszenie to bywa dodatnie lub ujemne, podobnie jak w ruchu postępowym (§ 13, art. 3). Skoro w kierunku obrotu działa siła stała, przewyższająca opory, obrót staje się jednostajnie przyśpieszony, przy kierunku przeciwnym siły obrót jest jednostajnie opóźniony. Siła stała daje tu stały moment obrotu; stąd przyśpieszenie obrotu (por. rys. 357).



Rys. 357. Stały moment obrotu.

W odległości r jednostek od osi

$$\text{przyśpieszenie obrotu } a = r \cdot \gamma = \text{promień} \times \text{przyśp. kątowe.}$$

Na cząstkę o masie m działa tu siła $m \cdot r\gamma$; iloczyn tej siły przez odległość r, prostopadłą do kierunku siły, daje

$$\text{moment obrotu } M = mr^2 \cdot \gamma.$$

3. Moment bezwładności. Energja kinetyczna w ruchu postępowym ciała, złożonego z cząstek m_1, m_2, $m_3 \ldots$, których masa ogólna $= m$, wyraża się wzorem.

$$\tfrac{1}{2} m_1 v^2 + \tfrac{1}{2} m_2 v^2 + \tfrac{1}{2} m_3 v^2 \ldots = \tfrac{1}{2} m v^2. \qquad \text{(I)}$$

Inaczej przedstawia się wartość energji w ruchu obrotowym. Tutaj cząstki mają rozmaite szybkości obrotu: $v_1 = r_1 \omega$, $v_2 = r_2 \omega$, $v_3 = r_3 \omega \ldots$, przy tej samej szybkości kątowej ω; zatym energja kinetyczna w ruchu obrotowym wynosi

$$\tfrac{1}{2} m_1 (r_1 \omega)^2 + \tfrac{1}{2} m_2 (r_2 \omega)^2 + \tfrac{1}{2} m_3 (r_3 \omega)^2 \ldots$$

albo

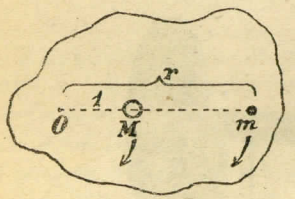
$$\tfrac{1}{2} (m_1 r_1^2 + m_2 r_2^2 + (m_3 r_3^2 \ldots) \omega^2. \qquad \text{(II)}$$

Sumę objętą nawiasem oznaczamy $\Sigma (mr^2)$ i zowiemy *momentem bezwładności.*

Moment bezwładności $B = \Sigma (mr^2)$.

Jest to suma iloczynów z masy każdej cząstki przez kwadrat jej odległości od osi.

Z porównania wzorów I i II wynika, że moment bezwładności odgrywa rolę masy: jest on tym dla ruchu obrotowego, czym masa dla ruchu postępowego. Istotnie, doświadczenia wykazują, że jak masa stawia opór bezwładny przy posuwaniu, podobnież moment bezwładności przy obracaniu ciała; jedno i drugie sprzeciwia się jakiejbądź zmianie w ruchu; zatrzymaniu, powiększeniu szybkości, zmniejszeniu; masa zachowuje kierunek ruchu po linji prostej, moment bezwładności zachowuje płaszczyznę obrotu.



Rys. 358.
Masa równoważna.

Można uważać moment bezwładności jako masę równoważną w odległości jednostki od osi. Gdyby bowiem, zamiast skupionej masy ciała m w odległości r od osi O (rys. 358), umieszczono masę M w odległości 1, miałaby ona energję kinetyczną $\frac{1}{2} M \omega^2 = \frac{1}{2} mr^2 \cdot \omega^2$.

4. Czynniki ruchu obrotowego. Stosując wzór na moment obrotu dla poszczególnej cząstki, mianowicie $M = mr^2 \cdot \gamma$, do całego ciała, t. j. biorąc ogólnie $\Sigma (mr^2)$ zamiast mr^2, otrzymujemy

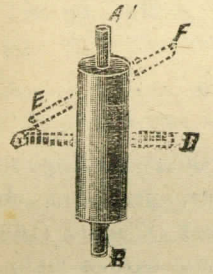
moment obrotu	$M = B \cdot \gamma =$	moment bezwładności	$\times$	przyśpieszenie kątowe

Równość powyższa charakteryzuje ruch obrotowy; oznacza mianowicie, że moment obrotu wyraża się iloczynem momentu bezwładności i przyśpieszenia kątowego. Odpowiada to w ruchu postępowym równości $p = m \cdot a$, t. j. siła wyraża się iloczynem masy i przyśpieszenia linjowego.

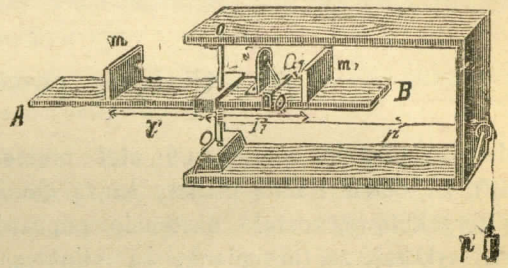
Tak więc, z zestawienia obu rodzajów ruchu wypływa, że

w ruchu postępowym	odpowiada	w ruchu obrotowym
siła		moment obrotu siły
masa		moment bezwładności
przyśpieszenie linjowe		przyśpieszenie kątowe.

5. Wartość momentu bezwładności zależy od masy ciała, od jego postaci, jako też od położenia osi obrotu. Nie jest to zatym wielkość niezmienna, dla danego ciała, jak jego masa.



Rys. 359.



Rys. 360. Wartość momentu bezwładności.

Np. walec ma inny moment bezwładności, wirując około osi AB (rys. 359), niż około CD lub EF. Gdyby walec zgnieciono tak, aby z niego powstał krążek cienki a znacznie większy w średnicy od walca, miałby krążek, przy tej samej masie i szybkości obrotu, daleko większy moment bezwładności.

Praktycznie można oznaczyć moment bezwładności w przypadkach prostszych. Zasadę takiego urządzenia podaje rys. 360, gdzie lekki pręt AB wiruje na osi pionowej pod wpływem ciężaru p; na pręcie osadzone równe masy m i m w jednakowych odległościach r i r. Wstrzymując spadek ciężaru p po 3, 5, 10 sekundach, oznacza się przyśpieszenie kątowe γ, jakie miały powyższe masy w danej chwili. Moment obrotu M wypada z wartości siły p i jej odległości od osi = promienia waleczka $o\,o$, na który nawinięto sznurek. W ten sposób można ustalić wzajemne zależności, oczywiście, w grubym przybliżeniu.

Teoretycznie da się obliczyć moment bezwładności dla brył foremnych, jednolitych, i to za pomocą rachunku wyższego. Np. moment cienkiego drutu o długości l i masie m, względem osi, umieszczonej na końcu, wyraża wzór $\frac{1}{3} ml^2$; moment krążka o promieniu r i masie m, względem osi, przechodzącej przez środek, jest $\frac{1}{2} mr^2$; moment pręta o kształcie pryzmatycznym, jaki np. mają magnesy, jest $\frac{1}{12} ml^2$.

6. Zastosowania. Koła rozpędowe maszyn mają cienkie szprychy a dużą masę na obwodzie, aby nagromadzały jaknajwiększą ilość energji kinetycznej. — Igły magnesowe, skazówki przyrządów czułych (galwanometrów), które mają się poruszać od działania słabych momentów obrotowych, są nie tylko lekkie, ale ku końcom coraz cieńsze. — *Girostat* czyli ciężkie koło, szybko wirujące, służy do ustalenia kompasu okrętowego, aby go uczynić niewrażliwym na kołysanie statku; potężne girostaty hamują nawet kołysanie okrętów, utrzymują w położeniu pionowym wagony kolei o jednej szynie.

Dlaczego bąk wirujący opiera się przewróceniu? — Dlaczego na rowerze tym łatwiej się utrzymać, im prędzej się jedzie? — Jaki wpływ na celność pocisków ma ich ruch wirowy w czasie przelotu?

§ 70. Ciążenie powszechne.

1. Przyciąganie wzajemne ciał niebieskich. Odkrycie Kopernika (1543), że ziemia i inne planety krążą dokoła słońca, przyczym obiegają tory kołowe, zostało następnie poprawione przez Keplera (1609), który wykazał, że tory planet są eliptyczne, zresztą bardzo mało od kół się różnią. Podobnie odbywa się obieg księżyców czyli satelitów około planet, np. naszego księżyca dokoła ziemi.

Ruch więc ciał niebieskich w układzie słonecznym jest ruchem środkowym, t. j. obiegiem około pewnego punktu, zwanego środkiem ruchu. Ruch taki może istnieć tylko pod wpływem siły przyciągającej ku środkowi; poszczególnym jego przypadkiem jest ruch obrotowy (§ 68).

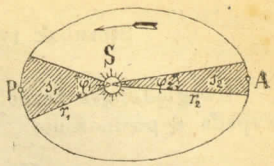
Z zasady działania i oddziaływania wynika, że przyciąganie ciał niebieskich musi być wzajemne: z jaką siłą np. słońce przyciąga ziemię, z taką samą ziemia je przyciąga (Newton 1687).

W skutek przewagi masy słońca nad masą ziemi, ta ostatnia ma ruch wymuszony około słońca. Podobnież księżyc, który przyciąga ziemię siłą równą jej wzajemnemu przyciąganiu, jest zmuszony do krążenia koło ziemi, środek tego ruchu nie leży w środku ziemi, ale w środku masy układu „ziemia-księżyc".

2. Prawa Keplera. Uważając słońce za nieruchome i wyznaczając położenia planet w różnych porach roku, ustalił Kepler 3 wnioski, zwane *prawami Keplera*:

1) Każda planeta krąży po elipsie, której ognisko jedno zajmuje słońce (rys. 361).

Odległość więc każdej planety od słońca zmienia się podczas obiegu, najmniejsza jest w punkcie przysłonecznym (perihelium), największa w punkcie odsłonecznym (aphelium), położonych na końcach wielkiej osi elipsy (punkty P i A).



Rys. 361.
Obieg planety.

2) Linje proste, łączące środki planety i słońca, czyli promienie wodzące każdej planety zakreślają w równych czasach jednakowe pola.

Tak np. pole s_1, zakreślone promieniem r_1, ma wielkość tę samą, co pole s_2, zakreślone promieniem r_2.

Stąd szybkość kątowa planety jest największa w punkcie przysłonecznym P, najmniejsza w punkcie odsłonecznym A.

3) Rozumiejąc jako średnią odległość planety od słońca połowę wielkiej osi elipsy, czyli średnią arytmetyczną odległości planety od słońca w punktach P i A, pod nazwą zaś okresu czas jednego okrążenia słońca, wyraził Kepler zależność między nimi w trzecim prawie:

Kwadraty okresów obiegu planet są proporcjonalne do sześcianów ich średnich odległości od słońca.

Skoro odległości średnie dwu planet wynoszą r_1 i r_2, okresy odpowiednie T_1 i T_2, zachodzi stosunek

$$T_1^2 : T_2^2 = r_1^3 : r_2^3.$$

3. Ciążenie powszechne czyli **grawitacja.** Ponieważ tory planet są bardzo zbliżone do kołowych, można przyjąć, że planety mają stałe przyśpieszenie dośrodkowe, i stosować wzory na ruch obrotowy. W ten sposób, uwzględniając nadto trzecie prawo Keplera, uzasadnia się teoretycznie prawo Newtona co do przyciągania planet i słońca, mianowicie:

Siła przyciągania planet do słońca jest w stosunku prostym do masy planet, a odwrotnym do kwadratów odległości:

$$P_1 : P_2 = \frac{m_1}{r_1^2} : \frac{m_2}{r_2^2}$$

gdzie m_1 i m_2 oznaczają masy dwu planet, r_1 i r_2 ich średnie odległości od słońca, P_1 i P_2 odpowiednie siły przyciągania planet przez słońce.

Dowód. Podług § 68, art. 2, wzór II,

$$P_1 = \frac{4\pi^2 r_1 \cdot m_1}{T_1^2} \qquad P_2 = \frac{4\pi^2 r_2 \cdot m_2}{T_2^2}.$$

Stosunek tych sił wynosi $P_1 : P_2 = \frac{m_1 r_1}{T_1^2} : \frac{m_2 r_2}{T_2^2}$.

Uwzględniając trzecie prawo Keplera, w postaci $r_1^3 : r_2^3 = T_1^2 : T_2^2$, wypada z pomnożenia

$$P_1 r_1^3 : P_2 r_2^3 = m_1 r_1 : m_2 r_2$$

i stąd $$P_1 : P_2 = \frac{m_1}{r_1^2} : \frac{m_2}{r_2^2}.$$

Newton uogólnił powyższe prawo, przyjmując, że podobnie jak ciała niebieskie, przyciągają się wszelkie ciała na ziemi, czyli że istnieje wzajemne przyciąganie wszelkich mas, bez względu na rodzaj materji, tworzącej te masy. Stanowi ono t. zw. prawo ciążenia powszechnego czyli grawitacji, jedno z najogólniejszych praw przyrody:

Wszelkie ciała przyciągają się wzajemnie siłą proporcjonalną do ich mas, a odwrotnie proporcjonalną do kwadratów ich odległości.

Dla mas m_1 i m_2, rozdzielonych odległością r między ich środkami

$$\text{przyciąganie } P = k \frac{m_1 \cdot m_2}{r_2}.$$

Stały czynnik k zowie się *stałą grawitacji.*

Jeżeli bowiem M oznacza masę słońca, każda z planet m_1 i m_2 przyciąga nawzajem słońce siłą proporcjonalną do jego masy, tak iż

$$P_1 : P_2 = \frac{Mm_1}{r_1^2} : \frac{Mm_2}{r_2^2}$$

albo $$\frac{P_1}{\left(\frac{Mm_1}{r_1^2}\right)} = \frac{P_2}{\left(\frac{Mm_2}{r_2^2}\right)} = \text{const.}$$

Oznaczając const. przez k, otrzymujemy

$$P_1 = k \frac{Mm_1}{r_1^2}$$

czyli wzór grawitacji.

Wartość k, stałej grawitacji, stanowi wartość siły przyciągania się dwu cząstek o masach $m_1 = m_2 = 1$, oraz $r = 1$; wtedy $P = k$. W układzie *CGS*, gdy m_1 i m_2 wyrażono w gramach, a r w centymetrach, $k = 67.10^{-9}$ dyn; czyli dwa ciała na ziemi, ważące po 1 g, przyciągają się w odstępie 1 cm między ich środkami ciężkości siłą 0,000 000 067 dyny.

Przyciąganie więc mechaniczne rozmaitych ciał na ziemi stanowi siłę znikomą, którą może wykazać tylko bardzo subtelne doświadczenie. A jednak dla brył tej miary, co ciała niebieskie, siła ta stanowi, w skutek olbrzymiej ich masy, potężne więzy, zmuszające te ciała do wiecznego krążenia.

Że siła ciężkości jest objawem ciążenia powszechnego, wywnioskował Newton z t. zw. „rachunku księżycowego", który wykazuje, że księżyc w obiegu dokoła ziemi spada ku ziemi z takim przyśpieszeniem, jak gdyby spadało na nią jakiebądź ciało z równej odległości.

Odległość księżyca od ziemi średnio wynosi 60 promieni ziemskich; siła przyciągania ziemskiego w tej odległości musi być 60^2 razy mniejsza, niż na powierzchni ziemi, zatym i przyśpieszenie a musi być tyleż razy mniejsze, czyli $a = g : 60^2 = 981 : 3600 = 0{,}272$ cm/sek^2.

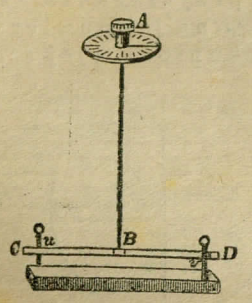
Oznaczając przez a_1 przyśpieszenie spadku księżyca ku ziemi, otrzymujemy ze wzoru na ruch obrotowy $a_1 = \frac{4\pi^2 r}{T^2}$; ponieważ czas obiegu T księżyca koło ziemi, czyli t. zw. miesiąc gwiazdowy, wynosi 27 dni 7 godzin 43 min. 11 sek. = 2 360 591 sekund, $r = 6370 \cdot 10^5$ cm, przyśpieszenie spadku księżyca ku ziemi

$$a_1 = \frac{4 \cdot (3{,}14)^2 \cdot 60 \cdot 6370 \cdot 10^5}{(2\,360\,591)^2} = 0{,}271 \text{ cm/sek}^2.$$

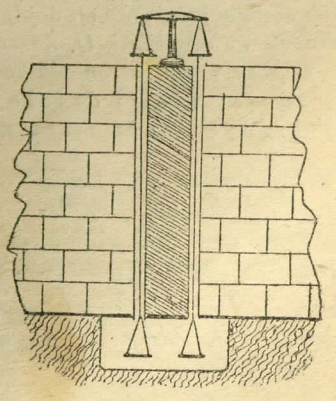
Tak więc, $a = a_1$, gdyż drobna różnica pochodzi z przyjęcia ziemi za kulę, a toru księżyca za kołowy.

4. Pomiar grawitacji, a zarazem doświadczalne stwierdzenie prawa ciążenia należy do prac trudnych i subtelnych. W ogólnych zarysach polega na użyciu tak zwanej wagi skręceń Cavendisha (1794), bądź nadzwyczaj czułej wagi zwykłej, jaką sporządził Jolly (1881, por. § 5, art. 4), a ulepszyli ostatnio Richarz (1890) oraz Krigar-Menzel (1898).

Waga skręceń (rys. 362) składa się zasadniczo z cienkiego drucika lub nitki kokonu AB, zawieszonego w A, a w B unoszącego poprzeczny pręcik CD. Przez zakręcenie główki doprowadza się pręcik do zetknięcia ze słupkami u i v. Za obracaniem główki A dalej, pręcik CD wywiera na słupki,



Rys. 362. Waga skręceń.



Rys. 363.

skutkiem skręcenia druta, ciśnienie proporcjonalne do kąta skręcenia. Tą drogą można oznaczyć, jaka siła odpowiada skręceniu o 1^0; wogóle jest to siła nadzwyczaj mała (zwłaszcza przy zawieszeniu pręcika na nici kokonu), nie dająca się ocenić na zwykłej wadze.

Cavendïsh urządził przyrząd znacznych wymiarów i umieścił na końcach C i D kule ołowiane; za przysunięciem do jednej nich dużej kuli ołowianej nastąpiło pewne zbliżenie kuli ruchomej. Z wielkości kąta skręcenia wypadła wartość siły przyciągającej.

Nowszy i dokładniejszy przyrząd do oznaczenia stałej grawitacji zbudował prof. Richarz. Składa on się z wagi o 4 szalkach (rys. 363), pomiędzy którymi znajduje się bryła ołowiu, ważąca 100 ton. Doświadczenie wykonano w murowanych podziemiach Spandau. Skoro na lewą górną szalkę i prawą dolną położono równe ciężary, np. po 1 kg, waga przechyliła się lewą stroną na dół; ciężar bowiem kilogramowy w pierwszej szalce przyciągała masa ołowiu ku dołowi, w drugiej ku górze.

Przykład. Jaką siłą przyciągają się nawzajem dwie kule ołowiane, każda o objętości 1 dm^3, z odległości 15 cm? Gęstość ołowiu = 11,4.

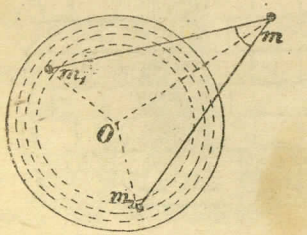
Rozw. Masa każdej kuli wynosi $1000 \times 11{,}4 = 11400$ g; odległość między kulami = 15 cm;

$$\text{przyciąganie } p = 67 \times 10^{-9} \times \frac{11400 \,.\, 11400}{15^2} = \frac{1}{26} \text{ dyny.}$$

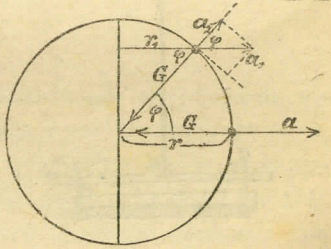
Ażeby sobie uzmysłowić, jak znikomą jest tu siła przyciągania, zważmy, że wynosi ona tyle, co waga $\frac{1}{4}$ mm^2 papieru niniejszej książki, t. j. pyłka ledwie dostrzegalnego.

5. Uzasadnienie kierunku ciężkości. Każda cząstka ziemi przyciąga każdą cząstkę ciała na jej powierzchni. Przyjąwszy ziemię za kulę, podzielmy ją na cienkie warstwy spółśrodkowe (rys. 364), których gęstość wzrasta ku środkowi O, jak to wynika z badań geofizyki. W dowolnej warstwie musi się znaleźć para cząstek m_1 i m_2 równo oddalonych od środka O, jako też od danej cząstki m nad powierzchnią ziemi, a przytym położonych w jednej płaszczyźnie $m_1\ O\ m_2\ m$. Połączywszy dany punkt m z O, otrzymamy dwa trójkąty o bokach odpowiednio równych, zatym $\sphericalangle m_1\ m\ O = \sphericalangle m_2\ m\ O$, czyli wypadkowa obu przyciągań m_1 i m_2 przechodzi przez środek ziemi O.

Stosując podobne rozważanie do jakiejkolwiek pary cząstek, położonych w innej warstwie jednorodnej, dojdziemy również do wniosku, że wypadkowa ich ma kierunek ku środkowi O. Że zaś z powodu symetrji kuli musi być równa liczba cząstek z obu stron płaszczyzny $m\ O$, przyciągania wszystkich cząstek ziemi działają na ciało m na jej powierzchni tak, jak gdyby cała masa ziemi była skupiona w jej środku.



Rys. 364.



Rys. 365.

Stąd kierunek pionowy czyli kierunek siły ciężkości prowadzi ku środkowi ziemi (por. § 5, art. 2).

6. Zmniejszenie wagi ciał skutkiem obrotu ziemi. Siła odśrodkowa, wywołana ruchem wirowym ziemi, zmniejsza wagę ciał tym bardziej, im szybciej ciało obraca się wraz z ziemią. Stąd na równiku ubytek wagi jest największy, na biegunach zaś niema go wcale; ze wzoru bowiem na siłę odśrodkową $P = \frac{4\pi^2 rm}{T^2}$ wypływa, że im większy jest promień równoleżnika r (rys. 365), tym większa siła odśrodkowa P.

Na równiku ciężar ciał zmniejsza się o $\frac{1}{289}$, tak iż np. masa, ważąca 1 kg na biegunie, waży na równiku mniej prawie o $3\frac{1}{2}$ grama.

Prócz tego ciężar ciał zmniejsza się ku równikowi jeszcze z powodu kształtu elipsoidalnego ziemi, tak iż ogółem ubytek ciężaru na równiku wynosi przeszło $\frac{1}{200}$ ciężaru tegoż ciała na biegunach.

Obliczenie ubytku wagi ciał na równiku skutkiem obrotu ziemi. Należy tu uwzględnić, że natężenie ciężkości równa się liczebnie przyśpieszeniu (§ 63, art. 3). Podstawiamy tedy na wzorze $a = \frac{4\pi^2 r}{T^2} = \frac{2\pi r \,.\, 2\pi}{T^2}$ za obwód równika $2\pi r$ liczbę 40 076 km = 40 076 . 10^5 cm, za czas obrotu t liczbę 24 godzin = 86 400 sekund czasu gwiazdowego, czyli 86 164 sekund podług średniego czasu słonecznego (pt. „Układ jednostek bezwzględnych"), ziemia bowiem wykonywa pełny obrót w czasie o 3 minuty 56 sekund krótszym od doby słonecznej, t. j. okresu od południa do następnego południa. Stąd $a = 3{,}39$ cm/sek^2; ponieważ przyśpieszenie $g = 978$ cm/sek^2 na równiku, stosunek $a/g = 3{,}39 : 978 = \frac{1}{289}$.

Gdyby więc ziemia obracała się 17 razy prędzej, zatym przyśpieszenie odśrodkowe wyniosłoby $\frac{289}{289}\ g = g$, wszystkie ciała na równiku byłyby pozbawione ciężaru, t. j. nie ważyłyby nic.

Wpływ szerokości geograficznej (rys. 365). Na równiku przyśpieszenie odśrodkowe $a = \frac{4\pi^2 r}{T^2}$.

Pod szerokością geograficzną φ przyśpieszenie odśrodkowe

$$a_1 = \frac{4\pi^2 r_1}{T^2} = \frac{4\pi^2 r \cos\varphi}{T^2} = a \cos\varphi.$$

Na przyśpieszenie ciężkości wpływa tutaj nie całe przyśpieszenie a_1, ale tylko jego składowa $a_2 = a_1 \cos\varphi = a \cos^2\varphi$.

Gdyby ziemia się nie obracała, miałaby przyśpieszenie ciężkości G; przy obrocie jej przyśpieszenia są mniejsze, mianowicie wynoszą:

$g_1 = G - a_2$ dla szerokości φ
$g = G - a$ dla równika.

Po odjęciu otrzymujemy:

$g_1 - g = a - a_2 = a - a\cos^2\varphi = a\,(1 - \cos^2\varphi) = a\sin^2\varphi.$

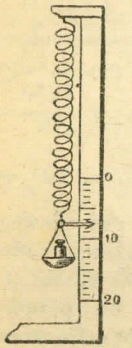
Czyli $g_1 = g + a\sin^2\varphi$, gdzie $a\sin^2\varphi$ oznacza przyrost przyśpieszenia ziemskiego pod szerokością φ, zatym i przyrost ciężkości.

Przyrost ciężkości jest proporcjonalny do kwadratu wstawy szerokości geograficznej.

G) RUCH DRGAJĄCY.

§ 71. Ruch harmoniczny.

1. Pochodzenie ruchu harmonicznego. Skoro na ciało sprężyste działa siła, tak iż kształt ciała wyraźnie się zmienia, np. ciało się wydłuża, wtedy po nagłym usunięciu siły ciało nabywa *ruchu drgającego*: dany punkt ciała porusza się tam i napowrót około położenia równowagi.

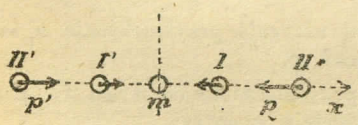


Rys. 366.

Przy nieznacznych wychyleniach, jak to bywa zwykle, siła wychylająca jest proporcjonalna do wychylenia (por. § 9 art. 5), czyli do odległości cząstki od położenia równowagi. Ruch drgający wtedy zowie się *ruchem wahadłowym* albo *harmonicznym*, przytym prostym; z dwu lub więcej zaś takich ruchów powstają ruchy złożone.

Dogodny sposób otrzymania ruchu drgającego harmonicznego daje szarpnięcie sprężyny obciążonej, np. w wadze Jolly'ego (rys. 366). Skoro ciężarek rozciąga sprężynę tak, iż skazówka ustawia się na 10 cm podziałki, za pociągnięciem zaś ręką wydłuży się sprężyna do 20 cm, to puszczona nie powróci zaraz do pierwotnej długości, ale skurczy się prawie do 0 podziałki; następnie znów sprężyna opadnie skazówką prawie do 20 cm, podskoczy prawie do 0 i t. d. Że ruchy te stopniowo słabną i sprężyna zatrzymuje się niebawem na 10 cm, czyli położeniu równowagi, tłomaczy się tarciem wewnętrznym oraz oporem powietrza.

2. Rodzaj ruchu harmonicznego. Wahania ciała odbywają się pod wpływem dwu czynników: siły i bezwładności.



Rys. 367.

Niech cząstkę m (rys. 367) ciała doskonale sprężystego wychyla siła zewnętrzna x do położenia II; w tej chwili równoważy ją siła sprężystości p, równa i przeciwna, i cząstka posiada zasób energji potencjalnej. Za zniknięciem siły x cząstka cofa się do położenia równowagi m, pod wpływem p, ruchem niejednostajnie przyśpieszonym, gdyż wartość p maleje: w położeniu I jest mniejsza,

niż w II, w m spada do O; przyśpieszenie tu = O, szybkość zaś jest największa, dotąd bowiem wzrastała ona bez przeszkody. W ruchu od II do m zachodzi przemiana energji potencjalnej na kinetyczną.

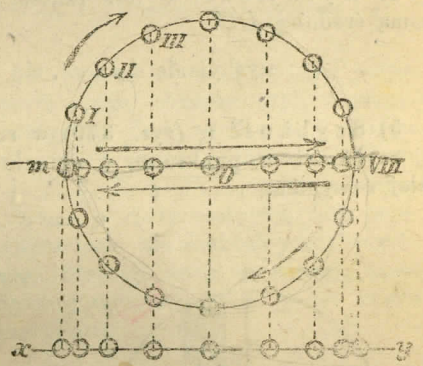
Z powodu bezwładności cząstka m nie zatrzyma się, ale posuwa się dalej do I' i II', aż wyczerpie się jej energja kinetyczna, zamieniając się całkowicie na potencjonalną w położeniu II', tak iż droga m-II' = $=m$-II. Ruch od m do II' jest niejednostajnie opóźniony, gdyż przeciwdziała rosnąca siła sprężystości p'; w ruchu od m do II' przyśpieszenie jest ujemne, szybkość w położeniu II' spada do O.

Następnie cząstka wraca ruchem przyśpieszonym do m, posuwa się dalej ruchem opóźnionym do II i t. d. Tak więc, ruch harmoniczny cząstki jest niejednostajnie zmienny i odbywa się teoretycznie bez końca.

Wychyleniem albo *elongacją* (m-I) nazywamy odległość punktu drgającego w danej chwili od położenia równowagi; największe wychylenie nazywamy *obszernością* drgania albo *amplitudą* (m-II).

Okresem ruchu harmonicznego nazywamy czas, w którym punkt wykonywa całkowite wychylenie w obie strony (m-II-m-II'm).

3. Teorja ruchu harmonicznego. Ruch harmoniczny można uważać jako rzut obrotu jednostajnego na średnicę koła.



Rys. 368.

Przy obrocie drobnego ciała, np. kulki m (rys. 368) dokoła punktu O przybiera ona kolejno w równych odstępach czasu położenia I, II, III..., jednakowo odległe od siebie; rzuty zaś tych położeń na średnicę koła mają odstępy coraz większe ku środkowi O, dalej znów coraz mniejsze. Rzuty kulki mają ruch harmoniczny.

Puszczając np. promienie słońca z góry na kulkę w kierunku linji kropkowanych, otrzymalibyśmy cienie kulki na płaszczyźnie xy, równoległej do średnicy m-VIII, przyczym cienie posuwałyby się ruchem harmonicznym.

1) Ruch harmoniczny odbywa się pod wpływem siły zmiennej, proporcjonalnej do wychylenia.

W dowolnym położeniu cząstka m (rys. 369) ma przyśpieszenie dośrodkowe $a = \frac{4\pi^2 r}{T^2}$ (§ 68, art. 2). Z rozkładu a, oraz z rzutu przyśpieszenia a na średnicę DC, wynika $a_1 : a = d : r$, czyli

$$a_1 = \frac{a}{r} \cdot d.$$

Ponieważ a i r są w danym ruchu stałe, przyśpieszenie a_1 jest proporcjonalne do wychylenia d; zatym i siła $p_1 = m \cdot a_1$, działająca w ruchu harmonicznym po linji AO, jest proporcjonalna do tegoż wychylenia.

Gdy wychylenie przy ruchu punktu m stopniowo wzrasta, równocześnie powiększa się siła i przyśpieszenie, stąd ruch jest zmienny niejednostajnie.

2) Okres T ruchu stanowi czas jednego obiegu punktu m od A przez C, B, D do A; w tym samym bowiem czasie punkt m_1 czyli rzut punktu m przebywa drogę $OCODO$. Ze wzoru $a = \frac{4\pi^2 r}{T^2}$ wynika

$$\text{okres } T = 2\pi \sqrt{\frac{r}{a}}.$$

3) Położenie punktu w ruchu harmonicznym określa się wychyleniem, bądź wynika z t. zw. fazy ruchu.

Fazą nazywamy stan ruchu w danej chwili, określony wartością kąta obrotu α. Mianowicie, jeżeli punkt m posunął się po łuku Am zamykającym kąt α, to długość łuku wynosi αr: jeżeli czas trwania tego ruchu wynosi t, okres całkowity T, wówczas

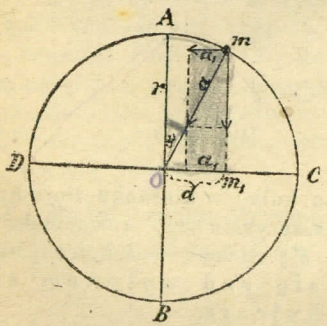
$$t : T = \alpha r : 2\pi r \qquad \text{i stąd } \alpha = \frac{2\pi t}{T}.$$

4) Wychylenie d jest rzutem promienia ruchomego $m\,O$ na nieruchomą średnicę DC:

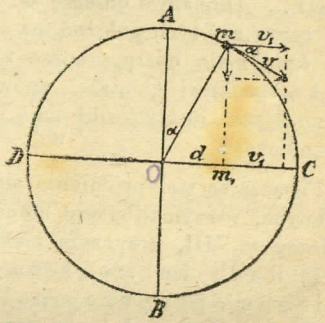
$$\text{wychylenie } d = r \cdot \sin \alpha = r \cdot \sin \frac{2\pi t}{T}.$$

5) Szybkość v_1 (rys. 370) w ruchu harmonicznym jest rzutem stycznej szybkości v punktu m w obrocie jednostajnym. Z rozkładu szybkości stałej v wynika.

$$v_1 = v \cdot \cos \alpha.$$



Rys. 369.



Rys. 370.

Szybkość więc zmniejsza się, skoro wzrasta kąt obrotu, a osiąga największą wartość przy $\alpha = 0^0$, gdy m_1 przechodzi przez położenie równowagi O.

Ponieważ $v = \frac{2\pi r}{T}$ (§ 68, art. 2), $\alpha = \frac{2\pi t}{T}$,

$$\text{szybkość } v_1 = \frac{2\pi r}{T} \cdot \cos \frac{2\pi t}{T}.$$

6) Przyśpieszenie a_1 (rys. 369) ruchu harmonicznego jest rzutem stałego przyśpieszenia obrotowego a. Z rozkładu przyśpieszenia a wynika

$$a_1 = a \cdot \sin \alpha.$$

Przyśpieszenie więc zwiększa się przy wzrastaniu kąta obrotu α, a przy $\alpha = 0^0$, gdy m_1 przechodzi przez położenie równowagi O, przyśpieszenie $= 0$.

Podstawiając wartość $\alpha = \frac{2\pi t}{T}$, otrzymujemy

$$\text{przyśpieszenie } a_1 = a \cdot \sin \frac{2\pi t}{T}.$$

7) Zgodność faz. Przy ciągłym ruchu harmonicznym punkt m wraca do tej samej fazy, czyli osiąga to samo wychylenie i szybkość, gdy łuk Am powiększa się o 2π, 4π, $6\pi \ldots$, czyli czas t wzrasta o T, $2T$, $3T \ldots$ Można to wymiarkować ze wzorów $d = r \sin \frac{2\pi t}{T}$ oraz $v_1 = \frac{2\pi r}{T} \cos \frac{2\pi t}{T}$.

Ruch przeto harmoniczny zowiemy też ruchem *okresowym* czyli *perjodycznym*. Skoro fazy się różnią o całkowitą liczbę okresów czyli o parzystą wielokrotność π, jak wyżej podano, następują *fazy zgodne*, t. j. mające nie tylko jednakową szybkość i wychylenie, ale i znaki jednakowe. Skoro zaś fazy różnią się o połowę okresów. $\frac{1}{2}T$, $\frac{3}{2}T$, $\frac{5}{2}T \ldots$, czyli o nieparzystą wielokrotność π, jako to 1π, 3π, $5\pi \ldots$, wtedy następują *fazy przeciwne*, o tych samych wychyleniach i szybkościach, ale znakach przeciwnych.

8) Energja E_h ruchu harmonicznego. Stosując wzór na energję kinetyczną do cząstki o masie m przy największej szybkości v, t. j. w chwili przejścia przez położenie równowagi, otrzymujemy:

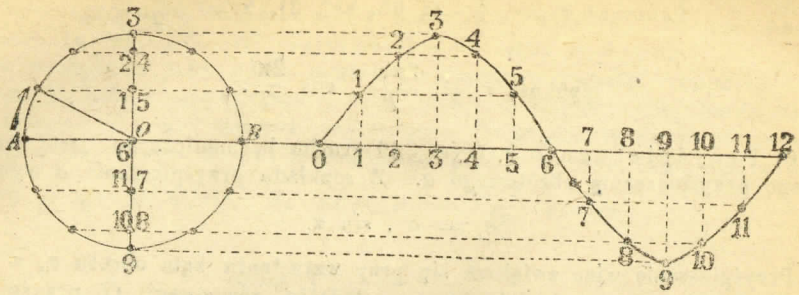
$$E_h = \tfrac{1}{2} mv^2 = \tfrac{1}{2} m \left(\frac{2\pi r}{T}\right)^2 = 2\pi^2 \cdot \frac{mr^2}{T^2}$$

Ponieważ r jest największym wychyleniem, czyli amplitudą, wzór powyższy wyraża:

Energja ruchu harmonicznego jest wprost proporcjonalna do masy ciała i do kwadratu amplitudy, a odwrotnie do kwadratu okresu.

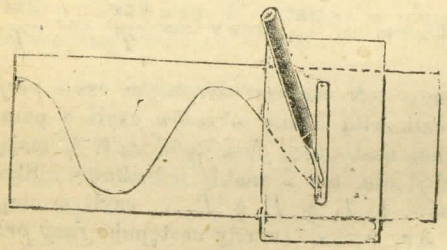
4. Wykreślenie ruchu harmonicznego. Niech punkt m obraca się jednostajnie, począwszy od położenia A (rys 371); oznaczmy w ciągu okresu T 12 położeń równo odległych. W położeniu A rzut punktu jest w O, rzut położenia m jest w 1, następnie w 2, 3, 4 ... (Należy zauważyć, iż tutaj rzuty padają na średnicę pionową, gdy na rys. 368, 369, 370 padały na średnicę poziomą; zatym rys. 371 jest przekręcony o 90^0 wstecz względem poprzednich).

Wychylenia stanowią odpowiednio O, O-1, O-2, O-3, O-4 ...



Rys. 371. Ruch harmoniczny przedstawia sinusoida.

Na przedłużonej średnicy AB oznaczamy czasy $t = \frac{1}{12} T$ w postaci 12 równych odcinków O-1-2-3-4 ..., a na ich końcach wystawiamy prostopadłe 1-1, 2-2, 3-3, 4-4 ... równe odnośnym wychyleniom. Otrzymane punkty wytykają kierunek krzywej, zwanej *krzywą harmoniczną* albo *sinusoidą*, ponieważ oznacza ona cały przebieg wartości wstaw (sinusów) od 0° do 360°. Stąd ruch harmoniczny zowie się inaczej ruchem sinusoidalnym.



Rys. 372. Wykreślenie sinusoidy.

Można też nakreślić sinusoidę w innej skali, niż wynosi długość wychyleń, z warunkiem, aby rzędne 1-1, 2-2... były proporcjonalne do wychyleń czyli wstaw (sinusów) odpowiednich kątów, a odcięte O-1, 1-2 ... proporcjonalne do czasów.

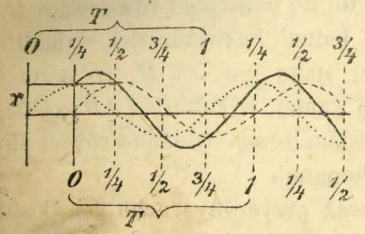
Praktyczne wykreślenie sinusoidy. Gdyby w czasie wahania punktu wzdłuż średnicy 3-9 (rys. 371) zarazem posuwała się jednostajnie średnica równolegle do siebie, t. j. w kierunku AB, punkt nakreśliłby sinusoidę. W przybliżeniu można to wykonać, starając się poruszać ołówek harmonicznie tam i z powrotem wzdłuż szpary, wyciętej w tekturce (rys. 372), równocześnie zaś ciągnąc papier prostopadle do szpary ze stałą szybkością. Nawzajem, posuwając odpowiednio kartkę ze szparą po papierze, na którym nakreślono sinusoidę, ujrzymy wewnątrz szpary ruch harmoniczny.

5. Składanie ruchów harmonicznych. Z dwu lub więcej prostych ruchów harmonicznych powstaje ruch złożony przez składanie czyli *interferencję* (krzyżowanie) drgań poszczególnych.

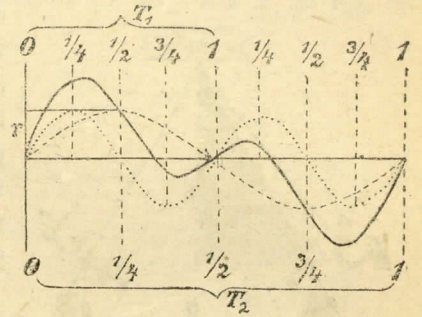
Składanie ruchów opiera się na zasadzie niezależności ruchów (§ 12, art. 3). W najprostszym przypadku, jaki tu roztrząsamy, składają się dwa ruchy o kierunkach zgodnych, na linji prostej, wtedy ruch wypadkowy otrzymuje się przez dodawanie wychyleń oraz szybkości obu ruchów składowych.

Skoro ruchy mają jednakowe okresy T, różniąc się tylko co do fazy, t. j. nie zaczynają się jednocześnie, wtedy ruch wypadkowy jest również harmoniczny i wyraża się sinusoidą. Na rys. 373 widzimy ruch złożony z dwu takich ruchów o równych amplitudach r, przyczym różnica faz wynosi $\frac{1}{4}$ okresu T; wypadkową jest sinusoida o większej amplitudzie, oznaczona linją mocniejszą.

Gdy ruchy mają okresy różne T_1 i T_2, wypadkowa nie może być sinusoidą, jakkolwiek jest krzywą perjodyczną. Na rys. 374 widać interferencję dwu takich ruchów o jednakowych amplitudach r, gdzie okres $T_2 = 2\ T_1$.



Rys. 373.



Rys. 374.

6. Przykłady drgań harmonicznych. Drgania sprężyny (rys. 366). — Drgania sznura, szarpniętego za końce w przeciwne strony. — Drgania strun i prętów we wszelkich narzędziach muzycznych (pt.). — Ruchy wahadła zegarowego.

Pospolicie ruch harmoniczny powstaje przy zamianie ruchu postępowego na obrotowy, jak w silnikach parowych i spalinowych, kołowrotku, tokarni i szlifierni pedałowej, maszynie do szycia (pt. mechanizm korbowy maszyny parowej, rys. 270, oraz motoru gazowego, rys. 273).

§ 72. Wahadło.

1. Ruch wahadłowy pod wpływem ciężkości jest szczególnym objawem ruchu harmonicznego. Zasługuje on na bliższe rozważenie ze względu, że stanowi pospolitą i obszerną dziedzinę zjawisk, oraz daje ważne zastosowania naukowe i praktyczne.

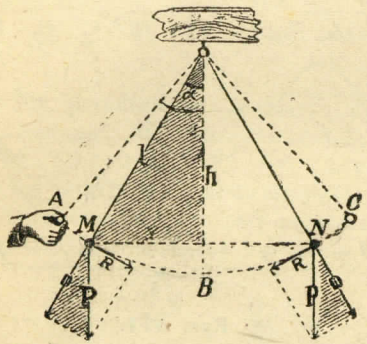
2. Wahadłem jest każde ciało, zawieszone swobodnie i kołyszące się około punktu zawieszenia.

Do rozważań należy sobie wyobrazić *wahadło matematyczne* czyli proste, t. j. punkt ciężki, zawieszony na nici sztywnej i nieważkiej, wahający się bez żadnej przeszkody. Odległość punktu materjalnego od punktu zawieszenia jest *długością* (l) wahadła.

Największe odchylenie od położenia równowagi zowie się *obszernością wahań* albo *amplitudą*.

Czas, w którym wahadło przebiega całkowitą swą drogę łukową, zowie się *czasem wahnienia* (t); podwójny czas wahnienia, czyli czas przebiegu drogi tam i napowrót, stanowi *okres wahań* ($T = 2t$).

3. Przyczyna wahań. Wahadło ma ruch wymuszony: może się poruszać tylko po łuku ABC (rys. 375); ciężar więc odchylonego wahadła P rozkłada się na dwie siły, D i R, z których pierwszą znosi opór nici, składowa zaś kinetyczna R usiłuje sprowadzić wahadło do położenia równowagi B. Skutkiem jednak bezwładności, wahadło przechodzi dalej po za B, aż wznosi się do tej samej wysokości ($AB=CB$), wtedy bowiem praca włożona równa się pracy wykonanej.



Rys. 375.
Wahadło matematyczne.

Ponieważ przyczyny ruchu, ciężkość i bezwładność, działają stale, wahadło powinnoby się poruszać wiecznie.. W rzeczywistym jednak wahadle, fizycznym, ruch hamują stopniowo nieuniknione przeszkody: tarcie, opór powietrza, niedosknała sztywność nici.

4. Teorja wahadła.. 1) Ruch wahadła. Z rozkładu siły P, wyrażającej ciężar wahadła matematycznego, oraz z podobieństwa trójkątów lh i DP wynika:

$$R = P \cdot \sin \alpha.$$

Widać stąd, że siła R, poruszająca wahadło, nie jest stała; w miarę spadania wahadła od A zmniejsza się kąt α, a z nim i wartość siły R. Stąd ruch wahadła ku dołowi jest niejednostajnie przyśpieszony; największą prędkość osiąga w pionowym położeniu B. Dalej prędkość maleje i ruch przechodzi w niejednostajnie opóźniony, bo składowa kinetyczna (siła pędząca) zmienia kierunek i wartość, aż do — R w położeniu C. Ruch więc wahadła jest prostym ruchem harmonicznym.

2) Przemiana energji. Ruch wahadła stanowi przykład ciągłej zamiany energji potencjalnej na kinetyczną i nawzajem. Gdy wahadło o owadze $P=mg$ podniesiemy od B do A, t. j. na wysokość $l - h$, wykonywamy pracę $mg\ (l - h)$, która stanowi energję potencjalną wahadła. Przy spadaniu energja ta przemienia się w kinetyczną; że zaś szybkość, jaką wahadło posiada w najniższym punkcie B, jest taka sama, jak gdyby ono spadło pionowo do B, czyli z wysokości $l - h$, gdyż szybkość nie zależy od postaci toru (§ 63, art. 5), przeto szybkość $v = \sqrt{2g\ (l-h)}$, a energja kinetyczna $= \frac{1}{2} mv^2 = \frac{1}{2} m \cdot 2g\ (l - h)$. Powyższa energja kinetyczna sprawia, że wahadło nie może się zatrzymać w położeniu pionowym,

ale się wznosi po za B, przyczym energja zamienia się stopniowo na potencjalną. Całkowita zamiana dzieje się za wzniesieniem o $l-h$; t. j. do C; odchylenia zatym od pionu w obie strony są jednakowe.

3) Czas wahnienia t. Jeżeli kąt odchylenia wahadła jest niewielki, np. nie przekracza 2^0 lub 3^0, można łuk brać za cięciwę, czyli amplituda $MB = x$.

Stosując tu wzór na okres wahań $T = 2\pi \sqrt{\frac{r}{a}}$, czyli czas wahnienia $t = \pi \sqrt{\frac{r}{a}}$, należy zamiast r podstawić $x = l \sin \alpha$, zamiast a jego wartość z równości $R = P \sin \alpha$, gdzie $R = ma$, oraz $P = mg$, zatym $a = g \sin \alpha$.

$$\text{Stąd } t = \pi \sqrt{\frac{x}{a}} = \pi \sqrt{\frac{l \sin \alpha}{g \sin \alpha}} = \pi \sqrt{\frac{l}{g}}.$$

5. Prawa wahań. Z teorji wahadła wynika, że dla wahań o małe obszerności

$$\text{czas wahnienia } t = \pi \sqrt{\frac{l}{g}}.$$

(t w sekundach, l w cm, g w cm/sek²)

Wzór powyższy wyraża następujące prawa:

Czas wahnienia

a) jest w stosunku prostym do pierwiastka z długości wahadła;

Wahadło 4 razy dłuższe waha się 2 razy wolniej, 9 razy dłuższe 3 razy wolniej i t. d.

b) jest w stosunku odwrotnym do pierwiastka z przyśpieszenia ciężkości, zatym zależy od szerokości geograficznej, a także od wyniesienia wahadła nad poziomem morza;

Wahadło, bijące pod równikiem ($g = 9{,}78$ m) sekundy, uderza pod biegunem ($g = 9{,}83$ m) raz na 0,99745 sek, czyli na dobę daje o 220 wahań więcej.

c) nie zależy od obszerności wahań czyli amplitudy, t. j. wahania wszystkie są równe co do czasu, czyli izochroniczne;

Wahania większe AC i mniejsze MN trwa jednakowo długo, jeżeli odchylenie α i β nie przekracza 2^0 lub najwyżej 3^0.

d) nie zależy od ciężaru, bądź masy wahadła. Wynika to już stąd, że wszystkie ciała spadają równie prędko.

Wahadła korkowe, drewniane i żelazne, ciężkie i lekkie, kuliste lub nieforemne — wszystkie wahają się jednakowo, przy równej ich długości l.

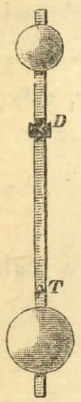
Nadto wpływ bezwładności sprawia, że wahadło zachowuje niezmiennie płaszczyznę wahań (por. rys. 37).

6. Wahadło sekundowe, t. j. wahające się raz na sekundę, ma rozmaitą długość, zależnie od szerokości geograficznej danego miejsca. Z podstawienia $t' = 1$ we wzorze na t wypada:

Długość wahadła sekundowego $l = \frac{g}{\pi^2}$.

W Warszawie $l = 99{,}4$ cm (prawie 1 m).

Wogóle długość wahadła sekundowego mało się różni od 1 metra: na biegunie = 0,996 m, na równiku 0,991 m.



Rys 376. Wahadło fizyczne.

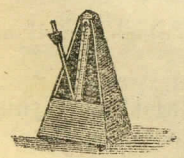
7. Wahadło fizyczne czyli **złożone** stanowi każde ciało, kołyszące się równomiernie na osi. Dla wahadła ciężarowego oś powinna się znajdować powyżej środka ciężkości.

Zwykle wahadło w zastosowaniach ma postać pręta (rys. 376), obciążonego u dołu lub na obu końcach. Wahadło fizyczne waha się prędzej, niż matematyczne tej samej długości, jeżeli się liczy całkowitą długość wahadła fizycznego.

Każde bowiem wahadło fizyczne można uważać jako zbiór wahadeł prostych czyli matematycznych. Ponieważ krótsze z tych wahadeł, każde z osobna, poruszyłyby się prędzej, oddziaływają one przyśpieszająco na dłuższe wahadła, i cały układ zostaje zmuszony do wahania szybszego, niż wahadło matematyczne równej długości.

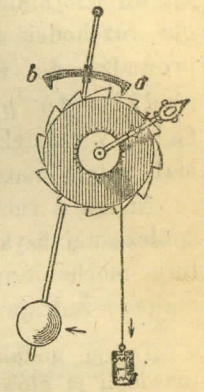
Długością sprowadzoną albo zredukowaną (l) wahadła fizycznego zowie się długość wahadła matematycznego, któreby poruszało się z szybkością taką samą, jak fizyczne. Punkt (T) w wahadle fizycznym, do którego liczy się długość (l) matematycznego o równym okresie, zowie się *środkiem wahań*. Ma on tę własność, że wahadło odwrócone, t. j. zawieszone za środek wahań T, porusza się z taką samą szybkością, jak pierwej, przy zawieszeniu za oś D. Wahadło, które można zawieszać w ten sposób, zowie się *rewersyjnym*.

8. Zastosowania. Doświadczalne stwierdzenie obrotu ziemi (doświadczenie Foucault'a, § 14, art. 1). — Oznaczanie przyśpieszenia ziemskiego g, czyli badanie siły grawitacji, przez zliczenie wahań w danej miejscowości, w ciągu dłuższego czasu; stąd wnioski co do rzeczywistego kształtu ziemi.— Obliczanie momentu bezwładności. — Obliczanie siły uderzenia pocisków armatnich, na zasadzie odskoku ciężkiego wahadła (*wahadło balistyczne*). — Dokładne liczenie sekund, np. przy maszynie Atwooda; pt. wahadło sekundowe. — Ocena równowagi na wadze z jej kołysania: zamiast czekać przy ważeniu, aż waga się uspokoi, obserwuje się, czy odchylenia skazówki są w obie strony równe.


Rys. 377. Metronom.

Metronom (ryś. 377) czyli licznik taktu w muzyce, posiada wahadło obracające się na osi nisko położonej i obciążone znacznie u dołu; ciężarek przesuwany na wystającym do góry pręcie wahadła służy do zwolnienia biegu.

Zegar (Huyghens 1660, rys. 378) stanowi główne zastosowanie wahadła, mianowicie dwu jego własności: że wahania zależą od długości wahadła i że są izochroniczne. Główną część zegara stanowi mechanizm kółkowy, poruszany ciężarem lub sprężyną, oraz wahadło. Ciężar, spadając powoli, obraca kółko zębate; ruch kółka, podobnie jak spadek ciężaru, byłby przyśpieszony, gdyby nie *wychwyt ab*, który za każdym ruchem wahadła zaczepia o ząb kółka. Kółko więc posuwa się za każdym wahaniem o jeden ząbek; równość wahań sprawia, że kółko obraca się ruchem drgającym o stałym okresie, zatym każdy jego obrót trwa jednakowo długo; podobnież porusza się skazówka, osadzona na osi kółka. Powiadamy tedy, że zegar idzie „równo".— W zegarze sprężynowym ruch bez wahadła byłby opóźniony; sprężyna bowiem, obracająca kółko, w miarę rozkręcania się, działa coraz słabiej. Wahadło i tutaj sprawia w podobny sposób „równy" bieg zegara.



Rys. 378. Zegar wagowy.

Nawzajem wahadło w każdym zegarze doznaje w chwili zetknięcia z kółkiem pewnego popędu, który je stale utrzymuje w ruchu.

W zegarkach kieszonkowych wahadło utrzymuje w ruchu cieniutka sprężynka, zwana włosem, a ciężar wahadła jest zrównoważony, skutkiem czego nie ma on znaczenia, i zegarek powinien iść jednakowo w każdym położeniu.

H) RUCH FALOWY.

§ 73. Ruch falowy w ogólności.

1. Powstawanie ruchu falowego. Ruch drgający jednego punktu materjalnego pobudza do ruchu sąsiednie punkty, czyli okoliczne cząstki ciała.

Ruch drgający ciała udziela się jego otoczeniu, tak iż cząstki sprężystego ośrodka, gdzie ciało się znajduje, nabierają takiegoż ruchu drgającego. Np. gdy wahadło potrąci drugie takież wahadło, wprawia je w ruch; podobnież trzecie, czwarte i t. d.

W ogóle ruchy harmoniczne rozchodzą się w ośrodku sprężystym na wszystkie strony; takie rozchodzenie się drgań zowiemy *ruchem falowym*.

Przykład najpospolitszy dają fale wodne, które powstają, gdy padnie kamień na spokojną powierzchnię wody; stąd pochodzą nazwy: fala, grzbiet fali, dolina fali, stosowane do rozmaitych ruchów falowych, zarówno w teorji, jak w rzeczywistości.

Kołysanie się łanu zboża lub trzciny za podmuchem wiatru. — Ruch sznura przy trzaskaniu z długiego bata.

2. Znaczenie ruchu falowego. Fizyka właściwa, jako nauka o energji we wszystkich jej objawach, dąży do zbadania, w jaki sposób energja rozchodzi się w przestrzeni. Wszelkie doświadczenia i rozważania prowadzą do wniosku, że najpospolitszym środkiem w przyrodzie do przenoszenia energji na odległość jest ruch falowy cząstek materji lub eteru; niekiedy tylko przenosi się też masa ciał, zatym materja.

Nauka o ruchu falowym czyli *teorja undulacyjna* stanowi podwalinę spółczesnej fizyki teoretycznej; stosuje się ona zarówno do zjawisk natury mechanicznej, jako też do głosu, ciepła, oraz promieniowań rozmaitego rodzaju: świetlnych, chemicznych, elektrycznych.

Teorję undulacyjną zapoczątkował Huyghens w roku 1678; następnie rozwinęli ją głównie: Weber dla fal wodnych, Ohm i Helmholtz dla fal głosowych, Fresnel i Young dla świetlnych, Maxwell i Hertz wprowadzili dziedzinę fal elektromagnetycznych.

3. Środowisko przenoszące energję. Pewne postaci energji, jak: ruch, głos, ciepło, rozchodzą się za pośrednictwem materji, której cząstki wprawiają w drganie; inne zaś, jak światło, promienie t. zw. cieplne, chemiczne, elektryczne rozprowadza środowisko niematerjalne, zwane eterem. Np. uderzenie młota, trzęsienie ziemi, huk wystrzału rozchodzą się w skałach, metalach, wodzie, powietrzu; żar i blask słońca, sygnały elektryczne dochodzą nas za pomocą drgań eteru, wypełniającego wszechświat.

4. Sposoby przenoszenia energji. 1) Za pomocą materji.

a) Każde ciało, będące w ruchu, zawiera pewien zasób energji, a biegnąc coraz dalej, t. j. posiadając ruch postępowy, przenosi w sobie tę energję na odległość; zachodzi tu zarazem przenoszenie masy. Jest to więc przenoszenie energji wraz z materją, nie mające nic wspólego z ruchem falowym.

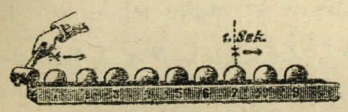
Jeżeli mnóstwo drobnych ciałek posuwa się we wspólnym kierunku, możnaby je porównać do cząstek materjalnych, przenoszących energję.

Przykłady. Salwa karabinowa. — Bombardowanie. — Deszcz i grad. — Zapach kwiatów.

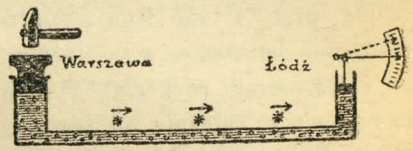
b) Powszechnie materja bywa tylko pośrednikiem w wędrówce energji: przez nią odbywa się przebieg i wymiana energji, cała zaś masa materji pozostaje na miejscu, tylko jej cząstki zmieniają chwilowo położenie, poczym wracają do równowagi poprzedniej. Słowem, przenosi się energja, ale nie materja; zachodzi przytym ruch falowy.

Przykłady. Przez kij można wbić gwóźdź w ścianę, przyczym kij po każdym uderzeniu odskakuje napowrót. — Przez ziemię i mury domu dochodzą wstrząśnienia wozu, jadącego ulicą. — Od wybuchu dynamitu pękają szyby w okolicy, nieraz bardzo rozległej.

Uderzenie kul sprężystych, zawieszonych jak wahadła, objaśnia rys. 345. Tak samo przebiega uderzenie kul, leżących w jednym rzędzie poziomym, np. na stole, w rowku między dwiema listwami (rys. 379). Uderzamy, np. na stole, w rowku między dwiema listwami (rys. 379). Uderzając pierwszą kulę młotkiem, zauważymy, że ta potrąci drugą i zatrzyma się po tym drgnięciu; druga trąci trzecią i również się zatrzyma i t. d., aż ostatnia kula odskoczy tak, jak gdyby ją samą młotkiem uderzono. Ruch ten wymaga czasu: np. po upływie 1 sekundy drgnie siódma kula, po upływie 2 sekund czternasta i t. d.



Rys. 379.
Ciała stałe przenoszą energję.



Rys. 380.
Woda przenosi energję.

Uderzenie przez wodę (rys. 380): jeżeli rura wodociągowa łączy dwa krańce miasta, to za uderzeniem tłoka, zamykającego jeden koniec rury, po niejakim czasie odskoczy na drugim jej końcu; można to dostrzedz łatwiej na skazówce, połączonej z tłokiem. Gdyby długość rury wynosiła tyle, co odległość Warszawy od Łodzi, t. j. 112 km w linji prostej, to przez wodę w ciągu jednej sekundy wstrząśnienie dojdzie na odległość 1,4 km, po 2 sek. na 2,8 km i t. d., tak iż dopiero po 80 sekundach tłok łódzki odczułby uderzenie młota w Warszawie.

Pomienione wstrząśnienia mogą stanowić fale głosowe: ucho, przyłożone do jednego tłoka, usłyszeć może odgłos uderzenia drugiego.

Porównania. Przewodzenie ciepła w prętach metalowych. — Przenoszenie działania chemicznego w tlejącym loncie, w trociczce.

2) Za pomocą eteru powszechnego (§ 7, art. 4). W wielu objawach materja nie bierze wcale udziału w przenoszeniu pracy, jaką wydaje np. energja promienista: ciepło promieniste, światło, drgania elektryczne. Przyjąć wtedy musimy istnienie jakiegoś czynnika, złożonego z cząstek sprężystych, a niezmiernie subtelnych, nieposiadających wyraźnej masy, słowem jakby niematerjalnych; nieokreślony ten czynnik, *eterem* zwany, drganiem swych cząstek, rozprowadza energję promienistą, podobnie jak ruch cząstek wody, jak potrącanie wzajemne kul rozprowadza energję uderzenia, mechaniczną. I tutaj istnieć musi tylko ruch cząsteczkowy (molekularny), nie zaś wędrówka eteru z miejsca na miejsce; zatem przenosi się tylko energja, cząstki zaś eteru pozostają na miejscu, wahając się w ciasnych granicach.

5. Rodzaje fal. Zależnie od środowiska, w jakim powstają fale, i od sposobu ich wzbudzania, fale mogą być poprzeczne i podłużne.

Poprzecznym zowiemy ruch falowy, skoro cząstki drgają prostopadle do kierunku, w jakim ruch postępuje; np. cząstki wody na powierzchni, falującej pod wpływem spadku kamienia (w głębi ruch przechodzi stopniowo na podłużny).

Podłużnym jest ruch falowy, gdy cząstki drgają w kierunku rozchodzenia się ruchu; np. cząstki powietrza w rurach podczas gry na organach.

W tym samym ciele stałym mogą powstawać fale obu rodzajów; np. struny, pręty i rury drgają poprzecznie od pociągnięcia smyczkiem lub uderzenia bocznego, a podłużnie od pocierania w kierunku ich długości.

Odróżniamy ruch fal linjowy, powierzchniowy i przestrzenny, zależnie od tego, czy chodzi o ruch cząstek ułożonych na jednej linji, np w strunie lub sznurze, na powierzchni, np. błonie bębna, oraz w przestrzeni, np. w powietrzu; te ostatnie fale trójwymiarowe mamy na względzie przy rozchodzeniu się wszelkich fal, np. trzęsienia ziemi, głosu, światła, elektryczności.

§ 74. Fale poprzeczne.

1. Fale wodne (falowanie cieczy w ogólności *) nadają się najdogodniej do badania poprzecznego ruchu falowego. Kamień, rzucony na spokojną powierzchnię wody, wytwarza na niej pierścienie współśrodkowe, naprzemian wklęsłe i wypukłe. Wydaje się, jak gdyby woda płynęła od środka tych pierścieni na wszystkie strony.

W rzeczywistości cząstki wody pozostają na miejscu, podnosząc się tylko i opadając; okazuje to np. pływające drewienko lub piana. Złudzenie pochodzi stąd, że nie dostrzegamy cząstek wody: wzrok biegnie za grzbietem fali, który istotnie się posuwa: słowem, przenosi się ruch, ale nie materja, która tylko pośredniczy w przenoszeniu ruchu.

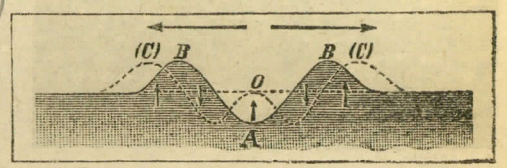
Im dalej leżą cząstki wody od punktu zaburzenia O, tym później dochodzi do nich ruch falowy.

*) W cieczach mogą powstawać tylko fale podłużne, ponieważ wynikają one ze zmiany gęstości, a więc i objętości; podobnież w gazach. Poprzeczne fale powstają w ciałach stałych, gdyż wynikają ze zmiany kształtu ciał. Fale poprzeczne na powierzchni cieczy (nie wewnątrz cieczy) o jakich mowa, są falami grawitacyjnymi, powierzchniowymi; ich charakter poprzeczny wynika oczywiście z kierunku siły ciężkości, prostopadłego do poziomu cieczy, po którym fale się rozchodzą.

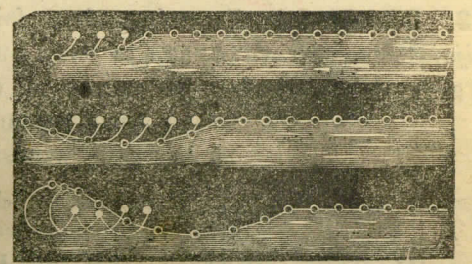
Ruch cząstek wody ma kierunek prostopadły do biegu fal (por. skazówki krótsze i dłuższe); stąd fale wodne zowią się *poprzecznymi*. Część wypukła fali zowie się *grzbietem* (górą), część wklęsła *doliną*; obie razem stanowią jedną falę. *Długość fali* więc stanowi odstęp (BB, rys. 381) od środka grzbietu do środka drugiego grzbietu, albo od doliny do doliny.

Ruch cząstek jest wahadłowy, drgający, każda bowiem cząstka przechodzi perjodycznie przez położenie równowagi (O). *Amplituda* czyli obszerność wahań, t. j. największe wychylenie cząstek wody, ma tu kierunek pionowy (OA). Całkowity czas ruchu cząstki w obie strony od położenia równowagi stanowi *okres wahań* (T).

Rys. 381 wyobraża w przekroju pionowym falę poprzeczną. Kamień pada na poziom wody w O, wypierając wodę, która tworzy tu wklęsłość A; wyparta woda tworzy naokoło wypukłość BB. Po chwili cząstki w A dążą z powrotem do stałego poziomu O, a przekraczając go, podobnie jak wahadło skutkiem nabytego pędu, tworzą wypukłość nad O. W tym samym czasie cząstki w B opadają, tworząc wklęsłość, a pierwotna wypukłość B posuwa się do C i t. d.



Rys. 381. Fala poprzeczna.



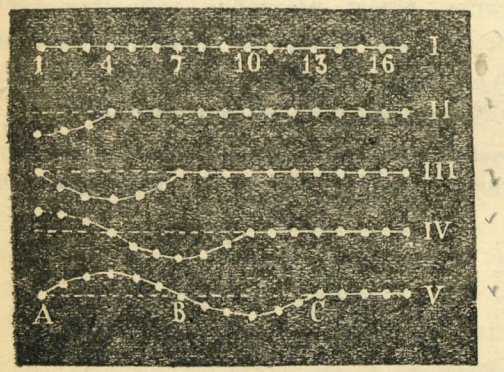
Rys. 382. Fala wodna.

Ściślejsze badanie wykazuje, że cząstki wody, leżące na powierzchni, nie poruszają się prosto, po linjach pionowych, ale w płaszczyznach pionowych, mianowicie każda cząstka zakreśla koło, którego płaszczyzna zawiera kierunek biegu fali; amplitudy są prostopadłe do biegu fali. W większej głębokości cząstki zakreślają elipsy coraz bardziej wydłużone w kierunku poziomym, tak iż ruch cząstek przechodzi wreszcie w podłużny. Ruch rzeczywisty cząstek wody na powierzchni objaśnia rysunek 382.

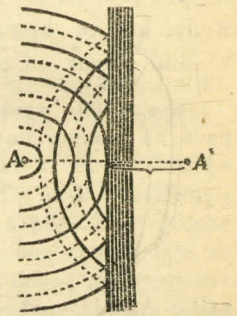
2. Pochodzenie fali poprzecznej. Ażeby okazać pochodzenie fal poprzecznych, przypuśćmy szereg cząstek ciała sprężystego, ułożonych na linji prostej (rys. 383). Wzajemne przyciąganie cząstek czyli siła spójności utrzymuje takowe w pewnych stałych odległościach (I). Skoro cząstkę I jakaś siła prostopadle wysunie z szeregu, pociąga ona za sobą cz. 2 i 3, tak iż po niejakiej chwili szereg będzie miał położenie II; cząstka 1 doszła tu do najniższego miejsca, gdy ruch dosięgnął cząstki 4. Gdy cz. 1 powróci do pierwotnego swego miejsca, ruch przejdzie w tym czasie do cząstki

7 (III). Następnie cz. 1 dąży do góry i dochodzi najwyższego położenia, a ruch postępowy dosięga cząstki 10 (IV). Wreszcie cząstka 1 powraca do szeregu, ruch zaś postępowy obejmuje wszystkie cząstki do 13 (V).

W danej chwili (V) mamy obraz fali całkowitej, złożonej z grzbietu i doliny. Podobnież tworzą się dalsze fale, które biegną ruchem postępowym, gdy cząstki materji wykonywają na miejscu wahania (drgania) prostopadłe do biegu fal. W ten sposób ruch falowy może się przenosić na setki mil.

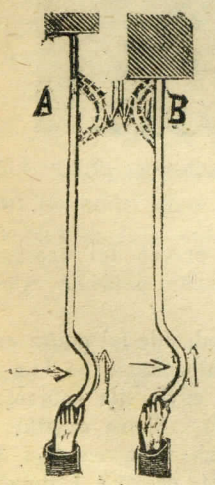


Rys. 383. Istota fali poprzecznej.



Rys. 384.
Odbicie fal wodnych.

3. Odbicie fal. Za uderzeniem fal wodnych o płaską ścianę, *odbijają się* one; czyli wracają w innym kierunku. Wydaje się, jakgdyby fale pochodziły z punktu A' (rys. 384), położonego po za ścianą symetrycznie względem źródła fal A: skoro punkt A się wznosi, punkt A' opada.



Rys. 385.
Odbicie fali w sznurze.

W ciałach stałych, mianowicie prętach, sznurach, fala odbija się w ten sposób, że grzbiet fali powraca jako grzbiet, czyli zwrócony w tę samą stronę, jeżeli koniec ciała jest ruchomy; skoro zaś ciało umocowano sztywno, grzbiet odbija się jako dolina fali, czyli zwraca się w stronę przeciwną.

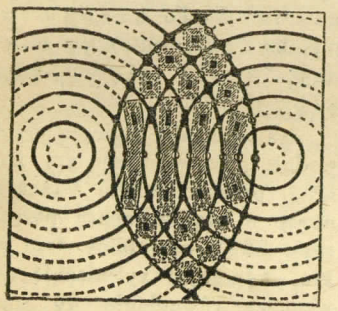
Doświadczenie (rys. 385). Najlepiej udaje się wywołanie fal poprzecznych oraz ich odbicie za pomocą rurki gumowej. Przywiązawszy rurę do belki za pomocą wiotkiej nici (A), wypręża się rurę, trzymając za drugi koniec, i uderza się tutaj prostopadle. Tworzy się wklęsłość, która postępuje ku A i po odbiciu od końca sznura powraca jako wklęsłość do ręki. Zjawisko to można porównać z uderzeniem kuli sprężystej o drugą, posiadającą masę mniejszą; kula uderzająca, która odpowiada tu wolnemu końcowi rury, zachowuje wtedy kierunek pierwotny (§ 66, art. 7, przypadek 2-d).

Przy umocowaniu sztywnym końca (B), np. przybiciu do belki, wklęsłość po dojściu do końca sznura odbija się w postaci odwróconej, jako wypukłość. Tutaj nadaje się porównanie do uderzenia kuli o drugą, posiadającą większą masę, przyczym pierwsza kula zmienia kierunek (§ 66, art. 7, prz. 2-e).

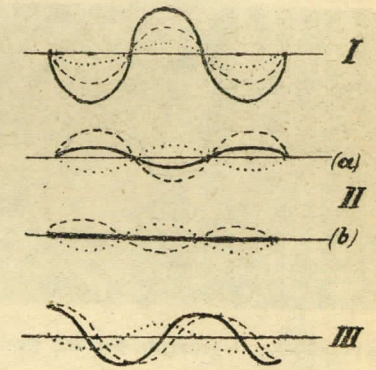
Pomieniony przebieg fal w rurce sprężystej lub sznurze udaje się łatwiej wywołać przez umiejętne szarpnięcie, jak na rys. 388.

4. Interferencja fal. Skoro się spotykają dwa ruchy falowe, powstają fale złożone, których przebieg na powierzchni wody wyobraża rys. 386, dla fal o długości jednakowej. Gdzie spotykają się dwa grzbiety fal, cząstki wody wznoszą się na wysokość podwójną; gdzie spotykają się dwie doliny, powstaje wklęsłość podwójna; w miejscach spotkania się grzbietu z doliną cząstki są w danej chwili nieruchome.

Podobne oddziaływanie wzajemne zowie się *interferencją* (krzyżowaniem) i wykreśla się podobnie jak interferencja ruchu harmonicznego (rys. 386).



Rys. 386.
Interferencja fal poprzecznych.



Rys. 387.

Postać fal wypadkowych zależy od różnicy faz obu ruchów, każdą falę można wykreślić, dodając fale składowe (rys. 387).

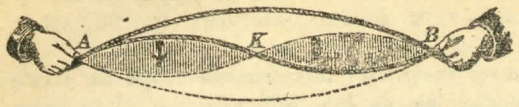
Skoro obie fale różnią się o cały okres, t. j. o całą długość fali (I), wypadkowa ma te same fazy, amplitudę zaś równą sumie składowych.

Jeżeli ruchy różnią się o pół fali (II*a*), to fala wypadkowa ma amplitudę równą różnicy obu składowych. Gdy amplitudy fal o różnicy pół okresu są jednakowe, oba ruchy falowe znoszą się wzajemnie (II*b*).

Gdy różnica nie wynosi ani całkowitej, ani połowy długości fali, natenczas fala wypadkowa posiada i fazę, i amplitudę odmienną (III).

5. Fale stojące. Fale wodne po odbiciu od ściany spotykają się z falami uderzającymi. Stąd pewne cząstki mają stale fazę tę samą, t. j. idą wciąż razem tak w ruchu do góry, jak na dół; tutaj amplitudy obu fal się dodają; inne zaś cząstki różnią się w fazie stale o $\frac{1}{2}$ okresu, czyli o $\frac{1}{2}$ długości fali, zatym amplitudy ich się znoszą, i cząstki nie poruszają się wcale. Do tych należą cząstki przy ścianie oraz wszystkie odległe stąd o pół fali (punkty spotkania linji ciągłych i kropkowanych między A i A', rysunek 384).

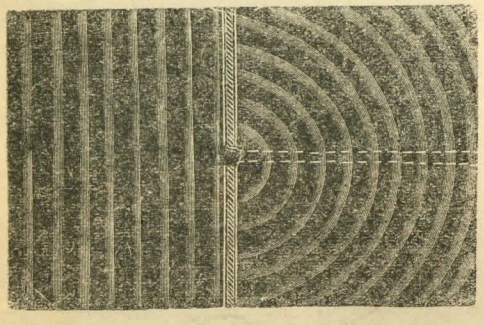
Fale, powstające z interferencji fal odbitych z pierwotnymi, zowią się falami stojącymi; zasadniczą ich cechę stanowi istnienie *węzłów*, czyli miejsc nieruchomych, pomiędzy którymi znajdują się części drgające, czyli *międzywęźla* (wzdęcia). Węzły przypadają w odstępach co pół fali.



Rys. 388. Fale stojące w sznurze.

Fale stojące łatwo wywołać w sznurze, uwiązanym jednym końcem, szarpiąc rytmicznie za drugi koniec, albo w sznurze ujętym oburącz (rys. 388). Im raptowniej się porusza rękoma, tym więcej powstaje węzłów *K*.

6. Dyfrakcja czyli **uginanie fal.** Gdy fale wodne spotykają przegrodę częściową, tak iż mogą się przedostać obok jej brzegu lub przez otwór, wymijają tę przegrodę, zmieniając kierunek. Takie zboczenie fal koło brzegu ściany, która im drogę zagradza, zowie się *uginaniem* albo *dyfrakcją*.



Rys. 389. Uginanie się fal wodnych.

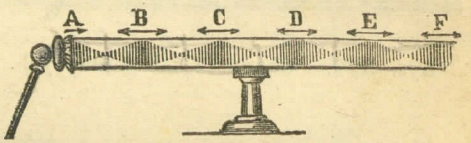
Najwyraźniej uginają się fale wodne, gdy w obszernym zbiorniku, przegrodzonym ścianą pionową z wąską szparą pośrodku (rys. 389), wywołamy fale płaskie, uderzając rytmicznie deską pionową, równolegle do ściany. Wtedy fale, które uderzają o ścianę prostopadle, po za otworem nie postępują w tym samym kierunku, czyli wąskim pasem, zaznaczonym kreskami, ale rozchodzą się z otworu na wszystkie strony, jak gdyby tutaj brały początek. Zjawisko to doprowadziło do odkrycia zasady Huyghensa (pt. poniżej).

Uginanie się fal tłomaczy, że drobne, choć liczne, przeszkody w wodzie, jak sitowie w stawach, okratowanie łazienek, pale i drzewa z wody sterczące, nie powstrzymują ruchu falowego, np. kołysania łódki. Natomiast długie tamy pozostawiają za sobą wodę spokojną, z wyjątkiem powierzchni po za końcem tamy, gdzie falowanie dochodzi skutkiem dyfrakcji. Obszar spokojny po za tamą, wolny od falowania jest jakby cieniem dla fal wodnych, podobnie jak przestrzeń pozbawiona światła jest cieniem dla fal świetlnych (pt.).

§ 75. Fale podłużne.

1. Fale powietrzne (falowanie gazów w ogólności) nadają się szczególnie do badania podłużnego ruchu falowego. Powietrze bowiem i wogóle gazy, jako ciała w najwyższym stopniu ściśliwe i doskonale sprężyste, podlegają z łatwością zgęszczeniom i rozrzedzeniom, szybko po sobie następującym; w ten sposób powstają w nich *fale podłużne*.

Jeżeli np. w powietrzu kołysze się wahadło, udziela swego ruchu cząstkom powietrza, które również odbywają wahania tam i napowrót, to skupiając się, to oddalając od siebie: stąd pochodzą naprzemian zgęszczenia i rozrzedzenia.



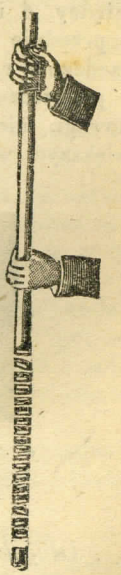
Rys. 390.
Obraz fal powierznych w rurze.

Podobne zjawisko ma miejsce przy poruszaniu tłoka w rurze lub uderzeniu błony, zamykającej rurę (rys. 390). Zgęszczenia oznaczono tu cieniami, rozrzedzeniom odpowiadają miejsca czyste.

Każda cząstka posiada ruch wahadłowy, t. j. posuwa się i cofa naprzemian wzdłuż rury, pozostając zawsze w obrębie jednej warstwy (skazówki *B*, *C*, *D*...) fale zaś postępują coraz dalej, również w kierunku rury; przenosi się więc ruch, ale nie materja.

Zasadniczą różnicę fal podłużnych od poprzecznych stanowi to, że w falach podłużnych cząstki drgają w tym samym kierunku, w jakim biegną fale.

W ciałach stałych mogą powstawać również fale podłużne, np. przy pocieraniu struny, pręta lub rury w kierunku ich długości. W płynach, wewnątrz ich masy, powstają tylko fale podłużne, np. w wodzie od wstrząśnień podwodnych, od dzwona uderzanego pod wodą.

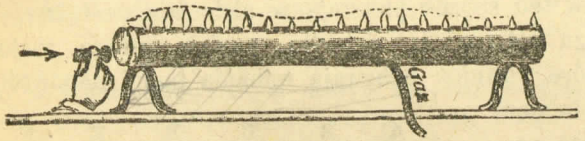


Rys. 391.

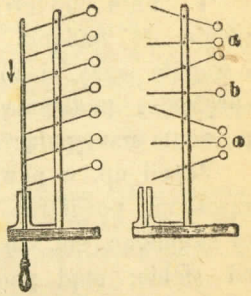
Doświadczenia. 1) Rura szklana, pocierana mocno w jednej połowie mokrą szmatą, może osiągnąć tak silne drgania podłużne, że druga jej połowa rozpadnie się na kawałki, postaci obrączkowej (doświadczenie Savarta, rysunek 391).

2) Ażeby okazać przebieg ruchu falowego w gazach, łączy się obszerną rurę poziomą, opatrzoną u góry rzędem dziurek, z kranem gazowym (rys. 392). Po zapaleniu gazu nad rurą, każde trącenie błony, zamykającej rurę, powoduje faliste migotanie płomieni: w miejscach zgęszczenia płomyki się powiększają, w rozrzedzeniach maleją.

3) Naśladować można fale podłużne w następującym przyrządzie (rysunek 393). Na słupie umocowano szereg drążków, obracających się każdy lekko na osi i starannie zrównoważonych, aby wszystkie miały położenie poziome; każdy drążek ma na końcu papierek okrągły, wyobrażający cząstkę. Obok przykłada się listwę I tak, aby dotykała



Rys. 392. Okazanie fal podłużnych w gazie.

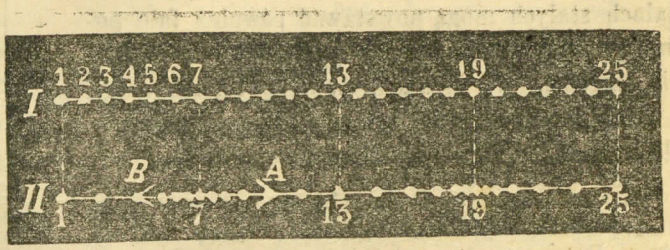


Rys. 393. Przyrząd do fal podłużnych.

drążków. Za pociągnięciem listwy, każdy papierek porusza się jednakowo, ale następne trochę później od poprzednich; stąd powstają miejscami zbliżenia papierków (zgęszczenia *a*), miejscami zaś oddalenia (rozrzedzenie *b*).

W długiej sprężynie (rys. 366) można również wywołać fale podłużne, pociągając ją raptownie ku górze o 1 lub 2 cm.

2. Pochodzenie fali podłużnej można wyrozumieć z rys. 394. Rząd I wyobraża szereg cząstek w spoczynku, rząd II te same cząstki, poruszone w kierunku ich szeregu. Cząstka 1 posuwa cząstkę 2, ta cząstkę 3 i t. d., przez co cząstki chwilowo się zbliżają, tworząc zgęszczenie (na rysunku między *A* i *B*), poczym natychmiast oddalają się nawzajem, przekraczając poprzednie położenia tak, iż powstaje rozrzedzenie. Zgęszczenie i rozrzedzenie razem wzięte tworzy jedną falę, Przy zestawieniu fal podłużnych z poprzecznymi, środek zgęszczenia i rozrzedzenia odpowiada miejscom równowagi, miejsca zaś naturalnej gęstości w fali podłużnej odpowiadają największym wychyleniom w fali poprzecznej.



Rys. 394. Istota fali podłużnej.

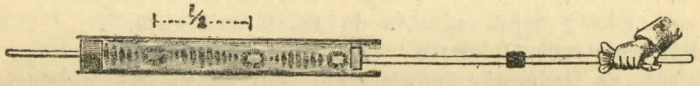
Długość fali stanowi odstęp od środka zgęszczenia do środka następnego zgęszczenia, albo od rozrzedzenia do rozrzedzenia: na rysunku od 7 do 19, albo od 1 do 13. Sam środek zgęszczenia, np. 7, 19, jako też środek rozrzedzenia, 1, 13, 25, zawiera cząstki w położeniu równowagi (chwilowej), *Amplituda* ma kierunek wzdłuż biegu fali.

3. Interferencja, odbicie i uginanie fal podłużnych zachodzi podobnie, jak dla fal poprzecznych.

Wzajemne oddziaływanie czyli *interferencja* dwu ruchów o drganiach podłużnych polega na tym, że gdy zgęszczenie trafia na zgęszczenie, fale się wzmacniają, gdy zaś zgęszczenie trafia na rozrzedzenie, fale się osłabiają, a nawet znoszą zupełnie.

Przy uderzeniu o ścianę fale powietrza i wogóle fale podłużne zwracają się w innym kierunku, czyli ulegają *odbiciu*. Skoro ściana jest ruchoma, np. błona, albo poprostu warstwa powietrza, zgęszczenie odbija się jako rozrzedzenie; skoro ściana jest sztywna, zgęszczenie powraca po odbiciu również jako zgęszczenie (objaśnić).

Przez interferencję fali pierwotnej z odbitą powstają *fale stojące*, gdzie w *węzłach* cząstki powietrza nie drgają zupełnie. Węzły są zawsze odległe od siebie o pół fali.



Rys. 395. Fale stojące w rurze.

Doświadczenie (rys. 395). Rurę szklaną, zamkniętą tłokiem, posypuje się wewnątrz proszkiem widłaku (Lycopodium), cienko a równo. Do przeciwnego końca rury wsuwa się pręt metalowy; za pocieraniem wytwarza on fale powietrzne, które przebiegają rurę i odbijają się od tłoka. Drgania powietrza rozpylają proszek ze ścian rury, miejscami zaś proszek skupia się gęściej, mianowicie w węzłach.

§ 76. Teorja ruchu falowego.

1. Fale kuliste. Gdy drganie rozchodzi się z jednego punktu na wszystkie strony, powstają *fale przestrzenne*, czyli *trójwymiarowe*. Powierzchnia, której wszystkie punkty drgają jednakowo i równocześnie, czyli są w tej samej fazie, nazywa się *powierzchnią fali*.

Gdy fale przestrzenne rozchodzą się w ośrodku jednolitym, np. wodzie albo powietrzu o gęstości wszędzie jednakowej, tak iż szybkość fal jest we wszystkich kierunkach jednakowa, wtedy powierzchnia fal jest kulista i same fale zowią się *kulistymi*. Linje proste, łączące środek fali z powierzchnią, stanowią *promienie*; są one prostopadłe do powierzchni fali.

Małą część powierzchni fali możemy uważać jako płaską, a promienie na nią padające jako równoległe do siebie; stąd nazwa *fale płaskie*. Postępującą część powierzchni zowiemy *czołem fali*.

W teorji niniejszej roztrząsamy zasadnicze własności fal kulistych.

2. Energja fal. Fale materjalne wykonywają pracę, nieraz bardzo znaczną, w sposób widoczny. Praca ta jest miarą energji, jaką przenosi ruch falowy, i jest tym większa, im większą gęstość ma środowisko falujące, im prędzej faluje oraz im obszerniejsze są wychylenia, t. j. im większa amplituda.

Ze wzoru na energję ruchu harmonicznego $E_k = 2\pi^2 \frac{mr^2}{T^2}$ (§ 71, art. 3, wzór 8), można napisać, uwzględniając $m = vd$ (§ 6, art. 3), że na każdą jednostkę objętości falującej materji, t. j. gdy $v = 1$, a $m = d$,

$$\text{energja fali } E_f = 2\pi^2 \frac{dr^2}{T^2}.$$

W naturze istnieje niemało przykładów na energję fal. Fala morska wydrąża skały, podmywa i zwala brzegi strome, zamula i podwyższa brzegi niskie. — Fale kołyszą i miotają okrętem. — Fale trzęsienia ziemi zamieniają w gruzy miasta, rozrywają pokłady ziemskie; w dalekiej zaś odległości od środka trzęsienia zdradza się ono zarysowaniem murów, brzęczeniem szyb, kołysaniem obrazów, poruszaniem sprzętów. — Pękanie szyb od huku, opadanie tynku. — We fjordach, w górach spadanie kamieni na odgłos wystrzału.

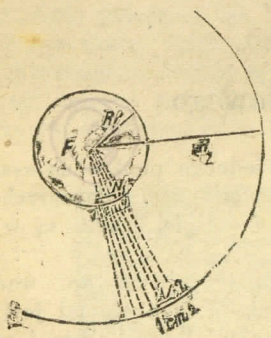
Doświadczenie rys. 391 świadczy o energji fal, wytworzonych w ciele stałym: ruch falowy doprowadza tu do zniszczenia ciała.

3. Natężenie ruchu falowego. Energja ruchu falowego w ciągu sekundy, przypadająca na jednostkę powierzchni fali, zowie się *natężeniem ruchu falowego*. Oznaczając ilość energji na sekundę przez F, natężenie przez N, można je wyrazić dla fali kulistej:

$$\text{natężenie ruchu falowego } N = \frac{F}{4\pi R^2} = \frac{\text{energja na sek}}{\text{powierzchnia}}.$$

Energja cząstki, której drgania rozchodzą się naokoło, musi się udzielać coraz większej liczbie cząstek, musi się więc rozpraszać w stosunku do liczby cząstek czyli do powierzchni fali; natężenie energji musi znacznie słabnąć z odległością, w miarę jak fale się oddalają od środka ruchu.

Tylko dla ruchu linjowego, t. j. dla fali, postępującej w szeregu cząstek na jednej linji (rys. 383 i 394), niema żadnego osłabienia; każda bowiem cząstka oddaje całą swą energję jednej tylko następnej cząstce.



Rys. 396.

Dla fal kulistych istnieje prawo:

Natężenie ruchu falowego jest odwrotnie proporcjonalne do kwadratów odległości. Dla fal, wychodzących z tegoż punktu drgającego o energji F na sek, natężenia N_1 i N_2 dwu fal o promieniach R_1 i R_2 wyraża proporcja:

$$N_1 : N_2 = R_2^2 : R_1^2.$$

Dowód (rys. 396). Natężenie $N_1 = \frac{F}{4\pi R_1^2}$, natężenie $N_2 = \frac{F}{4\pi R_2^2}$; zatym $N_1 : N_2 = R_2^2 : R_1^2$,

Wynika stąd $N_2 = N_1 \frac{R_1^2}{R_2^2}$, albo prościej, oznaczając stosunek $R_2 : R_1$ przez R, gdzie $R > 1$,

$$\text{natężenie } N_2 = \frac{N_1}{R^2}.$$

Wzory powyższe mają zastosowanie w akustyce, optyce, magnetyźmie, elektryczności.

4. Szybkość ruchu falowego zależy od własności ośrodka, przewodzącego fale; nie zależy zaś wcale od okresu drgań, zatym od długości fali, ani od obszerności drgań, czyli amplitudy.

Fale rozchodzą się tym prędzej, im bardziej sprężysta jest materja przewodząca, oraz im mniejszą ma gęstość. Jednakowo zaś prędko rozchodzą się fale małe i wielkie, fale o drganiach szybkich i powolnych.

Posługując się rachunkiem wyższym, Newton wyprowadził następujący wzór na szybkość c ruchu falowego, gdzie d oznacza gęstość przewodnika stałego lub płynnego, E moduł sprężystości (§ 9, art. 5):

$$c = \sqrt{\frac{E}{d}}.$$

Dla gazów należy uwzględnić pracę cieplną cząstek drgających, z powodu dwojakiego ciepła właściwego gazów, czyli do wzoru należy wprowadzić czynnik $k = 1{,}41$ (§ 43, art. 6). Wobec tego szybkość fal w gazach

$$c = \sqrt{k \frac{E}{d}}.$$

Wpływ temperatury oznajmia się ze zwiększaniem szybkości ruchu fal za ogrzaniem przewodnika, a to w stosunku pierwiastka z $(1+at)$, czyli dwumianu rozszerzalności (§ 41, art. 1). Tak więc szybkość c_t przy t^0 wyraża się względem szybkości c_o przy 0^0 zależnością:

$$c_t = c_o \sqrt{1+at}.$$

Przykłady. 1) Szybkość ruchu falowego w głębi wody, np. szybkość głosu, można obliczyć ze ściśliwości wody, której spółczynnik wynosi 0,000 05 (§ 25, art. 3); ciśnienie 1 atmosfery = 1033 . 981 dyn, zatym $E = 1033 \cdot 981 \cdot \frac{100\,000}{5}$; gęstość $d = 1$. Stąd $c = 142\,400$ cm/sek = = 1424 m/sek (por. doświadczenie rys. 380).

2) W powietrzu przy 0^0 szybkość ruchu falowego, np. głosu, wynika z $d = 0{,}001\,293$, $E = 1033 \cdot 981 \cdot 1$, $k = 1{,}41$; stąd $c = 333$ m/sek.

3) W powietrzu o temperaturze pokojowej, wynoszącej 16^0, szybkość $c = 333 \sqrt{1+0{,}00366 \cdot 16} = 340$ m/sek.

5. Zależność szybkości ruchu fal od ich długości oraz okresu, względnie częstości drgań. W czasie całkowitego okresu drgań, t. j. w ciągu czasu T rys. 383), gdy cząstka 1 odbywa drogę od A na dół, do góry przez A i znów na dół do A, ruch falowy dochodzi do cząstki 13, t. j. przebywa drogę AC (rząd V); odległość ta jest długością fali λ. Zatym droga w jednostce czasu, czyli $\frac{\lambda}{T}$

$$\text{szybkość ruchu falowego } c = \frac{\lambda}{T} = \frac{\text{długość fali}}{\text{okres drgania}}.$$

Ponieważ okres T jest bardzo krótki, dogodniej bywa wprowadzić liczbę drgań na sekundę, zwaną *częstością drgań*. Skoro cząstka odbywa n drgań na sekundę, okres jednego drgnienia

$$T = \frac{1}{n} \text{ sek.}$$

Przy zastąpieniu więc T przez $^1/_n$ wypada

$$\left\{\begin{matrix}\text{szybkość ruchu}\\ \text{falowego}\end{matrix}\right\} c = n\lambda \left\{\begin{matrix}\text{częstość}\\ \text{drgań}\end{matrix}\right\} \times \left\{\begin{matrix}\text{długość}\\ \text{fali}\end{matrix}\right\}$$

Wzory powyższe dotyczą zarówno fal poprzecznych, jak podłużnych i mają znaczenie ogólne w fizyce, podobnie jak ich wyniki:

$$\text{długość fali} \quad \lambda = cT, \text{ albo } \lambda = \frac{c}{n}$$

$$\text{okres drgania} \quad T = \frac{\lambda}{c}$$

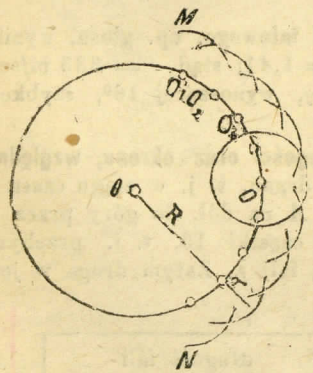
$$\text{częstość drgań} \quad n = \frac{c}{\lambda}.$$

Im więc krótsze są fale, tym większą mają częstość, czyli więcej drgań na sekundę.

Najdłuższe są fale elektryczne, mierzą się nawet na kilometry, fale głosowe mają długość pośrednią, mierzoną w metrach, lub centymetrach; najkrótsze są fale świetlne i wogóle fale promieniowania, nie dochodzą mikrona, t. j. $\frac{1}{1000}$ mm.

6. Zasada Huyghensa (1690). Każdy punkt fali można uważać jako źródło nowego ruchu falowego.

Teoretycznie można zasadę Huyghensa zrozumieć w ten sposób, że każda cząstka fali drga tak samo, jak cząstka pierwotna, która ruch wywołała, czyli jak środek ruchu; może więc sama stać się środkiem ruchu.



Rys. 397.

Na rys. 397 punkty O_1, O_2, O_3... na powierzchni fali kulistej, wychodzącej z O, tworzą od siebie fale również kuliste (jedną z nich w całości nakreślono dokoła O), zwane *falami częściowymi*, czyli *elementarnymi*. Czoła fal elementarnych można uważać jako wspólną powierzchnię kulistą MN o promieniu $(R+r)$.

Doświadczalnie okazuje to dla fal wodnych rys. 389, gdzie czoło fali płaskiej, zatrzymane przegrodą z małym otworem, wytwarza nowy układ fal dokoła tego otworu.

7. Przejście fal do innego środowiska. Gdy fala jakiejkolwiek energji spotyka środowisko o innych własnościach, np. gęstsze, na ich granicy energja dzieli się na trzy części: jedna powraca do tegoż środowiska, jako *fala odbita*, z tą samą szybkością; druga postępuje dalej w nowym środowisku, jako *fala przepuszczona*, z szybkością zmienioną; trzecia zostaje *pochłonięta*, zamieniając się na ciepło.

Na granicy między obu środowiskami, której drobną część możemy uważać za płaską, rozróżniamy zjawiska dwojakie: odbicia fal oraz załamania fal.

Energja pochłonięta, jako ciepło, należy do odrębnego działu fizyki (rozdział V).

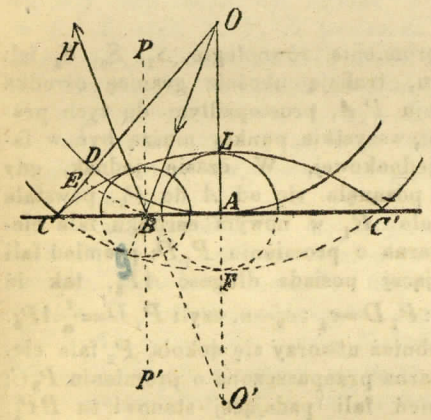
8. Odbicie fal. 1) Fala odbija się od granicy środowiska tak, że powstaje nowa fala, której środek jest w równej odległości po za granicą.

2) Promień padający i odbity leżą w płaszczyźnie prostopadłej do granicy.

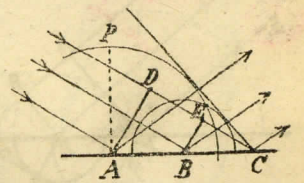
3) Kąt padania fal równa się kątowi odbicia.

Powyższe prawa odbicia fal przypominają prawa odbicia kul sprężystych (§ 66, art. 7, ust. 3).

Dowód (rys. 398) teoretyczny polega na zasadzie Huyghensa. Fala kulista, pochodząca ze środka O, dosięgając granicy w A, daje tu źródło fali elementarnej, której promień rośnie w miarę postępowania fali głównej; gdy fala główna dojdzie do punktu C, naokoło A powstanie fala o promieniu $CD = AF$. W tej samej chwili około punktu B utworzy się fala elementarna o promieniu $CE = BG$. Gdyby fale mogły się dalej posuwać po za granicą, czoła ich oraz innych fal niezliczonych utworzyłyby powierzchnię kulistą CFC';



Rys. 398.



Rys. 399.

w rzeczywistości zaś tworzą takąż powierzchnię symetryczną CLC', tylko przed granicą obu środowisk, przyczym środek jej przypada w O'. Skoro $OF = O'L$, to $OA = O'A$.

Promień OB fali padającej zmienia kierunek na $O'B$ w fali odbitej, przyczym OB i $O'B$ z jego przedłużeniem BH oraz prostopadła PP' muszą leżeć w jednej płaszczyźnie, gdyż $PP' \parallel OO'$.

Z powodu równości trójkątów OBA i $O'BA$, jako mających boki odpowiednio równe, $\sphericalangle OBA = \sphericalangle O'BA$, zatym i $\sphericalangle OBP = \sphericalangle O'BP' = \sphericalangle HBP$.

Podobnie jak fale kuliste, odbijają się fale płaskie, co można wyrozumieć z rysunku 399.

9. Załamanie fal. Przenikając do innego środowiska, gdzie szybkość ruchu falowego jest mniejsza, lub większa, fala na granicy zmienia kierunek tak, iż promień fali padającej i promień przepuszczonej stanowią linję łamaną; stąd nazwa *załamanie fal*.

Skoro szybkość w nowym ośrodku jest mniejsza, jak to bywa zwykle w materji gęstszej, promień załamuje się ku prostopadłej do granicy; skoro szybkość staje się większą, zatym w materji rzadszej, promień załamuje się wstecz, czyli odchyla się od prostopadłej. Promień prostopadły do granicy nie załamuje się wcale.

Prawa załamania:

1) Promień padający i załamany leżą w płaszczyźnie prostopadłej do granicy obu środowisk.

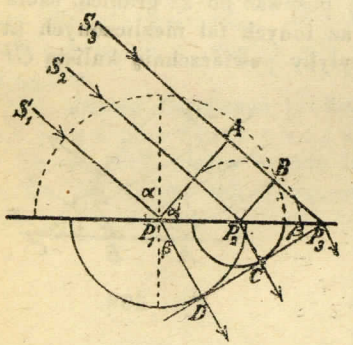
2) Stosunek wstawy kąta padania do wstawy kąta załamania ma wartość stałą dla danych dwu środowisk:

$$\frac{\sin\alpha}{\sin\beta} = \text{const.}$$

3) Stosunek wstaw równa się stosunkowi szybkości w obu ośrodkach i zowie się *spółczynnikiem załamania* (znak n):

$$\frac{\sin\alpha}{\sin\beta} = \frac{c_1}{c_2} = n.$$

Dowód (rysunek 400). Niech promienie równoległe S_1, S_2, S_3 fali płaskiej, idące w płaszczyźnie rysunku, trafiają ukośnie granicę ośrodka w punktach P_1, P_2, P_3. Na przekroju P_3A, prostopadłym do tych promieni, wszystkie punkty muszą być w fazie jednakowej. W czasie jednak, gdy fala posunęła się od A do P_3, powstała naokoło P_1 w nowym ośrodku fala elementarna o promieniu P_1D; promień fali padającej posiada długość AP_3, tak iż $AP_3 : P_1D = c_1 : c_2 = n$, czyli $P_1D = \frac{1}{n} AP_3$. Podobnież utworzy się dokoła P_2 fala elementarna przepuszczona o promieniu P_2C; promień fali padającej stanowi tu BP_3, tak iż $P_2C = \frac{1}{n} BP_3$. Czoła tych fal załamanych postępują wspólną płaszczyzną styczną P_3D.



Rys. 400.

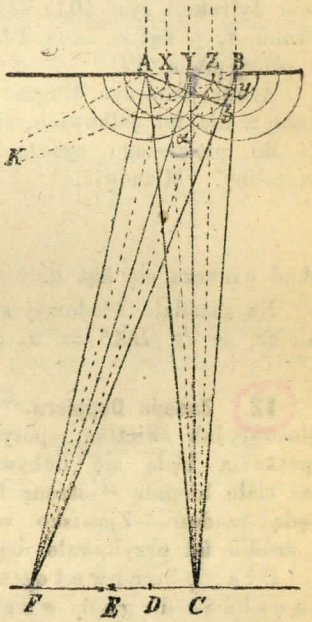
Istotnie, poprowadziwszy styczną P_3D do większej z fal załamanych, otrzymamy dwie pary trójkątów podobnych. Z trójkątów P_3P_1D i P_3P_2C wynika $P_1D : P_2C = P_1P_3 : P_2P_3$; z trójkątów P_3P_1A i P_3P_2B wynika $AP_3 : BP_3 = P_1P_3 : P_2P_3$; stąd $P_1D : P_2C = AP_3 : BP_3$, albo po przestawieniu wyrazów skrajnych $BP_3 : P_2C = AP_3 : P_1D = n$. Zatym $P_2C = \frac{1}{n} BP_3$, t. j. odległość P_2C płaszczyzny P_3D od punktu P_2 równa się promieniowi P_2C fali przepuszczonej; płaszczyzna P_3D jest styczną zarazem dla obu fal załamanych.

Stosunek wstaw wynika z trójkątów AP_1P_3 i DP_1P_3; mianowicie $AP_3 = P_1P_3 \cdot \sin\alpha$, oraz $P_1D = P_1P_3 \cdot \sin\beta$; przez podział otrzymujemy $\sin\alpha : \sin\beta = AP_3 : P_1D = n$.

Gdy $\alpha = 0$, to $\sin\alpha = 0$, zatym $\sin\beta = 0$ i $\beta = 0$; promień prostopadły idzie dalej w tym samym kierunku, bez załamania.

10. Uginanie się fal czyli **dyfrakcja.** Zjawisko uginania świadczy, że rozchodzenie się fal nie jest zwykłym ruchem po linji prostej, jak np. lot kuli, ale polega na kolejnej interferencji fal elementarnych, wedle zasady Huyghensa. Najwyraźniej występuje zjawisko uginania w promieniach świetlnych, przy powstawaniu cieni i barw (pt.). Tutaj roztrząsamy teoretyczną zasadę uginania fal w ogólności.

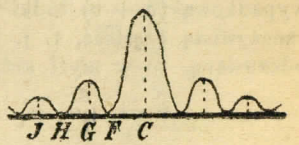
Niech fala płaska pada na ścianę MN (rys. 401), przyczym przez otwór AB, w rzeczywistości bardzo wąski, przechodzi prostopadle wiązka promieni. Czoło fali ma jednakowe fazy w każdym punkcie między A i B. Powstające tu w A, X, Y, Z, B fale elementarne rozszerzają przez ciągłą interferencję ruch falowy daleko po za obręb brzegów A i B; stąd fale zajmują nietylko obszar ABC, wzdłuż pierwotnego kierunku promieni, ale przekroczą go na wszystkie strony.



Rys. 401.

W punkcie C, prostopadle naprzeciw otworu AB, fazy muszą być zgodne z panującymi w A i B, oraz X, Y, Z, ponieważ przy wąskości otworu promienie AC, XC... BC są prawie równoległe, zatym ich długości, czyli drogi, jakie przebywają fale z A, X... B do punktu C, są jednakowe. Tutaj więc fazy się wspomagają i dają największe natężenie fali, np. jasność światła.

Inaczej przedstawia się natężenie w punktach D, E, F, gdzie interferencja fal elementarnych wytwarza rozmaite fazy. Niech do punktu F dochodzą promienie, których drogi BF i AF różnią się o całą długość fali, czyli odcinek $Bb = \lambda$; wtedy promień YF, idący pośrodku między AF i BF, przebywa drogę krótszą o $By = \frac{1}{2}\lambda$, zatym jego faza w F jest przeciwna, i fale tutaj się znoszą, np. fale światła się gaszą, dając ciemność. Podobny wynik dają promienie XF i ZF, różniące się o $\frac{1}{2}\lambda$, oraz każda inna para promieni, która musi istnieć symetrycznie z obu stron YF, a różni się podobnież o $\frac{1}{2}\lambda$. Wogóle więc można wiązkę promieni AB podzielić na połowy, które się wzajemnie znoszą w punkcie F. Pomiędzy C i F natężenie słabnie stopniowo aż do 0.



Rys. 402.

Wiązkę promieni bardziej skośnych, np. AK i BK, które się różnią w długości przebytej drogi o $1\frac{1}{2}\lambda$, można podzielić na 3części; pierwsze 2 się znoszą, jak poprzednio, w odpowiednim punkcie G (rys. 402), po za F, pozostaje tylko trzecia, skutkiem czego natężenie fal w G stanowi $\frac{1}{3}$ natężenia w C. Promienie jeszcze skośniejsze, o różnicy 2 λ, można podzielić na 4 wiązki, które się parami znoszą całkowicie w dalszym punkcie H; z promieni o różnicy $2\frac{1}{2}\lambda$ wypadnie 5 wiązek, z których 2 pary się znoszą, piąta wiązka zostaje, dając w J tylko $\frac{1}{5}$ natężenia, panującego w C.

Wynikiem więc uginania jest: 1) rozszczepienie się wiązki promieni, przechodzącej przez szczelinę; 2) perjodyczny ubytek natężeń od środka promieni na wszystkie strony.

Rys. 402 objaśnia graficznie przebieg natężeń: widzimy tu pośrodku najwyższe natężenie w C, obok mniejsze G, dalej jeszcze słabsze J i t. d.; natężenia te dzielą przerwy F, H w równych odstępach, gdzie drgań niema zupełnie. Dla światła oznajmia się to zjawisko prążkami naprzemian jasnymi i ciemnymi (pt. w optyce „Uginanie światła").

11. Oznaczanie długości fal na zasadzie dyfrakcji. *Kątem ugięcia* (kątem dyfrakcji rys. 401) nazywamy odchylenie promieni od pierwotnego kierunku, t. j. kąt $\alpha = CYF$ pomiędzy kierunkiem YF promieni ugiętych a prostopadłą YC.

Ażeby oznaczyć długość fali, należy przedewszystkim oznaczyć wartość kąta α dla fal całkowicie się gaszących, a to mierząc odstęp CF od środka C do pierwszego zgaszenia fali w F, oraz odległość CY płaszczyzny od szczeliny. Mianowicie

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{CF}{CY},$$

skąd oznacza się kąt α.

Na zasadzie wiadomej szerokości AB szczeliny, otrzymujemy, uwzględniając, że $\sphericalangle BAb = \alpha$, oraz $Bb = \lambda$:

$$\lambda = AB \cdot \sin \alpha.$$

12. Zasada Dopplera. Jeżeli jakikolwiek ruch falowy, np. fale wodne, głosowe, lub świetlne, spotykają ciało, poruszające się naprzeciwko nich, spotkania będą się odbywały częściej, niż z ciałem nieruchomym. Jeżeli zaś ciało biegnie w stronę fal, czyli jakby uchodzi przed nimi, spotkania będą rzadsze. Zjawisko wygląda tak, jak gdyby ciało było nieruchome, a źródłu fal przybywało drgań harmonicznych, bądź ubywało.

Dla obserwatora, zbliżającego się do źródła fal, częstość drgań wzrasta; dla ciała oddalającego się, częstość się zmniejsza (Doppler 1841).

Dowód. Gdy ruchy idą naprzeciwko siebie, np. łódka płynie z szybkością v przeciw falom o szybkości c, dodają się oba ruchy, dając szybkość wypadkową $(c + v)$ łódki względem grzbietu fali *). Skoro więc n oznacza rzeczywistą częstość, t. j. liczbę drgań na sekundę, n_1 częstość pozorną czyli odczuwaną, to w myśl art. 5

$$n = \frac{c}{\lambda},\ n_1 = \frac{c+v}{\lambda},\ \text{czyli}\ \lambda = \frac{c}{n},\ \lambda = \frac{c+v}{n_1}$$

i stąd

$$n_1 = n\frac{c+v}{c} = n\left(1 + \frac{v}{c}\right).$$

Gdy ruchy idą w tę samą stronę, np. łódka ucieka przed falami, szybkość wypadkowa jest $c - v$, zatym

$$n_1 = n\left(1 - \frac{v}{c}\right).$$

W pierwszym wypadku $n_1 > n$, w drugim $n_1 < n$.

Zjawiska powyższe mają szczególne znaczenie w akustyce i optyce (pt.).

*) Należy pamiętać, że fale nie wpływają na bieg łódki; składanie szybkości tutaj nie ma nic wspólnego z ruchem łódki względem brzegów, do którego odnoszą się przykłady § 12, art. 5.

I) RUCH PŁYNÓW.

(HYDRODYNAMIKA).

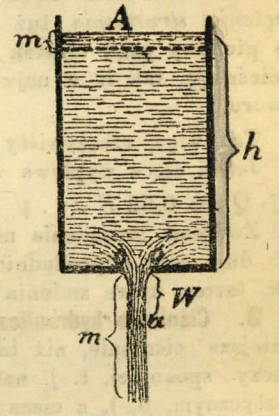
§ 77. Wypływ cieczy.

1. Szybkość wypływu. Ciecz, zawarta w naczyniu, posiada pewien zasób energji potencjalnej, która przy wypływie cieczy zamienia się częściowo lub całkowicie na energję kinetyczną. Przez otwór w ścianie lub dnie naczynia ciecz wypływa z szybkością, która nie zależy od rodzaju cieczy, lecz tylko od wysokości jej w naczyniu.

Szybkość wypływu cieczy równa się tej szybkości, jakiej nabrałoby ciało swobodnie spadające z wysokości (h) poziomu płynu nad otworem naczynia (prawo Torricellego, 1644):

$$v = \sqrt{2gh}.$$ (por. § 63, art. 4, wzór III)

Wzór $v = \sqrt{2gh}$ stosuje się zarówno do cieczy, wypływającej pionowo na dół, z otworu w dnie naczynia, jak do wytryskującej z otworu w ścianie bocznej, lub bijącej do góry, np. w wodotryskach. Szybkość bowiem wypływu zależy tylko od ciśnienia słupa h, a ciśnienie to rozchodzi się wszędzie jednostajnie.



Rys. 403.
Wypływ cieczy.

Dowód teoretyczny opiera się na zasadzie zachowania energji. Skoro ciecz wypływa (rys. 403), na poziomie A ubywa np. masa m, a takaż masa m cieczy wychodzi otworem oo; przeniesienie masy m od powierzchni do otworu jest stratą na energji potencjalnej o $mg \cdot h$; tyle bowiem pracy potrzeba, ażeby tę masę podnieść znów do A. Energja ta przemienia się na energję kinetyczną, czyli siłę żywą $= \frac{1}{2}mv^2$, gdzie v stanowi szybkość wypływu; zatym

$$mgh = \tfrac{1}{2}mv^2,$$

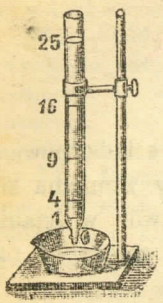
stąd

$$v = \sqrt{2gh}.$$

Każda więc cząstka płynu ma w otworze oo taką szybkość, jak gdyby spadała swobodnie z powierzchni A.

Że gęstość płynu nie ma tu znaczenia, łatwo pojąć, zważywszy, że w razie płynu gęstszego, wypływ odbywa się pod większym ciśnieniem, ale i masa poruszana jest tyleż razy większa.

Doświadczenie. Rurkę szklaną (rys. 404) z wąskim wylotem napełnia się rtęcią na wysokość 25 cm, zaznaczywszy uprzednio na niej od dołu odstępy 1, 4, 9, 16, 25 cm. Skoro rtęć wypływa, okazuje się, że czas opadania rtęci od znaku do znaku jest wszędzie jednakowy, np. 10 sekund, tak iż czasy wynoszą 10, 20, 30, 40, 50 sek, a szybkości wypływu odpowiednio mają się jak 50 : 40 : 30 : 20 : 10; ilości zaś rtęci wylane, zatym i wysokości jej w rurze, jak 25 : 16 : 9 : : 4 : 1. Z zestawienia wynika, że szybkości wypływu są proporcjonalne do pierwiastków z wysokości:



Rys. 404.

$$50 : 40 : 30 : 20 : 10 = \sqrt{25} : \sqrt{16} : \sqrt{9} : \sqrt{4} : \sqrt{1}.$$

2. Wydatek prądu, czyli objętość cieczy wypływającej na sekundę, można obliczyć z danej szybkości wypływu i pola otworu. Ponieważ ciecz płynie z otworu *oo* jednostajnie, przy niezmiennym poziomie A (rys. 403), np. ciągłym dolewaniu z góry, przeto na sekundę wysuwa się słup W, o podstawie równej polu S otworu *oo*, a długości *oa*, którą stanowi droga w ciągu sekundy, czyli szybkość wypływu $v = \sqrt{2gh}$. Zatym teoretyczny

$$\text{wydatek prądu } W_t = S\sqrt{2gh}.$$

Rzeczywista objętość cieczy wypływającej jest znacznie mniejsza, wynosi mianowicie około 62% teoretycznej. Niezgodność ta pochodzi ze *zwężenia strumienia* tuż po za otworem; przy wylocie bowiem *oo* spotyka się pionowy prąd cząstek z prądami bocznymi (por. rys. 403), które go zacieśniają, tak iż w najwęższym miejscu przekrój strumienia = 0,62 pola otworu.

Tak więc, rzeczywisty wydatek prądu $W_r = 0{,}62\ S\sqrt{2gh}$.

Jeżeli ciecz wypływa w ciągu t sekund, całkowita objętość cieczy wylanej $Q = 0{,}62\ S\ .\ t\ .\sqrt{2gh}$ cm³.

Zwężenia strumienia można uniknąć, przystosowując do otworu w ścianie lub dnie rurę, odpowiednio zwężoną; natomiast występuje wtedy nowy czynnik, tarcie, które zmienia warunki wypływu.

3. Ciśnienie hydrauliczne. Ciecz, płynąca rurą, wywiera na jej ściany mniejsze ciśnienie, niż ta sama ciecz w spoczynku. Nazywając ciśnienie cieczy spokojnej, t. j. nacisk na jednostkę pola, *ciśnieniem hydrostatycznym* (statycznym, p_s), a cieczy płynącej *ciśnieniem hydraulicznym* (dynamicznym, p_d), rzec można ogólnie, że ciśnienie hydrauliczne jest mniejsze, niż hydrostatyczne: $p_d < p_s$.

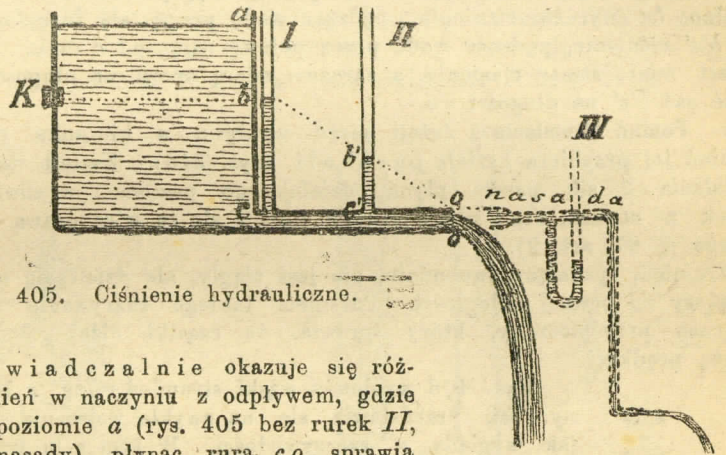
Ponieważ $p_s = \frac{P}{q}$ (§ 16, art. 3), oraz $P = qhd$ (§ 27, art. 3), wartość $p_s < hd$.

Im większa jest szybkość wypływu, tym więcej różnią się oba ciśnienia tak, iż ciśnienie hydrauliczne może spaść do 0, a nawet osiągnąć wartość ujemną. Na tym polega *działanie ssące* strumienia wody, lub innej cieczy, stosowane w *aspiratorach* do wyciągania powietrza (rys. 171).

Teoretycznie obliczyć można ciśnienie hydrauliczne na zasadzie przemiany energji. Ciśnienie hydrostatyczne p_s stanowi rodzaj energji potencjalnej; skoro ciecz wypływa, mając szybkość v, siła żywa w jednostce objętości, t. j. w 1 cm³, wynosi $\frac{1}{2}dv^2$, gdyż masa m = gęstości d. Ciśnienie więc hydrauliczne p_d, jako pozostałość pierwotnej energji potencjalnej, równa się różnicy między nią a wytworzoną siłą żywą:

$$p_d = p_s - \tfrac{1}{2}dv^2.$$

Różnica obu ciśnień równa się wadze słupa cieczy, któryby swą wysokością sprawił daną szybkość wypływu,



Rys. 405. Ciśnienie hydrauliczne.

Doświadczalnie okazuje się różnica ciśnień w naczyniu z odpływem, gdzie woda o poziomie a (rys. 405 bez rurek *II*, *III* i nasady), płynąc rurą *co*, sprawia u wejścia *c* do rury ciśnienie hydrauliczne *bc*; woda w rurce *I* stoi na poziomie *b*, gdy tymczasem ciśnienie hydrostatyczne stanowi słup *ac*. W razie zamknięcia *o*, woda w *I* stanie na poziomie *a*. Różnica $ac - bc = ab$ sprawia istniejącą szybkość wypływu: woda wypływa z otworu *oo* rury z taką szybkością, z jaką wylewałaby się wprost z otworu w ścianie na poziomie *b*, np. za wyjęciem korka *K*.

Ilość cieczy, przepływającej przez każdy przekrój rury, jest jednakowa, inaczej bowiem nastąpiłby zastój cieczy. Wynika stąd, że w razie rur zwężonych, szybkość prądu w miejscach zwężonych jest większa, niż w miejscach szerszych.

Przy silnym zwężeniu szybkość przepływu cieczy może wzrosnąć tak dalece, że ciśnienie hydrauliczne stanie się większe od hydrostatycznego, t. j. ujemne, gdy $\frac{1}{2}dv^2 < p_s$; sam ciężar płynu oczywiście nie wystarcza tu do wytworzenia takiej siły żywej i nadmiar jej płyn czerpie z ciśnienia atmosfery. Objawia się to w *działaniu ssącym strumieni*. Za dodaniem np. wąskiej nasady do rury odpływowej, woda przy tej nasadzie (w rurce *III* rys. 405) opada niżej poziomu rury *co*, przez którą płynie; skoro woda opadnie poniżej zgięcia tej rurki, powietrze dostaje się do strumienia wody i porwane w postaci pęcherzyków wydostaje się na zewnątrz. Łącząc wolny koniec rurki *III* z jakimś zbiornikiem powietrza, można zeń powietrze wessać (stąd nazwa „aspirator").

4. Opór w rurach. Jeżeli rura, przez którą ciecz płynie (*co*, rys. 405), jest dostatecznie wąska i długa, wskutek tarcia stawia ona prądowi cieczy wyraźny *opór*, który jest w stosunku prostym do długości rury, a odwrotnym do jej średnicy; nadto opór wzrasta, skoro się powiększa szybkość wypływu.

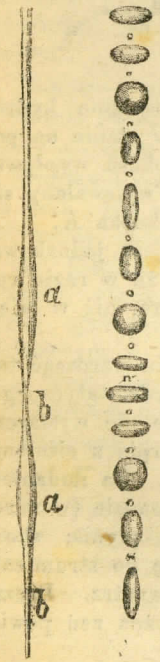
Pokonanie oporu wywołuje *stratę ciśnienia* proporcjonalną do długości rury.

Jeżeli np. przystosowano do rury odpływowej *co* dwie rurki pionowe I i II tak, iż rurka II przypada 2 razy bliżej otworu *oo*, niż rurka I, to wysokość wody w II jest 2 razy mniejsza, niż w I i poziomy w *o*, II i I leżą na linji prostej *bo*. W miarę zacieśniania otworu *oo*, woda podnosi się w obu rurkach, zachowując zawsze prostą linję poziomów.

Słup *bc* wyraża ciśnienie, pędzące wodę przez całą rurę, od *c* do *o*; słup *b'c'* ciśnienie, pędzące wodę przez połowę rury, od *c* do *o*. Wysokość *bc* jest miarą straty ciśnienia, a zarazem miarą oporu na długości *co*, wysokość zaś *b'c'* na długości *c'o*.

5. Postać strumienia. Jeżeli ciecz wypływa w kierunku poziomym, strumień jej przybiera kształt paraboli (rys. 346). Kształt ten wynika z działania 2 sił: parcia płynu, działającego poziomo, w chwili wylotu cząstek z otworu, oraz siły ciężkości; stosują się tu więc prawa rzutu poziomego (§ 67, art. 2).

Strumień, spadający swobodnie, nie jest ciągły, ale dzieli się na krople, począwszy od pewnej odległości. Powodem takiego rozrywania się płynu jest ruch przyśpieszony, który sprawia, że cząstki niżej położone mają większą prędkość.

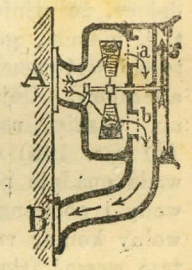


Rys. 406.

Rys. 406 wyobraża wąski strumień wody: z lewej strony, jak przedstawia się na zwykłe wejrzenie, z prawej, jak wygląda w rzeczywistości. W tym celu trzeba strumień rozpatrywać na tle bardzo silnego światła, np. drutu do białości rozpalonego, jak w lampie elektrycznej, albo lepiej oświetlić go błyskawicznie iskrą elektryczną. Wtedy okazuje się szereg kropel stopniowo coraz dłuższych, to znów naprzemian coraz szerszych; stąd zwężenia miejscowe *bb* i zgrubienia *aa*. Zachodzi tu jakby ustawiczna walka między siłą spójności, a siłą ciężkości i każda kropla nabywa w swej masie ruchu drgającego, skutkiem czego rozciąga się i kurczy względem swej normalnej postaci kuli.

6. Zastosowania. Działanie rzek i strumieni, zarówno budujące, jak niszczące (objaśnić bliżej). — Działanie prądów morskich. — Przepływ wody rurach wodociągowych, w ściekach, kanałach. — Opróżnianie zbiorników wody, jak akwarja, beczki, stągwie.

Wodomiar służy w urządzeniach wodociągowych do oznaczania ilości wody, jaką odbiorca zużył w ciągu pewnego czasu, np. miesiąca. Urządzenie wewnętrzne podaje rys. 407. Woda z rury wodociągowej przepływa w *A* do puszki żelaznej, gdzie uderzając ukośnie o skrzydła wiatraczka *ww*, obraca go, a stąd za pomocą

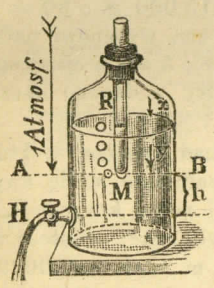


Rys. 407. Wodomiar.

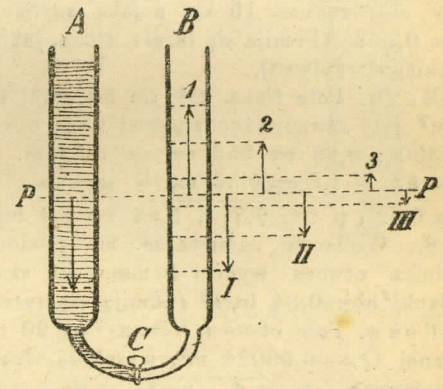
kółek obrót przenosi się na skazówkę *s*; do odpływu wody służą otwory *a* i *b* oraz dolna rura *B*. Przyrząd kalibruje się praktycznie, t. j. oznacza się z doświadczenia, ile obrotów wiatraczka przypada np. na 100 litrów wody przepływającej; w ten sposób skazówka podaje wprost ilości wody zużytej w hektolitrach (hektolitr = 8 wiader).

Flaszka Mariotte'a (rys. 408) służy do otrzymania wypływu cieczy ze stałą szybkością, pomimo iż poziom cieczy obniża się w miarę wypływu. Flaszka posiada u dołu rurkę z kranem *H*, przez korek zaś przechodzi rurka otwarta *R*, której koniec *M* przypada cokolwiek powyżej kranu *H*. Ciecz wypływa z taką szybkością, jak gdyby poziom jej znajdował się stale na równi z dolnym wylotem rurki, t. j. w *AB*.

Dowód. Skoro woda odpływa, powietrze we flaszce się rozrzedza, i przez rurkę *M* dostają się wciąż pęcherzyki powietrza. Tak w poziomie $M = AB$, jak w *H* panuje ciśnienie atmosfery; ciecz więc wylewa się pod ciśnieniem stałego słupa *h*, t. j. ze stałą szybkością $v = \sqrt{2gh}$.



Rys. 408. Flaszka Mariotte'a.



Rys. 409. Wahania cieczy.

7. Wahania cieczy w rurkach połączonych. Przepływ cieczy z jednej rurki pionowej do drugiej, połączonej z nią u dołu węższym kanałem, odbywa się ruchem wahadłowym. Ciecz, wlana do jednej z rur połączonych, nie odrazu dochodzi do jednakowego poziomu w obu rurach, jak tego wymaga zasada równowagi cieczy w naczyniach połączonych.

Jeżeli rura *A* (rys. 409) zawiera wodę lub inny jakiś płyn, rura zaś *B* jest próżna, to za otwarciem kranu *C* płyn wpada do *B* i waha się między poziomami 1-I, 2-II, 3-III... przez czas pewien, zanim się uspokoi i dojdzie ostatecznie do poziomu *PP*. Długość i liczba tych wahań zależy od wysokości, tarcia i lepkości płynu, a także od średnicy rury łącznej. Jeśli rura *C* jest obszerna i otworzymy ją naraz całą, wahania będą liczne i obszerne; przy wąskim połączeniu będą krótsze i słabe.

Uwaga. Wypływ cieczy, wahania w rurach połączonych i w ogólności ruchy cieczy (falowanie) mają znaczenie porównawcze dla innych działów fizyki, jako przyczynek do objaśnienia różnych objawów energji, np. rozchodzenia się głosu, ciepła, prądu elektrycznego, wyładowań iskrowych elektryczności.

Zadania i zagadnienia.

1. Dlaczego woda w rzekach płynie prędzej pośrodku koryta, niż u brzegów, a przy powierzchni prędzej, niż u dna?

2. Dlaczego w wąskim łożysku rzeki istnieje prąd wartki, a w szerszych miejscach woda płynie wolniej?

3. Jaki wpływ ma przybór wody na szybkość prądu w rzece, i dlaczego?

4. Jaki ma wpływ na szybkość prądu: a) wyniesienie źródeł ponad ujściem rzeki, b) długość rzeki?

5. Walec pionowy, wysoki na 1,8 m. napełniono wodą. Z jaką szybkością wytryska woda z otworu, zrobionego tuż koło dna? Odp. 3,7 m/sek.

6. Z jaką szybkością wytryśnie nafta, napełniająca ten sam walec? Gęstość nafty = 0,85.

7. Jeżeli walec powyższy ma średnicę 8 cm. i zamyka go tłok, naciskany siłą ręki = 15 kg, z jaką szybkością wypływa z walca nafta o gęstości 0,85? (Pomija się tarcie tłoka, jako też zmianę poziomu nafty w czasie krótkiego wypływu).

Rozw. Pole tłoka $\pi r^2 = 50$ cm^2; ciśnienie = 15 000 g : 50 = 300 g/cm^2 jest równoważne słupowi wody o wysokości 300 cm, a słupowi nafty = = 300 : 0,85 = 353 cm = 3,53 m. Zatym wysokość h słupa cisnącego = = 3,53 + 1,8 = 5,33 m, a szybkość wypływu nafty z danego naczynia $v = 0{,}62 \cdot \sqrt{2 \cdot 9{,}81 \cdot 5{,}33} = 6{,}4$ m/sek.

8. Woda w samowarze ma poziom 45 cm ponad kranem, w którym średnica otworu wynosi 5 mm. Ile czasu trwa napełnienie wodą zwykłej szklanki obj. 0,24 litra? (pomija się tarcie w krótkiej rurce kranowej).

Rozw. Pole otworu $S = \pi r^2 = 20$ mm^2 = 0,00002 m^2; objętość wody wylanej $Q = 0{,}00024$ m^3, wysokość słupa $h = 0{,}45$ m. Zatym $0{,}00024 = 0{,}00002 \cdot t \cdot \sqrt{2 \cdot 9{,}81 \cdot 0{,}45}$; stąd $t = 4$ sek (tutaj opuszcza się spółczynnik 0,62, bo zwężenie strumienia znosi się prawie skutkiem przystosowania rurki; natomiast nie uwzględniamy tarcia, które przedłuży czas napełnienia).

Uwaga. Prawa i wzory co do przepływu cieczy są dosyć zawiłe i stosują się w grubym przybliżeniu, ponieważ istnieją tu wpływy uboczne, trudne do sformułowania (lepkość płynów i stąd niejednakowa szybkość prądu w całym przekroju, wiry w prądzie, chropowatość rur).

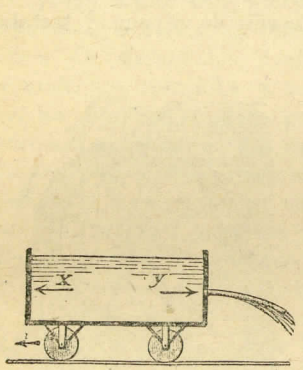
§ 78. Energja cieczy płynącej.

1. Ciśnienie czynne. Płyn w spoczynku, zawarty w naczyniu zamkniętym, posiada energję potencjalną; objawem tej energji jest ciśnienie na dno i ściany naczynia. Ciśnienie na dno usiłuje wyprzeć dno na zewnątrz; ciśnienie boczne usiłuje posunąć ścianę, a wraz z nią naczynie. W zwykłych jednak warunkach, gdy ciecz nie wypływa z bocznej ściany, każdemu ciśnieniu (x, rys. 410) z jednej strony odpowiada równe ciśnienie (y) z przeciwnej; oba ciśnienia znoszą się wzajemnie, tak iż naczynie sie nie porusza.

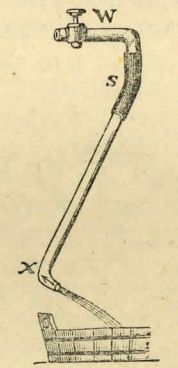
Skoro z jednej strony, np. w y, znajduje się otwór w ścianie, ciśnienie płynu na ścianę tutaj ustaje, płyn bowiem ma ujście: energja potencjalna przemienia się na kinetyczną. Ciśnienie przeciwne x staje się wtedy *czynnym*, t. j. porusza naczynie. Ponieważ ruch odbywa się w kierunku przeciwnym wypływowi, ciśnienie czynne x nazywa się także *wstecznym* (reakcyjnym).

Doświadczenia. Oprócz doświadczenia, wyobrażonego na rys. 410, ciśnienie czynne stwierdzić jeszcze można w sposób następujący:

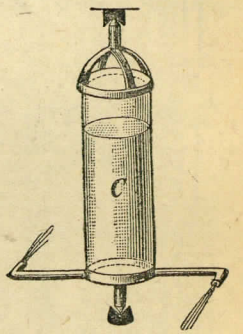
a) Rurka zakrzywiona *sx* (rys. 411), połączona z kranem wodociągowym W, odchyla się od położenia pionowego tym więcej, im obficiej woda wypływa.



Rys. 410. Ciśnienie czynne.



Rys. 411.



Rys. 412. Młynek Segnera.

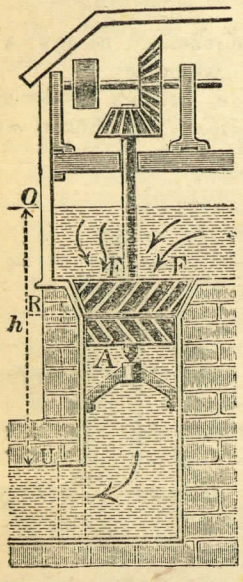
b) *Młynek Segnera* (1750, rys. 412) składa się z wysokiego naczynia C, osadzonego na osi pionowej i opatrzonego u dołu dwiema rurkami poziomymi, zakrzywionymi w przeciwne strony. Za napełnieniem naczynia wodą, młynek obraca się skutkiem wytrysku wody z rurek.

3. Turbiny czyli **silniki wodne** stanowią zastosowanie energji kinetycznej, jako też ciężaru cieczy, do celów praktycznych. Odróżnić wypada turbiny właściwe, o zamkniętym strumieniu wody, i koła wodne, poruszane wodą płynącą lub spadającą swobodnie.

Turbina (rys. 413) czerpie wodę ze zbiornika F przez stałe, ukośne komórki, ułożone promienisto; woda spada na koło A turbiny, osadzone na pionowej osi AF i opatrzone łopatkami o kierunku prawie prostopadłym do górnych przegródek. Ciśnienie to obraca koło siłą tym większą, im wyżej leży dopływ O nad odpływem U. Ruch wirowy turbiny przenosi się dalej za pomocą kół trybowych i wałów.

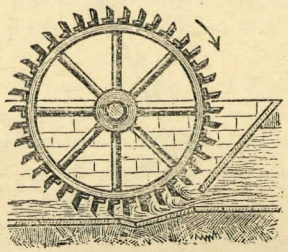
Największe turbiny urządzono w pobliżu wodospadu Niagary, gdzie wysokość spadku wynosi 50 m; zasila on obecnie kilkadziesiąt turbin, z których największe posiadają sprawność po 5000 HP. Całkowite wyzyskanie Niagary dałoby przeszło 10 miljonów koni parowych; obecnie już uzyskano z niej 200000 koni parowych do poruszania maszyn w elektrowniach, a stąd

otrzymania światła elektrycznego, pędzenia silników fabrycznych, tramwajów i t. p. — W Europie istnieją turbiny zwłaszcza w krajach górzystych, jak Szwajcarja, południowa Francja, Skandynawja, gdzie zasilają energją mechaniczną potężne elektrownie.

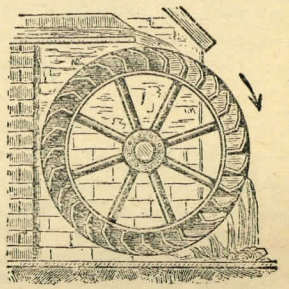


Rys. 413.
Turbina.

Koła wodne, zwane też *kołami młyńskimi*, stanowią najdawniejszą, mniej korzystną postać motorów wodnych, o osiach poziomych. Należą tu *koła podsiębierne* (rys. 414), poruszane samym tylko pędem rzeki lub strumienia, najmniej korzystne, i *koła nasiębierne* (rys. 415), gdzie woda wpada z góry i działa zarazem ciężarem i uderzeniem. Stosują się głównie do młynów i tartaków.

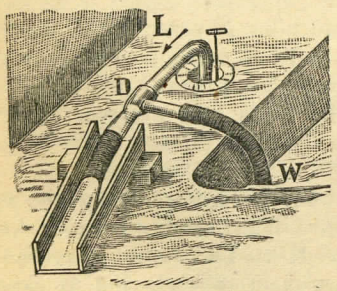


Rys. 414.
Koło podsiębierne.



Rys. 415.
Koło nasiębierne.

4. Działanie ssące strumienia wody, wpadającego wąską rurą do innej obszerniejszej, tłomaczy się siłą żywą cząstek, pędzących w strumieniu, przez co otaczające cząstki powietrza zostają porwane, następuje rozrzedzenie. Stosuje się ono do wyciągania wody z dołów, piwnic (rys. 416), do opróżniania ustępów i t. p.



Rys. 416. Działanie ssące strumienia wody.

Zadania.

1. Młynek Segnera posiada 3 rurki do wypływu, każda o przekroju 3 mm², w odległości 30 cm od osi przyrządu; woda w naczyniu ma wysokość 80 cm. Jaki moment obrotu wywołuje woda wypływająca? Odp. 216 g/cm.

2. Do poruszania turbiny zużyto wodospadu o 4 m wysokości spadku, dostarczającego 2 m³ wody na sekundę. Ile koni mechanicznych wydaje turbina, jeżeli 30% sprawności zużywa się na pokonanie tarcia i inne straty? Odp. 74,7 HP.

K) RUCH GAZÓW.

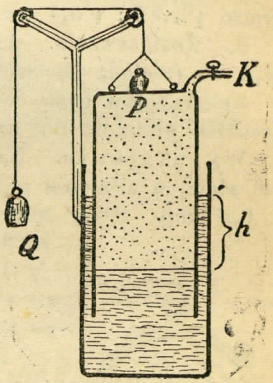
(AERODYNAMIKA).

§ 79. Wypływ gazów.

1. Zbiornik gazu, zwany niezbyt trafnie *gazometrem* albo *gazomierzem* (rys. 417), służy do przechowywania gazów i do otrzymania strumienia gazu, którego szybkość można dowolnie regulować przez zmianę ciśnienia.

Przyrząd, wyobrażony na rys. 417, daje strumień gazu najbardziej jednostajny. Składa się z blaszanego dzwona, zawieszonego na blokach i zrównoważonego ciężarem Q; dzwon ten zanurza się otworem do obszerniejszego zbiornika z wodą. Ciężar P, położony na dzwonie, wtłacza go do wody, która się podnosi na wysokość h, tak iż gaz za otwarciem kranu wypływa pod ciśnieniem słupa wody h. Powiększając lub zmniejszając ciężar P, można zmienić słup h, zatym i szybkość wypływu.

Podobne dzwony żelazne wielkich wymiarów służą w gazowniach miejskich do gazu świetlnego.



Rys. 417.
Zbiornik gazu.

2. Wypływ gazów. Ciecz wypływa z naczynia pod działaniem ciężkości lub ciśnienia zewnętrznego, gaz pod działaniem ciśnienia wewnętrznego czyli prężności. Wypływ gazu ma miejsce wtedy, gdy jego prężność jest większa od prężności zewnętrznej.

Różnica obu prężności, stanowiąca o szybkości wypływu, da się wyrazić słupem wody (h), a szybkość wypływu wzorem Torricellego (§ 77), przyczym wszakże uwzględnić trzeba gęstość gazu: im lżejszy jest gaz, tym prędzej wypływa. Zależność między szybkością wypływu a ciśnieniem i gęstością gazu, wypływającego małym otworem, wyraża *prawo Grahama*: Gaz wypływa z szybkością wprost proporcjonalną do pierwiastka z przewyżki ciśnienia, a odwrotnie proporcjonalną do pierwiastka z gęstości gazu. Wynika stąd:

Szybkości wypływu gazów są odwrotnie proporcjonalne do pierwiastków z gęstości.

Dowód. Skoro pewna drobna objętość gazu uchodzi z otworu K, równa objętość wody opada o h; zachodzi więc strata na energji potencjalnej wody, którą musi pokryć energja kinetyczna wypływającego gazu. Niech dana objętość gazu posiada masę m, a wody masę M; wtedy:

$$Mgh = \tfrac{1}{2} mv^2 \qquad \text{skąd } v = \sqrt{2gh \cdot \tfrac{M}{m}}.$$

Ponieważ masy $M : m$ mają się do siebie jak gęstości wody i gazu względem wody $1 : d$, to

$$v = \sqrt{2\,gh \,.\, \frac{1}{d}}.$$

Podobnież dla innego gazu $v' = \sqrt{2\,gh \,.\, \frac{1}{d'}}$.

Stąd $v : v' = \sqrt{d'} : \sqrt{d}$.

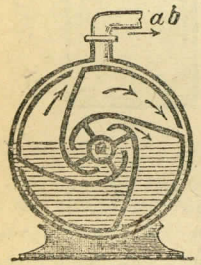
Przykłady. 1) Szybkość wypływu powietrza pod ciśnieniem 1 atmosfery = 10,5 m wody, uwzględniając gęstość powietrza względem wody $d = \frac{1}{773}$, wynosi $\sqrt{2 \,.\, 9{,}81 \,.\, 10{,}5 \,.\, 773} = 396$ m/sek.

2) Gaz świetlny wypływa prawie 2 razy prędzej od dwutlenku węgla, gdyż jest od niego prawie 4 razy lżejszy; mianowicie stosunek szybkości wynosi $\sqrt{1{,}53} : \sqrt{0{,}4} = 1{,}95$.

3. Zastosowania. 1) Oznaczanie gęstości gazów na zasadzie szybkości wypływu (metoda Bunsena).

2) Wypływ gazu świetlnego z palników: silniejszy strumień gazu na wysokich piętrach, niż na dole.

Wyjaśnienie. Na $10\frac{1}{2}$ m wzniesienia ciśnienie atmosfery spada o 1 mm rtęci, a ciśnienie gazu, o gęstości 0,4 względem powietrza, spada tylko o 0,4 mm rtęci; zatym przewaga ciśnienia gazu na powietrzu rośnie na każde $10\frac{1}{2}$ m wzniesienia o 0,6 mm rtęci, czyli o $0{,}6 \times 13{,}6$ = okr. 8 mm wody, co przy niewielkim ciśnieniu manometrycznym gazu, wynoszącym ok. 50 mm wody, stanowi różnicę dość poważną.



Rys. 418. Gazomierz.

3) *Gazomierz* czyli *licznik gazowy* (rys. 418), do obliczania ilości zużytego gazu świetlnego, ma postać bębna, w którym obraca się na poziomej osi drugi, mniejszy bęben, podzielony na 4 komory, przyrząd zawiera wodę, sięgającą powyżej osi. Gaz wchodzi rurą środkową *o* i wypełnia jednę z komór, która skutkiem tego podnosi się i wynurza z wody, wypuszczając gaz do rury *ab* w górze; bęben przytym się obraca, a miejsce pierwszej komory zajmuje następna i t. d. Obroty bębna przenoszą się na skazówki, umieszczone na zewnątrz aparatu i podające odrazu objętość gazu użytego.

4. Energja powietrza i pary w ruchu. Gazy i pary przepływają w rurach, podobnie jak płyny, dążąc ku miejscom o mniejszym ciśnieniu i okazując spadek ciśnienia proporcjonalny do długości rury. Napotykając opór, gaz wykonywa pracę, posiada więc energję kinetyczną; podobnież gaz wypływający z wąskiego otworu, jako też gaz pędzący w przestrzeni nieograniczonej. Zwłaszcza energja powietrza i pary wodnej wytwarzają potężną pracę w przyrodzie i zastosowaniach.

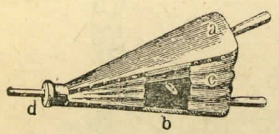
Energja powietrza swobodnego: wiatry, cyklony, burze, trąby powietrzne; pędzenie chmur, deszczu, gradu; pędzenie wiatraków, okrętów żaglowych.

Energja gazu w rurach: wyziewy par i gazów z wulkanu; wyziewy kominowe; przeciąg powietrza w piecu, w lampie; przeciągi w pokoju; wentylacja przez kanały w murach; przepływ gazu świetlnego w rurach miejskich.

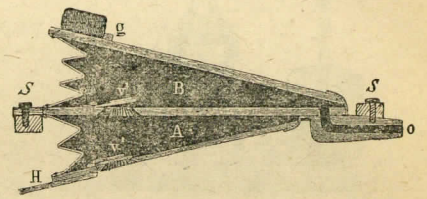
Energja powietrza, a zwłaszcza pary, tryskających wąskim wylotem, ma wiele zastosowań: w miechach, rozpylaczach, inhalatorach, injektorach, turbinach parowych.

1) *Miech* stanowi najdogodniejszy przyrząd do dęcia, czyli pędzenia powietrza, o ile chodzi o niewielką przewyżkę nad ciśnieniem atmosferycznym, np. do okurzania, rozpylania cieczy, do podsycania ognia, do organów.

Miech pojedyńczy (rys. 419) składa się z dwu desek, złączonych ruchomo a szczelnie skórą fałdowaną. Jedna z deszczułek posiada otwór z klapką, otwierającą się ku środkowi miecha. Za rozsunięciem deszczułek powietrze wchodzi do miecha, otwierając klapkę (dlaczego?); za naciśnięciem klapka się zamyka, a miech dmie wąskim wylotem *d*. Miech ten daje więc przerywany prąd powietrza. (Na rycinie wyjęto część skóry dla uwidocznienia klapki *b*).



Rys. 419.

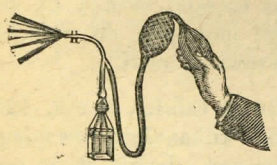


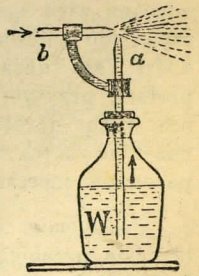
Rys. 420.

Miech podwójny (rys. 420) dmie nieustannie; składa się z dwu miechów, z których górny dmie ciągle, a dolny zasila go nowym powietrzem. Deska *SS*, stanowiąca przegrodę między miechami, jest nieruchoma; górną deskę naciska ciężar *g*, dolną ciągnie się ku górze za rączkę *H*; obie klapki *vv* otwierają się ku środkowi miecha. Dolna deska, puszczona swobodnie, opada własnym ciężarem, a miech dolny nabiera powietrza; pociągając rączkę *H*, wpędzamy powietrze do górnego miecha, który je pędzi dalej wylotem *o*, przy nowym opadnięciu deski *A* miech górny dmie dalej wskutek obciążenia *g*.

Podobnie działają małe *mieszki*, złożone z podwójnych baloników gumowych, a używane do rozpylania perfum, odkażania (dezynfekcji), do skrapiania roślin pokojowych. Rys. 421 wyobraża taki mieszek gumowy w połączeniu z rozpylaczem.

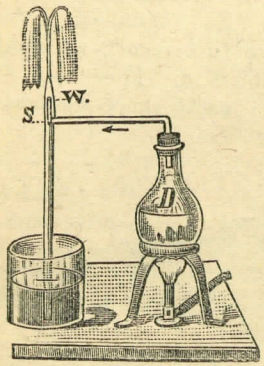
2) *Rozpylacz* (pulweryzator, rys. 422) polega na przystosowaniu do bani Herona rurki poziomej tak, aby otwór jej przypadł tuż obok wylotu rurki pionowej. Dmąc w rurkę poziomą, porywa się siłą żywą cząstek powietrze z rurki pionowej, płyn z flaszki wchodzi do tej rurki, a dosięgłszy wylotu, zostaje porwany prądem powietrza i rozpryskuje się na drobne kropelki.


Rys. 421.

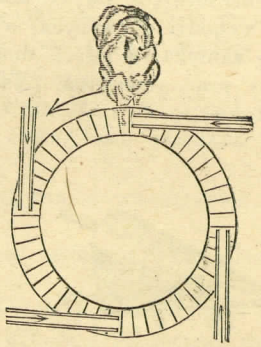


Rys. 422.

Podobny przyrząd, zasilany parą z kociołka D, stanowi *inhalator* (rys. 423) do wziewania lekarstwa, które się znajduje w szklance, a wraz ze strumieniem pary W wydostaje się rurką S i kieruje się na drogi oddechowe.— *Injektor* parowy służy do nabierania wody do kotła lokomotywy i opiera się na zasadzie rys. 423, gdzie rolę naczynia D spełnia kocioł maszyny, a rolę szklanki wielki zbiornik wody na stacji.



Rys. 423.

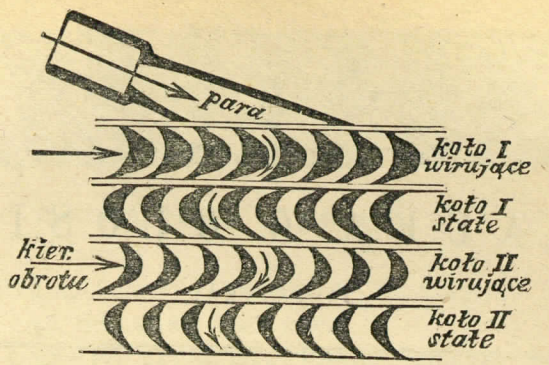


Rys. 424.
Zasada turbiny parowej.

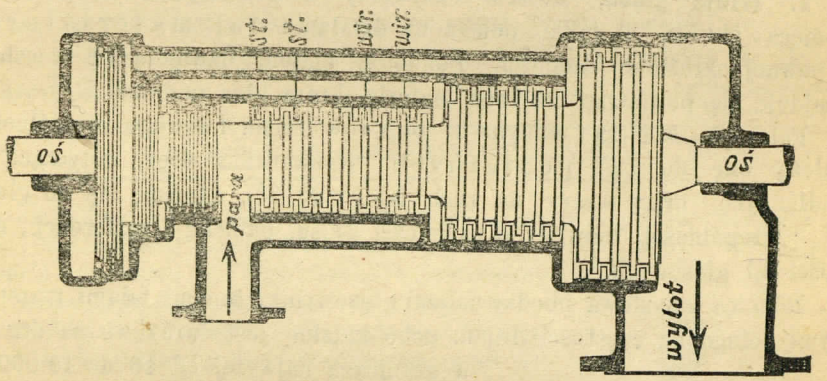
Turbina parowa (Laval 1887) polega na bezpośrednim wyzyskaniu siły żywej cząstek pary, która wytryska z wąskich wylotów, uderzając o łopatki koła, podobnie jak woda w kole młyńskim (rys. 424).

Ponieważ para ma przy wylocie ogromną szybkość, do 1000 m/sek, a to z powodu małej masy a znacznego ciśnienia (pt. art. 2, wzór Grahama), teorja zaś wykazuje, że największa wydajność istnieje przy wyzyskaniu połowy szybkości, t. j. gdy szybkość łopatek $= \frac{1}{2}$ szybkości cząstek pary, turbina wiruje nadzwyczajnie szybko: 10 000 do 50 000 razy na minutę; wymaga więc specjalnej pędni, obniżającej ilość obrotów, żadna bowiem maszyna nie zniosłaby tak szybkiego wirowania. Zaletą wszakże takiej szybkości jest duża sprawność turbiny, przy niewielkich wymiarach i zręcznej postaci; przytym turbina pracuje spokojnie, bez wstrząśnień, dając bezpośrednio ruch obrotowy. Obecnie więc turbiny coraz częściej stosują się zamiast zwykłych maszyn parowych, o cylindrze Watta; najwięcej do wielkich parowców morskich oraz do elektrowni, np. w Warszawie, Łodzi.

Urządzenie turbiny Lavala wyobraża rys. 426 w całości, a rys. 425 objaśnia przebieg pary. Na wspólnej osi znajduje się kilkanaście równoległych kół łopatkowych, przyczym jedne z nich są ruchome, drugie stałe: pomiędzy kołami pędzącymi znajdują się naprzemian koła kierownicze, to jest



Rys. 425. Przebieg pary w turbinie.



Rys. 426. Przekrój ogólny turbiny.

prowadzące parę, aby jej nadać znów pierwotny kierunek (rys. 426). Szybkość pary spada w miarę przebiegu, to też dalsze koła mają średnicę coraz większą, podobnie jak cylindry sprzężone w maszynie parowej (§ 52, art. 6-d). Ażeby nacisk pary zrównoważyć, daje się z przeciwnej strony osi (lewej na rys. 426) kilka kół luźnych, bez łopatek; w ten sposób rozdziela się pęd pary na obie strony osi.

ROZDZIAŁ VII.

NAUKA O GŁOSIE.

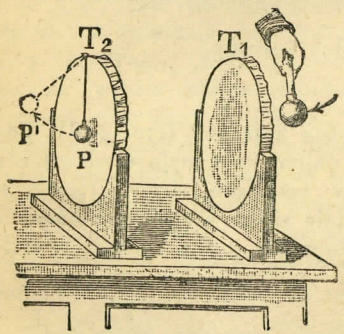
(AKUSTYKA)

§ 80. Głos w ogólności.

1. Istota głosu. *Głosem* nazywamy wrażenie, jakie odbieramy za pomocą słuchu, a jakie polega na działaniu fal materjalnych o pewnej określonej długości. Pomiędzy ciałem dźwięczącym a uchem znajduje się powietrze lub inna materja, która głos przenosi.

Fale głosowe są jednym z objawów ruchu falowego w ogólności; należą one do fal podłużnych. Rozważania więc, dotyczące fal podłużnych, oraz wzory na ruch falowy (§ 76), odnoszą się do głosu. W szczególności mówimy o szybkości głosu, odbiciu; interferencji, długości fal głosowych.

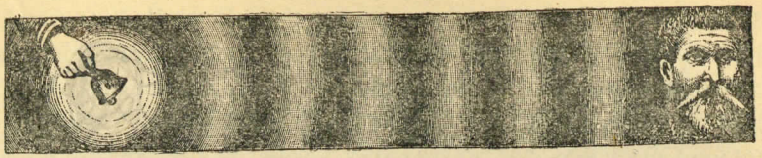
Różnica zmysłowa między falami głosowymi a innymi falami materjalnymi polega na częstości drgań: ucho ludzkie jest wrażliwe na drgania w granicach najwyżej od 16 do 40 000 na sekundę; drgania szybsze lub powolniejsze na słuch nie działają.



Rys. 427.
Powietrze przenosi głos.

Że istotnie materja, np. powietrze, stanowi środowisko, przenoszące głos, można okazać objektywnie, stukając w błonę sztywno rozpiętą na obręczy (rys. 427); wahadło, dotykające takiej samej błony, ustawionej naprzeciwko, odskakuje za każdym stuknięciem. Świadczy to zarazem, że głos stanowi rodzaj energji.

2. Źródła głosu. Zwykle źródłem głosu jest jakieś ciało stałe, drgające wskutek uderzania lub pocierania, np. dzwonek, struna. Drgania tego ciała udzielają się powietrzu i wytwarzają w nim fale (rys. 428), które dochodzą do błony bębenkowej ucha, a drgania błony przenoszą dalej kostki i inne części ucha na nerw słuchowy.



Rys. 428. Obraz fal głosowych.

Fale w powietrzu spokojnym rozchodzą się na wszystkie strony jednostajnie, tworzą więc warstwy kuliste.

Wstrząśnienia cieczy lub gazów mogą również stanowić źródła głosu, np. plusk deszczu, szum wodospadu, huk wystrzału lub wybuchu.

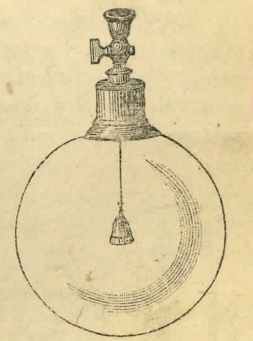
3. Przewodniki głosu. Głos rozchodzi się przez materje stałe, płynne i lotne. Z ciał stałych najlepiej przewodzą głos te, które są zarazem twarde i sprężyste, np. metale, kamienie; tłumią zaś głos ciała miękkie, sypkie i plastyczne, np. tkaniny, wata, guma, piasek.

Przez próżnię głos nie przechodzi. Wypływa to już z właściwości, że

> głos polega na ruchu falowym materji.

Doświadczeniem można stwierdzić zanik głosu w próżni, zawiesiwszy w bani szklanej dzwonek na gumowym sznurku (rys. 429). W miarę wyciągania powietrza z bani, dzwonek wstrząsany dzwoni coraz słabiej, aż wreszcie ucicha zupełnie.

Przykłady na przewodnictwo głosowe ciał stałych i płynów. Oddalony tupot koni słychać przez ziemię, chód zegarka słychać przez kij lub stół.—Szmer w słupach telegraficznych. — Telefon sznurkowy. — Dzwon słychać pod wodą. — Narządy słuchowe ryb, skorupiaków, mięczaków.



Rys. 429.
Dzwonek w próżni.

4. Dźwięk a głos. Głosy krótkie, urywane, jak huk, brzęk, stuk, trzask, polegają na drganiach zbyt krótkotrwałych i stąd dla ucha nieokreślonych; inne głosy, jakkolwiek przeciągłe, np. szelest, plusk, turkot, składają się z drgań bardzo nierównych co do obszerności, okresu i rodzaju.

W akustyce chodzi głównie o badanie *dźwięków*, czyli głosów ciągłych, których drgania są jednostajne; takimi są dźwięki rozmaitych instrumentów muzycznych oraz śpiew. Wszelkie inne głosy są mniej lub więcej bezładną mieszaniną dźwięków muzycznych, co można sprawdzić, analizując je za pomocą odpowiednich urządzeń (pt. poniżej „Analiza dźwięków").

5. Rodzaj drgań. Dźwięczące ciała stałe drgają poprzecznie, np. struny, pręty, błony; drgania podłużne wywołuje się tylko w razach wyjątkowych. Cząstki gazów dźwięczących drgają zawsze podłużnie, np. powietrze w organach.

Fale głosowe, jakie się rozchodzą w powietrzu lub wodzie, czy to wytworzone drganiem ciał stałych, czy gazów, należą zawsze do podłużnych; wiadomo bowiem, że taki tylko ruch falowy jest możliwy w ośrodku gazowym i płynnym (pt. „Ruch falowy": rodzaje fal).

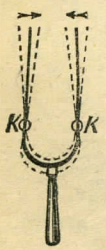
W ciałach dźwięczących istnieją *węzły*, t. j. miejsca spokojne; są one cechą fal stojących (pt.).

Stosownie do postaci, można wyróżnić punkty, linje i płaszczyzny węzłowe: np. na strunie bardzo cienkiej, której grubość można pominąć, węzły stanowią punkty niedrgające; na szybach dźwięczących węzły tworzą linje, w rurach dźwięczących tworzą płaszczyzny.

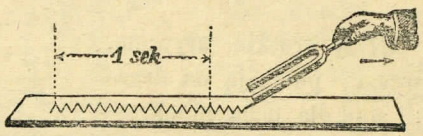
Doświadczenia. 1) *Kamerton* (rys. 430) jest prętem stalowym dwuramiennym, osadzonym na trzonku; za uderzeniem lub pociągnięciem smyczka kamerton wydaje dźwięk. Dotykając go wtedy w różnych miejscach kulką z kości słoniowej, uczepioną do nitki, albo posuwając prędko końcem kamertonu po zakopconej szybie, można okazać drgania (rys. 431). Węzły posiada kamerton w punktach K, K, niedaleko osady.

2) Struna kiszkowa lub stalowa, napięta mocno wzdłuż deski (*monochord*, rys. 432), wydaje dźwięki za pociągnięciem smyczka. Przytym siodełka papierowe, zawieszone na strunie, spadają; struna więc drga w całości. Skoro dotkniemy struny palcem w $\frac{1}{2}$, $\frac{1}{3}$, $\frac{1}{4}$... części, dzieli się ona na 2, 3, 4... części drgające, rozdzielone punktami spokojnymi (w I, II, III papierki nie spadają).

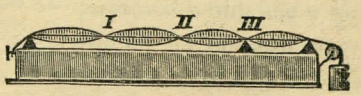
3) Płyty dźwięczące, np. szyby, umocowane pośrodku w położeniu poziomym i posypane piaskiem, okazują również miejsca drgające i spokojne *figury Chladni'ego*, rys. 433 i 434); te ostatnie mają postać linji prostych lub krzywych, zależnie od pociągnięcia smyczkiem i dotykania palcami.



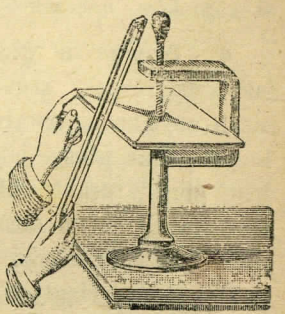
Rys. 430.
Kamerton.



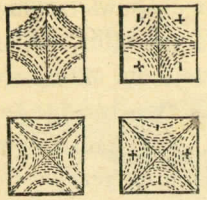
Rys. 431. Kamerton piszący.



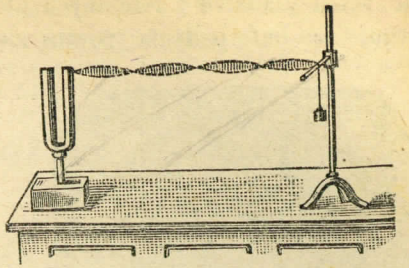
Rys. 432. Monochord.



Rys. 433.



Rys. 434.
Figury Chladni'ego.



Rys. 435.
Fale głosowe stojące.

4) Fale stojące i węzły mogą powstawać także w ciałach, połączonych z ciałem dźwięczącym, np. w nitce przywiązanej do kamertonu i wyprężonej (rys. 435). Odległość węzłów = pół fali.

6. Szybkość głosu. Zgodnie z teorją ruchu falowego (pt.), szybkość głosu zależy od sprężystości i gęstości ośrodka. Najprędzej rozchodzi się głos w ciałach stałych, najpowolniej w gazach, zwłaszcza w powietrzu i gazach cięższych od niego. Zmiany ciśnienia atmosferycznego nie wpływają na szybkość głosu; natomiast ogrzanie podnosi ją, zresztą nieznacznie.

W powietrzu, przy temperaturze 0°

szybkość głosu = 333 m/sek.

Że głos potrzebuje wyraźnego przeciągu czasu na przebycie niewielkiej nawet przestrzeni, dowodzą zjawiska, które jednocześnie oddziaływają na wzrok i słuch: np. przy rąbaniu drzewa z daleka widać najpierw spadek siekiery, a w chwilę później słychać uderzenie; przy odległych wystrzałach zrazu widać błysk lub dym, poczym następuje huk; grzmot następuje po błyskawicy, choć są to zjawiska równoczesne.

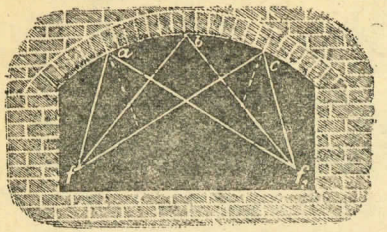
Doświadczalnie oznaczono szybkość głosu w powietrzu za pomocą wystrzałów armatnich, obserwowanych z daleka (członkowie akademji paryskiej, 1738); do widza, oddalonego o 10 km, huk wystrzału doszedł w $\frac{1}{2}$ minuty po błysku; stąd $v = 10\,000 : 30 = 333$ m/sek.

W wodzie oznaczono szybkość głosu za pomocą dzwona, który uderzano pod wodą (Colladon i Sturm na jeziorze Genewskim, 1827); wyniosła ona 1435 m/sek.

Szybkość głosu w żelazie wynosi okrągło $2\frac{1}{2}$ km/sek; najprędzej zaś rozchodzi się głos w drzewie sosnowym, w kierunku włókien, 6 km/sek.

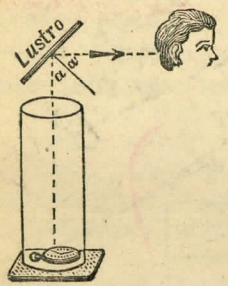
7. Odbicie głosu. Skoro fale głosowe spotykają jakąś powierzchnię mniej lub więcej ciągłą i obszerną, odbijają się od takowej, to jest zwracają się w innym kierunku. Powierzchnie takie stanowią ściany domów, skały, las, woda, chmury i t. p.

Od ścian gładkich i foremnych głos odbija się podług zasady ruchu falowego, że kąt padania równa się kątowi odbicia. Stąd sklepienia, niższe i wogóle powierzchnie wklęsłe wzmacniają głos, skierowując fale ku miejscom określonym, stanowiącym t. zw. *ogniska akustyczne* (rys. 436, f i f_1). Odpowiadają one ogniskom optycznym (pt.), podobnie bowiem zbierają się promienie światła.

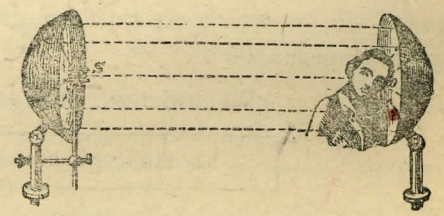


Rys. 436. Ogniska akustyczne.

Doświadczalnie stwierdzić można odbicie głosu w sposób, wskazany na rys. 437. Że głos zegarka odbija się od płaszczyzny, np. od zwykłego lustra, przekonać się można, usuwając lustro; wtedy zegarka nie słychać. Kąt, jaki tworzy kierunek fali głosowej z lustrem, równa się kątowi, pod jakim fala się odbija.



Rys. 437. Odbicie głosu.



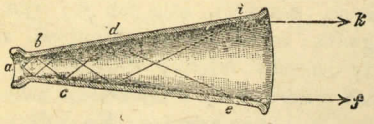
Rys. 438.

Odbicie głosu od powierzchni wklęsłej stwierdza doświadczenie rys. 438. Przed blachą, wygiętą półkulisto, w odpowiednim miejscu położono zegarek; przed drugą podobną blachą, ustawioną naprzeciwko, staje człowiek tak, aby jego ucho przypadło w położeniu odpowiednim do zegarka, czego można dojść przez wypróbowanie. Wtedy chód zegarka będzie dobrze słychać, między blachami zaś nie daje się słyszeć. Miejsca, skąd głos wychodzi i gdzie się nawzajem fale jego schodzą, stanowią ogniska akustyczne; miejsca takie można uważać jako punkty, skoro ciało dźwięczące posiada wymiar bardzo mały. Z ogniska s wychodzą fale, odbijają się od blachy wszystkie równolegle do siebie, a padając na drugą blachę, skupiają się znów w ognisku o. I tutaj zachodzi równość kątów padania i odbicia, podobnie jak na rys. 437. (Szczegóły pt. w optyce: „Lustra wklęsłe").

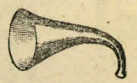
Tak samo tłómaczy się ogniska sali sklepionej rys. 436.

Przykłady. Sale średniowieczne do podsłuchiwania. — Szmery w muszli. — Ucho zewnętrzne człowieka i zwierząt.

Tuby czyli rury do mówienia z daleka (rys. 439) i do słuchania (rys. 440): fale po wielokrotnym odbiciu wychodzą z tuby głosowej prawie równolegle, nie osłabiają się więc znacznie przez rozproszenie; wpadające zaś fale do tuby słuchowej skupiają się dalej podobnież przez odbicie.



Rys. 439. Tuby.



Rys. 440.

8. Echo. Jeżeli fale głosowe uderzają o ścianę prostopadle, powracają do punktu wyjścia; stąd pochodzi powtórzenie głosu czyli *echo* (odgłos). Zależnie od oddalenia ściany, echo bywa jednozgłoskowe, lub wielozgłoskowe, t. j. powtarza jednę sylabę, dwie lub więcej; zależnie zaś od liczby ścian odbijających, echo bywa jednokrotne, bądź, co najczęściej, wielokrotne, t. j. powtarzające się kilka razy, lub przeciągłe.

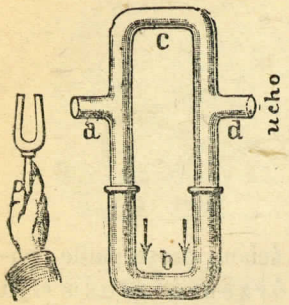
Ażeby echo powtarzało wyraźnie mowę, trzeba odległości około 34 m między źródłem głosu a ścianą odbijającą. W pustych salach, gdzie odległość ścian wynosi mniej niż 34 m, zgłoski odbite zlewają się z wymawianymi, tworząc t. zw. *pogłos*; stąd mowa brzmi donośnie, ale niewyraźnie. Zjawiska tego nie należy utożsamiać z rezonansem, który także sprawia wzmocnienie głosu (§ 81, art. 3).

Odległość 34 m, jako warunek echa jednozgłoskowego, wynika z następującego rozważania. Człowiek może wymówić dobitnie 5 sylab na sekundę, czyli na wymówienie jednej sylaby potrzeba około $\frac{1}{5}$ sekundy; w ciągu tego czasu głos musi przebiedz drogę od człowieka do ściany i napowrót, zatym ściana powinna być odległa o połowę tej drogi, mianowicie $\frac{1}{2} \times \frac{1}{5} \times 340 = 34$ m. Głos odbity spóźnia się wtedy o jednę sylabę, czyli powtarza ostatnią sylabę. Przy odległości podwójnej, t. j. 68 m, głos powtarza dwie ostatnie sylaby, echo więc będzie dwuzgłoskowe. W razie mowy powolniejszej lub prędszej, odległości muszą być odpowiednio zmienione.

Echo wielokrotne, t. j. powtarzające ten sam głos krótki, jak krzyk, wystrzał i t. p., kilka lub kilkanaście razy, polega na odbiciu głosu od wielu powierzchni; najpierw dochodzą nas odgłosy od powierzchni najbliższych, następnie od coraz dalszych. Tego rodzaju echo występuje często w lesie, w górach, w portach. Przy dwu tylko ścianach pobliskich, naprzeciw siebie położonych, może również zachodzić odbicie wielokrotne, np. w wąwozie.

9. Interferencja głosu. Podobnie jak fale wodne (pt.), fale głosowe przez spotkanie czyli skrzyżowanie mogą się nawzajem wzmacniać lub osłabiać. Łatwo zauważyć taką interferencję dwu fal jednakowych, obracając kamerton naokoło trzonka w stałym oddaleniu od ucha; oba ramiona chwilami różnią się w fazach, stąd słychać dźwięk przerywany. Jeżeli środek zgęszczenia jednej fali przypada na środek rozrzedzenia drugiej, fale się znoszą; tak więc dwa tony mogą się całkowicie stłumić nawzajem, skoro się różnią w punkcie wyjścia o pół fali.

Przyrząd Quinckego (rys. 441) służy do okazania takiej interferencji. Składa się z rury dwuramiennej, rozsuwanej i opatrzonej dwoma wylotami *aa* naprzeciw siebie. Ton kamertonu, trzymanego przy jednym wylocie, dochodzi do ucha przy drugim wylocie dwiema drogami: przez *c* i przez *b*. Jeżeli obie drogi są równej długości, fale ich się wzmacniają; przy wyciąganiu części *b* fale stopniowo się osłabiają, a gdy różnica między długością *c* i *b* dosięgnie $\frac{1}{2}$ fali, znoszą się wzajemnie, zatym rura tłumi zupełnie ton kamertonu. Np. dla normalnego kamertonu stłumienie ma miejsce, gdy różnica między *b* i *c* wynosi 38 cm; kamerton powyższy wydaje 435 drgań na sekundę, wytwarza więc fale długości 333 : 435 = 0,76 m = 76 cm.



Rys. 441.
Interferencja głosu.

Przyrząd Quinckego może służyć też do oznaczania szybkości głosu w różnych gazach, skoro jest wiadoma liczba drgań kamertonu, oraz długość ramion rury, przy której głos milknie.

Interferencja dwu dźwięków, różniących się nieznacznie, np. o kilka drgań na sekundę, sprawia t. zw. *dudnienie*, t. j. perjodyczne wzmacnianie i osłabianie dźwięku. Można je okazać na dwu jednakowych kamertonach, z których jeden obciążono na końcu ramienia małym ciężarkiem, przez co ton cokolwiek się obniża.

§ 81. Cechy głosu.

1. Różnica dźwięków. Fale głosowe różnią się między sobą: a) częstością, b) energją, c) kształtem. Stąd w głosie, a zwłaszcza w dźwiękach, słuch rozpoznaje trojaką właściwość: wysokość, natężenie i dźwięczność.

Na *wysokości* dźwięku, czyli ilości drgań, polega np. różnica w głosach męskich i kobiecych, w dźwiękach rozmaitych strun fortepianu.

Natężenie czyli *siła* głosu jest to wielkość wrażenia słuchowego; np. donośniej brzmi dźwięk trąby, niż fletu; głośniejszy jest wystrzał armatni; niż karabinowy.

Dźwięczność czyli *brzmienie* głosu (tembr, franc. timbre *) jest cechą, odróżniającą dźwięki o tej samej wysokości i natężeniu, np. dźwięki rozmaitych instrumentów, głosy ludzkie, tudzież samogłoski między sobą.

2. Złożoność dźwięków. Wszelkie dźwięki, z małym wyjątkiem (kamerton), składają się z połączenia kilku i więcej ruchów falowych. Np. struna, płyty dźwięczące podlegają drganiom złożonym, dzieląc się na części, z których każda wykonywa drgania pojedyńcze. Stąd fala wypadkowa ma kształt zawiły.

*) Dźwięczność bywa też nazywaną niewłaściwie *barwą głosu*. Barwy ciał (pt.) zasadniczo różnią się tylko liczbą drgań, stanowią więc analogję wysokości dźwięków, gdy tymczasem dźwięczność jest wynikiem złożoności dźwięków, a stąd kształtu fali.

Złożoność dźwięków stanowi przyczynę dźwięczności. Dźwięki, polegające na drganiach prostych, np. kamertonu, zowią się *tonami*; można więc powiedzieć, że dźwięki składają się z tonów.

Ponieważ drgania ciała dźwięczącego można rozłożyć na proste ruchy harmoniczne (pt.), powiadamy, że dźwięki muzyczne składają się z *tonów harmonicznych*; są one wielokrotne względem pierwszego, najniższego tonu w danym dźwięku, t. j. liczba ich drgań względem tonu zasadniczego wyraża się szeregiem liczb kolejnych 1 : 2 : 3 : 4 : 5 : 6... Stosownie do tego, czy danemu tonowi głównemu towarzyszą te lub inne tony harmoniczne, czy jedne z nich brzmią donośniej, inne słabiej, zmienia się dźwięczność głosu. Szczególnie w tony harmoniczne obfitują głosy ludzkie (pt. poniżej „Analiza dźwięków").

W muzyce wyraz „ton" obejmuje szersze pojęcie: używa się w znaczeniu „dźwięku". Właściwie oznacza on *ton zasadniczy*, czyli najniższy, każdego dźwięku muzycznego; ton ów głównie słyszymy w tym dźwięku.

Ucho ludzkie jest bardzo wrażliwe na dźwięczność głosu. Odróżnia subtelne odcienie w głosie rozmaitych osób, w grze rozmaitych artystów, w dźwiękach skrzypców różnego pochodzenia i t. p.

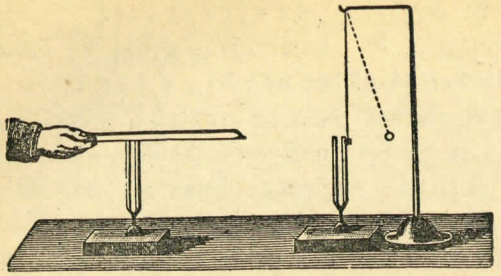
3. Rezonans polega na współbrzmieniu jakiegoś ciała, pod wpływem innego ciała, dźwięczącego w pobliżu. Ma on miejsce wtedy, gdy jedno z ciał może wydawać dźwięki tej samej wysokości, co drugie, czyli tę samą liczbę drgań; powiadamy wtedy, że oba ciała są dostrojone do jednakowego tonu. Np. struna skrzypcowa odezwie się, skoro uderzymy klawisz fortepianu, wydający taki sam ton, na jaki nastrojono strunę skrzypiec; za uderzeniem kolejnych klawiszy fortepianu, odzywają się kolejne struny arfy, gdyż arfa posiada taki sam strój, jak fortepian.

Wynikiem rezonansu jest wzmocnienie głosu, tym znaczniejsze, im większa masa ciał okolicznych współdźwięczy. Zjawisko to odgrywa poważną rolę w budowie sal akustycznych, podobnież w budowie instrumentów muzycznych.

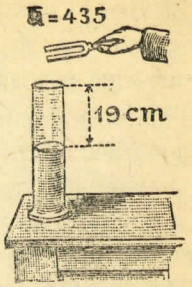
Teoretycznie warunek rezonansu polega na tym, że ciało pobudzane posiada ten sam okres drgań, jak ciało dźwięczące; wtedy amplitudy się powiększają, a stąd energja fal wzrasta.

Można wzbudzić rezonans i w ciałach różniących się co do okresu drgań, ale wtedy współdźwięczą one tylko tak długo, jak dźwięczy ciało pobudzające; np. pudła skrzypiec, fortepianu, bębenek ucha.

Doświadczenie (rys. 442). Najłatwiej sprawdzić warunek rezonansu na 2 kamertonach, jednakowo nastrojonych, np. normalnych, o 435 drganiach na sekundę. Za pociągnięciem jednego z kamertonów smyczkiem, lub za uderzeniem, drugi kamerton się odzywa; można to zauważyć bądź słuchem, bądź dotykając kamertonu kulką, wiszącą na nici.



Rys. 442.
Rezonans kamertonu.



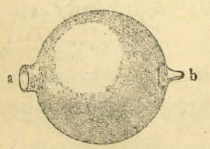
Rys. 443.
Rezonans powietrza.

Nietylko ciała stałe, ale i gazy mogą okazywać zjawisko rezonansu. warunkiem rezonansu jest odpowiednia d ł u g o ś ć słupa powietrznego, i wogóle gazowego: w rurze zamkniętej długość ta wynosi $\frac{1}{4}$ fali, w otwartej $\frac{1}{2}$ fali tonu dźwięczącego; wtedy bowiem zachodzi odbicie fali w końcu rury tak, iż amplitudy się zgadzają (pt. „Odbicie fal").

D o ś w i a d c z e n i e (rys. 443). Kamerton, trzymany nad otworem pionowej rury szklanej, brzmi słabo; skoro zmieniamy stopniowo wysokość słupa powietrznego w rurze, np. wlewając wodę, następuje wzmocnienie tonu. Dla kamertonu normalnego, o 435 drganiach (długość fali $= 333 : 435 =$ $= 0{,}76$ m $= 76$ cm), słup powietrza współbrzmiący wynosi $\frac{1}{4} \times 76 =$ $= 19$ cm.

Na rezonansie słupa powietrznego polega *analiza dźwięków*. Dobierając szereg naczyń walcowych lub kulistych, czyli *rezonatorów*, takiego wymiaru, aby każdy z nich wzmacniał jeden określony ton, i przykładając kolejno rezonatory do ucha, słyszy się wzmocnienie głosu lub nie, i stąd wnioskuje, jakie tony poszczególne składają dany dźwięk.

Tą drogą Helmholtz nietylko okazał złożoność wszelkich dźwięków, ale zdołał wyróżnić tony muzyczne w takich głosach nieokreślonych, jak szmer, szum, turkot, huk. Rezonatory Helmholtza składają się (rys. 444) z kul blaszanych o dwu wylotach naprzeciw siebie, z których węższy przykłada się do ucha.



Rys. 444.

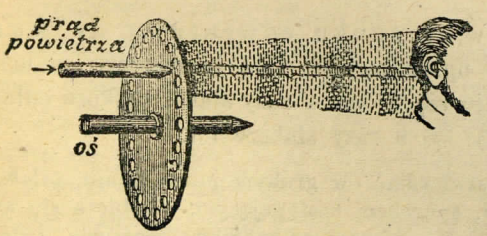
Analiza mowy ludzkiej wyjaśniła powstawanie samogłosek i spółgłosek. Samogłoski, wymawiane tym samym tonem, różnią się od siebie tylko w tonach harmonicznych. Krtań, a w niej struny głosowe, wytwarzają dany dźwięk; usta zaś odgrywają rolę rezonatora, którego kształt ustawicznie się zmienia, przez co raz te, raz inne tony harmoniczne nabierają siły, nadając brzmienie samogłosce. Spółgłoski są to szmery, towarzyszące samogłoskom i powstają od tarcia powietrza w różnych częściach jamy ustnej i gardzieli; stąd podział spółgłosek na wargowe, gardłowe, zębowe i t. d.

Podobnież stwierdza analiza dźwięków, że dźwięki różnych instrumentów, jednakowe co do wysokości, czyli co do tonu zasadniczego, składają się z rozmaitych tonów harmonicznych. Np. skrzypce, fortepian, flet, trąbka wydają dźwięk o 308 drganiach tonu głównego, któremu towarzyszą tony o liczbie drgań 2×308 jakoteż 3×308 i wyższe; jedne z nich brzmią silniej w fortepianie, inne w trąbce i tym podobnie, stąd słuch rozpoznaje odmienną d ź w i ę c z n o ś ć tych instrumentów.

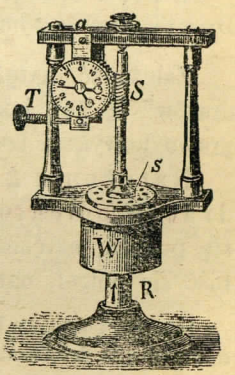
4. **Wysokość tonu** stanowi c z ę s t o ś ć d r g a n i a, t. j. liczba drgań głosowych na sekundę. Pod względem jej odróżniania istnieją szerokie granice w słuchu ludzkim: drgania jakiegoś ciała objawiają się jako tony, skoro ich częstość nie jest niższa od 16, ani wyższa od 40000 na sekundę (§ 80, art. 1). Zresztą przytoczone g r a n i c e s ł y s z e n i a dotyczą słuchu bardzo muzykalnego i wahają się u rozmaitych osób dosyć znacznie.

Dźwięki o znacznej liczbie drgań zowiemy *wysokimi*, o niewielkiej liczbie *niskimi*. Dźwięki zbyt wysokie lub zbyt niskie brzmią niemile, stąd w muzyce używamy dźwięków w granicach szczuplejszych, niż te, jakie słuch obejmuje: fortepian np. wydaje dźwięki od 27 do 3480 drgań na sekundę, głos ludzki 82 do 1044 drgań.

Do oznaczania liczby drgań służy *syrena*, której część zasadniczą stanowi krążek z otworami blisko obwodu, w równych odstępach (rys. 445). Prąd powietrza dmie z rurki prostopadłej do krążka; gdyby krążek był nieruchomy, a nawprost rurki przypadł otwór w krążku, powietrze miałoby drogę wolną, sprawiając wiatr w kierunku rury (linja podwójna, przerywana). Przy obracaniu krążka prąd chwilami uderza weń i zatrzymuje się, chwilami przechodzi, skąd powstają zgęszczenia i rozrzedzenia, czyli fale głosowe.



Rys. 445. Zasada syreny.



Rys. 446. Syrena.

Liczba drgań tonu wypada z pomnożenia liczby otworów krążka przez liczbę obrotów w ciągu sekundy. Mianowicie, krążek np. o 20 otworach, obracany 1 raz na sekundę, dałby 20 przerw w strumieniu powietrza, czyli 20 drgań na sekundę; obracany 2 razy, wyda 2×20, obracany 3 razy, wyda 3×20 i t. d.

Wygląd rzeczywisty syreny Cagniard de Latoura podaje rys. 446. Powietrze z miecha wpada rurą R do bębna W, nad którym znajduje się krążek z otworami s, obracający się na osi. Otworki krążka przypadają tuż nad otworami bębna, idą jednak skośnie względem nich (podobnie jak komórki w turbinie, rys. 411). Prąd więc powietrza wprawia krążek w ruch wirowy, który za pomocą śruby bez końca S przenosi się na kółko trybowe T, ze skazówką; mechanizm ten wskazuje odrazu liczbę obrotów krążka.

5. Zasada Dopplera, objaśniona teoretycznie w § 76, art. 12, objawia się w podwyższaniu lub obniżaniu tonów, skoro zmienia się odległość między uchem a ciałem dźwięczącym. Mianowicie, gdy ciało takie z dużej odległości przybliża się prędko ku słuchającemu, ton wydaje się wyższy; gdy się oddala, ton wydaje się niższy. Biegnąc bowiem naprzeciw fal, ucho chwyta je częściej; uciekając przed nimi, chwyta je rzadziej.

Przykłady. Świst lokomotywy przy zmijaniu się pociągów.—Dźwięki orkiestry na wybrzeżu, gdy przepływamy obok na parowcu.

6. Natężenie głosu, zwane potocznie **siłą głosu**, zależy od masy ciała dźwięczącego, od amplitudy oraz odległości. Im znaczniejszą ciało posiada masę, im obszerniejsze wydaje drgania, tym wydaje głos silniejszy, fale bowiem posiadają większą energję, zgodnie z teorją ruchu falowego (§ 76).

Wpływ amplitudy drgań łatwo okazać za pomocą kamertonu piszącego (rys. 431); bywa ona tym większa, im silniej uderzono kamerton, a wraz z nią wzrasta i siła tonu. — Struna szarpnięta mocno, brzmi głośniej, aniżeli trącona delikatnie.

Wpływ masy. Kamerton duży wydaje ton głośniejszy, niż mały. — Dzwony słychać tym donośniej, im są większe.

Zależność natężenia głosu od odległości wyraża się „prawem kwadratów" (§ 76), jako jeden z poszczególnych jego przypadków. Dla głosu prawo powyższe brzmi:

Natężenie głosu jest w stosunku odwrotnym do kwadratów odległości. Skoro np. odległość ciała brzmiącego od ucha się podwoi, natężenie głosu staje się $2^2 = 4$ razy słabsze; skoro odległość się potroi, natężenie jest $3^2 = 9$ razy słabsze i t. d.

Doświadczalnie można stwierdzić, w grubym przybliżeniu, osłabienie głosu z kwadratem odległości, sposobem następującym. Dobiera się kilka dzwonków automatycznych, jak np. w zegarze-budziku, możliwie jednakowych. Jeżeli głos jednego dzwonka słychać, np. na otwartym polu, najdalej o 30 metrów, to głos 4 takich dzwonków da się słyszeć na odległość 60 m, głos 9 dzwonków na odległość 90 m i t. d.

§ 82. Dźwięki muzyczne.

1. Zgodność tonów. Skoro dwa tony brzmią równocześnie, mogą dawać wrażenie przyjemne lub niemiłe (konsonans lub dysonans); pierwsze tony zowiemy *zgodnymi* względem siebie, czyli *harmonicznymi*, drugie *niezgodnymi* czyli *fałszywymi*. Zgodność zależy od stosunku liczby drgań obu tonów, odstępu muzycznego, czyli *interwału*; im prostszy bywa stosunek, tym przyjemniejsze daje wrażenie.

Współczesne brzmienie dwu lub więcej tonów zowie się *akordem*. Najbardziej zgodnie brzmią tony o stosunku 1 : 1, czyli jednobrzmiące (unisono); dalej tony o stosunku 1 : 2, przyczym ton niższy zowie się tutaj *zasadniczym*, ton o podwójnej liczbie drgań zowie się *oktawą* (właściwie oktawą jest nie sam ton, ale interwał obu tonów, czyli stosunek 2 : 1).

W muzyce strój instrumentów odbywa się według *normalnego kamertonu* o 435 drganiach na sekundę; postępując w dół i w górę, dojdziemy do ujęcia dźwięków muzycznych w granice kilku oktaw, np. 7 oktaw na fortepianie, wyrażonych liczbą drgań (ułamki przy liczbach pominięto):

27 : 54 : 109 : 218 : **435** : 870 : 1740 : 3480.

2. Gama muzyczna. Pomiędzy tonem zasadniczym a jego oktawą ucho wyróżnia 6 tonów, które w kolejnym następstwie tworzą *gamę muzyczną*; gama więc obejmuje 8 tonów, czyli 7 odstępów między nimi. Wyrażają się one względem tonu zasadniczego C szeregiem liczb:

	C	D	E	F	G	A	H	C
Wysokość względem C	1	$\frac{9}{8}$	$\frac{5}{4}$	$\frac{4}{3}$	$\frac{3}{2}$	$\frac{5}{3}$	$1\frac{5}{8}$	2
Interwały kolejne		$\frac{9}{8}$	$\frac{10}{9}$	$\frac{16}{15}$	$\frac{9}{8}$	$\frac{10}{9}$	$\frac{9}{8}$	$\frac{16}{15}$

Interwały $\frac{9}{8}$ i $\frac{10}{9}$, czyli $1\frac{1}{8}$ i $1\frac{1}{9}$, mało się różnią od siebie; w muzyce praktycznej nie robi się różnicy między nimi i nadaje miano *całych tonów*. Interwał $\frac{16}{15}$, czyli $1\frac{1}{15}$, o różnicy prawie 2 razy mniejszej, nazywa się *półtonem*. Gama więc naturalna, czyli *djatoniczna* składa się z 5 całych i 2 półtonów. W tabelce całe odstępy oznaczono kreskami; widać stąd, że odstęp trzeci i siódmy są półtonami.

Ponieważ można przyjąć za ton zasadniczy każdy ton gamy, czyli gamę można rozpoczynać od któregobądź jej tonu, zachodzi potrzeba wtrącenia wszędzie półtonów, gdzie ich brakuje w gamie naturalnej.

Zaczynając gamę, np. od tonu E, nie możemy przyjąć za drugi ton gamy tonu F, gdyż odstęp $F/E = \frac{16}{15}$ jest półtonem. Półtony można wtrącić albo przez podwyższenie tonów poprzednich o pół tonu, t. j. podniesienie ich liczby drgań w stosunku $\frac{16}{15}$, albo przez obniżenie tonów

następnych w tym samym stosunku. Tony podwyższone oznaczamy *krzyżykami* ♯ (nazwy: Cis, Dis i t. p.), obniżone oznaczamy *bemolami* ♭ (nazwy: Des, Es i t. p.).

Tony w ten sposób podwyższone i obniżone, np. C ♯ i D ♭, różnią się nieznacznie, tak iż na instrumentach o stroju stałym, np. fortepian, arfa, zrównywa się je całkowicie i wydobywa za pomocą tego samego klawisza lub struny (czarne klawisze fortepianu). Tak więc liczba wtrąconych półtonów sprowadza się z 10 do 5; powstała tą drogą gama, złożyna z 12 półtonów, zowie się *chromatyczną*.

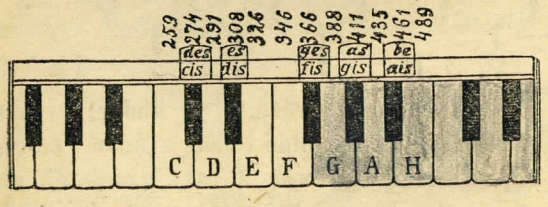
Oprócz półtonu $\frac{16}{15}$, w gamie przypada jeszcze półton $\frac{25}{24}$; jest to interwał między tonem E $= \frac{5}{4}$ i D ♯ $= \frac{6}{5}$, jako też między tonem A $= \frac{5}{3}$ i G ♯ $= \frac{8}{5}$. Tak więc, istnieją 2 rodzaje całych tonów i 2 rodzaje półtonów: interwał $\frac{9}{8}$, czyli wielki cały ton, $\frac{10}{9}$ mały cały ton; interwał $\frac{16}{15}$ wielki półton, $\frac{25}{24}$ mały półton.

Ażeby uniknąć niejednostajności półtonów, a zarazem uprościć gamę, w technice muzycznej wtrąca się półtony nie w stosunku $\frac{16}{15}$, ani $\frac{25}{24}$, ale w stosunku stałym, jaki wypada z następującej zasady: pozostawia się bez zmiany tony oktawowe, do każdej zaś oktawy wtrąca się 12 interwałów (półtonów) równych. Wartość takiego interwału x wynika z postępu geometrycznego: $1 : x : x^2 : x^3 : x^4 \ldots x^{11} : 2$.

czyli $x^{12} = 2$, skąd $x = \sqrt[12]{2} = 1{,}059\ldots$

Tak więc, *gama jednostajnie temperowana*, czyli *umiarkowana* (Rameau), panująca w obecnej muzyce, wyraża się szeregiem:

Tony	C	C ♯ / D ♭	D	D ♯ / E ♭	E	H	C.
Liczba drgań	1	$\sqrt[12]{2}$	$\sqrt[12]{2^2}$	$\sqrt[12]{2^3}$	$\sqrt[12]{2^4}$. . . .	$\sqrt[12]{2^{11}}$	2.



Rys. 447.

Rysunek 447 wyobraża część klawiatury fortepianowej z oznaczeniem rzeczywistej liczby drgań według powyższej zasady (Rameau). Bliższe szczegóły podaje teorja muzyki.

§ 83. Źródła dźwięków.

1. Narzędzia muzyczne, czyli **instrumenty** można podzielić w ogólności na *strunowe* i *dęte*. W pierwszych struny wydają dźwięki za pomocą szarpania palcami, np. w arfie, cytrze, lub uderzania w klawisze, np. fortepian, bądź pociągania smyczkiem, np. skrzypce, wiolonczela, kontrabas; instrumenty strunowe ostatniego rodzaju zowią się

smyczkowymi. W instrumentach dętych drga słup powietrza, zawarty w rurze; stąd nazwa *rury dźwięczące* albo *piszczałki*, np. rury organowe, flet, fujarka.

2. Dźwięki strun. Wysokość tonu zasadniczego, jaki wydaje struna, zależy od jej długości, grubości, materjału i napięcia. Mianowicie ton bywa tym wyższy:

a) im struna jest krótsza,
b) im jest cieńsza,
c) im mocniej jest napięta,
d) im mniejszą posiada gęstość.

Za pomocą monochordu (rys. 432) można stwierdzić te zależności, przyczym wynika, że liczba drgań n jest w stosunku odwrotnym do długości L i średnicy D struny, oraz do pierwiastka z gęstości d, a w stosunku prostym do pierwiastka z napięcia P struny (wzór Taylora, 1716):

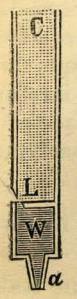
$$n = \frac{1}{LD} \cdot \sqrt{\frac{P}{d}}.$$

Tak np. ton o podwójnej liczbie drgań, czyli oktawę tonu zasadniczego, można otrzymać za pomocą struny 2 razy krótszej, albo 2 razy cieńszej, albo wyrobionej z materji 4 razy lżejszej, albo napiętej ciężarem 4 razy większym.

Zastosowania. Fortepian z prawej strony mieści struny do wysokich tonów: żelazne, krótkie, cienkie, sztywne; ku lewej zaś stronie, do niższych tonów, coraz dłuższe, grubsze, mniej naprężone; ostatnie (najniższe) nadto okręcone miedzią lub srebrem. — Strojenie fortepianu, arfy, skrzypców. — Gra na skrzypcach: skracanie struny przez naciskanie palcem; gamę wygrywa się, stawiając palec kolejno w odległościach $\frac{8}{9}, \frac{4}{5}, \frac{3}{4}, \frac{2}{3}, \frac{3}{5}, \frac{8}{15}, \frac{1}{2}$ od podstawki, czyli w stosunku odwrotnym do liczby drgań każdego z tonów gamy.

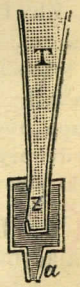
3. Dźwięki piszczałek. Słup powietrza w piszczałkach można pobudzić do drgania w sposób dwojaki.

a) W *piszczałkach wargowych* (fletowych, rys. 448) strumień powietrza, wdmuchiwany ustami lub miechem, dzieli się w otworze, przy ostrej krawędzi, zwanej *wargą*, na dwie części: jedna wychodzi na zewnątrz, druga wpada do rury i wywołuje chwilowe zgęszczenie, które wstrzymuje dalszy dopływ, tak iż cały prąd uchodzi na zewnątrz; w następnej chwili przy wardze zachodzi rozrzedzenie i t. d.



Rys. 448. Piszczałka wargowa.

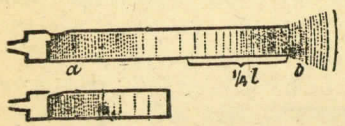
b) W *piszczałkach stroikowych* (języczkowych, rys. 449) prąd powietrza działa na blaszkę sprężystą, zwaną językiem lub stroikiem, który waha się w otworze, zamykając go i otwierając naprzemian.



Rys. 449. Piszczałka stroikowa.

Piszczałki wargowe mogą być *otwarte* lub *kryte* (zamknięte). Piszczałka otwarta wydaje ton zasadniczy oktawą wyższy od tonu tej samej piszczałki krytej.

Objaśnienie polega na teorji odbicia fal. W miejscu wdmuchiwania panuje wstrząśnienie powietrza, zatym wzdęcie fali; na końcu rury otwartej jest również wzdęcie, na końcu rury zamkniętej istnieje węzeł (rys. 450).



Rys. 450.

Odstęp dwu węzłów lub dwu wzdęć wynosi $\frac{1}{2}$ fali (§ 75, art. 3); zatym długość piszczałki otwartej $L_0 = \frac{1}{2}l$; długość krytej $L_k = \frac{1}{4}\ l$ (rys. 450). Piszczałka więc otwarta musi dawać ton oktawą wyższy od tonu piszczałki krytej, przy tej samej długości rury L.

Stąd wysokość tonu zasadniczego piszczałki otwartej

$$n_0 = \frac{c}{2L}.$$

Wysokość tonu zasadniczego piszczałki krytej

$$n_k = \frac{c}{4L}.$$

(W obu wzorach c oznacza szybkość głosu, L długość rury).

Wysokość tonu piszczałek zależy od ich długości i od siły dęcia, nie zależy zaś od szerokości rury, ani jej materjału; te ostatnie warunki wpływają tylko na dźwięczność głosu.

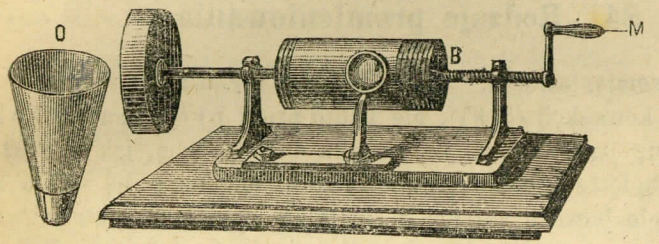
Długość rury wpływa w podobny sposób, jak długość struny: wysokość tonu jest w stosunku odwrotnym do długości rury.

Jeżeli prąd powietrzny się wzmaga, ton się podwyższa, przyczym piszczałki otwarte wydają wszystkie tony harmoniczne, t. j. tony o liczbie drgań 1, 2, 3, 4, 5, 6...; piszczałki zamknięte wydają tylko nieparzyste tony harmoniczne, t, j. tony o liczbie drgań 1, 3, 5, 7... względem zasadniczego.

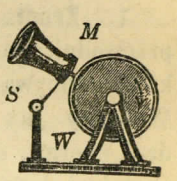
Zastosowania. Rury organowe, flet, gwizdawki (piszczałki wargowe).— Klarnet, obój, fagot, trąbka, puzon, krtań ludzka (piszczałki stroikowe); w trąbach rolę stroika pełnią wargi grającego. — Pistony, czyli klapki przy trąbach umożliwiają wygrywanie wszystkich tonów gamy przez skracanie słupa powietrznego. Dawniejsze instrumenty dęte mosiężne, bez pistonów, wydawały tylko szereg tonów harmonicznych: stąd ograniczenia w partyturze orkiestrowej dawniejszych mistrzów (Haydna, Mozarta, Beethovena).

4. Fonograf (Edison 1877) jest przyrządem utrwalającym i powtarzającym głos w jego najrozmaitszych odmianach. Drgania głosowe udzielają się błonie, która za pomocą igły kreśli je na powierzchni walca, wirującego dokoła osi. W *gramofonie* igła kreśli drgania na płaskim krążku wirującym.

Fonograf (rys. 451 i 452) składa się z dwu części głównych. Część piszącą stanowi lejek, czyli rezonator O, zamknięty u dołu błoną drgającą, czyli djafragmą, zaopatrzoną w igłę. Część drugą stanowi wałek B, powleczony materją plastyczną i obracany mechanizmem zegarowym (na rysunku rączką). Lejek ustawia się przy wałku tak, iż igła dotyka zlekka powierzchni wałka, a zarazem posuwa się po linji śrubowej. Pod wpływem głosu błona drga, a igła wchodzi to głębiej, to płyciej w masę walca, znacząc na nim wszelkie cechy głosu: głębokość wydrążeń stanowi o natężeniu głosu, ilość takowych o wysokości tonu, postać zależy od dźwięczności. Np. łagodne tony kamertonu dają na wałku jednostajną linję falistą (sinusoidę); dźwięki syreny, pochodzące od krótkich, urywanych podmuchów powietrza, dają linję o karbach krótszych i dłuższych naprzemian; ostre dźwięki piły tworzą linję o karbach śpiczastych. Tak więc fonograf nadaje się wybornie do badania rozmaitych dźwięków.



Rys. 451. Fonograf, wzorzec zasadniczy.



Rys. 452. Fonograf z boku.

Odtwarzanie głosu odbywa się drogą odwrotną; igła trafiając w wydrążenia, drga odpowiednio i pobudza do drgania błonę, skąd powstają dźwięki takie same, jakie brzmiały przed tubą fonografu.

Wadą wszelkich fonografów i gramofonów jest pewien szum, nieodłączny od dźwięków wydawanych. Szum ten pochodzi od tarcia igły o powierzchnię wałka; powyższa wada nie da się w zupełności usunąć w fonografach, opartych na mechanicznym zapisywaniu głosu.

ROZDZIAŁ VIII.

NAUKA O PROMIENIOWANIU.

(O P T Y K A *)

A) ENERGJA PROMIENISTA.

§ 84. Rodzaje promieniowania.

1. Źródła promieniowania. Ciepło uchodzi z ciał nie tylko wskutek przewodnictwa i konwekcji (§ 51), ale nadto przez promieniowanie, które odbywa się zarówno w środowisku materjalnym, jak w próżni. Wnosimy już stąd, że promieniowanie stanowi odmienny od ciepła rodzaj energji, ciepło bowiem rozchodzi się tylko w ciałach materjalnych. Promieniowanie zresztą przenosi nie tylko ciepło (w tym wypadku nazwano je dawniej „ciepłem promienistym"), ale i światło, energję chemiczną i inne; wogóle więc promieniowanie należy uważać jako ruch energji swoistej, zwanej *energją promienistą*.

Ciepło stanowi źródło promieniowania najpospolitsze, lecz nie wyłączne; promieniowanie np. powstaje przy zjawiskach elektrycznych, chemicznych, przy rozpadzie ciał promieniotwórczych (pt.).

Wybitny przykład energji promienistej daje promieniowanie słońca. Ciepło słoneczne zamienia się na energję promienistą, która z olbrzymią szybkością (w ciągu ośmiu minut) dochodzi do ziemi, gdzie przemienia się znów na ciepło lub inną energję.

2. Przebieg i rodzaje promieniowania. Spotykając ciała, promieniowanie ulega losowi trojakiemu: część zostaje odbita, czyli zwraca się wstecz, inna część pochłonięta, czyli zatrzymuje się w ciele, reszta zostaje przepuszczona, czyli przenika ciało nawskroś. Pochłanianie promieni objawia się zazwyczaj jako ciepło, czyli rozgrzewa ciała i służy do ilościowego oznaczania energji promienistej. Wogóle zaś możemy badać tę energję nie w jej przebiegu, który się odbywa niesłychanie szybko, ale tylko w jej skutkach; według tego odróżniamy rozmaite rodzaje promieni.

*) Pt. także rozdział XI D „Promieniowanie elektryczne".

Promieniowanie, działające na zmysł wzroku zowiemy promieniowaniem widzialnym albo jasnym, czyli *światłem*; inne rodzaje promieniowania, np. *cieplne*, jakie odczuwamy np. w pobliżu pieca lub w słońcu, jako też *chemiczne*, działające na kliszę fotograficzną, nazywają się promieniowaniem ciemnym, czyli niewidzialnym. Nazwę „promienie widzialne" rozumieć należy potocznie, zamiast „promienie, czyniące ciała widzialnymi"; samych bowiem promieni światła nie widzimy, tylko przedmioty, na jakie one padają.

Przestrzeń między słońcem a ziemią jest ciemna, jakkolwiek ją przenikają niezliczone promienie światła, widzimy natomiast niebo, t. j. atmosferę oświetloną słońcem; niebo na znacznych wysokościach wygląda coraz ciemniej, ponieważ wtedy nad nami mniejsza ilość cząstek powietrza jest oświetlona. Tak zwane „promienie słońca" w postaci smug jaskrawych w powietrzu znaczą tylko drogę promieni po pyłkach kurzu lub kropelkach, rozsianych w atmosferze.

Ze wszystkich rodzajów promieniowania najlepiej i najdawniej poznano światło. Stąd nazwę optyki, czyli nauki o świetle, rozciągnięto na całą naukę o promieniowaniu; zjawiska świetlne składają tu dział najobszerniejszy i praktycznie najważniejszy.

3. Istotę promieniowania upatruje nauka w drganiach eteru powszechnego. Jak kamerton dźwięczący wprawia w ruch wahadłowy cząstki powietrza, tworząc fale, które roznoszą głos naokoło, podobnież ciało ogrzane lub ciało świecące wywołuje w otaczającym eterze fale, które rozchodzą się na wszystkie strony w promieniach, wytwarzających światło, ciepło, działania chemiczne i t. p. Promienie te nazywamy wprost promieniami światła, promieniami ciepła, promieniami chemicznymi, pamiętając wszakże, iż niosą one wspólną energję promienistą, która dopiero w odpowiednich warunkach daje zjawiska światła, ciepła i chemizmu.

Teorję undulacyjną, t. j. opartą na ruchu falowym eteru, zapoczątkował względem światła jeszcze Huyghens (1678); rozwinęła się ona jednak dopiero dzięki pracom Fresnela i Younga (1815), które ostatecznie obaliły dawniejszą teorję emisyjną Newtona, poczytującą światło za wypływ cząstek materjalnych. Słabą stroną teorji emisyjnej była, np. niemożność wytłómaczenia zjawiska tak pospolitego, jak uginanie się promieni (pt. § 97 „Światło jako ruch falowy"); zjawisko to staje się łatwo zrozumiałe na zasadzie teorji undulacyjnej (§ 76, art. 10).

Fale promieniowania należą do poprzecznych (§ 74), cząstki bowiem eteru wahają się prostopadle do kierunku promienia.

4. Świecenie ciał. Ciała, które same są źródłem światła, t. j. wydają promienie świetlne, zowiemy *świecącymi*; ciał takich na ziemi jest bardzo niewiele. Pozostałe stanowią ciała *ciemne*, widzialne tylko wtedy, gdy na nie padają promienie obce, to jest gdy są oświetlone.

Np. słońce, gwiazdy należą do ciał świecących; planety są przeważnie ciałami ciemnymi, świecą one światłem odbitym, pochodzącym od słońca. Niekiedy ciała oświetlone jaśnieją tak mocno, że można je wziąć za świecące, np. lustra, metale na słońcu, księżyc.

Ciała świecące są zwykle w stanie rozżarzonym; rzadko daje się spostrzegać świecenie na zimno i jest zawsze bardzo słabe.

Każde ciało stałe lub płynne zaczyna świecić za ogrzaniem do temperatury około 500° C. (*prawo Drapera*).

Należy tu rozumieć ciała, nie ulatniające się, ani rozkładające się chemicznie przy takim ogrzewaniu. Zależnie od wrażliwości oka, temperatura świecenia zaczyna się od 475° do 550°; podaną więc temperaturę 500° należy rozumieć dla oka średnio czułego.

Nadto temperatura wpływa na rodzaj promieni i jasność światła: poniżej 500° C. ciała wydają tylko ciemne promienie ciepła, między 500° a 600° zaczynają świecić czerwono (żar czerwony, temperatura czerwoności), około 1000° jaśnieją światłem żółtym, około 1500° jaskrawym światłem białym (żar biały, temperatura białości). Zarazem wzrasta obfitość promieni chemicznych.

Do zimnych źródeł światła należy fosforescencja i fluorescencja.

Fosforescencja polega na świeceniu ciał przez utlenianie nadzwyczaj słabe, prawie znikome, np. fosforu, próchna, bądź na czynnościach fizjologicznych, np. u t. zw. robaczków świętojańskich, niektórych istot morskich. Powodem fosforescencji może też być naświetlanie ciał, np. soli wapiennych, zwłaszcza siarczków wapnia, oraz strontu i baru; świecą one całymi godzinami po naświetleniu i służą jako farby do powlekania przedmiotów, gdy chodzi o ich dostrzeżenie w ciemności, jak lichtarze, zapalniczki, zegary. Energja promieni nagromadza się tu do pewnego stopnia, a następnie ujawnia się jako światło.

Fluorescencją nazywa się świecenie pod wpływem niewidzialnych promieni, t. j. takich, które same nie oddziaływają na nasz wzrok, np. promieni t. zw. chemicznych, o częstości drgań wyższej, niż promieni światła. Ciała fluoryzujące ukazują się pod wpływem takich promieni w kolorze rozmaitym: jedne są błękitne, np. chinina, inne czerwone, np. spat wapienny, żółte lub zielonawe, np. szkło uranowe. Niektóre ciała fluoryzują i w promieniach zwykłego światła dziennego, ukazując inny kolor w jednym kierunku, niż w drugim, np. nafta, benzyna i wiele barwików organicznych. Dla objaśnienia fluorescencji należy przyjąć, iż ciało posiada własność zamiany częstszych drgań eteru na rzadsze, czyli jest jakby transformatorem energji promienistej.

5. Przepuszczalność ciał dla energji promienistej. Pod względem przepuszczania rozmaitych promieni ciała różnią się bardzo znacznie.

a) Dla światła dzielimy ciała zwykle na przezroczyste, przeświecające i nieprzezroczyste. *Przezroczyste* są ciała, przez które dokładnie widać przedmioty, np. szkło, woda, lód, powietrze; *nieprzezroczyste* zatrzymują światło całkowicie, np. metale, węgiel; *przeświecające* przepuszczają światła tyle, że są nawskroś oświetlone, ale niepodobna przez ciała takie widzieć przedmiotów, np. papier, szyba matowa, porcelana, stearyna.

Podział ten jest względny. Właściwie wszystkie ciała są przeświecające, t. j. przepuszczają mniej lub więcej światła, częściowo zaś je zatrzymują. Najczystsze szkło lub woda stają się nieprzezroczyste w bardzo grubych warstwach; nawzajem ciała nieprzepuszczalne dla światła, jeżeli dadzą się rozpostrzeć w cieniutkich warstwach, okazują się przezroczyste, np. złoto malarskie, powłoka kopciu, albo metalu rozpylonego na szkle, jak w starych lampkach elektrycznych (żarówkach).

b) Przepuszczalność ciał dla promieni cieplnych nazywa się *przecieplaniem*, a ciała, stosownie do zachowania się względem tych promieni, przecieplającymi, czyli djatermicznymi, bądź nieprzecieplającymi, czyli atermicznymi. Do pierwszych należy sól kuchenna, powietrze, jod w roztworze; do ostatnich woda, lód, ałun, metale.

c) Promienie chemiczne najlepiej przepuszcza kryształ górski, spat islandzki, fluspat, słabo zaś szkło, powietrze.

Tak więc, z przezroczystości dla światła nie można wnosić o przepuszczalności dla innych promieni, ani nawzajem.

Ciała niejako rozdzielają promienie różnego rodzaju. Np. szkło przepuszcza światło, zatrzymuje wszelkie promienie ciemne, stąd ma zastosowanie w cieplarniach, inspektach; jod, sól zakopcona, nieprzezroczyste dla światła, przepuszczają promienie ciepła; atmosfera zasłania ziemię głównie od promieni chemicznych słońca, przepuszcza promienie jasne, t. j. idące od ciała rozpalonego, zatrzymuje natomiast promienie ciemne, a stąd ma znaczenie jako osłona ziemi, zatrzymująca ciepło w niej nagromadzone.

6. Wysyłanie i pochłanianie promieni (emisja i absorbcja). Ilość energji promienistej, jaką ciało wydaje w ciągu sekundy z każdego cm^2 swej powierzchni, zowie się *emisją*; jest ona miarą sprawności promieni wysyłanych. Emisja zależy od temperatury ciała promieniującego, od właściwości powierzchni i od barwy ciała, mianowicie:

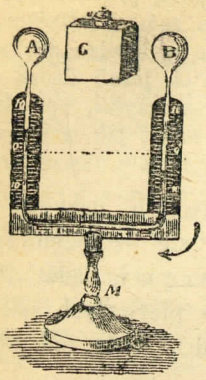
1) Im wyższą temperaturę posiada ciało ponad otoczeniem, tym więcej wysyła promieni.

2) Powierzchnia szorstka promieniuje silniej, niż gładka.

3) Ciemna barwa powierzchni zwiększa promieniowanie.

Największą emisję okazuje sadza, jako ciało prawie doskonale czarne i matowe; najmniejszą metale wygładzone, lśniące, zwłaszcza srebro, nikiel, mosiądz.

Powyższe zależności sprawdza się za pomocą *termometru różnicowego* (rys. 453). Składa się on z dwu baniek szklanych, zawierających powietrze, a połączonych rurką, która zawiera nieco wody; poziom wody jest w obu ramionach jednakowy, skoro kulki mają tę samą temperaturę. Pomiędzy kulki wstawia się sześcian blaszany o ścianach przeciwległych odpowiednio zmienionych na powierzchni: naprzeciw ściany gładkiej jest szorstka, naprze-



Rys. 453.
Termometr różnicowy.

ciw białej jest czarna. Wpływ temperatury sprawdza się, ustawiając sześcian obok jednej z kulek i napełniając raz wodą letnią, drugi raz gorącą; słupek cieczy w rurce posuwa się w ostatnim wypadku dalej, niż w pierwszym. Wpływ powierzchni bada się, wstawiając sześcian z wodą gorącą pomiędzy kulki, w równej odległości, do A zwrócony stroną gładką, do B chropowatą; słupek posuwa się od B do A. Wpływ koloru okazuje się podobnież, zwracając sześcian stroną białą do A, czarną do B; przesunięcie słupka ma miejsce od B do A.

Z badań ściślejszych wynika, że dla ciała doskonale czarnego, do jakiego zbliża się sadza, emisja (E) rośnie w stosunku do 4-ej potęgi temperatury bezwzględnej (T), czyli $E = k \cdot T^4$ (*prawo Stefana*). Całkowita ilość energji promienistej, wydawanej przez 1 cm² ciała, na sekundę wynosi

$$E_0 = 1{,}28 \cdot 10^{-12}\ T^4 \text{ kalorji.}$$

7. Związek między emisją i absorbcją. Energję promienistą, jaką wydaje pewne ciało, pochłaniają inne ciała, rozgrzewając się przytym mniej lub więcej. Pochłanianie to, czyli *absorbcja* jest w ścisłej zależności od zdolności emisyjnej danego ciała, mianowicie:

Zdolność pochłaniania promieni cieplnych jest równa zdolności wysyłania (*prawo Kirchhoffa*). Należy przez to rozumieć, że każde ciało pochłania najsilniej te właśnie promienie, jakie samo wysyła przy tej samej temperaturze ku innym ciałom. Tak np. węgiel rozpalony, żużle, żelazo, jaśniej się żarzą i mocniej grzeją swe otoczenie, aniżeli szkło lub gazy, rozgrzane do tej samej temperatury.

Do sprawdzenia prawa Kirchhoffa służy przyrząd rys. 453 z pewnymi zmianami. Kulkę A należy poczernić sadzą, a B posrebrzyć i wygładzić; z sześcianem postąpić tak samo, czerniąc i srebrząc dwa jego boki przeciwne. Wtedy po wstawieniu sześcianu z wodą gorącą pomiędzy kulki, czarną stroną do kulki posrebrzonej B, i nawzajem, słupek cieczy w rurkach się nie poruszy.

8. Rola promieniowania cieplnego. Biała i lśniąca powierzchnia pieców; malowanie beczek do nafty, lodowni, okrętów podzwrotnikowych na biało; jasne ubiory i kapelusze w lecie, tudzież w krajach gorących. — Ciemna barwa i szorstka powierzchnia rur ogrzewających (kaloryferów); polerowanie rur parowych, należących do maszyn. — Gęstsza rosa i szron na ciemnej roli, niż na piasku. — Mróz w zimie pomimo blasku słonecznego. — Ubytek ciepła w miarę wznoszenia się nad ziemią: powietrze nie ogrzewa się wprost od promieni słońca, lecz od zetknięcia z ziemią rozgrzaną.

§ 85. Ruch promieniowania.

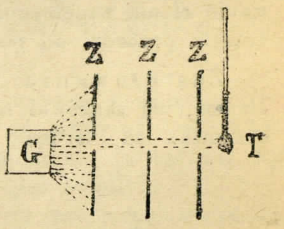
1. Rozchodzenie się promieni. Wszelkie promieniowanie rozchodzi się po linjach prostych, zwanych *promieniami*. Zboczenie lub skrzywienie promieni może mieć miejsce tylko wtedy, gdy promienie padają na ciała nieprzepuszczalne lub przechodzą do innego środowiska; zjawiska takie stanowią odbicie i załamanie promieni (pt.).

Teoretycznie promień stanowi kierunek biegu fali (§ 76); jako prostopadły do powierzchni fali, musi wydłużać się wciąż prosto, gdy fala kulista rozchodzi się w ośrodku jednolitym, tworząc coraz większe powierzchnie spółśrodkowe.

Doświadczalnie stwierdza się prostodrożny bieg promieni w sposób rozmaity, zależnie od rodzaju promieni.

a) Ażeby okazać kierunek promieni światła, czyli, jak się mówi potocznie, uczynić je widocznymi, należy wpuścić do pokoju zaciemnionego wąski pasek promieni słonecznych przez otwór w okiennicy. Wtedy w kurzu, jaki się unosi w powietrzu, znać prosty ślad promieni. Wyraźniej można sprawdzić kierunek promieni, puszczając wąski pasek światła wzdłuż ściany, albo na tarczę Hartla (pt. poniżej rys. 486), przyrząd powszechny do doświadczeń optycznych.

Dla promieni ciepła służy doświadczenie, objaśnione na rys. 454, gdzie G stanowi źródło ciepła, np. sześcian z wodą gorącą, ZZZ szereg zasłon nieprzepuszczalnych, np. blach, w środku przedziurawionych, T czuły termometr. Skoro wszystkie otworki i kulka termometru leżą na linji prostej, termometr się rozgrzeje.

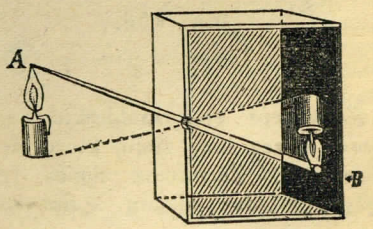


Rys. 454.

Dla promieni chemicznych może służyć to samo doświadczenie, skoro w G umieścimy np. płomień siarki, w T kliszę fotograficzną; klisza naprzeciwko otworków okaże ciemną plamkę.

Zastosowania. Celowanie z broni palnej. — *Celowniki*, czyli *wizjery* fotograficzne, astronomiczne, geodezyjne, za pomocą których ustawia się aparaty dokładnie nawprost punktów żądanych. — Wytykanie linji prostej w polu, za pomocą trzech kołków, naprzemian przestawianych. — Parasolka.

Ciemnia optyczna (camera obscura, rys. 455), daje pomniejszone wizerunki przedmiotów zewnętrznych, podobne do tych, jakie otrzymuje się dokładniej za pomocą soczewek fotograficznych. Składa się ze skrzynki, opatrzonej małym otworkiem w ścianie przedniej, zwróconej do przedmiotu; na tylnej ścianie, naprzeciw otworu, powstaje obraz przedmiotu w położeniu odwróconym,



Rys. 455. Ciemnia optyczna.

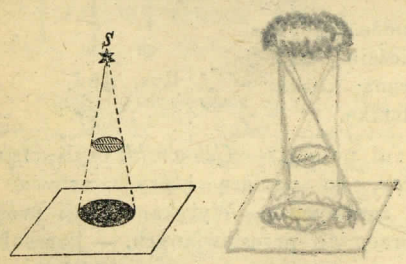
tym mniejszy, im przedmiot jest dalej. Mianowicie, punkt A przedmiotu wysyła wiązkę promieni świetlnych, która przenikając przez otworek, daje w B na przeciwnej ścianie plamę jasną, mającą kształt otworu. Podobne plamki dają inne punkty ciała oświetlonego, tak iż zlewają się one w jedną całość, tworząc o b r a z całego ciała, przyczym położenie plamek jest odwrotne, niż punktów, z jakich pochodzą; promienie krzyżują się w otworze. Im mniejszy jest otworek, tym wyraźniejszy jest obraz przedmiotu, ale słabszy co do jasności. Zupełnej wyrazistości osiągnąć niepodobna z powodu uginania światła (§ 97. art. 6).

W ten sposób można wytłómaczyć krążki świetlane na ziemi pod drzewami: są to niedokładne obrazy słońca. W czasie częściowego zaćmienia słońca plamy świetlane na ziemi mają postać sierpa (dlaczego?).

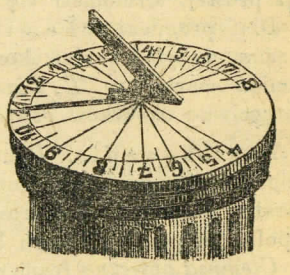
2. Cienie. Skoro promienie światła spotykają na drodze ciało nieprzezroczyste, poza tym ciałem powstaje *cień*, t. j. przestrzeń, pozbawiona światła. Cień na powierzchni płaskiej daje zarys przedmiotu, czyli jego podobiznę obwodową. Zarys ten bywa wyraźny, czyli ostro odgraniczony od tła, albo też brzegi jego są podwójne, potrójne i t. d., lub niejasne, rozpływają się na tle oświetlonym; cienie ostatniego rodzaju zowią się *półcieniami*.

Cień wyraźny bywa wtedy, gdy światło pochodzi z jednego punktu, np. od słońca, od świecy zdaleka; półcienie, gdy z wielu punktów, albo od całej powierzchni świecącej, np. od nieba. Rys. 456 objaśnia w A powstawanie cienia zupełnego, w B powstawanie półcienia; w ostatnim wypadku światło pochodzi od powierzchni świecącej AB.

Z a s t o s o w a n i a. *Kompas*, czyli *zegar słoneczny* (rys. 457) rzuca na słońcu cień skazówki na podziałkę godzinową, zrobioną na poziomej tarczy; skazówka ma kierunek osi ziemskiej.

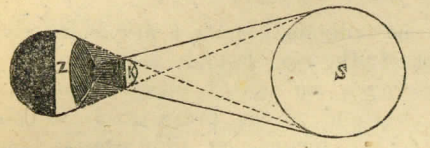


Rys. 456.

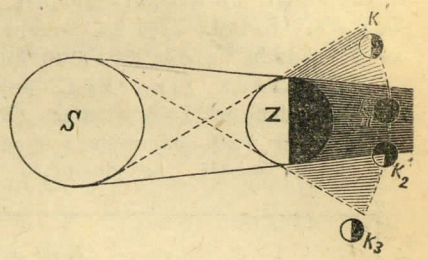


Rys. 457. Kompas.

Zaćmienia ciał niebieskich zachodzą wtedy, gdy na ciało pada cień, rzucony przez inne ciało, które się znajduje chwilowo na drodze promieni słonecznych. Zaćmienie słońca (rys. 458) ma miejsce wskutek położenia księżyca między ziemią a słońcem; zaćmienie księżyca (rys. 459) wskutek położenia ziemi pomiędzy słońcem a księżycem. Z rycin widać zarazem, że zaćmienie słońca bywa widzialne tylko na małej części ziemi, zaćmienie księżyca widać z całej półkuli ziemskiej; pierwsze może być tylko w czasie nowiu, drugie w czasie pełni księżycowej. Szczegóły podaje nauka kosmografji.



Rys. 458. Zaćmienie słońca.



Rys. 459. Zaćmienie księżyca.

3. Szybkość światła jest tak znaczna, że usuwa się z pod zwykłych spostrzeżeń. Na drodze ścisłych doświadczeń fizycznych, zarówno jak spostrzeżeń astronomicznych, obliczono, że w próżni

szybkość światła = 300000 km/sek.

W powietrzu szybkość światła różni się bardzo mało

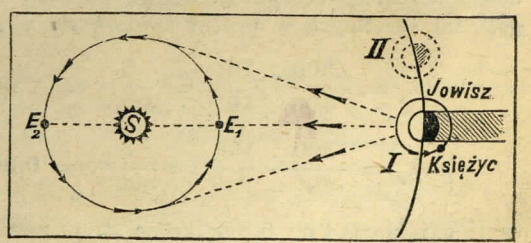
Liczba ta w warunkach ziemskich jest niepomiernie wielka, tak iż zwykle pomijamy czas, jakiego potrzebuje światło na przebycie pewnej drogi.

Wobec jednak odległości niebieskich szybkość światła wydaje się nieznaczną i służy często do oceny odległości w t. zw. l a t a c h ś w i a t ł a. Np. światło najbliższej gwiazdy (α Centaura) dochodzi nas po upływie $3\frac{1}{2}$ lat; średnicę drogi mlecznej ocenić można na 7000 „lat światła".

Szybkość światła w rozmaitych gazach nie różni się znacznie od szybkości w próżni, natomiast w ciałach płynnych i stałych jest znacznie mniejsza: w wodzie wynosi okrągło 225 000, w szkle 200 000, w djamencie 120 000 km/sek.

4. Pomiar szybkości światła. 1) M e t o d a a s t r o n o m i c z n a polega na obserwacji zaćmienia księżyców Jowisza (Olaf Römer 1676, rys. 460).

Planeta Jowisz posiada kilka księżyców, z których najbliższy obiega ją w ciągu $42\frac{1}{2}$ godziny, kryjąc się perjodycznie w cieniu Jowisza. Skoro ziemia w swej drodze naokoło słońca przejdzie od E_1 do E_2 (w ciągu około 200 dni), Jowisz posuwa się z położenia I do II; przez ten czas ma miejsce cały szereg zaćmień jowiszowego księżyca, termin ich łatwo obliczyć z $42\frac{1}{2}$ godzinnego obiegu księżyca.

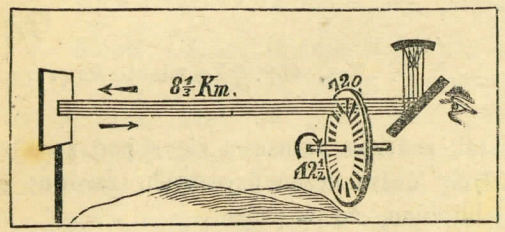


Rys. 460. Pomiar szybkości światła.

Okazuje się jednak, że każde zaćmienie spóźnia się cokolwiek; ziemia bowiem odsuwa się od Jowisza, i światło od niego ma coraz większą drogę do przebycia. Skoro ziemia oddali się na $E_1 E_2$, t. j. na podwójną odległość swą od słońca = 300 000 000 km, zaćmienie dostrzeżone spóźnia się o 16 minut 36 sekund względem obliczonego na zasadzie samych obiegów księżyca. Światło więc na przebycie 300 000 000 km potrzebuje 996 sek; na 1 sekundę wypada 301 000 km.

2) Metoda fizyczna, polega na odbiciu światła i przyjęciu odbitych promieni na koło wirujące (Fizeau 1849, rys. 461).

Koło o 720 otworach i tyluż równych im zębach wiruje dokoła osi. Promienie światła, przedostające się wąskim pasem przez otwór w kole, biegną po linji prostej i padają na lustro, odległe o $8\frac{1}{3}$ km, poczym odbite powracają tą samą drogą. Jeżeli koło obraca się powoli, światło wpada napowrót do oka przez ten sam otwór; gdy jednak koło robi na sekundę $12\frac{1}{2}$ obrotów, światło znika, bo wracając, trafia na miejscu otworu następujący po nim ząb.



Rys. 461. Pomiar szybkości światła.

Za jednym obrotem na sekundę przesuwa się przed okiem 720 otworów i tyleż zębów, t. j. 1440 odstępów o szerokości zęba; przy $12\frac{1}{2}$ obrotach = $12\frac{1}{2}$. 1440 = 18000 odstępów na sek. Zatym przesunięcie koła o jeden ząb trwa $\frac{1}{18000}$ sek.; w tym czasie promień światła przechodzi drogę 2 . $8\frac{1}{3}$ = $16\frac{2}{3}$ km.

W $\frac{1}{18000}$ sek. światło przebywa $16\frac{2}{3}$ km.

„ 1 „ „ $16\frac{2}{3}$. 18000 = 300 000 km.

5. Długość fal świetlnych oblicza się według wzoru ogólnego na ruch falowy (§ 76) $c = n \cdot \lambda$, skąd:

$$\lambda = \frac{c}{n}.$$

Rozmaite barwy światła różnią się od siebie częstością drgań eteru (por. „Widmo"); najpowolniejsze są drgania w promieniach czerwonych, około 400 biljonów na sekundę, najszybsze w promieniach fijołkowych, około 800 biljonów. Tak więc z podstawienia v = 300 000 km, n = 400 biljonów dla barwy czerwonej, a 800 biljonów dla fijołkowej, wypada, że długość fal świetlnych w próżni zawiera się w granicach:

$$\lambda_1 = \frac{300 \cdot 10^9}{400 \cdot 10^{12}} = \frac{3}{4000} = 0{,}00075 \text{ mm} = 0{,}75\ \mu,$$

$$\lambda_2 = \frac{300 \cdot 10^9}{800 \cdot 10^{12}} = \frac{3}{8000} = 0{,}00038 \text{ mm} = 0{,}38\ \mu,$$

czyli okrągło 0,4 do 0,8 mikrona, t. j. zawsze mniej od $\frac{1}{1000}$ mm.

Podobne obliczenia dla promieniowania ciemnego wykazują długość fal cieplnych wyższą, aż do 40 mikronów, zaś fal promieni chemicznych mniejszą, niż fal świetlnych, aż do 0,1 mikrona.

§ 86. Natężenie promieniowania.

1. Miarą natężenia promieni, w rozmaitej odległości od ich źródła, jest ilość energji promienistej, przechodząca przez każdy cm² pola, prostopadle, w ciągu sekundy; wyraża się ona zwykle w jednostkach ciepła, czyli kalorjach.

Z natężenia energji promienistej, jaką ciało wydaje, można obliczyć emisję tego ciała (§ 84), a stąd i całkowitą ilość energji, jaką ciało wytwarza w ciągu każdej sekundy, czyli sprawność ciała promieniującego. Wyrazić ją można, jak każdą sprawność, w koniach mechanicznych, emisję zaś w koniach na cm² powierzchni ciała.

W ten sposób można obliczyć energję słońca, które na każdy cm² powierzchni ziemi przysyła w swych promieniach średnio 3 kalorje na minutę, czyli $\frac{1}{20}$ kalorji na sekundę. W tym stosunku rozprasza słońce energję na wszystkie strony w przestrzeń wszechświata, czyli na powierzchnię kuli o promieniu równym odległości ziemi od słońca: $4\pi \cdot (150 \cdot 10^{11})^2 \cdot \frac{1}{20} =$ = 138 . 10^{24} kalorji na sekundę = 78 . 10^{22} HP. Promieniowanie więc słońca w ciągu sekundy jest równoważne sprawności około kwadryljona koni parowych

Emisja słońca, czyli sprawność na każdy cm² powierzchni słońca, wynika z podziału 78 . 10^{22} przez 4π . $(693 \cdot 10^8)^2$, czyli (78 . 10^{22}) : : (6 . 10^{22}) = 13 HP. Olbrzymią tę ilość energji można uzmysłowić, wyobrażając sobie na każdym centymetrze kw. słońca motor o sprawności 13 koni.

2. Jasność światła. Dla promieni świetlnych emisja czyli sprawność promieni zowie się *jasnością*, albo potocznie *siłą światła* i wyraża się w t. zw. *świecach*; stąd utarte określenia: lampa o sile 5, 10, 16, 100 i t. d. świec.

Jednostka światła czyli jego sprawności nie jest ściśle ustalona. Najczęściej za taką jednostkę czyli za *świecę normalną* przyjmujemy światło świecy parafinowej, określonych wymiarów.

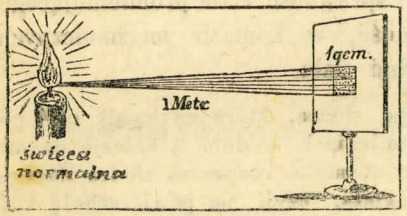
Dokładniejszą jest *świeca Hefnera*, którą stanowi płomień octanu amylu, wymiarów przepisanych. Obie te jednostki mało się różnią od siebie i od światła zwykłej świecy stearynowej.

Świeca normalna parafinowa mierzy 2 cm średnicy i pali się płomieniem o wysokości 5 cm. Świeca Hefnera jest właściwie lampką o knocie 8 mm średnicy i płomieniu 4 cm. Obie dają światło cokolwiek zmienne, tak iż jasność waha się w granicach kilku % powyżej lub poniżej normy zwłaszcza dla świecy parafinowej. Świeca Heſnera = $\frac{6}{7}$ świecy normalnej.

Dokładniejszą, ale wielce niedogodną miarą jasności światła jest *jednostka Violle'a*, przyjęta na kongresie międzynarodowym elektryków w Paryżu (1881): jest to ilość światła, jaką wydaje 1 cm² platyny w chwili jej roztapiania; wynosi ona prawie 16 świec normalnych.

Przykłady. Jasność małej lampy naftowej, o płaskim knocie, wynosi średnio 3 do 5 świec normalnych; lampy większe, pokojowe, o okrągłym knocie, 15 do 20 świec; naftowe, t. zw. błyskawiczne, około 40 świec; lampy gazowe, uliczne, z koszulką Auera, czyli gazożarowe, 60 do 70 świec; lampki elektryczne żarowe, pokojowe, 16, 25, 32, 50, 100 świec; lampy elektryczne łukowe, uliczne, zwykle od 800 do 1000 świec.

3. Oświetlenie powierzchni wyraża się w *świecach metrycznych*. Pod nazwą świecy metrycznej rozumieć należy oświetlenie jakiejś powierzchni świecą normalną, przy prostopadłym kierunku promieni, z odległości 1 metra.



Rys. 462. „Świeca metryczna" i „lumen".

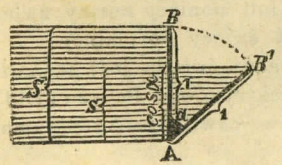
Za jednostkę oświetlenia, czyli tak zwanego prądu świetlnego, przyjmują niektórzy uczeni *lumen*=1 świecę metryczną na 1 cm² powierzchni (rys. 462).

Przy oświetleniu sztucznym 50 św. metr. czyta się wygodnie, jak przy świetle dziennym; 10 św. m. wystarcza do robót grubszych, nie wymagających przyglądania się przedmiotom. — Oświetlenie uliczne waha się od $\frac{1}{10}$ do 1 św. metr. — Oświetlenie słoneczne dochodzi 50000 św. m., a księżycowe 0,2 świec metrycznych.

4. Natężenie światła, padającego na daną powierzchnię, czyli jasność oświetlenia zależy od jasności źródła, od nachylenia powierzchni względem promieni, oraz od odległości źródła. Ponieważ światło jest tylko poszczególną postacią energji promienistej, podlega ogólnym prawom ruchu falowego, gdy fale kuliste rozchodzą się w przestrzeni; teoretyczne uzasadnienie podaje § 76.

W szczególności *prawa oświetlenia* dadzą się ująć w trzy wnioski następujące:

1) Oświetlenie jest proporcjonalne do dostawy (cos) kąta nachylenia płaszczyzny. Za kąt nachylenia uważamy kąt między kierunkiem promieni z linją prodstopadłą do płaszczyzny. Zatym oświetlenie jest tym słabsze, im ukośniej promienie padają na płaszczyznę, t. j. im więcej są odchylone od prostopadłej; najsilniej oświetlają promienie prostopadłe do danej powierzchni.



Rys. 463.

Warunek powyższy można wyrozumieć z konstrukcji rys. 463. Płaszczyzna AB (na rysunku w przekroju), prostopadła do biegu promieni, otrzymuje oświetlenie S; niechaj jej wymiar = 1 m. Za pochyleniem płaszczyzny o kąt α do położenia AB', otrzymuje ona mniej promieni (s), mianowicie tyle, ile przejdzie przez wymiar = = cos α.

Zatym oświetlenie $s = S \cdot \cos \alpha$.

Przy $\alpha = 0$, $\cos \alpha = 1$, t. j. ma wartość największą; wtedy $s = S$.

Doświadczalnie można się przekonać, że oświetlenie słabnie w miarę ukośnego padania promieni: a) na książce, otwieranej stopniowo tak, aby światło padało na jedną stronę prostopadle, na drugą coraz ukośniej; b) na papierze złożonym w faldy; c) na kuli gipsowej.

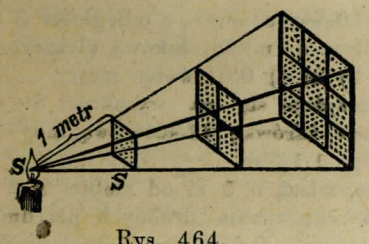
Znaczenie w przyrodzie. Prawo oświetlenia ma znaczenie nietylko dla promieni świetlnych; zastosowane jako prawo natężenia energji promienistej w ogólności, np. do promieni cieplnych, odgrywa doniosłą rolę na ziemi; stąd pochodzi zmiana pór roku w naszym klimacie oraz istnienie stref klimatycznych na ziemi (wyjaśnić bliżej).

2) Oświetlenie jest w stosunku odwrotnym do kwadratów odległości. W odległości np. 2 razy większej od źródła światła natężenie promieni jest 4 razy mniejsze; w odległości 3 razy większej 9 razy mniejsze i t. d.

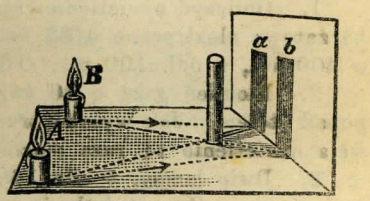
Prawo powyższe odnosi się do promieni rozbieżnych, jakie wydają wszelkie źródła światła. Nie podlegają mu promienie równoległe, jakie można otrzymać za pomocą luster i soczewek; promienie te idą w przestrzeni bez osłabienia (teoretycznie; dlaczego?).

Uzasadnić można „prawo kwadratów" dla światła, przyjmując, że prąd świetlny S (rys. 464) pada na pole kwadratowe 1 cm² w odległości 1 m od świecy; za oddaleniem o 2 m od świecy ta sama wiązka pada na pole 2^2 razy większe, t. j. na 4 cm²; za oddaleniem o 3 m na pole 3^2 razy większe, t. j. na 9 cm² i t. d.; wogóle, w odległości r na pole r^2 razy większe. Stąd oświetlenie na 1 cm² każdego pola musi być 2^2, $3^2 \ldots r^2$ razy słabsze, czyli

$$\text{oświetlenie} = \frac{S}{r^2},$$



Rys. 464.

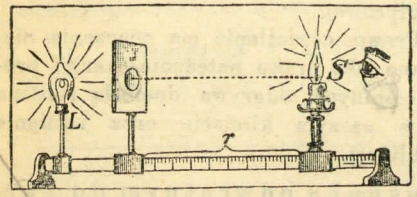


Rys. 465. Fotometr Rumforda.

Doświadczalnie stwierdza się zależność oświetlenia od odległości za pomocą *fotometrów*; najprostszy z nich jest *fotometr cieniowy* Rumforda (Lamberta, rys. 465). Świeca normalna A, postawiona w pewnej odległości od ekranu, np. 10 cm, rzuca na ekran cień a pałeczki, umieszczonej między świecą a ekranem. Druga świeca normalna B, postawiona obok pierwszej, daje cień b jednakowo ciemny; za odsunięciem zaś świecy B, cień jej słabnie. Ażeby otrzymać cień b tej samej co a mocy, trzeba 4 świec w odległości podwójnej, lub 9 świec w odległości potrójnej i t. d.

Podobne wyniki daje *fotometr plamowy* Bunsena (rys. 466), polegający na tym, że plama tłusta na papierze przestaje być widoczną, gdy oświetlenie z obu stron jest jednakowe.

Zastosowanie. Oba powyższe fotometry nadają się do oznaczenia jasności światła rozmaitych lamp i świec. Niechaj np. plama fotometru rys. 466 znika, gdy odległość świecy normalnej S od ekranu wynosi 15 cm, a odległość żarówki elektrycznej L wynosi 60 cm; wtedy jasność żarówki $= 60^2 : 15^2 = 16$ świec normalnych.



Rys. 466. Fotometr Bunsena.

Trudność w podobnych pomiarach stanowi niejednakowa barwa świateł, np. przy porównaniu światła świecy ze światłem gazożarowym lub elektrycznym; cienie są wtedy zabarwione odmiennie. W przybliżeniu ocenia się tutaj oświetlenie, przepuszczając światło jedno i drugie przez szkło kolorowe, raz np. czerwone, drugi raz innej barwy, np. niebieskie, i biorąc średnią z obu obliczeń.

3) Oświetlenie jest proporcjonalne do jasności źródła światła. Przy tej samej odległości i nachyleniu powierzchni światło n świec daje oczywiście oświetlenie n razy silniejsze.

Z zestawienia wszystkich 3 praw wynika:

$$\text{oświetlenie } J = \frac{n}{r^2} \cdot S \cos \alpha \quad \text{świec metr.}$$

Zadania.

1. Obliczyć oświetlenie: a) gazowe o 10 świec norm., z odległości 3 m; b) żarowe elektryczne o 32 św., z odległości 4 m; c) łukowe elektryczne o 400 św., z odl. 100 m. Odp. a) 1,1; b) 2; c) 0,04 świec metr.

2. Płomień gazu o 10 świec norm. znajduje się na wysokości 80 cm ponad stołem. Jak wysoko trzebaby zawiesić żarówkę 32-świecową, aby dawała oświetlenie $1\frac{1}{2}$ raza mocniejsze? Odp. 1,13 m.

3. Dwie lampy, o sile 16 świec każda, wiszą o 5 m od siebie, a 2 m nad ziemią. Czy oświetlenie wystarcza do rozpoznania drobnych przedmiotów, i ile wynosi w równej odległości od lampy? Odp. Okr. 2 świece metr., jest więc niedostateczne.

B) ODBICIE ŚWIATŁA.

(KATOPTRYKA)

§ 87. Zwierciadła płaskie.

1. Odbiciem nazywamy zmianę kierunku promieni, gdy zwracają się wstecz, do tego samego środowiska. Odbiciu ulegają wszelkie promienie, zarówno świetlne, jak cieplne, chemiczne, elektryczne; jest to bowiem objaw odbicia fal w ogólności, teoretycznie uzasadniony w § 76.

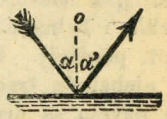
Najdokładniej i najłatwiej daje się stwierdzić odbicie światła; to też dział optyki, zwany *katoptryką*, uwzględnia głównie odbicie promieni światła. Odbicie bywa tym zupełniejsze, im gładszą jest powierzchnia, oraz im ciało jest mniej przezroczyste.

2. Warunki odbicia. Powierzchnie gładkie, określone pod względem geometrycznym, jako to płaskie, kuliste i t. p., zowią się *lustrami* lub *zwierciadłami*, np. zwykłe lustra szklane, blacha polerowana, szyby, kule srebrzone, powierzchnia wody spokojnej, rtęci.

Od powierzchni lustrzanej odbijają się promienie wszelkiego rodzaju według praw następujących, które dotyczą zarówno odbicia fal, jako też kul sprężystych (por. § 66, art. 7, ust. 3).

1) Kąt padania jest równy kątowi odbicia.

2) Oba promienie, padający i odbity, leżą w płaszczyźnie prostopadłej do lustra.



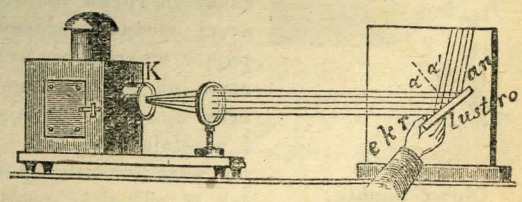
Rys. 467. Odbicie w ogólności.

Kąt padania (α, rys. 467) zawiera się pomiędzy promieniem padającym a linją prostopadłą do lustra, wystawioną w punkcie padania; kąt odbicia (α') pomiędzy promieniem odbitym a prostopadłą.

Promienie padające na lustro prostopadle, odbijają się po tej samej linji.

Doświadczenie (rys. 468). Uwidocznić można bieg promieni i wymierzyć kąty padania i odbicia, puszczając światło słońca, albo światło z latarni projekcyjnej (pt.) wzdłuż białego ekranu, na pochyłe lustro; łatwo sprawdzić na ekranie, że kąt padania α równa się kątowi odbicia α'.

Użycie takiej latarni, zamiast samej tylko lampy, ma na celu nie tylko wzmocnienie światła, ale i skierowanie promieni jednakowo, równolegle do siebie. Podobne wiązki promieni równoległych stosują się powszechnie w doświadczeniach optycznych. W naturze za promienie równoległe poczytujemy promienie słońca w niewielkiej przestrzeni (dlaczego?).



Rys. 468. Odbicie promieni światła.

Do ściślejszych doświadczeń na odbicie światła służy *tarcza optyczna* Hartla (pt. poniżej, rys. 486), w której środku umieszczono lusterko płaskie, wypukłe lub wklęsłe.

Na powierzchni szorstkiej promienie światła ulegają *rozproszeniu*, czyli odbiciu we wszelkich kierunkach, chociażby promienie padały w jednym kierunku, t. j. równoległe do siebie, np. na mury w słońcu, papier, drzewo, kredę, gips.

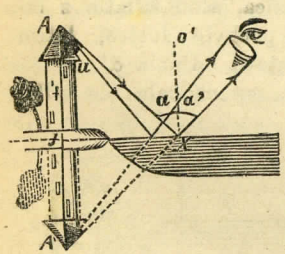
Dzięki światłu rozproszonemu, mamy oświetlenie przedmiotów w pokoju i w naturze mniej lub więcej jednostajne; stąd też widzimy w różnych kierunkach przedmioty, choć są oświetlone jednostronnie, np. ścianę pokoju, na którą padają promienie przez okno, a nawet ścianę przeciwległą, choć nie oświetloną bezpośrednio.

3. Zwierciadłem płaskim czyli **lustrem zwykłym** teoretycznie jest powierzchnia płaska jakiegobądź ciała, np. rtęci, wody, metalu, szkła.

W rzeczywistości żadna powierzchnia nie odbija światła doskonale, nie jest bowiem idealnie gładka, ani ciało bezwzględnie nieprzezroczyste. Najlepiej odbija promienie światła srebro wygładzone starannie, czyli polerowane; mniej dokładnie odbijają zwykłe lustra szklane.

Srebro odbija się do 97% padającego światła, lustra domowe tylko 75 do 80%, a nadto, mając dwie powierzchnie odbijające, przednią powierzchnię szkła i tylną metaliczną, dają odbicia wielokrotne, co mąci jasność obrazów (pt. poniżej). Lustra srebrne mają jednak tę wadę, że się łatwo rysują i niebawem tracą gładkość powierzchni, np. przez ścieranie kurzu; dlatego w użyciu są przeważnie lustra szklane, t. j. szyby powleczone cienką warstwą cyny lub srebra.

4. Obraz punktu świetlnego, znajdującego się przed lustrem płaskim, przypada poza lustrem, w tej samej odległości. Patrzącemu w lustro wydaje się, jak gdyby promienie wychodziły z punktu świetlnego po drugiej stronie lustra, przyczym odległość tego punktu (obrazu) od lustra jest taka sama, jak punktu świecącego (przedmiotu); obraz taki zowie się *urojonym* albo *pozornym*, nie istnieje bowiem rzeczywiście w przestrzeni, nie da się np. okazać na ekranie lub na kliszy.



Rys. 469.
Obraz punktu.

Dowód teoretyczny, oparty na ogólnych zasadach ruchu falowego, podaje § 76. W szczególności można zastosować dla promieni światła następujące wykreślenie (rys. 469). Z punktu A, świecącego lub oświetlonego, idą dowolne promienie, z których np. dwa odbijają się od zwierciadła (np. wody) i wpadają do oka. Promienie te są rozbieżne; po przedłużeniu spotykają się w A', poza lustrem, tak iż odległość prostopadła $AI = A'I$.

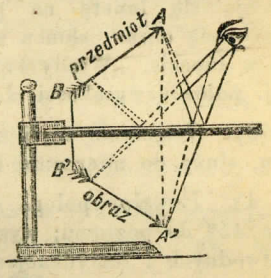
Istotnie, w trójkątach prostokątnych AIX i $A'IX$ kąt $A = \alpha$ i $A' = \alpha'$, kąt padania α = kątowi odbicia α', zatym $A = A'$; trójkąty więc są równe, i $AI = A'I$. Podobny wynik daje rozważanie drugiej i więcej par trójkątów, tak iż wszystkie promienie, pochodzące z A, po odbiciu schodzą się pozornie w A'. Wynika stąd zarazem, że obraz urojony powstaje teoretycznie ze spotkania się przedłużeń promieni.

Doświadczenie. Na stole kładzie się podziałkę milimetrową i stawia na niej pośrodku szybę, przed szybą zaś krótką świeczkę zapaloną. Poza szybą widać blady obraz płomienia, a zarazem i podziałkę, na której odczytuje się odległość obrazu.

5. Obrazy przedmiotów. Z obrazów poszczególnych punktów tworzy się obraz całego przedmiotu, który w lustrze płaskim jest zawsze tej samej wielkości i w tej samej odległości poza lustrem, jak przedmiot przed lustrem. Obraz ma położenie proste, czyli naturalne, t. j. górna strona przedmiotu jest górną również na obrazie; jest on przytym symetryczny, t. j. prawa strona przedmiotu jest na obrazie lewą, i nawzajem.

Wykreślenie obrazu (rys. 470). Z główniejszych punktów przedmiotu prowadzimy prostopadłe do lustra i odmierzamy poza lustrem odpowiednio równe odległości.

Przykłady. Podnieś prawą rękę przed lustrem, a ujrzysz lewą podniesioną na wizerunku. — Prawa i lewa rękawiczka. — Odbicie pisma na bibule jest symetryczne względem pisma; trzymane zaś przed lustrem, wygląda naturalnie, jak samo pismo. — Przeglądanie się w wodzie, w szybie. — Połysk szyb na słońcu; połysk wszelkich przedmiotów gładkich, jak metalowych, drewnianych politurowanych.

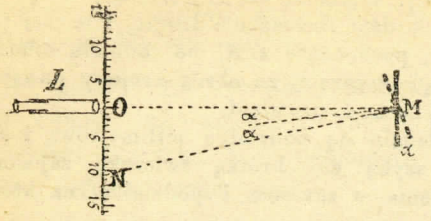


Rys. 470.
Obraz przedmiotu.

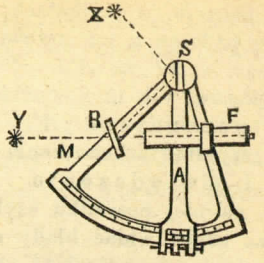
6. Zastosowania. Z naukowych użytków luster płaskich najważniejsze jest odczytywanie zwierciadłowe, które służy do mierzenia bardzo małych odchyleń, np. igły magnesowej, bądź do mierzenia kątów w kryształach, bądź do oznaczania wysokości słońca nad poziomem; stąd rozmaite przyrządy.

1) *Metoda Poggendorffa* (rys. 471) mierzenie odchyleń polega na odczytywaniu zdaleka przez lunetę L podziałki ON przez jej odbicie w lusterku M. Gdy lusterko jest w spoczynku, ma kierunek równoległy do podziałki; w lunecie więc, ustawionej prostopadle, widać zero podziałki; za odchyleniem lusterka o kąt α widać inną kreskę N podziałki, tak iż odchylenie promienia MN od MO wynosi 2α. Odchylenie więc odczytane jest 2 razy większe od mierzonego, co wpływa na dokładność pomiaru.

Wartość kąta α wypada z zależności $\operatorname{tg} 2\alpha = ON : OM$; obierając więc odległość OM znaczną, np. kilka metrów, można odmierzać kąty minutowe i sekundowe.



Rys. 471.
Mierzenie małych odchyleń.



Rys. 472.
Sekstans.

2) *Sekstans* (rys. 472) służy do oznaczania szerokości geograficznej, przez pomiar wysokości słońca nad poziomem; głównie na okrętach w czasie podróży, gdyż pozwala mierzyć kąty mimo kołysania statku, skoro trzymamy sekstans w ręku. Podziałka łukowa obejmuje $\frac{1}{6}$ koła (stąd nazwa). Skazówka A, ruchoma na osi S, posiada tutaj lusterko; naprzeciwko zaś jest osadzone płaskie szkiełko R, w połowie posrebrzone, t. j. działające tą połową jak lustro; granica tego lusterka i szkła czystego przypada wprost lunety F. Gdy skazówka A stoi na zerze, lustra S i R są do siebie równoległe. Aby oznaczyć kąt między położeniem słońca X a poziomem Y, kieruje się lunetę na poziom i obraca się skazówkę dotąd, aż w lunecie ukaże się obraz słońca w kierunku poziomu, czyli obrazy X i Y nakryją się w lunecie. Wtedy kąt odczytany FSA równa się połowie kąta YFX, t. j. połowie wysokości słońca nad poziomem.

3) *Gonjometr* czyli *kątomierz*, oparty na odbiciu światła od ścian kryształu, służy do mierzenia kątów w mineralogji.

4) *Peryskop* polega na odbiciu światła od lustra, postawionego pod kątem 45° do poziomu; wystając tuż nad wodą lub ziemią, służy w łodziach podwodnych i fortyfikacjach do oglądania przedmiotów, znajdujących się na powierzchni, promienie bowiem poziome przybierają kierunek pionowy.

5) *Kalejdoskop* składa się z dwu luster, ustawionych względem siebie pod kątem ostrym, np. 45°; przez odbicie wielokrotne pomnaża liczbę obrazów przedmiotu, umieszczonego między lustrami. W ten sposób z drobnych szkiełek kolorowych powstają efektowne układy, które się zmieniają do nieskończoności przy wstrząsaniu przyrządu.

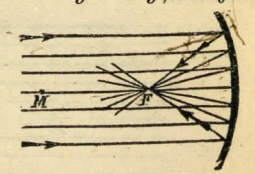
6) *Heljostat* służy do skierowania promieni słońca stale, pomimo pozornego ruchu słońca na niebie. Składa się z lustra płaskiego, obracającego się bardzo wolno na osi za pomocą mechanizmu zegarowego. Heljostat umieszcza się zwykle za oknem pracowni, promienie zaś skierowuje się ku wnętrzu pracowni, przyczym zachowują one kierunek niezmienny, skoro mechanizm nachyla lustro stosownie do biegu słońca.

---

§ 88. Zwierciadła kuliste.

1. **Zwierciadłem kulistym** albo **sferycznym** jest odcinek powierzchni kulistej. Stosownie do tego, czy odbija wewnętrzna lub zewnętrzna powierzchnia kuli, odróżniamy zwierciadła wklęsłe i wypukłe.

2. **Zwierciadło wklęsłe** (rys. 473). Linja prosta, poprowadzona przez środek powierzchni lustrzanej i przez *środek krzywizny*, to jest środek M kuli, której odcinek stanowi lustro, zowie się *osią optyczną główną*; inne proste, poprowadzone przez środek M, zowią się *osiami bocznymi*.

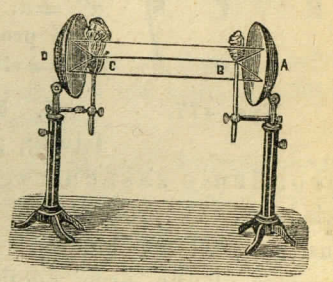


Rys. 473. Ognisko.

Zasadniczą własność luster wklęsłych można okazać, stawiając lustro wpoprzek promieni słonecznych, które z powodu niezmiernej odległości słońca można uważać za równoległe do siebie; promienie idą tu zarazem równolegle do osi głównej. Wtedy na małym papierku, przesuwanym przed lustrem, widać krążek świetlny, który w położeniu F schodzi do wielkości najmniejszej; przy małym lusterku widać w F punkt olśniewająco jasny. Punkt F, gdzie zbiegają się odbicia promieni równoległych do osi, zowie się *ogniskiem głównym* albo wprost *ogniskiem*. Stąd zwierciadła wklęsłe zowią się *zbierającymi*.

Zarazem w ognisku jednoczą się i promienie ciepła, odbite od lustra, tak iż zapala się tu papier, drzewo i t. p.; stąd nazwa *luster palących*. Podobnież odbijają się i zbierają się fale głosowe.

Doświadczenie (rys. 474). Dwa duże lustra wklęsłe, wyrobione z blachy i wewnątrz posrebrzone, ustawia się naprzeciw siebie tak, aby miały wspólną oś główną. Za umieszczeniem węgla rozżarzonego w ognisku C jednego z luster, zapala się hubka w ognisku B drugiego. (Por. odnośne doświadczenie akustyczne rys. 439.)



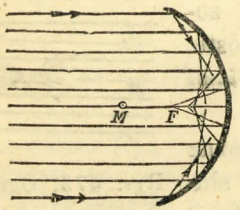
Rys. 474. Lustra palące.

Wszelkie rozważania i wzory co do luster kulistych są dostatecznie ścisłe tylko dla promieni środkowych, czyli padających blisko środka lustra; promienie boczne schodzą się poza ogniskiem F.

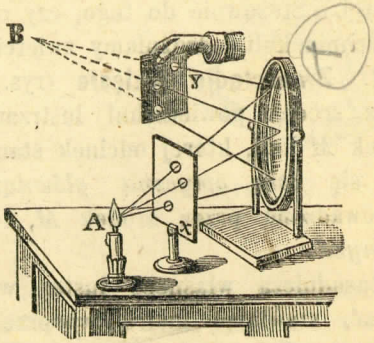
Tak np. duże zwierciadła o krótkim promieniu, t. j. o powierzchni silnie zakrzywionej, mają zamiast jednego punktu całą powierzchnię ogniskową (rys. 474), gdyż promienie światła, padające na brzegi lustra, schodzą się bliżej lustra, niż promienie środkowe: przekrój tej powierzchni zowie się *katakaustyką* i ma postać do cyfry 3 zbliżoną.

Właściwość luster wklęsłych, polegająca na uchylaniu się promieni bocznych od ognisk, nazywa się *aberacją sferyczną*.

Nie tylko promienie równoległe, ale i r o z b i e ż n e, czyli pochodzące z jednego punktu, poza ogniskiem, zbierają się po odbiciu od lustra w pewnej odległości; punkt spotkania w tym razie nazywa się *ogniskiem danego punktu* albo *ogniskiem sprzężonym* i ma położenie zmienne, zależnie od odległości danego punktu.



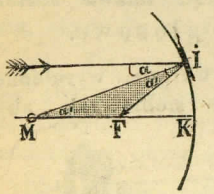
Rys. 475.



Rys. 476.

D o ś w i a d c z e n i e. Przed lustrem wklęsłym stoi świeca A (rys. 476), oddzielona od lustra zasłoną x z 3 otworkami. Promienie odbite padają na papier y, tworząc 3 jasne plamki, które za przesunięciem papieru schodzą się w jeden punkt B.

3. Ognisko lustra wklęsłego leży w połowie promienia, na osi głównej, t. j. pośrodku między lustrem a jego środkiem krzywizny.



Rys. 477.

D o w ó d. Niech równolegle do osi pada na lustro promień w punkcie I (rys. 477); odbije się on pod kątem $\alpha' = \alpha$ i przetnie oś w punkcie F (linja MI jest promieniem kuli, zatym prostopadłą do powierzchni lustra). W trójkącie MFI kąt $\alpha'' = \alpha'$, ponieważ $\alpha'' = \alpha$; zatym bok $MF = FI$. Skoro I leży blisko K, czyli promień I należy do środkowych, można przyjąć $FI = FK$, a więc $MF = FK$.

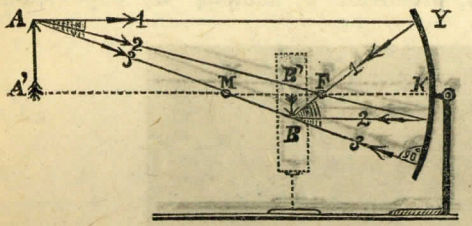
4. Rodzaj obrazów. Wykreślić można obraz najłatwiej, gdy z punktu świetlnego poprowadzimy dwa p r o m i e n i e z a s a d n i c z e, których kierunek po odbiciu z góry jest wiadomy: 1) promień równoległy do osi, 2) promień prostopadły do lustra, czyli oś boczną. Pierwszy z nich po odbiciu przejdzie przez ognisko główne, drugi odbije się z powrotem po tej samej linji. W ten sposób można dojść na drodze graficznej do 3 g ł ó w n y c h r o d z a j ó w obrazu, jakie daje lustro wklęsłe, przyczym obrazy różnią się co do c h a r a k t e r u, p o ł o ż e n i a i w i e l k o ś c i.

1) Jeżeli przedmiot znajduje się poza środkiem krzywizny, obraz jest r z e c z y w i s t y, o d w r ó c o n y i z m n i e j s z o n y (rys. 478).

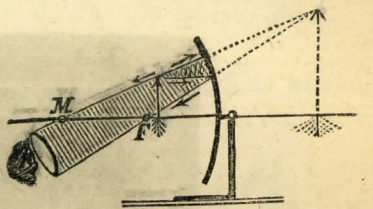
Obraz *rzeczywisty* powstaje teoretycznie ze spotkania samych promieni, nie zaś ich przedłużenia, jak w lustrach płaskich (§ 87); obraz taki można ukazać na ekranie.

Punkt A przedmiotu daje obraz w B, skutkiem odbicia promieni AY po linji 1, a promienia AM po linji 3, t. j. w tym samym kierunku MA. Każdy inny punkt między A i osią w A' da podobnież obraz między B i osią w B', tak iż cały przedmiot AA' ukaże się na ekranie w postaci BB'.

2) Jeżeli przedmiot znajduje się między środkiem krzywizny a ogniskiem, obraz jest r z e c z y w i s t y, o d w r ó c o n y i p o w i ę k s z o n y (rysunek 478).



Rys. 478. Obrazy rzeczywiste.



Rys. 479. Obraz urojony.

Obierając bowiem BB' za przedmiot, otrzymamy nawzajem obraz w AA', tak iż rysunek pozostaje bez zmiany, tylko należy przyjąć przeciwny bieg promieni.

W obu przypadkach można zamiast promienia AY wyznaczyć przebieg promienia AF, co jednak jest mniej dogodne.

3) Jeżeli przedmiot znajduje się przed ogniskiem, obraz jest u r o j o n y, p r o s t y i p o w i ę k s z o n y (rys. 479.

Promienie zasadnicze po odbiciu są rozbieżne, tak iż spotkają się tylko ich przedłużenia, poza lustrem. Obrazu na ekranie być nie może, natomiast powstaje on w oku, do którego wpadają oba promienie.

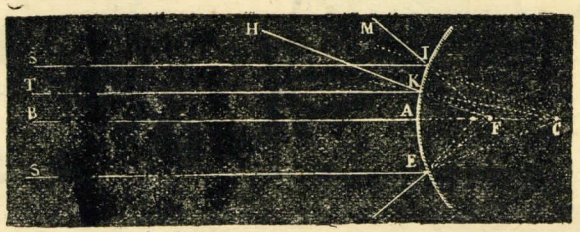
Z powyższego łatwo wywnioskować, że dla przedmiotu, umieszczonego w samym środku krzywizny, obraz byłby w tej samej odległości i tej samej wielkości, tylko odwrócony; dla przedmiotu zaś, położonego w ognisku, obraz byłby w nieskończoności, t. j. nie będzie go wcale, bo promienie odbite są równoległe.

Z a s t o s o w a n i a luster wklęsłych, Obrazy gwiazd, słońca, planet w teleskopach, — Lusterka oświetlające w mikroskopie. — Lusterko gardlane czyli laryngoskop, lusterko uszne. — Reflektory do lamp i latarni.

5. Zwierciadło wypukłe (rys. 480). Zarówno promienie równoległe do osi, jak i rozbieżne, pochodzące z bliskiego do lustra punktu, po odbiciu mają kierunek rozbieżny; odbiegają one od osi tym bardziej, im dalej od osi trafiają zwierciadło. Stąd zwierciadła wypukłe zowią się *rozpraszającymi.*

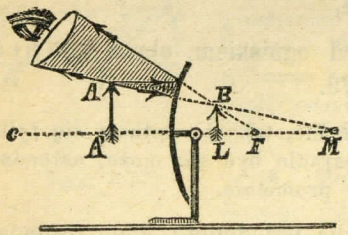
Wykreślenie obrazu odbywa się tutaj zupełnie tak samo, jak w lustrze wklęsłym; rozważania są podobne. Wynika stąd, że lustro wypukłe posiada tylko *ognisko urojone* i obrazy więc daje zawsze urojone, przytym proste i zmniejszone, bez względu na odległość przedmiotu.

Jeżeli na lustro wypukłe padają promienie równoległe S, T, S', a C jest środkiem krzywizny (rys. 480), promienie te odbijają się odpowiednio



Rys. 480. Ognisko urojone.

w kierunkach M, H, G; linje CI, CK, CE, jako promienie kuli, prostopadłe do jej powierzchni, służą do wykreślenia kątów padania i odbicia. Dla oka, patrzącego w lustro, wydaje się, jak gdyby poza lustrem był jeden punkt świecący F; jest to ognisko urojone.



Rys. 481.
Obraz w lustrze wypukłym.

Położenie ogniska w lustrze wypukłym jest takie same, jak we wklęsłym, mianowicie na połowie promienia krzywizny: $AF = \frac{1}{2} AC$. Wynika to z rozpatrzenia trójkąta równoramiennego CFI, gdzie $CF = IF$, zatym w przybliżeniu $CF = AF$.

Wykreślenie obrazu odbywa się tak samo, jak w lustrze wklęsłym, uwzględniając 2 promienie zasadnicze; okazuje to rys. 481.

Zastosowania. Lustra wypukłe mają niewielkie znaczenie praktyczne; służą głównie jako zmniejszające lusterka kieszonkowe, kule zwierciadlane do ozdoby parków, ogrodów, willi.

---

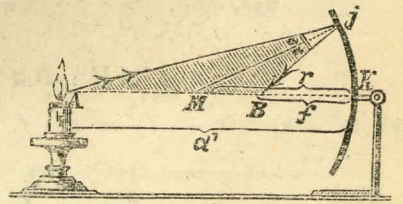
§ 89. Teorja zwierciadeł.

1. Punkty sprzężone. Każdej odległości punktu świecącego od lustra odpowiada odległość jego obrazu, i nawzajem, tak iż punkt i obraz mogą się wzajemnie zastępować, o ile obraz jest rzeczywisty; stąd nazywają się *punktami sprzężonymi.*

W niniejszej teorji rozważamy głównie następujące dwie zależności: 1) miejsce obrazu, czyli jego odległość od lustra przy danej odległości przedmiotu; 2) wielkość obrazu względem przedmiotu. Z powyższego wypływa charakter obrazu, t. j. czy jest on rzeczywisty lub urojony. Aby oznaczyć miejsce obrazu, wystarcza obrać jeden punkt przedmiotu, na osi głównej położony; gdyby dany punkt nie znajdował się na osi głównej, można go zawsze sprowadzić na tę linję przez obrócenie lustra.

2. Odległość obrazu można wyrazić w zależności od promienia zwierciadła, bądź w zależności od głównego ogniska.

a) Zwierciadło wklęsłe (rys. 482). Niech punkt świecący A znajduje się na osi głównej MK, gdzie punkt M jest środkiem krzywizny lustra; dowolny promień światła AI odbija się od lustra po IB, tworząc z promieniem krzywizny MI kąt $\alpha' = \alpha$. Obraz A powstaje w B, na spotkaniu odbitych promieni AI i AK. W trójkącie AIB linja IM dzieli napoły kąt I; stąd



Rys. 482. Związek między d, f, r.

$$AI : BI = AM : BM.$$

Jeżeli odległość przedmiotu $AK = d$, odległość obrazu $BK = f$, promień krzywizny $MK = r$, a nadto jeżeli promień AI należy do środkowych, zatym $AI = AK$, oraz $BI = BK$, to

$$d : f = (d - r) : (r - f)$$
$$dr - df = df - fr$$
$$dr + fr = 2\,df$$

z podziału przez $d\,f\,r$

$$\boxed{\frac{1}{f} + \frac{1}{d} = \frac{2}{r}.} \qquad \text{(I)}$$

Dla promieni równoległych $d = \infty$, zaś ognisko sprzężone f staje się ogniskiem głównym F; podstawiając F za f, oraz ∞ za d, otrzymujemy

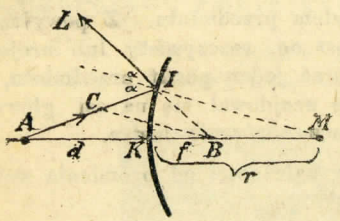
$$\boxed{F = \frac{r}{2}.} \qquad \text{(II)}$$

Ognisko lustra znajduje się na połowie promienia krzywizny.

Podstawiając stąd wartość $r = 2F$ do równania I, otrzymujemy

$$\frac{1}{f} + \frac{1}{d} = \frac{1}{F}. \qquad \text{(III)}$$

b) Zwierciadło wypukłe (rys. 483). Punkt świecący A, położony na osi głównej, rzuca na lustro promień AI, pod kątem α; promień odbija się po IL, pod kątem α, tak iż przedłużenie jego spotyka się w punkcie B z przedłużeniem promienia AK, idącego wzdłuż osi głównej; tutaj przypada obraz urojony punktu A. Poprowadziwszy $BC \parallel MI$, otrzymujemy $AM : BM = AI : CI$. Ponieważ $CI = BI$ (z trójkąta równoramiennego CIB, gdzie $\sphericalangle ICB = \sphericalangle IBC = \alpha$), a nadto ponieważ w przybliżeniu $BI = BK$ oraz $AI = AK$, wynika



Rys. 483.

$$AM : BM = AK : BK$$

czyli $(d + r) : (r - f) = d : f$.

Stąd $$\frac{1}{f} - \frac{1}{d} = \frac{2}{r}. \qquad \text{(IV)}$$

Wzór ten można zresztą wyprowadzić wprost ze wzoru I, uwzględniając, że f i r mają położenie względem d przeciwne poza lustrem, należy więc je przyjąć za ujemne, albo raczej zmienić znak przy d,

Jeżeli $d = \infty$, to $f = \frac{r}{2} = F$; i tutaj więc, jak dla lustra wklęsłego, ognisko znajduje się na połowie promienia krzywizny. Przytym F, jak i f, jest ujemne; ognisko więc jest urojone.

c) Zwierciadło płaskie można uważać jako kuliste o promieniu nieskończenie wielkim. Zakładając we wzorze I, że $r = \infty$, otrzymujemy

$$f = -d. \qquad \text{(V)}$$

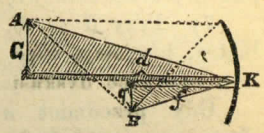
Odległość obrazu równa się odległości przedmiotu; ogniska niema, gdy bowiem $d = \infty$, to $f = -\infty$, promienie odbite idą równolegle.

3. **Wielkość obrazu** (g) tak się ma do wielkości przedmiotu (c), jak odległość obrazu (f) do odległości przedmiotu (d):

$$g : c = f : d. \qquad \text{(VI)}$$

Dowód. Wszystkie promienie, wychodzące z punktu A (rys. 484), spotykają się w obrazie B tego punktu; zatym i promień AK odbity pójdzie po KB, tworząc z osią główną przy K równe kąty. Z trójkątów podobnych, o podstawach g i c, a wysokościach f i d, wynika $g : c = f : d$.

Taki sam stosunek daje zwierciadło wypukłe.



Rys. 484.

Przykład. Jak wielki jest obraz słońca w lustrze wklęsłym? Rozw. G jest średnicą słońca, d jego odległością od ziemi $= 110$ średnic słonecznych, $f = F$; zatym $g : 1 = F : 110$ i stąd $g = \frac{1}{110} F$, czyli średnica obrazu słońca stanowi zawsze $\frac{1}{110}$ odległości ogniskowej zwierciadła.

4. **Zmiany obrazów.** Roztrząsanie wzorów powyższych, I do IV, oraz ich przekształceń, pozwala określić własności obrazów dla zwierciadeł każdego rodzaju, czyli oznaczyć miejsce, wielkość i charakter obrazu w każdym wypadku.

a) Zwierciadło wklęsłe. Wyznaczając z I wzoru $f = \frac{dr}{2d - r}$, nadajemy temu ostatniemu wzorowi postać dogodniejszą, z podziału przez d, mianowicie

$$f = \frac{r}{2 - \frac{r}{d}}. \qquad \text{(VII)}$$

Rozróżniamy 3 przypadki ogólniejsze oraz 4 poszczególne.

1) Przy $d > r$, ułamek r/d jest mniejszy od 1, cały mianownik ma wartość między 1 i 2, czyli f zawiera się między r i $r/2$, t. j. między r i F. Z powodu $f < d$, wypada $g < c$.

Gdy przedmiot znajduje się poza środkiem krzywizny lustra, obraz jego rzeczywisty jest między środkiem a ogniskiem głównym. Obraz jest zmniejszony.

2) Przy $d < r$, ale $d > F$, wartość r/d zawiera się między 1 a 2, wartość mianownika wzoru VII między 0 a 1, zatym f ma wartość od r do ∞. Z powodu $f > d$, wypada $g > c$.

Gdy przedmiot się znajduje między środkiem a ogniskiem, obraz jego rzeczywisty przypada poza środkiem krzywizny. Obraz jest powiększony.

Widać stąd zarazem, że gdy przedmiot się przybliża, obraz się oddala od lustra: obraz i przedmiot zmieniają swe role, są sprzężone.

3) Przy $d < F$, ułamek $r/d > 2$, mianownik < 0 czyli ujemny, zatym i f jest ujemne. Nadto ze wzoru III wynika, że $1/f < 1/F$, czyli $f > F$, zatym $f > d$, a stąd $g > c$.

Gdy przedmiot znajduje się między lustrem a ogniskiem głównym, obraz jest poza lustrem, t. j. urojony, zarazem powiększony.

Jako przypadki poszczególne można uważać:

4) Przy $d = \infty$, wypada $f = \frac{1}{2} r$, t. j. obraz w ognisku (wzór II). Zarazem $g = 0$, obraz jest nieskończenie mały, czyli jest punktem.

5) Przy $d = r$, wypada $f = r = d$, t. j. obraz spotyka się z przedmiotem w środku krzywizny. Wtedy $g = c$, t. j. obraz i przedmiot są równej wielkości.

6) Przy $d = F$, wypada $f = \infty$, t. j. obraz jest nieskończenie daleko, czyli promienie odbite idą równolegle. Wtedy $g = \infty$, t. j. obraz jest nieskończenie wielki, w rzeczywistości go nie widać.

7) Przy $d = 0$, wypada $f = 0$, t. j; obraz i przedmiot przystają do lustra, przystają więc do siebie, są równej wielkości.

Cała więc dyskusja prowadzi do następującego uogólnienia:

Gdy przedmiot z nieskończoności zbliża się do ogniska zwierciadła, obraz rzeczywisty oddala się od ogniska do nieskończoności; w środku krzywizny obraz spotyka się z przedmiotem i dorównywa mu wielkością. Gdy przedmiot przybliża się następnie od ogniska do lustra, obraz urojony przybliża się z nieskończoności poza lustrem do powierzchni lustra, aż wreszcie spotykają się oba na powierzchni.

b) Zwierciadło wypukłe. Ze wzoru IV wynika

$$f = \frac{r}{2 + \frac{r}{d}}. \qquad \text{(VIII)}$$

Jakąkolwiek jest odległość d, mianownik $2 + r/d$ jest większy od 2, czyli $f < \frac{1}{2} r$. Obraz więc przypada zawsze między lustrem a ogniskiem, po przeciwnej stronie lustra niż d, jest przeto urojony.

Ponieważ wedle IV wzoru $1/f > 1/d$, czyli $f < d$, przeto $g < c$, t. j. obraz jest zawsze zmniejszony.

c) Zwierciadło płaskie. Wzór V, gdzie $f = -d$, wykazuje bezpośrednio, że obraz jest zawsze urojony, co do wielkości równy przedmiotowi.

C) ZAŁAMANIE ŚWIATŁA.

(DJOPTRYKA)

§ 90. Załamanie promieni w ogólności.

1. Załamanie promieni należy do objawów ruchu falowego (§ 76). Polega ono na zmianie kierunku promienia, skoro promień przenika do innego ośrodka. Np. załamaniu ulegają promienie, idące z powietrza do próżni i nawzajem, z powietrza do wody, z wody do szkła i t. p.

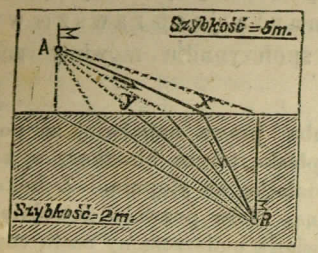
Z promieni, padających na powierzchnię ciała, pewna tylko część się załamuje, reszta zostaje odbita lub pochłonięta.

Powodem załamania promieni jest rozmaita ich szybkość w jednym i drugim ośrodku. Materja, w której szybkość światła jest mniejsza, nazywa się optycznie gęstszą, np. szkło względem wody; materje gatunkowo cięższe są zwykle optycznie gęstsze, wyjątki są nieliczne.

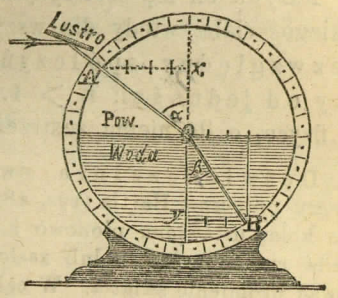
Światło załamuje się na granicy dwu ciał, obiera bowiem drogę najprędszą.

Porównanie. Cyklista ma zamiar przebyć drogę od A do B (rys. 485) w najkrótszym czasie, przyczym na polu gładkim A szybkość jazdy wynosi 5 m na sek., na polu nierównym B tylko 2 m na sek.

Można sprawdzić wykreśleniem, zarówno jak rachunkiem, że najśpieszniej odbędzie drogę po linji łamanej AXB, nie zaś po linji prostej AYB lub innej.



Rys. 485.
Najprędsza droga.



Rys. 486.
Załamanie światła na tarczy Hartla.

2. Prawa załamania. Skoro promień przenika do środowiska gęstszego, załamuje się ku linji prostopadłej do granicy obu środowisk; w przeciwnym razie, t. j. w środowisku rzadszym lub w próżni, promień odchyla się od prostopadłej.

Kąt między promieniem padającym a prostopadłą zowie się *kątem padania* (α, rys. 486); kąt między promieniem załamanym a prostopadłą zowie się *kątem załamania* (β).

Tak więc, gdy promień przechodzi do materji gęstszej, kąt załamania jest mniejszy od kąta padania; w materji rzadszej przeciwnie.

Promień prostopadły do powierzchni ciała nie załamuje się wcale, t. j. idzie dalej w tym samym kierunku, bo $\alpha = \beta = 0$.

Z teorji ruchu falowego (§ 76) wynikają następujące prawa co do załamania światła, wykryte prawie równocześnie przez Snelljusza i Kartezjusza (Descartes, około 1621);

1) Stosunek wstawy kąta padania do wstawy kąta załamania ma wartość stałą, dla danej pary środowisk, t. j. nie zależy od kąta padania, lecz od rodzaju środowiska. Stosunek ten zowie się *spółczynnikiem załamania* (n).

$$\boxed{\frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = n.}$$

2) Promień padający i załamany leżą w płaszczyźnie prostopadłej do powierzchni granicznej.

Spółczynnik załamania światła równa się stosunkowi szybkości tegoż w obu środowiskach:

$$n = \frac{v_1}{v_2}.$$

Nazywa on się *bezwzględnym*, skoro światło przenika z próżni do jakiegoś ciała; wtedy dla wszystkich ciał przezroczystych $\alpha > \beta$, zatym bezwzględny spółczynnik załamania jest zawsze większy od jedności: $n > 1$. O takim spółczynniku mówimy zawsze w fizyce, o ile niema zastrzeżeń.

Doświadczalnie stwierdza się oba prawa najłatwiej za pomocą *tarczy optycznej* Hartla (rys. 486). Jest to płaska tarcza blaszana, w kształcie koła, ustawiona pionowo i opatrzona podziałką na stopnie. Z boku posiada ruchome lustro lub zasłonę ze szczeliną, która pozwala dowolnie skierować promienie światła. W celu załamania światła umieszczamy na tarczy półokrągłą szklaną wanienkę z wodą, o płaskich ścianach przedniej i tylnej. Wiązka promieni słonecznych tworzy linję AO na górnej połowie tarczy, w powietrzu; dalszy ciąg tej wiązki idzie w wodzie po OB, tak iż sin α : sin β=4 : 3.

Zestawiając szybkość światła w powietrzu v_1 i wodzie v_2, mamy

$$\frac{v_1}{v_2} = \frac{300\,000}{225\,000} = \frac{4}{3}.$$

3. Względny spółczynnik załamania. Gdy światło przechodzi z jednej materji do drugiej, spółczynnik zowie się *względnym*. Dla ciał stałych i płynnych, wartość spółczynnika nie zależy prawie od tego, czy światło przenika do ciała z próżni, czy z powietrza. Oznaczone przeto spółczynniki ciał względem powietrza możemy uważać prawie dokładnie za bezwzględne. Przyczyna tkwi w niezmiernie małej różnicy między szybkością światła w próżni i powietrzu (§ 85).

Spółczynnik załamania zależy od barwy światła; zwykle oznacza się go dla barwy żółtej, jako najwidoczniejszej, a przytym zajmującej położenie mniej więcej środkowe pomiędzy barwami, z których składa się światło lamp lub słońca (pt. § 95, art. 2).

Spółczynniki załamania (bezwzględne, średnie).

Powietrze przy 0° i 760 mm	1,00029
Woda.	1,33 (okr. $\frac{4}{3}$)
Szkło zwykłe (koronne, ang. crown) . .	1,53 („ $\frac{3}{2}$)
Kryształ górski	1,55 („ $\frac{3}{2}$)
Siarczek węgla	1,65 („ $\frac{5}{3}$)
Szkło ciężkie (flint) . . . od 1,75 do	2,00
Dyjament	2,55 („ $\frac{5}{2}$)

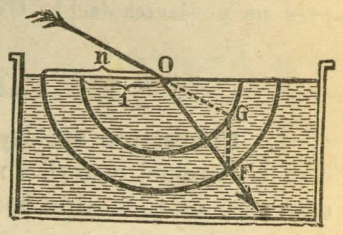
Względny spółczynnik załamania, przy przejściu światła z jednego ciała do drugiego, jest stosunkiem bezwzględnych spółczynników obu ciał.

Mianowicie, oznaczając przez $n_{0\text{-}1}$ spółczynnik przy wejściu światła z próżni do jednego z ciał, $n_{0\text{-}2}$ z próżni do drugiego ciała, $n_{1\text{-}2}$ spółczynnik względny obu ciał, oraz v_0, v_1, v_2 odpowiednie szybkości światła, otrzymamy

$$n_{0\text{-}1} = \frac{v_1}{v_0} \qquad n_{0\text{-}2} = \frac{v_2}{v_0} \qquad \frac{n_{0\text{-}1}}{n_{0\text{-}2}} = \frac{v_1}{v_2} = n_{1\text{-}2}.$$

Przykład. Spółczynnik załamania szkła względem wody $= \frac{3}{2} : \frac{4}{3} = \frac{9}{8}$.

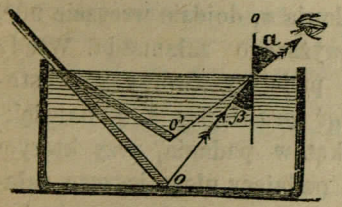
4. Wykreślenie promienia załamanego (Snelljusz, rys. 487). Około punktu O zatacza się koła promieniami 1 i n, przedłuża się promień padający w głąb drugiego ciała, aż do spotkania koła 1 w punkcie G, poczym na kole n poszukuje się punktu F, leżącego pod G na linji prostopadłej do granicy ciał. Przez punkt F przechodzi promień załamany.



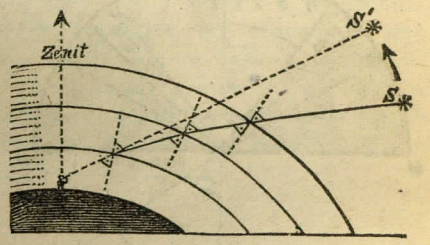
Rys. 487. Wykreślenie promienia załamanego.

Ażeby uzasadnić powyższą konstrukcję, należy w O wystawić ku dołowi prostopadłą do granicy obu ciał, a z G i F poprowadzić równoległe do tej granicy; wtedy odcinek między G i prostopadłą wyraża sin α, a równy mu odcinek między F i prostopadłą wyraża n sin β, zatym sin α : sin $\beta = n$.

5. Złudzenia wskutek załamania światła. a) Kij, zanurzony częścią w wodzie, wydaje się złamany (rys. 488). Dla wyjaśnienia, należy poprowadzić dwa promienie od końca zanurzonego tak, aby po załamaniu wpadły do oka; punkt, z którego promienie pochodzą, oko widzi na przedłużeniu wpadających promieni, t. j. wyżej, niż jest w rzeczywistości.



Rys. 488.
Złudzenie wskutek załamania.



Rys. 489.
Refrakcja astronomiczna.

b) Wody rzek, jezior, mórz niezbyt głębokich, gdzie widać dno, wydają się płytsze, niż są w istocie, i to tymbardziej, im ukośniej patrzymy.

c) *Refrakcja astronomiczna* (rys. 489), czyli załamanie w atmosferze promieni, idących od ciał niebieskich, sprawia, iż widzimy te ciała wyżej na niebie, niż są w istocie. Stąd np. słońce ukazuje się na niebie wcześniej, niż wschodzi rzeczywiście, a kryje się później; skutkiem tego dzień przedłuża się blisko o 4 minuty.

Zadania.

1. Promienie światła padają ua powierzchnię wody pod kątem 30°, 45°, 60°, 75°. Wykreślić promienie załamane i obliczyć kąty załamania z tablic trygonometrycznych.

2. Jaki jest spółczynnik dyjamentu względem szkła? Względem wody? Odp. $\frac{5}{3}$, $\frac{15}{8}$.

3. Ile wynosi pozorna grubość szyby szklanej, oceniona z odległości pyłu na powierzchniach? Odp. $\frac{2}{3}$ grubości rzeczywistej.

§ 91. Całkowite odbicie światła.

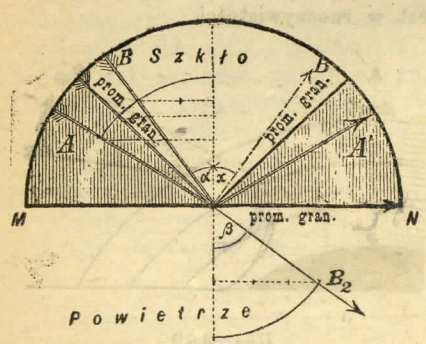
1. Odwrotność spółczynnika załamania. Jeżeli promień światła przenika z dowolnej materji do próżni, spółczynnik załamania ma wartość odwrotną $= {}^1/_n$. Gdy bowiem $\sin\alpha : \sin\beta = n$ (rys. 486), to

$$\frac{\sin\beta}{\sin\alpha} = \frac{1}{n}.$$

Ponieważ $n > 1$, liczba ${}^1/_n$ jest zawsze ułamkiem właściwym.

To samo odnosi się do przenikania światła z ośrodka gęstszego do rzadszego: skoro $n_{1\text{-}2} > 1$, to $n_{2\text{-}1} = 1/n_{1\text{-}2} < 1$.

2. Granica załamania światła. Światło nie zawsze może przeniknąć z ośrodka gęstszego do rzadszego. Jeżeli np. promień B (rys. 490) przechodzi ze szkła w próżnię lub powietrze, padając pod kątem rozmaitym, to kąt załamania β, jako większy od kąta padania α, dojdzie wreszcie 90°, t. j. najwyższego załamania. Wtedy promień padający tworzy z prostopadłą *kąt graniczny*, t. j. największy z kątów padania, przy którym promień padający ulega jeszcze załamaniu; ten ostatni jest *promieniem granicznym*.



Rys. 490. Całkowite odbicie światła.

Dalsze promienie A, padające ukośniej względem szkła, nie wyjdą już w powietrze, ale odbijają się od jego powierzchni MN w zupełności, jak gdyby pod tą powierzchnią istniała materja doskonale nieprzezroczysta. Takie odbicie światła od wewnętrznej strony ciała gęstszego zowie się *odbiciem całkowitym*. Dla oka, patrzącego w kierunku A', powierzchnia MN błyszczy, jak doskonałe zwierciadło.

Doświadczalnie można okazać odbicie całkowite, umieszczając półokrągłą taflę szklaną na tarczy Hartla i obracając ją tak, aby smuga B światła szła z dołu ku O i padała coraz ukośniej (rys. 485).

Wartość kąta granicznego (względem powietrza):

Woda	48°
Szkło zwykłe	42°
Flint	30° do 36°
Dyjament	24°.

3. Warunek odbicia całkowitego. Teoretycznie warunek odbicia wewnętrznego wynika ze wzoru $\sin\alpha : \sin\beta = {}^1/n$ (rys. 490), skąd

$$\sin\beta = n \sin\alpha.$$

Skoro wzrasta kąt padania α, rośnie też i kąt załamania β, aż do 90°; wtedy $\sin\beta = 1$. Zatym największa wartość $n \sin\alpha = 1$, skąd wypada równość

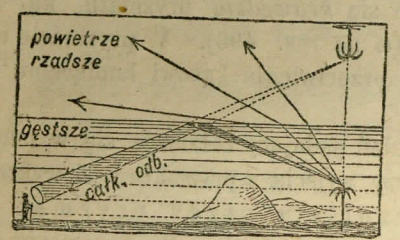
$$\sin\alpha = \frac{1}{n},$$

wyznaczająca wartość kąta granicznego α.

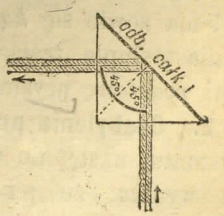
Ze wzoru tego wynika, że im silniej ciało załamuje światło, tym kąt graniczny ma mniejszy, czyli tym więcej promieni odbija się od wewnętrznych ścian ciała.

4. Rola w przyrodzie i zastosowania. Znaczny spółczynnik załamania powoduje świetny blask wewnętrzny klejnotów, zwłaszcza dyjamentu.—Wszelkie ciała przezroczyste i bezbarwne, np. sól, szkło, lód, po utłuczeniu na proszek, wydają się białe w świetle dziennym. — Białość śniegu. — Srebrzysty połysk baniek powietrznych w wodzie.

Mamidła powietrzne (fata morgana, rys. 491), zwykle w pustyniach, bywają wtedy, gdy sąsiednie warstwy powietrza różnią się znacznie w gęstości, np. skutkiem nierównego ogrzania. Skoro np. w pewnej wysokości nad ziemią unosi się chwilowo warstwa rzadsza, promienie zbyt ukośne odbijają się od niej, a wpadając do oka, dają w oddali urojony obraz przedmiotu. Obrazy bywają odwrócone, zwykle mgliste, odbicie bowiem od niewyraźnej i falującej powierzchni nie może być dokładne.



Rys. 491. Mamidło.

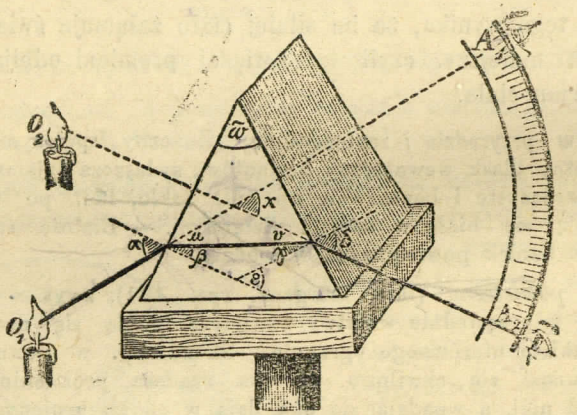


Rys. 492. Zwierciadło pryzmatyczne.

Zwierciadło pryzmatyczne (rys. 492) składa się z pryzmatu szklanego o prostokątnym przekroju. Światło, padające prostopadle na ścianę przyprostokątną, idzie bez załamania w szkle i pada pod kątem 45° na ścianę przeciwprostokątną. Ponieważ kąt graniczny szkła wynosi 42°, zachodzi tu odbicie wewnętrzne, tak iż promienie wychodzą również pod kątem 45° względem ściany odbijającej, czyli pod 90° względem promieni padających. Zastosowanie w fotometrach, lornetkach, przyrządach mierniczych.

§ 92. Pryzmat i szyba.

1. Załamanie w pryzmacie. *Pryzmat optyczny* stanowi każde ciało przezroczyste, posiadające przynajmniej dwie ściany płaskie, do siebie nachylone tak, iż przez jedną światło przenika do pryzmatu, a przechodząc przezeń, wychodzi drugą ścianą. Najczęściej używa się pryzmatów trójściennych, szklanych, ze szkła zwykłego, kryształowego, t. zw. szkła koronnego (ang. crown, wym. kron), albo ze szkła silniej łamiącego, cięższego, t. zw. flintu.



Rys. 493. Kąt odchylenia.

Ściany, przez które promień wchodzi i wychodzi, zowią się *ścianami łamiącymi*; linja ich przecięcia zowie się *krawędzią* pryzmatu, kąt nachylenia zowie się *kątem łamiącym* (ω na rys. 493). W pryzmacie czyli graniastosłupie trójściennym ściana przeciwległa kątowi łamiącemu stanowi *podstawę* pryzmatu.

2. Odchylenie promienia. Promień padający załamuje się w materji pryzmatu, następnie w powietrzu, przy wyjściu z pryzmatu. Z wykreślenia wynika, że promień w przejściu przez pryzmat nachyla się ku grubszej stronie pryzmatu. W pryzmacie więc trójściennym (rys. 493) promień nachyla się ku podstawie.

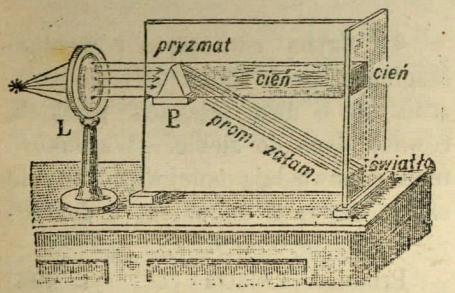
Odchyleniu podlegają zarówno promienie światła, jak innych rodzajów energji promienistej; zarazem zachodzi rozszczepienie światła na barwy i t. p. (szczegóły poniżej w § 95).

Kąt między promieniem padającym O_1 a wychodzącym A_2 stanowi *kąt odchylenia* (x); wzrasta on wraz z wielkością kąta łamiącego i spółczynnika załamania.

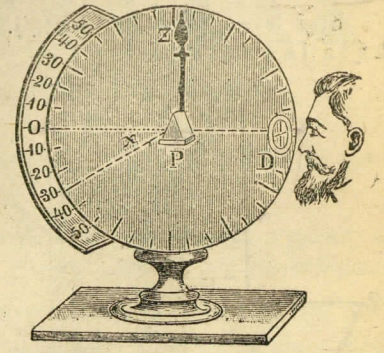
Oko widzi płomień świecy O_1 jak gdyby podniesiony, t. j. obraz przesunięty ku krawędzi.

Doświadczenie (rys. 494). Promienie słońca albo promienie lampy, zebrane soczewką w wiązkę równoległą, napotykając pryzmat, tworzą za nim cień na ekranie, znacząc w ten sposób swój kierunek pierwotny; zarazem widać na ekranie jasną smugę promieni załamanych.

Najmniejsze odchylenie ma miejsce wtedy, gdy promień przebiega pryzmat symetrycznie, t. j. wchodzi pod takim samym kątem, pod jakim wychodzi ($\alpha = \delta$).



Rys. 494. Załamanie w pryzmacie.



Rys. 495. Pomiar odchylenia.

Doświadczalnie łatwo to stwierdzić, obracając pryzmat (rys. 494) około krawędzi, i bacząc, kiedy jasna smuga na ekranie będzie miała najwyższe położenie.

Dla światła wskazuje dokładniej ten warunek *tarcza optyczna* Hartla (rys. 495), gdzie umieszczono w środku pryzmat szklany P ze skazówką Z. Patrząc przez pryzmat, widzi się zamiast 0 cyfrę 30, czyli $x = 30°$; za obróceniem pryzmatu widać dalsze cyfry. Skazówka daje ocenić symetryczny bieg promieni względem pryzmatu; ma to miejsce wtedy, gdy x jest najmniejsze (30°).

3. Wartość odchylenia i kąta łamiącego (rys. 493).

Kąt łamiący $\omega = \beta + \gamma =$ suma kątów wewnętrznych.

Kąt odchylenia $x = \alpha + \delta - \omega = \left\{\begin{matrix}\text{suma kątów}\\ \text{zewn.}\end{matrix}\right\} - \left\{\begin{matrix}\text{suma kątów}\\ \text{wewn.}\end{matrix}\right\}$

Dowód. Suma kątów wewnętrznych $\beta + \gamma =$ kątowi zewnętrznemu $\varepsilon = \omega$, jako mającemu boki prostopadłe do ε.

Kąt zewn. $x =$ sumie kątów wewn. $u + v = (\alpha - \beta) + (\delta - \gamma) = (\alpha + \delta) - (\beta + \gamma) = (\alpha + \delta) - \omega$.

Szczególny przypadek. Przy najmniejszym odchyleniu x, kąt $\alpha = \delta$, $\beta = \gamma = \omega/2$, $u = v = x/2$, czyli wszystkie te kąty są symetrycznie równe. Stąd łatwo wyznaczyć spółczynnik załamania, mierząc kąt odchylenia x i kąt łamiący ω.

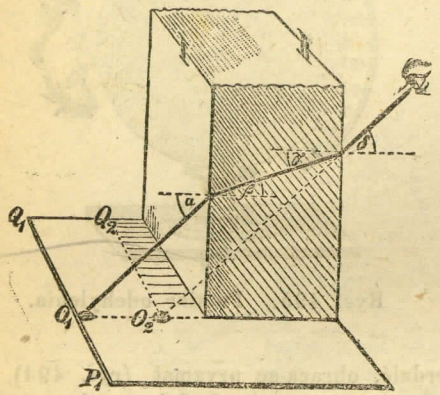
$$n = \frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = \frac{\sin (\beta + u)}{\sin \beta} = \frac{\sin \frac{1}{2} (\omega + x)}{\sin \frac{1}{2} \omega}.$$

Fabryki optyczne oznaczają tą drogą spółczynniki załamania szkieł rozmaitych, szlifując dwie strony szkła tak, aby tworzyły kąt ostry ω.

Dla pryzmatu o bardzo małym kącie łamiącym ω wzór powyższy można uprościć, skoro promień pada pod małym kątem α; wtedy można zastąpić wstawy ich łukami:

$$n = \frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = \frac{\alpha}{\beta} = \frac{\frac{1}{2} (\omega + x)}{\frac{1}{2} \omega}.$$

Stąd $x = (n - 1)\,\omega$, t. j. odchylenie jest proporcjonalne do kąta łamiącego.



Rys. 496.
Przebieg światła przez szybę.

4. Szybą czyli **płytą równoległościenną** zowie się każde ciało przezroczyste o dwu ścianach płaskich, równoległych do siebie. Warunkowi temu odpowiadają mniej więcej zwykłe szyby, używane do okien, a dokładnie szyby lustrzane.

Promień światła (O_1, rys. 496) załamuje się raz w szybie, drugi raz w powietrzu i wychodzi w kierunku równoległym do promienia padającego. Promień więc nie zmienia kierunku, tylko jest przesunięty względem promienia padającego.

Dowód.

$$\sin \alpha : \sin \beta = n$$
$$\sin \gamma : \sin \delta = 1/n.$$

Z pomnożenia i uwzględnienia $\beta = \gamma$, wynika $\frac{\sin \alpha}{\sin \delta} = 1$

czyli $\sin \alpha = \sin \delta$ oraz $\alpha = \delta$.

Ponieważ oko widzi w kierunku wpadających doń promieni, punkt O_1 będzie widoczny w O_2, podobnież Q_1 w Q_2. Patrząc więc przez szybę, widzimy przedmioty przysunięte ku szybie, postać zaś ani wielkość przedmiotu nie ulega zmianie.

Dla szyb i płytek cienkich, jakie zwykle są w użyciu, i promieni niezbyt ukośnych, można przyjąć, że światło przechodzi nawskroś po linji prostej, bez załamania.

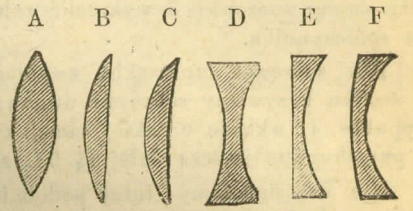
§ 93. Soczewki.

1. Rodzaje soczewek. Soczewkę stanowi każde ciało przezroczyste, ograniczone z dwu stron krzywymi powierzchniami, zwykle kulistymi.

Linja prosta, poprowadzona przez środki obu powierzchni, czyli *środki krzywizny*, nazywa się *osią optyczną główną*.

Stosownie do postaci, wypada odróżnić dwa rodzaje soczewek:

1) *Soczewki wypukłe* (rys. 497, A, B, C), są całkowicie zamknięte dwiema powierzchniami kulistymi; mogą być podwójnie-wypukłe, płasko-wypukłe i wklęsło-wypukłe (peryskopijne).



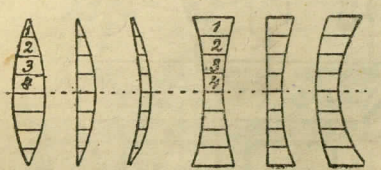
Rys. 497. Soczewki.

2) *Soczewki wklęsłe* (rys. 497, D, E, F), mają powierzchnie kul rozbieżne, tak iż ograniczenie wymaga jeszcze innej powierzchni, zwykle walcowej; mogą być podwójnie-wklęsłe, płasko-wklęsłe i wypukło-wklęsłe.

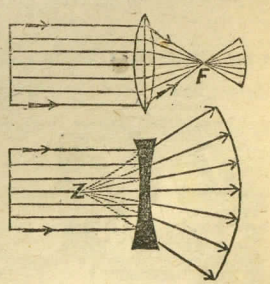
Praktycznie łatwo odróżnić soczewki po tym, że soczewki wypukłe są w środku grubsze, soczewki zaś wklęsłe w środku cieńsze, niż po brzegach.

2. Własności soczewek. Soczewki wypukłe zowią się *zbierającymi*, wklęsłe *rozpraszającymi*, stosownie do skutków, jakie sprawiają z promieniowaniem na nie padającym.

Powierzchnię kulistą można uważać jako złożoną z nieskończenie drobnych pól płaskich. Soczewki więc stanowią jakby zbiór pryzmatów (1, 2, 3, 4 na rys. 498), które w soczewkach wypukłych są zwrócone do osi podstawami, we wklęsłych krawędziami. Według reguły załamania w pryzmacie, pierwsze z tych soczewek załamują światło ku osi, t. j. zbierają promienie, ostatnie na zewnątrz osi, t. j. nadają promieniom kierunek rozbieżny.



Rys. 498.



Rys. 499.
Ognisko rzeczywiste i urojone.

Promienie światła, równoległe do osi, a bliskie do niej (środkowe), spotykają się po przejściu soczewki wypukłej w jednym punkcie, położonym na osi; punkt ten zowie się *ogniskiem optycznym* (*F*, rys. 499).

Soczewka wklęsła ma tylko *ognisko urojone* (*Z*), gdzie spotykają się przedłużenia promieni załamanych.

Wykreśleniem można stwierdzić własności zbierające lub rozpraszające soczewek, tudzież położenie ogniska. Należy tylko przeprowadzić promienie krzywizny, które stanowią zarazem linje prostopadłe do jednej i drugiej strony soczewki, i wykreślić załamane promienie światła według znanego spółczynnika.

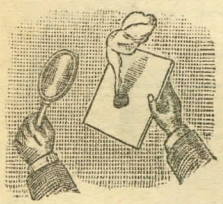
Dla soczewek ze szkła zwykłego, ognisko główne znajduje się prawie w środku krzywizny soczewki dwuwypukłej i dwuwklęsłej; soczewki płaskowypukłe i wklęsłe o takiej samej krzywiźnie mają ognisko dwa razy dalej, a peryskopijne jeszcze dalej (§ 94, zadania 2, 3).

Nie uwzględniamy tutaj podobnie jak i dalej, przy kreśleniu obrazów, rozszczepienia i zboczenia (pt. poniżej), jakim ulegają promienie, padające na brzegi soczewki; wyniki więc są dostatecznie ścisłe tylko dla promieni środkowych, podobnie jak to ma miejsce dla zwierciadeł (§ 88).

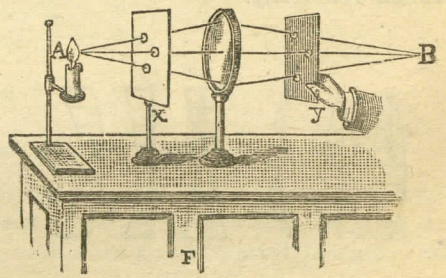
W użyciu praktycznym soczewki wypukłe zowią się także *szkłami palącymi*, ponieważ załamują również promienie ciepła i zbierają je w *ognisku cieplnym*; stąd od promieni słońca np. można zapalić papier, tytoń, drzewo (rys. 500).

Nie tylko promienie równoległe, ale i rozbieżne, t. j. pochodzące z danego punktu, zbierają się również w jednym punkcie, który w tym razie zowie się ogniskiem danego punktu, czyli *ogniskiem sprzężonym*.

Doświadczenia. 1) Ażeby oznaczyć w przybliżeniu ognisko, wystawiamy soczewkę dwuwypukłą na słońce tak, aby promienie padały w kierunku osi (rys. 500); wtedy na papierze ukaże się plama jaskrawa, okrągła, która w pewnej odległości papieru od soczewki zmniejszy się tak, iż robi wrażenie punktu świetlnego. Jest to ognisko optyczne; cokolwiek dalej nastąpi przepalenie papieru, co świadczy o położeniu ogniska cieplnego; leży ono nieco dalej dlatego, że promienie ciepła załamują się słabiej.



Rys. 500.



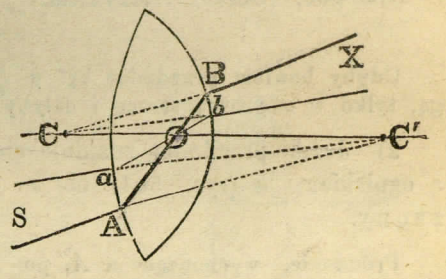
Rys. 501.

2) Ognisko dla promieni rozbieżnych, t. j. dla dowolnego punktu świecącego, oznaczamy za pomocą świecy, wstawiając między nią i soczewkę ćwiartkę tektury z 3 otworkami (rys. 501); wtedy na papierze poza soczewką ukażą się 3 jasne plamki, które w położeniu *B* zlewają się w jedną plamkę.

3. Środkiem optycznym soczewki jest punkt na osi, przez który promienie światła przechodzą bez zmiany kierunku. W przybliżeniu można przyjąć, że promień przebiega soczewkę po linji prostej, jak gdyby nie załamywał się wcale. Kierunek takiego promienia, t. j. każda linja prosta, przeprowadzona przez środek optyczny, z pominięciem środka krzywizny, zowie się *osią boczną*.

Środek optyczny leży na osi głównej, wewnątrz soczewki, o ile ta jest dość gruba.

Dowód. Ze środków krzywizny *C* i *C'* (rys. 502) wykreślamy dowolne równoległe *CB* i *C'A*; w punktach *A* i *B* muszą być styczne płaszczyzny równoległe do siebie, zatym promień światła *SA* przechodzi jakby przez szybę i wychodzi po *BX* równolegle do *SA*. Punkt *O* przecięcia *AB* z osią jest środkiem optycznym; jest on stały dla wszelkich promieni padających. Jeżeli bowiem obrócimy *AB* do położenia *ab*, trójkąty *C'Oa* i *COb* są podobne, albowiem z podobieństwa trójkątów *C'OA* i *COB* wynika proporcjonalność ich boków $C'O : CO = C'A : CB$; że zaś $C'A = C'a$ i $CB = Cb$, to $C'O : CO = C'a : Cb$, kąt $a = b$, czyli linje *C'a* i *Cb* są równoległe. Przy małej grubości soczewki można przyjąć, że promień nie załamuje się wcale, t. j. że linja *SABX* jest prostą.



Rys. 502. Środek optyczny.

4. Obrazy przedmiotów w soczewkach wypukłych. Soczewki wypukłe dają obrazy rozmaite co do wielkości, położenia i charakteru, zależnie od odległości przedmiotu. Zależność ta i rodzaj obrazów są takie same, jak w lustrach wklęsłych.

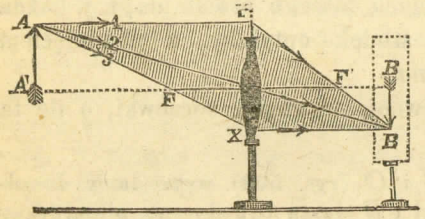
Obraz jakiegoś przedmiotu składa się z obrazów poszczególnych jego punktów; obraz punktu powstaje ze spotkania przynajmniej dwu promieni.

Wykreślenie obrazu daje się najłatwiej uskutecznić przez poprowadzenie z danego punktu dwu promieni, których przebieg jest z góry wiadomy: 1) promienia równoległego do osi optycznej, 2) promienia przechodzącego przez środek optyczny, czyli osi bocznej. Pierwszy z tych promieni po załamaniu przechodzi przez ognisko, drugi stanowi linję prostą, t. j. nie załamuje się wcale.

Dla ułatwienia przyjmuje się soczewkę za niezmiernie cienką, czyli zastępuje jedną płaszczyznę łamiącą, jak to widać z rys. 503, 504, a zwłaszcza z górnego rys. 499.

Przy porównaniu z warunkami kreślenia obrazów w lustrach należy zważyć, że podwójną odległość ogniskową stanowi tam promień krzywizny $r = 2F$; dla soczewek zaś ogniskowa zależy nie tylko od promienia r, ale i od załamania, np. dla zwykłego szkła $r = F$, w soczewce dwuwypukłej.

1) Jeżeli przedmiot znajduje się poza podwójną odległością ogniskową (czyli krócej: podwójną ogniskową, $2F$, rys. 503), obraz jest rzeczywisty, odwrócony i zmniejszony.



Rys. 503. Obrazy rzeczywiste.

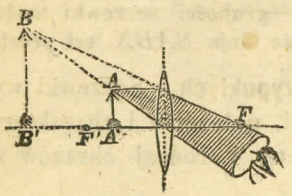
Promienie, wychodzące z A, spotykają się w B; podobnież inne, wychodzące z pomiędzy A i A', spotykają się między B i B'.

2) Jeżeli przedmiot znajduje się między ogniskiem F a podwójną ogniskową $2F$, obraz jest również rzeczywisty i odwrócony, ale powiększony.

Gdyby bowiem przedmiot był w BB', promienie poszłyby tą samą drogą, tylko w odwrotną stronę i dałyby obraz w AA'.

2) Jeżeli przedmiot znajduje się jeszcze bliżej soczewki, między nią a ogniskiem F (rys. 504), obraz jest urojony, prosty i powiększony.

Promienie, wychodzące z A, po przejściu soczewki mają kierunek rozbieżny, tak iż przedłużenia ich spotykają się w B, cały zaś obraz przedmiotu AA' ukazuje się oku, patrzącemu przez soczewkę, w położeniu BB'.



Rys. 504. Obraz urojony.

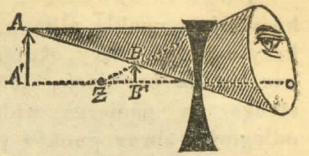
W poszczególnych przypadkach, gdy punkt świetlny znajduje się w samym ognisku (F, rys. 499), obrazu niema, bo promienie załamane idą równolegle do osi. Gdy zaś przedmiot jest w $2F$, obraz jest także w $2F$, równej wielkości.

Zastosowania. Przyrząd fotograficzny. — Lunety. — Latarnia projekcyjna. — Mikroskop. — Szkła do okularów dla osób dalekowzrocznych. — Szkła powiększające i panoramiczne. — Szkła palące. — Soczewki oświetlające, np. w latarkach powozowych, latarniach magicznych, latarniach morskich.

5. Obrazy przedmiotów w soczewkach wklęsłych. Soczewki wklęsłe dają tylko obrazy urojone; co do wielkości, obrazy tu zawsze są mniejsze od przedmiotu, położenie zaś mają proste.

Do wykreślenia obrazu (rys. 505) potrzeba również 2 promieni zasadniczych: 1) równoległego do osi, który po załamaniu oddala się od osi tak, iż jego przedłużenie przechodzi przez ognisko główne (Z), urojone; 2) promienia, nie ulegającego załamaniu, czyli osi bocznej AB.

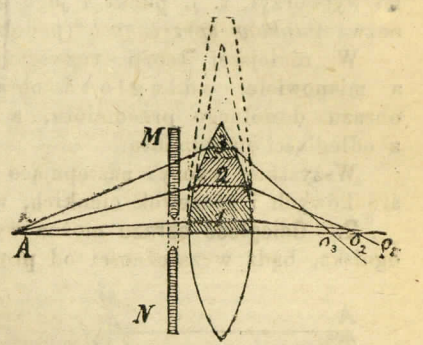
Zastosowania. Szkła do okularów dla krótkowidzów. — Lornetka teatralna. — Wizjery czyli celowniki do ręcznych przyrządów fotograficznych.



Rys. 505. Obraz urojony.

6. Niedokładności obrazów. Soczewki dają wyraźny obraz punktu, a tym samym i przedmiotu, jeżeli padają na nie tylko promienie bliskie osi optycznej, czyli promienie środkowe, te bowiem skupiają się dokładnie w odpowiednim punkcie. Promienie, idące od danego punktu ku brzegom soczewki, ulegają rozmaitemu zboczeniu i rozproszeniu, co psuje wyrazistość obrazów. Na powyższą niedokładność obrazów składają się 3 powody.

1) *Aberacja sferyczna* (rys. 506) polega na tym, że promienie brzeżne mają cokolwiek bliższe ognisko, niż promienie środkowe. Im większa jest soczewka w stosunku do swego promienia, czyli im jest bardziej zakrzywiona, tym więcej zbaczają promienie. Aberacja staje się zrozumiałą, skoro zważymy, że pryzmaty 1, 2, 3, na jakie można podzielić soczewkę, mają kąty łamiące stopniowo większe, zatym odchylenie promieni A-1, A-2, A-3 musi być odpowiednio coraz większe, mianowicie ku O_1, O_2, O_3.



Rys. 506. Aberacja sferyczna.

W celu zmniejszenia tej wady, sprawiającej wykrzywienia linji obrazu, umieszcza się przed soczewką *przesłonę* czyli *djafragmę* MN, z małym otworem pośrodku, aby zatrzymać promienie brzeżne. Dokładnie wszakże usuwa się aberację sferyczną dopiero przez dobór pary soczewek. Najmniejszą aberację mają soczewki wklęsło-wypukłe (peryskopijne). Układ soczewek, nie mający aberacji sferycznej, zowie się *aplanatem*.

2) *Aberacja chromatyczna* sprawia zabarwienie obrazu: zarysy przedmiotów są okolone na obrazie tęczową obwódką. Właściwość ta wynika z rozszczepienia światła; bliższe objaśnienie i środki zaradcze podaje § 95. Soczewki pozbawione aberacji chromatycznej, zowią się *achromatycznymi*.

3) *Astygmatyzm*. Skoro na soczewkę pada ukośnie wąski snop promieni, widać na ekranie, zamiast punktu świetlnego, dwie krótkie linijki wzajemnie prostopadłe. Wadę tę posiadają soczewki nawet aplanatyczne; zaciera ona wyrazistość obrazów. Układ soczewek, w którym usunięto tę niedokładność, zowie się *anastygmatem*. Do takich należą najlepsze szkła do fotografowania, czyli objektywy fotograficzne.

Nadto przy bardzo znacznych powiększeniach daje się uczuwać uginanie światła (§ 97, art. 6), t. j. obraz każdego punktu rozszerza się w małą plamkę, skutkiem czego cały obraz traci na wyrazistości.

Doświadczenia. 1) i 2) Patrząc na tekst drukowany przez soczewkę silnie wypukłą albo przez kulistą karafkę z wodą, widzimy wiersze wykrzywione, a litery okolone barwami tęczy. — 3) Soczewkę wypukłą wystawia się na promienie słońca tak, aby padały ukośnie; wtedy zamiast obrazu słońca na papierze widać dwie krzyżujące się kreski. Jeżeli w pewnej odległości obraz punktu rozciąga się wszerz, t. j. w kreskę poziomą, to obraz linji poziomej zarysowuje się ostro, gdy tymczasem linja pionowa będzie na obrazie rozszerzona, niewyraźna.

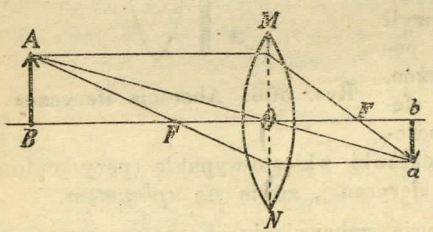
§ 94. Teorja soczewek.

1. Punkty sprzężone. Każdemu położeniu punktu świecącego odpowiada położenie jego obrazu, czyli ognisko danego punktu. Skoro obraz jest rzeczywisty, może zamieniać się na miejsce z punktem świecącym, który go wytworzył, t. j. punkt i jego obraz mogą się wzajemnie zastępować; stąd nazwa *punktów sprzężonych* (podobnie jak dla zwierciadeł, § 89).

W niniejszej teorji rozważamy własności soczewek oraz ich obrazów, a mianowicie: odległość obrazu dowolnego punktu, oraz wielkość obrazu dowolnego przedmiotu, a zarazem charakter obrazu, wynikający z odległości przedmiotu.

Wszystkie wzory następujące są dostatecznie ścisłe tylko dla promieni środkowych i soczewek cienkich, w porównaniu z ich średnicą.

2. Odległość obrazu można wyrazić w sposób dwojaki: w zależności od ogniska, bądź w zależności od promieni krzywizny i spółczynnika załamania.



Rys. 507.

A) Soczewki zbierające. Wzór, wyprowadzony dla soczewki dwuwypukłej, stosuje się też do soczewki płasko-wypukłej i wklęsło-wypukłej, przy uwzględnieniu znaku, bądź wartości promieni.

1) Dana jest ogniskowa F soczewki dwuwypukłej.

Dowolny punkt A przedmiotu, położonego poza ogniskiem, rzuca promienie na soczewkę, między innymi $AM \parallel OF$, t. j. osi głównej, oraz AO przez środek optyczny O; powstaje stąd obraz rzeczywisty a. Trzeci promień AN, przechodzący przez ognisko F, załamuje się po $Na \parallel OF$ i zbiega się również w a.

Trójkąt ANa daje $\quad OF : Na = OA : Aa$

„ AMa „ $\quad OF : Ma = Oa : Aa$

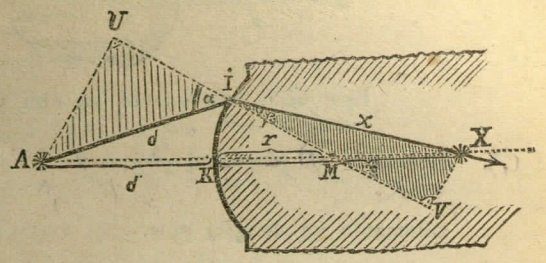
z dodania $\quad \dfrac{OF}{Na} + \dfrac{OF}{MA} = 1.$

Oznaczając ogniskową OF przez F i uwzględniając, że $Na = f$ i $MA = d$, otrzymujemy wzór taki sam, jak dla lustra wklęsłego (§ 89, wzór III):

$$\frac{F}{f} + \frac{F}{d} = 1 \qquad \text{albo} \qquad \boxed{\frac{1}{f} + \frac{1}{d} = \frac{1}{F}.} \qquad \text{(I)}$$

Powyższy wzór zasadniczy wystarcza do określenia właściwości i zmian obrazu, skoro zmienia się odległość przedmiotu (pt. art. 5),

2) Dane są promienie krzywizny r_1 i r_2 oraz spółczynnik załamania n.



Rys. 508. Załamanie na jednej powierzchni.

Najprzód uwzględnić wypada załamanie promieni na jednej powierzchni, czyli przy wejściu promieni, następnie na drugiej powierzchni, czyli przy wyjściu.

Z punktu A wychodzi nieskończona ilość promieni. Dowolny promień światła AI pada na soczewkę bardzo grubą, o promieniu krzywizny r i środku krzywizny M, tak iż

$$\frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = n.$$

Promień AI powinien należeć do środkowych; w takim razie można przyjąć $AI = AK = d$, $XI = XK = x$. Z podstawienia $\sin \alpha = AU : d$, oraz $\sin \beta = XV : x$ wypada:

$$n = \frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = \frac{AU}{XV} \cdot \frac{x}{d}.$$

Trójkąty podobne AUM i XVM dają $AU : XV = AM : MX = (d + r) : (x - r)$;

stąd $$n = \frac{d + r}{x - r} \cdot \frac{x}{d}$$

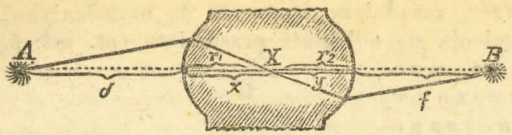
z pomnożenia $$ndx - ndr = dx + rx$$

z podziału przez drx $$\frac{n}{r} - \frac{n}{x} = \frac{1}{r} + \frac{1}{d}$$

czyli $$\frac{n}{x} = \frac{n - 1}{r} - \frac{1}{d}.$$

Wszystkie promienie środkowe, pochodzące z A, mają to samo d, zaś r i n są dla danej soczewki stałe, zatym wszystkie te promienie po załamaniu zbierają się w X.

Stosując to samo rozważanie do obu stron soczewki bardzo grubej, o promieniach r_1 i r_2 (rys. 509), otrzymujemy



Rys. 509. Załamanie na obu powierzchniach.

załamanie na pierwszej pow. $\frac{n}{x} = \frac{n-1}{r_1} - \frac{1}{d}$

załamanie na drugiej pow. $\frac{n}{y} = \frac{n-1}{r_2} - \frac{1}{f}$

z dodania $\frac{n\,(x+y)}{x\,.\,y} = (n-1)\left(\frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2}\right) - \left(\frac{1}{d} + \frac{1}{f}\right).$

Pomijając teraz grubość soczewki, t. j. gdy $x + y = 0$, znosimy całą lewą stronę równania, tak iż

$$\boxed{\frac{1}{f} + \frac{1}{d} = (n-1)\left(\frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2}\right).} \qquad \text{(II)}$$

Wzór ten stosuje się do soczewek podwójnie wypukłych. Dla płasko-wypukłych $r_2 = \infty$, czyli $1/r_2 = 0$; we wklęsło-wypukłych promień r_2 ma kierunek przeciwny, należy więc dać znak ujemny przed wyrazem $1/r_2$.

Z zestawienia wzorów I i II wynika

$$F = \frac{1}{(n-1)\left(\frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2}\right)}. \qquad \text{(III)}$$

B) Soczewki rozpraszające. Wzory, dotyczące soczewek zbierających, stosują się i do rozpraszających, przy odpowiedniej zmianie znaków. Soczewka dwuwklęsła wymaga ujemnych znaków przy r_1 i r_2, bo promienie krzywizny są zwrócone przeciwnie. Wzór III pozostaje bez zmiany, gdyż i F jest ujemne, wzór zaś I i II przyjmie postać

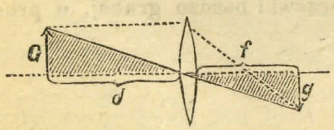
$$\frac{1}{f} + \frac{1}{d} = -(n-1)\left(\frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2}\right) = -\frac{1}{F}. \qquad \text{(IV)}$$

Dla soczewek płasko-wklęsłych $r_2 = \infty$, czyli $1/r_2 = 0$; dla wypukło-wklęsłych promień r_2 ma znak ujemny.

3. Wielkość obrazu tak się ma do wielkości przedmiotu, jak odległość obrazu do odległości przedmiotu.

$$\boxed{g : c = f : d.}$$

Proporcjonalność wynika z podobieństwa trójkątów o podstawach g i c, a wysokościach f i d, na rys. 510, odnoszącym się do soczewki wypukłej. Taki sam stosunek istnieje dla soczewki wklęsłej; można to wywnioskować wprost z rys. 505.



Rys. 510. Wielkość obrazu.

4. Ogólne własności soczewek. Wszystkie soczewki wypukłe mają własności zbierające, wszystkie soczewki wklęsłe mają własności rozpraszające.

Istotnie zbieżność promieni wymaga, aby F było dodatnie, t. j. $F > 0$, zatym i $1/F > 0$; rozbieżność, aby F było ujemne, t. j. $F < 0$, zatym i $1/F < 0$. Z wartości spółczynnika załamania, który zawsze > 1, czyli $n - 1 > 0$, wyprowadzamy wnioski:

A) Soczewkami zbierającymi są:

dwuwypukła, bo $r_1 > 0$ i $r_2 > 0$, więc $F > 0$;
płasko-wypukła, bo $r_1 > 0$, $r_2 = \infty$, więc $F > 0$;
wklęsło-wypukła, bo $r_1 > 0$, $r_2 < 0$, przyczym $r_2 > r_1$, czyli $1/r_1 - 1/r_2 > 0$, więc $F > 0$.

B) Soczewkami rozpraszającymi są:

dwuwklęsła, bo $r_1 < 0$ i $r_2 < 0$, więc $F < 0$;
płasko-wklęsła, bo $r_1 < 0$, $r_2 = \infty$; więc $F < 0$;
wypukło-wklęsła, bo $r_1 < 0$, $r_2 > 0$, przyczym $r_2 > r_1$, czyli $1/r_1 - 1/r_2 < 0$, więc $F < 0$.

Wzory dla soczewki dwuwypukłej stosują się do płasko-wypukłej, uwzględniając w odnośnych wzorach, że $r_2 = \infty$, zatym $1/r_2 = 0$, oraz do soczewki wklęsło-wypukłej, uwzględniając, że $r_2 < 0$, czyli biorąc $1/r_2$ ze znakiem — .

Podobnież wzór dla soczewki dwuwklęsłej stosuje się do płasko-wklęsłej, uwzględniając, że $r_2 = \infty$, czyli $1/r_2 = 0$, oraz do soczewki wypukło-wklęsłej, uwzględniając, że $r_1 < 0$, czyli biorąc $1/r_1$ ze znakiem — .

Wzór na wielkość obrazu odnosi się zarówno do wszelkich soczewek.

Zdolność zbierającą soczewek stanowi odwrotność ogniskowej, t. j. $1/F$. Soczewka wypukła im krótszą ma ogniskową, tym silniej zbiera promienie, t. j. bliżej do swej powierzchni. Istotnie, wzór I wykazuje, że przy niezmiennej odległości d przedmiotu musi być $1/f$ tym większe, im $1/F$ jest większe, czyli obraz jest tym bliżej, im ogniskowa jest mniejsza. To samo odnosi się do zdolności rozpraszającej: soczewka wklęsła rozprasza tym silniej, im krótszą ma ogniskową; rozbieżność bowiem znaczy to samo, co zbieżność w kierunku przeciwnym, czyli ujemnym.

Miarą zdolności zbierającej lub rozpraszającej soczewek jest *dioptrja* (D) t. j. zdolność zbierająca soczewki, której ogniskowa $F = 1$ m. Np. soczewka wypukła, mająca ogniskową $\frac{1}{2}$ m, $\frac{1}{5}$ m, $\frac{1}{10}$ m, posiada zdolność zbierającą $2D$, $5D$, $10D$; soczewka wklęsła o tych samych długościach ogniskowej posiada zdolność zbierającą $-2D$, $-5D$, $-10D$.

Zgodnie z III wzorem, każda soczewka tym silniej skupia lub rozprasza promienie, im powierzchnię ma bardziej zakrzywioną; ogniskowa bowiem F jest tym mniejsza, im mniejsze są promienie krzywizny r_1 i r_2.

5. Zmiany obrazu. Roztrząsanie wzorów I do V oraz przekształcenia wzoru I pozwala określić własności obrazów, czyli miejsce, charakter i wielkość obrazu, zależnie od odległości przedmiotu. Ze wzoru I wynika

$$f = \frac{dF}{d-F} = \frac{F}{1 - \frac{F}{d}}. \qquad \text{(VI)}$$

A) Soczewki zierające. Rozróżniamy 3 wypadki ogólniejsze oraz 4 poszczególne (por. obrazy zwierciadeł, § 89, art. 4).

1) Gdy $d > 2F$, to ułamek $F/d < \frac{1}{2}$, mianownik wzoru VI zawiera się między $\frac{1}{2}$ a 1, zatym $f > F$, ale $f < 2F$; przedmiot, umieszczony poza podwójną ogniskową $2F$, daje obraz rzeczywisty między F i $2F$. Zarazem $g < c$, obraz jest zmniejszony.

2) Gdy $d < 2F$, ale $d > F$, to ułamek F/d zawiera się między 1 a $\frac{1}{2}$, mianownik jest ułamkiem $< \frac{1}{2}$, zatym $f > 2F$; przedmiot, umieszczony między ogniskową F a podwójną ogniskową $2F$, daje obraz rzeczywisty poza $2F$. Ponieważ $g > c$, obraz jest powiększony.

3) Gdy $d < F$, to ułamek $F/d > 1$, mianownik i wzór cały ma znak ujemny; przedmiot, umieszczony między ogniskiem a soczewką, daje obraz urojony, po tej samej stronie soczewki. Ze wzoru I wynika $1/f < 1/F$ czyli $f > F$, zatym $f > d$, a stąd $g > c$; obraz jest powiększony.

Poszczególne przypadki stanowią:

4) Gdy $d = \infty$, to $f = F$; promienie równoległe, t. j. pochodzące od przedmiotu nieskończenie dalekiego, zbierają się w ognisku. Wtedy z V wzoru $f/d = 0$, czyli $g = 0$; obraz jest punktem.

5) Gdy $d = 2F$, to $f = 2F$; przedmiot, umieszczony w odległości podwójnej ogniskowej, daje obraz w takiej samej odległości. Stąd $g = c$, obraz ma wielkość naturalną.

6) Gdy $d = F$, to $f = \infty$; przedmiot, umieszczony w ognisku, daje obraz w nieskończoności, czyli w istocie nie daje go wcale, promienie bowiem idą równolegle po przejściu soczewki. Wtedy $f/d = \infty$, zatym $g = \infty$; obraz jest nieskończenie wielki.

7) Gdy $d = 0$, to $f = 0$; przedmiot, przystający do soczewki, daje obraz również przystający. Wtedy $g = c$, przedmiot ma wielkość naturalną.

Uogólnienie wszystkich powyższych przypadków brzmi:

Gdy przedmiot z nieskończoności zbliża się do ogniska soczewki, obraz jego rzeczywisty oddala się od ogniska do nieskończoności, a wielkość jego wzrasta od punktu do nieskończoności; obraz osiąga wielkość naturalną w odległości podwójnej ogniskowej. Przy zbliżeniu przedmiotu od ogniska aż do soczewki obrazy stają się urojone i powiększone.

B) Soczewki rozpraszające. Z przekształcenia wzoru IV wynika

$$f = -\frac{F}{1 + \frac{F}{d}} \qquad \text{(VII)}$$

Przy wszelkich wartościach d, od 0 do ∞, wypada f zawsze ujemne i mniejsze od F. Gdziekolwiek więc przedmiot się znajduje, obraz jest urojony i położony pomiędzy soczewką a jej ogniskiem. Ponieważ $1/f = -(1/F + 1/d)$, wartość $f < d$, zatym $g < c$; obraz jest zawsze zmniejszony.

Zadania.

1. Zastąpić soczewkę dwuwypukłą ze szkła koronnego przez płasko-wypukłą z flintu, któraby miała taką samą ogniskową, jeżeli $r_1 = 20$ cm, $r_2 = 30$ cm.

Rozw. Socz. z kr. $\frac{1}{F} = (1{,}5 - 1) \cdot \left(\frac{1}{20} + \frac{1}{30}\right) = \frac{1}{24}$

socz. z fl. $\frac{1}{F} = (1{,}7 - 1) \cdot \left(\frac{1}{r} + \frac{1}{\infty}\right) = 0{,}7 \cdot \frac{1}{r}$.

$0{,}7 \cdot \frac{1}{r} = \frac{1}{24}$ stąd $r = 16{,}8$ cm.

2. Która z dwu soczewek ma bliżej ognisko główne i ile razy: płasko-wypukła, czy podwójnie wypukła symetryczna, t. j. gdzie $r_1 = r_2$?

Rozw. Ze wzoru na F wypada dla socz. wypukłej $F_1 = \frac{r}{2(n-1)}$, dla wklęsłej $F_2 = \frac{r}{n-1}$, zatym $F_1 = \frac{1}{2} F_2$, t. j. soczewka wypukła ma ogniskową 2 razy krótszą.

3. Udowodnić, że dla soczewek dwuwypukłych z kronu ognisko znajduje się w środku krzywizny. Odp. Z założenia $r_1 = r_2$ i podstawienia $n = \frac{3}{2}$, wypada $F = r$.

4. W odległości 120 cm od soczewki szklanej, której $r_1 = 30$, $r_2 = 20$ cm, stoi świeca, wysoka na 8 cm. Oznaczyć wielkość i odległość obrazu. Odp. 2 cm; 30 cm.

5. Jaki obraz daje soczewka wklęsła, symetryczna, ze szkła zwykłego, o promieniu $r_1 = r_2 = -30$ cm, jeżeli przedmiot ma wysokość 1 m i stoi w odległości 30 cm? Odp. Obraz urojony, w odstępie 23 cm, wysokości 6,9 cm.

D) ROZKŁAD PROMIENIOWANIA.

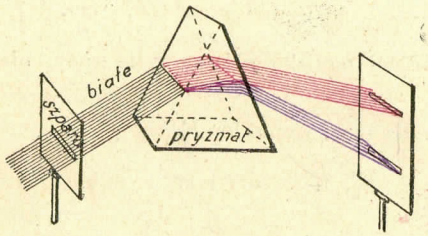
§ 95. Barwy.

1. Widmo. Promieniowanie ciała rozgrzanego, przechodząc przez pryzmat, ulega nie tylko załamaniu (jakie roztrząsa § 92 w szczególności dla światła), ale zarazem *rozszczepieniu*, t. j. promienie stają się rozbieżne i okazują odrębne własności, jak barwy, skutki cieplne, chemiczne. Podobne zjawisko ma miejsce i w soczewkach, jako też wszędzie, gdzie promienie przechodzą do innego ośrodka; rozszczepienie więc towarzyszy każdemu załamaniu promieni.

Promienie różnią się spółczynnikiem załamania i to tym więcej, im silniej ciało jest rozpalone. Stąd ciała świecące, zwłaszcza jaskrawym, olśniewającym blaskiem, dają rozszczepienie najwybitniejsze, gdzie łatwo rozróżnić główne rodzaje promieniowania: cieplne, świetlne, chemiczne.

Rozszczepione pasmo promieni zowie się *widmem.*

2. Rozkład światła słonecznego (Newton 1666). Promienie słońca, przepuszczone przez wąską szparę, równoległą do krawędzi pryzmatu, dają na ekranie smugę kolorową, czyli widmo świetlne w którym brzeg czerwony leży po stronie krawędzi, fijołkowy po stronie podstawy pryzmatu (rysunek 511). Przy położeniu pryzmatu krawędzią ku górze, jak na rysunku, widmo ma barwę czerwoną najwyżej; przy odwrotnym położeniu najniżej.



Rys. 511. Rozszczepienie światła.

Rysunek wskazuje przebieg tylko skrajnych promieni, dla wyrazistości; promienie wszelkich innych barw przypadają między czerwoną a fijołkową.

Kolory w widmie przechodzą stopniowo jeden w drugi, tak iż właściwie ilość ich jest nieograniczona. Chcąc uzyskać analogję do 7 tonów gamy, Newton przyjął 7 kolorów widmowych: czerwony, pomarańczowy, żółty, zielony błękitny, szafirowy, fijołkowy. Podział co do ilości barw jest zupełnie dowolny.

Widmo składa się z niezliczonych obrazów szpary, czyli wąskich pasków, zachodzących na siebie i wskutek tego zlewających się w ciągłą wstęgę różnobarwną. Każdy z tych kolorowych pasków zowie się *linją widmową* lub *prążkiem widmowym.*

Szerokość widma, t. j. odstęp między skrajnymi barwami zależy od zdolności rozszczepiającej materji, z jakiej zrobiono pryzmat; np. pryzmat z flintu daje widmo 3 razy szersze, niż taki sam pryzmat wodny.

Doświadczenie dodatkowe. Po usunięciu pryzmatu, na ekranie pozostaje biały obraz szpary, tej samej co ona szerokości. Przy zasłonięciu szpary szkłem czerwonym lub niebieskim, obraz będzie miał tę samą co szkło barwę, nie zmieni jednak miejsca na ekranie.

Jeżeli zaś poza szkłem czerwonym umieścimy pryzmat krawędzią do góry, obraz szpary (czerwony) obniży się na ekranie; zmieniając szkło czerwone na niebieskie, otrzymamy nowy obraz szpary (niebieski) jeszcze niżej. Barwa więc niebieska załamuje się bardziej, niż czerwona.

Różnica między spółczynnikiem załamania promieni skrajnych fijołkowych i czerwonych $n_f - n_c = d$, stanowi *wielkość rozszczepienia światła.*

3. Niewidzialne części widma. Obok widma opisanego, *optycznego,* t. j. działającego na zmysł wzroku, istnieje z obu jego stron widmo niewidzialne, utworzone przez rozmaite promieniowania ciemne (§ 84).

Poza smugą promieni czerwonych, które zarazem odznaczają się znaczną energją cieplną, istnieje dalsza wstęga promieni cieplnych, oddziaływających na czuły termometr, a niedostępnych dla oka; jest to *widmo cieplne,* zwane też wedle położenia *pozaczerwonym* (podczerwonym).

Poza obrębem zaś promieni fijołkowych, które zarazem posiadają wybitną energję chemiczną, ciągnie się dalsze pasmo ciemnych promieni chemicznych, działających np. na kliszę fotograficzną lub na zieleń roślinną; jest to widmo *chemiczne* czyli *pozafijołkowe.* Owe ciemne promienie chemiczne odznaczają się też zdolnością wywoływania fluorescencji (§ 84) i rozbrajania ciał naelektryzowanych (pt.).

Szczególną obfitością promieni pozafijołkowych wyróżnia się płomień magnezu, cynku, siarki, oraz światło elektryczne łukowe (pt.).

Do otrzymania widma chemicznego należy używać pryzmatu z kwarcu, szkło bowiem pochłania większą część promieni pozafijołkowych. Do otrzymania widma cieplnego należy się posługiwać ciałem bardziej od szkła przecieplającym, np. pryzmatem z soli kamiennej.

4. Barwy widmowe są proste. Przypuszczając którąkolwiek z barw widma przez drugi pryzmat, otrzymamy na ekranie wstęgę tej samej barwy, tylko odchyloną. Objaśnia to rys. 514, gdzie pryzmat (*w*) odszczepia barwę fijołkową, która dalej, na ekranie (w *x*) ukazuje się również jako fijołkowa.

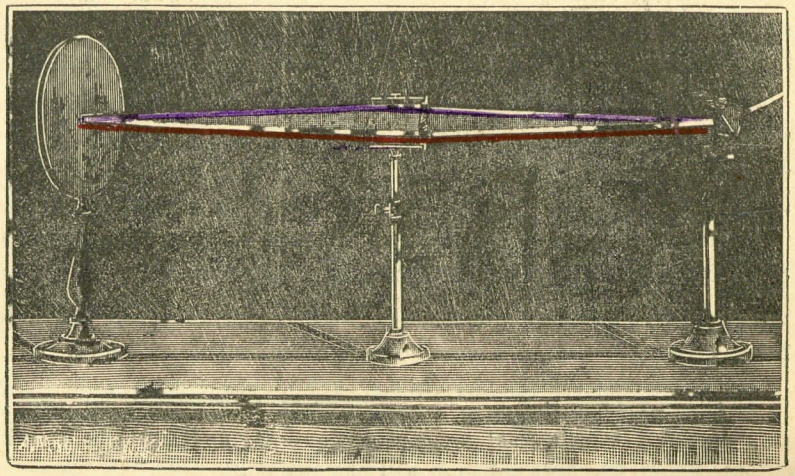
Widmo więc składa się z barw prostych, które mogą ulegać załamaniu, nie ulegają zaś rozkładowi.

5. Barwy ciał wszelkich są złożone. Światło, pochodzące od rozmaitych ciał kolorowych w oświetleniu dziennym, albo od ciał rozżarzonych, zawiera oprócz barwy głównej, nadającej im zabarwienie, cały szereg barw innych.

Przekonać się można o tym, przepuszczając światło tych ciał przez pryzmat. Wyjątkowe tylko ciała wydają lub przepuszczają promienie jednobarwne, t. j. tej barwy, jaką posiadają dla oka; np. czerwone tylko promienie przepuszcza szkło fotograficzne, żółte wydaje rozżarzona para sodu, zielone wydaje rozżarzona para talu.

Liść wydaje się zielony, jakkolwiek obok barwy zielonej zdradza w pryzmacie domieszkę innych. — Czerwony ogień bengalski zawiera domieszkę promieni żółtych, niebieskich. — Sód płonący, albo jego sole, rozżarzone w płomieniu spirytusowym, dają światło żółte zarówno dla oka bezpośrednio, jak przy użyciu pryzmatu, czyli światło jednobarwne.

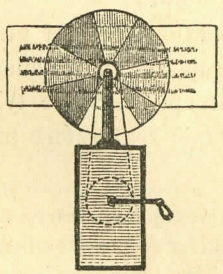
6. Składanie barw (synteza). a) Barwa biała. Różnobarwne promienie widma słonecznego, zebrane za pomocą soczewki, dają w jego ognisku plamę białą (rys. 512). Podobny skutek sprawia lustro wklęsłe. Z połączenia więc wszystkich barw widmowych powstaje barwa biała.



Rys. 512. Synteza światła białego.

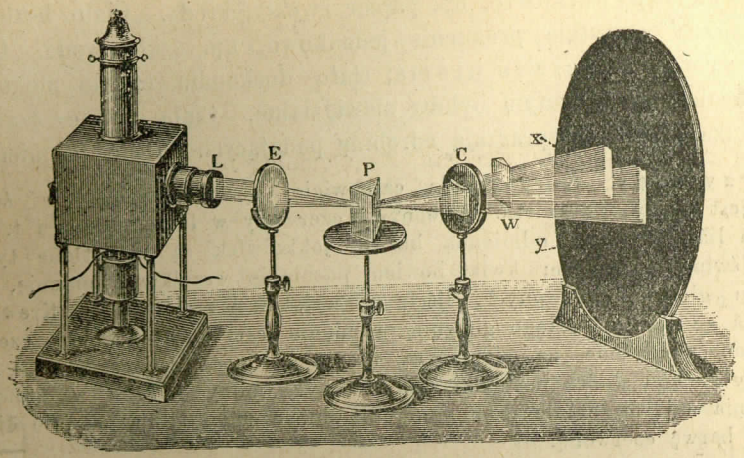
Barwę mniej więcej białą można ujrzeć, obracając krążek o wycinkach, pomalowanych barwami, naśladującymi kolory widma (rys. 513). Zupełnej białości niepodobna osiągnąć, bo nie są to barwy czyste.

Jeżeli widmo słoneczne pozbawimy jednej z barw, to pozostałe złączone dają pewną barwę, którą zowiemy *dopełniającą* względem wyłączonej barwy: obie barwy dopełniające dają barwę białą. Np. dla barwy czerwonej dopełniającą barwą jest zielona, dla żółtej fijołkowa, dla pomarańczowej błękitna i t. p. W ten sposób można w widmie odnaleźć niezliczoną ilość par kolorów, które się wzajemnie dopełniają na kolor ogólny, t. j. biały.



Rys. 513. Mieszanie barw.

Rys. 514 wyobraża przyrząd do okazania barw dopełniających. Światło lampy elektrycznej wychodzi wąską szczeliną z latarni i skupione soczewką *E* pada na pryzmat; tutaj się rozszczepia i daje widmo na ekranie. W razie ustawienia soczewki *C* poza pryzmatem, promienie widma zbierają się w plamę białą. Skoro zaś część tych promieni, np. fijołkowo-szafirową *x* odłączyć za pomocą innego wąskiego pryzmatu *W*, pozostałe promienie tworzą plamę żółtą *y*.



Rys. 514. Otrzymanie barw dopełniających.

Łączenie barw dopełniających można łatwiej uskutecznić przez zmieszanie dwu roztworów kolorowych. Np. sole niklu mają barwę zieloną, sole kobaltu różową; roztwory obu soli zmieszane w odpowiednim stosunku dają ciecz bezbarwną.

Mieszając zwykłe farby malarskie, nie otrzymuje się nigdy kolorów odpowiadających kolorom widma; farby bowiem nie posiadają czystych kolorów widmowych. Objaśnia to przykład następujący. Ze zmieszania farby szafirowej z żółtą powstaje, jak wiadomo z praktyki, kolor zielony, nie zaś biały, jakkolwiek są to barwy dopełniające. Farba bowiem żółta, zbadana przez pryzmat, okazuje promienie żółte, czerwone i zielone, farba szafirowa promienie niebieskie, zielone i fijołkowe; razem więc okazują tylko wspólną barwę zieloną, inne osłabiają się wzajemnie lub znoszą.

b) Wszelkie barwy można otrzymać przez połączenie *3 barw zasadniczych*: czerwonej, zielonej i niebiesko-fijołkowej. Odpowiadają one podług teorji Younga i Helmholtza trzem rodzajom substancji wzrokowych, wrażliwych każda na jednę z barw wymienionych.

Technika korzysta z barw zasadniczych do *chromolitografji*, gdzie odbitki danego przedmiotu z 3 klisz: czerwonej, zielonej i fijołkowej składają się na obraz w barwach mniej lub więcej naturalnych. Poza tym barwy zasadnicze mają zastosowanie w fotografji kolorowej (§ 99).

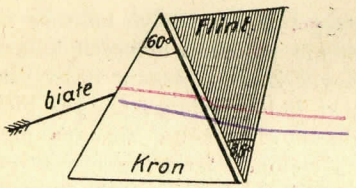
7. Barwy ciał objaśniamy w ten sposób, że każde ciało odbija lub przepuszcza promienie tej głównie barwy, w jakiej nam się ukazuje, pozostałe zaś pochłania lub rozprasza.

Białą barwę widzimy wtedy, gdy ciało odbija zarówno wszystkie promienie, np. papier zwykły, kreda. Ciało bezbarwne przepuszcza wszystkie promienie jednakowo, np. szkło, woda. Czarnej barwy właściwie niema; ciało doskonale czarne nie odbijałoby wcale światła, zatym byłoby niewidzialne. Ciała zwane czarnymi, np. sadza, węgiel, rozpraszają odrobinę padających na nie promieni.

Przykłady. Śnieg odbija całkowicie wszelkie promienie światła; stąd jest biały w świetle dziennym, czerwony w łunie pożaru i t. p. — Róża i liść róży mają odmienną barwę, jakkolwiek są oświetlone tym samym światłem białym; kwiat bowiem pochłania wszelkie promienie, z wyjątkiem głównie czerwonych, liście z wyjątkiem zielonych. — Krew przepuszcza ze światła białego głównie promienie czerwone. — Szkło czerwone i zielone, nałożone na siebie, są nieprzezroczyste (dlaczego?). — Zorza, krwawy zachód słońca pochodzi stąd, że pył wodny i kurz w atmosferze pochłania najkrótsze fale promieniowania słonecznego, odbija zaś fale dłuższe, dające barwę czerwoną.

8. Achromatyzm. Wielkość rozszczepienia nie jest proporcjonalna do spółczynnika załamania rozmaitych materji. Można dobrać dwa ciała o jednakowym prawie załamaniu, a różniące się bardzo co do rozszczepienia.

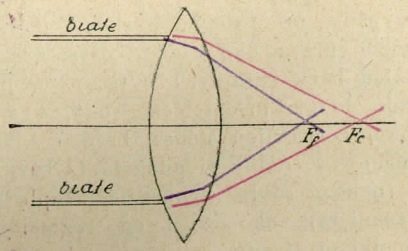
Na tej zasadzie można sporządzić *pryzmat achromatyczny* (rys. 515), t. j. nie rozkładający światła na barwy, a jednak zmieniający kierunek promieni. Pryzmat taki składa się z dwu gatunków szkła, z których pierwszy rozszczepia słabiej prawie dwa razy od drugiego.



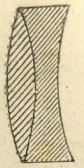
Rys. 515.
Pryzmat achromatyczny.

Jeżeli pryzmat ze szkła koronnego, czyli kronu ma kąt łamiący 60°, a z flintu 35°, to promienie, np. czerwony i fijołkowy, rozszczepione przez jeden pryzmat, schodzą się w drugim znów równolegle do siebie, tak iż wiązka światła białego wychodzi z pryzmatu również jako wiązka biała, tylko załamana ku podstawie pryzmatu szerszego (kron), jak na rysunku 515. Przeciwnie, zwiększając rozwartość pryzmatu z flintu, można znieść odchylenie, a pozostanie przewaga rozszczepienia po stronie flintu. Takie pryzmaty rozkładają światło przy patrzeniu wprost w jego kierunku; budowę objaśnia rys. 525.

Soczewki achromatyczne polegają na tej samej zasadzie; soczewkę bowiem można uważać za układ pryzmatów nadzwyczaj wąskich (§ 93). W soczewce wypukłej promienie fijołkowe, jako więcej łamliwe, zbierają się bliżej soczewki, niż promienie czerwone (rys. 516), zatym ognisko dla światła białego nie stanowi jednego punktu, ale jest rozciągnięte wzdłuż osi; stąd obrazy zabarwione i niewyraźne. Usuwa się tę niedokładność, zwaną *aberacją chromatyczną*, dobierając parę soczewek, jak wskazuje rys. 517, wypukłą



Rys. 516.
Soczewka rozkłada światło.

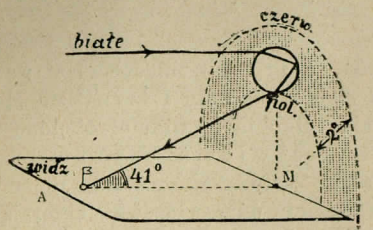


Rys. 517.
Soczewka achromatyczna.

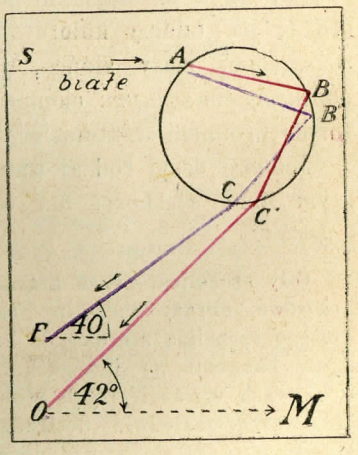
z kronu i wklęsłą z flintu (objaśnić przebieg promieni). Zważyć jednak wypada, że dokładny achromatyzm tak w pryzmacie, jak soczewkach, da się osiągnąć tylko dla 2 lub 3 barw dowolnych, co zwykle w praktyce wystarcza; ażeby usunąć pozostałe barwy, należałoby zestawić większą ilość pryzmatów, czy soczewek, coby się odbiło niekorzystnie na jasności obrazów.

9. Tęcza stanowi naturalne widmo postaci łukowej, wskutek załamania, rozszczepienia i odbicia światła słonecznego w kropelkach wody, z jakich składają się chmury.

Warunki powstawania tęczy: słońce musi się znajdować z tyłu widza, nisko nad poziomem, przed widzem zaś chmury dosyć ciężkie, t. j. złożone z kropelek niezbyt drobnych. Tęcza bywa widzialna pod kątem najwyżej 41° względem poziomu, szerokość jej wynosi przeszło 2° (por. rys. 518).



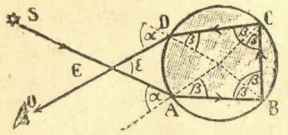
Rys. 518. Wysokość tęczy.



Rys. 519. Zasada tęczy głównej.

Teorję tęczy podał Descartes (1637), uzupełnił Newton i inni. Uzasadnić można powstawanie tęczy i jej właściwości, wykreślając bieg promieni w kropli wody, przy uwzględnieniu spółczynnika załamania światła w wodzie $= \frac{4}{3}$ (ściśle dla promieni czerwonych $n = 1{,}330$, dla fijołkowych 1,344).

Rys. 518 objaśnia kąt najwyższej tęczy = 41°; zarazem stwierdza, że środek M łuku tęczowego przypada na promieniu słońca AM, przechodzącym przez oko widza. Rys. 519 wskazuje rozkład barw skrajnych w tęczy: w punkcie O wpada do oka promień czerwony, wyżej biegnie fijołkowy; promień słońca, bardzo bliski, idący poniżej SA, dałby w punkcie O barwę fijołkową (należy sobie wyobrazić kroplę cokolwiek przesuniętą); oko więc od rozmaitych części kropelki otrzymuje cały szereg barw. Z rysunku 519 wynika, że tęcza u góry musi być okolona barwą czerwoną, jak to zaznaczono na rys. 518.



Rys. 520.
Zasada tęczy wtórnej.

Niekiedy ponad tęczą główną widać drugą tęczę bledszą o barwach ułożonych przeciwnie. Stanowią ją promienie padające na dolną część kropli i ulegające 2 razy odbiciu wewnątrz kropli (zbadać bieg promieni rys. 520).

§ 96. Analiza widmowa.

1. Dwa rodzaje widma. Otrzymane w doświadczeniu Newtona (rys. 511) widmo słoneczne okazuje przy dokładniejszym zbadaniu mnóstwo prążków czarnych na ogólnym tle kolorowym. Wąziutkie te prążki, zaledwie widzialne gołym okiem, zowią się *linjami Fraunhofera* (1814, pt. tablicę kolorową). Różnobarwna część widma pochodzi od rozżarzonej masy słońca, jest wynikiem jego emisji, stąd zowie się *widmem emisyjnym*; ciemne prążki powstają skutkiem pochłaniania pewnych promieni w atmosferze słońca i stanowią *widmo absorbcyjne*.

Jeden i drugi rodzaj widma dają też sztuczne źródła światła, przyczym inne własności ma widmo ciał stałych i płynów, niż widmo par i gazów.

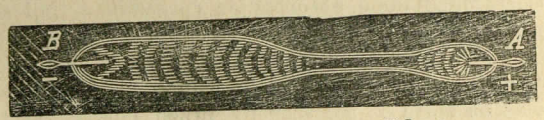
Gdy szczelina, przez którą światło pada na pryzmat, niedość jest wąska, kolorowe obrazy szczeliny zachodzą na siebie znacznie i barwy się łączą; dlatego szczelina szeroka na kilka mm daje tylko białe widmo, okolone słabymi barwami po brzegach. Ażeby otrzymać widmo czyste, to jest o barwach wyraźniejszych i obfitszych, należy zastosować szczelinę niezmiernie wąską, zaledwie dostrzegalną, albo lepiej użyć soczewki zbierającej. Wtedy ukazują się w widmie słońca linje Fraunhofera, tym liczniejsze i bardziej wyraziste, im węższą jest szczelina; przy użyciu pryzmatów silnie łamiących można ich naliczyć kilka setek, główniejsze oznaczono literami od A w barwie czerwonej do H w fijołkowej.

2. Widmo emisyjne. 1) Ciała stałe i płynne w stanie rozżarzonym dają *widmo ciągłe*. Ilość barw w takim widmie zależy tylko od temperatury, nie zależy zaś od rodzaju materji świecącej. Z widma więc ciągłego nie można nic wnosić o istocie materji.

Żelazo, węgiel, lawa, rozpalone zaledwie do czerwoności, dają w widmie barwę czerwoną, do której przyłącza się stopniowo pomarańczowa, żółta itd. w miarę silniejszego rozgrzania. Wszystkie kolory widma występują dopiero przy rozżarzeniu do białości. Przy 540° widmo czerwone dosięga linji B, przy 700° dochodzi do F, przy 1200° poza linję H. Płomień świecy, zawierający rozpalone pyłki węgla, jako też światło gazowe i elektryczne wydaje widmo ciągłe, różnobarwne, podobne do słonecznego, ale bez ciemnych prążków (dlaczego?).

2) Pary i gazy rozżarzone dają *widmo przerywane*, t. j. na tle ciemnym, albo blado zabarwionym, istnieją wyraźne a wąziutkie *prążki* czyli *linje widmowe*, albo szersze, rozlewne paski czyli *smugi widmowe*. Pierwsze powstają zwykle w temperaturze bardzo wysokiej i przy małej gęstości materji, drugie przy rozżarzeniu słabszym i materji gęstszej.

Ponieważ rozmaite materje dają właściwe sobie linje widmowe, których ilość i położenie oznaczono, można rozpoznawać materje na zasadzie ich widma (pt. poniżej „Analiza widmowa").

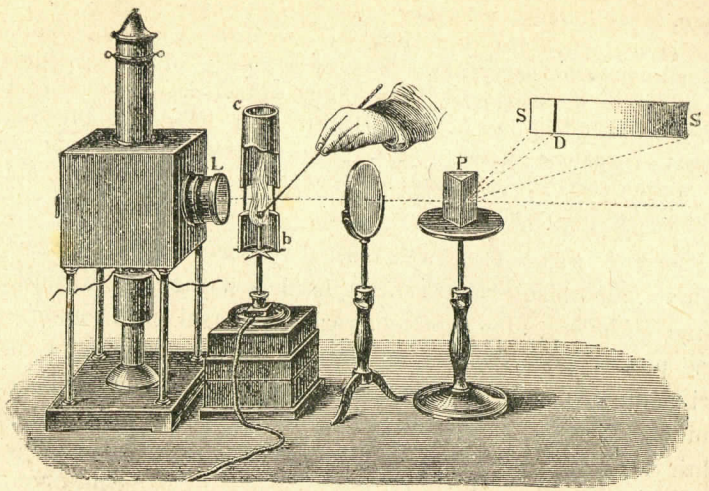


Rys. 521. Rurka widmowa Pflückera.

Dla otrzymania widma przez ulotnienie materji stałej lub płynnej wprowadza się ją do płomienia za pomocą drucika platynowego (rys. 522, część b), albo wydobywa się z niej iskry elektryczne. Materje, które są przy temperaturze zwykłej w stanie lotnym, pobudza się do świecenia za pomocą iskier elektrycznych, niepodobna ich bowiem dostatecznie rozżarzyć drogą ogrzewania. Istnieją w tym celu *rurki Pflückera* (rys. 521) zwężone pośrodku; po napełnieniu rurki badanym gazem łączy się jej końcówki A i B z maszyną elektryczną lub innym przyrządem iskrzącym (Ruhmkorffa, pt.); wtedy gaz wydaje światło jaskrawe pod wpływem wyładowań elektrycznych, mimo iż rozgrzewa się bardzo mało (zamiana energji elektrycznej na promienistą).

3. Widmo absorbcyjne. Świecące pary i gazy pochłaniają promienie tej barwy, jaką same wydają (*prawo Kirchhoffa*). Na tej zasadzie powstają ciemne prążki na tle widma ciągłego, tęczowego, skoro światło białe przenika przez rozżarzony gaz lub parę. Prążki te stanowią widmo pochłaniania czyli *absorbcyjne*, zwane też widmem *odwróconym*, ponieważ prążki ciemne zajmują to samo miejsce, jakie miałyby prążki kolorowe danego gazu lub pary, gdyby usunięto światło białe.

Widmo absorbcyjne powstaje skutkiem różnicy temperatury obu źródeł światła. Koniecznym tedy jest warunkiem, aby światło białe pochodziło od ciała silniej rozgrzanego, niż badany gaz lub para.



Rys. 522. Widmo absorbcyjne (przemiana linji sodu).

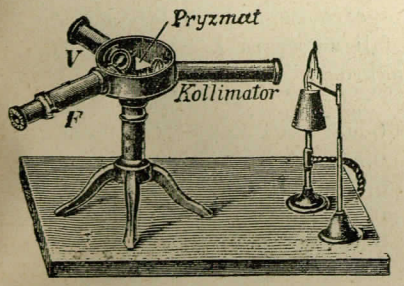
Np. lampa elektryczna łukowa daje widmo ciągłe; płomień spirytusowy, zabarwiony sodem na żółto i umieszczony przed lampą, zatrzymuje z białego światła lampy promienie żółte, tak iż na tle różnobarwnym powstaje ciemna linja, w miejscu żółtej linji sodu. Doświadczenie to wyjaśnia rys. 522.

4. Zasada analizy widmowej. Linje widmowe dają możność dokonania *analizy spektralnej* czyli *widmowej*, t. j. wyśledzenia pierwiastków chemicznych oraz niektórych związków, z jakich składa się badana materja. W tym celu należy materję ulotnić i doprowadzić do świecenia, a światło jej rozpatrywać przez silnie łamiący pryzmat w przyrządzie, zwanym *spektroskopem*. Metodę powyższą podali Kirchhoff i Bunsen (1859).

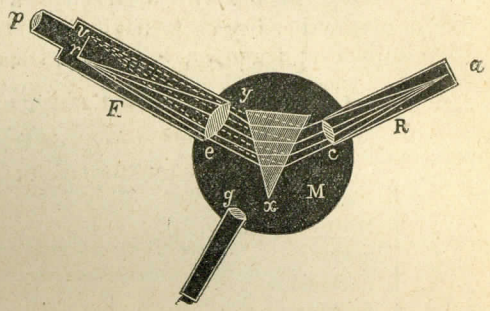
Tablica kolorowa podaje kilka najprostszych widm emisyjnych. Para sodu (*Na*) daje linję jaskrawo żółtą, która przy silnym powiększeniu się rozdwaja; para talu (*Tl*) daje linję zieloną; wodór (*H*) trzy główne linje: czerwoną, zieloną i szafirową (czwarta liljowa jest bardzo słaba). Przeważnie widma bywają bardziej złożone; np. azot daje linje i smugi w różnych częściach widma, najwięcej w czerwonej; dla pary żelaza naliczono kilkaset linji widmowych. Mając w tablicach ilość i położenie głównych linji widmowych, porównywamy badane widmo i stąd wnosimy o zawartości danego pierwiastka.

Widmo absorbcyjne stosuje się nie tylko do par i gazów, ale do płynów, barwików i wogóle materji, które badamy na zimno, przepuszczając przez nie światło różnobarwne. Materje kolorowe pochłaniają barwy, jakie same posiadają w zwykłym świetle dziennym; np. krew okazuje dwie właściwe sobie smugi ciemne w czerwonej części widma.

Analizą spektralną można wykryć niepochwytne prawie ilości materji; np. kurz, unoszący się w powietrzu, zdradza już widmo sodu. Tą drogą Bunsen i inni wykryli wiele pierwiastków metalicznych, zanim zdołano je chemicznie wydzielić. W astronomji zaś spektroskop jest jedynym narzędziem do poznania składu ciał niebieskich. Linje Fraunhofera, które stanowią widmo absorbcyjne słońca, zdradzają budowę słońca, wykazując, że jest to bryła materji gęstej, jak ciecz, otoczona atmosferą gazów i par o wysokiej temperaturze. W tej gazowej powłoce słońca wykryto te same pierwiastki, jakie zawiera ziemia.



Rys. 523. Spektroskop Bunsena.



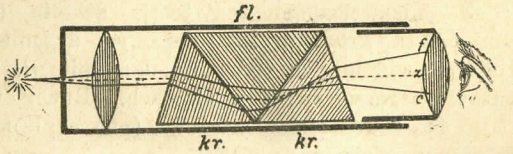
Rys. 524. Działanie spektroskopu.

Spektroskop Bunsena (rys. 523 i 524) składa się z rury ze szczeliną i soczewką czyli kollimatora (*R* na rys. 524), który się zwraca ku światłu badanemu; dalej promienie idą przez pryzmat, a rozłożone przenikają przez soczewkę w lunecie *F*, która daje obraz widma powiększony. Trzecia rura zawiera podziałkę milimetrową do wyznaczenia miejsca linji widmowych, albo też daje widmo porównawcze, t. j. zwraca się na jakieś znane światło, np. dzienne, aby je porównać z widmem badanym.

Przebieg promieni w spektroskopie objaśnia rys. 524, gdzie powstaje widmo *rv*, przyczem *r* oznacza promień czerwony, *v* fijołkowy; patrzy się przez soczewkę *p* lunety *F*. Podziałkę zawiera rurka *N* (*V* na rys. 523); ustawiając przed nią lampę, przerzuca się obraz podziałki, odbity od ściany *xy* pryzmatu, przez soczewkę *e* do lunety *F*, tak iż ukazuje się tutaj podziałka na tle widma.

Spektroskop Browninga (rys. 525), czyli spektroskop nieodchylający, daje rozszczepienie światła prawie bez odchylenia promieni.

Osiąga się to przez układ pryzmatów naprzemian z kronu i flintu, o kątach tak dobranych, że widmo *fc* ukazuje się w kierunku badanego światła, mianowicie środek widma, promień zielony *z* (objaśnić przebieg promieni).



Rys. 525. Spektroskop Browninga.

Przyrząd taki, choć słabiej rozszczepia, daje widmo bardziej jaskrawe i stosuje się do badań astronomicznych, oraz jako przyrząd podręczny w farbiarstwie, do badania kolorów, jako też w hutnictwie, przy wytapianiu stali, gdzie z widma płomienia wnosi się o spalaniu pewnych domieszek (w procesie Bessemera).

§ 97. Światło jako ruch falowy.

1. Teorja widma. a) Widmo ciągłe. Widmo rozżarzonych ciał stałych i płynnych zawiera wszelkie fale eteru, o częstości od 5 biljonów do 3000 biljonów drgań na sekundę. Długość fali ze wzoru $\lambda = c/n$ (§ 76, art. 5), wynosi odpowiednio od 60 do 0,1 mikrona. Mianowicie, w granicach przybliżonych:

promienie cieplne		od λ =	60 μ	n =	5	biljonów
		do „	0,5 μ	„	600	„
światło	czerwone, skrajne	„	0,760 μ	„	395	„
	żółte, średnio	„	0,560 μ	„	534	„
	zielone „	„	0,512 μ	„	582	„
	niebieskie „	„	0,456 μ	„	655	„
	fijołkowe, skrajne	„	0,396 μ	„	758	„
promienie chemiczne		od „	0,5 μ	„	600	„
		do „	0,1 μ	„	3000	„

Tak więc, promienie widzialne czyli światło mieści się w granicach niespełna jednej oktawy, promienie ciemne obejmują daleko większy obszar: chemiczne przeszło 2 oktawy, cieplne prawie 7 oktaw.

b) Widmo prążkowe. Widmo par i gazów zawiera tylko fale o częstości określonej, charakterystycznej dla każdej materji. Np: widmo pary sodowej, czyli żółta linja D zawiera fale o długości 0,589 μ, co odpowiada 509 biljonom drgań na sekundę. Widmo o kilku prążkach charakterystycznych, np. wodoru, zawiera kilka rodzajów fal, ale brak mu fal o częstości pośredniej między danymi.

Jak dźwięki składają się z tonów pojedyńczych, harmonicznych (§ 81, art. 2), podobnież światło kolorowe, pochodzące od par i gazów, składa się z odrębnych prążków barwnych, o drganiach właściwych. Jednakże tony harmoniczne w akustyce są do siebie w prostym stosunku wielokrotnym, linje zaś widmowe takiej prawidłowości nie okazują lub dają się tylko jej dopatrzeć w niektórych widmach.

2. Elektromagnetyczna teorja światła (Maxwell 1873). Należy przypuścić, że źródłem fal eteru są drgania harmoniczne wewnątrz atomów. Ile linji widmowych wykazuje dany pierwiastek, tyle mieć musi prostych ruchów harmonicznych w atomach. Ruchy te są natury elektrycznej, polegają na drganiach elektronów (pt.) czyli atomów elektryczności, zawartych w atomie chemicznym.

Światło białe i różne światła kolorowe o widmie ciągłym stanowią mieszaninę fal najrozmaitszych, czyli t. zw. zmienne pole elektromagnetyczne. Widmo zaś linjowe powstaje skutkiem prostych drgań harmonicznych elektronów wewnątrz atomu, co pobudza eter do drgania odpowiedniego; oznajmia się ono właściwym prążkiem w widmie.

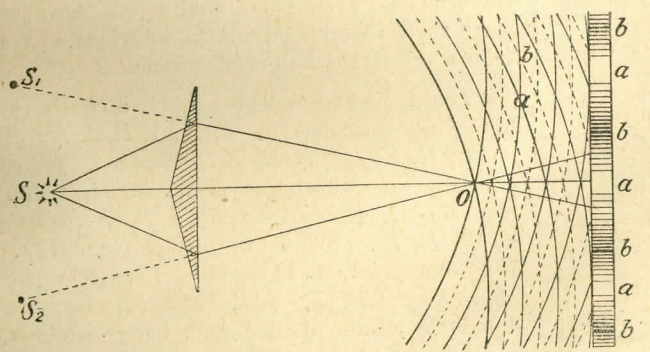
Powyższy pogląd stanowi istotę *elektromagnetycznej teorji światła*, która źródło zmian w eterze, poruszanych w teorji undulacyjnej, przypisuje siłom elektrycznym i magnetycznym. Tak, np. linje widmowe pod działaniem magnesu przesuwają się cokolwiek i rozszerzają, a nawet rozszczepiają, co świadczy o przyśpieszaniu lub zwolnieniu drgań atomowych, bądź o ich rozkładaniu (zjawisko Zeemana 1896).

3. Interferencja światła. Podobnie jak dla fal materjalnych (§ 74, art. 4), *interferencja* światła oznacza składanie ruchów falowych eteru, którego wynikiem jest osłabienie lub zgaszenie drgań w jednych miejscach, a wzmożenie w innych. Światło jednobarwne, np. żółty płomień sodu, daje wskutek interferencji prążki naprzemian ciemne i jasne, światło zaś białe daje smugi tęczowe, jak w widmie pryzmatycznym.

Interferencja stała się punktem wyjścia dla teorji światła falowej czyli undulacyjnej a obaliła dawniejszą teorję emisyjną. Przypuszczana bowiem w dawnej teorji emisja cząstek nieważkich w kierunku promienia nie może w żadnym razie zgasić światła, gdy spotykają się dwa promienie; tymczasem teorja falowa tłumaczy łatwo powstawanie ciemności, choć światło dodaje się do światła.

Warunkiem niezbędnym do interferencji światła jest krzyżowanie się fal pod kątem bardzo ostrym; można to osiągnąć przez załamanie światła, odbicie i uginanie.

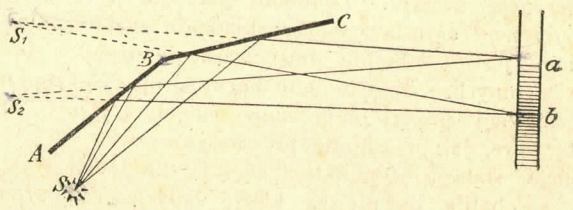
a) Interferencja za pomocą pryzmatu (rys. 526). Promienie jednobarwne z punktu S, przepuszczone przez bardzo rozwarty pryzmat, spotykają się pod kątem O, w rzeczywistości znacznie ostrzejszym, niż można przedstawić rysunkiem. Fale kuliste krzyżują się tak, iż na ekranie powstają smugi jasne w a, a, a, gdzie grzbiety obu fal się spotykają, a ciemne w b, b, b, b, gdzie trafia grzbiet na dolinę fali. Zjawisko odbywa się tak, jak gdyby światło pochodziło z dwu punktów S_1 i S_2.



Rys. 526. Interferencja przy załamaniu światła.

Gdy światło S ma barwę czysto żółtą, na ekranie widać smugi żółte i czarne; gdy barwę czerwoną, smugi są czerwone i czarne, przyczem są szersze, niż smugi żółte; gdy światło S jest fijołkowe, smugi są fijołkowe i czarne, a szerokość ich najmniejsza. Czerwone więc promienie mają największą długość fali, fijołkowe najmniejszą. Stąd w razie białego światła S

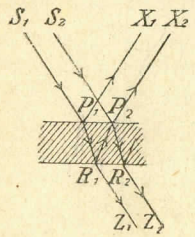
nie powstają smugi białe i czarne, ale kolorowe: pośrodku nakładają się wszystkie barwy, smuga więc jest biała, tylko brzegi ma czerwone, gdzie zachodzi na nią sąsiednia fala; następna jasna smuga ma jeszcze środek biały, a brzegi czerwony i fijołkowy, następne przybierają coraz więcej barw, tak iż występują wreszcie wszystkie barwy widmowe. Otrzymuje się zatym tą drogą *widmo interferencyjne*,



Rys. 527. Interferencja przy odbiciu światła.

b) Interferencja za pomocą luster (Fresnel 1821, rys. 527). Skoro światło S pada przez wąską szczelinę na dwa lustra płaskie, AB i BC, nachylone bardzo mało względem siebie, a ustawione do szczeliny równolegle swą krawędzią łączną B, powstają na ekranie smugi jasne i ciemne, względnie kolorowe, podobnie jak w doświadczeniu rys. 526. Wydaje się, jak gdyby światło pochodziło z punktów S_1 i S_2. Fale światła nakładając się fazami zgodnymi lub przeciwnymi, dają światło lub ciemność; skoro punkt a ekranu przypada w równej odległości od S_1 i S_2, panuje tu jasność; w punkcie b, odległym od S_2 bliżej o $\frac{1}{2}$, $1\frac{1}{2}$, $2\frac{1}{2}$... fali, niż od S_2, panuje zaciemnienie.

4. Barwy cienkich błonek. Gdy światło białe pada na bardzo cienką błonę lub płytkę przezroczystą, promienie odbite od zewnętrznej i wewnętrznej ściany tej płytki interferują z sobą, tak iż ściana mieni się kolorami widma.

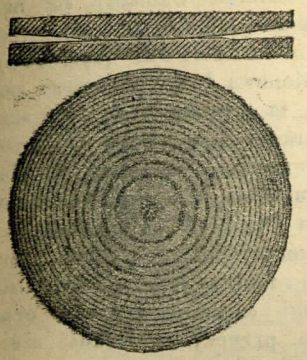


Rys. 528.

Promienie równoległe S_1P_1 i S_2P_2 (rys. 528) odbijają się częściowo po P_1X_1 i P_2X_2, częścią załamują po $P_1R_1Z_1$ i $P_2R_2Z_2$. Zarazem jednak promienie odbijają się wewnątrz płytki w R_1 i R_2. Stąd promień np. R_1P_2 spotyka się z P_2X_2, różniąc się o drogę $P_1R_1P_2$. Skoro ta droga wynosi λ, 2λ, 3λ..., fazy obu promieni są zgodne i światło się wzmacnia; skoro wynosi $\frac{1}{2}\lambda$, $1\frac{1}{2}\lambda$, $2\frac{1}{2}\lambda$..., fazy są przeciwne, i światło gaśnie dla jednej z barw widmowych o długości λ fali; powstaje więc w P_2 barwa dopełniająca. Ponieważ inne promienie padają na płytkę bardziej lub mniej ukośnie, różnice dróg stopniowo wzrastają lub maleją, przez co występują wszystkie barwy widma.

Gdy promienie padają niezbyt ukośnie, można przyjąć $P_1R_1P_2 = 2d$, gdzie d oznacza grubość płytki. Wynika stąd, że płytki muszą być niezmiernie cienkie; są to raczej błonki, o grubości bliskiej do λ, jeśli barwy mają być jaskrawe.

Pierścienie Newtona (rys. 529) dają wybitny przykład na barwy cienkich błonek, a zarazem okazują, jaki wpływ ma grubość błonki. Do płaskiej szyby przykłada się soczewkę płasko wypukłą o bardzo nieznacznej wypukłości. Wtedy w miejscu zetknięcia, czyli pośrodku soczewki widać okrągłą plamę ciemną, dokoła zaś pierścienie o barwach widmowych, coraz węższe ku brzegom, aż do zaniku zupełnego tam, gdzie warstwa powietrza między szkłami jest zbyt gruba. W świetle jednobarwnym czerwonym, pierścienie są naprzemian czarne i czerwone; w świetle fijołkowym pierścienie są czarne i fijołkowe, przyczym ich średnica jest prawie dwa razy mniejsza niż dla światła czerwonego odpowiednio do długości fali. Przy naciskaniu soczewki pierścienie zmieniają postać i szerokość, zdradzając najmniejsze zmiany w grubości błonki powietrznej, która jest ich przyczyną.



Rys. 529.
Pierścienie Newtona.

Przykłady. Tęczowe barwy, jakiemi się mienią bańki mydlane, skazy i rysy w szybach, mika, muszle, metale i szyby zatłuszczone, plamy tłuste na wodzie.

5. Fale stojące (Wiener 1890). Podobnie jak fale materjalne (§§ 74, 75, 80), światło wytwarza przy odbiciu *fale stojące*, skoro promienie padają na lustro prostopadle. Zachodzi tu interferencja fali odbitej z falą padającą, skutkiem czego światło gaśnie w węzłach, gdzie grzbiet fali spotyka się z doliną.

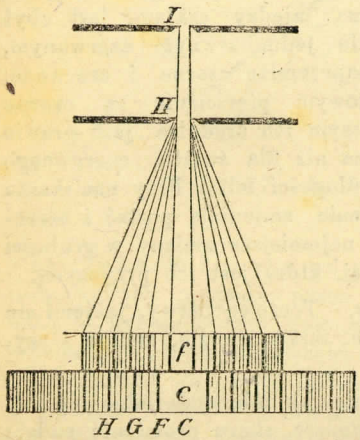
Okazać można fale stojące na drodze fotograficznej, rozpościerając ukośnie błonkę uczuloną, która czernieje od światła, nad blachą lśniącą, tak iż między blachą a błoną pozostaje wąziutka przestrzeń klinowata. Za oświetleniem jednobarwnym w błonie zjawiają się w równych odstępach warstwy jasne i ciemne, które się utrwala za pomocą kąpieli fotograficznych (§ 99).

W podobny sposób zdołano utrwalić barwy w widmie słonecznym (Lippmann 1891). Gdy na błonę uczuloną, rozpostartą na powierzchni rtęci, padną barwy widmowe, po utrwaleniu błona okazuje na tle ciemnym naturalne kolory widma, w przezroczu zaś kolory dopełniające. Fale bowiem stojące sprawiają sczernienie błony we wzdęciach, czyli warstwach odległych o $\frac{1}{2}$ fali odpowiedniej barwy. Skoro białe światło pada następnie na te warstwy, każda z nich odbija tylko barwę o właściwej długości fali; inne barwy giną się przez interferencję, mają bowiem fazy niezgodne. Ostatnio osiągnięto na tej drodze fotografje kolorowe rozmaitych przedmiotów (§ 99).

6. Dyfrakcja czyli **uginanie światła** (Grimaldi 1661). Jak fale wodne (§ 74, art. 6), podobnież światło podlega *uginaniu* się czyli *dyfrakcji*, t. j. promienie uchylają się od pierwotnego kierunku, przechodząc obok krawędzi jakiejkolwiek zasłony, np. poza węgłem ściany, prętem nieprzezroczystym, szparą we drzwiach. Powstają stąd zjawiska interferencji: ciemne i jasne prążki albo barwy widmowe.

Teorja uginania należy do ogólnych zasad ruchu falowego (§ 76, art. 10); tutaj rozpatrujemy tylko objawy uginania, dotyczące światła. Uginanie stanowi poważny dowód przeciw teorji emisyjnej światła, tłumaczy się natomiast łatwo teorją falową, według zasady Huyghensa (§ 76, art. 6).

a) Uginanie światła poza wąskim otworem (rys. 530). Niech światło słoneczne wpada przez szczelinę pionową I do ciemnego pokoju i dalej trafia równoległą szczelinę II. Gdy ta ostatnia jest dość szeroka, widać na ekranie jasną smugę C wprost szczeliny. Za zwężeniem szczeliny II zjawiają się z obu stron C smugi kolorowe, coraz słabsze ku brzegom. Przy zasłonięciu szczeliny w górnej połowie szkłem czerwonym, w dolnej fijołkowym, zjawiają się odpowiednio smugi czerwone i czarne oraz fijołkowe i czarne, przyczym szerokość czerwonych jest prawie dwa razy większa, niż fijołkowych. Bliższe objaśnienie prążków interferencji dają rys. 401 i 402, których litery odpowiadają rys. 530.

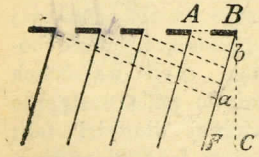


Rys. 530. Uginanie światła.

Zamiast na ekran można wpuścić światło dyfrakcyjne wprost do oka, stanąwszy tak, aby oko przypadło w C; wtedy widać szczelinę I jakby znacznie rozszerzoną i prążkowaną. Nawet patrząc wprost na płomień lub niebo przez palce złożone, aby tworzyły wąską szparę, widać słabe prążki dyfrakcyjne.

b) Uginanie światła poza wąską zasłoną. Skoro światło słoneczne, wpadające szczeliną do ciemnego pokoju, spotyka drut równoległy do szczeliny, na ekranie poza drutem ukazuje się szereg prążków jasnych i ciemnych.

Siatka dyfrakcyjna stanowi teoretycznie szereg niezmiernie wąskich szpar i zasłon, dzięki czemu uginanie światła wywołuje interferencję daleko jaskrawszą, niż przy użyciu jednej szczeliny. Zasadę jej i przebieg światła objaśnia rys. 531. W wykonaniu praktycznym składa się z małej szyby albo lusterka o powierzchni zrysowanej dyjamentem tak cienko i gęsto, że na każdy mm przypada przeszło 1000 kresek. Tą drogą w świetle przepuszczonym lub odbitym, zależnie od tego, czy siatka jest szklana lub zwierciadlana, otrzymuje się *widmo dyfrakcyjne*, nader rozległe, a przytym *normalne*: wszystkie barwy tworzą smugi równomierne, odpowiednio do długości fali, gdy tymczasem w widmie pryzmatycznym część fijołkowa i dalsze są nadto rozciągnięte, bo rozszczepienie wzrasta przy coraz większym kącie padania tych promieni.



Rys. 531.

Przykłady. Smugi promieniste, jasne i ciemne, poza drzwiami uchylonymi, przez które wpada jaskrawe światło do ciemnego pokoju. — Obwódka barwna dokoła latarni, której światło widzimy przez mgłę. — Kręgi barwne około słońca i księżyca. — Zabarwienie płomienia, gdy nań patrzymy po przez rzęsy, chorągiewkę pióra, albo przez szybę zapotniałą.

7. Długość fal światła oznacza się najdokładniej za pomocą dyfrakcji, podług § 76, art 11. Należy tylko oznaczyć kąt ugięcia α (rys. 401 i 531) oraz szerokość szczeliny AB czyli odstęp dwu odpowiednich miejsc w siatce dyfrakcyjnej; wtedy

$$\lambda = AB \cdot \sin \alpha.$$

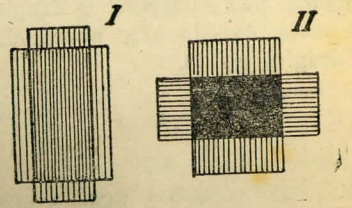
Zamiast sin α można wziąć z wielkim przybliżeniem CF/CY (rys. 401), zmierzywszy odstęp pierwszego ciemnego prążka od środka widma, oraz odstęp od szczeliny do widma.

O dokładności tej metody świadczą pomiary długości fali np. dla żółtego światła sodu, t. j. linji D, dokonane przez rozmaitych fizyków: otrzymano liczby od 0,58958 do 0,58962 μ, różniące się zaledwie o 0,00004 mikrona.

8. Polaryzacja światła. Promień światła po odbiciu lub załamaniu nabiera w pewnych warunkach szczególnej własności, że nie może się ponownie odbijać lub załamywać, ale gaśnie. Zjawisko to zowie się *polaryzacją*, promień zowie się *spolaryzowanym*.

Tak np. promień, padający na szybę pod kątem 57°, skoro po odbiciu od niej pada na drugą szybę pod takim samym kątem, nie odbija się wcale, gdy obie płaszczyzny padania są wzajemnie prostopadłe. Promień, przechodzący przez odpowiednio wyciętą płytkę turmalinu lub spatu islandzkiego, nie przechodzi przez drugą taką płytkę, wpoprzek położoną; zatym dwa ciała przezroczyste dają razem ciemność.

Najprościej okazuje się zjawisko polaryzacji za pomocą turmalinu. Minerał ten krystalizuje w postaci graniastosłupa sześciokątnego, posiada bladą barwę zielonawą; wycina się zeń płytki równolegle do osi graniastosłupa. Płytki takie, złożone z sobą zgodnie, t. j. gdy ich osi mają kierunek równoległy, są przezroczyste (rys. 532 - I); skrzyżowane natomiast, t. j. gdy osi są do siebie prostopadłe, płytki nie przepuszczają światła zupełnie (rys. 532 - II).

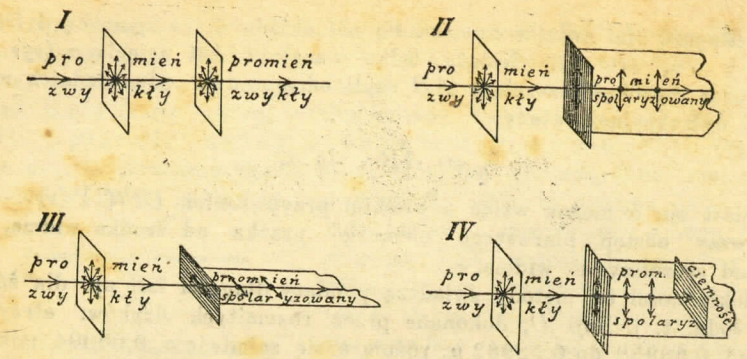


Rys. 532.
Polaryzacja w turmalinie.

Należy więc przypuścić w turmalinie taki układ cząstek, że przenikają go drgania eteru tylko w jednym kierunku, mianowicie równolegle do osi (na rycinie w kierunku kresek). Gdy druga płytka leży na pierwszej zgodnie, drgania odbywają się w niej dalej; gdy leży poprzecznie, wstrzymuje drgania, jak gdyby była nieprzezroczystą.

Polaryzacja światła dowodzi, że fale świetlne są poprzeczne.

W fali podłużnej cząstki drgają tylko w kierunku biegu fali; trafiając więc ciała przepuszczalne, drgania postępują wciąż po tej samej linji prostej, po której biegnie fala, podobnież idą dalej przez drugie takież ciało, chociażby wpoprzek ustawione; polaryzacji więc być nie może, np. dla fal głównych (jedynie pewne osłabienie drgań skutkiem niedoskonałej przepuszczalności ciała).



Rys. 533. Objaśnienie polaryzacji światła.

Inaczej się przedstawia przebieg fali poprzecznej. Na rys. 533-I promień światła przechodzi prostopadle przez 2 szyby, przyczym cząstki eteru drgają w każdej szybie, jak w powietrzu, we wszystkich kierunkach, byleby prostopadłych do promienia. W części II rysunku światło po przejściu szyby spotyka płytkę materji polaryzującej, np. turmalinu, gdzie cząstki eteru mogą drgać tylko w jednym kierunku, np. w płaszczyźnie naszej ryciny. Przy obróceniu płytki o 90°, jak w III, przechodzą tylko drgania prostopadłe do płaszczyzny ryciny. Przy ustawieniu zaś płytek polaryzujących w ten sposób, aby światło spotykało je kolejno, w położeniu skrzyżowanym, jak w IV, drgania pod działaniem drugiej płytki zanikają, tak iż poza nią panuje ciemność; światło więc przechodzi przez szybę i pierwszą płytkę turmalinu, w drugiej gaśnie.

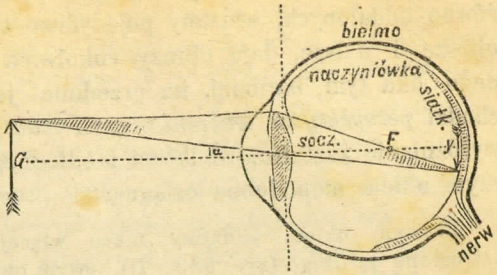
E) NARZĘDZIA OPTYCZNE.

§ 98. O k o.

1. Główne części oka (rys. 534). Oko ludzkie ma postać kuli, zwanej *gałką oczną*, o średnicy około $2\frac{1}{2}$ cm. Pod zewnętrzną, twardą powłoką, zwaną *białkiem* albo *bielmem*, mieści się błona nieprzezroczysta, *naczyniówka*, zawierająca splot naczyń krwionośnych. Wewnętrzną zaś powłokę oka, mianowicie na dnie oka, stanowi *siatkówka*, splot nerwów wzrokowych; najczulszą jej część, gdzie pada środek obrazu, stanowi t. zw. p l a m a ż ó ł t a.

Przednia część powłoki rogowej jest bardziej wypukła, przezroczysta i zowie się *rogówką*. Przednia część naczyniówki tworzy krążek różnobarwny, *tęczówkę* (iris), z otworem pośrodku, *źrenicą*.

Za źrenicą znajduje się *soczewka oczna*, ciało przezroczyste, silnie łamiące światło, złożone z warstw spółśrodkowych. Wnętrze oka jest mniej lub więcej płynne, przyczym między rogówką a soczewką jest t. zw. płyn wodnisty, w pozostałej części oka t. zw. płyn szklisty.



Rys. 534.

2. Sprawa widzenia. Rogówka, płyny oczne, a głównie soczewka załamuje światło, tak iż na siatkówce powstaje zmniejszony i odwrócony obraz przedmiotów, na jakie patrzymy.

J a s n o ś ć obrazu zależy od wielkości źrenicy, która się zmienia dzięki włóknom mięśniowym, zawartym w tęczówce.

W i e l k o ś ć obrazu zależy od *kąta widzenia* czyli kąta między promieniami stycznymi do przedmiotu, schodzącymi się w źrenicy. Im większy jest przedmiot i bliższy, tym znaczniejszy jest kąt widzenia, zatym więcej widzimy szczegółów przedmiotu.

Niech promień styczny przedmiotu G (rys. 534) zamyka kąt α z osią soczewki ocznej; jest to kąt widzenia dla części przedmiotu z tej strony osi. Z proporcji $y : G = f : d$ (§ 94) wypada

$$\text{wielkość obrazu } y = \frac{G}{d} \cdot f = f \operatorname{tg} \alpha.$$

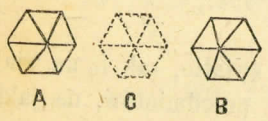
Zatym obraz ma wielkość proporcjonalną wprost do wielkości przedmiotu, a odwrotnie do odległości. Widzimy przedmiot czyli oceniamy jego postać wtedy tylko, gdy jego obraz pokrywa przynajmniej kilka końcówek nerwów na siatkówce; ma to miejsce, gdy kąt widzenia $\alpha > \frac{1}{2}$ minuty, przy jasnym oświetleniu.

Obrazy przedmiotów na siatkówce są odwrócone, zmniejszone i rzeczywiste. Pomimo odwrotności obrazu widzimy przedmiot w postawie naturalnej; od dzieciństwa bowiem przywykliśmy za pomocą dotyku odnosić położenie przedmiotu do miejsca, skąd pochodzą promienie, a przez to w i d z i m y w k i e r u n k u p r o m i e n i ś w i a t ł a, w p a d a j ą c y c h d o o k a.

W i d z e n i e p o j e d y ń c z e dwojgiem oczu objaśnia się odpowiednim skierowaniem osi ocznych na dany punkt, tak iż jego obraz w każdym oku pada na odpowiadające sobie miejsca siatkówki. W razie np. przesunięcia oka lewego tak, aby przypadło na miejscu prawego, obrazy punktów nakryłyby się, czyli zlałyby się w jeden obraz.

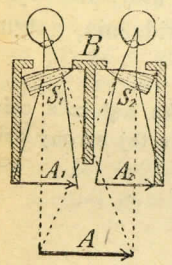
Patrząc jednak na przedmiot wypukły lub szereg przedmiotów nierówno oddalonych, widzimy pojedyńczo tylko jedno miejsce, inne zaś, bliższe i dalsze, dają obrazy cokolwiek przesunięte, odmienne dla każdego oka tym bardziej, im przedmiot jest bliższy i większy. Stąd pochodzi *perspektywa widzenia*, czyli *widzenie plastyczne* dwojgiem oczu: wyróżnianie kształtu, wielkości i odległości przedmiotów, czego pojedyńczym okiem niepodobna osiągnąć.

Prawym okiem widzimy nieco więcej prawej strony przedmiotu, np. ostrosłupa prostego (rys. 535 - B), lewym okiem nieco więcej lewej strony (A); dwojgiem oczu widzimy obie strony jednakowo, a przytym mamy wrażenie, wypukłości. Podobne wrażenie można osiągnąć, narysowawszy ostrosłup tak, jak się przedstawia każdemu oku osobno, i patrząc dwojgiem oczu na te rysunki, położone obok siebie i zasłoniętych tak, aby każde oko widziało jeden tylko rysunek odnośny.



Rys. 535.

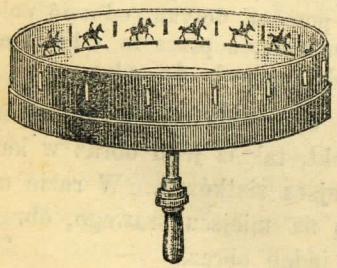
Stereoskop (Wheatstone 1838, rys. 536) służy do plastycznego widzenia fotografji. Fotografje A_1 i A_2 tego samego przedmiotu zdjęto z dwu punktów obok siebie położonych w odstępie takim, jak źrenice oczu, t. j. 7 do 8 cm; fotografje te umieszczone na dnie pudełka, ogląda się przez połówki soczewek S_1 i S_2. Powstają obrazy powiększone, które zlewają się w jeden obraz A, wskutek właściwego nachylenia soczewek, gdyż działają one zarazem jako pryzmaty. Przegroda B sprawia, że każde oko widzi jeden tylko właściwy obraz. W ten sposób odbiera się łudzące wrażenie odległości i wypukłości przedmiotów, jak w naturze.



Rys. 536. Stereoskop.

3. Trwałość wrażeń świetlnych. Ażeby przedmiot był widoczny, musi jego obraz trwać przez czas pewien, tym krótszy, im mocniej przedmiot jest oświetlony. Nawzajem, po zniknięciu obrazu, jego wrażenie trwa jeszcze przez chwilę, wynoszącą średnio od $\frac{1}{8}$ do $\frac{1}{10}$ sekundy.

Przykłady. Kuli wystrzelonej nie widzimy, natomiast można widzieć głownię wystrzeloną. — Szprychy koła wirującego zacierają się dla oka przy zwykłym świetle dziennym, ukazują się zaś wyraźnie w oświetleniu błyskawicy, nadzwyczaj jaskrawym, a krótkim.— Węgiel rozżarzony robi wrażenie koła, skoro go szybko obracamy. — Koła samochodu pędzącego wydają się pełne (masywne). — Struna drgająca wydaje się w środku jakby wydęta.


Rys. 537. Stroboskop.

Zastosowanie. *Stroboskop* Anschütza (rys. 537) jest przyrządem, dającym ruchliwe obrazy przedmiotów, z których zdjęto fotografje nadzwyczaj szybkie w kolejnych położeniach. Zdjęcia te są

umieszczone na ścianie walca, tak iż patrząc przez szparki, widać przez każdą z nich jedno położenie przedmiotu. Za obrotem walca widzimy coraz inne położenia, tak szybko po sobie następujące, że robią wrażenie ruchu naturalnego. — Podobne obrazy w powiększeniu na ekranie daje *kinematograf*.

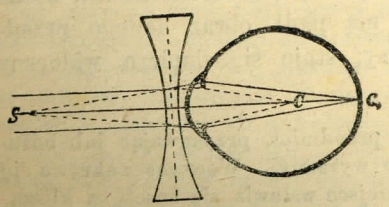
4. Akomodacja czyli **nastawność** oka na rozmaite odległości pozwala widzieć zarówno bliskie, jak dalekie przedmioty.

Soczewka oczna pod wpływem mięśni może się kurczyć, stając się mniej lub więcej wypukłą, w miarę odległości przedmiotów, tak iż obraz przypada zawsze na siatkówce. Mianowicie, skoro patrzymy na przedmiot bliski, obraz jego, przy niezmiennej soczewce, utworzyłby się za siatkówką; ażeby wypadł na siatkówce, soczewka musi zbierać silniej, staje się więc wypuklejszą. Przy patrzeniu w dal soczewka przybiera postać mniej wypukłą.

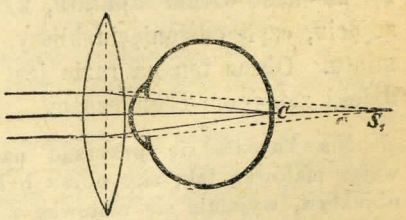
Zdolność akomodacji jest ograniczona: dla oka normalnego punkt bliski, t. j. najbliższa odległość widzenia wynosi około 10 cm, punkt daleki, t. j. najdalsza odległość widzenia leży w nieskończoności. Przy skupieniu wzroku na punkt bliski akomodacja jest najsilniejsza; przy patrzeniu na punkt daleki niema wcale akomodacji. Dla każdego oka istnieje *odległość najdokładniejszego widzenia*, która dla oka normalnego wynosi około 25 cm.

Oko *krótkowzroczne* widzi dokładnie z odległości bliższej, niż 25 cm; punkt daleki znajduje się blisko oka, promienie zaś, idące z nieskończoności, czyli równoległe, zbierają się przed siatkówką (w C, rys. 538), a to wskutek wydłużenia gałki ocznej. Krótkowidz zatym widzi wyraźnie przedmioty bardzo bliskie, o kilka lub kilkanaście cm; ażeby uzyskać zdolność normalnego widzenia, czyli odsunąć obraz aż do siatkówki (C_1), musi patrzeć przez szkło rozpraszające.

Oko *dalekowzroczne* widzi dokładnie z odległości większej, niż 25 cm, promienie zaś równoległe skupia bez akomodacji za siatkówką (w S_1, rys. 539), a to wskutek spłaszczenia gałki ocznej. Dalekowidz przeto widzi wyraźnie przedmioty oddalone przynajmniej na kilkadziesiąt cm, nie może więc czytać pisma drobnego, które w takiej odległości daje zbyt mały kąt widzenia. Ażeby widzieć normalnie, czyli sprowadzić obraz aż do siatkówki (C), musi patrzeć przez szkło zbierające.



Rys. 538. Krótkowzroczność.



Rys. 539. Dalekowzroczność.

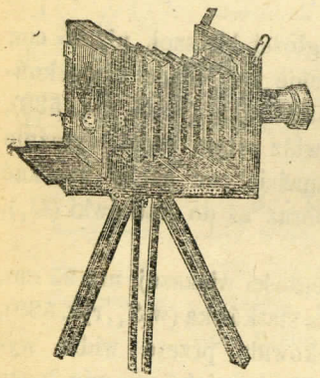
Okulary. Numery szkieł do okularów oznaczają dioptrje (§ 94), czyli odwrotności ogniskowej w metrach, albo jak w naszym handlu optycznym, podają wartość ogniskowej w calach angielskich. Soczewka o 1 m ogniskowej ma 1 dioptrję.

Jeżeli dla krótkowidza odległość punktu dalekiego wynosi 20 cm $= \frac{1}{5}$ m, używa on soczewki rozpraszającej — 5 *D*. Promienie bowiem równoległe stają się przez to rozbieżnymi, jak gdyby wychodziły z punktu dalekiego *S* (rys. 538), czyli z odległości 20 cm. Odpowiada to numerowi 8 szkła wklęsłego, gdyż 20 cm = 8 cali.

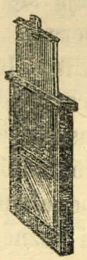
Dla dalekowidza odległość punktu dalekiego jest ujemną, t. j. leży poza okiem, np. o 20 cm $= \frac{1}{5}$ m (w S_1, rys. 539); w takim razie używa soczewki zbierającej 5 *D*, która sama skupiłaby promienie równoległe w punkcie S_1, a przy dalszym załamaniu w oku, bez akomodacji, promienie schodzą się na siatkówce w *C*.

§ 99. Fotografja.

1. Aparat fotograficzny (rys 540) składa się z *kamery* czyli pudła zwykle rozsuwanego, posiadającego w przedniej ścianie soczewkę zbierającą albo układ soczewek, czyli *objektyw*, w tylnej szybę matową czyli *matówkę*. Rozsuwanie kamery odbywa się zwykle przy użyciu *miecha*. Na matówce ogląda się obraz, utworzony działaniem objektywu; do fotografowania zastępuje się matówkę *kliszą*, zawartą w *kasecie* (rys. 541).



Rss. 540.
Aparat forograficzny.



Rys. 541
Kaseta.

Przedmioty fotografowane znajdują się powszechnie dość daleko od aparatu, t. j. poza podwójną odległością ogniska; objektyw zatym daje obrazy rzeczywiste, zmniejszone i odwrócone.

2. Czynności fizyczne przy fotografowaniu polegają: 1) na nastawieniu aparatu, 2) założeniu kliszy zamiast matówki, 3) na zdjęciu, czyli odsłonięciu kliszy, aby na nią padł obraz danego przedmiotu. Obraz ten na razie jest u t a j o n y; staje się dopiero widoczny dzięki zabiegom chemicznym.

N a s t a w i a się przyrząd na żądany przedmiot, przysuwając lub odsuwając matówkę tak, aby obraz był zupełnie wyraźny. Wówczas nakrywa się objektyw, wyjmuje się matówkę i na jej miejsce wstawia się kasetę z kliszą, t. j. płytą wrażliwą na światło. Przed samym zdjęciem otwiera się od w e w n ą t r z kasetę, odsłaniając przez to powierzchnię kliszy wewnątrz kamery.

Z d j ę c i a czyli e k s p o z y c j i dokonywa się bądź przez otwarcie ręką pokrywki objektywu, bądź za pomocą *migawki*, t. j. mechanizmu otwierającego, za naciśnięciem piłki lub sprężyny.

Czas trwania zdjęcia stanowi jeden z najważniejszych warunków dobrego fotografowania; utrafienie jego wymaga studjów praktycznych. W dzień jasny, pod gołym niebem, zdjęcie trwa drobną część sekundy, tak iż umożliwia pochwycenie na obrazie najszybszych ruchów, np. skok konia, pociąg w biegu; we wnętrzu budynków wypada nieraz eksponować parę minut i dłużej.

3. Czynności chemiczne polegają: 1) na wywołaniu obrazu na kliszy, 2) utrwaleniu obrazu, czyli otrzymaniu *negatywu*, z którego następnie można otrzymać dowolną ilość odbitek, czyli *fotografji*.

Klisze składają się zwykle z szyb, powleczonych żółtawo białą emulsją z żelatyny i bromku srebra (*Ag Br*); stąd nazwa *klisze bromo-żelatynowe*. Od działania światła, a właściwie zawartych w nim promieni chemicznych, klisza czernieje, ponieważ bromek srebra się rozkłada, przyczym brom zostaje pochłonięty, a srebro osiada w postaci subtelnego pyłu, barwy szaro-czarnej. Taki jednak rozkład zupełny wymagałby czasu zbyt długiego. Czas ten można skrócić znakomicie przez zastosowanie środków chemicznych.

Przy krótkim działaniu światła, jakie ma miejsce w czasie zdjęcia, powstający na kliszy o b r a z u t a j o n y zawiera bromek srebra tylko częściowo rozłożony, tak iż nie zmienia swej białej barwy.

W y w o ł a n i e obrazu, t. j. uwidocznienie jego na kliszy polega na zanurzeniu kliszy do płynu, zwanego w y w o ł y w a c z e m, który wydziela metaliczne srebro w miejscach naświetlonych; stąd obraz czernieje. Działanie więc wywoływacza uzupełnia, rzec można, działanie światła: dokonywa rozkładu tam, gdzie światło go zaczęło. Wywoływanie odbywa się przy świetle czerwonym, jako nie zawierającym promieni chemicznych (§ 95).

Istota wywoływania polega na zawiłych procesach elektrochemicznych; zasadniczo można ją objaśnić na drodze czysto chemicznej (Eder), przypuszczając, że bromek srebra w czasie zdjęcia rozkłada się na podbromek srebra i brom: $2\ Ag\ Br = Ag_2\ Br + Br$. Podbromek srebra, również biały jak bromek, stanowi obraz niewidoczny; uwolniony zaś brom pochłania żelatyna.

Przy wywołaniu redukuje się tylko podbromek srebra, wydzielając metaliczne srebro, bromek srebra zaś pozostaje bez zmiany: $Ag_2\ Br = 2\ Ag + Br$.

U t r w a l e n i e obrazu ma na celu usunięcie czułego na światło bromku srebra, jaki pozostał w miejscach nieoświetlonych, Kliszę wywołaną zanurza się do płynu, zwanego u t r w a l a c z e m czyli f i k s a ż e m; jest to roztwór t. zw. natronu czyli tiosiarczanu sodu ($Na_2\ S_2\ O_3$), który rozpuszcza bromek srebra, nie zmienia zaś srebra metalicznego w obrazie. W ten sposób klisza pozbywa się swej mlecznej barwy i zawiera już tylko materje nieczułe na światło. Chemicznie tłumaczy się utrwalenie w ten sposób, że srebro tworzy z natronem sól podwójną, łatwo rozpuszczalną w wodzie: $Ag\ Br + Na_2\ S_2\ O_3 = Na\ Ag\ S_2\ O_3 + Na\ Br$. Tak wywołana i utrwalona klisza daje *negatyw* czyli obraz ujemny, gdyż stosunek świateł i cieniów jest na obrazie przeciwny, niż w naturze: miejsca w rzeczywistości jasne, np. niebo, mury, twarze, są na obrazie ciemne, i nawzajem (dlaczego?).

Kopjowanie służy do otrzymania z negatywu odbitek dodatnich, *pozytywów*, czyli właściwych fotografji, zwykle na papierze, powleczonym czułą emulsją z chlorku srebra. Pod negatyw podkłada się papier naczulony i wystawia na światło; papier czernieje pod tymi miejscami negatywu, które są przezroczyste, zatym w naturze ciemne, tak iż otrzymuje się wizerunek zgodny z rzeczywistością.

Odbitkę skopjowaną trzeba także utrwalić, aby usunąć pozostały w papierze, a czuły na światło chlorek srebra; dokonywa się tego w roztworze natronu, jak z kliszą. Wreszcie odbitka podlega jeszcze tonowaniu, t. j. moczeniu w roztworach złota lub platyny, ażeby nabrała pożądanego tonu czyli odcienia, barwy brunatnej, stalowej, czarnej i t. p. Niedokładności na kliszy i papierze zaprawia się ręcznie przez retuszowanie, mianowicie na portretach.

4. Nowsze zastosowania fotografji. Do niektórych celów, np. do obrazów na ekranie, rzucanych z latarni projekcyjnej (§ 100), negatywy kopjuje się nie na papierze, lecz na szkle, powleczonym czułą emulsją, chloro-srebrną lub bromo-srebrną; takie przezroczyste odbitki noszą miano *djapozytywów* czyli *przezroczy*.

Do kinematografów zarówno negatywy, jak odbitki robi się na błonach celuloidowych czyli *filmach*, które dają się zwijać w rulony. Obecnie rozwinął się cały przemysł wyrobu przezroczy i filmów.

Fotografja znajduje też obszerne zastosowanie do mikroskopu i lunet astronomicznych (mikrofotografja i astrofotografja).

5. Fotografja kolorowa (Lippmann 1891). Fotografowanie przedmiotów bezpośrednio w barwach naturalnych polega na wytworzeniu fal stojących (§ 97) i utrwaleniu ich na kliszy. Warstwa bromo-srebrna, rozpostarta na powierzchni lustrzanej, przy fotografowaniu staje się środowiskiem dla fal stojących: w węzłach niema działania chemicznego, w międzywęźlach osiadają warstewki srebra, w odstępach odpowiednich do fal każdej barwy. Przy oglądaniu więc takiej kliszy w świetle białym zachodzi interferencja cienkich błonek (pt.) i ukazują się barwy naturalne. Wadę tej metody stanowi niemożność otrzymania odbitek.

Inny rodzaj fotografji kolorowej polega na naśladowaniu barw naturalnych, czyli otrzymaniu barw pośrednio, przez połączenie *trzech barw zasadniczych*: czerwonej, zielonej i niebiesko-fijołkowej. Odpowiada to teorji Younga i Helmholtza, że siatkówka oka zawiera trojakie elementy nerwowe, wrażliwe na powyższe barwy. W wykonaniu praktycznym istnieją dwa sposoby. a) Podług Yvesa, przez 3 filtry świetlne, t. j. szkła zabarwione czerwono, zielono i fijołkowo, robi się osobne zdjęcia na kliszach odpowiednio naczulonych na te barwy, czyli ortochromatycznych, poczym robi się z nich odbitki na błonach celuloidowych tej samej barwy, wreszcie skleja się te 3 błony, tak iż obrazy zlewają się w jeden, a barwy się nakładają. b) Nowsza metoda Lumière'a posługuje się jedną tylko kliszą bromo-srebrną, zawierającą jednocześnie filtr trójbarwny, złożony z mikroskopijnych ziarnek mączki (do 3000 na 1 mm²), czerwonych, zielonych i fijołkowych, zmieszanych z sobą jednostajnie.

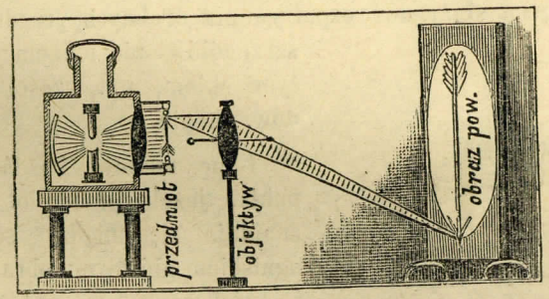
6. Wzmianka historyczna. Daguerre (1838) otrzymał pierwszy wizerunek fotograficzny na blasze srebrnej, pokrytej jodkiem srebra (dagerotypy).— Talbot (1839) wprowadził papier chloro-srebrny. — Archer i Fry (1851) wprowadzili klisze kolodjonowe, Maddox (1881) klisze bromo-żelatynowe obecne, które znakomicie uprzystępniły fotografję.

§ 100. Narzędzia powiększające.

1. Latarnia projekcyjna, zwana dawniej **magiczną** lub **czarnoksięską** (rys. 542), służy do ukazywania na ekranie powiększonego obrazu małych przedmiotów, jako to fotografji na szkle czyli przezroczy, preparatów mikroskopowych, przyrządów fizycznych, zdjęć kinematograficznych.

Składa się z urządzenia oświetlającego i soczewki wypukłej, lub systemu soczewek. Przedmiot silnie oświetlony i umieszczony za ogniskiem głównym soczewki (między F i $2F$), daje obraz rzeczywisty, odwrotny i zwiększony. Ażeby mieć na ekranie obraz prosty, wstawia się przezrocza do latarni w położeniu odwrotnym.

Część oświetlająca latarni zawiera silne źródło światła, umieszczone w ognisku *kondensatora* czyli soczewki oświetlającej, tak aby promienie, skupione przez tę ostatnią, padły wszystkie na objektyw. Promienie te oświetlają przedmiot, ustawiony tuż za kondensatorem.



Rys. 541. Latarnia projekcyjna.

Najlepszym światłem do latarni jest elektryczne łukowe, jako najbardziej jaskrawe, t. j. mające znaczną emisję (§ 84, art. 6); słabsze i mniej dogodne jest światło Drumonda, czyli światło wapna, rozżarzonego do białości w płomieniu wodoro-tlenowym. Najmniej nadają się lampy gazo-żarowe, mają bowiem zbyt wielką powierzchnię świecącą (koszulkę), z której do obrazu wchodzą tylko promienie środkowe; lampy spirytusowo-żarowe, o znacznym ciśnieniu, oraz lampy acetylenowe (karbidowe) stanowią obecnie najpospolitszy środek oświetlenia latarni, gdzie brak światła elektrycznego. Do słabszych lamp stosuje się często w latarni jeszcze reflektor, mianowicie blaszane lustro wklęsłe (pt. rys. 541).

Powiększenie latarni jest tym silniejsze, im większy odstęp (f) dzieli ją od ekranu i im krótsze ognisko (F) ma objektyw.

Wynika to mianowicie ze wzoru

$$\frac{1}{f} + \frac{1}{d} = \frac{1}{F} \qquad \text{czyli} \quad \frac{1}{d} = \frac{1}{F} - \frac{1}{f},$$

Powiększenie wyraża stosunek odległości ekranu i przedmiotu f/d, jako równy stosunkowi obrazu do przedmiotu (g/G, § 94). Z pomnożenia przez f ostatniego równania wynika

$$\text{powiększenie} \quad \left(\frac{f}{d}\right) = \frac{f}{F} - 1.$$

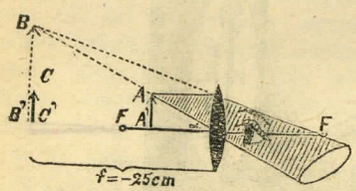
Przy znacznym powiększeniu można pominąć jednostkę, tak iż powiększenie wyraża stosunek odległości ekranu do ogniska:

$$\text{powiększenie} \quad \left(\frac{f}{d}\right) = \frac{f}{F}.$$

Przykłady. 1) Gdy ekran stoi o 2 m, latarnia o ogniskowej 40 cm powiększa $(200 : 40) - 1 = 4$ razy, o ogniskowej 25 cm powiększa $(200 : 25) - 1 = 7$ razy.

2) Przy odległości 6 m, a ogniskowej objektywu 15 cm, powiększenie wynosi w przybliżeniu $600 : 15 = 40$ razy.

2. Lupa czyli **szkło powiększające**, zwane dawniej mikroskopem pojedyńczym, służy do rozpatrywania drobnych przedmiotów, których szczegółów nie możemy rozpoznać gołym okiem, np. części kwiatów, owadów, tkanin.



Rys. 542. Lupa.

Lupę stanowi każda soczewka wypukła, jeżeli przedmiot rozpatrywany znajduje się między soczewką a jej ogniskiem głównym; obraz daje urojony i zwiększony, w położeniu prostym (rys. 542).

Powiększenie lupy zależy od jej ogniska; im krótsze jest ognisko, tym silniejsze powiększenie.

W praktyce powiększenie lupy wynosi zwykle kilka do kilkunastu razy, nie przenosi zaś nigdy 100 razy, z powodu aberacji, jaką trudno usunąć w silniejszych powiększeniach.

Na rys. 536 odległość obrazu $f = 25$ cm jest odległością najdokładniejszego widzenia. Ponieważ f jest ujemne (obraz urojony), wzór przybiera postać

$$\frac{1}{d} - \frac{1}{f} = \frac{1}{F} \qquad \text{czyli} \quad \frac{1}{d} = \frac{1}{F} + \frac{1}{f} = \frac{1}{F} + \frac{1}{25}.$$

Powiększenie jest stosunkiem $\frac{25}{d}$; z pomnożenia przez ostatniego równania przez 25 wynika

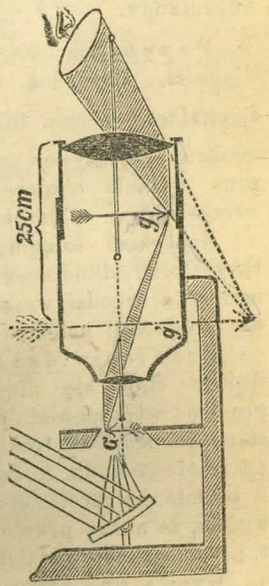
$$\text{powiększenie} \quad \left(\frac{25}{d}\right) = \frac{25}{F} + 1.$$

Przy powiększeniach silniejszych można jednostkę pominąć, tak iż powiększenie wyraża się stosunkiem odległości wyraźnego widzenia do ogniska:

$$\text{powiększenie} \quad \left(\frac{25}{d}\right) = \frac{25}{F}.$$

Dla krótkowidzów lupa powiększa mniej, dla dalekowidzów więcej, gdyż pierwsi mają $f < 25$ cm, ostatni $f > 25$ cm.

3. Mikroskop (drobnowidz), zwany dawniej złożonym (rys. 544), służy do rozpatrywania przedmiotów nadzwyczaj drobnych, niewidocznych dla gołego oka. Używa się zwykle tam, gdzie powiększenie lupy nie wystarcza, np. ukazuje budowę tkanek roślinnych i zwierzęcych, komórek, skał zeszlifowanych, metalów, zarazki chorobotwórcze.



Rys. 543. Mikroskop.

Narzędzie to jest jakby połączeniem przyrządu projekcyjnego i lupy. Składa się z dwu części zasadniczych, *objektywu* czyli szkła przedmiotowego i *okularu* czyli szkła ocznego.

Objektyw jest soczewką wypukłą (układem soczewek) o bardzo bliskim ognisku. Przedmiot, czyli *preparat* G mieści się tuż poza ogniskiem, stąd powstaje obraz rzeczywisty, powiększony i odwrotny (g).

Okular jest lupą o krótkiej odległości ogniskowej; mieści się w takim odstępie od objektywu, aby obraz pierwszy (g) przypadł między ogniskiem a soczewką okularu. Stąd tworzy się obraz ostateczny (g'), urojony i powiększony powtórnie; obraz ten ma położenie odwrotne względem przedmiotu (G).

Oświetlenie preparatu uskutecznia się za pomocą lusterka wklęsłego, umieszczonego pod stolikiem mikroskopu, tak iż promienie skupione idą przez otwór w stoliku i prześwietlają przedmiot nawskroś. Mikroskop więc pozwala na rozpatrywanie przedmiotów tylko przezroczystych lub przeświecających.

Oznaczając ognisko główne objektywu przez F_1 i przyjąwszy w przybliżeniu odległość preparatu $d = F_1$, zaś odległość obrazu $f = l$, t. j. długości mikroskopu, otrzymamy:

$$\text{pierwsze powiększenie } \left(\frac{g}{G}\right) = \frac{f}{d} = \frac{l}{F_1} = \frac{\text{długość mikr.}}{\text{ognisko obj.}}$$

Ze wzoru na lupę wynika

$$\text{drugie powiększenie } \left(\frac{g'}{g}\right) = \frac{25}{F_2}.$$

Powiększenie ogólne mikroskopu jest iloczynem obu powiększeń *):

$$\text{powiększenie ogólne } \left(\frac{G}{g'}\right) = \frac{g'}{g} \cdot \frac{g}{G} = \frac{l \cdot 25}{F_1 \cdot F_2}.$$

Silne więc powiększenia można osiągnąć przez dobranie objektywu i okularu o krótkich odległościach ogniskowych, oraz przez długi wyciąg rury mikroskopu.

Przykład. Zwykle używane mikroskopy mają rurę (tubus) 170 mm długości, wyciąganą do 250 mm. Przy objektywie o ogniskowej 6 mm i okularze o ogn. 50 mm, powiększenie wynosi $\frac{170 \cdot 250}{6 \cdot 50} = \text{okr. } 140$. Przy zmianie objektywu na mniejszy, o ogn. 1,5 mm, powiększ. = 560; dalej przy zmianie okularu na mniejszy, o ogn. 20 mm, powiększeuie = 1400; wreszcie przy całym wyciągu rury = 250 mm, powiększenie = okr. 2100.

Najwyższe osiągnięte powiększenia mikroskopu wynoszą przeszło 2000 razy; przy silniejszych bowiem powiększeniach aberacja sferyczna i chromatyczna szkodzi wyrazistości obrazu, a nadto oświetlenie preparatu nastręcza trudności: natężenie świetlne obrazu słabnie z kwadratem powiększenia.

Granica widzialności. Skutkiem uginania światła przedmioty zbyt drobne stają się niewidzialne, przy oświetleniu nawskroś; teoretycznie granicę widzialności stanowi długość fali. Mianowicie, gdyby przedmiot stanowiła siatka dyfrakcyjna, gdzie odstęp kresek = AB (rys. 401 i 531), zgaszenie światła nastąpi przy takim kącie ugięcia α, gdy różnica dróg 2 promieni wynosi $Bb = \lambda$. Wzór $\lambda = AB \sin \alpha$ (§ 76, art. 11) pozwala wnosić, że nawet przy największym kącie α, gdy $\sin \alpha = 1$, wypada $\lambda = AB$, t. j. najmniejszy widzialny odstęp kresek równa się długości fali.

Wynika stąd zarazem, że im krótsze są fale, tym drobniejszy przedmiot możemy widzieć. Na tej zasadzie używa się t. zw. *imersji* czyli zanurza się objektyw wraz z preparatem do płynu silnie łamiącego, np. olejku cedrowego, przez co λ się zmniejsza.

Jeszcze silniejsze powiększenia daje *mikrofotografja* przy użyciu promieni pozafijołkowych. Dla promieni światła najkrótsza fala wynosi 0,4 μ, przedmiot więc takiego wymiaru możemy jeszcze widzieć przez mikroskop; drobniejsze natamiast cialka, aż do 0,1 μ, można tylko fotografować w mikroskopie, kierując na nie promienie pozafijołkowe.

*) **Uwaga.** Powiększenia wszelkich narzędzi wyraża się w mierze linjowej; powiększenie całej powierzchni przedmiotu jest oczywiście kwadratem powiększenia linjowego. Jeżeli np. mikroskop powiększa 200 razy, to pole obrazu jest większe od pola przedmiotu $200^2 = 40\,000$ razy.

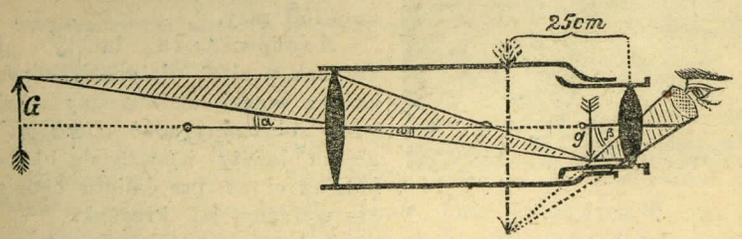
Ultramikroskop (Siedentopf i Zsigmondy 1903) ukazuje pyłki mniejsze, niż wymiar fal pozafijołkowych, aż do 0,004 μ, np. zawarte w koloidach, w szkle czerwonym (pył złota). Polega na oświetleniu takich pyłków w kierunku prostopadłym do osi optycznej; przez silne ugięcie promienie wpadają do mikroskopu, dając plamki świetlne, które nie pozwalają wprawdzie widzieć szczegółów, ale ukazują obecność ciałek. Oświetlenie boczne działa tu podobnie, jak na kurz, który staje się widzialny w ukośnych promieniach słońca.

§ 101. Lunety.

1. Lunety w ogólności stanowią narzędzia zbliżające pozornie przedmiot do oka, a tym samym powiększające go, oko bowiem widzi przez lunetę przedmiot pod większym kątem (α, § 98).

Spółczesne lunety składają się zwykle z samych soczewek, t. j. dają obrazy powstałe z załamania światła i zowią się też *refraktorami*. Lunety z zastosowaniem luster wklęsłych, t. j. odbicia światła, czyli *teleskopy* (reflektory), wychodzą z użycia, z powodu nietrwałości luster srebrnych, których powierzchnia ulega z czasem zrysowaniu.

2. Luneta astronomiczna (refraktor, rys. 545) składa się z dwu soczewek, objektywu i okularu. Pierwszy daje tuż poza ogniskiem obraz przedmiotu bardzo oddalonego, mianowicie ciał niebieskich, rzeczywisty, zmniejszony i odwrotny. Obraz ten przypada tuż przed ogniskiem okularu, który odgrywa rolę lupy, tak iż powstaje ostatecznie obraz urojony i powiększony, w położeniu odwrotnym względem przedmiotu.



Rys. 544. Luneta astronomiczna.

Odwrotność obrazu nie stanowi niedogodności w zastosowaniach lunety astronomicznej (dlaczego?).

Powiększenie lunety mierzy się stosunkiem kątów widzenia obrazu i przedmiotu. Gdyby nie było lunety, oko, umieszczone na miejscu objektywu, ujrzałoby przedmiot G (rys. 544), pod kątem α, przez lunetę zaś, t. j. umieszczone prawie w środku okularu, widzi przedmiot pod kątem β. Z powodu małości kątów można ich stosunek $\beta : \alpha$ zastąpić stosunkiem $tg\,\beta : tg\alpha$. Ponieważ obraz g znajduje się prawie w odległości F_1 od

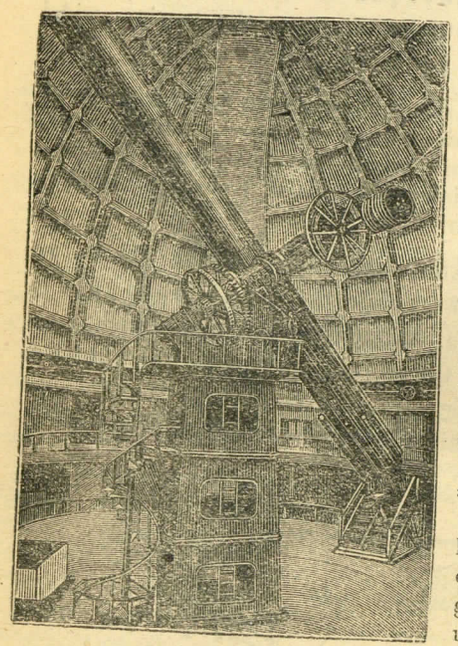
g = wielkość obrazu przedmiotu

objewtywu a zarazem w odległości prawie F_2 od okularu, można przyjąć (uważając obraz po jednej stronie osi) $tg\ \beta = g : F_2$ oraz $tg\ \alpha = g : F_1$. Zatym

$$\text{powiększenie } \left(\frac{\beta}{\alpha}\right) = \frac{tg\beta}{tg\alpha} = \frac{g}{F_2} : \frac{g}{F_1} = \frac{F_1}{F_2}$$

t. j. powiększenie wyraża się stosunkiem odległości ogniskowych objektywu i okularu. Ponieważ zbyt krótkie ognisko okularu szkodzi dokładności i jasności obrazu, w silnych narzędziach daje się jak największy wymiar soczewce objektywu.

Długość lunety astronomicznej jest równa prawie odległości ogniskowej objektywu, gdyż krótkie ognisko okularu można pominąć. Wielkie lunety astronomiczne wymagają gmachu o wysokości kilku pięter, na pomieszczenie ich i mechanizmu poruszającego (rys. 545). Np. refraktor Yerkesa w Chicago ma objektyw o średnicy 1 m, a ogniskowej 17 m, tak iż luneta w pionowym położeniu dochodzi do wysokości 20 m nad podłogą. Sam objektyw daje obraz słońca o średnicy $\frac{1}{110} F$ (por. przykład § 89, art. 3), czyli $\frac{1}{110} \cdot 17000 = 155$ mm średnicy. Jasność obrazu, t. j. skupienie promieni jest stosunkiem otworu rury do pola obrazu $= (\frac{1}{4}\pi \cdot 1000^2) : (\frac{1}{4}\pi \cdot 155^2) = 42$-krotna. Przy użyciu okularu o ognisku 4 mm, luneta powiększa czyli przybliża $17000 : 4 = 4250$ razy.



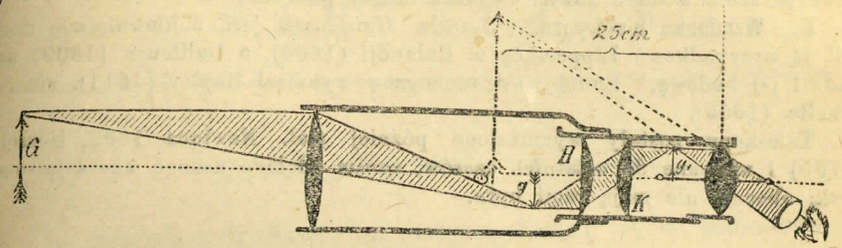
Rys. 545.

Nastawianie lunety ułatwia krzyżyk z nitek platynowych przy soczewce ocznej, umieszczony w miejscu, gdzie ma przypadać obraz g. Przy użyciu lunety wysuwa się okular dotąd, aż obraz przedmiotu będzie równie wyraźny, jak krzyżyk.

Zastosowania. Lunety do spostrzeżeń astronomicznych. — Małe lunety do odczytywania podziałek (rys. 205, 271). — *Teodolit*, t. j. luneta, obracająca się pionowo i poziomo, do pomiaru kątów niebieskich.

3. Luneta ziemska (rys. 546) stanowi odmianę astronomicznej i służy do otrzymania obrazów prostych. W tym celu między objektywem a okularem mieści się soczewka odwracająca (układ soczewek) w takiej odległości, że obraz objektywu przerzuca się na drugą stronę soczewki bez zmiany w wielkości.

Luneta ziemska nadaje się do powiększeń słabszych, od kilku do kilkudziesięciu razy, ponieważ większa ilość szkieł wpływa niekorzystnie na jasność obrazów, a nadto atmosfera przy dużych odległościach rzadko bywa dostatecznie przezroczysta.



Rys 546. Luneta ziemska.

Do odwrócenia obrazu służy zwykle para soczewek płasko-wypukłych, ustawionych tak, iż jedna przypada w ognisku drugiej. Objektyw daje obraz g w ognisku przedniej soczewki; wskutek tego promienie przebiegają soczewkę równolegle, a załamując się w tylnej soczewce, dają takiej samej wielkości obraz g' w położeniu odwrotnym. Obraz ten powiększa lupa, stanowiąca okular lunety.

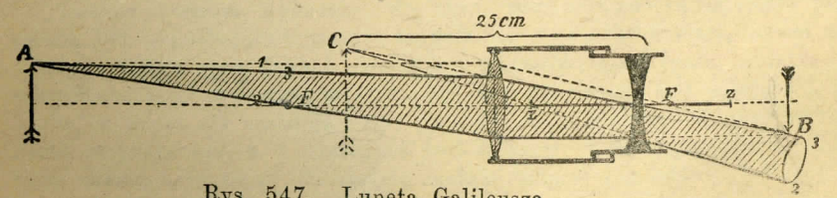
Długość tej lunety, przy równym powiększeniu, musi być większa od poprzedniej, gdyż składa się z odległości ogniskowych objektywu F_1, soczewki pośredniej F_2 i okularu F_3; mianowicie długość $= F_1 + 3\,F_2 + F_3$, gdzie głównym składnikiem jest F_1,

Powiększenie $= F_1 : F_2$, podobnie jak w lunecie astronomicznej, gdyż szkła pośrednie nie powiększają.

Zastosowania. Lunety podróżne, polowe, morskie, wojskowe i t. p. Zwykle składają się z kilku stawów rurowych, wsuwanych jeden w drugi.

4. Luneta Galileusza (rys. 547) za pomocą dwu soczewek wytwarza obrazy proste. Objektyw stanowi soczewka wypukła, okular soczewka wklęsła, ustawiona przed ogniskiem objektywu, tak iż jego ognisko (F) schodzi się prawie z tylnym ogniskiem okularu (Z). Promienie, idące przez okular, ulegają rozproszeniu, tak iż obraz przerzuca się na drugą stronę. Powstaje stąd obraz urojony i powiększony, o położeniu prostym.

Za pomocą lunety Galileusza osiąga się nieznaczne powiększenia, natomiast obrazy są szczególnie czyste i jasne (dlaczego?).



Rys. 547. Luneta Galileusza.

Długość lunety stanowi różnica odległości ogniskowych objektywu i okularu; jest to więc najkrótsza z lunet.

Powiększenie wyraża się stosunkiem $F_1 : F_2$, jak poprzednio.

Zastosowania. Podwójną lunetę Galileusza stanowi *lornetka teatralna* (powiększenie 2 do 3 razy). — Małe lunety podróżne.

5. Wzmianka historyczna. Luneta Galileusza jest najdawniejszą; zestawił ją przypadkowo Lippershey w Holandji (1608), a Galileusz (1609) uzasadnił jej budowę. Lunetę astronomiczną wynalazł Kepler (1611), ziemską Rheita (1665).

Teleskopy zostały wynalezione później (tel. Newtona 1663, Herschla 1795) i używane do ostatnich czasów, zanim zdołano usunąć aberację soczewek; obecnie nie mają racji bytu.

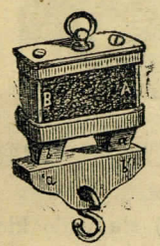
ROZDZIAŁ IX.

MAGNETYZM.

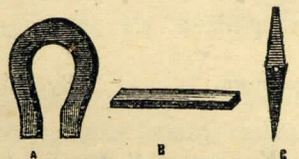
§ 102. Własności magnesu.

1. Rodzaje magnesów. *Magnetyzm* objawia się w zdolności przyciągania żelaza i stali, oraz metalów pokrewnych, zwłaszcza niklu i kobaltu. Ciało, posiadające tę zdolność, zowie się *magnesem*. Obecnie magnesy wyrabiane są wyłącznie ze stali hartowanej; są to więc *magnesy sztuczne* (Porta 1589).

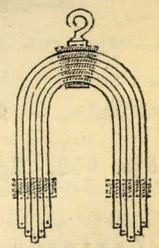
Trafiające się miejscami okazy rudy żelaznej, zwanej żelaziakiem magnetycznym ($Fe_3 O_4$) stanowią *magnesy naturalne* i mają tylko znaczenie historyczne. Magnes taki w oprawie żelaznej wyobraża rys. 548.



Rys. 548.
Magnes naturalny.



Rys 549.
Magnesy sztuczne pojedyńcze.

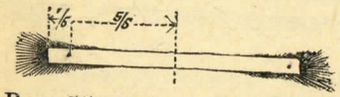


Rys. 550.
Magnes złożony.

Magnesy mają zwykle kształt pręta prostego lub zgiętego w rodzaju podkowy rys. 549 *A*, *B*); magnes prosty, zakończony śpiczasto, zowie się *igłą magnesową* (*C*). Magnes, utworzony z wielu prętów, zowie się *magnesem złożonym* (rys. 550).

Nowsze badania wykazały, że silny magnes wywiera działanie przyciągające lub odpychające w małym stopniu na wszelkie ciała, nawet płynne i lotne. Ciała przyciągane zowią się *magnetycznymi* (paramagnetycznymi), odpychane *diamagnetycznymi*. Zresztą zachowanie się ciał zależy od środowiska, w jakim się znajdują: np. zwykłe szkło zielone w powietrzu jest nieco magnetyczne, a w roztworze soli żelazowych diamagnetyczne. Najbardziej diamagnetycznymi ciałami są metale bizmut i miedź.

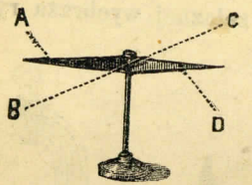
2. Bieguny magnesu. Przy zetknięciu magnesu z opiłkami żelaznymi, przytrzymuje on około końców najwięcej opiłek, które się układają w pewne linje, skierowane ku dwom punktom magnesu (rys. 551). Te punkty przyciągania stanowią *bieguny magnesu*, a łącząca je linja stanowi *oś magnesu*. Siła przyciągania maleje ku środkowi magnesu, tak iż pośrodku istnieje *pas obojętny*, nie zdradzający żadnego działania.



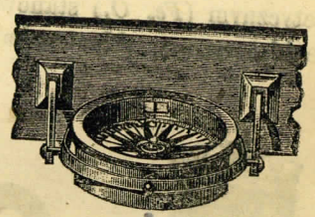
Rys. 551. Bieguny magnesu.

Bieguny w magnesach prostych i podkowiastych istnieją tym bliżej końców, im magnes jest cieńszy; magnesy postaci zwykle używanej mają bieguny w odstępie od końców, wynoszącym około $\frac{1}{12}$ długości magnesu.

3. Kierunek igły magnesowej. Ruchoma igła magnesowa, t. j. zawieszona pośrodku na nitce lub osadzona na ostrzu (rys. 552), zwraca się jednym biegunem mniej więcej na północ, drugim na południe. Stąd bieguny otrzymały miano *północnego* i *południowego*; pierwszy oznacza zwykle litera *N*, drugi *S* (od ang. North, South).



Rys. 552. Igła magnesowa.



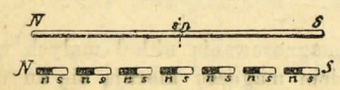
Rys. 553. Kompas okrętowy.

Zastosowanie. *Kompas* czyli *busola* (rys. 553) służy do kierowania się na morzu, jako też wogóle do wyznaczenia stron świata przy zdejmowaniu planów i t. p. Igła magnesowa jest tu zawarta w puszce z podziałką na stopnie lub t. zw. różą wiatrów; busola morska ma nadto zawieszenie ruchome (Cardana), aby pomimo kołysania statku zachowywała stale położenie poziome. Przy dokładnym użyciu kompasu należy się liczyć ze zboczeniem magnetycznym (§ 104).

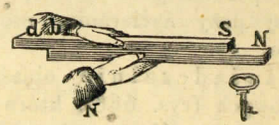
4. Wzajemne oddziaływanie biegunów. Za zbliżeniem magnesu naprzemian jednym i drugim biegunem do igły magnesowej okazuje się, że jednakowe bieguny się odpychają, przeciwne przyciągają się nawzajem.

Na tej zasadzie łatwo sprawdzić, czy żelazo lub stal są namagnesowane. Zwykła np. stalówka, klucz, szydło przyciągają oba bieguny igły jednakowo.

5. Budowa magnesu. Po rozłamaniu magnesu na 2, 3, 4 i więcej części, każda część posiada oba bieguny, jest więc magnesem zupełnym, tylko słabszym (rys. 554). Stąd można wnosić, że i najdrobniejsze nawet części magnesu posiadają własne dwa bieguny, zatym że i każda cząstka fizyczna w magnesie jest zupełnym magnesem, czyli jest *dwubiegunowa*. W myśl tego poglądu należy cały magnes uważać jako zbiór magnesów cząstkowych, zwróconych jednakowymi biegunami w tę samą stronę (por. rys. 555, część dolna).



Rys. 554. Podział magnesu.



Rys. 555.

Nawzajem, przez złączenie sztabek magnesowych przeciwnymi biegunami w jeden łańcuch, bieguny występują tylko na końcach łańcucha. W miejscach złączenia działanie biegunów znosi się wzajemnie; np. za przyłożeniem bieguna południowego magnesu do bieguna północnego drugiego takiegoż magnesu, dźwigającego klucz, ten ostatni odpada (rys. 555).

6. Magnesowanie. Stal hartowaną można namagnesować przez pocieranie którymkolwiek biegunem magnesu, ciągle w tę samą stronę. Małe igiełki, stalówki magnesują się dostatecznie już od zetknięcia z mocnym magnesem.

Siła przyciągania magnetycznego, wzbudzona w jakibądź sposób, ma pewne granice, zależne od wymiarów sztaby magnesowej i od gatunku stali. Najsilniejsze namagnesowanie, jakie dany magnes może osiągnąć, zowie się *nasyceniem* magnetycznym.

W praktyce pocieranie magnesem lub zatknięcie nie wystarcza do otrzymania silniejszych magnesów, tak iż magnesowanie odbywa się wyłącznie za pomocą prądu elektrycznego (pt. „Elektromagnetyzm").

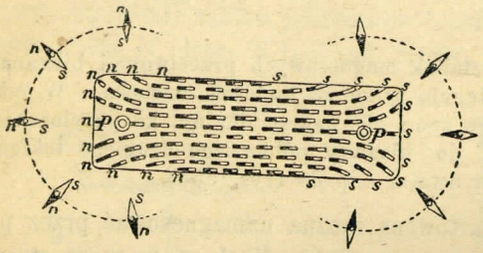
7. Magnetyzm trwały i chwilowy. Po namagnesowaniu stali hartowanej zachowuje ona siłę przyciągającą na zawsze; zatym stal staje się magnesem trwałym. Inaczej zachowuje się zwykłe żelazo, zwane kowalnym lub miękkim: żelazo traci magnetyzm natychmiast po ustaniu siły magnesującej, i to tym zupełniej, im jest czystsze i bardziej rozdrobnione.

W użyciu niema żelaza bezwzględnie czystego, tak iż w rozmaitych gatunkach żelaza pozostają ślady magnetyzmu, zwane *pozostałością magnetyczną* albo *magnetyzmem szczątkowym*; samo zaś zjawisko zatrzymywania pewnej części magnetyzmu zowie się *koercją*.

Fakt, że magnes nie traci nic na sile, chociażby przez pocieranie wytworzył tysiące magnesów, można wytłumaczyć tylko w ten sposób, że w stali i żelazie już od natury istnieją cząstki magnetyczne dwubiegunowe. Na zewnątrz nie okazują one działania, ponieważ są zwrócone w rozmaite strony, równoważąc swe przyciągania wzajemne; pod działaniem zaś magnesu cząstki obracają się odpowiednim biegunem w jedną stronę, przyczym w twardej stali cząstki pozostają w nadanym położeniu, w miękkim zaś żelazie, jako bardziej ruchliwe, przybierają położenia najrozmaitsze.

Z poprzedniego wypływa, że magnesowanie odbywa się na koszt pracy, włożonej przy nacieraniu, nie zaś przez oddawanie magnetyzmu ze strony magnesu.

Doświadczalnie objaśnia istotę magnesowania układ małych igiełek magnesowych (rys. 556), które za zbliżeniem magnesu kierują się ku niemu, np. biegunami północnymi, po usunięciu zaś magnesu wykręcają się rozmaicie, tak iż na zewnątrz nie okazują prawie działania.

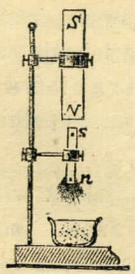


Rys. 556. Kierunek magnesów cząstkowych.

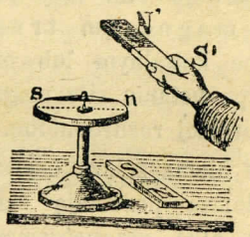
Osłabienie siły przyciągającej magnesu zachodzi wskutek uderzeń, wstrząśnień albo ogrzania, co się godzi z teorją właściwego żelazu magnetyzmu cząstkowego (objaśnić); w temperaturze jasnej czerwoności, t. j. około 900°, stal traci zdolność magnetyczną.

§ 103. Pole magnetyczne.

1. Influencją albo **indukcją magnetyczną** zowie się oddziaływanie magnesów na siebie, jako też na żelazo, już z pewnej odległości, przyczym w żelazie powstaje biegun przeciwny po stronie bliższej do magnesu. Tak wzbudzone żelazo może znów działać indukcyjnie na dalsze przedmioty żelazne (rys. 557).



Rys. 557.
Indukcja magnetyczna.



Rys. 558.
Zasada kompensacji magnetycznej.

Objawem influencji jest kierowanie się igły magnesowej ku północy, jako też wzajemne oddziaływanie biegunów (§ 102, art. 4).

Zastosowanie. *Kompensacja* czyli zrównoważenie magnetyczne igły w kompasie okrętowym: ażeby usunąć wpływ masy żelaznej statków na igłę magnesową, która może wskutek tego dawać fałszywe wskazówki, umieszcza się obok kompasu, z różnych stron, silne magnesy tak, aby igłę sprowadzić do położenia normalnego. Przykład takiej kompensacji objaśnia rys. 558, gdzie działanie magnesu NS znosi wpływ $N'S'$.

2. Ilość magnetyzmu. Bieguny dwu magnesów działają na siebie tym silniej, im są bliżej, oraz im większą posiadają *ilość magnetyzmu* czyli *masę magnetyczną*.

Siła wzajemnego oddziaływania biegunów jest w stosonku prostym do iloczynu ich magnetyzmów, a odwrotnym do kwadratu odległości (prawo Coulomba 1785):

$$\text{lub } \begin{matrix}\text{odpychanie}\\ \text{przyciąganie}\end{matrix} \Big\} \quad P = \pm \frac{m_1 \cdot m_2}{r^2} \text{ dyn.}$$

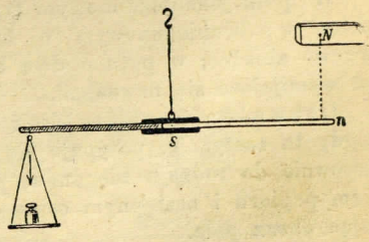
Znak + oznacza odpychanie, bo wtedy m_1 i m_2 są oba dodatnie albo ujemne; znak — przyciąganie, bo m_1 i m_2 mają znaki przeciwne. Siła P wypada w dynach, gdy r w cm, ilości m_1 i m_2 również w jednostkach bezwzględnych; przy $P = 1$ dyna, oraz $r = 1$ cm, $m_1 = m_2 = m$, wypada $m = 1$. Zatym jednostką magnetyzmu jest taka ilość, która równą sobie przyciąga lub odpycha w odległości 1 cm siłą 1 dyny.

Wymiar bezwzględny tej jednostki otrzymuje się ze wzoru Coulomba; gdy $m_1 = m_2 = m$, to $m = \sqrt{Pr^2}$. Że zaś wymiar siły $P = LMT^{-2}$ (§ 53, art. 3), wymiar długości $r = L$, wypada

wymiar masy magnetycznej $L^{3/2} M^{1/2} T^{-1}$
„ jednostki „ $cm^{3/2} g^{1/2} sek^{-1}$.

Doświadczalnie stwierdza się prawo Coulomba za pomocą *wagi skręceń* (rys. 362), albo też za pomocą *wagi magnetycznej* (rys. 559). Do bieguna S cienkiego magnesu przyczepia się pręcik drewniany w kierunku osi i zawiesza całość tak, aby tworzyła rodzaj wagi. Za zbliżeniem wolnego bieguna n do N magnesu następuje odpychanie, tak iż szalka się podnosi. Do równowagi trzeba obciążyć szalkę: przy odległości biegunów $nN = 1$ cm ciężarkiem naprz. p g, przy 2 cm $\frac{1}{4}$ p, przy 3 cm $\frac{1}{9}$ p i t. d.

Zmieniając magnes N na silniejszy, np. 2, 3 razy, trzeba w tym stosunku dokładać ciężarków. Podobnież przy zmianie ruchomego magnesu n na silniejszy, trzeba obciążać szalkę proporcjonalnie.



Rys. 559. Waga magnetyczna.

Przykłady. 1) Biegun o masie 30 jednostek magn. przyciąga biegun o 80 jedn. z odległości 4 cm. Przyciąganie wynosi $(30 \cdot 80) : 4^2 = 150$ dyn = okr. 0,15 grama.

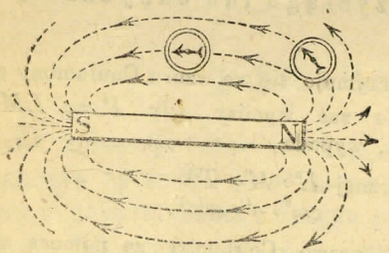
2) Zwykłe igły magnesowe mają bieguny o masie kilku lub kilkunastu jednostek magnetycznych.

3) Igła na kompasie zwraca się ku północy z taką siłą, jak gdyby biegun o masie $H = \frac{1}{5}$ jedn. magn. znajdował się o 1 cm od jej bieguna.

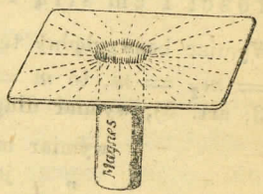
3. Pole magnetyczne stanowi obszar, gdzie magnes ujawnia mniej lub więcej wyraźnie swój wpływ przyciągający lub odpychający, czyli influencję. Pole magnetyczne właściwie nie ma granic, ale jego natężenie ubywa tak raptownie, że w pewnej odległości nie okazuje już wyraźnego działania.

Ujawnić można pole magnetyczne za pomocą igły magnesowej, którą się oprowadza dokoła magnesu, albo za pomocą opiłek żelaznych, któremi obsypuje się magnes. Zarówno igła, jak opiłki układają się wzdłuż pewnych linji, zwanych *linjami sił magnetycznych*, które wskazują kierunek przyciągania lub odpychania magnetycznego. Linje te mają postać krzywych, łączących oba bieguny magnesu.

Północny biegun magnesu przyjęto uważać za punkt wyjścia linji sił (rys. 560); stąd zmierzają one ku biegunowi południowemu, tworząc tak zw. *prąd magnetyczny* (por. prąd ciepła, gazu, wody). Prąd ten można rozumieć w ten sposób, że biegun północny, oddzielony od igły magnesowej, poruszyłby się w polu magnetycznym od N do S, biegnąc po krzywej, na której go oddzielono.



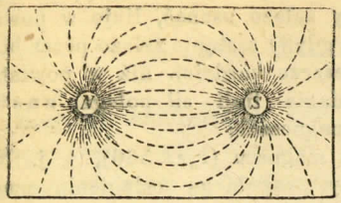
Rys. 560. Przebieg linji magnetycznych.

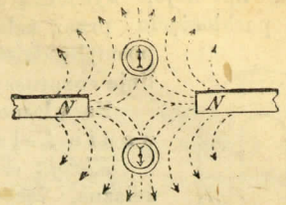


Rys. 561. Pole jednobiegunowe.

W polu jednobiegunowym (rys. 561) linje opiłek rozchodzą się promieniście; w dwubiegunowym o biegunach różnoimiennych (rys. 562) tworzą krzywe zbieżne; w polu o dwu biegunach jednakowych (rys. 563) linje krzywe wymijające się nawzajem.

Utrwalenie obrazu linji sił: napuszcza się papier stopioną parafiną, a gdy ta zastygnie, posypuje się papier opiłkami i przykłada do magnesu: stosownie do rodzaju biegunów, powstaje rozmaity układ opiłek. Za ogrzaniem papieru i następnym ostudzeniem, opiłki przylegają mocno do papieru, dając obraz pola.





Pola dwubiegunowe.

Rys. 562. Pole różnoimienne.

Rys. 563. Pole jednoimienne.

4. Natężeniem (H) pola magnetycznego zowiemy wartość siły, działającej na jednostkę magnetyzmu w danym punkcie pola.

Jeżeli wartość tej siły $= P$ dyn, a działa na biegun o m jednostkach magnetycznych, to

$$\text{natężenie pola } H = \frac{P}{m}.$$

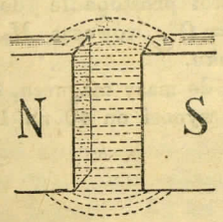
Jednostkę natężenia pola magnetycznego stanowi *gaus* (od nazwiska Gaussa, twórcy układu bezwzględnego): działa ono na jednostkę magnetyzmu siłą 1 dyny. Stąd np. biegun północny, zawierający m jednostek, w polu o natężeniu H gausów byłby pędzony w kierunku linji magnetycznych siłą $P = mH$ dyn. Dla silnych magnesów natężenie pola wynosi kilka tysięcy gausów.

Przy natężeniu 1 gausa przyjmujemy, że na każdy cm² pola przypada 1 magnetyczna linja siły; na tej zasadzie można liczyć linje magnetyczne i tą liczbą wyrażać również natężenie pola.

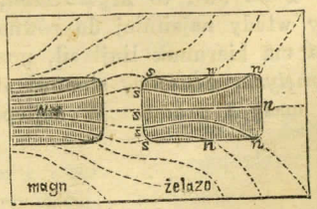
Natężenie pola magnetycznego można mierzyć liczbą linji magnetycznych, przechodzących przez 1 cm², prostopadle (Faraday 1852). Rozumieć tu należy *pole jednostajne*, gdzie linje sił idą równolegle do siebie i w równej odległości; ma to np. miejsce pomiędzy dużymi a płaskimi końcówkami magnesów (rys. 564).

Im gęściej idą linje sił, tym silniejsze jest działanie magnetyczne.

Z powyższego wynika, że ciałami magnetycznymi są te, które jakby wchłaniają czyli zagęszczają linje sił, np. żelazo, nikiel, kobalt, słabiej chrom, mangan, platyna; diamagnetycznymi są ciała, rozpraszające linje sił, np. bizmut, miedź, drzewo, woda.

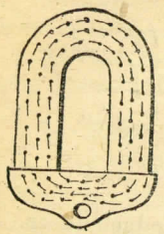


Rys. 564. Pole jednostajne.



Rys. 565. Zgęszczenie linji sił.

Tak np. linje, wychodzące z bieguna N (rys. 565), ulegają w większej części pochłonięciu przez żelazo. Gdyby żelazo usunąć, linje w powietrzu poszłyby daleko rzadziej; gdyby zastąpić żelazo przez bizmut, linje rozproszyłyby się jeszcze bardziej, niż w powietrzu.



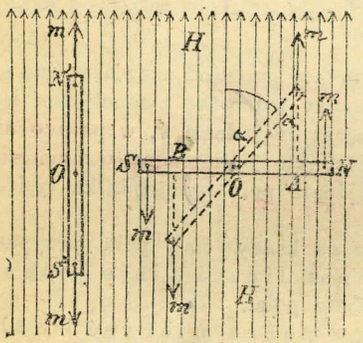
Rys. 565. Rola zbroi.

Na własności pochłaniania linji sił polega zastosowanie żelaza przy magnesach:

Zbroja czyli *zasłona* magnesu (rys. 566), t. j. bryłka żelazna, łącząca bieguny, zapobiega osłabieniu magnesu z biegiem czasu, gdyż pole jest tu zamknięte, linje sił się nie rozpraszają.

b) *Zasłona* magnetyczna, t. j. grube pudło lub klosz żelazny, zabezpieczające igłę magnesową od wpływów ubocznych.

5. Moment magnetyczny. Magnes swobodny, umieszczony w polu magnetycznym, ustawia się w kierunku linji sił, zwracając się biegunem północnym w stronę ich przebiegu ($S'N'$, rys. 568). Magnes bowiem znajduje się pod działaniem pary sił, których moment w położeniu równowagi magnesu równa się zeru, bo kierunek sił przechodzi przez oś (§ 19, art. 7).



Rys. 566.

Momentem magnetycznym M zowie się iloczyn z ilości magnetyzmu m w biegunie i odległości biegunów $NS = l$: moment magnetyczny $M = m \cdot l$.

Wyrażenie powyższe należy pojmować w ten sposób, że gdy np. igła magnesowa o ilości magnetyzmu na każdym biegunie po m jednostek i odległości biegunów l cm mieści się w jednostajnym polu magnetycznym o natężeniu 1, prostopadle do linji sił, podlega on działaniu pary sił, o momencie $m \cdot l/_2 + m \cdot l/_2 = ml = M$.

Moment kierujący magnesu M_k jest to jego moment obrotu w ogólnym wypadku, gdy natężenie pola $= H$, a kąt osi magnetycznej z kierunkiem linji sił $= \alpha$; wtedy, jak można wywnioskować z rysunku,

$$M_k = Hm \cdot OA + Hm \cdot OB = Hm \cdot l/_2 \sin\alpha + Hm \cdot l/_2 \sin\alpha, \text{ czyli}$$

moment kierujący magnesu $M_k = Hml \sin\alpha$.

Gdy $\alpha = 90^0$, to $M_k = Hml$, t. j. gdy igła stoi prostopadle do linji sił, dąży wtedy najsilniej do równowagi. Gdy $\alpha = 0^0$, wówczas $M_k = 0$: gdy igła ma kierunek linji sił, pozostaje w spoczynku.

Magnetyzm właściwy stanowi stosunek momentu do masy magnesu, to jest moment masy 1 grama. W najlepszych magnesach wynosi on 40 na 1 g.

§ 104. Magnetyzm ziemski.

1. Bieguny magnetyczne ziemi stanowią punkty, ku którym zmierza igła magnesowa. Kula ziemska zachowuje się jak gdyby magnes o biegunie magnetycznym południowym na północnej półkuli, a biegunie magnetycznym północnym na półkuli południowej, przyczym bieguny magnetyczne nie zgadzają się co do położenia z biegunami geograficznymi (Gilbert, około r. 1600).

Pogląd taki, na pozór uzasadniony, nie jest jednak ścisły, ziemia bowiem nie okazuje dokładnie własności magnesu dwubiegunowego: linje magnetyczne na ziemi mają przebieg nieprawidłowy (por. poniżej mapkę rys. 572).

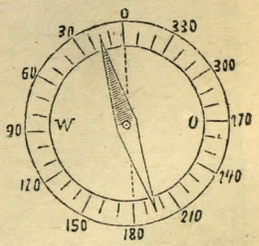
Główne punkty przyciągania magnetycznego, czyli bieguny magnetyczne ziemi, przypadają zdala od biegunów geograficznych: na półkuli północnej biegun magnetyczny leży na półwyspie Boothia Felix, około ziemi Baffina, pod 70° szer. geogr. i 97° dług. geogr. (Ross 1831); na półkuli południowej pod 73° szer i 146° dług. geogr., na południe od wyspy Tasmanji (Borchgrevink 1900).

2. Zboczenie magnetyczne czyli **deklinację** stanowi odchylenie igły magnesowej od południka ziemskiego; jest to więc kąt, jaki tworzy kierunek igły kompasu z południkiem danego miejsca.

Zboczenie bywa wschodnie lub zachodnie i ma rozmaitą wartość dla różnych miejsc ziemi; nadto zmienia się w tym samym miejscu z biegiem czasu.

Igła magnesowa wskazuje *południka magnetycznego* dla danego miejsca; stąd można jako zboczenie uważać kąt między południkiem geograficznym a magnetycznym.

Jeżeli rys. 567 leży na stole, zwrócony dokładnie zerem na północ, linja 0 — 180 daje kierunek południka geograficznego, igła zaś wskazuje kierunek południka magnetycznego; zboczeniem więc jest kąt między kierunkiem igły a linją zerową.



Rys. 567. Zboczenie magnetyczne.

Praktyczne wyznaczenie zboczenia. Wetknąć szydło w stół pionowo i wystawić na słońce, w samo południe; na cieniu, rzuconym na stół, położyć kompas podzielony na stopnie, przyczym cień winien przechodzić przez środek igły. Stopień, jaki wskazuje koniec igły kompasu, stanowi zboczenie magnetyczne.

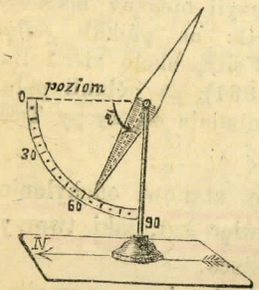
W Warszawie zboczenie wynosi obecnie około 5° na zachód; dalej ku wschodowi Europy maleje, np. na Uralu = 0, aż przechodzi w zboczenie wschodnie; ku zachodowi zaś rośnie, np. na Atlantyku wynosi 20°, 30° i więcej.

Zboczenie stanowi ważny czynnik w żegludze morskiej, który trzeba uwzględniać przy wskazówkach busoli; tabelę zboczeń dla każdego miejsca podają mapy magnetyczne, wydawane co pewien przeciąg czasu (pt. poniżej).

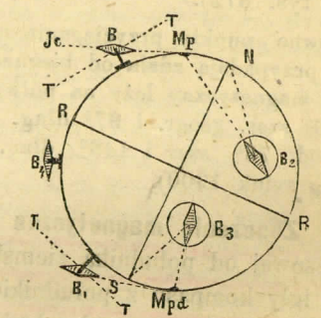
3. Nachylenie magnetyczne czyli **inklinacja** (*i*, rys. 568) stanowi odchylenie igły magnesowej od poziomu, przyczym na naszej półkuli zwraca się na dół biegun północny, na przeciwnej południowy.

Zwykły kompas nie zdradza nachylenia. Ażeby je okazać, należy igłę dokładnie zawiesić w środku ciężkości, przez co usuwa się wpływ ciężkości; wtedy igła przybiera położenie bardzo ukośne, jak wskazuje rysunek.

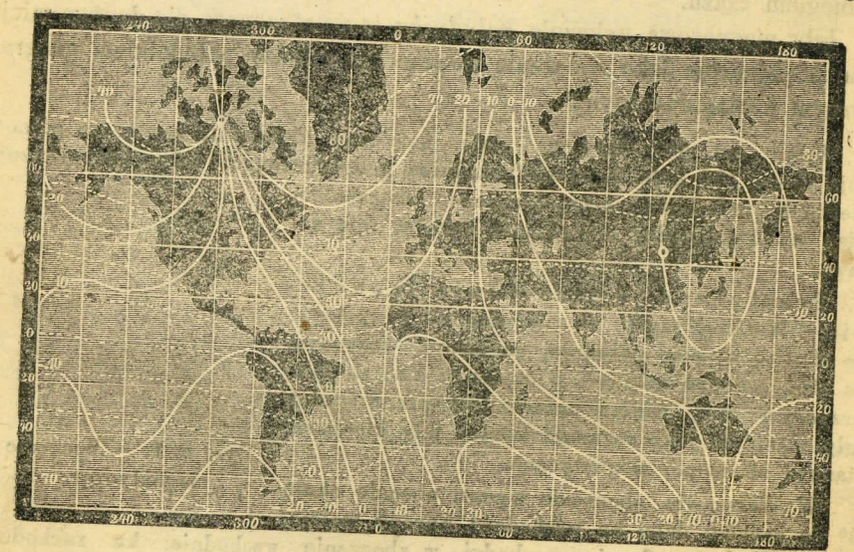
Nachylenie bywa odmienne dla każdego miejsca i czasu. W Warszawie wynosi teraz około 66°; na biegunach magnetycznych igła stoi pionowo, w pobliżu równika poziomo. (Objaśnić rys. 569).



Rys. 568.
Nachylenie magnetyczne.



Rys. 569.
Pochodzenie magnetyzmu ziemskiego.



Rys. 570. Mapa magnetyczna.

4. Mapy magnetyczne. Wielkość nachylenia i zboczenia igły magnesowej w rozmaitych miejscach ziemi podają *mapy magnetyczne*, gdzie połączono linjami ciągłymi miejscowości o jednakowym nachyleniu, jak również miejscowości o jednakowym zboczeniu.

Linje jednakowego nachylenia, czyli *izokliny*, idą miejscami równolegle do równika ziemskiego, bądź niewiele się uchylają (rys. 570); izoklina 0°, t. j. linja miejscowości bez nachylenia, gdzie igła stoi poziomo, stanowi *równik magnetyczny* i różni się mało od równika geograficznego. Natomiast linje jednakowego zboczenia, czyli *izogony*, mają przebieg bardzo nieregularny; izogona 0°, t. j. linja miejscowości bez zboczenia, gdzie igła wskazuje wprost na północ, idzie prawie na granicy Europy i Azji, a na drugiej półkuli wzdłuż Ameryki. Chiny i Japonję obejmuje odrębna, zamknięta w sobie izogona 0°. Z map magnetycznych widać, że magnetyzm ziemski jest wynikiem zjawisk bardzo zawiłych, których wyświetlenie stanowi cel współczesnych badań naukowych.

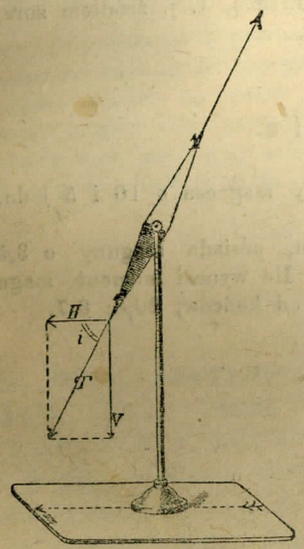
5. Natężenie magnetyzmu ziemskiego. Igła nachyleń wskazuje kierunek działania magnetyzmu ziemskiego, a zarazem pozwala na oznaczenie jego natężenia. W tym celu wypadłoby oznaczyć siłę T, potrzebną do przesunięcia igły w jej kierunku, przy uwolnieniu od siły ciężkości.

W rzeczywistości siłę T rozkładamy na 2 siły, *poziomą składową* H i *pionową* V (rys. 571) i oznaczamy wartość każdej osobno, podając je na jednostkę magnetyzmu w biegunie igły.

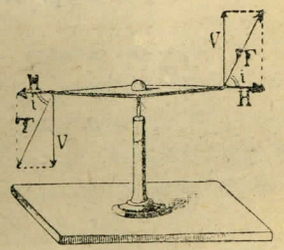
Z rozkładu siły T wynika

$$H = T \cdot \cos i$$

skąd $$T = \frac{H}{\cos i}.$$



Rys. 571.



Rys. 572.

Igła w kompasie podlega działaniu samej tylko poziomej składowej magnetyzmu ziemskiego; wartość siły pionowej V (rys. 572) znosi się tutaj, wskutek odpowiedniego osadzenia igły na pionowym ostrzu; nie cała więc siła T, ale tylko jej część H nadaje kierunek igle magnesowej. Stąd głównie pozioma składowa ma znaczenie w pomiarach i polega częstemu oznaczaniu w każdej miejscowości, jako jej charakterystyka magnetyczna w danym czasie.

Największą wartość ma pozioma składowa na równiku, na biegunach zaś jest zerem. W Warszawie $H = 0{,}19$ dyny; zatym natężenie całkowite $T = H : \cos 66^0 = 0{,}45$ dyny. Pole więc magnetyczne ziemi posiada natężenie około $\frac{1}{2}$ gausa, czyli zawiera 1 linję sił na 2 cm², t. j. gęstość linji nadzwyczaj słabą.

Pole ziemskie jest jednostajne, t. j. linje magnetyczne w obszarze niezbyt wielkim są do siebie równoległe.

6. Wahania magnetyzmu ziemskiego. Zboczenie magnetyczne wynosiło w Paryżu $11\frac{1}{2}^0$ ku wschodowi w roku 1580, spadło stopniowo do zera w r. 1663; przeszło następnie na zachodnie i osiągnęło najwyższą wartość $22\frac{1}{2}^0$ w roku 1814, obecnie znów ubywa, np. w roku bieżącym wynosi około 12^0 ku zachodowi. Podobne zmiany wiekowe zachodzą w innych miejscowościach. Średnie zboczenie zmniejsza się w Europie obecnie na rok o $0{,}1^0$; nachylenie zmniejsza się o $0{,}03^0$.

Natężenie poziomej składowej rośnie obecnie co roku o 0,00015.

Pozatym igła magnesowa podlega wahaniom codziennym, bardzo wprawdzie nieznacznym. Raptowne drgania igły, t. zw. *burze magnetyczne*, towarzyszą zwykle zorzy podbiegunowej. Częstość zaś tych zjawisk znajduje się w pewnej zależności od zaburzeń na słońcu, zwłaszcza plam słonecznych.

Istota więc magnetyzmu ziemskiego, jakkolwiek mało zbadana, ma związek niewątpliwy z elektrycznością atmosferyczną, t. j. źródłem zorzy polarnej, oraz z promieniowaniem słońca.

Zadania.

1. Jaką siłą przyciągają się bieguny magnesu o 10 i 5 jedn. magn., z odległości 20 cm? Odp. 0,125 dyny.

2. Igła magnesowa, długa na 9 cm, posiada bieguny o 3,57 jedn. magn. i waży 4 g. Gdzie leżą bieguny? Ile wynosi moment magn. i magnetyzm właściwy? Odp. Około 7,5 mm od końców; 26,8; 6,7.

ROZDZIAŁ X.

ELEKTROSTATYKA.

Elektrostatyka jest nauką o elektryczności w spoczynku, czyli elektryczności jako energji potencjalnej. Zasób tej energji stanowi nabój elektryczny, skoro przez włożenie pewnej pracy posiędzie dążność do wyzwolenia się, czyli napięcie elektryczne. Sam przez się nabój elektryczny energją nie jest, podobnie jak nie jest nią ciężar, który dopiero za podniesieniem nabywa energji.

W przeciwieństwie do elektrostatyki, drugą część nauki elektryczności stanowi *elektrodynamika*, nauka o prądzie elektrycznym, gdzie elektryczność występuje jako energja kinetyczna (rozdział XI).

Zjawiska elektryczne poznano dopiero od paru stuleci, przy udoskonaleniu sposobów badania fizycznego. Elektryczność bowiem w przyrodzie nie oddziaływa wprost na nasze zmysły, jak ruch, głos, ciepło i światło; nie posiadamy zmysłu elektrycznego, to też nie odczuwamy stanu elektrycznego ciał, jakie nas otaczają. Zdradza on się dopiero, gdy elektryczność przemienia się na inną energję, np. w piorunie, który sprawia błysk, huk, pożar.

§ 105. Stan elektryczny.

1. Objawy elektryczne, po których można wnosić o obecności w ciałach energji, zwanej elektrycznością, polegają zwykle na słabym oddziaływaniu mechanicznym: przyciąganiu lub odpychaniu. Dopiero przy większym nagromadzeniu energji elektrycznej występuje rozgrzanie jakiegoś ciała, świecenie, działania chemiczne, skutki fizjologiczne: uczucie mrowia, skurcz mięśni, ból, śmierć.

Stan elektryczny ciał polega zatym, w pospolitym przypadku, na przyciąganiu się ich wzajemnym lub odpychaniu. Własności tej nabierają wszystkie ciała wskutek tarcia, wyjątkowe zaś ciała nadto wskutek ogrzania.

2. Elektryzowanie ciał przez tarcie. Za potarciem kauczuku flanelą, albo szkła jedwabiem, ciała te nabierają zdolności przyciągania, a następnie odpychania lekkich przedmiotów, jak piórek, papierków itp. Powiadamy, że ciała te *elektryzują się* wskutek tarcia, przytym właściwości takiej nabiera zarówno ciało pocierające, jak pocierane.

Podobną zdolność przyciągania i odpychania można wywołać przez tarcie we wszelkich ciałach stałych jako też płynnych i lotnych, przy odpowiednim odosobnieniu, czyli izolacji (pt. poniżej). Przyczynę tego stanu ciał zowiemy *elektrycznością*, przyczym ilość jej w ciele nagromadzoną zowiemy *nabojem* albo *masą elektryczną*.

Każde ciało elektryzuje się za potarciem innym ciałem, przytym w rozmaitym stopniu.

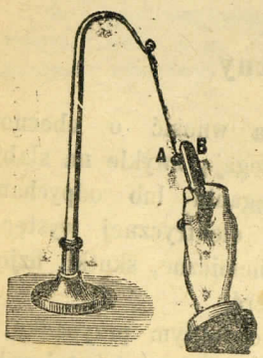
Zdolność przyciągania zauważono w starożytności na bursztynie, po grecku „elektron" (Thales z Miletu, około r. 600 przed Chr.). Dopiero w wiekach nowszych zdołano wykryć tę właściwość w innych ciałach (Gilbert 1600).

3. Oddziaływanie ciał naelektryzowanych. Ażeby okazać, że wszelkie ciała naelektryzowane zachowują się względem siebie w sposób dwojaki, przyciągają się lub odpychają, należy każde z nich natrzeć osobno i następnie zbliżyć do siebie.

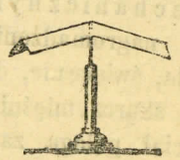
Doświadczenia. 1) Dwie laski kauczukowe, potarte suknem i zawieszone w środku ciężkości, za zbliżeniem odpychają się wzajemnie, podobnież każda para innych ciał jednakowych. Natomiast kauczuk i szkło naelektryzowane przyciągają się nawzajem, podobnież lak i szkło.

2) Oddziaływanie to dogodniej sprawdzić na *wahadełku elektrycznym* (rys. 573), kulce bzowej, t. j. ze rdzenia bzu dzikiego, zawieszonej na jedwabnej nici. Dotyka się jednej i drugiej takiej kulki lakiem naelektryzowanym, albo jednej lakiem, drugiej szkłem; w pierwszym wypadku następuje odpychanie kulek, w drugim przyciąganie.

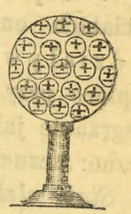
3) Najłatwiej jednak okazać działania elektryczne, nawet słabsze, które mogą zawieść przy sposobach poprzednich, za pomocą papierowego paska, zgiętego i osadzonego na ostrzu igły, jak wskazuje rys 574.



Rys. 573.
Wahadło elektryczne.



Rys. 574.



Rys. 575.

4. Dwa rodzaje elektryczności. Na zasadzie wzajemnego odziaływania można przypuścić w ciałach *dwa rodzaje elektryczności*: jednakowe się odpychają, odmienne przyciągają. Dla elektryczności szkła przyjęła się nazwa *dodatniej* (znak +), dla el. kauczuku *ujemnej* (—).

Zresztą rodzaj elektryczności w danym ciele zależy od materji: np. szkło elektryzuje się dodatnio, od potarcia jedwabiem, ujemnie od potarcia futrem kocim. Dodatni nabój szkła i ujemny kauczuku rozumiemy przy ich pocieraniu bezpośrednim.

W ciałach *obojętnych*, t. j. nienaelektryzowanych, według utartego poglądu, przypuszczamy istnienie równych ilości elektryczności dodatniej i ujemnej, które się wzajemnie równoważą (rys. 577); pocieranie sprawia tylko rozdział obu elektryczności już istniejących (hipoteza dwu fluidów elektrycznych, Symmer 1759).

Podług nowo powstałej teorji elektronowej istnieje tylko elektryczność ujemna w postaci t. zw. „atomów elektrycznych" czyli *elektronów* (pt.), t. j. ujemnych nabojów elektrycznych o masie znikomo małej. Odszczepienie tych nabojów od zwykłych atomów, np. przy pocieraniu ciał, czyni te atomy dodatnio elektrycznymi; atom zaś w połączeniu z odpowiednią ilością elektronów nie okazuje elektryczności, czyli jest obojętny.

5. Potencjał elektryczny. Wszelkie ciała na ziemi mają pewne wyniesienie, pewną temperaturę; podobnież mają pewien stan elektryczny, czyli *potencjał*. Pod nazwą potencjału w ogólności rozumiemy pewien stan ciała, przy którym ono zawiera zasób energji w jakiejbądź postaci, np. ciało wzniesione, ciało ogrzane.

Za zero potencjału elektrycznego można przyjąć pewien dowolny stan elektryczny ciała; za ciało takie obrano kulę ziemską.

Potencjał elektryczny ziemi = 0. Dwa rodzaje elektryczności można pojmować w ten sposób, że ciało naelektryzowane dodatnio ma potencjał wyższy od ziemskiego, naelektryzowane ujemnie ma potencjał niższy, ciała obojętne mają potencjał taki jak ziemia, t. j. 0.

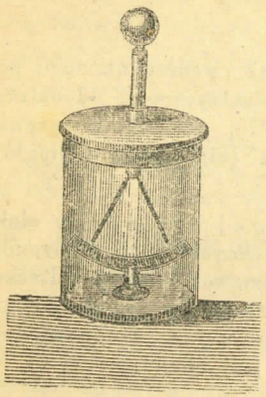
Wyładowanie elektryczne polega na wyrównaniu się potencjałów; odbywa się między ciałami o przeciwnych znakach elektrycznych, t. j. jednym naelektryzowanym dodatnio, drugim ujemnie, albo między ciałem, naelektryzowanym jakkolwiekbądź, a ziemią.

Porównania. Za zero poziomu przyjęto powierzchnię morza; odtąd w górę mierzy się wysokość, w dół głębokość. Jeżeli pierwszą oznaczymy znakiem +, np. góra wysokości + 600 m, drugą oznacza znak — , np. głębokość morza — 600 m.

Za zero temperatury, t. j. poziomu cieplnego, przyjęto temperaturę topniejącego lodu; stąd pochodzą stopnie ciepła (+) i zimna (—).

Woda płynie zawsze z góry na dół, t. j. od poziomu wyższego do niższego, wreszcie do poziomu oceanu. Ciepło rozchodzi się od ciała cieplejszego do zimniejszego.

6. Elektroskop służy do okazania i porównywania stanu elektrycznego. Najprostszy jest *elektroskop listkowy* (rys. 576), który się składa z dwu listków złota malarskiego lub glinu (aluminjum), zawieszonych na metalowym pręciku i zawartych w bańce szklanej. Ciało naelektryzowane, dotknięte do pręcika, udziela mu i listkom elektryczności, wskutek czego listki się rozchylają; wielkość odchylenia stanowi o wysokości potencjału.



Rys. 576.
Elektroskop.

Elektroskop z podziałką do oznaczania potencjału zowie się *elektrometrem*; składa się zwykle z jednego tylko paska ruchomego, zawieszonego obok stałego pręcika (rys. 585).

Elektrometr odgrywa podobną rolę względem elektryczności, jak termometr dla ciepła. Termometrem nie oznaczamy ilości ciepła, ale stan cieplny czyli temperaturę; elektrometrem nie oznaczamy ilości naboju elektrycznego, ale jego stan elektryczny czyli potencjał.

7. Przewodnictwo elektryczne. Już samo odchylenie listków elektroskopu przekonywa, że metal rozprowadza elektryczność: rozchodzi się ona tu po pręciku i listkach.

Łącząc elektroskop za pomocą rozmaitych materji z ciałem naelektryzowanym, dostrzeżemy odchylenie listków natychmiast, albo powoli, albo wcale. Zatym przewodnictwo elektryczne materji, podobnie jak przewodnictwo cieplne, bywa rozmaite; stąd podział materji na *przewodniki* i *nieprzewodniki* elektryczności.

Nieprzewodnikami oddzielamy ciała, podlegające elektryzacji, od ziemi, jako też od innych ciał naelektryzowanych, aby je uchronić od straty lub dopływu elektryczności; zabezpieczenie takie zowie się *izolacją*.

Przewodnictwo elektryczne tłumaczy, czemu nie wszystkie ciała można naelektryzować przez tarcie, trzymając je np. w ręku, lub kładąc na stole; stan elektryczny takich ciał nie może być różny od stanu ziemi, t. j. potencjał ich jest zerem; wyrażamy to przystępniej, mówiąc, że elektryczność uchodzi do ziemi.

Metale są najlepszymi przewodnikami elektryczności, zwłaszcza srebro i miedź, dalej węgiel, a w mniejszym stopniu woda naturalna i ciała wilgotne, stąd ciało ludzkie, ziemia. Do najgorszych przewodników czyli nieprzewodników należy szkło, żywica, guma (kauczuk i gutaperka), siarka, jedwab, woda chemicznie czysta. Wogóle jednak niema doskonałych nieprzewodników; zwłaszcza materje organiczne, jak suche drzewo, papier, słoma, bawełna i t. p., są miernymi przewodnikami.

Dokładne oznaczenie przewodnictwa odbywa się za pomocą prądu elektrycznego; p. t. „Opór elektryczny".

§ 106. Nabój elektryczny.

1. Siła oddziaływania nabojów elektrycznych. O *ilości elektryczności* czyli *naboju elektrycznym* ciała wnosimy z siły, z jaką ciało to przyciąga lub odpycha inne ciało elektryczne.

Za jednostkę bezwzględną naboju, czyli *jednostkę elektrostatyczną* (*ES*), przyjęto taką ilość elektryczności, która na równą sobie działa w odległości 1 cm siłą 1 dyny. Do pomiarów technicznych jednostka powyższa jest zbyt mała, stąd w praktyce jednostka naboju czyli ilości elektrycznej ma wartość 3 miljardy razy większą i zowie się *kulombem*.

Kulomb $= 3 \cdot 10^9$ jednostek *ES*.

Siła wzajemnego oddziaływania dwu ciał elektrycznych jest w stosunku prostym do iloczynu ich nabojów, a odwrotnym do kwadratu odległości (prawo Coulomba, 1785):

$$\left.\begin{matrix}\text{przyciąganie}\\ \text{lub}\\ \text{odpychanie}\end{matrix}\right\} P = \pm \frac{e_1 \cdot e_2}{r^2}.$$

(P wyrażone w dynach, e_1 i e_2 w jedn. *ES*, r w cm).

Znak + odnosi się do odpychania, znak — do przyciągania (dlaczego?).

Tak więc, prawo działania ilości elektryczności wyraża się wzorem takim samym, jak ilości magnetyzmu (§ 103) i mas materjalnych (§ 70); stąd ilość elektryczności zowie się inaczej *masą elektryczną*.

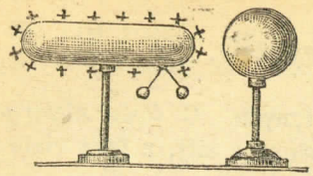
Zakładając w tym wzorze $e_1 = e_2$, $r = 1$ cm, $P = 1$ dyna, otrzymamy $e_1 = e_2 = 1$, t. j. wartość jednostki *ES*.

Wymiar naboju elektrycznego otrzymuje się z uwzględnienia $e_1 = e_2 = e = \sqrt{P \cdot r^2}$; ponieważ wymiar siły $P = LMT^{-2}$, wymiar odległości $r = L$, wypada:

$$\left.\begin{matrix}\text{wymiar naboju}\\ \text{czyli ilości el.}\end{matrix}\right\} e = L^{3/2} M^{1/2} T^{-1}. \qquad \text{jedn. } ES = cm^{3/2} g^{1/2} sek^{-1}.$$

Doświadczalnie można stwierdzić prawo Coulomba za pomocą wagi skręceń (rys. 365) albo wagi podobnej do magnetycznej (rys. 360); są to doświadczenia nader subtelne.

2. Konduktor elektryczny. W doświadczeniach wypada często zebrać znaczną ilość elektryczności, czyli zmieścić nabój elektryczny na niewielkiej stosunkowo powierzchni ciała. Taki zbiornik elektryczności statycznej nazywa się *konduktorem*; ma zwykle postać kuli lub walca o końcach zaokrąglonych, osadzonego na trzonku izolującym, i wyrabia się z metalu (rys. 577).



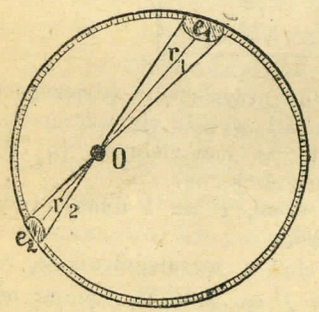
Rys. 577. Konduktory.

Ażeby uwidocznić, czy konduktor jest naelektryzowany i w jakim stopniu, zawiesza się u dołu podwójne wahadełka elektryczne, t. j. pary kulek bzowych na nitkach przewodzących, np. bawełnianych lub metalowych.

3. Miejsce naboju elektrycznego. Elektryczność gromadzi się tylko na powierzchni przewodników, nigdy zaś w ich masie lub na ścianach wewnętrznych. Wynika to już z prawa odpychań elektrycznych: gdyby nabój był rozproszony w ciele, jego części musiałyby skutkiem odpychania wydostać się na powierzchnię. Jeżeli powierzchnia ciała posiada części miejscami wypukłe i wklęsłe, elektryczność gromadzi się tylko na wypukłościach.

Jakakolwiek ilość elektryczności, zawarta wewnątrz ciała, np. kuli metalowej nie oddziaływa wcale na powierzchnię, i nawzajem. Całe działanie ujawnia się tylko na zewnątrz.

Dowód teoretyczny (rys. 578). Niech wewnątrz kuli naelektryzowanej mieści się w O nabój elektryczny e jednostek ES. Niech każdy cm^2 kuli mieści nabój 1 ES. Naprzeciwko dowolnej powierzchni e_1 cm^2 znajduje się odpowiednia powierzchnia e_2; z podobieństwa zaś stożków e_1O i e_2O, których powierzchnie e_1 i e_2 można obrać dowolnie małe, wynika.



Rys. 578.

$$e_1 : e_2 = r_1^2 : r_2^2$$

a stąd $$\frac{e_1}{r_1^2} = \frac{e_2}{r_2^2}.$$

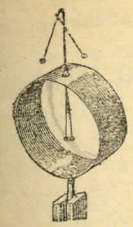
Ponieważ e_1 i e_2 wyrażają zarazem naboje w jednostkach ES, z pomnożenia przez wartość naboju e wynika wzór Coulomba

$$\frac{e \cdot e_1}{r_1^2} = \frac{e \cdot e_2}{r_2^2} \text{ czyli } P_1 = P_2$$

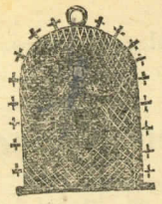
t. j. oddziaływania między nabojem e i e_1 a przeciwległym nabojem e i e_2, są równe i zarazem przeciwne, znoszą się więc nawzajem.

Doświadczenie (rys. 579). Elektryzując szeroką a niewielką obręcz z blachy, zauważymy, że wahadełka na zewnątrz jej się rozchylają, a wewnątrz nie poruszają się wcale.

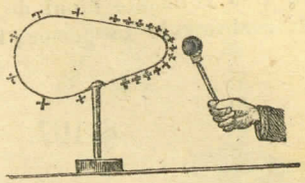
Zastosowanie. *Osłona elektryczna* Faraday'a (ryt. 580). Siatka metalowa, połączona z konduktorem choćby najmocniej naelektryzowanym, nie zdradza na stronie wewnętrznej ani śladu elektryczności; przekonywa o tym elektroskop, wstawiony do siatki i połączony z nią drutem.



Rys. 579.



Rys. 580. Osłona elektryczna.



Rys. 581. Gęstość elektryczna.

4. Gęstość elektryczną stanowi ilość elektryczności na każdy cm^2. Na kuli gęstość jest wszędzie jednakowa, czyli nabój elektryczny rozpostarty jednostajnie po całej powierzchni. Inne ciała mają gęstość niejednostajną, a mianowicie największą na miejscach najbardziej wypukłych.

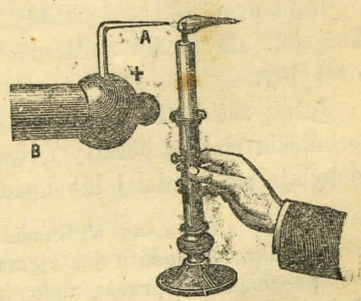
Skoro nabój e kulombów pokrywa równomiernie powierzchnię q cm^2,

$$\text{gęstość el. } d = \frac{e}{q} \; {}^{kul}/_{cm^2}.$$

Gdyby np. przypuścić, że na konduktorze postaci jajowatej (rys. 581) elektryczność ma wszędzie jednakową gęstość, to na grubszej stronie zebrałoby się więcej elektryczności, a zatym reszta byłaby silniej odpychana ku wierzchołkowi; musiałaby się nagromadzić tu obficiej, czyli osiągnąć większą gęstość..

Doświadczenie potwierdza to z łatwością. Do konduktora rys. 581 dotyka się kuleczką metalową na trzonku izolującym, czyli t. zw. *kulką próbną*, raz na grubszym, drugi raz na cieńszym końcu, i każdą próbkę zaczerpniętej w ten sposób elektryczności przenosi się osobno na elektroskop. Odchylenie przy ostatniej próbce jest większe, niż przy pierwszej.

5. Rozbrojenie przez ostrza. Na ostrych krawędziach, rogach, kolcach zagęszcza się elektryczność tak obficie, że zetknięte cząstki powietrza raptownie się elektryzują i unoszą z ciała nabój elektryczny; jest to t. zw. *rozbrajająca zdolność ostrzy*. Nawzajem, ostrza jakby wchłaniają nabój elektryczny do przewodnika, skoro w pobliżu znajduje się ciało naelektryzowane: *działanie ssące ostrzy*.



Rys. 582. Wypływ elektryczności.

Niepodobna więc naelektryzować przewodników, mających ostre brzegi lub śpiczastych; dlatego przyrządy elektryczne mają kształty zaokrąglone.

Wiatr elektryczny (rys. 582) w kierunku kolca, spowodowany pędem cząstek powietrza naelektryzowanych, można okazać przez odchylenie płomienia albo zbliżenie dłoni do kolca.

Na rozbrajaniu za pomocą kolców polegają *piorunochrony* (§ 109, art. 6).

§ 107. Pole elektryczne.

1. Pole elektryczne. Przestrzeń, w której ciało naelektryzowane okazuje mniej lub więcej wyraźne działanie na inne ciała, zowie się *polem elektrycznym*. Wartość siły, działającej w takim polu na dodatnią jednostkę elektryczności, stanowi *natężenie pola*.

Kierunek siły w polu elektrycznym zowie się *linją siły elektrycznej*; jest to kierunek, w jakimby się poruszała swobodna jednostka dodatniej elektryczności.

W *polu jednostajnym* linje sił przebiegają w jednakowej od siebie odległości i kierunku, czyli równolegle; panuje więc wszędzie to samo natężenie pola.

Teoretycznie obejmuje pole elektryczne obszar nieskończony.

Wogóle pole elektryczne posiada własności podobne do pola magnetycznego (§ 103); daje ono podobny obraz linji sił.

Natężenie pola elektrycznego można więc wyrazić ilością linji sił, przechodzących przez 1 cm^2 (Faraday).

2. Indukcja elektrostatyczna albo influencja. Działanie pola elektrycznego objawia się nie tylko w przyciąganiu lub odpychaniu nabojów elektrycznych, ale i we wpływie naboju elektrycznego na pobliskie ciała obojętne, bez zetknięcia, o ile ciała te są przewodnikami.

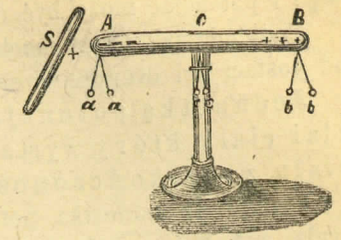
Wpływ ciała naelektryzowanego na przewodniki obojętne zowie się *influencją* albo *indukcją elektrostatyczną*: po stronie najbliższej do ciała naelektryzowanego występuje na przewodniku elektryczność przeciwna, po drugiej stronie jednoimienna.

Influencję okazuje każdy elektroskop: nie potrzeba mianowicie dotknięcia, ale dość zbliżenia jakiegoś ciała potartego, ażeby listki się rozchyliły.

Jeżeli zaś listki elektroskopu już są odchylone, wskutek niedawnego dotknięcia ciałem potartym, to za zbliżeniem jakiegoś ciała elektrycznego odchylają się bardziej lub opadają, zależnie od rodzaju elektryczności.

Objaw ten można wytłumaczyć rozdziałem naturalnej elektryczności przewodnika na dodatnią i ujemną, z których jedna, mianowicie przeciwna, jest przyciągana przez ciało naelektryzowane, druga odpychana (§ 105). Istnieje więc podobieństwo między indukcją elektryczną a magnetyczną (§ 103).

Doświadczenie. Ciało S (rys. 583), naelektryzowane np. dodatnio, zbliża się do konduktora walcowego, opatrzonego na końcach i pośrodku wahadełkami a, b, c; odchylają się tylko wahadełka końcowe a i b. Za dotknięciem inną, małą laseczką szklaną, naelektryzowaną, można sprawdzić, że koniec A mieści elektryczność —, koniec B elektryczność + (wahadełka bb rozchylają się bardziej, wahadełka aa opadają).



Rys. 583. Influencja.

Dotknięcie ręką do konduktora sprawia opadnięcie tylko wahadełka w B; elektryczność dodatnia, jako odpychana, uchodzi do ziemi, elektryczność zaś ujemną w A wiąże ładunek dodatni na ciele pobliskim.

Po usunięciu ciała elektrycznego wszystkie wahadełka się odchylają, gdyż uwolniona elektryczność (—) rozchodzi się po całej powierzchni konduktora.

3. Praca i sprawność elektryczna. Przy zbliżaniu naboju dodatniego do ciała również nabitego zachodzi odpychanie, które trzeba pokonać pewną siłą, czyli wykonać pewną pracę; zowiemy ją *pracą elektryczną*, gdyż odbywa się w polu elektrycznym. Pracę taką można mierzyć w ergach lub kilogramometrach. Do celów jednak technicznych obrano jednostkę, wynoszącą 10 miljonów ergów, zwaną *dżulem* (od nazwiska fizyka angielskiego Joule).

Praktyczną jednostką pracy elektrycznej jest
$$dżul = 10^7 \text{ ergów} = \frac{1}{9{,}81} \text{ kgm.}$$

Stąd wynika praca elektryczna w ciągu 1 sekundy, czyli sprawność elektryczna, której jednostkę w technice nazwano *watem* (od nazwiska Watta, wynalazcy maszyny parowej).

Praktyczną jednostką sprawności elektrycznej jest
$$wat = \frac{\text{dżul}}{\text{sek}} = 10^7 \text{ erg/sek} = \frac{1}{736} \text{ HP.}$$

Do większych sprawności służy *kilowat* = 1000 watów = 1,36 HP (okr. $1^1/_3$ HP).

4. Miara potencjału elektrycznego. Stan elektryczny ciała czyli potencjał można mierzyć pracą, czy to zużytą, czy otrzymaną, gdy nabój przesuwa się w polu elektrycznym. Całkowita ilość pracy w sprowadzeniu naboju z danego ciała aż do granicy pola, t. j. nieskończoności lub powierzchni ziemi, bądź odwrotnie, stanowi wartość potencjału.

Praca może być dodatnia lub ujemna, stosownie do tego, czy nabój porusza się zgodnie z kierunkiem linji sił, czy przeciwnie. Odpowiednio więc i potencjał może być dodatni lub ujemny.

Podobnie jak praca mechaniczna, zarówno i elektryczna nie zależy od postaci ani długości drogi przebytej (por. § 24, art. 4).

Jednostką potencjału bezwzględną jest taki potencjał ciała, który wymaga pracy 1 erga na dostarczenie ciału z nieskończoności naboju + 1 *ES*.

Praktyczna jednostka potencjału powstała przez zamianę erga na dżula, a 1 *ES* na kulomba.

Jednostkę praktyczną potencjału stanowi *wolt*: jest to potencjał ciała, który wymaga pracy 1 dżula na dostarczenie ciału z nieskończoności naboju 1 kulomba.

Gdy praca wynosi L dżulów na dostarczenie e kulombów, to na 1 kulomba wartość pracy czyli

$$\text{potencjał } V = \frac{L}{e} = \frac{\text{praca}}{\text{nabój}}.$$

Stąd

$$\boxed{\text{praca elektr. } L = e \,.\, V = \text{nabój} \times \text{potencjał}}$$

$$\text{dżul} = \text{kulomb} \times \text{wolt}.$$

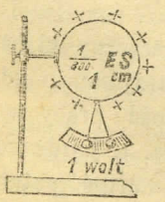
Porównania: praca mechaniczna = ciężar × wysokość; kilogramometr = kilogram × metr.

Z podstawienia wartości bezwzględnych dżula i erga wynika:

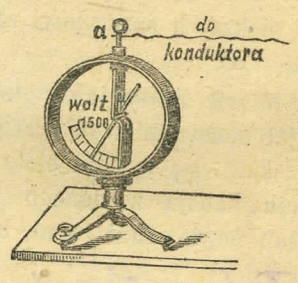
$$\boxed{\textit{wolt} = \tfrac{1}{300} \text{ jednostki bezwzgl. } ES \text{ potencjału.}}$$

Mianowicie, gdy $L = 1$ erg, $e = 1$ *ES*, to $V = 1$ jednostka bezwzględna potencjału. Gdy $L = 1$ dżul $= 10^7$ jedn. bezwzgl., $e = 1$ kulomb $= 3.10^9$ jedn. bezwzgl., to $V = 10^7 : (3.10^9) = \frac{1}{300}$ jedn. bezwzględnej.

Zobrazować można wolt jako potencjał kuli o promieniu 1 cm, nabitej $\frac{1}{300}$ jednostki *ES* (rys. 584).



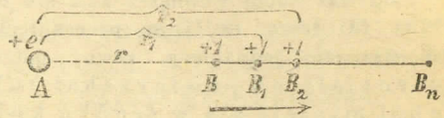
Rys. 584.



Rys. 585. Elektrometr bezwzględny.

Pomiar praktyczny potencjału odbywa się najdogodniej za pomocą *elektrometru bezwzględnego* Brauna (rys. 585): zawiera on pionowy słupek nieruchomy, od którego odchyla się listek ruchomy, wskazując wartości potencjału w woltach; podziałkę sporządza się drogą doświadczalną, najlepiej przez połączenie z baterją galwaniczną o wysokim napięciu (pt.).

5. Matematyczny wyraz potencjału. Niech w punkcie A (rys. 586) znajduje się nabój + e jedn. *ES*; odpycha on nabój + 1 *ES* w punkcie B, posuwając go przez B_1, B_2... B_n do nieskończoności. Ażeby sprowadzić + 1 do położenia B, trzeba wykonać pracę, która wyrazi potencjał naboju e w odległości $AB = r$.



Rys. 586.

Dzieląc $B \ldots B_n$ na bardzo małe odcinki BB_1, $B_1B_2 \ldots$, oblicza się prace częściowe na każdym: mianowicie, podług prawa Coulomba

siła		praca częściowa	
w $B = \frac{e \,.\, 1}{r^2}$	średnio $\frac{e}{rr_1}$	od B do B_1	$= \frac{e}{rr_1}(r_1 - r) = e\left(\frac{1}{r} - \frac{1}{r_1}\right)$
w $B_1 = \frac{e \,.\, 1}{r_1^2}$			
w $B_2 = \frac{e \,.\, 1}{r_2^2}$	„ $\frac{e}{r_1 r_2}$	od B_1 do B_2 podobnież	$e\left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2}\right)$
. . . . .	. . . . .	. . . . .	. . . . .
w $B_n = \frac{e \,.\, 1}{r_n^2}$	„ $\frac{e}{r_{n-1} r_n}$	od B_{n-1} do B_n „	$e\left(\frac{1}{r_{n-1}} - \frac{1}{r_n}\right)$
		praca ogólna	$= e\left(\frac{1}{r} - \frac{1}{r_n}\right)$

Skoro $r_n = \infty$, wypada $1/r_n = 0$, a praca wyraża

$$\boxed{\text{potencjał } V = \frac{e}{r}.}$$

Potencjał w danej odległości od ciała naelektryzowanego jest wprost proporcjonalny do wielkości naboju, a odwrotnie do odległości.

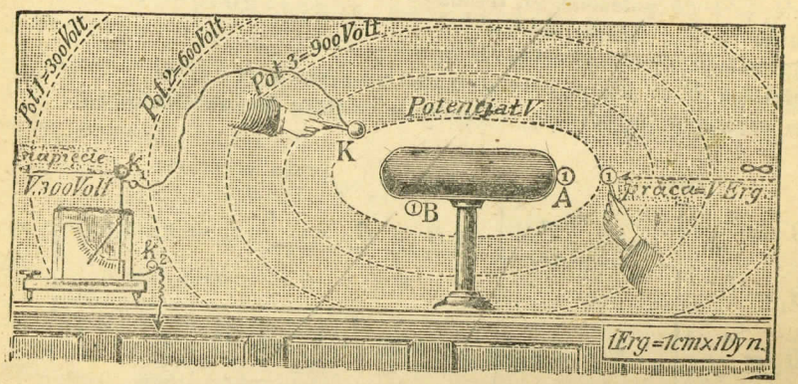
Wymiar potencjału otrzymuje się stąd, uwzględniając wymiar $e = L^{3/2}M^{1/2}T^{-1}$ i $r = L$:

$$\text{wymiar potencjału} = L^{1/2}M^{1/2}T^{-1} \qquad \text{jedn.} = cm^{1/2}\, g^{1/2}\, sek^{-1}$$

Albo z określenia (art. 4): potencjał = praca/nabój, wynika również wymiar $L^2MT^{-2} : L^{3/2}M^{1/2}T^{-1} = L^{1/2}M^{1/2}T^{-1}$.

6. Potencjał kuli. Nabój e na powierzchni konduktora kulistego o promieniu r działa na jego środek tak, iż nabój ε każdej cząstki powierzchownej wytwarza w środku potencjał ε/r; suma więc tych potencjałów częściowych daje potencjał ogólny: $\Sigma \frac{\varepsilon}{r} = \frac{e}{r}$.

Ponieważ nabój wewnątrz kuli nie doznaje żadnej siły (§ 106), nie potrzeba tu pracy do jego przesunięcia. Zatym potencjał wewnątrz kuli jest wszędzie jednakowy, równy potencjałowi na powierzchni; wartość potencjału na powierzchni kuli jest taka, jak gdyby cały nabój mieścił się w środku kuli.



Rys. 587. Poziomy elektryczne.

7. Poziomy elektryczne. Na całej powierzchni przewodnika naelektryzowanego, czyli posiadającego jakiś potencjał, panuje potencjał jednakowy; inaczej elektryczność musiałaby przepływać z miejsca na miejsce aż do wyrównania potencjału. Przesunięcie pewnego naboju elektrycznego, np. 1 ES, po powierzchni przewodnika, np. od A do B (rys. 587), nie wymaga żadnej pracy.

Dokoła przewodnika muszą również istnieć powierzchnie zamknięte, z których każda posiada jednakowy potencjał, w całej swej rozciągłości, od jednej zaś do drugiej potencjał stopniowo ubywa (por. rys. 587). Powierzchnie o jednakowym potencjale stanowią *poziomy elektryczne.*

Powierzchnie poziomów elektrycznych są prostopadłe do linji sił. Praca elektryczna polega na przeniesieniu naboju z jednego poziomu do innego; praca ta jest miarą różnicy potencjałów.

Porównania. Poziom stołu i podłogi: do poruszania kulki poziomo, t. j. prostopadle do kierunku siły ciężkości, nie potrzeba pracy (teoretycznie, t. j. z pominięciem tarcia), podniesienie zaś kulki wymaga pracy, i miarą tego podniesienia może być praca włożona. — Poziomy wody w jeziorach górskich. — Powierzchnie równego ciśnienia barometrycznego i ich obraz graficzny: izobary (rys. 160).

8. Napięcie elektryczne. Różnica potencjałów pomiędzy ciałem a jego otoczeniem wytwarza na powierzchni ciała *napięcie elektryczne*, t. j. dążność do wyrównania różnicy potencjałów, czyli do *wyładowania elektrycznego* (rozbrojenia). Wyładowaniu stoi na przeszkodzie izolacja; ponieważ jednak doskonałych izolatorów niema, elektryczność zawsze rozprasza się prędzej lub później.

Miarą napięcia, jak i potencjału, jest *wolt.*

Napięcie $E = V_1 - V_2$ = różnica potencjałów.

Z powyższego wynika, że napięcie danego ciała względem ziemi stanowi jego potencjał.

Porównania. Prężność gazów i ciśnienie ich na ściany naczynia. — Naprężenie cięciwy łuku, albo sprężyny w materacu i jej ciśnienie.

Napięcie elektryczności w ciałach posiada pewną granicę, to jest każde ciało daje się naelektryzować, np. przy pocieraniu danym ciałem, tylko do pewnego potencjału, zależnego od rodzaju ciał, ich powierzchni, oraz środowiska. W danych więc warunkach osiąga się najwyższy potencjał, którego przekroczyć niepodobna; dalsze pocieranie byłoby bezcelowe.

Przykład. Pręt kauczukowy, pocierany dobrą wełną, nabija się do napięcia 30000 woltów; dalsza praca tarcia przemienia się na ciepło, to jest rozgrzewa kauczuk, ale napięcia nie podnosi. Można tym prętem naelektryzować setki konduktorów, pocierając go i dotykając naprzemian do każdego, ale żaden z konduktorów nie osiągnie wyższego nad 30000 w. napięcia, chociaż nabijany z innego źródła mógłby posiąść wyższe napięcie.

Porównania. Igłę można namagnesować, przez pocieranie magnesem, tylko do pewnego stopnia. — Wodę można ogrzać, pod ciśnieniem zwykłym, tylko do 100° C. Ciała, zanurzone do tej wody, osiągną temperaturę najwyżej 100°.

§ 108. Pojemność elektryczna.

1. Pojemność elektryczna. Aby osiągnąć jednakowy potencjał w przewodnikach o kształcie podobnym, ale rozmaitej wielkości, potrzeba różnych nabojów: im przewodnik jest większy, tym zmieści więcej elektryczności, przy tym samym potencjale.

Pojemność elektryczną stanowi ilość elektryczności, potrzebna do zmiany jego potencjału o jednostkę. W układzie *CGS* za jednostkę pojemności przyjęto *farad*: jest to pojemność przewodnika, w którym nabój 1 kulomba podnosi potencjał o 1 wolt. Zatym pojemność wyraża się stosunkiem naboju do potencjału:

$$\text{pojemność } C = \frac{e}{V} = \frac{\text{nabój}}{\text{potencjał}}$$

$$\text{farad} = \frac{\text{kulomb}}{\text{wolt}}.$$

Ponieważ farad jest zbyt wielką pojemnością, do pomiarów praktycznych służy *mikrofarad* = 0,000 001 farada.

Wartość farada i mikrofarada wynosi odpowiednio:

$$\text{farad} = \frac{3 \cdot 10^9}{\frac{1}{300}} = 9 \cdot 10^{11} \quad \text{jedn. } ES.$$

$$\text{mikrofarad} = 9 \cdot 10^5 \quad \text{jedn. } ES.$$

Ze wzoru pojemności wynika:

$$\text{nabój } e = C \cdot V = \text{pojemność} \times \text{potencjał}.$$

Ilość elektryczności, potrzebna do nabicia przewodnika, wzrasta w miarę jego pojemności i potencjału: a) w tym samym ciele nabój jest proporcjonalny do potencjału; b) w dwu ciałach o tym samym potencjale nabój jest proporcjonalny do ich pojemności.

Porównanie. Im więcej powietrza napompujemy do obręczy gumowej, tym silniejsze będzie naprężenie gumy. Do wielkich obręczy, np. powozowych, trzeba więcej powietrza, aby otrzymać to samo naprężenie, co mniejszych, np. rowerowych. Ilość powietrza w gumach zależy od ich objętości i ciśnienia, pod jakim pompa wtłacza powietrze:

$$\text{ilość powietrza} = \text{objętość} \times \text{ciśnienie}.$$

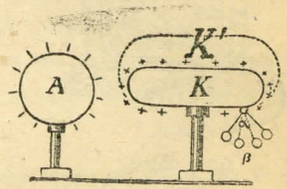
Wymiar pojemności otrzymuje się z uwzględnienia wymiaru $e = L^{3/2}M^{1/2}T^{-1}$ oraz $V = L^{1/2}M^{1/2}T^{-1}$:

$$\text{wymiar pojemności} = L \qquad \text{jednostka} = cm.$$

Elektryczna więc pojemność ciał ma wymiar linjowy, centymetr; mierzy się liczbą centymetrów.

1. Pojemność konduktora wzrasta w pobliżu ciała połączonego z ziemią, lub naelektryzowanego przeciwnie. Objaw ten jest wynikiem influencji. Wystarczy np. zbliżenie ciała naelektryzowanego do muru, albo zbliżenie doń ręki, aby powiększyć pojemność ciała, a tym samym zmniejszyć jego potencjał.

Wyjaśnienie. Przez zbliżenie konduktora naelektryzowanego do przewodnika, połączonego z ziemią, występuje na tym ostatnim elektryczność przeciwna, która wiąże, czyli jakby równoważy znaczną część elektryczności konduktora, tak iż może on przyjąć jeszcze nową ilość elektryczności. Jeżeli zaś jej nie otrzymuje, potencjał konduktora spada, gdyż ubyło mu wolnej elektryczności.



Rys. 588.

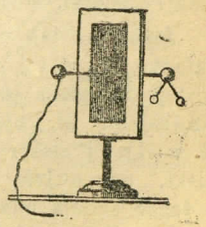
Podobny objaw ma miejsce, gdy w bliskości konduktora znajdzie się inny konduktor, i oba są nabite przeciwną elektrycznością (rys. 588). Wahadełka na konduktorze K opadają; dzieje się tak, jak gdyby konduktor stał się większy, np. K'.

3. Pojemność kuli. Nabój e wytwarza na powierzchni kuli potencjał $V = e/r$ (§ 107, art. 6); skąd $e = Vr$. Ponieważ $e = VC$, wynika $C = r$, t. j. pojemność elektryczna kuli równa się liczebnie jej promieniowi.

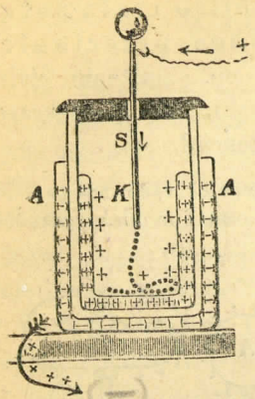
Przykłady. 1) Jak wielki musiałby być konduktor kulisty o pojemności 1 mikrofarada? Odp. Mikrofarad $= 9.10^5$ jednostek ES pojemności $=$ liczebnie 9.10^5 cm; kula o pojemności 1 mikrofarada miałaby promień 9.10^5 cm $= 9$ kilometrów, czyli byłaby niewykonalna praktycznie.

2) Ile wynosi pojemność elektryczna kuli ziemskiej? Odp. Promień ziemi $= 6370$ km, kula o pojemności mikrofarada ma promień 9 km; stąd pojemność ziemi $= 6370 : 9 = 707$ mikrofaradów, czyli mniej niż $\frac{1}{1000}$ farada.

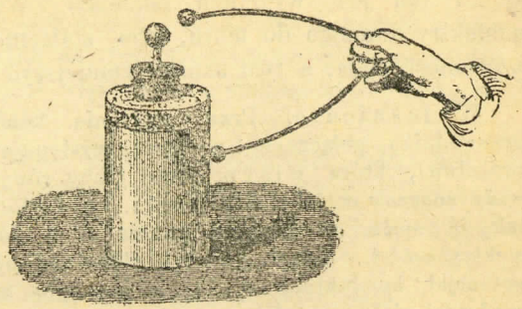
4. Kondensatory elektryczne. Przyrząd do osiągnięcia znacznej pojemności przy małych wymiarach stanowi *kondensator elektryczny*; sprawia on jakby zgęszczenie elektryczności i składa się wogóle z dwu przewodników, przedzielonych nieprzewodnikiem. Kondensatorem jest np. szyba szklana, oklejona z obu stron cynfolją (rys. 589); butelka napełniona wodą i trzymana w ręku.


Rys. 589.
Kondensator elektryczny.

Praktyczną postać kondensatora stanowi *butelka lejdejska* (rys. 590 w przekroju, rys. 591 wygląd zewnętrzny); jest to słój szklany, oklejony w środku i z wierzchu cynfolją i opatrzony pokrywką izolującą, przez którą przechodzi aż do dna pręt, zakończony u góry gałką.



Rys. 590.



Butelka lejdejska. Rys. 591.

Nabijanie butelki uskutecznia się przez połączenie jej gałki ze źródłem elektryczności, a zewnętrznej okładki z ziemią, np. trzymając butelkę w ręku. Wyładowanie oznajmia się iskrą (pt. poniżej) za połączeniem z sobą obu okładek, np. drutem, łańcuszkiem, albo też rękoma.

Ażeby uniknąć wstrząśnień ciała, przykrych i nawet niebezpiecznych posługujemy się *rozbrajaczem* (rys. 591), t. j. pałąkiem z grubego drutu, zakończonym kulkami.

Objaśnienie. Zgęszczenie elektryczności w butelce jest wynikiem influencji. Gdyby nie było okładki zewnętrznej, powierzchnia cynfonji wewnętrzna K byłaby zwykłym konduktorem, który można nabić pewną ilością elektryczności, stosunkowo niewielką.

Jeżeli na tak naładowaną okładkę K, np. dodatnio, nasunąć następnie okładkę A, w tej ostatniej występują obie elektryczności, z których ujemna zostaje związana przez dodatnią okładki K, dodatnia zaś uchodzi do ziemi. Nawzajem, el. ujemna zewnętrzna wiąże część dodatniej wewnętrznej, tak iż wolnej elektryczności dodatniej będzie niewiele, i potencjał jej będzie niski, mianowicie daleko niższy, aniżeli źródła nabijającego. Można więc z tegoż źródła udzielić dalej + el. okładce K; ta wydobywa znów odpowiednią ilość — el. w okładce A, która wiąże część przybytku + el. w K i tak dalej, aż wolna elektryczność okładki K posiędzie napięcie takie, jakie ma źródło elektryczne, wtedy bowiem przypływ ustaje. W ten sposób można w kondensatorze zebrać kilkadziesiąt i więcej razy elektryczności, niż na tej samej powierzchni pojedyńczej.

5. Siedlisko naboju w kondensatorach. Nabój elektryczny w kondensatorze mieści się nie na okładce metalowej, ale na powierzchni izolatora czyli *djelektryka*, dzielącego okładki. Okładki służą właściwie do rozprowadzania naboju w kondensatorze.

Przekonywa o tym kondensator płaski (rys. 591) o okładkach odejmowanych, albo butelka lejdejska rozbierana. Po nabiciu kondensatora oddala się jego okładki i rozbraja się je przez połączenie z ziemią; po następnym zestawieniu kondensator okazuje się znowu nabity.

6. Pojemność kondensatora jest tym większa, im większą ma powierzchnię okładek, a mniejszą grubość djelektryka; nadto zależy od właściwości djelektryka. Przy jednakowych np. warunkach, kondensator szklany nagromadza 5 razy więcej elektryczności, niż powietrzny, to jest zawierający powietrze między okładkami, zamiast szkła.

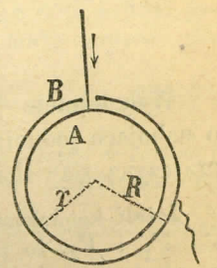
Liczba, wskazująca stosunek pojemności danej materji do pojemności powietrza, gdy jedna i drugie tworzą jednakowe kondensatory, zowie się *stałą djelektryczną* (D).

Wartość stałych djelektrycznych dla tej samej materji waha się dość znacznie wskutek wpływów rozmaitych, jak postać kondensatora, czas elektryzacji i in.; dla powietrza jest prawie taka sama, jak dla próżni. Średnio można przyjąć:

Stałe djelektryczne.

Powietrze i próżnia	1	Siarka	3
Kauczuk	2	Mika	4
Parafina	2	Szkło zwykłe	5
Szelak	3	Flint	8

Obliczenie pojemności dokonywa się najłatwiej dla *kondensatora kulistego* (rys. 592), czyli dwu powierzchni kulistych, spółśrodkowych, o promieniach R i r, przedzielonych bardzo cienką warstwą djelektryka o grubości $a = R - r$. Po wprowadzeniu naboju $+e$ na kulę wewnętrzną A, wywołuje on przez indukcję nabój $-e$ na kuli zewnętrznej B, połączonej z ziemią. Potencjał samej kuli A byłby e/r; że zaś potencjał kuli B wynosi $-e/R$, a to zarówno na powierzchni, jak wewnątrz, potencjał rzeczywisty kuli A jest $V = \frac{e}{r} - \frac{e}{R} = e \cdot \frac{R-r}{Rr}$.



Rys. 592.

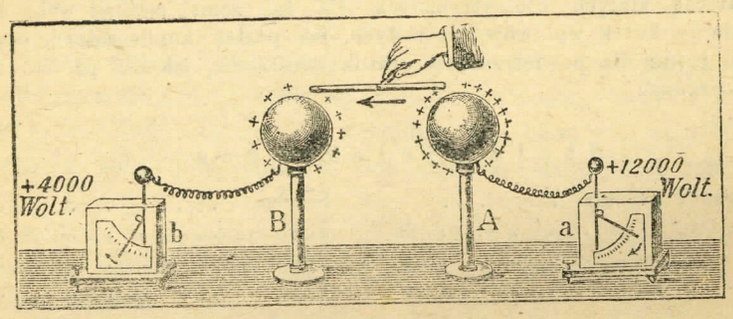
Uwzględniając $e = CV$, otrzymujemy $C = \frac{Rr}{R-r}$; wobec małej różnicy R i r można je zastąpić średnią geometryczną R^2, zatem $C = \frac{R^2}{a} = \frac{4\pi R^2}{4\pi a} = \frac{S}{4\pi a}$, gdzie S jest powierzchnią kuli. Wzór dotyczy kondensatora powietrznego; dla djelektryka o stałej D pojemność wyniesie D razy więcej.

pojemność kondensatora kulistego $C = D \cdot \frac{S}{4\pi a}$.

Pojemność wypada w jednostkach ES, jeżeli S i a są wyrażone w cm; dzieląc przez $9 \cdot 10^5$, otrzymujemy pojemność w mikrofaradach.

Wzór powyższy wskazuje, że pojemność kondensatora jest znacznie większa, niż kuli pojedyńczej, której wartość wynosiłaby R. Wzór stosuje się w przybliżeniu także do płaskich kondensatorów i butelek lejdejskich, których okładki wyprostowane można uważać jako części powierzchni kulistej o bardzo wielkim promieniu.

7. Wyrównanie napięcia w przewodnikach (rys. 593). Za połączeniem dwu przewodników naelektryzowanych, za pomocą jakiegoś przewodnika, następuje wyładowanie elektryczności w ten sposób, że z ciała o wyższym potencjale przechodzi pewna ilość elektryczności do drugiego ciała, aż potencjał obu się wyrówna. Zachodzi tu więc jakby chwilowy prąd elektryczny, który trwa, w razie przewodnika metalowego, niepochwytnie krótko.



Rys. 593. Wyrównanie napięcia.

Wyładowanie podobne odbywa się zarówno między przewodnikami o nabojach jednoimiennych, np. dodatnich, jak o nabojach przeciwnych; przyczyną zjawiska jest różnica potencjałów.

Jeżeli konduktory posiadają pojemności C_1 i C_2, a potencjały odpowiednio V_1 i V_2, to przed złączeniem miały razem nabój $C_1 V_1 + C_2 V_2$, po złączeniu, gdy potencjał obu $= V$, mają nabój $(C_1 + C_2) V$. Ponieważ obie ilości są równe, wypada

$$V = \frac{C_1 V_1 + C_2 V_2}{C_1 + C_2}.$$

(Por. wzór na średnią temperaturę mieszaniny, § 43, art. 7).

Doświadczenie (rys. 593). Niechaj konduktor A posiada potencjał wyższy niż B, co wskazują elektrometry. Z chwilą połączenia obu prętem metalowym, elektrometr a opada, b podnosi się, i oba wskazują potencjał jednakowy.

Przykład. Niechaj kula o promieniu 5 cm posiada potencjał 12 000 woltów, a kula o 3 cm potencjał 2000 w. Jaki potencjał osiągną obie kule po zetknięciu? Odp. Pierwsza z kul ma pojemność $C_1 = \frac{5}{300} ES$, druga $\frac{3}{300} ES$, zatym $(\frac{5}{300} . 12\,000 + \frac{3}{300} . 2000) : (\frac{5}{300} + \frac{3}{300}) = 8250$ woltów.

Zadania.

1. Dwie kulki o promieniu 1 cm znajdują się w odstępie 8 cm; jednę nabito do potencjału + 30 000 woltów, drugą do — 12 000 w. Jaką siłą kulki się przyciągają?

Rozw. Nabój pierwszej $e_1 = 12\,000 . \frac{1}{300} = 40\ ES$

„ drugiej $e_2 = 30\,000 . \frac{1}{300} = 100\ ES$

Przyciąganie $P = \frac{40 . 100}{8^2} = 63$ dyny $=$ okr. $\frac{1}{16}$ g.

2. Kula o promieniu 7 cm otrzymała nabój 5 jedn. ES. Jaki osiągnęła potencjał?

Rozw. Pojemność kuli $= 7$ jedn. bezwzgl. ES, nabój $= 5$ jedn.; ze wzoru $C = e/V$ wynika $V = e/C$, czyli $V = \frac{5}{7}$ jedn. bezwzgl. potencjału $= \frac{5}{7} . 300 = 214$ woltów.

3. Wahadło elektryczne składa się z dwu kulek o prom. $\frac{1}{2}$ cm, które się odpychają z odległości 6 cm siłą 0,09 g. Oznaczyć wysokość potencjału.

Rozw. Oznaczenie naboju: $\frac{e^2}{6^2} = 0{,}09 . 981$; stąd $e = 56\ ES$.

Oznaczenie potencjału x: Kulka $\frac{1}{2}$ cm ma pojemność $\frac{1}{2} . \frac{1}{300} ES$, zatym mieści przy x woltach $x . \frac{1}{2} . \frac{1}{300} = 56\ ES$; stąd $x = 33\,600$ woltów.

4. Konduktor o pojemności $\frac{1}{60} ES$ i potencjale + 15 000 woltów połączono z konduktorem o poj. $\frac{1}{100} ES$ i potencjale + 3000 woltów. Ile wynosi potencjał ostateczny?

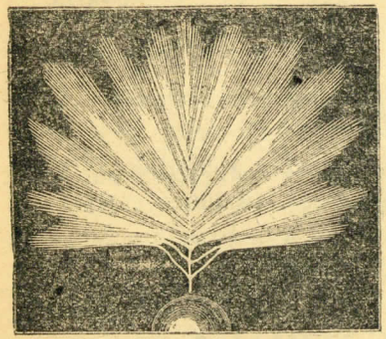
Odp. Ze wzoru art. 7 wynika $V = (\frac{1}{60} . 15000 + \frac{1}{100} . 3000) : (\frac{1}{60} + \frac{1}{100}) = 10\,500$ woltów.

5. Obliczyć pojemność butelki lejdejskiej ze szkła flintowego o średnicy 22 cm, wysokości okładek 30 cm i grubości szkła 3 mm, jeżeli stała dielektryczna flintu $= 8$. Odp. $8 . \frac{\pi . (11)^2 + 2\pi . 11 . 30}{4\pi . 0{,}3} = 0{,}0058$ mikrofarada.

§ 109. Wyładowania elektryczne.

1. Rodzaje wyładowania. *Wyładowanie* elektryczne polega na wyrównaniu się potencjałów. Zachodzi ono między dwoma ciałami, naelektryzowanymi czy to przeciwnie, czy też jednakowo, ale do różnej wysokości potencjału, albo między ciałem naelektryzowanym a ziemią; wogóle zachodzi wtedy, gdy istnieje różnica potencjałów czyli napięcie elektryczne.

Odróżniamy wyładowanie *powolne* lub *raptowne*. Pierwsze ma miejsce zawsze w ciałach naelektryzowanych, ponieważ niema doskonałej izolacji, i zowie się *rozpraszaniem* elektryczności; w powietrzu silne rozpraszanie zdradza się świeceniem w kształcie aureoli lub różdżki (rys. 594), a często i pewnym szmerem, i zowie się *wyładowaniem cichym*. Raptowne wyładowanie, w jednej chwili, połączone z większym lub mniejszym błyskiem i hukiem, stanowi *iskrę elektryczną* (rys. 599, 600, 601).



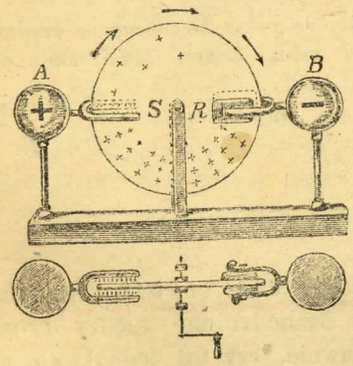
Rys. 594. Wyładowanie ciche.

2. Maszyny elektryczne czyli **elektrostatyczne** służą do otrzymania silnych i częstych wyładowań, zwłaszcza iskrowych, czy to bezpośrednio, czy przez nabijanie kondensatorów. Jedne wzbudzają elektryczność przez tarcie, inne wyłącznie drogą influencji.

Za pomocą maszyn elektrycznych osiąga się napięcia zwykle od 50 000 do 100 000 woltów, a niekiedy i wyższe, co przy odpowiednim naboju daje iskry na kilkanaście do kilkudziesięciu centymetrów.

Pierwowzór maszyn elektrycznych dał Guericke (1653) w postaci kuli siarczanej, pocieranej ręką. Zbudowany następnie przez Voltę *elektrofor* stanowi krążek z żywicy, który się elektryzuje przez uderzanie futrem; ma on dziś znaczenie tylko historyczne.

a) *Maszyna frykcyjna* Wintera (1740, rys. 595), t. j. wytwarzająca elektryczność wskutek tarcia, stanowi najprostszą i najdawniejszą postać maszyny elektrycznej. Składa się z ciała pocierającego, ciała pocieranego i konduktora. Elektryczność wzbudzona tarciem, działa indukcyjnie na konduktor, tak iż nagromadza się na nim znaczny nabój elektryczny.



Rys. 595.
Maszyna elektryczna Wintera.

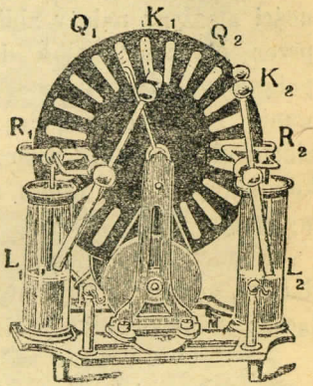
Okrągła szyba szklana obraca się za pomocą korby, ocierając się z obu stron o poduszki skórzane *R*. Poduszki te są amalgamowane roztworem cyny i cynku w rtęci; elektryzują się one ujemnie, szkło zaś dodatnio. Przechodząc między widełkami, opatrzonymi rzędem kolców, szyba przyciąga z nich el. — i rozbraja tutaj jednocześnie, el. + zaś indukuje się na konduktorze *A*. Przy dalszym obracaniu powstaje wciąż na szybie el. +, która przysparza znów el. + na konduktorze, aż potencjał na nim dorówna potencjałowi na szybie. Wtedy dalsze obracanie byłoby bezużyteczne.

Elektryczność ujemną poduszek można odprowadzić drutem do ziemi, albo też, izolując poduszki, zebrać ją na innym konduktorze *B*.

Potencjał maszyny może się zmieniać, napięcie mimo to bywa stałe. Niech jeden np. z konduktorów ma + 40 000 W, drugi — 40 000 W, napięcie więc = 80 000 W. Jeżeli drugi konduktor połączymy z ziemią, potencjał jego = 0, a pierwszy konduktor okaże + 80 000 W.

Maszyny frykcyjne są bardzo wrażliwe na wilgoć w powietrzu, tak iż działają dobrze tylko w atmosferze suchej i przy starannym oczyszczeniu wszelkich części przyrządu; to też obecnie wychodzą prawie z użycia.

b) *Maszyna influencyjna* Wimshursta (rys. 596 i 597) nie ma wcale pocieradła i elektryzuje się tylko wskutek influencji. Składa się z dwu okrągłych tarcz kauczukowych lub szklanych, na których naklejono dokoła wycinki z cynfolji; tarcze obracają się w przeciwne strony. Oprócz konduktorów (R_1 i R_2) posiada pędzelki metalowe (p_1 i p_2), podtrzymujące nabój tarczy, pomimo wyładowań konduktorów.

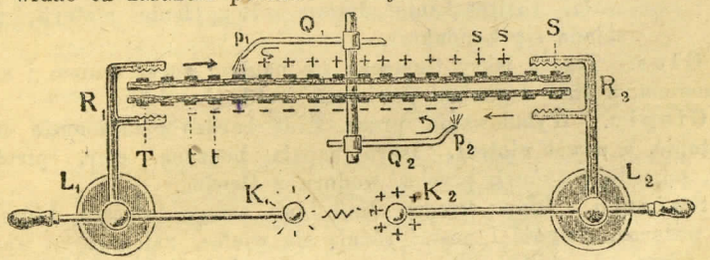


Rys. 596. Maszyna elektryczna Wimshursta.

Butelki lejdejskie (L_1 i L_2) zwiększają pojemność konduktorów, zatym i energję wyładowań, nie są jednak niezbędne do działania maszyny.

Maszyna Wimshursta posługuje się *samowzbudzeniem*, najmniejsze bowiem ślady elektryczności, jej udzielone lub pozostałe, wzrastają przez indukcję przy obracaniu maszyny, kosztem pracy mechanicznej, aż do zupełnego nabicia konduktorów.

Rys. 597 wyobraża przekrój poprzeczny, gdzie *ss* i *tt* oznaczają wycinki cynfolji; widać tu zarazem położenie wzajemne obu tarcz i konduktorów.



Rys. 597.

Przed użyciem maszyny należy raz na zawsze naelektryzować którykolwiek z pędzelków przez dotknięcie np. szkłem potartym; w ten sposób np. p posiądzie nabój dodatni. Przy obracaniu tarczy wycinki *ss*, dotykając pędzelka, elektryzują się dodatnio, indukują zaś w pędzelku p_2 i dotykają-

cych go wycinkach *tt* el. ujemną. Nawzajem, wycinki *tt*, przesuwając się przed p_1, indukują tu el. +, tak iż naboje *s* i *t* wzajemnie się wzmacniają. Ostatecznie naboje jednej i drugiej strony przechodzą na grzebienie R_1 i R_2, a stąd na konduktory K_1 i K_2.

Maszyna Wimshursta przy małych wymiarach wytwarza więcej elektryczności, niż wielkie maszyny z tarciem, i jest mało wrażliwa na wilgoć. Daje ona dobry przykład zamiany pracy mechanicznej na elektryczność: przyrząd jest tym trudniej obracać, im większy nabój nagromadza się na konduktorach.

Pierwowzór maszyn influencyjnych stanowi *maszyna Holtza* (1865), o budowie dosyć złożonej i działaniu mniej pewnym, niż maszyna Wimshursta; ma ona dzisiaj znaczenie muzealne.

3. Skutki wyładowań elektrycznych. Celem wyładowania elektryczności maszyny należy zbliżyć do siebie oba konduktory maszyny nabitej przez obracanie, albo do jednego z konduktorów zbliżyć przewodnik, połączony z ziemią; następuje wyładowanie raptowne, iskrowe. Wyładowania spokojne zachodzą, gdy konduktory są izolowane od siebie i od ziemi; elektryczność rozprasza się w powietrzu, przyczym w ciemności konduktory i inne części maszyny jarzą się słabym światłem niebieskawym (rys. 594).

Kondensatory nabija się, łącząc jednę okładkę z konduktorem dodatnim, drugą z ujemnym, a kondensator izolując od ziemi, albo też łącząc jednę okładkę z ziemią, drugą z którymkolwiek konduktorem.



Rys. 598. Wiatraczek Franklina.

Przy wyładowaniu ma miejsce zamiana energji potencjalnej, skupionej w naboju, na energję kinetyczną, przyczym powstaje praca mechaniczna, głos, ciepło, światło, skutki chemiczne, fizjologiczne.

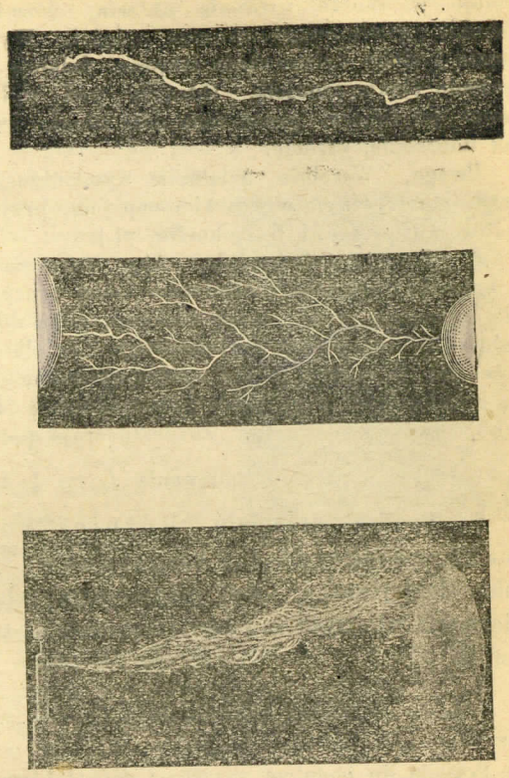
a) Skutki mechaniczne. Silne przyciągania i odpychania ciał pobliskich, stąd rozmaite efekty; wiatr elektryczny (rys. 577), wiatraczek Franklina (rys. 598, objaśnić); nastroszenie włosów na głowie. Przebijanie iskrą tektury, szkła, roztrzaskanie drzewa. Rozpylanie materji, z jakiej składa się konduktor.

b) Głos. Trzask iskry tłumaczy się nagłym zgęszczeniem i następnie rozrzedzeniem, a stąd drganiem powietrza na drodze iskry.

c) Ciepło. Wyładowanie przez drut bardzo cienki może drut rozgrzać, stopić, a nawet ulotnić. Iskra zapala benzynę, eter, spirytus, gaz świetlny, powoduje wybuch prochu, wodoru z tlenem.

d) Światło. *Iskra* tworzy linję lub smugę świecącą, której blask, grubość pozorna, długość i postać różnią się wielce, zależnie od warunków. Krótkie iskry, do kilkunastu mm, mają wygląd linji prostej, dłuższe są zygzakowate (rys. 599), jeszcze dłuższe rozgałęzione (rys. 600). Jeżeli iskry biją nie między kulkami, ale między kolcem (+) a tarczą (—), są znacznie dłuższe i trafiają do brzegów tarczy (rys. 601); przy odwrotnym kierunku wyładowania iskry są krótsze i biją w środek tarczy, tak iż można stąd rozpoznać rodzaj biegunów.

Kształt zygzakowaty iskry tłumaczy się w ten sposób, że iskra obiera najkrótszą drogę co do czasu, to jest przez miejsca najlepiej przewodzące; mianowicie iskra wymija warstwy powietrza, które na prostej drodze zgęszcza, przechodzi przez warstwy rzadsze: gazy bowiem rozrzedzone do pewnego stopnia są lepszymi przewodnikami elektryczności (pt. „Prąd dektryczny w gazach").



Rys. 599, 600, 601. Wyładowania iskrowe.

Jasność iskry pochodzi od rozżarzonych cząstek powietrza; główny blask jednak daje *aureola*, otaczająca iskrę i nadająca jej pewną grubość pozorną. Składa się ona z porwanych i rozżarzonych cząstek konduktora; to też i kolor iskry bywa rozmaity, zależnie od rodzaju materji konduktora, oraz rodzaju gazu, w którym odbywa się wyładowanie; stąd użytek do analizy widmowej (pt.). Jaskrawość blasku zależy od naboju; dlatego maszyny elektryczne dają iskry słabo świecące, kondensatory zaś iskry znacznie jaskrawsze.

Długość iskry w powietrzu zwykłym zależy przy tym samym konduktorze głównie od napięcia, wzrasta jednak bardziej, niż napięcie: np. pomiędzy kulkami o promieniu 1 cm

iskra długości	1 mm	10 mm	25 mm
wymaga napięcia	4500	30 000	50 000 woltów.

Czas trwania iskry wynosi drobną część sekundy, jednakże waha się w szerokich granicach, zależnie od pojemności konduktora i innych warunków; średnio zawiera się między tysiączną a miljonową częścią sekundy. Każda iskra składa się z szeregu iskier coraz słabszych, bijących naprzemian pomiędzy konduktorami; stanowi zatym drgania elektryczne, skąd powstają fale elektryczne w przestrzeni (pt. „Promieniowanie elektryczne").

e) Skutki chemiczne. Rozkład wody na wodór i tlen, zresztą bardzo słaby. Łączenie azotu powietrza z tlenem, stąd przy udziale wody powstaje kwas azotowy, np. w wodzie deszczowej w czasie burzy. Zamiana tlenu powietrza na ozon, stąd osobliwy zapach ostry w pobliżu maszyny elektrycznej.

f) Skutki fizjologiczne. Iskra z małej butelki lejdejskiej wywołuje w skórze wrażenie ukłucia, w mięśniach zaś ból i wstrząśnienie wskutek gwałtownego skurczu mięśni. Wyładowanie silnej baterji zabija; częste i słabe wyładowania iskrowe działają pobudzająco na nerwy, stąd leczenie elektrycznością. Odruchy pod wpływem elektryczności zachodzą nawet po śmierci przez czas dość długi, zwłaszcza po śmierci gwałtownej, jak uduszenie, otrucie.

Uwaga. Wszelkie działania wymienione daleko skuteczniej wywołuje prąd elektryczny, o wosokim napięciu, przy użyciu odpowiednich transformatorów (np. cewki Ruhmkorffa, pt.).

4. Energja wyładowania. Aby wprowadzić do ciała obojętnego nabój 1 kulomba, potrzeba niezmiernie małej pracy; następne naboje po 1 kulombie wymagają pracy coraz większej, gdyż odpychanie wzrasta, tak iż prace kolejne tworzą postęp arytmetyczny. Jeżeli ciało od e kulombów osiągnęło potencjał V woltów, praca ogólna wynosi tyle, jak gdyby nabito ciało odrazu e kulombami przy potencjale średnim $\frac{1}{2}$ V woltów. Całą tę pracę oddaje nabój przy wyładowaniu. Zatym energja potencjalna naboju, a zarazem

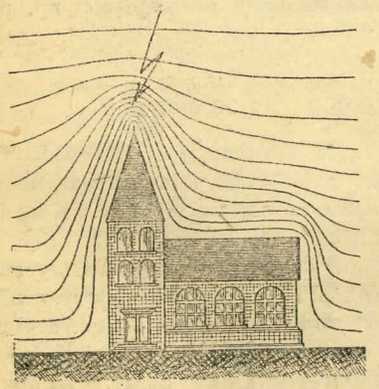
$$\text{praca wyładowania } L = \tfrac{1}{2}\, V \cdot e \text{ dżulów.}$$

5. Spadek potencjału. Różnica potencjałów w dwu miejscach, odległych o 1 cm, stanowi *spadek potencjału*. Jeżeli do pola elektrycznego albo przewodnika włączono elektrometry, w dwu miejscach odległych o l cm, i oznaczono tu potencjały V_1 i V_2 woltów, to

$$\text{spadek potencjału} = \frac{V_1 - V_2}{l} \text{ wolt/cm.}$$

Posiada on podobne znaczenie dla elektryczności, jak spadek temperatury dla ciepła (pt.).

6. Elektryczność atmosferyczna. Atmosfera nawet w czasie pogody okazuje stan elektryczny, mianowicie potencjał dodatni, który wzrasta z wyniesieniem nad powierzchnią ziemi. Ponieważ wszelkie wyniosłości ziemi mają podobnież jak równiny potencjał O, poziomy elektryczne w atmosferze tworzą powierzchnie bardzo nierówne, tak iż spadek potencjału miejscami jest bardzo znaczny (rys. 602).

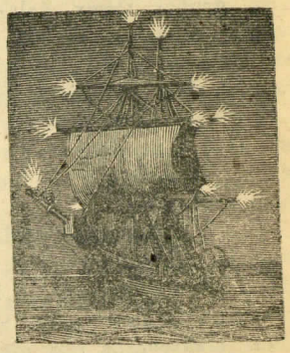


Rys. 602.
Poziomy elektryczne w atmosferze.

Skoro zachodzi obfite skraplanie pary w powietrzu i powstają gęste chmury, napięcie może zrosnąć tak, iż następuje wyładowanie: *piorun* czyli potężna iskra elektryczna przebija warstwę powietrza między chmurą a ziemią, wyrównywając chwilowo

ich potencjały. Głos przy uderzeniu piorunu stanowi *grzmot*, światło *błyskawicę*. Chmury między sobą rozbrajają się także iskrami, gdy różnią się znacznie ich potencjały; sprawia to *błyskanie ciche*; ostatnie może też być odblaskiem dalekich piorunów.

W krajach podbiegunowych niema błyskawic, ani piorunów, elektryczność zaś atmosferyczna zdradza się długotrwałym cichym wyładowaniem w postaci *zorzy polarnej*. W krajach umiarkowanych zdarzają się niekiedy wyładowania ciche przez szpiczasto zakończone przedmioty, jak słupy, maszty, wieże i t. p.; stanowią t. zw. *ognie św. Elma* (rys. 603).

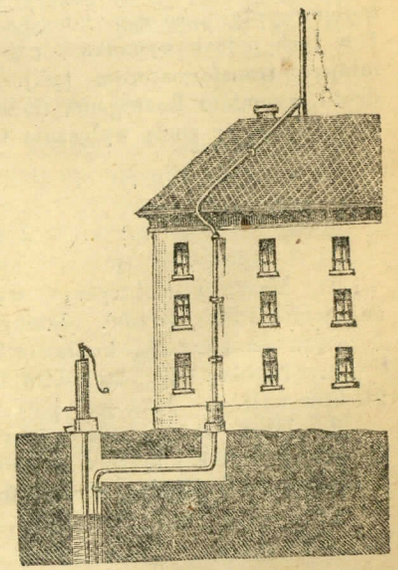


Rys. 603. Ognie św. Elma.

Grzmot i błyskawica zachodzą jednocześnie, słyszymy zaś grzmot tym później, im dalej uderza piorun. Przeciągły odłos grzmotu pochodzi z odbicia wielokrotnego, tudzież wskutek znacznej długości iskry; z miejsc dalszych na drodze iskry głos dochodzi nas później. Ciche błyskanie pochodzi od chmur tak dalekich lub tak wysokich, że głos się rozprasza i nie dochodzi do nas; w górnych, rozrzedzonych warstwach powietrza głos już z natury jest słaby.

Do okazania elektryczności atmosferycznej służy elektroskop, opatrzony zamiast gałki wysokim prętem, śpiczastym, izolowanym od ziemi; listki odchylają się tym więcej, im wyżej sięga koniec pręta.

Można też połączyć elektroskop z latawcem, wypuszczonym wysoko. Tą drogą oznacza się potencjały w różnych miejscach atmosfery; powierzchnie jednakowego potencjału przebiegają gęsto zwłaszcza nad wzgórzami, domami, drzewami (rys. 602, dlaczego?); to też piorun uderza zwykle w takie wystające przedmioty. Spadek potencjału w atmosferze jest bardzo znaczny: zależnie od stanu pogody i klimatu potencjał wzrasta od 60 do 500 woltów na każdy metr wyniesienia; stąd potencjał atmosfery pogodnej, na 1 km ponad ziemią, można ocenić powyżej 100 000 woltów. Na znacznych wysokościach potencjał wzrasta daleko słabiej, np. na wysokości 3 km wzrasta tylko około 10 woltów na metr wyniesienia.



Rys. 604. Piorunochron.

Co do pochodzenia elektryczności atmosferycznej, istnieją różne hipotezy; źródłem jej może być tarcie prądów powietrza, skroplenie pary wodnej i in. Najnowszy pogląd opiera się na teorji elektronowej (pt.).

Elektryczność budynku z ostrza idzie do ziemi.

Elektryczność z chmur wydobył Benjamin Franklin (1752) za pomocą latawca z kolcem; latawiec był uwiązany na sznurze konopnym do klucza, izolowanego od ziemi. Gdy zerwała się ulewa i zmoczyła sznurek, między kluczem a ziemią biły iskry długie na kilka metrów.

Piorunochron czyli *gromnik* (rys. 604) służy do zabezpieczenia budynków od pioruna; rozbraja on budynek z nagromadzonej w nim elektryczności i nie dopuszcza uderzenia pioruna. Składa się z wysokiego kolca, osadzonego na dachu lub wieży i połączonego z ziemią za pomocą grubej taśmy żelaznej lub liny miedzianej; dolny koniec tego przewodnika wpuszcza się do wody lub zakopuje w wilgotną ziemię. Wierzchołek kolca robi się z miedzi pozłacanej, aby był oporny na wpływy powietrza; dawniej wyrabiano go z platyny.

Nowsze piorunochrony są oparte na zasadzie osłony elektrycznej (rysunek 580) oraz własności ostrzy. Składają się z rzadkiej kraty drucianej na dachu, połączonej z ziemią; w bliskich odstępach na tej kracie stoją krótkie kolce pozłacane.

7. Zastosowania wyładowań elektrostatycznych. Z powodu bardzo wysokiego napięcia wszystkie przyrządy elektrostatyczne tracą prędko nabój w otoczeniu, gdyż niepodobna ich izolować dostatecznie; już to samo przeszkadza szerszemu zastosowaniu maszyn elektrycznych i kondensatorów. Powtóre, praca elektryczna jest nieznaczna, a nadto przedstawia się niekorzystnie, gdyż jej wartość $L = Ve$ zawiera przy wielkim napięciu V, wynoszącym setki tysięcy woltów, niezmiernie małą ilość elektryczności e, zaledwie miljonowe części kulomba. Możnaby to porównać z pracą wody, która pod olbrzymim ciśnieniem bije cienką strugą na znaczną wysokość. Podobna praca mało dać może pożytku. Nadto wyładowanie maszyny elektrycznej, czy kondensatora, jest nazbyt krótkie i gwałtowne.

Wyładowania więc elektrostatyczne stosują się w niewielu wypadkach: głównie do leczenia elektrycznością, czy przez wstrząśnienia ciała, czy działaniem wypływu, co oznaczamy nazwami *faradyzacja*, względnie *arsonwalizacja*. I w tych jednak wypadkach maszyny elektrostatyczne ustępują coraz częściej miejsca transformatorom (pt.). Do wyładowań iskrowych, telegrafji bez drutu, promieni Roentgena, do których możnaby stosować pomienione maszyny, obecnie służą wyłącznie transformatory, przy użyciu kondensatorów.

Zadania.

1. Maszyna elektryczna wytwarza 0,0001 kulomba na sekundę, przy napięciu 50 000 woltów. Jakiej sprawności trzeba do jej obracania? Odp. 5 watów = okr. $\frac{1}{150}$ konia mech.

2. Butelkę lejdejską nabito ilością 0,002 kulomba z maszyny o napięciu 90 000 woltów. Jaka jest pojemność butelki? Odp. $\frac{1}{45}$ mikrofarada.

3. Iskra elektryczna bije z konduktora o potencjale 120 000 woltów do pobliskiego konduktora o 70 000 w. Ile pracy wykonywa iskra, przenosząc 6 jedn. ES? Odp. 50 000 . 6 . $\frac{1}{300}$ = 1000 ergów.

50.000 · 1/300 · 6ES = 1000 erg.
50

ROZDZIAŁ XI.

ELEKTRODYNAMIKA.

A) PRĄD GALWANICZNY czyli ELEKTROCHEMICZNY.

§ 110. Źródła chemiczne elektryczności.

1. Elektryzacja w zetknięciu (Volta 1792). Dwa metale, zetknięte z sobą, okazują po rozłączeniu jeden elektryczność dodatnią, drugi ujemną; przytem dany metal może być elektro-dodatni względem pewnego szeregu metalów, a elektro-ujemny względem innego. Np. żelazo w zetknięciu z miedzią okazuje elektryczność dodatnią, w zetknięciu z cynkiem ujemną.

Volta zestawił metale i węgiel w takim porządku, że każdy elektryzuje się dodatnio w zetknięciu z następnym, a ujemnie z poprzednim; jest to t. zw. *szereg napięcia* Volty:

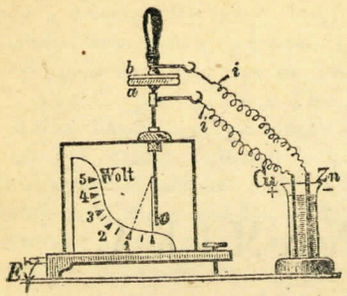
\+ cynk, ołów, żelazo, miedź, srebro, platyna, węgiel — .

Napięcie między którąkolwiek parą metali, wybranych z szeregu, równa się sumie napięć poszczególnych par między nimi; np. napięcie cynku w zetknięciu ze srebrem równa się sumie napięć cynk/ołów + ołów/żelazo + + żelazo/miedź + miedź/srebro. Wynika stąd, że suma staje się zerem, gdy pierwszy i ostatni metal zetkną się z sobą, t. j. napięcie znika, a zatym nie może być przepływu elektryczności.

Metale w zetknięciu z płynami nie okazują takiej prawidłowości; różnica potencjałów trwa pomimo połączenia z sobą różnych metalów, zanurzonych w płynie. Stąd istnieje ciągły przepływ elektryczności czyli prąd elektryczny.

Metale przy zetknięciu z płynami elektryzują się ujemnie, przyczym napięcie bywa rozmaite dla każdej pary ciał t. j. metalu i płynu. Napięcie to jest większe, niż przy zetknięciu metalów między sobą, zawsze jednak jest niezmiernie słabe w porównaniu z napięciem maszyny elektrycznej; okazać je można za pomocą bardzo czułego elektrometru z kondensatorem.

Elektrometr kondensacyjny Volty (rys. 605) posiada stały pręcik metalowy *o*, a przy nim wiszący swobodnie pasek folji glinowej (aluminium); pręcik ma połączenie z okładką *a* kondensatora. Gdy nabój metalów zanurzonych udzieli się okładkom kondensatora, pasek się na razie nie odchyla, aż dopiero po zdjęciu górnej okładki *b* (dlaczego?).

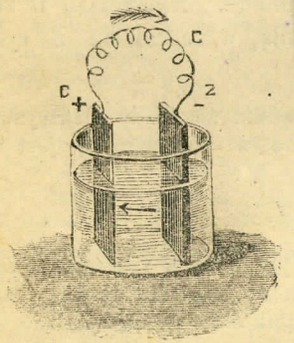


Rys. 605.

Przyczynę elektryzacji wszelkich ciał można objaśnić udziałem t. zw. atomów elektrycznych czyli elektronów (pt.).

2. Źródło prądu elektrycznego. Przy zanurzeniu dwu przewodników do płynu, np. miedzi i cynku do słabego kwasu siarczanego, napięcie wzajemne na metalach stanowi różnicę napięć względem płynu. Jeden z przewodników staje się *elektrodą dodatnią* czyli *anodą*, drugi *ujemną* czyli *katodą*; wystające ich końcówki zowią się *biegunami* (+ i — na rys. 606).

Np. potencjał cynku względem kwasu siarczanego wynosi — 1,50 wolta, miedzi względem kwasu — 0,44 w. Napięcie więc na biegunach = 1,06 wolta, przyczem miedź ma potencjał wyższy, jest więc biegunem dodatnim. Gdyby miedź połączono z ziemią, posiadałaby potencjał O, cynk zaś — 1,06 wolta; gdyby cynk połączono z ziemią, posiadałby potencjał O, miedź zaś + + 1,06 w. Gdyby cynk połączono z konduktorem o potencjale 1000 W., miedź okazałaby potencjał 1001,06 W.



Rys. 606. Najprostsze ogniwo galwaniczne.

Podobna para metalów wraz z cieczą stanowi *ogniwo galwaniczne*, inaczej *elemen galwaniczny*. Za połączeniem biegunów ogniwa przewodnikiem, np. drutem, następuje ciągłe wyładowanie elektryczności, *prąd elektryczny*, od bieguna dodatniego do ujemnego; prąd taki zowie się także *galwanicznym* albo *elektrochemicznym*, jeśli chodzi o zaznaczenie jego pochodzenia.

Napięcie elektryczne istnieje na biegunach wskutek zetknięcia, ale niema żadnych zmian chemicznych w ogniwie, dopóki obwód jest owarty, t. j. póki niema połączenia biegunów. Dopiero przy zamknięciu obwodu zaczyna się działanie chemiczne w ogniwie; kosztem tego działania, t. j. zużytego metalu i kwasu, powstaje prąd elektryczny. Pewnej ilości gramów materji odpowiada pewna ilość kulombów elektryczności. Tak więc, prąd galwaniczny jest wynikiem działania chemicznego; mówiąc ściślej, zachodzi wciąż w ogniwie galwanicznym przemiana energji chemicznej na elektryczną.

Siła pędząca prąd elektryczny, a podtrzymująca stałe napięcie na biegunach ogniwa, zowie się *siłą elektrowzbudzającą* albo *elektromotoryczną*; jako proporcjonalna do napięcia, wyraża się liczbą *woltów*.

Im energiczniej działa płyn na jeden z metalów ogniwa, czyli większe ma powinowactwo chemiczne, tym wyższe bywa napięcie i siła elektrowzbudzająca. Np. cynk i żelazo w słabym kwasie siarczanym dają mniejsze napięcie, niż cynk i miedź, a te ostatnie mniejsze, niż cynk i platyna. Żelazo wobec cynku jest biegunem dodatnim, wobec miedzi lub platyny ujemnym.

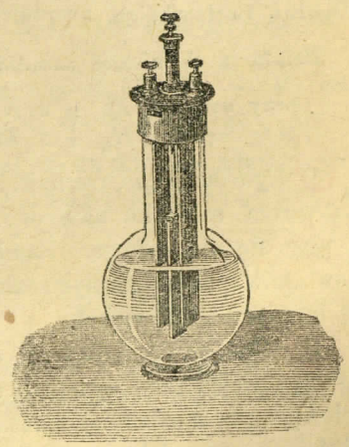
Uwaga. Zwykły cynk handlowy poddaje się działaniu kwasu siarczanego nawet przy obwodzie otwartym, bez wytwarzania prądu. Ażeby temu zapobiec, trzeba cynk amalgamować, czyli powlec jego powierzchnię rtęcią.

3. Ogniwa stałe. Prąd ogniwa prostego (rys. 606) już po krótkim czasie, np. po kilku minutach, staje się coraz słabszy, aż wreszcie zanika zupełnie. Powodem tego osłabienia jest *polaryzacja galwaniczna*: prąd elektryczny rozkłada wodę w ogniwie, przyczym wywiązuje się wodór na biegunie dodatnim (miedzi), przylega do niego częściowo i przeszkadza zetknięciu z płynem, a nadto, jako bardziej elektro-dodatni od cynku, budzi ku niemu prąd przeciwny.

W ogniwach t. zw. stałych polaryzację usunięto mniej lub więcej przez pochłanianie chemiczne wodoru. We wszystkich ogniwach praktycznych za elektrody służą cynk i miedź lub węgiel, dają bowiem największe napięcie z pomiędzy ciał pospolitych.

1) *Ogniwo Greneta* (rys. 607) zawiera cynk i węgiel w postaci płytek, zanurzonych w roztworze kwasu siarczanego i chromowego. Ogniwo to daje prąd silny, ale krótkotrwały, gdyż prędko się przy działaniu zanieczyszcza wskutek osadów chromowych. Zaleca się ono zręczną postacią i służy głównie do doświadczeń.

Ogniwo Greneta zawiera zwykle dwie płytki węglowe, połączone z sobą, tak iż tworzą jeden biegun, dodatni; płytka zaś ujemna, cynkowa, jest o połowę krótsza i daje się wyciągać z cieczy, gdy prądu nie potrzeba.


Rys. 607. Ogniwo Greneta.

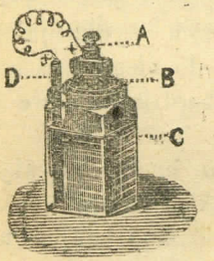
Działanie. Od działania kwasu siarczanego na cynk powstaje sól łatwo rozpuszczalna, siarczan cynku; wodór zaś, wywiązany w ogniwie, odbiera od kwasu chromowego część tlenu i wytwarza wodę, zostaje więc w ten sposób usunięty. Jednakże powstają przez to związki chromowe w postaci osadów i soli nierozpuszczalnych, które zamulają ogniwo, a prąd osłabiają. Po przerwaniu prądu na czas dłuższy osad się rozpuszcza i prąd stopniowo odzyskuje siłę.

Działanie chemiczne przy użyciu H_2SO_4 i CrO_3 przebiega zasadniczo tak:

przy cynku: $Zn + H_2\ SO_4 = Zn\ SO_4 + H_2$
przy węglu: $3\ H_2 + 2\ Cr\ O_3 = Cr_2\ O_3 + 3\ H_2\ O.$

Zamiast CrO_3 używa się dla taniości t. zw. roztworu chromowego, który się przyrządza z 1 cz. dwuchromianu sodu $Na_2Cr_2O_7$, 2 cz. kwasu siarczanego $H_2\ SO_4$ i 12 cz. wody; działa on podobnież utleniająco.

2) *Ogniwo Leclanché'go* (rys. 608) zawiera pałeczkę cynkową (*D*) w roztworze salmiaku czyli chlorku amonu, oraz płytę węgla (*A*), otoczoną zbitą masą (*B*) minerału braunsztynu czyli dwutlenku manganu. Polaryzację usuwa również tylko na czas krótki, poczym prąd słabnie, ale po wypoczynku ogniwa powraca do zwykłej siły. Stąd nadaje się do prądów często przerywanych, jako to do dzwonków, telegrafu, zapalniczek elektrycznych.



Rys. 608.
Ogniwo Leclanché'go.

Przy działaniu ogniwa tworzy się sól cynkowa i wywiązuje się amoniak gazowy, wodór zaś utlenia się od braunsztynu na wodę. Utlenianie zachodzi powolnie, tak iż prąd wymaga przerywania, albo też użycia oszczędnego, do przyrządów o znacznym oporze (pt.), gdzie prąd działa tylko małą częścią swego możliwego natężenia; w przeciwnym razie ogniwo się polaryzuje. Cynku amałgamować nie trzeba, bo znajduje się w roztworze soli obojętnej.

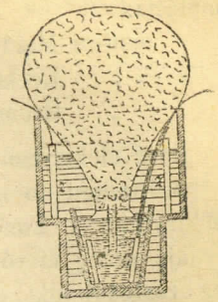
Działania chemiczne zasadnicze:

przy cynku: $Zn + 2\ NH_4\ Cl = Zn\ Cl_2 + 2\ NH_3 + H_2$
przy węglu: $H_2 + 2\ Mn\ O_2 = Mn_2\ O_3 + H_2\ O.$

3) *Ogniwa suche*, rozmaitej postaci, są odmianami ogniwa Leclanché'go; roztworem salmiaku nasycono w nich trociny lub papkę papierową, tak iż płyn się nie wylewa. Zamknięte szczelnie, małe i lekkie, ogniwa te, niewłaściwie zwane suchymi, służą do przyrządów przenośnych, zwłaszcza do latarek elektrycznych.

4) *Ogniwo Meidingera* (rys. 609) składa się z cynku w kształcie niskiego walca (*zz*), opartego na wrębie słoja tak, iż zajmuje górną jego połowę, oraz miedzianej blaszki (*cc*), umieszczonej na dnie słoja. Cynk mieści się w wodzie zwykłej, zaprawionej odrobiną jakiej soli obojętnej,

zwykle siarczanu magnezu (soli gorzkiej), miedź w roztworze siarczanu miedzi (koperwasu), który jako gęstszy, trzyma się na spodzie. Jest to najwytrwalsze z ogniw, nawet przy ciągłym i długim użyciu, prąd jednak daje słaby, zdatny głównie do telefonów, telegrafów i dzwonków na długich linjach, sygnałów kolejowych, zegarów elektrycznych.

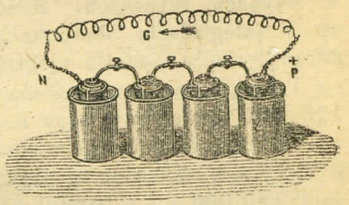

Rys 609.
Ogniwo Meidingera.

Ogniwo Meidingera stanowi ulepszoną postać *ogniwa Daniella*, najdawniejszego z ogniw stałych, a obecnie wycofanego z użycia.

Działanie chemiczne z początku polega na wytworzeniu odrobiny wodoru przez rozkład wody; wtedy prąd stopniowo się ustala, osadzając miedź na blasze miedzianej, a wytwarzając kwas siarczany, który następnie działa na cynk, jak w innych ogniwach. Polaryzacji niema zupełnie.

Przy miedzi: $H_2 + Cu\ SO_4 = Cu + H_2\ SO_4$
przy cynku: $Zn + H_2\ SO_4 = Zn\ SO_4 + H_2.$

4. **Baterja** czyli **stos galwaniczny** (rys. 610). Połączenie kilku lub więcej ogniw w odpowiedni sposób stanowi *baterję* czyli *stos galwaniczny*. Zwykle łączy się ogniwa z sobą przeciwnymi biegunami: dodatni biegun pierwszego z ujemnym następnego i t. d.; w takim *połączeniu szeregowym* napięcia ogniw się sumują.


Rys. 610. Stos galwaniczny.

Jeżeli bowiem biegun cynkowy pierwszego ogniwa N (rys. 610) ma potencjał V_0, biegun węglowy V_1, napięcie $E_1 = V_1 - V_0$; cynk drugiego ogniwa, połączony z węglem pierwszego, ma potencjał tegoż $= V_1$, węgiel zaś drugiego ma potencjał V_2, napięcie więc $E_2 = V_2 - V_1$ itd.; wogóle napięcie n ogniw $E = E_1 + E_2 \ldots + E_n = V_n - V_0$.

Przy jednakowych ogniwach w stosie, jak to zwykle ma miejsce, gdy ogniwa są połączone w szereg, napięcie stosu jest proporcjonalne do liczby ogniw:

$$\left\{\begin{array}{c}\text{napięcie}\\ \text{stosu}\end{array}\right\} E_s = n \cdot E = \left\{\begin{array}{c}\text{liczba}\\ \text{ogniw}\end{array}\right\} \times \left\{\begin{array}{c}\text{napięcie}\\ \text{1 ogniwa}\end{array}\right\}.$$

5. **Napięcie i praca ogniwa.** Napięcie nie zależy od wielkości ogniwa; jest ono jednakowe dla ogniw dużych i małych, byleby złożonych z tych samych materjałów.

Używane powszechnie ogniwa różnią się niewiele pod względem napięcia:

ogniwo Mędingera, Daniella,	średnio	1,0	wolt
„ Leclanché'go, ogniwo suche,	„	1,5	„
„ Greneta	„	2,0	„

Ilość elektryczności, jaką zawierają ogniwa galwaniczne, jest ogromna w porównaniu do naboju elektrostatycznego, jaki nagromadzają maszyny elektryczne i kondensatory. Pomimo więc niskiego napięcia, ogniwa wydają pracę nierównie większą, aniżeli przyrządy elektrostatyczne. To też zastosowania elektryczności datują dopiero od wynalezienia ogniw galwanicznych.

Praca elektryczna stosu wyraża się wzorem ogólnym (§ 107, art. 4)

$$L = V \cdot e$$

gdzie L oznacza pracę w dżulach, V napięcie w woltach, e ilość elektryczności w kulombach. Wartość tej pracy liczy się na setki tysięcy dżulów dla jednego ogniwa.

Prąd ogniwa galwanicznego można porównać do prądu wody w rzece, gdzie przy niewielkim spadku płynie ogromna masa wody (por. § 109, art 7); w tych warunkach woda służy do wykonania pracy korzystnej, np. w młynach, turbinach. Podobnież prąd galwaniczny daje pracę użyteczną, np. w telegrafach, dzwonkach, motorach, czy też w zamianie na pracę chemiczną, ciepło, światło elektryczne.

Przykłady. 1) Duże ogniwo Greneta wydaje za jednym napełnieniem 120 000 kulombów przy napięciu użytecznym 1 wolta (napięcie użyteczne wynosi $^1/_2$ napięcia biegunowego, przy największej wydajności ogniwa; por. § 112, art. 7, oraz § 113, art. 6, przypadek 3). Zasób pracy wynosi $1 \times 120\,000 = 120\,000$ dżulów = okr. 12 000 kgm.

2) Duża butelka lejdejska ma pojemność 0,004 mikrofarada, co przy napięciu 100 000 woltów stanowi nabój 0,0004 kulomba. Zasób pracy = $= 100\,000 \times 0{,}0004 = 40$ dżulów = okr. 4 kgm.

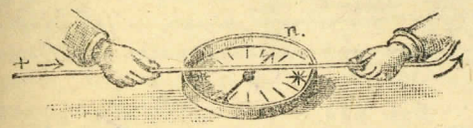
Ogniwo zatym okazuje się niemal 3000 razy energiczniejsze od kondensatora podobnej wielkości. Ważną zaletę stanowi nadto niskie napięcie, a stąd łatwość izolacji, oraz prąd ciągły i długotrwały, w przeciwieństwie do przyrządów elektrostatycznych (por. § 109, art. 7).

§ 111. Pole elektromagnetyczne.

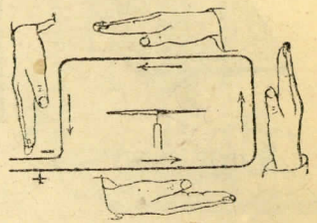
1. Ogólne własności magnetyczne prądu. Prąd elektryczny zachowuje się względem otoczenia jak magnes: przyciąga lub odpycha bieguny magnesu, układa opiłki żelazne, magnesuje żelazo i stal. Istnieje więc dokoła przewodnika, po którym prąd przebiega, pole magnetyczne o własnościach takich samych, jak pole dokoła magnesu; ze względu na pochodzenie, zowie się ono *polem elektromagnetycznym*.

2. Odchylenie igły magnesowej (Oersted 1820). Działanie prądu na igłę magnesową stanowi najczulszy i najpewniejszy sposób przekonania się o istnieniu prądu.

Igła magnesowa odchyla się pod wpływem prądu, idącego w pierwotnym jej kierunku (rys. 611).



Rys. 611. Galwanoskop.



Rys. 612.

Igła może zbaczać na prawo lub na lewo, zależnie od kierunku prądu. W tym celu najdogodniej bywa orjentować się według *reguły prawej dłoni*: Połóżmy prawą dłoń wzdłuż przewodnika tak aby prąd szedł w kierunku palców; północny biegun igły zwraca się w stronę wielkiego palca (rys. 612).

Nawzajem z wiadomego odchylenia igły można wyznaczyć kierunek prądu.

Przyrząd do okazania prądu elektrycznego, w rodzaju rys. 611, zowie się *galwanoskopem*; jeżeli zarazem służy do mierzenia prądu, *galwanometrem* (§ 113).

Reguła ręki zastępuje z korzyścią *regułę Ampère'a*, wedle której należy sobie wyobrazić człowieka płynącego z prądem; człowiek ten miałby biegun północny po lewej ręce.

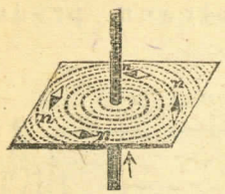
3. Linje sił magnetycznych, jakie prąd wytwarza, obiegają przewodnik dokoła, w płaszczyznach prostopadłych do przewodnika.

a) Przewodnik prosty tworzy kołowe linje sił, tak iż stanowi jak gdyby oś dla tych linji.

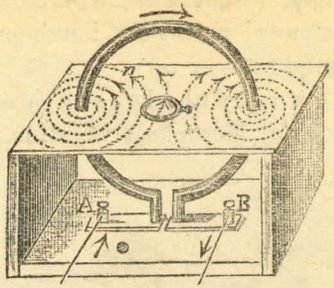
Kartka papieru, nadziana na drut prosty, po którym płynie prąd, i posypana opiłkami, ujawnia te linje (rys. 613). Dla patrzącego w kiernku prądu (na rycinie z dołu), linje sił mają bieg zgodny z ruchami skazówek zegara; sprawdzić to można za pomocą krótkiej igły magnesowej.

b) Przewodnik kołowy wydaje linje sił, idące w środku prawie prostopadle do płaszczyzny przewodnika (rys. 614).

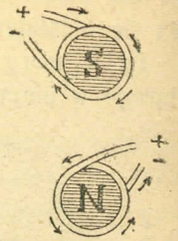
c) Szczególnie silne pole magnetyczne tworzy *solenoid*, t. j. drut spiralnie zwinięty, przez który płynie prąd. Koniec, gdzie prąd płynie zgodnie z obrotem skazówek zegara jest biegunem południowym (*reguła skazówek*, rys. 615).



Rys. 613.



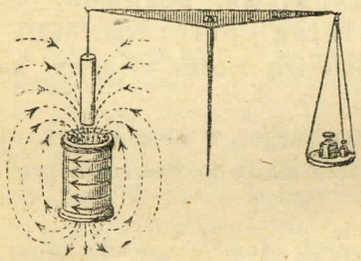
Rys. 614.



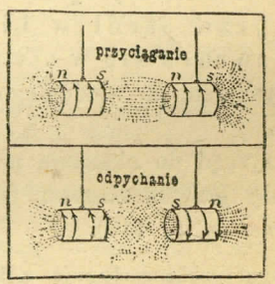
Rys. 615.

Solenoid można uważać za szereg przewodników kołowych o wspólnej osi; linje sił mają tu przebieg taki, jak w magnesie prostym (rys. 616).

Solenoid ma wszelkie własności magnesu: przyciąga żelazo, magnesuje; zawieszony ruchomo, kieruje się ku północy, przyciąga lub odpycha drugi solenoid (rys. 617).



Rys. 616. Pole magnetyczne solenoidu.



Rys. 617.

Walec żelazny ulega wciągnięciu wewnątrz solenoidu dotąd, aż środek walca dojdzie do środka solenoidu. Siłę tego wciągania można oznaczyć na wadze, a stąd porównywać natężenie prądu (rys. 616).

4. Wzajemne oddziaływanie prądów i magnesów. Prawa elektrodynamiczne Ampère'a (1821):

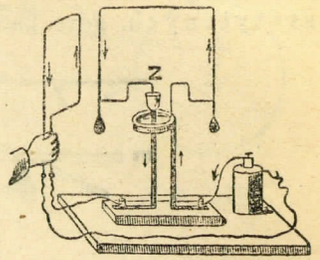
1) Dwa prądy równoległe o kierunku zgodnym przyciągają się, o kierunkach zaś przeciwnych odpychają się nawzajem.

2) Dwa krzyżujące się prądy dążą do ustawienia się tak, aby były równoległe i jednakowo skierowane.

Tak więc, prądy przyciągają się tam, gdzie oba dążą do miejsca skrzyżowania lub od niego, a odpychają się tam, gdzie jeden płynie do miejsca skrzyżowania, drugi od tego miejsca.

Magnes i prąd oddziaływają również na siebie, przyciągając się lub odpychając. Na tej zasadzie można teoretycznie uważać magnes za solenoid (pt. poniżej).

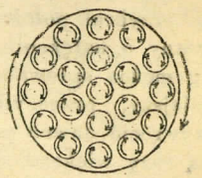
Doświadczalnie stwierdza się oba prawa na przyrządzie (rys. 618), złożonym z dwu ramek drucianych, z których jedna obraca się na osi Z, drugiej zaś nadaje się rozmaite położenia. Dla prądów równoległych trzyma się ramkę, jak wskazuje rycina; dla prądów krzyżowych trzyma się ramkę prostopadle nad ruchomą ramką Z.



Rys. 618.

5. Teorja magnetyzmu Ampère'a. Magnes składa się z magnesów cząstkowych; solenoid składa się z prądów kołowych równoległych, o kierunku zgodnym; stąd wniosek, że każdą cząstkę magnesu obiega prąd dokoła. We wszystkich cząstkach wewnętrznych, sąsiadujących z sobą, prądy są przeciwne, więc działanie ich się znosi; tylko prądy cząstkowe na powierzchni magnesu dodają się w jeden prąd wypadkowy, dokoła osi magnesu.

Tak więc, magnetyzm polega na obiegu prądów naokoło osi magnesu; na biegunie S prądy mają kierunek zgodny z ruchem skazówek zegara, na N kierunek przeciwny. Rysunek 619 wskazuje obieg prądów cząsteczkowych na biegunie południowym magnesu; rys. 617 wskazuje ogólny bieg prądów w magnesach i ich wzajemne działanie.



Rys. 619.

6. Jednostka prądu. Ilość elektryczności, płynąca w przewodniku na sekundę, stanowi *natężenie prądu*, zwane też *siłą prądu*. Praktyczną jednostkę natężenia prądu, czyli krócej jednostkę prądu stanowi *amper*.

Skoro e kulombów przepływa przez dany przewodnik w ciągu t sekund, to

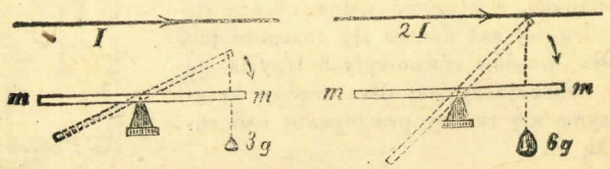
$$\text{natężenie prądu } I = \frac{e}{t} = \frac{\text{nabój}}{\text{czas}}.$$

Z założenia $e = 1$ kulomb, $t = 1$ sekunda, wynika, że prąd ma natężenie 1 ampera, gdy płynie przez dany przekrój przewodnika ilość elektryczności 1 kulomb w ciągu 1 sekundy:

$$\text{amper} = \frac{\text{kulomb}}{\text{sek}}.$$

Porównanie. Prąd wody można określić podług ilości wody, przepływającej w rurze na sekundę.

Powyższe określenie ampera opiera się na jednostkach elektrostatycznych, gdyż kulomb = 3 . 10^9 *ES* jednostek naboju.

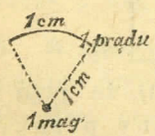


Rys. 620.

Dogodniej bywa oznaczyć natężenie prądu i jego jednostkę na drodze elektromagnetycznej, mianowicie z odchylenia igły magnesowej pod wpływem prądu, a to na zasadzie, że siła oddziaływania prądu na biegun magnetyczny jest proporcjonalna do natężenia prądu.

Opierając np. ruchomo pręt magnetyczny *mm* (rys. 620) pośrodku tak, aby przybrał położenie poziome, przepuszcza się równolegle doń prąd elektryczny o natężeniu *I*; wtedy magnes się nachyla. Za pomocą ciężarka np. 3 g można sprowadzić magnes do poprzedniego położenia. Skoro inny prąd, silniejszy, przechyli magnes bardziej, tak iż trzeba ciężarka 6 g, aby mu przywrócić dawne położenie, oznacza to, że drugi prąd posiada natężenie dwa razy większe, czyli 2 *I*.

Elektromagnetyczną jednostkę prądu w praktyce stanowi również *amper*: jest to prąd, który, obiegając 1 cm łuku koła o promieniu 1 cm, działa na jednostkę magnetyzmu w środku koła siłą $\frac{1}{10}$ dyny (rys. 621).



Rys. 621.

7. Bezwzględne jednostki elektromagnetyczne (*EM*) a jednostki elektrostatyczne (*ES*). Bezwzględną jednostkę elektromagnetyczną prądu stanowi *weber*: jest to prąd, który, obiegając 1 cm łuku koła o promieniu 1 cm, działa na 1 magnetyzmu w środku koła siłą 1 dyny. Praktyczna więc jednostka, amper, stanowi $\frac{1}{10}$ bezwzględnej jednostki, webera.

Określenie jednostki bezwzględnej prądu wynika z ogólnego prawa działania prądu na biegun magnetyczny; zowie się ono *prawem Biot Savarta* bądź *prawem Laplace'a*, gdyż ten ostatni wyprowadził je z doświadczeń Biota i Savarta:

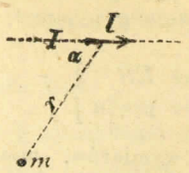
Siła wzajemnego oddziaływania prądu nu biegun magnetyczny jest wprost proporcjonalna do ilości magnetyzmu, do natężenia prądu, długości przewodnika i wstawy (sin) kąta między przewodnikiem a kierunkiem działania, oraz odwrotnie proporcjonalna do kwadratu odległości średniej przewodnika.

Siła P wyraża się w dynach, skoro wszystkie pomienione wielkości I, l, r, m wyrażono w jednostkach bezwzględnych (rys. 622):

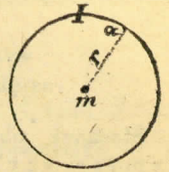
$$P = \frac{m \cdot I \cdot l}{r^2} \sin \alpha.$$

Dla prądu kołowego $l = 2\pi r$, kąt $\alpha = 90^0$, zatym (rys. 623):

$$P = 2\pi \frac{m \cdot I}{r}.$$



Rys. 622.



Rys. 623.

Stąd przy $P = 1$, $m = 1$, $r = 1$, oraz przyjęciu, zamiast całego obwodu 2 π cm, tylko jego części = 1 cm, wypada $I = 1$ weber.

Stosunek jednostek *EM* i *ES*. Amper = kul./sek, zaś weber = = 10 amp. = 10 kul./sek = 10 × 3 . 10^9 *ES*/sek = 3 . 10^{10} *ES*/sek. Zatym weber czyli jednostka *EM* prądu = 3 . 10^{10} jednostek *ES*, prądu; zarazem więc jednostka *EM* naboju = 3 . 10^{10} jednostek *ES* naboju.

Ze wzoru $L = e\,V$ (§ 107, art. 4) wynika, że praca $L = 1$ erg, gdy nabój $e = 1$ *ES* i potencjał $V = 1$ *ES*. Jeżeli nabój $e = 1$ *ES* wyrazić w jednostkach *EM*, wynosi on $\frac{1}{3 \cdot 10^{10}}$ *EM*; aby więc praca równała się tej samej jednostce = 1 erg, potencjał V musi być 3 . 10^{10} razy większy, bo praca 1 erg = nabój $\frac{1}{3 \cdot 10^{10}}$ *EM* × potencjał 3 . 10^{10} *EM*. Zatym jednostka *ES* potencjału = 3 . 10^{10} jedn. *EM* potencjału.

Wynika stąd że 1 wolt = $\frac{1}{300}$ *ES* wynosi $\frac{1}{300}$. 3 . 10^{10} = 10^8 jednostek *EM* potencjału.

Zestawienie jednostek *EM* i *ES*.

jednostka *EM* naboju jest równoważna	3 . 10^{10}	jedn. *ES*
„ *EM* prądu, weber . . .	3 . 10^{10}	„ „
„ *EM* potencjału i napięcia .	$\frac{1}{3}$. 10^{-10}	„ „
kulomb = $\frac{1}{10}$ jedn. *EM*	3 . 10^9	„ „
amper = $\frac{1}{10}$ jedn. *EM* webera .	3 . 10^9	„ „
wolt = 10^8 jedn. *EM*	$\frac{1}{300}$	„ „

Wymiar natężenia prądu. Ze wzoru Biot-Savarta wynika, po odrzuceniu sin α, który dla wymiaru nie ma znaczenia:

$$I = \frac{P \cdot r^2}{l \cdot m}.$$

Wymiar siły $P = LMT^{-2}$, wymiar masy magnetycznej $m = L^{3/2}M^{1/2}T^{-1}$; stąd

$$\left.\begin{matrix}\text{wymiar } EM \\ \text{natężenia prądu}\end{matrix}\right\} \quad I = \frac{LMT^{-2} \cdot L^2}{L \cdot L^{3/2}M^{1/2}T^{-1}} = L^{1/2}M^{1/2}T^{-1}$$

$$\left.\begin{matrix}\text{wymiar} \\ \text{jednostki prądu}\end{matrix}\right\} \quad = cm^{1/2}\, g^{1/2}\, sek^{-1}.$$

Wymiar ten elektromagnetyczny prądu można wyrazić w mierze elektrostatycznej, podstawiając wymiar elektrostatyczny naboju (§ 106) $e = L^{3/2}M^{1/2}T^{-1}$ do wzoru na natężenie prądu (art. 6 niniejszego §) $I = e/t$; stąd

$$\left.\begin{matrix}\text{wymiar } ES \\ \text{natężenie prądu}\end{matrix}\right\} \quad I = \frac{L^{3/2}M^{1/2}T^{-1}}{T} = L^{3/2}M^{1/2}T^{-2}.$$

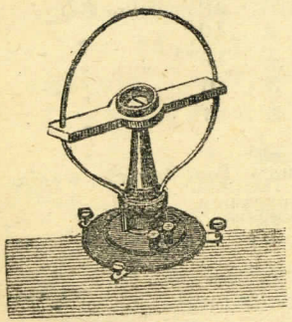
Stosunek obu wymiarów, mianowicie ES do EM, stanowi LT^{-1} czyli wymiar szybkości; liczebnie zaś stosunek obu $= 3 \cdot 10^{10}$. Teoretyczny stąd wniosek, że wyładowanie elektryczne rozchodzi się w przestrzeni z szybkością $3 \cdot 10^{10}$ cm/sek $= 300\,000$ km/sek, t. j. z szybkością światła (jest to szybkość elektronów, pt.).

Na tej zasadzie powstała elektromagnetyczna teorja światła (§ 97, art. 2), której rozwój stoi w związku z obecną teorją elektronową (pt.).

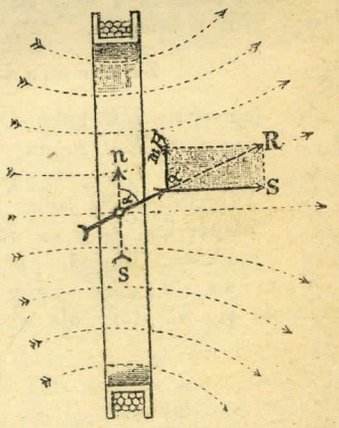
8. Pomiar bezwzględny natężenia prądu odbywa się bezpośrednio za pomocą *busoli stycznych* (Pouillet 1837, rys. 624); opiera się ona na zasadzie, że natężenie prądu jest proporcjonalne do stycznej (*tg*) kąta odchylenia igły magnesowej:

$$\text{natężenie prądu } I = k \cdot \operatorname{tg} \alpha$$

gdzie k oznacza stały czynnik, zależny od wymiaru przyrządu i miejsca. Obliczywszy raz jego wartość, oznacza się natężenie prądu w mierze bezwzględnej lub w amperach. Można też podziałkę na ampery umieścić w samym przyrządzie; wskazuje on wtedy wprost natężenie prądu w amperach i zowie się *amperometrem*.



Rys. 624. Busola stycznych.



Rys. 625. Zasada busoli stycznych.

Aby osiągnąć dokładną proporcjonalność I do tg α, należy umieścić igłę w polu jednostajnym, a więc pośrodku przewodnika kołowego o znacznej średnicy, aby długość igły stanowiła najwyżej $\frac{1}{10}$ tej średnicy.

Niech w środku obręczy, stanowiącej przewodnik (rys. 625 w przekroju), mieści się krótka igła ns o m jedn. magn., którą prąd odchyla o kąt α, do położenia R. Siła R jest wypadkową dwu sił: poziomej składowej magnetyzmu ziemskiego mH i elektromagnetycznego działania prądu S. Z konstrukcji wynika

$$S = mH \cdot \operatorname{tg} \alpha \text{ dyn.}$$

Zarazem wartość siły S podaje wzór § niniejszego, art. 7 (siłę S oznaczono tam literą P): $S = 2\pi \frac{mI}{r}$, a przy n zwojach przewodnika

$$S = 2\pi \frac{n\,m\,I}{r} \text{ dyn.}$$

Zatym $$\frac{2\pi n m I}{r} = mH \cdot \operatorname{tg} \alpha$$

i stąd $$I = \frac{rH}{2\pi n} \operatorname{tg} \alpha \text{ jedn. bezwzgl. czyli weberów}$$

albo $$I = 10 \cdot \frac{rH}{2\pi n} \operatorname{tg} \alpha = \frac{5\,r\,H}{\pi n} \operatorname{tg} \alpha \text{ amperów.}$$

Spółczynnik $\frac{5\,r\,H}{\pi n} = k$ ma wartość stałą dla danego przyrządu i miejsca, albowiem r, H, n są wielkościami stałymi.

Przykład. W Warszawie $H = 0{,}19$; zatym dla busoli o jednym zwoju drutu $n = 1$, a stała $k = (5\,r \cdot 0{,}19) : \pi = 0{,}3\,r$.

Stąd np. średnica obręczy busoli, w której prąd 10 amp. sprawia odchylenie 45°, wypada ze wzoru

$$10 = k \cdot \operatorname{tg} 45^0 = 0{,}3\,r \cdot 1, \text{ czyli } r = \frac{10}{0{,}3} = 33 \text{ cm.}$$

Średnica więc obręczy wynosi 66 cm. Dając na obręczy 2, 3 ... n zwojów przewodnika, osiąga się ten sam skutek przy obręczy 2, 3 ... n razy mniejszej.

§ 112. Opór elektryczny.

1. Pojęcie oporu. Prąd w ogniwie galwanicznym przebywa drogę między powierzchniami obu metalów; na zewnątrz zaś przepływa między biegunami przez druty i przyrządy włączone, które stanowią *obwód elektryczny*. W obwodzie więc można odróżnić część wewnętrzną i zewnętrzną (por. najprostsze ogniwo, rys. 606). Tak w jednej, jak w drugiej prąd napotyka pewien *opór*, t. j. pewną przeszkodę, która go mniej lub więcej osłabia.

Galwanoskop (rys. 611), włączony do obwodu, daje pewne odchylenie igły. Jeżeli blaszki (C, Z) ogniwa zbliżymy do siebie, odchylenie wzrasta, za oddaleniem słabnie. Takie same zmiany nastąpią, gdy drut (O) zastąpimy przez grubszy lub cieńszy.

Opór wywołuje spadek potencjału w przewodniku, po którym prąd płynie. Potencjał bowiem mierzymy pracą, na pokonanie zaś oporu zużywa się praca; zamienia się ona w ciepło, które częścią ogrzewa przewodnik, częścią rozprasza się w otoczeniu. Potencjał zatym jest inny w różnych miejscach przewodnika: im dalej od źródła prądu, tym potencjał jest niższy.

Natężenie prądu w całym obwodzie jest jednakowe; inaczej bowiem musiałby zbierać się i wzrastać wciąż w danym miejscu zasób elektryczności.

Doświadczenia. 1) Elektrometr czuły wskazuje na biegunie C ogniwa (rys. 606) wyższy potencjał, niż pośrodku drutu między C i Z, a na biegunie Z potencjał niższy, aniżeli między C i Z. — 2) Amperometr, włączony gdziekolwiek między C i Z, wskazuje jednakowe natężenie prądu.

Porównania. Ciśnienie wody płynącej zmniejsza się ku końcowi rury, wskutek tarcia (rys. 405). — Ilość wody, przepływającej w każdym przekroju rury, jest jednakowa, gdyż dopływ wody musi być równy odpływowi.

2. Jednostkę oporu stanowi *om*: jest to opór przewodnika, w którym napięcie 1 wolta wytwarza prąd 1 ampera.

Praktyczny *wzorzec oma* daje słupek rtęci o przekroju 1 mm² i długości 1,06 m, w temperaturze 0°. Gdy przez taki słupek przechodzi prąd 1 ampera, na końcach jego panuje różnica potencjałów 1 wolta.

3. Wartość oporu. *Oporem właściwym* zowie się opór przewodnika o długości 1 m i przekroju 1 mm², wszędzie jednakowym, przy temperaturze 0°. Im lepszym ciało jest przewodnikiem, tym mniejszy stawia opór, tak iż przewodnictwo (c) jest odwrotnością oporu właściwego (ρ):

$$c = \frac{1}{\rho} \qquad \text{oraz} \quad \rho = \frac{1}{c}.$$

Jeżeli np. prąd, płynący przez galwanometr i drut miedziany, wskazuje odchylenie 30°, to potrzebaby wiązki z sześciu drutów żelaznych takiej samej grubości i długości, aby otrzymać to samo odchylenie. Żelazo więc ma opór 6 razy większy, czyli przewodnictwo żelaza $\frac{1}{6}$ przewodnictwa miedzi.

Metale idą w tym samym porządku co do przewodnictwa elektrycznego, jak co do cieplnego. Opór metalów rośnie wraz z temperaturą, w przybliżeniu według wzoru $(1 + \alpha t)$, gdzie α ma wartość zbliżoną do spółczynnika rozszerzalności gazów. Opór płynów oraz węgla zmniejsza się za ogrzaniem. Opór wody doskonale czystej, jakiej w naturze niema, jest tak wielki, że stanowi ona prawie izolator.

Osobliwość stanowią stopy, których opór zawsze jest wyższy, niż metalów składowych (punkt topliwości zaś niższy, pt. „Topnienie"), i bardzo mało zmienia się za ogrzaniem (rozszerzalność cieplna jest również znikoma). Stąd nadają się one do pomiarów oporu i regulowania prądu, w postaci oporników (pt. art. 5).

Opór właściwy (ρ, w omach).

Srebro	0,016	Nikielina (Cu+Ni)	0,42
Miedź	0,017	Manganina (Cu+Mn)	0,68
Cynk	0,06	Rtęć	0,95
Platyna	0,09	Węgiel do lamp el.	40
Żelazo	0,10	Kwas azotowy	12 000
Nikiel	0,13	Kw. siarczany (10%)	20 000
Ołów	0,21	Woda czysta	$13 \cdot 10^9$

Opór jest wprost proporcjonalny do długości przewodnika i oporu właściwego, a odwrotnie do przekroju. Gdy l oznacza długość w metrach, q przekrój w mm, ρ opór właściwy, to

$$\text{opór } R = \frac{l \cdot \rho}{q} \text{ omów.}$$

Doświadczenia. 1) Drut miedziany o przekroju 2, 3, 4... mm², włączony do obwodu, daje takie samo odchylenie galwanometru, jak 2, 3, 4... druty o przekroju 1 mm², a tej samej długości. 2) Odchylenie się nie zmieni, gdy drut będzie 2, 3 4... razy dłuższy i zarazem 2, 3 4... razy grubszy w przekroju.

Przykład. Jaki opór ma kilometr linji telegraficznej, jeżeli stanowi ją drut żelazny 4 mm grubości? Odp. Opór $R = \frac{1000 \cdot 0{,}1}{\pi \cdot 2^2} =$ okr. 8 omów.

4. Prawo Ohma (1827). Natężenie prądu jest w stosunku prostym do napięcia, a odwrotnym do oporu.

$$\text{Natężenie } I = \frac{E}{R} = \frac{\text{napięcie}}{\text{opór}}.$$

I w amperach, E w woltach, R w omach.

Porównania. 1) Ilość wody, wypływającej w danym czasie w rury wzrasta w miarę ciśnienia wody, a zmniejsza się wskutek oporu, jaki woda napotyka w rurze. Opór ten, spowodowany tarciem wody, zależy od długości rury, jej przekroju, chropowatości. — 2) Prąd cieplny (§ 44, art. 3).

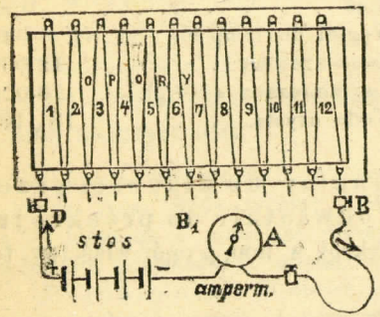
Prawo powyższe odnosi się zarówno do całego obwodu, jak do każdej jego części: pod $E = V_1 - V_2$ rozumieć należy różnicę potencjałów w dwu dowolnych punktach obwodu; pod $R = R_1 + R_2$ sumę oporu wewnętrznego i zewnętrznego, a ten ostatni może się składać z oporu przewodników, przyrządów mierniczych, maszyn albo lamp elektrycznych i t. p.

Z założenia $E = 1$ wolt, $R = 1$ om, wynika $I = 1$ amper:

$$\text{amper} = \frac{\text{wolt}}{\text{om}}.$$

Nawzajem, $R = \frac{E}{I}$, zatym przy $E = 1$ i $I = 1$, wynika $R = 1$, czyli określenie oma, jako jednostki oporu, podane w art. 2.

Doświadczalnie najdogodniej sprawdzić prawo Ohma za pomocą amperometru i stosu z dużych ogniw Greneta. Za opór służy drut nawinięty w zygzak na ramę drewnianą (rys. 626); skoro drut ten jest długi a cienki, można pominąć opory amperometru i stosu, jako bardzo nieznaczne.



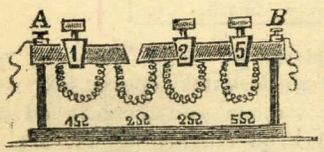
Rys. 626.

a) Wpływ napięcia. Włącza się w szereg stopniowo 1, 2, 3, 4 ogniwa, przez co napięcia się sumują. Niech opór ogólny wynosi np. 6 omów; wtedy amperometr wskaże natężenie $\frac{1}{3}$, $\frac{2}{3}$, 1, $\frac{4}{3}$ amp.

b) Wpływ oporu. Włącza się do obwodu jednego ogniwa kolejno opory 4, 8, 12 (jak w B) omów; natężenie prądu wyniesie $\frac{1}{2}$, $\frac{1}{4}$, $\frac{1}{6}$ amp.

5. Opornik czyli **reostat** stanowi zbiór oporów, które szybko i dogodnie można zmieniać w miarę potrzeby; służy bądź do pomiarów elektrycznych, bądź do regulowania prądu w praktyce elektrotechnicznej. Oporniki wyrabia się zwykle z drutu, którego metal posiada wysoki opór właściwy, a przytym mało zależny od zmian temperatury (dlaczego?). Opornikiem jest np. przyrząd w ramie rys. 626.

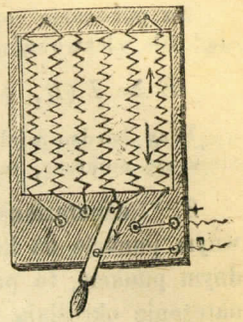
a) *Opornik zatyczkowy* (rys. 627) nadaje się głównie do pomiarów; opory tutaj dobiera się przez wyjmowanie kołeczków.



Rys. 627.
Opornik pomiarowy.

Składa się z cewek drutu, przytwierdzonych do sztaby mosiężnej, przepiłowanej w równych odstępach tak, iż koniec jednego drutu i początek drugiego łączą się z tym samym odcinkiem sztaby. Cewki posiadają opory: 1, 2, 2, 5, 10, 20, 20, 50... omów, jako też mniejsze i większe w tym stosunku. Wstawiając mosiężny kołeczek pomiędzy dwa odcinki, wyłączamy znany opór; wyjmując kołeczek, wtrącamy opór. Na rysunku np. opór całkowity między A i B wynosi 2 omy.

b) *Opornik korbowy* (rys. 628) kieruje prąd, za pomocą korby, kolejno przez rulony drutu o znacznym oporze, przez co natężenie prądu się zmienia. Np. przy ustawieniu korby, jak na rys. 628, prąd płynie tylko przez 2 rulony drutu; posuwanie korby na lewo (t. j. rączki na prawo) wprowadza 4 i 6 rulonów, czyli osłabia prąd stopniowo. Zastosowania: w tramwaju elektrycznym do zmiany szybkości; przy lampach elektrycznych, regulowanych ręcznie (rys. 667) do zmian jasności światła; w elektrowni do regulowania prądu maszyn.



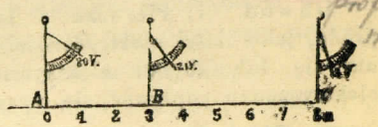
Rys. 628.
Regulator prądu.

6. Strata napięcia w przewodnikach. W jednostajnym przewodniku napięcia spada proporcjonalnie do długości przewodnika. Wynika to ze wzoru Ohma, który można napisać w postaci:

$$\text{napięcie } E = I \,.\, R = \text{natężenie} \times \text{opór}.$$
(wolt = amper × om)

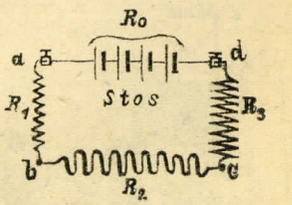
Ponieważ opór R jest proporcjonalny do długości l przewodnika, czyli $R = l \,.\, k$, można wyrazić napięcie $E = I \,.\, l \,.\, k$.

Doświadczenie (rys. 629). Jeżeli w drucie AC, długim na 8 m, płynie prąd i elektrometr w A wskazuje 30 woltów, w C zaś 6 woltów, to w punkcie B, odległym od A o 3 m, potencjał wynosi 21 W. Całkowita bowiem strata napięcia na długości 8 m wynosi 24 W, zatym spadek napięcia wynosi 24 : 8=3 W na 1 m, zatym w odstępie 3 m, potencjał wynosi 3 × 3 = 9 W: 30 W — 9 W = 21 W.



Rys. 629. Spadek napięcia.

7. Napięcie użyteczne stosu, t. j. różnica potencjałów na końcówkach stosu czynnego, jest zawsze mniejsza od siły elektrowzbudzającej. Część bowiem siły elektrowzbudzającej stosu zużywa się na pokonanie oporu wewnętrznego ogniwa; napięcie zaś biegunowe stanowi tę część siły elektrowzbudzającej, która idzie na pokonanie oporów zewnętrznych. Tylko przy obwodzie otwartym, albo przy niezmiernie wielkim oporze zewnętrznym, napięcie staje się równe sile elektrowzbudzającej.



Rys. 630.

Jeżeli między bieguny a i d stosu (rysunek 630) włączono opory R_1, R_2, R_3 w szereg, jeden za drugim, prąd w każdym z nich $= I$, a napięcie

między a i b wynosi $E_1 = I \,.\, R_1$ woltów
„ b i c „ $E_2 = I \,.\, R_2$ „
„ c i d „ $E_3 = I \,.\, R_3$ „

Zatym całkowite napięcie użyteczne między a i d

$$E_p = E_1 + E_2 + E_3 = I\,(R_1 + R_2 + R_3) \text{ woltów.}$$

Na pokonanie oporu R_0 stosu potrzeba nadto napięcia $E_0 = I \,.\, R_0$; stąd siła elektrowzbudzająca

$$E = I\,(R_1 + R_2 + R_3 + R_0) = E_p + I \,.\, R_0 = E_p + E_0.$$

Przy bardzo wielkim oporze zewnętrznym $(R_1 + R_2 + R_3)$ siła prądu I staje się znikomą, tak iż wyraz $IR_0 = 0$; wtedy $E_p = E$.

8. Rozgałęzienie prądu. Jeżeli przewodnik się rozgałęzia w pewnym punkcie na kilka odnóg, które się następnie schodzą znów w jednym punkcie, to prąd przepływa wszystkimi odnogami, przyczym jego natężenie określają *prawa Kirchhoffa* (1847):

1) Natężenie prądu całkowitego równa się sumie natężeń w odnogach. Inaczej: suma algebryczna prądów w miejscach rozgałęzienia $= 0$.

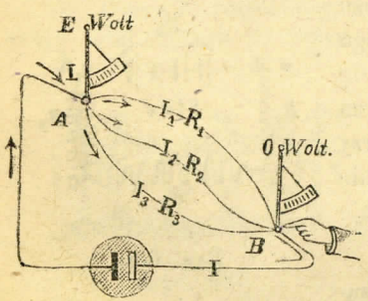
2) Prądy w każdej odnodze mają natężenia odwrotnie proporcjonalne do oporów tych odnóg.

Dowód. 1) Pierwsze z tych praw wypływa z pojęcia o natężeniu prądu, jako ilości elektryczności na sekundę. Ażeby nie było nagromadzenia się lub ubytku elektryczności w miejscach rozgałęzienia, musi tyleż elektryczności odpływać, ile przypływa.

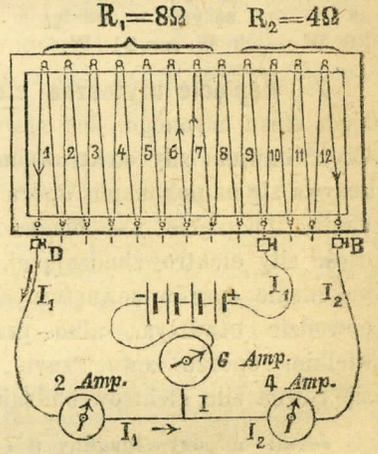
2) Między punktami rozgałęzienia A i B (rys. 631) panuje napięcie E, które można wyrazić w pierwszej odnodze przez $I_1 \,.\, R_1$, w drugiej przez $I_2 \,.\, R_2$, w trzeciej przez $I_3 \,.\, R_3$; zatym

$$I_1 R_1 = I_2 R_2 = I_3 R_3.$$

Stąd $I_1 : I_2 = R_2 : R_1$ i t. p.



Rys. 631.



Rys. 632.

Doświadczalnie można stwierdzić prawa Kirchhoffa za pomocą amperometrów i opornika, jak wskazuje rys. 632.

Opór ogólny R wszystkich odnóg można wyznaczyć ze wzoru

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} \cdots$$

Wynika to z podstawienia w równaniu $I = I_1 + I_2 + I_3$ wartości $I = \frac{E}{R}$, $I_1 = \frac{E}{R_1}$ i t d., oraz skrócenia przez E.

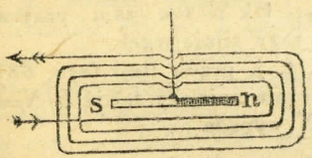
Szczególny przypadek, spotykany często w łączeniu równoległym lamp elektrycznych, dzwonków i t. p., ma miejsce, gdy opory r każdej z n odnóg są jednakowe; wtedy opór ogólny $R = \frac{r}{n}$.

§ 113. Pomiary elektryczne.

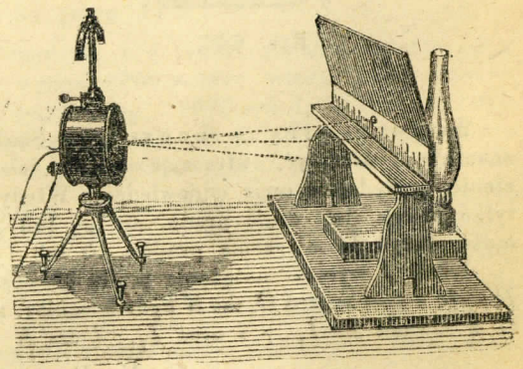
1. Pomiar natężenia. Do mierzenia prądów bardzo słabych służą *galwanometry*, gdzie igła magnesowa odchyla się pod wpływem prądu (§ 111, art. 2). Do galwanometrów zalicza się też busola stycznych (rys. 624), używana do mierzenia prądów silniejszych. Przyrządy powyższe mają wspólną wadę, iż dają wskazówki niedokładne w razie sąsiedztwa prądów obcych albo ciał magnetycznych; poza tym odczytywanie jest utrudnione przez wahania igły, które trwają długo.

Powszechnie mierzymy prądy za pomocą *amperometrów*, niezależnych od wpływu otoczenia, a działających bądź przez wciąganie magnetyczne żelaza do solenoidu, bądź przez odchylenie przewodnika w polu silnego magnesu; stąd dwa główne rodzaje amperometrów.

1) *Galwanometr zwykły* (Schweiger 1821, rys. 633) zawiera igłę magnesową wewnątrz cewki z drutu izolowanego. Im więcej zwojów drutu ma cewka, tym silniej odchyla igłę, każdy swój bowiem pomnaża działanie prądu; stąd przyrząd o licznych zwojach zowie się także *multyplikatorem*. Podziałkę zwykle miewa w stopniach (łukowych), tak iż nie ma ona określonej zależności od siły prądu i nadaje się głównie do porównań.

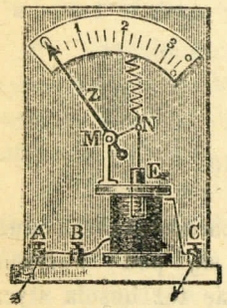


Rys. 633.
Zasada galwanometru.



Rys. 634. Galwanometr zwierciadłowy.

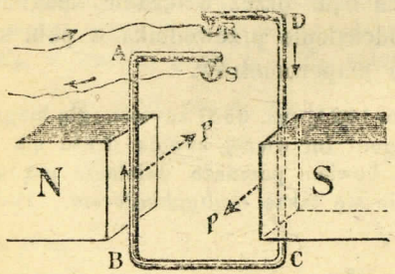
2) *Galwanometr zwierciadłowy* (Thompsona, rys. 634) różni się od poprzedniego w tem, że magnes posiada nader lekki, przytwierdzony do maleńkiego lusterka, tak iż wespół z nim się obraca. Podziałka znajduje się w znacznej odległości, przyczem stosuje się tu odczytywanie za pomocą lunety metodą Poggendorffa (rys. 471), albo plamy świetlnej, jaką lusterko rzuca na podziałkę (rys. 634). Jest to przyrząd nadzwyczaj czuły, wskazujący miljonowe części ampera. Odchylenie nie przenosi kilku stopni, tak iż można je uważać za proporcjonalne do siły prądu.



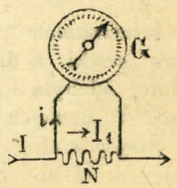
Rys. 635. Amperometr.

3) *Amperometr elektromagnetyczny* (Kohlrauscha, rys. 635) posiada solenoid, wciągający w siebie rdzeń żelazny E, który porusza skazówkę Z; przeciwdziała wciąganiu sprężyna N. Podziałkę w amperach uskutecznia się doświadczalnie przez włączenie busoli stycznych lub innego przyrządu, wskazującego natężenie prądu, np. woltametru (pt.).

4) *Amperometr elektrodynamiczny* (Depreza, zasada na rys. 636) polega na wzajemnym oddziaływaniu prądu i magnesu. Ramka z drutu obraca się między biegunami magnesu, skoro przez nią płynie prąd. Przymocowana do ramki skazówka podaje wprost natężenie prądu na skali, wyznaczonej z doświadczenia. Jest to najdokładniejszy i najczulszy z przyrządów technicznych; nadto ma zaletę, że jest *aperjodyczny*, t. j. skazówka odchylona nie waha się, ale staje odrazu na właściwej działce (powody: silne, prawie zamknięte pole magnetyczne; drobna masa do poruszania).



Rys. 636.



Rys. 637.
Amperometr z bocznicą.

Amperometry z bocznicą. Skalę każdego amperometru można znacznie rozszerzyć, wtrącając między ich końcówki *bocznicę*, t. j. odgałęzienie, posiadające opór odpowiedni. Wtedy przez amperometr przechodzi tylko pewna stała część prądu, np. $\frac{1}{10}$ lub $\frac{1}{100}$, tak iż ten sam przyrząd może służyć do mierzenia prądów 10 lub 100 razy silniejszych.

Jeżeli I wyraża natężenie prądu głównego, t. j. prądu linji (rys. 637), R opór amperometru G, zaś N opór bocznicy, znacznie mniejszy, tak iż $R/N = n$, to z równań $I = I_1 + i$ oraz $I_1 : i = R : N$ wypada

$$I = i \cdot \frac{N+R}{N} = i\,(n+1).$$

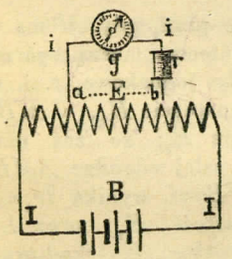
Zwykle $I = 10\,i$, $100\,i$, $1000\,i$; $n = 9$, 99, 999; czyli $N = \frac{1}{9}R$, $\frac{1}{99}R$, $\frac{1}{999}R$.

2. Pomiar napięcia. Za pomocą czułego amperometru o bardzo znacznym oporze można oznaczyć napięcie, panujące między dwoma punktami obwodu; przy stałym bowiem oporze napięcie jest proporcjonalne do natężenia prądu. Przyrząd taki włącza się w odgałęzienie danych punktów i zowie się *woltmetrem*.

Przez woltmetr przechodzi drobna część i prądu głównego I; ponieważ opór R przyrządu jest wiadomy, oblicza się stąd napięcie $E = iR$, podobnież $E_1 = i_1R$, $E_2 = i_2R$... Wartość iR, i_1R, i_2R... zaznacza się w przyrządzie zamiast i, i_1, i_2... W ten sposób podziałka woltmetru wskazuje bezpośrednio napięcia.

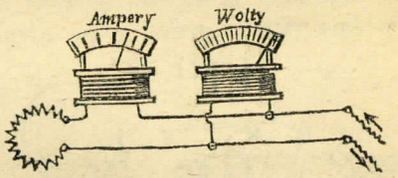
Aby np. oznaczyć napięcie między a i b (rys. 638), włącza się tu woltmetr g z dodatkiem wielkiego oporu r, tak iż natężenie prądu głównego I nie zmieni się prawie wskutek takiego upustu nikłej części i prądu. Opór $g + r = R$ musi być tak znaczny, aby wobec niego można pominąć opory linji i stosu. Wtedy

$$E = i \,.\, R = i \,.\, \text{const.}$$



Rys. 638.

t. j. napięcie między a i b jest proporcjonalne do natężenia prądu w woltmetrze.



Rys. 639.

Przykład. Jeżeli ogniwo Meidingera daje na galwanometrze natężenie prądu i, to 2 ogniwa dadzą $2\,i$, 3 ogniwa $3\,i$ i t. d.

Niech przyrząd wskazuje miliampery, t. j. każda działka oznacza $\frac{1}{1000}$ ampera, a opór przyrządu niech wynosi 1000 omów; wtedy jedna działka przyrządu odpowiada 1 woltowi, gdyż $\frac{1}{1000} \cdot 1000 = 1$. Skoro ten sam przyrząd otrzyma cewkę r o większym oporze, tak iż całkowity opór $R = 10\,000$ omów, każda działka oznacza 10 woltów, gdyż $\frac{1}{1000} \cdot 10\,000 = 10$.

3. Pomiar natężenia i napięcia równocześnie stosuje się powszechnie w technice; daje on w każdej chwili sprawność elektryczną instalacji. Amperometr włącza się zawsze w linję główną, woltmetr w odgałęzienie (rys. 639). Oba te przyrządy z dodatkiem opornika i klucza czyli wyłącznika do prądu umieszcza się zwykle na tablicy szyfrowej lub marmurowej, która stanowi dla nich podkład izolacyjny; urządzenie takie zowie się *tablicą rozdzielczą*, gdyż służy do rozprowadzania i regulowania prądu.

4. Pomiar oporów. 1) *Metoda podstawienia.* Włącza się do obwodu galwanometru badany opór, a następnie wprowadza się zamiast niego opornik zatyczkowy; opór tegoż dobiera się tak, aby galwanometr dał takie same odchylenie, jak poprzednio. Wtedy oba opory są równoważne.

Tą drogą można oznaczyć opór wewnętrzny ogniwa: należy włączyć do obwodu dwa jednakowe ogniwa przeciwnymi biegunami, aby nie dawały prądu; opór, jaki wypadnie, podwojony, stanowi opór ogniwa.

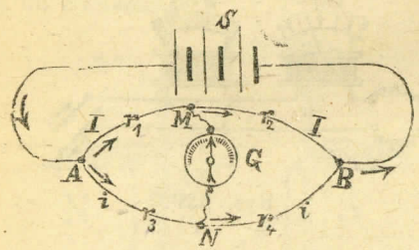
Metoda podstawienia, prosta i dogodna, daje przy pomiarach oporów zbyt małych wyniki niedość dokładne; włączenie bowiem drobnego oporu sprawia tylko nieznaczną zmianę w odchyleniu galwanometru.

2) *Mostek Wheatstone'a* (rys. 640). Obwód stosu S rozgałęzia się na 2 odnogi, pomiędzy którymi przerzuca się mostek MN z galwanometrem G. W mostku niema wcale prądu, gdy stosunek oporów w jednej odnodze jest taki sam, jak w drugiej:

$$r_1 : r_2 = r_3 : r_4.$$

Na tej zasadzie można wyznaczyć opór badany, skoro pozostałe trzy są wiadome.

Dowód. W przewodniku MN wtedy płynie prąd, gdy M ma wyższy potencjał niż N, lub przeciwnie. Skoro prądu niema, muszą być oba potencjały jednakowe, t. j. w AM i AN napięcie E_1, w MB i NB napięcie E_2; że zaś natężenie prądu całej odnodze $AMB = I$, w $ANB = i$, wynika $Ir_1 = ir_3$ jako wartość E_1, oraz $Ir_2 = ir_4$ jako wartość E_2, skąd przez podział $r_1 : r_2 = r_3 : r_4$.



Rys. 640. Mostek Wheatstone'a.

Porównanie. Gdyby zamiast stosu była w S pompa wodna, a zamiast drutów rury, to woda płynęłaby w kierunku AMB i ANB; w rurze zaś łącznej MN nie byłoby prądu, gdyby w M i N poziom wody był jednakowy.

W wykonaniu praktycznym mostka odnogę AMB stanowi drut prosty, po którem przesuwa się kontakt M; stosunek oporów $r_1 : r_2$ zastępuje się stosunkiem ich długości $l_1 : l_2$. Między B i N wtrąca się opór badany x, między A i N opornik zatyczkowy i dobiera się opór r tegoż, aby sprowadzić igłę galwanometru do zera. Wtedy $x = l_2 r : l_1$.

Stos można przestawić na miejsce galwanometru i nawzajem.

Mostek Wheatstone'a nadaje się również do mierzenia oporu cieczy. W tym celu należy użyć prądu zmiennego (pt.), a galwanometr zastąpić telefonem, ciecze bowiem ulegają rozkładowi pod wpływem prądu stałego.

5. Pomiar wielkości stałych ogniwa, t. j. siły elektrowzbudzającej i oporu wewnętrznego, można uskutecznić za pomocą amperometru, którego opór jest bardzo mały w porównaniu do oporu ogniwa, tak aby go można było pominąć.

Jeżeli podobny galwanometr wskazuje natężenie prądu I, włącza się taki opór r, aby natężenie spadło do $\frac{1}{2} I$; wtedy

opór wewnętrzny ogniwa $R = r$
siła elektrowzbudzająca ogniwa $E = Ir$.

Dowód. Przed włączeniem oporu $I = \frac{E}{R}$; po włączeniu $\frac{I}{2} = \frac{E}{R+r}$. Podstawiając tutaj poprzednią wartość I, otrzymujemy $\frac{E}{2R} = \frac{E}{R+r}$, skąd $R = r$. Zatym $I = \frac{E}{r}$, czyli $E = Ir$.

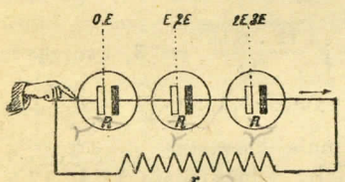
6. Łączenie ogniw w stosie. Mając n ogniw jednakowych, każde o sile elektrowzbudzającej E i oporze wewnętrznym r, można łączyć z sobą ogniwa, zależne od oporu zewnętrznego R, w sposób trojaki.

1) *Połączenie rzędowe* albo *szeregowe* (rys. 641, por. także rys. 612). Biegun dodatni pierwszego ogniwa łączy się z ujemnym drugiego, dodatni drugiego z ujemnym trzeciego i t. d. Wtedy siła elektrowzbudzająca stosu jest n razy większa, niż jednego ogniwa (§ 110, art. 4), jako też droga prądu n razy dłuższa, zatym opór wewn. n razy większy; stąd

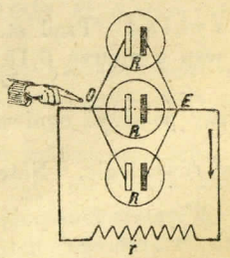
$$I = \frac{nE}{nr+R}.$$

Powyższy sposób łączenia bywa korzystny przy znacznym oporze zewnętrznym R, wobec którego opór stosu nr można pominąć, tak iż $I = n \cdot \frac{E}{R}$, t. j. natężenie prądu rośnie z liczbą ogniw.

Gdyby R było bardzo małe, $I = \frac{nE}{nr} = \frac{E}{r}$, t. j. natężenie prądu byłoby niezależne od n, czyli cały stos miałby prąd tak silny, jak jedno ogniwo.



Rys. 641. Połączenie rzędowe.



Rys. 642. Połączenie równoległe.

2) *Połączenie równoległe* (rys. 642). Wszystkie bieguny dodatnie łączą się między sobą, podobnież wszystkie ujemne. Stos działa jak jedno ogniwo o powierzchni n razy większej, czyli oporze n razy mniejszym; stąd

$$I = \frac{E}{\frac{r}{n} + R}.$$

Wzór ten wskazuje, że połączenie równoległe nadaje się przy bardzo małym R; wtedy bowiem $I = E : \frac{r}{n} = n\frac{E}{r}$, t. j. natężenie prądu wzrasta z liczbą ogniw n. Przy wielkim R wypada $I = \frac{E}{R}$, t. j. prąd stosu taki sam, jak jednego ogniwa.

3) *Połączenie mieszane.* Stos składa się z q rzędów po p ogniw w każdym rzędzie, tak iż $n = p.q$; działa więc jak stos z p ogniw o powierzchni q razy większej, czyli oporze q razy mniejszym, niż jednego ogniwa. Całkowity opór wewnętrzny stosu r_s wynosi pr/q, zatym

$$I = \frac{pE}{\frac{p}{q}r + R} = \frac{E}{\frac{r}{q} + \frac{R}{p}}.$$

Najkorzystniejsze ugrupowanie ogniw zachodzi wtedy, gdy opór zewnętrzny R równa się wewnętrznemu oporowi r_s całego stosu.

Z ostatniego bowiem wzoru wynika, że natężenie I jest tym większe, im mianownik $r/q + R/p$ jest mniejszy. Według teorji najmniejszości, suma dwu składników zmiennych, których iloczyn jest stały, ma wtedy najmniejszą wartość, gdy oba składniki są sobie równe; ponieważ $\frac{r}{q} \times \frac{R}{p} = \frac{rR}{n} = \text{const.}$, musi być $\frac{r}{q} = \frac{R}{p}$, czyli $R = r\frac{p}{q} = r_s$.

Liczba ogniw p w każdym rzędzie wypada z pomnożenia stosunku p/q w ostatniej równości przez p; liczba rzędów q wypada z pomnożenia tegoż przez q. Stąd

$$p = \sqrt{\frac{nR}{r}} \qquad q = \sqrt{\frac{nr}{R}}.$$

Przykład. Prąd stosu z 12 ogniw Greneta płynie przez cewkę elektromagnesu o oporze 0,15 Ω; siła elwzb. ogniwa = 1,9 W, opór = 0,2 Ω.

Należy połączyć ogniwa w szereg po $\sqrt{\frac{12 \cdot 0{,}15}{0{,}2}} = 3$, tworząc z nich 4 grupy równoległe. Natężenie prądu wynosi $1{,}9 : \left(\frac{0{,}2}{4} + \frac{0{,}15}{3}\right) = 19$ amperów. Wszelkie inne połączenia byłyby mniej korzystne: przy 1, 2, 4, 6, 12 ogniwach w szeregu natężenia wyniosłyby odpowiednio 11,4, 17,5, 18,2, 15,2, 8,9 amperów.

Zastosowania. Najczęściej stosuje się łączenie ogniw w szereg, np. do telegrafu, telefonu, elektryzowania ciała, światła elektrycznego. Łączenie równoległe i mieszane, używane do celów elektrochemicznych, do większych dzwonków, dogodniej bywa zastąpić przez dobór większych ogniw.

Zadania.

1. Jakiego trzeba napięcia, aby przez drut miedziany 5 mm grubości, a 135 m długości, przechodził prąd 15 A? Odp. 1,81 wolta.

2. Na końcach 45 km linji telegraficznej, którą stanowi drut żelazny 4 mm grubości, panuje napięcie 20 W. Jakie jest natężenie prądu? Odp. 0,056 A.

3. Do dzwonka elektrycznego zastosowano baterję o sile elwzb. 2 W i oporze wewn. 4 Ω; przewodniki mają opór 3 Ω, dzwonek 5 Ω. Jakie działa natężenie prądu? Odp. $\frac{1}{6}$ A.

4. Busola stycznych posiada obręcz o średnicy 28 cm, wyrobioną z taśmy miedzianej, grubej na 2 mm, a szerokiej na 2 cm. Ile wynosi opór obręczy? Odp. 0,00037 Ω, t. j. praktycznie jest znikomy.

5. Cewka solenoidu składa się z drutu miedzianego grubości 0,8 mm, nawiniętego w 9 warstwach, po 75 zwojów w każdej warstwie, średnica cewki zewnętrzna 42 mm, wewnętrzna 20 mm. Oznaczyć opór solenoidu. Odp. Średnica przeciętna zwojów = (42 + 20) : 2 = 31 mm; długość drutu = 3,14 . 0,031 . 75 . 9 = okr. 132 m; opór = 0,55 Ω.

6. Z ilu ogniw Meidingera, o sile elwzb. 1 W, powinien składać się stos do telegrafowania przez ocean, na 5000 km, jeżeli przewodnik miedziany w kablu ma grubość 1,15 mm, a wymagane natężenie prądu wynosi przynajmniej 0,001 A? Ile potrzebaby wzamian ogniw Leclanchego? Odp. Opór linji = 85 000 Ω, wobec czego można pominąć opór przyrządów i stosu; $E = E_p$ = 75 W, co odpowiada 75 ogniwom Meidingera albo 58 Leclanchego.

7. Ogniwa Meidingera, używane na stacjach telegraficznych, mają siłę elwzb. 1 W i opór wewnętrzny 9,5 Ω. Ile powinien wynosić opór zewnętrzny, aby w nim przepływał prąd 0,01 A przy użyciu 64 ogniw w szereg połączonych? Odp. 5792 Ω.

8. Na jaką odległość można telegrafować za pomocą baterji powyższej, jeżeli opór samych przyrządów telegraficznych = 1000 Ω, a drut żelazny linji ma grubość 4 mm? Odp. 725 km.

9. Dlaczego do elektryzowania ciała ludzkiego, którego opór wynosi średnio 5000 Ω, przy ujęciu biegunów w ręce, wielkość ogniw stosu nie ma znaczenia?

10. Jakie natężenie prądu daje proste ogniwo galwaniczne (rys. 608), gdzie blaszki *Zn* i *Cu*, długie na 12,5 cm, a szerokie na 8 cm, znajdują się od siebie w odstępie 2 cm? Płyn stanowi kwas siarczany 10%; przewodnikiem jest drut miedziany 0,8 mm grubości, a 2 m długości. Odp. Opór wewnętrzny = $\frac{0{,}02 \cdot 30\,000}{10\,000} = 0{,}06$ Ω, opór zewn. = $\frac{2 \cdot 0{,}018}{\pi \cdot (0{,}4)^2} = 0{,}07$ Ω; natężenie = $\frac{1{,}06}{0{,}13} = 8$ A.

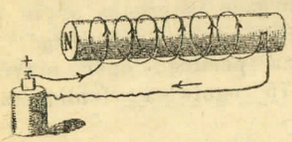
B) ENERGJA PRĄDU ELEKTRYCZNEGO.

Energja elektryczna zamienia się dogodnie na inne rodzaje energji: objawia się w postaci pracy mechanicznej, chemicznej, cieplnej, promienistej.

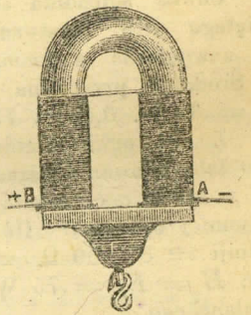
§ 114. Praca mechaniczna prądu.

1. Elektromagnes (Sturgeon 1825). Mechaniczne skutki prądu i zastosowania polegają na użyciu *elektromagnesów*, t. j. solenoidów, zawierających wewnątrz stały rdzeń żelazny, który znakomicie potęguje pole magnetyczne solenoidu. Żelazo więc, owinięte drutem izolowanym, po którym płynie prąd, staje się potężnym magnesem; po przerwaniu prądu traci siłę magnetyczną, tym zupełniej, im jest czystsze i bardziej rozdrobnione.

Co do postaci elektromagnesy bywają *proste* (rys. 643), lub *dwuramienne* (rys. 644); pierwsze mają jednę cewkę drutu, ostatnie dwie cewki nawinięte w kierunkach przeciwnych (dlaczego?).



Rys. 643. Elektromagnesy.



Rys. 644.

Odrębną postać mają elektromagnesy pierścieniowe i bębnowe (pt. „Prądnice").

Rodzaj biegunów elektromagnesu wypływa z kierunku prądu. Dogodną w tym względzie jest reguła skazówek zegarowych, według której dokoła bieguna południowego płynie prąd zgodnie z obrotem skazówek na zegarze (§ 111, art. 3).

2. Siła elektromagnesu, zatym natężenie pola magnetycznego, zależy od wymiaru i właściwości żelaza, zwanej *przenikliwością magnetyczną*, t. j. zdolności zagęszczania linji sił; nadto rośnie w miarę natężenia prądu i liczby zwojów drutu, t. j. liczby amperozwojów.

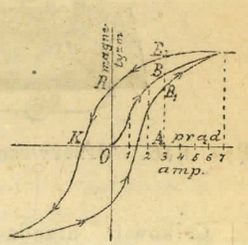
Zależność między siłą elektromagnesu P w dynach, natężeniem prądu I w amperach, liczbą zwojów n oraz przenikliwością μ wyraża wzór:

$$P = \frac{4\pi}{10}\,\mu\,.\,I\,n$$

gdzie μ dla żelaza ma wartość od 400 do 1000. Wartość ta nie jest stała, ale rośnie przy magnesowaniu, tak iż wzór stosuje się w grubym przybliżeniu. Duży elektromagnes może udźwignąć kilkaset kg.

Siła elektromagnesu wzrasta tylko dotąd, póki żelazo nie zostanie nasycone; wszelkie dalsze wzmacnianie prądu, czy powiększanie ilości zwojów nie ma żadnego wpływu. Wynika to już z teorji Ampère'a: najwyższą siłę osiąga magnes wtedy, gdy wszystkie prądy cząstkowe (kołowe), które w żelazie krążą rozmaicie, zostaną skierowane równolegle i zgodnie pod działaniem prądu magnesującego.

3. Przebieg magnesowania. Zasilając elektromagnes prądem 1, 2, 3... amperów, zaznaczamy na osi poziomej natężenia prądu i wystawiamy tu prostopadłe, odpowiadające natężeniu magnetyzmu. Powstaje stąd krzywa namagnesowania OB (rys. 645), która np. powyżej 7 amp. ma przebieg poziomy, świadcząc, iż żelazo osiągnęło stan nasycenia. Za osłabieniem prądu do OA, np. do 3 amp., magnetyzm jest silniejszy, niż przy wzrastaniu do 3 amp., t. j. $AB_2 > AB$; nawet przy prądzie=0 pozostał znaczny magnetyzm szczątkowy OR. Dopiero zmiana kierunku prądu sprowadza magnetyzm do zera; natężenie prądu OK jest wtedy miarą koercji (§ 102, art. 7). Następnie przy wzmacnianiu prądu przeciwnego wzrasta również magnetyzm przeciwny, aż do nasycenia żelaza. Odwracając wtedy kierunek prądu tak, iż tenże stał się zgodny z pierwotnym, otrzymuje się przy tym samym prądzie OA natężenie magnetyzmu $AB_1 < AB$, t. j. słabsze od pierwotnego. Takie opóźnianie magnesowania zowie się *histerezą*.



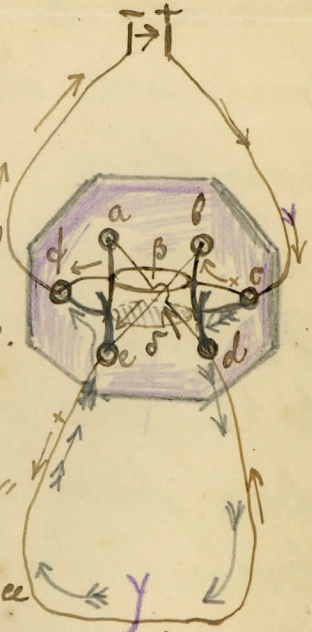
Rys. 645. Histereza.

Zjawisko histerezy, występujące przy prądzie zmiennym, ma przebieg ciągły; wyobraża się więc krzywą zamkniętą. Marnuje ono część pracy elektrycznej, która się zamienia na ciepło, a której wartość ocenia się z wielkości pola, objętego krzywą. Stąd elektromagnesy do prądu zmiennego, np. w transformatorach i prądnicach (pt.), robi się z żelaza możliwie czystego i rozdrobnionego na blachy lub druty, aby koercja była jak najmniejsza.

4. Przyrządy elektromagnetyczne. 1) *Przerywacz elektromagnetyczny* służy do szybkiego i samorzutnego przerywania prądu, np. kilka do kilkudziesięciu razy na sekundę, stosuje się w dzwonku elektrycznym, do elektryzowania ciała, do cewki indukcyjnej (pt.).

Przełącznik

dla zmieniania kierunku prądu.



Deska dość gruba posiadająca sześć wgłębień (a, b, c, d, e, f) wypełnionych rtęcią. Od „b" do „e" idzie przewodnik; od „d" do „a" również połączenie idące nad drutem „~~ad~~ be". Ponad temi połączeniami idzie drut „cf" mający rączkę „β" (izolowaną) z wtykami tak, aby raz je zanurzyć do „a, b"; drugi raz do „e, d"

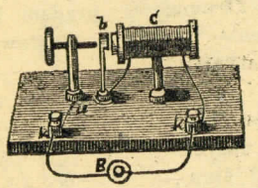
umieszczając rączkę w pozycję „δ" na rys. kropkowaną.

W pierwszym wypadku prąd idzie z baterji do „c", przez wtyk do „b", dalej do „e", przez przewodnik do „d, a" dalej przez drugi wtyk rączki do „f" i do baterji.

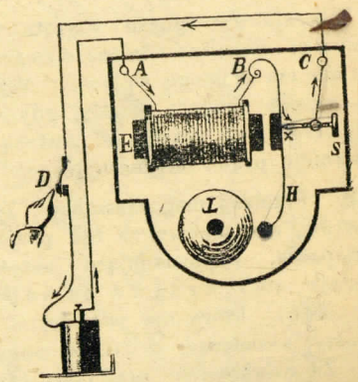
W drugim wypadku z baterji do „C", przez wtyk rączki do „d", przez przewodnik - w kierunku przeciwnym - do „e", przez drugi wtyk do „f" oraz do baterji. Przestawiając rączkę zmieniamy kierunek prądu w przewodniku „γ".

Najprostszą postać przerywacza stanowi *młotek Neefa* albo *Wagnera* (rys. 646). Prąd idzie przez słupek *a*, sprężynę *b*, na której osadzono młotek, czyli zbroję elektromagnesu; dalej przez cewkę *c* i wraca do ogniwa *B*. Namagnesowany rdzeń cewki przyciąga młotek, odrywając go od słupka, przez co prąd się przerywa, żelazo traci magnetyzm, sprężyna wraz z młotkiem odskakuje do poprzedniego położenia i t. d. Miejsca stykowe czyli *kontakty*, gdzie prąd się przerywa, winny być platynowe, aby się nie utleniały i nie stapiały od iskier, jakie tu występują.

2) *Dzwonek elektryczny* jest przerywaczem, opatrzonym kulką, która za każdą przerwą prądu uderza w kopułkę dzwonka.



Rys. 646. Przerywacz młotkowy.



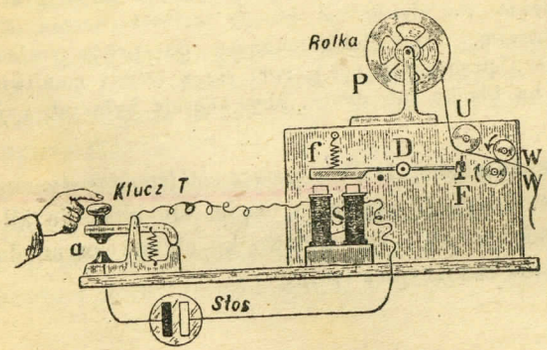
Rys. 647. Dzwonek elektryczny.

Całkowite urządzenie dzwonka objaśnia rys, 647; w *D* jest *przycisk*, ścienny lub wiszący. Do dzwonka wystarcza zwykle prąd 2 ogniw Leclanchego; przy dłuższych przewodach 3 lub 4 ogniwa.

3) *Telegraf kreskowy* (Morse 1837), najprostszy i najpewniejszy przyrząd do przesyłania depesz, drukuje na taśmie papierowej kreski i kropki, z których ułożono cały alfabet. Naprzykład

M o r s e

— — — — — . — . . .



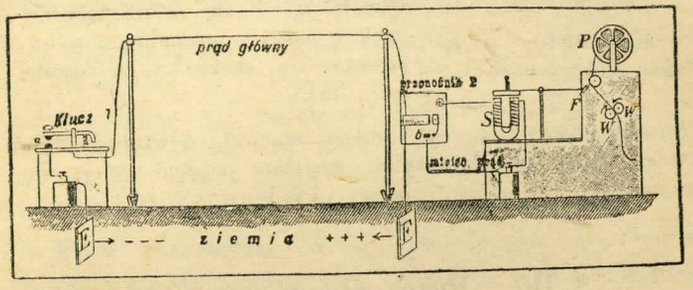
Rys. 648. Telegraf Morsego.

Źródłem prądu bywa stos Leclanchego lub Meidingera z kilkunastu do kilkudziesięciu ogniw.

Działanie. Za naciśnięciem *klucza* czyli przycisku *T* (rys. 648), elektromagnes *S* przyciąga zbroję *f*, osadzoną na dźwigni, która się obraca koło osi *D*; wtedy drugi koniec dźwigni, opatrzony piórkiem *F*, dotyka taśmy papierowej, którą wciąż snuje z rolki

przyrząd zegarowy. Skoro się prąd przerwie, zbroję *f* odrywa od biegunów sprężyna, a tym samym piórko odstaje od taśmy. W ten sposób za chwilowym naciskiem klucza powstaje na taśmie kropka, za dłuższym kreska.

Klucz i baterja stanowią w y s y ł a c z, przyrząd drukujący stanowi o d b i e r a c z. Zamiast łączyć obie stacje drutem podwójnym, idącym od każdego bieguna stosu, używa się dla oszczędności jednego tylko przewodnika, drugi zaś na każdej stacji wpuszcza się do ziemi, jak wskazuje rys. 649; takie *uziemienie* daje drogę prądowi obu stacji, bo potencjał ziemi = 0.



Rys. 649. Połączenie telegraficzne.

Ponieważ prąd, przebywając długą linję telegraficzną, dochodzi do stacji odbiorczej bardzo osłabiony i nie jest w stanie pobudzić dostatecznie magnesu, włącza się w obwód prądu linjowego nie sam magnes *S*, ale t. zw. *przenośnik* (franc. relais, *R*). Jest to bardzo czuły elektromagnes, przyciągający zbroję, skoro obiega go prąd nawet słaby; zbroja zaś jego wraz z magnesem drukującym *S* tworzy obwód baterji miejscowej, tak iż w *b* następuje zamknięcie tego obwodu. Telegrafowanie przy pomocy przenośnika odbywa się na odległość kilkuset kilometrów.

Telegraf drukujący (Hughens 1855) zwykłymi literami jest przyrządem dogodniejszym i szybszym w działaniu, ale bardziej zawiłym i delikatnym; polega również na działaniu elektromagnesów.

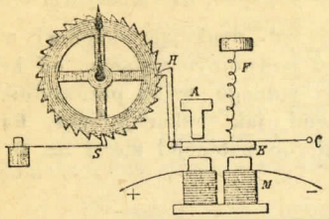
Telegraf podmorski (1866 między Europą i Ameryką) daje na stacji odbiorczej prąd tak słaby, że działanie jego można tylko okazać na galwanometrze zwierciadłowym: odchylenia na prawo odpowiadają kreskom Morsego, na lewo kropkom; albo też stosuje się *zapisywacz lewarowy* (siphon recorder) Thompsona, rodzaj lewarka z rurki włoskowatej, zanurzony w atramencie i wahający się w polu magnesu, jak ramka na rys. 637.

Za przewodnik telegraficzny na powietrzu służy zwykle goły drut żelazny, rozpięty na słupach, a izolowany od nich za pomocą rolek porcelanowych. Do telegrafów podmorskich stosuje się przewodniki miedziane, skręcone z wielu drutów, izolowanych gutaperką i masą żywiczną; taki przewodnik zowie się *kablem* lub *liną* elektryczną (przekrój na rys. 650).



Rys. 650.

4) *Zegar elektryczny.* Do zwykłego zegara, którego czas ma być miarodajny, przystosowuje się kontakt, zamykający prąd raz na minutę. Prąd przebiega do elektromagnesu M zegara elektrycznego (rys. 651), który przyciąga zbroję E, tak iż haczyk H posuwa kółko o jeden ząb, a wraz z nim i skazówka posuwa się o minutę, skoro kółko ma 60 zębów. Wtedy przerywa się prąd normalnego zegara, haczyk odskakuje do A pod wpływem sprężyny F, a haczyk S zatrzymuje kółko. W ten sposób łączy się wiele zegarów elektrycznych z jednym normalnym, a we wszystkich posuwa się skazówka co minuta, w tej samej chwili.



Rys. 651.
Zegar elektryczny.

5) *Silniki elektryczne* czyli *motory* stanowią odwrotny użytek dynamomaszyn; mianowicie dynamomaszyna, zasilana prądem, staje się motorem elektrycznym. Bliższe objaśnienia pt. „Prądnice".

§ 115. Praca chemiczna prądu.

1. Rozkład chemiczny pod wpływem prądu elektrycznego zowie się *elektrolizą.* Zachodzi on najwybitniej w materjach płynnych, mianowicie w roztworach, oraz w solach roztopionych. Płyny w stanie czystym, t. j. nie zawierające rozpuszczonych cząstek ciała stałego, płynnego lub gazowego, przewodzą prąd słabo lub wcale; podobnież sole w postaci stałej i suchej. Nie ulegają elektrolizie metale, choćby najbardziej złożone, t. j. stopy metaliczne, np. mosiądz, bronz.

Przewodniki rozkładalne od działania prądu, np. sole, kwasy, ługi; zowią się *elektrolitami.* Końcówki metalowe lub węglowe, doprowadzające prąd, np. blachy lub druty, zanurzone w cieczy, zowią *elektrodami*; z nich dodatnia zowie się *anodą*, ujemna *katodą.*

Rozkład elektrochemiczny zachodzi i w samym ogniwie (§ 110); stąd części zanurzone metalów lub węgla w ogniwie zowią się także *elektrodami.* Tak więc elektryczność, powstająca kosztem energji chemicznej ogniwa, wytwarza znów energję chemiczną w obwodzie zewnętrznym; są to więc zjawiska odwracalne.

2. Wyniki elektrolizy. Zwykle dokonywa się elektrolizy w roztworach wodnych. Woda chemicznie czysta jest izolatorem, tak iż najsilniejsze prądy jej prawie nie rozkładają. Warunkiem przewodnictwa jest rozpuszczenie w wodzie chociażby drobnej ilości soli, kwasu lub zasady; stąd rozkład wody jest właściwie zjawiskiem wtórnym, które towarzyszy rozkładowi kwasu, zasady lub soli.

Metale i wodór występują zawsze na biegunie ujemnym. W całej masie elektrolitu niema rozkładu, tylko przy elektrodach; wydaje się, jak gdyby pośrednie cząstki płynu nie brały udziału w elektrolizie: składniki wydzielają się tylko na elektrodach.

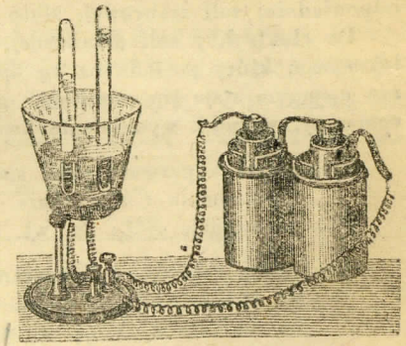
Przyrządy do elektrolizy otrzymały miano *woltametrów* (także „kulombometrów"); zależnie od produktów, woltametr zowie się gazowym, miedziowym, srebrowym i t. p. (Nazwy „woltametr" i „woltmetr" oznaczają odmienne przyrządy; por. § 113, art. 2).

Elektrody do woltametrów wyrabia się z platyny, jako metalu odpornego na produkty elektrolizy.

Napięcie, potrzebne do wywołania rozkładu, zależy od elektrolitu; wogóle jest nieznaczne, tak iż do elektrolizy wystarcza jedno lub kilka ogniw. Np. rozkład wody, zakwaszonej $H_2\ SO_4$, wymaga 1,5 wolta; rozkład siarczanu miedzi 0,7 w., soli niklu 2 do 3 w.

3. Przykłady zasadnicze. Woda zakwaszona, np. kwasem siarczanym, rozkłada się na wodór i tlen, przyczym wodór wywiązuje się na katodzie, tlen na anodzie; stosunek objętości wodoru i tlenu wynosi zawsze 2 : 1, zgodnie ze składem wody ($H_2\ O$).

Woltametr gazowy (rys. 652), do rozkładu wody, składa się z naczynia lejkowatego, opatrzonego elektrodami platynowymi; wywiązujące się gazy zbierają się w rurkach szklanych, gdzie można je odmierzyć.



Rys. 652.

2) Kwasy rozkładają się w ten sposób, że wodór z nich wywiązuje się na katodzie, pozostałe składniki czyli t. zw. resztka kwasowa na anodzie, przyczym podlega działaniom wtórnym, właściwym dla każdego kwasu. Zwykle kwasy zawierają tlen, który przy elektrolizie wywiązuje się z resztki kwasowej na anodzie. To też elektroliza takich kwasów w roztworze wodnym odbywa się tak, jak gdyby tylko woda się rozkładała, a kwas wcale się nie zmieniał: wywiązuje się wodór i tlen.

Np. przebieg elektrolizy kwasu siarczanego $H_2\ SO_4$:

na katodzie H_2
na anodzie SO_4; dział. wt. z $H_2\ O = H_2\ SO_4 + O$.

3) Zasady, mianowicie ługi (alkalja), dają również wodór i tlen, sama zaś zasada pozornie się nie zmienia.

Np. soda gryząca czyli wodzian sodowy $Na\ OH$ wyzwala:
na katodzie Na_2; dz. wt. z $2\ H_2\ O = 2\ Na\ OH + H_2$
na anodzie $(OH)_2$ rozpada się wtórnie na $H_2\ O + O$.

4) Sole, czyli związki metalu z resztką kwasową, ulegają rozdziałowi na te składniki, przyczym metal osiada na katodzie. Sole metalów ciężkich, jak cynku, ołowiu, miedzi, niklu, srebra, złota, platyny, wyzwalają tą drogą czysty metal. Jeżeli anoda jest wyrobiona z tego samego metalu, jaki zawiera dana sól w roztworze, metal stąd nagromadza się na katodzie, resztka zaś kwasowa działa na anodę i rozpuszcza ją stopniowo, zamieniając na sól odnośną; sól więc odtwarza się na nowo i roztwór się nie zmienia, wygląda to, jak gdyby prąd niszczył jednę elektrodę, a przenosił jej metal na drugą. Stąd reguła praktyczna: metale płyną z prądem. Jeżeli zaś metal podlega działaniu chemicznemu cieczy, w której zachodzi elektroliza, sam metal wtedy się nie wyzwala, lecz wchodzi do nowych związków chemicznych, t. j. podlega działaniom wtórnym; odnosi się to do soli metalów alkalicznych: wytwarzają one zasadę i kwas.

Skoro np. w roztworze koperwasu miedziowego anodę stanowi blacha miedziana, prąd przenosi z niej miedź drogą elektrolityczną na katodę, a roztwór nie ulega zmianie. Podobnież przenosi się srebro z roztworu odpowiedniej soli srebrowej, złoto ze swej soli i t. p.

Do elektrolizy soli alkalicznej, np. saletry, zabarwia się jej roztwór lakmusem, który posiada barwę fijołkową; w czasie rozkładu płyn na biegunie ujemnym staje się niebieski, gdzie wydziela się zasada, na dodatnim czerwony, wskutek wydzielenia kwasu.

Elektroliza koperwasu czyli siarczanu miedziowego $Cu\ SO_4$:
na katodzie Cu w stanie metalicznym
na anodzie SO_4; dz. wt. z anodą $Cu = Cu\ SO_4$.

Elektroliza saletry czyli azotanu potasowego $K\ NO_3$:
na katodzie K_2; dz. wt. z $2\ H_2O = 2\ K\ OH + H_2$
na anodzie $2\ NO_3$; dz. wt. z $H_2O = 2\ H\ NO_3 + O$.

4. **Teorja elektrolizy** zasadza się na ogólnej teorji roztworów, której szczegóły podaje chemja fizyczna (Clausius 1857, Arrhenius 1887). Każdy elektrolit przewodzi prąd dlatego, że zawiera już z natury swej pewną ilość cząstek, rozszczepionych na dwa składniki przeciwnie naelektryzowane, zwane *jonami*, swobodne w masie cieczy; one właśnie torują drogę elektryczności, pozostałe zaś cząstki nierozszczepione nie biorą udziału w elektrolizie. Taki rozpad cząstek nazywa się *dysocjacją elektrolityczną*. Zatym jon jest atomem lub grupą atomów, obdarzoną nabojem elektrycznym, dodatnim lub ujemnym; stąd nazwy *anjon* i *katjon*.

Pod wpływem przyciągań elektród odbywa się wędrówka jonów: jony dodatnie dążą do katody, jony ujemne do anody, zobojętniają tu swe naboje elektryczne i pozostawiają zwykłe atomy, tak iż na elektrodach uwalniają się składniki chemiczne elektrolitu. Elektrody zaś, tracąc również swą elektryczność, wskutek zobojętnienia nabojami jonów, wymagają ciągłego dopływu elektryczności przez połączenie ze stosem lub innym źródłem prądu.

Pogląd powyższy, panujący obecnie w nauce, różni się zasadniczo od pierwotnego pojęcia jonów (Grotthus, Faraday), gdy jonami nazwano produkty elektrolizy, czyli składniki, wydzielone na elektrodach, zatym obojętne elektrycznie. Obecnie rozumiemy „jon" jako połączenie atomu z nabojem elektrycznym i przypuszczamy, że jony powstają już wskutek rozpuszczania pewnych ciał w wodzie: im lepiej dany roztwór przewodzi prąd, tym bardziej jest zdysocjowany. Roztwory stężone są mało lub wcale nie zdysocjowane na jony.

Woda, spirytus i inne płyny, stanowiące izolatory, same nie są prawie wcale zdysocjowane na jony. Przeciwnie, woda posiada wybitną zdolność jonizacyjną względem innych ciał, t. j. zdolność rozszczepiania cząstek w niej rozpuszczonych.

5. **Prawa Faraday'a** (1834). Ważąc produkty elektrolizy, jako też oznaczając natężenie prądu i czas, Faraday stwierdził:

1) Ilość materji rozłożonej jest proporcjonalna do czasu i do natężenia prądu.

2) Ten sam prąd, przechodząc jednocześnie przez różne elektrolity, wydziela ilości materji, proporcjonalne do ich ciężarów równoważnikowych. Pod nazwą ciężaru równoważnikowego (k) należy rozumieć ciężar atomowy (a), podzielony przez wartościowość (w): $\frac{a}{w} = k$.

Ilość wydzielona $Q = k\ .\ I\ .\ t.$

Np. ten sam prąd wydziela w tym samym czasie:

wodoru	tlenu	miedzi	srebra	złota
1/1	16/2	63,8/2	107,9/1	197,2/3
1 g	8 g	31,8 g	107,9 g	65,7 g

Działania chemiczne w ogniwach podlegają tym samym prawom. Stąd można obliczyć zużycie rozmaitych materji w ogniwie na wytworzenie pewnej ilości elektryczności.

Ilość pierwiastka w miligramach, wyzwolona przez prąd 1 ampera na sekundę, czyli przez nabój 1 kulomba, nazywa się *równoważnikiem elektrochemicznym*. Skoro we wzorze $Q = k \cdot I \cdot t$ wartość $I = 1$ amp., $t = 1$ sek., wypada $Q = k$ mg.

Równoważnik elektrochemiczny	wodoru	srebra	miedzi	cynku
	0,01035	1,118	0,328	0,337.

Jon każdego elektrolitu zawiera jednakowy nabój elektryczny, mianowicie 96 540 kulombów na każdy atom gramowy, t. j. gdy wagę atomu wyrazimy w gramach. Ilość ta elektryczności nazywa się *nabojem atomowym*.

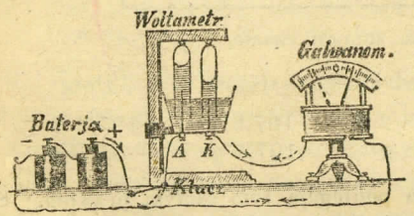
Do wydzielenia bowiem 1 g wodoru, albo 31,8 g miedzi, albo 107,9 g srebra potrzeba kulombów:

$$\frac{1}{0{,}00001035} = \frac{31{,}8}{0{,}000328} = \frac{107{,}9}{0{,}001118} = 96\,540 \text{ (okrągło).}$$

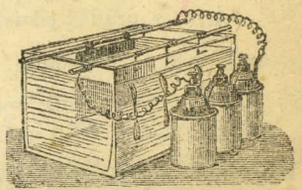
6. Chemiczny pomiar prądu zasadza się na prawach Faraday'a. Zwykle używa się do takich pomiarów *woltametru miedziowego* lub *srebrowego*, t. j. naczynia o elektrodach z miedzi lub srebra; naczynie to napełnia się roztworem $Cu\,SO_4$, względnie $Ag\,NO_3$. Ilość mg osadzonej miedzi lub srebra, podzielona przez równoważnik el.-chem. i czas, daje natężenie w amperach: $I = \frac{Q}{kt}$.

Do prądów silniejszych używa się woltametru gazowego, jak na rys. 653, zbierając wszakże razem wodór i tlen czyli gaz piorunujący. Z odmierzonej objętości gazu, przy uwzględnieniu poprawek na ciśnienie, temperaturę i prężność pary, wypada natężenie prądu: przy 0° C. i 760 mm ciśnienia, 1 amper wywiązuje na sekundę 0,174 cm^3 gazu piorunującego (okrągło $\frac{1}{6}$ cm^3).

Tą drogą sporządza się lub sprawdza podziałkę amperometru lub galwanometru, włączając go do obwodu stosu wraz z woltametrem, jak wskazuje rys. 653. Tą drogą oznacza się też najpewniej stałą k busoli stycznych (§ 111, art. 8).



Rys. 653.



Rys. 654. Galwanizowanie.

7. Zastosowania elektrolizy. 1) *Galwanizowanie* (galwanostegia) polega na powlekaniu przedmiotów cienką warstwą metalu na drodze elektrochemicznej. Stosownie do metalu wydzielanego, czynność ta ma nazwy rozmaite: złocenie, srebrzenie, niklowanie, miedziowanie, cynkowanie.

Wanna galwaniczna (rys. 654) do tych czynności składa się z naczynia, mieszczącego przedmioty, zawieszone na poziomym drążku mosiężnym, a równolegle, na drugim drążku, szereg blach z metalu, jaki ma osiadać na przedmiotach; kąpiel jest roztworem soli tegoż metalu. Np. do powlekania miedzią, niklem, cynkiem służą siarczany tych metalów, do złocenia i srebrzenia służą cjanki, z dodatkiem innych soli, ułatwiających elektrolizę. Przedmioty łączy się z katodą stosu, blachy zaś, przeznaczone na rozpuszczenie, z anodą (dlaczego?). Złocenie i srebrzenie zowią u nas *platerowaniem*.

Za przedmioty do srebrzenia i złocenia służą najczęściej lichtarze, tace, kubki, łyżki, trzonki, naczynia kościelne; do niklowania narzędzia stalowe, jak nożyczki, łyżwy, broń palna, jako też naczynia kuchenne, przyrządy fizyczne; do miedziowania i bronzowania medaljony, wazony, statuetki i posągi, wyrobione z gipsu lub innej taniej materji plastycznej.

2) *Galwanoplastyka* (Jacobi 1838) polega na otrzymywaniu odcisków miedzianych z wizerunków wypukłych lub wklęsłych, jako to medali, monet, klisz drukarskich, drzeworytów, za pomocą elektrolizy siarczanu miedzi ($Cu\,SO_4$).

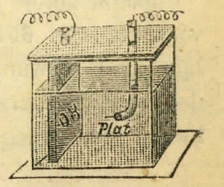
Z żądanego przedmiotu robi się odlew woskowy lub gutaperkowy, zwany (formą lub matrycą); naciera się grafitem, aby powierzchnię uczynić przewodzącą, i zanurza się do kąpieli galwanicznej. Po dłuższej elektrolizie osiada powłoka miedzi dość gruba, że ją można zdjąć z formy; powłoka ta zachowuje najdrobniejsze właściwości powierzchni, t. j. stanowi dokładną kopję przedmiotu.

3) *Metalurgja elektryczna*, czyli otrzymywanie i oczyszczanie metalów za pomocą elektrolizy, zastępuje z korzyścią zmudne i kosztowniejsze nieraz czynności hutnicze.

Np. złoto i srebro wydobywa się tą drogą z rud uboższych; z miedzi handlowej otrzymuje się miedź chemicznie czystą. Elektroliza, połączona ze stopieniem, wytwarza glin (aluminium), karbid, karborund; pt. „Piec elektryczny".

4) *Przerywacz elektrolityczny* (Wehnelt 1899, rys. 655). Jeżeli w elektrolizie wody zakwaszonej stanowi anodę krótki drucik platynowy, katodę blacha olowiana, i do obwodu wtrącono elektromagnes, to zachodzą przerwy nadzwyczaj częste i równe; prąd przerywa się do 2000 razy na sekundę.

Istotę zjawiska należy przypisać samoindukcji (pt.); przebieg zaś można objaśnić gwałtownym wywiązywaniem gazu i pary na małej powierzchni drucika, wskutek czego ustaje chwilami zetknięcie tegoż z wodą. Parę wodną wytwarza silne rozgrzanie drucika pod wpływem prądu. Przyrząd Wehnelta wymaga napięcia wyższego niż do zwykłej elektrolizy, najczęściej od 30 do 120 woltów.

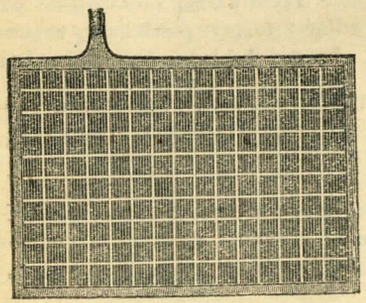


Rys. 655.

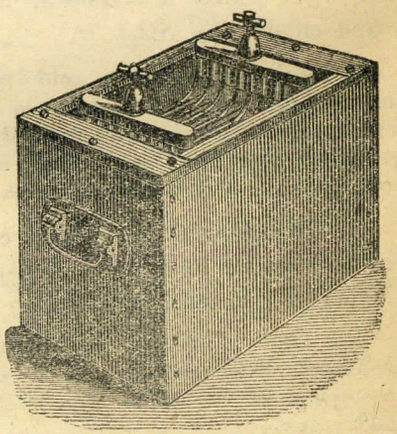
5) Inne zastosowania elektrolizy. Bielenie tkanin. — Odkażanie ścieków. — Trawienie rysunków na metalu.

8. Prąd wtórny. Galwanometr, połączony z elektrodami woltametru zaraz po dokonanej elektrolizie wody zakwaszonej, okazuje prąd elektryczny, o kierunku przeciwnym względem prądu, jaki wodę rozłożył; prąd ten nazywa się *wtórnym*. Przyczyną prądu wtórnego jest polaryzacja galwaniczna (§ 110, art. 2): wodór i tlen, nagromadzone na elektrodach, stają się źródłem siły elektrowzbudzającej o kierunku przeciwnym. Prąd wtórny przeto zowie się inaczej *polaryzacyjnym*; trwa on krótko, ponieważ drobna ilość gazów w woltametrze prędko się wyczerpuje, łącząc się z sobą na wodę. Ażeby otrzymać prąd dłuższy, przydatny do celów praktycznych, należy elektrody zrobić z metalu, zdolnego nagromadzić duże ilości wodoru i tlenu; najbardziej przydatny okazał się tutaj ołów. Przyrząd do przechowania tą drogą zapasu elektryczności nazywa się *akumulatorem* albo *zasobnikiem*.

Akumulator więc polega na odwracalności pracy chemicznej prądu: nagromadza zasób elektryczności, kosztem włożonej pracy chemicznej, i oddaje go w postaci prądu, silnego i długotrwałego. Energja kinetyczna prądu zamienia się na potencjalną chemiczną i nawzajem.

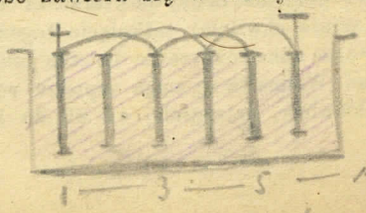


Rys. 656. Płyta akumulatora.



Rys. 657. Akumulator.

Akumulator ołowiany (Planté 1860) składa się z płyt lub krat ołowianych (rys. 656), wypełnionych gąbczastą masą tlenków ołowiu i połączonych równolegle w dwie grupy tak, iż nieparzyste płyty tworzą jeden biegun, parzyste drugi; całość zawiera się w naczyniu z roztworem kwasu siarczanego (rys. 657).



Nabijanie (ładowanie) akumulatora. Pod działaniem prądu obcego, np. trzech ogniw Meidingera, woda się rozkłada: wodór redukuje masę katody na ołów metaliczny, tlen zaś utlenia masę anody, tworząc dwutlenek ołowiu. Do nabijania potrzeba napięcia powyżej 2,5 wolta, bo tyle wynosi siła elektrowzbudzająca polaryzacji.

Wyładowanie. Po odłączeniu prądu ładującego łączy się bieguny akumulatora z odnośnym przyrządem, który ma korzystać z prądu akumulatora. Płyta utleniona stanowi anodę, która podczas wyładowania odtlenia się stopniowo, katoda zaś utlenia się do tego samego stopnia, stąd różnica potencjałów stopniowo znika i prąd ustaje.

Napięcie użyteczne wynosi około 2 woltów i spada powoli do 1,8 w., w ciągu kilku godzin, przy normalnym wyładowaniu; dalej spadek napięcia zachodzi bardzo prędko, płyty zaś tracą na trwałości, to też nie wyczerpuje się naboju do reszty, ale nabija się akumulator na nowo.

Opór wewnętrzny jest znikomo mały, tak iż akumulator daje prąd daleko silniejszy, niż ogniwa galwaniczne.

Działania chemiczne zasadnicze:

	przy nabijaniu	przy wyładowaniu
kat.	$Pb\,O + H_2 = Pb + H_2\,O$	$Pb + O = Pb\,O$
an.	$Pb\,O + O = Pb\,O_2$	$Pb\,O_2 + H_2 = Pb\,O + H_2\,O.$

W rzeczywistości działania są bardziej zawiłe; powstają produkty przejściowe ($Pb\,SO_4$ i inne), w rezultacie jednak sprowadzają się do pomienionego utlenienia i redukcji. Do uformowania płyt służyć mogą rozmaite nierozpuszczalne związki ołowiu: glejta $Pb\,O$, minja $Pb_3\,O_4$, biel ołowiana $Pb\,CO_3$, albo ich mieszanina; nie nadaje się zaś $Pb\,SO_4$, z powodu niemożności zupełnej redukcji. Dlatego też akumulatory nie mogą stać bez użytku w stanie wyładowanym, gdyż wtedy zawarty w płytach $Pb\,O$ zamienia się na bezwartościowy $Pb\,SO_4$ pod działaniem roztworu $H_2\,SO_4$, i akumulator się psuje.

Wydajność akumulatora wynosi do 85%, t. j. zwraca on do 85% otrzymanego naboju elektrycznego. Nabój wyraża się w *amperogodzinach*, przyczym amperogodzina = 3600 kulombów, bo kulomb jest amperosekundą (kul. = amp. × sek). Np. akumulator, nabity w ciągu 5 godzin prądem 20 A, utrzymał 100 amperogodzin; oddaje przy wyładowaniu 85 amperogodzin, np. prąd 10 A przez $8\frac{1}{2}$ godziny.

Zastosowania. Akumulatory zastępują z korzyścią stos galwaniczny tam, gdzie chodzi o prąd silny i gdzie można je nabijać tanim kosztem, to jest za pomocą mechanicznych źródeł prądu (pt. „Dynamomaszyny"). Stanowią zapasowe źródło prądu wielu elektrowni, służą do oświetlenia, do pędzenia motorów elektrycznych, jako też są najdogodniejszym źródłem elektryczności w pracowniach fizycznych, chemicznych, lekarskich, gdzie chodzi o prąd stały. — Wadę akumulatorów stanowi duży ciężar i szkodliwe wyziewy kwasowe.

Zadania i zagadnienia.

1. Oznaczyć stałą k busoli stycznych, która, włączona do obwodu wraz z woltametrem, wykazuje odchylenie 30°, gdy woltametr w ciągu $\frac{1}{2}$ minuty daje 26,2 cm³ gazu, przy 0° i 750 mm. Odp. Prąd $I = (2 \cdot 26{,}2) : 10{,}5 = 5$ A; $k = I : \operatorname{tg} 30^0 = 8{,}66$.

2. Jaki prąd wytwarza w woltametrze 212 cm³ gazu, przy 18° C. i ciśnieniu 720 mm, w ciągu 4 minut? Odp. 4,5 A.

3. Ile miedzi osadza prąd 100 A w ciągu doby? Odp. 2834 g.

4. Posąg człowieka wielkości naturalnej, gdzie powierzchnia = 1 m², ma być powleczony miedzią na grubość $\frac{1}{2}$ mm. Ile na to potrzeba czasu, skoro prąd wynosi 65 A? Odp. 58 godzin.

5. Dzwonek elektryczny połączono stale z ogniwem Leclanchégo; prąd w chwilach kontaktu = $\frac{1}{4}$ A, przerwy zaś są o połowę krótsze od kontaktów. Jak długo trwa dzwonienie, jeżeli ogniwo zawiera 106 g salmiaku? Cynk i braunsztyn nie wchodzą do obliczenia, gdyż pozostają w nadmiarze.

Rozw. Na 1 Zn zużywa się 4 $NH_4\,Cl$; zatym 106 g $NH_4\,Cl$ odpowiada 32,5 g Zn. Prąd stały trwałby $\frac{2}{3}$ całego czasu t dzwonienia; tak więc, $32\,500 = 0{,}337 \cdot \frac{1}{4} \cdot \frac{2}{3} t$, skąd $t = 578\,635$ sekund = okr. 160 godzin.

6. Wskazać podobieństwo i różnicę między akumulatorem a butelką lejdejską.

7. Ile czasu potrzeba na nabicie baterji akumulatorów z 6 ogniw, o naboju po 10 amp-godz., za pomocą stosu Meidingera z 20 ogniw, gdzie E=1 W. $R = 2\ \Omega$? Pomija się opór akumulatorów i drutów.

Rozw. Wszystkie ogniwa łączy się w szereg; zatym prąd ładujący = $= \frac{20{,}1 - 6.2{,}5}{20 \cdot 2} = 0{,}125$ A. Liczba godzin nabijania $x = 10 : 0{,}125 = 80$. Przy wydajności 85% wypadnie nabijać $\frac{100}{85} \cdot 80 = 94$ godziny.

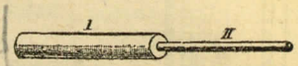
§ 116. Praca cieplna prądu.

1. Ogrzewanie przewodników. Prąd elektryczny, przechodząc przez rozmaite ciała, rozgrzewa je. Przezwyciężając bowiem ich opór elektryczny, prąd wykonywa pracę, która się ujawnia w postaci ciepła. Każdy przewodnik rozgrzewa się w czasie przebiegu prądu; dotyczy to zarówno drutów, jak roztworów, np. przy elektrolizie, nabijaniu akumulatorów, wreszcie w samym ogniwie.

W otoczeniu wszakże istnieją straty ciepła przez promieniowanie i przewodnictwo, tak iż dopływ ciepła elektrycznego staje się równy rozpraszaniu. Stąd przewodniki powietrzne rozgrzewają się nieznacznie, np. druty do oświetlenia elektrycznego, a przy słabym prądzie nie zdradzają nawet rozgrzania, np. druty telegraficzne.

Doświadczenia. 1) Cienkie druty i blaszki można rozżarzyć prądem, stopić, a nawet ulotnić.

2) Ten sam prąd, przechodząc jednym ciągiem przez drut 2 mm i 1 mm grubości (rys. 658), może drugi z nich rozżarzyć, gdy pierwszy zaledwie słabo się rozgrzeje. Różnicę tak wybitną łatwo pojąć, zważywszy, iż drut II ma opór $2^2 = 4$ razy większy od I, zatym zużywa 4 razy więcej pracy, czyli ciepła, a nadto ciepło to udziela się masie 4 razy mniejszej, zatym na każdy mm² przypada ilość ciepła $4 \cdot 4 = 16$ razy większa. Wogóle prąd wytwarza ilość ciepła w drucie odwrotnie proporcjonalną do 4-ej potęgi w średnicy drutu.



Rys. 658.

3) Płynąc w jednym ciągu przez drut miedziany, żelazny i nikielinowy tej samej grubości i długości, prąd rozgrzewa każdy z nich rozmaicie: najsilniej drut nikielinowy, najsłabiej miedziany (dlaczego?).

2. Prawo Joule'a. Ilość ciepła, wytworzona w przewodniku, jest proporcjonalna do kwadratu natężenia prądu, do oporu przewodnika i do czasu.

Ilość ciepła $Q = 0{,}24\ I^2 \cdot R \cdot t$ kalorji.

(I w amperach, R w omach, t w sek)

Zależność powyższa wynika z wartości pracy elektrycznej $L = eV$ (§ 107, art. 3), skoro uwzględnimy $e = It$ (§ 111, art. 6) oraz $V = E = IR$ (§ 112, art. 6); wtedy

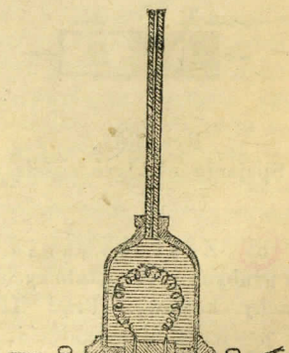
praca elektryczna $L = I^2 \cdot R \cdot t$ dżulów.

Aby tę pracę wyrazić w jednostkach cieplnych, t. j. kalorjach, należy wzór pomnożyć przez spółczynnik 0,24, ponieważ dżul = $\frac{1}{9{,}81}$ kgm, a kgm = $= \frac{1}{427}$ kalorji większej = $\frac{1000}{427}$ kal. gramowej,

zatym: dżul = $\frac{1}{9{,}81} \cdot \frac{1000}{427} = 0{,}24$ kal. gr.

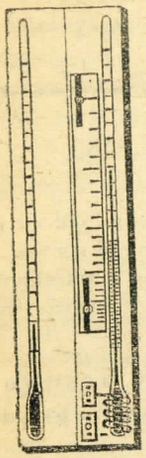
Doświadczalnie stwierdza się prawo Joule'a za pomocą kalorymetru wodnego (rysunek 659), gdzie do wiadomej ilości wody zanurzono drut spiralnie zwinięty o oporze R; mierzy się natężenie prądu I i podniesienie temperatury po upływie czasu t. Zmieniając: 1) natężenie prądu, 2) opór drutu, 3) czas trwania prądu, przekonywamy się o wpływie każdej z tych wielkości na ogrzanie wody.

Przykład. Jeżeli kalorymetr zawiera 100 g wody, $I = 10$ A, $R = 2\ \Omega$, $t = 30$ sek, to ilość ciepła $Q = 0{,}24 \cdot 10^2 \cdot 30 = 1440$ kal. gr., zatym woda ogrzeje się o $1440 : 100 = 14{,}4^0$ C.


Rys. 659.
Kalorymetr elektryczny.

3. Kalorymetryczne mierzenie prądu. Skoro masa wodna m g o temperaturze t_1 ogrzała się w kalorymetrze do t_2 stopni, ilość ciepła $Q = m\,(t_2 - t_1)$. Wypada więc ze wzoru Joule'a

natężenie prądu $I = \sqrt{\frac{0.24\ m\ (t_2 - t_1)}{0.24\ Rt}}$ amp.



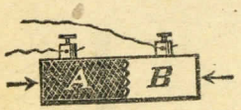
Rys. 660.

Sposób ten nadaje się zwłaszcza do prądów zmiennych (pt.), których natężenia oznaczyć niepodobna za pomocą opisanych galwanometrów i amperometrów (dlaczego?). W technice najprostszy *amperometr kalorymetryczny* (rysunek 660) składa się z dwu jednakowych termometrów, z których jeden jest okręcony drutem nikielinowym. Prąd rozgrzewa drut, i temperatura wkrótce się ustala; przyrost temperatury stanowi o natężeniu prądu. Przyrząd otrzymuje podziałkę w amperach, wykonaną przy pomocy woltametru i prądu stałego, gdyż ilość ciepła nie zależy od zmian w kierunku prądu, jako proporcjonalna do I^2.

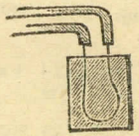
4. Rola praktyczna ogrzewania elektrycznego może być zarówno szkodliwa jak pożyteczna.

a) Objawy szkodliwe. Strata energji elektrycznej przez zamianę na ciepło w drutach łącznych, cewkach elektromagnesów, motorów dynamomaszyn (pt.).

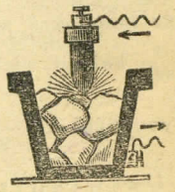
Krótkie spięcie, czyli zetknięcie przewodników, gdzie powstaje upust o znikomym oporze, potęguje natężenie prądu tak, iż przewodnik może się tu roztopić, izolacja spalić, stąd niebezpieczeństwo pożaru, mianowicie skoro prąd pochodzi z akumulatorów lub dynamomaszyn, których prąd jest bardzo silny. Dla zapobieżenia groźnym następstwom krótkiego spięcia służą *bezpieczniki* czyli *korki elektryczne*, zawierające cienki pasek ołowiu lub srebra, włączony do obwodu; metal ten stapia się, gdy prąd przekroczy natężenie dozwolone, i prąd się przerywa.



Rys. 661.
Spajanie elektrycznością



Rys. 662.
Zapłon elektryczny.



Rys. 663.
Piec elektryczny.

b) Zastosowania. *Lutowanie elektryczne* (rys. 661) stosuje się do grubych płyt metalowych, zwłaszcza żelaznych, jak szyny, płyty pancerne, blachy kotłowe. Prąd 1000 A lub silniejszy roztapia obie części metalu na powierzchni zetknięcia, tak iż zlewają się w jednę całość.

Zapłon elektryczny (rys. 662) służy do zapalania min: do materji wybuchowej wprowadza się mały nabój, zawierający cienki drucik, który z dowolnej odległości można prądem rozżarzyć i spowodować wybuch.

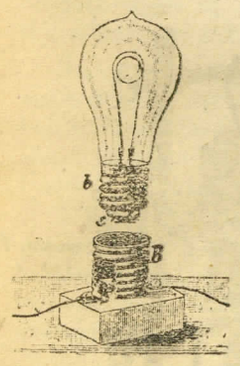
Galwanokaustyka. Przypalanie ran, obcinanie narośli i t. p., zwłaszcza w jamach ciała, odbywa się za pomocą rozpalonego drucika platynowego.

Piec elektryczny Moissana (rys. 663) daje najwyższą temperaturę, jaką dotąd osiągnięto, 3000 do 4000° C., tak iż topią się w nim wszelkie materje, prócz węgla. Zawiera on tygiel grafitowy, który tworzy katodę, a w nim jeden lub kilka prętów węglowych, złączonych z sobą tak, iż tworzą anodę (na rycinie dla uproszczenia dano anodę pojedyńczą). Tygiel napełnia się materjałem, przeznaczonym do wytapiania i zmieszanym z kawałkami węgla, które prąd rozżarza, a następnie powstają przy spalaniu przerwy płomienne (pt. poniżej „Łuk woltaiczny"). Materje ulegają stopieniu, a zarazem elektrolizie i związanym z nią działaniom chemicznym. Tą drogą otrzymuje się metal glin (*Al*) z korundu i krjolitu; karbid (*Ca* C_2), z wapna i węgla, używany do światła acetylenowego; karborund (*Si C*), materjał szlifierski o twardości dyjamentu; klejnoty sztuczne; wyroby z kwarcu topionego.

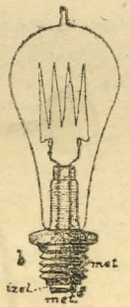
5. Światło elektryczne jest najważniejszym zastosowaniem energji cieplnej prądu. Do światła elektrycznego nadaje się najlepiej węgiel, jako materja zupełnie dla prądu nietopliwa, oraz metale i tlenki o wysokim punkcie topliwości, jak tantal, osm, wolfram, tlenek toru, cyrkonu, magnezja.

Odróżniamy dwa rodzaje oświetlenia elektrycznego: żarowe i łukowe; w pierwszym ma miejsce tylko żarzenie się ciał bez spalania, w drugim zachodzą oba te zjawiska jednocześnie.

1) *Lampy żarowe* czyli *żarówki* (Edison 1879) zawierają nić węglową lub metalową, umieszczoną w bańce, opróżnionej z powietrza. Końce nitki są spojone z drucikami, wtopionymi w szkło i połączonymi z oprawą zewnętrzną, jak wskazują rysunki 664 i 665.



Rys. 664.



Rys. 665.

Jasność światła żarówek zależy od powierzchni świecącej, t. j. od długości i grubości nitki, przy jednakowym rozżarzeniu. Powszechne u nas żarówki są przystosowane do napięcia prądu miejskiego, 120 do 125 woltów; jasność waha się w granicach bardzo obszernych, od 5 do 3000 świec, przyczym każda żarówka wydaje stale, normalne dla niej światło. Materjał nitki ulatnia się stopniowo i osiada na szkle, tak iż nitka staje się cieńsza i wreszcie się zrywa; trwać ona powinna przynajmniej 1000 godzin.

Natężenie prądu odpowiada jasności. Żarówki metalowe, jak osramowe, tantalowe i t. p., zużywają średnio $1\frac{1}{4}$ wata na każdą świecę; stąd np. żarówka 50 świecowa wymaga $50 \cdot 1\frac{1}{4} = 62{,}5$ wata, zatym $125 \cdot I = 62{,}5$, czyli $I = 0{,}5$ ampera. Obecnie są w użyciu przeważnie takie żarówki; inne, wyrobione z materji niemetalicznych, wychodzą z użycia:

węglowe, że mają zbyt małą wydajność, cyrkonowe i magnezjowe (Nernsta), że są nietrwałe. Ostatnio zaczęto wyrabiać żarówki t. zw. „półwatowe", t. j. zużywające po $\frac{1}{2}$ wata na świecę (w rzeczywistości około $\frac{3}{4}$ wata); zawierają one szczelnie skupioną spiralkę drutu, cienkiego jak włos, i wydają światło olśniewająco białe.

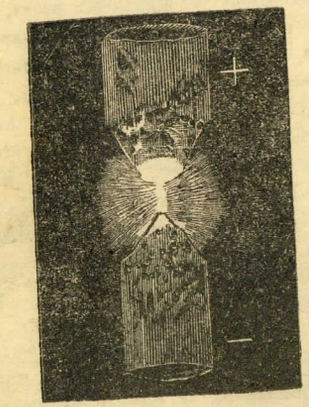
Łączenie żarówek między sobą zwykle uskutecznia się równolegle, tak iż dla n lampek napięcie $= E$, jak dla jednej, opór zaś $= R/n$; prąd więc $I = E : (R/n) = nI$. Połączenie w szereg wymagałoby napięcia nE czyli n . 125 woltów, co byłoby niebezpieczne, napięcia bowiem powyżej 500 W. mogą sprawić porażenie śmiertelne.

2) *Lampy łukowe* (Archereau 1848). Skoro dwie laski węglowe, zakończone śpiczasto, zetknięto z sobą, rozpalają się one w miejscu zetknięcia, czyli największego oporu, pod działaniem prądu dostatecznie silnego. Następnie za rozsunięciem węgli na kilka mm powstaje między nimi łuk świetlny, podobny do bladego płomienia, bardzo ruchliwy, zwany *łukiem woltaicznym* (Davy 1821, rys. 666).

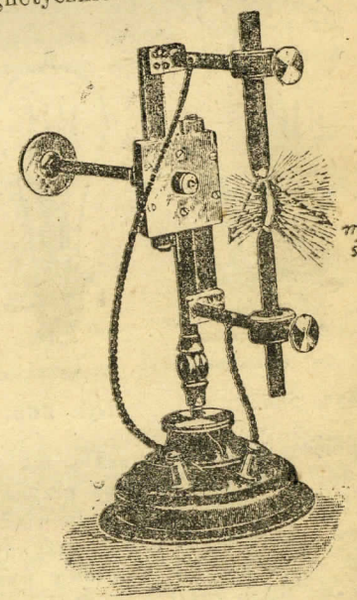
W powietrzu oba węgle się spalają, przyczym w dodatnim tworzy się wydrążenie w postaci krateru; ujemny węgiel jest mniej rozpalony i zachowuje wciąż kształt śpiczasty.

Skoro odległość między węglami się powiększy, łuk się przerywa i światło gaśnie. To też *lampa łukowa* posiada mechanizm do zbliżania węgli w miarę, jak się spalają; mechanizm może być poruszany ręką, bądź samym prądem czyli elektromagnetycznie.

Lampę z regulowaniem ręcznym odstępu węgli objaśnia rysunek 667.

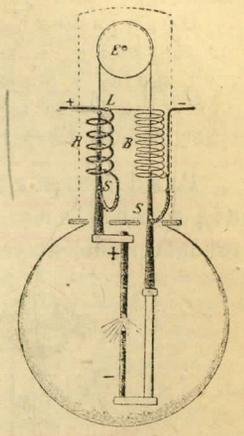


Rys. 666. Łuk Volty.



Rys. 667. Lampa łukowa ręczna.

Dokładną regulację posiada zwłaszcza *lampa różnicowa* (Hefner-Alteneck 1879), którą w konstrukcji Schuckerta, używanej powszechnie, wyobraża rys. 668. Węgle wiszą na bloku E, który po każdej stronie dźwiga nadto rdzeń żelazny S i S, każdy wewnątrz swego solenoidu. Prąd wchodzi przy L i dzieli się na 2 odnogi: główna prowadzi przez cewkę R z drutu grubego a krótkiego, i dalej przez węgle, wytwarza światło, jednocześnie zaś rozsuwa węgle (przyczyna?), przez co powstaje łuk Volty. Skoro łuk się wydłuża, prąd główny słabnie, natomiast wzmaga się prąd w drugiej odnodze, czyli bocznicy B, złożonej z drutu cienkiego a długiego; solenoid B, działając na swój rdzeń, zbliża węgle i w ten sposób łuk zachowuje normalną długość, zależną od różnicy w sile wciągającej obu solenoidów.



Rys. 668. Lampa łukowa automatyczna.

Łuk woltaiczny składa się z ulotnionych i porwanych prądem cząstek węgla i gazów otoczenia; bliższe wyjaśnienie podaje teorja elektronowa (pt.). Temperatura dodatniego węgla dochodzi 4000°, ujemnego 2700°; to też światło pochodzi głównie od węgla dodatniego, i tenże spala się prędzej. Przy prądzie zmiennym (pt.) oba węgle spalają się i świecą jednakowo.

Widmo światła łukowego, podobne do słonecznego, odznacza się obfitością promieni pozafijolkowych; stąd zastosowanie w fotografji. W nowszych lampach węgle są nasycone solami, które po ulotnieniu dają jaskrawe światło, zabarwione widmem danej soli; wtedy i łuk silnie świeci (Bremer 1900).

Jasność światła łukowego zależy od natężenia prądu; najmniej trzeba około 3 A do wytworzenia trwałego łuku, i wtedy światło wynosi około 250 świec. Pospolicie lampy zużywają 6 do 10 A, wydając światło 600 do 1000 świec, czyli średnio 100 świec na 1 A; wyjątkowo silne lampy, np. w latarniach morskich, mają światło 20 000 i więcej świec.

Napięcie łuku wynosi około 39 woltów i rośnie z jego długością; zwykłe lampy palą się przy napięciu 40 do 50 W. Tak więc, średnia lampa łukowa zużywa sprawność 50 W $\times$ 10 A $=$ 500 watów, t. j. przeszło $\frac{2}{3}$ HP; że zaś daje światło 1000 świec, wypada 0,5 wata na każdą świecę t. j. oszczędniej niż światło żarowe.

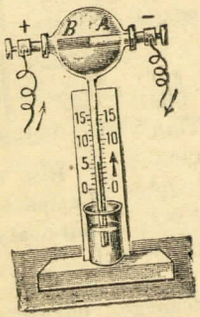
6. Prąd termoelektryczny. Prąd galwaniczny wywołuje różnicę temperatury w miejscu spojenia dwu różnorodnych przewodników; jest to t. zw. zjawisko Peltiera (1834). Nawzajem, przez ogrzewanie lub oziębianie takiego spojenia można otrzymać prąd, mający wszelkie własności prądu galwanicznego, a zwany *prądem termoelektrycznym*. Zachodzą tu więc zjawiska odwracalne.

Doświadczenie 1 (rys. 669). Do bańki termometru powietrznego wpuszczono pręcik BA, złożony w połowie B z bizmutu, w A z antymonu, zlutowanych z sobą. Jeżeli prąd stosu przechodzi od B do A, ciecz z naczynia wchodzi do rurki, zdradzając oziębienie pręcika BA; przy kierunku

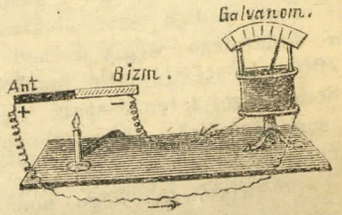
przeciwnym prądu ciecz ustępuje z rurki, czyli zachodzi ogrzanie *BA*. Bliższe badanie stwierdza, że ogrzanie lub oziębienie występuje zawsze w miejscu spojenia metalów.

Doświadczenie 2 (rys. 669). Gdy spojenie między *B* i *A* zostanie ogrzane z zewnątrz, powstaje prąd termoelektryczny od *B* do *A*, czyli zgodny z poprzednim prądem galwanicznym, który sprawił oziębienie. Prąd więc termoelektryczny posiada taki kierunek, że sprawia przeciwną zmianę temperatury, niż zgodny z nim prąd galwaniczny.

Prąd termoelektryczny powstaje przez bezpośrednią przemianę ciepła na energję elektryczną. Źródłem prądu termoelektrycznego jest para metalów spojonych z sobą i ogrzewanych w miejscu spojenia; zowie się ona *ogniwem termoelektrycznym* (Seebeck 1821, rys. 670).



Rys. 669.



Rys. 670.
Wytwarzanie prądu termoelektrycznego.

Można zestawić metale w ten sposób, że za ogrzaniem spojenia dwu sąsiednich płynie prąd elektryczny od poprzedniego ku następnemu; tak np. miedź stanowi biegun dodatni względem bizmutu, a ujemny względem antymonu. Im dalej stoją od siebie metale w szeregu, tym wyższe mają napięcie wzajemne; największe napięcie daje ogniwo z bizmutu i antymonu (szereg Becquerela):

\+ antymon, żelazo, cynk, miedź, ołów, srebro, bizmut —

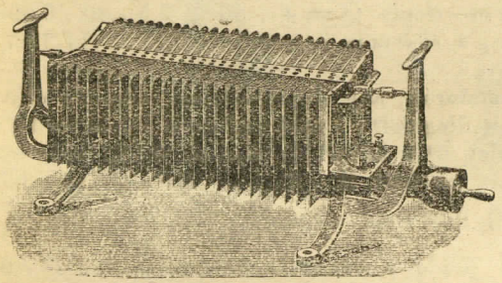
Połączenie kilku lub więcej ogniw tworzy *stos termoelektryczny*; ogniwa łączy się zawsze w szereg, t. j. na najwyższe napięcie. Spojenia parzyste są zwrócone w jednę, nieparzyste w drugą stronę, aby cały bok stosu można było ogrzewać, przeciwny oziębiać.

Napięcie prądu termoelektrycznego jest zawsze nader słabe: dla bizmutu i antymonu wynosi 0,007 wolta przy różnicy temperatury 100°. Napięcie rośnie w pewnych granicach proporcjonalnie do różnicy temperatury. Przy silniejszym jednak ogrzewaniu stosunek ten się zmienia; istnieje nawet dla każdej niemal pary metalów temperatura, przy której napięcie znika zupełnie, wreszcie zmienia znak przy dalszym ogrzewaniu, t. j. prąd zmienia kierunek.

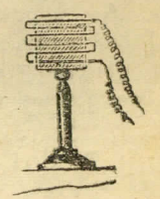
Ogniwa, złożone ze stopów, okazują wyższe napięcie, niż z metalów czystych (por. opór stopów i punkt topliwości), tak iż przez połączenie kilkunastu ogniw w baterję można otrzymać prąd taki sam, jak z ogniwa galwanicznego.

Zastosowania. Wszelkie baterje termoelektryczne posiadają nadzwyczaj małą wydajność (zaledwie 1%); stąd otrzymywanie elektryczności przez zwykłe ogrzewanie, choć daleko dogodniejsze, niż za pomocą stosów lub motorów, praktycznie się nie opłaca. Wynik ten stoi na przeszkodzie szerszemu zastosowaniu prądów termoelektrycznych.

Stos Gülchera (rys. 671), najkorzystniejszy ze stosów termoelektrycznych, składa się z 66 ogniw, ułożonych rzędem i ogrzewanych gazem; ogniwo składa się z rurki niklowej złączonej z bryłką stopu antymono cynkowego. Posiada napięcie biegunowe 4 W, a opór wewnętrzny $\frac{2}{3}$ Ω, tak, iż daje prąd do 6 A, przy znikomym oporze zewnętrznym. Zastępuje dogodnie 2 ogniwa Greneta i służy do doświadczeń elektromagnetycznych i elektrolitycznych, oraz do nabijania akumulatorów, połączonych równolegle; akumulatory te następnie można zastosować w połączeniu szeregowym, np. do światła elektrycznego.



Rys. 671. Stos Gülchera.



Rys. 672. Stos Nobilego.

Termomultyplikator (Melloni 1831) służy do okazania nadzwyczaj małych zmian temperatury, jakich nie zdradza najczulszy termometr rtęciowy. Stanowi połączenie małego stosu antymonobizmutowego, jaki zbudował Nobili (rys. 672) z galwanometrem. Dość zbliżyć rękę do stosu, aby wzbudzić prąd termoelektryczny, który odchyla igłę. Przyrząd ten używa się głównie do badań nad promieniowaniem; wskazuje już ogrzanie o 0,0001° C.

Pyrometr elektryczny (Le Chatelier), zwany także *termometrem elektrycznym*, służy do oznaczania temperatur bardzo wysokich, aż do 1600° C; składa się z cieniutkiej pary drutów, platynowego oraz platyno-rodowego. Ogniwo to wsuwa się np. do pieca, odchylenie zaś galwanometru, połączonego drutami z ogniwem, wskazuje temperaturę pieca, na zasadzie podziałki, sporządzonej doświadczalnie.

Zadania.

1. Ile ciepła wytwarza na sekundę prąd 12 A w drucie żelaznym długości 12 m i grubości 1,5 mm? Odp. 23,5 kal. gr.

2. Prąd 56 A płynie przez drut miedziany, mający 212 m długości i 20 mm² przekroju. Ile wynosi strata napięcia? zużycie energji na sekundę. Ile wywiązuje się w nim ciepła na sekundę? Odp. 10,8 wolta; 604 waty; 145 kal. gr.

3. Nitka węglowa, używana do lampek elektrycznych, o oporze 220 Ω i masie 0,1 g, rozżarza się pod działaniem prądu o napięciu 110 W. Jak rozgrzeje się nitka po upływie 1 sek? Ciepło właściwe węgla $= \frac{1}{4}$. Odp. $I = 110 : 220 = \frac{1}{2}$ A; $Q = 0{,}24 \cdot (\frac{1}{2})^2 \cdot 220 \cdot 1 = 13{,}2$ kal. gr. Wzór na ciepło właściwe daje $13{,}2 = 0{,}1 \cdot t \cdot \frac{1}{4}$, skąd $t = 528^0$ C.

4. Do imbryka miedzianego, który mieści 4 litry wody o temp. 20° C. i waży 3,5 kg, zanurzono kilkanaście zwojów drutu nikielinowego o oporze 16 Ω. Ile czasu potrzeba na ogrzanie wody do zagotowania prądem 17,3 A, jeżeli ciepło właściwe miedzi wynosi 0,09? Pomija się straty ciepła w otoczeniu. Odp. Niezbędna ilość ciepła $Q = 4 \cdot 80 + 3{,}5 \cdot 80 \cdot 0{,}09 = 345$ kal. kg. $= 345\,000$ kal. gr.; z równania $345\,000 = 0{,}24 \cdot (17{,}3)^2 \cdot 16 \cdot t$ wypada okr. 5 minut.

5. Ilu potrzeba akumulatorów, aby stopić w ciągu sekundy drut żelazny $\frac{1}{2}$ mm grubości i 40 cm długości? Punkt topliwości żelaza $= 1600^0$ C., ciepło właściwe średnie między 0^0 a 1600^0 C. wynosi 0,15, opór wł. 0,2; opór wewnętrzny akumulatora $= 0{,}01$ Ω. Rozw. Masa drutu $= 0{,}6$ g; opór $= \frac{0{,}4 \cdot 0.2}{\pi \cdot (1/4)^2} = 0{,}4$ Ω; ilość ciepła wymagana $Q = 0{,}6 \cdot 1600 \cdot 0{,}15 = 144$ kal. gr.; natężenie prądu z równania $144 = 0{,}24 \cdot I^2 \cdot 0{,}4 \cdot 1$ wypada 38 A; liczba akumulatorów, połączonych w szereg, z równania $38 = \frac{n \cdot 2}{n \cdot 0{,}01 + 0{,}4}$ wypada 10. Najmniej więc potrzeba 10 akumulatorów, t. j. nie uwzględniając straty ciepła w otoczeniu.

6. Ile sprawności elektrycznej zużywa światło łukowe o jasności 1000 świec? Ile światło żarowe o takiej samej jasności? Odp. 45 W . 10 A = 450 watów; $1000 \cdot 1\frac{1}{4} = 1250$ watów.

7. Lampa łukowa 600 świec zużywa 6 A i 39 W; ilu potrzeba ogniw Greneta ($E = 1{,}9$ W, $r = 0{,}1$ Ω) do takiego światła? Odp. Wzór $E_p = E - IR$ daje $39 = 1{,}9\,n - 6 \cdot 0{,}1\,n$, stąd $n = 30$.

8. Ile można za pomocą tegoż stosu rozświetlić lampek żarowych po 16 świec, o napięciu 50 W? Odp. Każda żarówka zużywa $16 \cdot 1\frac{1}{4} = 20$ watów, czyli potrzebuje prądu $20 : 50 = 0{,}4$ A; z równania $E_p = E - IR$ czyli $50 = 30 \cdot 1{,}9 - x \cdot 0{,}4 \cdot 30 \cdot 0{,}1$ wypada $x = 6$.

9. Dlaczego za pomocą stosu Meidingera, używanego w telegrafji ($E = 1$ W, $r = 6$ Ω), nie można otrzymać światła łukowego nawet przy tysiącach ogniw w szeregu?

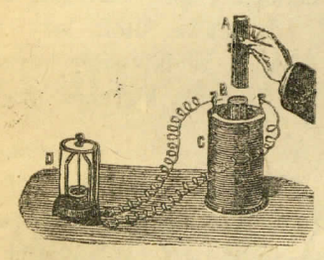
10. Latarka elektryczna kieszonkowa składa się z maleńkiej żarówki i stosu suchego o pojemności 0,6 ampero-godzin. Na ile godzin światła wystarczy stos, jeżeli lampka przy napięciu 4 W zużywa 1 wata. Odp. 8 godzin.

C) PRĄD INDUKCYJNY.

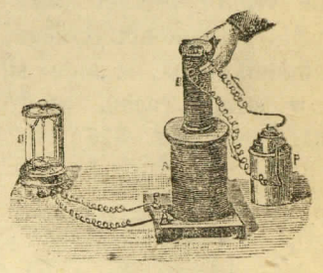
§ 117. Indukcja.

1. **Zasada indukcji.** Prąd elektryczny można otrzymać na drodze mechanicznej, przez poruszanie przewodnika w polu magnetycznym, albo przez zmianę natężenia pola. Wzbudzenie takiego prądu zowie się *indukcją* *), a prąd *indukcyjnym* (Faraday 1831).

Przewodnik w ruchu musi przecinać linje sił magnetycznych, aby wykonywał pracę: indukcja polega na przemianie pracy mechanicznej w elektryczną. Przy ruchu przewodnika wzdłuż linji sił, niema pracy, to też prąd nie powstaje.



Rys. 673. Indukcja magnetyczna.



Rys. 674. Indukcja woltaiczna.

Pole magnetyczne można wytworzyć za pomocą magnesu albo prądu; stąd odróżniamy indukcję *magnetyczną* i *woltaiczną*. Nadto w tej ostatniej można odróżnić 3 metody działania: zbliżanie i oddalanie prądu od przewodnika, albo przerywanie i zamykanie prądu, albo osłabianie i wzmacnianie prądu. Praktycznie więc istnieją 4 sposoby wytworzenia prądu indukcyjnego.

Doświadczenia. 1. Do cewki z cienkiego drutu zbliża się, a następnie oddala magnes (rys. 673); igła galwanometru, włączonego do obwodu cewki, odchyla się najprzód w jednę, potem w drugą stronę. Im szybsze są ruchy magnesu, tym większe wychylenie daje igła, t. j. tym większe natężenie ma prąd indukcyjny.

2. a) Cewkę, połączoną ze stosem (rys 674), wsuwa się do drugiej cewki, obszerniejszej, połączonej z galwanometrem, a następnie wysuwa się takową; igła waha się jak w doświadczeniu poprzednim.

---

*) Indukcja pod wpływem prądu lub magnesu jest zjawiskiem elektrodynamicznym, t. j. wywołuje ruch elektryczności; influencja zaś, czyli indukcja pod wpływem naboju elektrycznego, wywołuje tylko pewien stan elektryczny i nosi miano indukcji elektrostatycznej (§ 107, art. 2).

b) Wsunąwszy jednę cewkę do drugiej na stałe, zamyka się prąd w cewce wewnętrznej; igła się chwilowo odchyla, poczem wraca do zera. Za przerwaniem prądu następuje odchylenie przeciwne i znów powrót do zera.

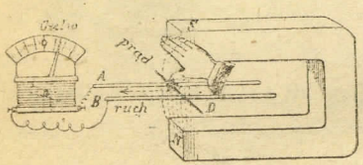
c) Podobny, lecz słabszy skutek daje wzmocnienie i osłabienie prądu.

2. Kierunek prądu indukcyjnego. Skoro przewodnik porusza się w polu magnetycznym, budzi się w nim prąd indukcyjny o kierunku takim, że hamuje ruch, przez który ten prąd został wytworzony (*prawo Lenza* 1834).

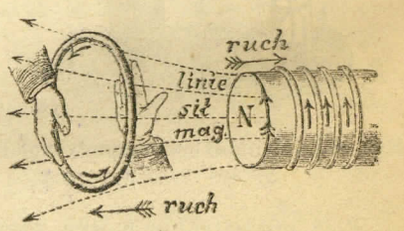
Przy tym jest rzeczą obojętną, czy porusza się przewodnik, a magnes jest nieruchomy, czy przeciwnie, porusza się magnes względem przewodnika nieruchomego.

Prawo Lenza można rozumieć krócej: prąd indukcyjny powstaje na koszt pracy mechanicznej.

Praktycznie oznacza się kierunek prądu indukcyjnego najdogodniej wedle *reguły prawej dłoni* (odróżnić od takiejże reguły odnośnie odchylenia galwanometrycznego, § 111, art. 2): gdy prawa dłoń leży na przewodniku tak, iż linje sił wchodzą do dłoni, a wielki palec zwraca się w stronę ruchu, wtedy pozostałe palce wskazują kierunek prądu indukcyjnego (rys. 675).



Rys. 675.



Rys. 676.

Uzasadnić można prawo Lenza w myśl rys. 676. Jeżeli wprost północnego bieguna magnesu umieszczono kółko a drutu, równolegle do prądów kołowych magnesu (§ 111, art. 5), to za odsunięciem kółka powstaje w nim prąd zgodny z prądami magnesu (ten przypadek wyobrażają skazówki); prądy te przyciągają się nawzajem, t. j. przeciwdziałają oddaleniu kółka. Przysuwając zaś kółko, wzbudzimy w nim prąd, przeciwny prądom magnesu; nastąpi wzajemne odpychanie, t. j. znów przeciwdziałanie ruchowi kółka. Tak więc, w każdym razie wypada pokonywać siły magnetyczne, czyli wykonywać pracę.

Z powyższego wynikają następujące wskazówki poszczególne:

Dla indukcji woltaicznej: przy zbliżeniu, zamknięciu, lub wzmocnieniu prądu pierwotnego budzi się w przewodniku prąd wtórny przeciwnego kierunku. Nawzajem przy oddaleniu, przerwaniu lub osłabieniu prądu pierwotnego budzi się prąd wtórny tego samego kierunku.

Dla indukcji magnetycznej, mianowicie dla przewodników kołowych: patrząc w kierunku linji sił, widzimy prąd zgodny z biegiem skazówek zegara, jeżeli zmniejsza się ilość linji w obrębie przewodnika (por. rys. 676), zaś prąd przeciwny, skoro ilość linji się powiększa.

3. Natężenie prądu indukcyjnego zależy od siły elektrowzbudzającej indukcji i oporu przewodnika, w myśl prawa Ohma (§ 112, art. 4); w tym samym przewodniku natężenie jest proporcjonalne do siły elektrowzbudzającej. Wartość jej jest tym większa, im dłuższy jest przewodnik, a zatym im więcej zwojów drutu ma cewka, im silniejsze jest pole magnetyczne, oraz im prędzej porusza się przewodnik w tym polu. Jeżeli zaś przewodnik jest nieruchomy, a indukcja pochodzi wskutek przerywania prądu głównego, to siła elektrowzbudzająca rośnie wraz z częstością przerw.

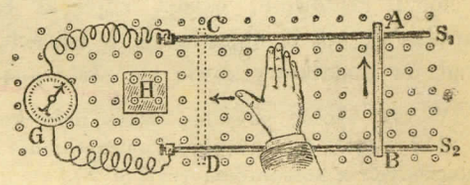
Warunki indukcji znalazły uogólnienie w dwu *prawach Faraday'a* (1831).

1) Prąd indukcyjny powstaje w zamkniętym przewodniku przez zmianę natężenia pola magnetycznego, w którym przewodnik się znajduje.

2) Siła elektrowzbudzająca indukcji jest proporcjonalna do liczby linji sił, przecinających przewodnik w ciągu sekundy.

Doświadczenia rys. 673 i 674 uzasadniają oba prawa powyższe.

Wartość siły elektrowzbudzającej indukcji. Rys. 677 wyobraża przekrój poprzeczny pola magnetycznego rysunku 675; kółeczka oznaczają linje sił w przecięciu, kropki w nich oznaczają kierunek ku patrzącemu. Niechaj przewodnik AB przesuwa się po szynach S_1 i S_2, w położeniu do nich prostopadłym. H oznacza natężenie pola jednostajnego, t. j. przez każdy cm² pola przechodzi H linji.



Rys. 677.

Gdyby przez przewodnik AB, leżący spokojnie, przepuszczono prąd I amp. ze stosu, przewodnik ten o długości l cm zacząłby się poruszać wstecz (§ 111, art. 4), t. j. tutaj na prawo; działająca nań

siła $P = \frac{1}{10} I H l$ dyn

(stosownie do § 111, art. 7 i § 76, art. 3, uwzględniając $H = m/r^2$).

Skoro I nie jest prądem galwanicznym, ale indukcyjnym, t. j. wywołanym pracą przesunięcia AB do położenia CD, czyli na drodze $AC = s$, trzeba pokonać opór równy sile P; zatym

praca $L = \frac{1}{10} I H l s$ ergów $= \frac{1}{10} I H l s \cdot 10^{-7}$ dżulów.

Gdy ruch trwa t sekund, praca na sekundę czyli

$$\text{sprawność } K = 10^{-8}\, I\, H\, l\, \frac{s}{t} \text{ watów.}$$

Stosunek $v = s/t$ stanowi szybkość ruchu; włożona sprawność mechaniczna daje sprawność elektryczną równoważną $K = EI$ watów:

$$EI = 10^{-8}\, I\, H\, l\, v.$$

Stąd

$$E = 10^{-8}\, H\, l\, v \text{ woltów.}$$

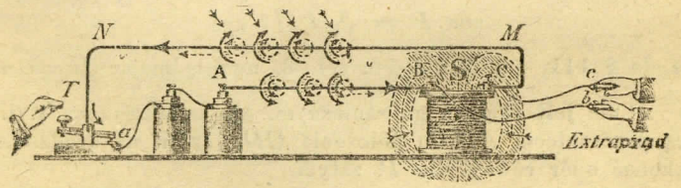
P r z y k ł a d. Drut, długi na 1 m, spada z wysokości 5 m. W chwili uderzenia o ziemię posiada szybkość $v = \sqrt{2\,g\,.\,h} =$ okr. 10 m/sek $= 1000$ cm/sek. Ponieważ $H =$ okr. $\frac{1}{5}$ dyny stanowi natężenie magnetyzmu ziemskiego, w drucie powstanie wskutek indukcji siła elwzb. $E = 10^{-8}\,.\,\frac{1}{5}\,.\,100\,.\,1000 = \frac{1}{5000}$ wolta.

4. Samoindukcją zowie się indukcja w obwodzie własnym, to jest w tym samym przewodniku, po którym płynie prąd elektryczny. Ma ona miejsce przy zamykaniu i przerywaniu prądu elektrycznego, a w słabszym stopniu przy zmianach natężenia prądu; występuje najsilniej w cewkach o rdzeniu żelaznym, np. elektromagnesach.

Wskutek samoindukcji prąd galwaniczny nie odrazu osiąga całkowite natężenie, bo w chwili zamknięcia obwodu budzi się w sąsiednich jego częściach p r z e c i w n y p r ą d i n d u k c y j n y, z w a n y p r ą d e m z a m k n i ę c i a. Nawzajem, w chwili przerwania prądu galwanicznego, powstaje z g o d n y p r ą d i n d u k c y j n y, z w a n y p r ą d e m o t w a r c i a; przedłuża on na chwilę trwanie prądu głównego, a skoro przerwanie zachodzi raptownie, osiąga napięcie bardzo wysokie (w myśl prawa Faraday'a), tak iż objawia się w iskrach lub wstrząśnieniach organizmu. Prąd ów dodatkowy zowie się *ekstraprądem*.

W taki sposób powstają iskry przy kontaktach przerywaczy i dzwonków (§ 114, art. 4); przykre wstrząśnienia ciała przy rozłączaniu kontaktów połączonych z solenoidem (rys. 678).

O k a z a ć można prąd samoindukcji za pomocą mostka Wheatstone'a (rysunek 640), gdy jeden z oporów, np. r_1, zastąpiono cewką z jądrem żelaznym i opory dobrano tak, aby $r_1 : r_2 = r_3 : r_4$. Przy zamknięciu prądu igła galwanometru zboczy chwilowo, jak gdyby cewka r_1 miała większy opór, niż w rzeczywistości. Za przerwaniem prądu igła również odskoczy, ale w stronę przeciwną. Przy ciągłym prądzie odchylenia nie będzie.



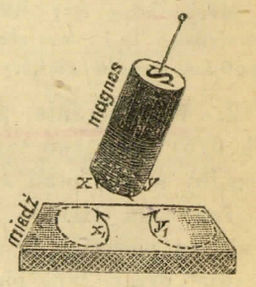
Rys. 678.

S a m o i n d u k c j a s t a n o w i j a k g d y b y b e z w ł a d n o ś ć e l e k t r y c z n ą. Jak niepodobna całej masy wody odrazu poruszyć, a płynącej naraz zatrzymać, podobnież nie można w jednej chwili wprawić w ruch daną ilość elektryczności, albo naraz powstrzymać, t. j. momentalnie wzbudzić prąd całkowity lub usunąć.

R o l a s a m o i n d u k c j i w przewodnikach o prądzie przerywanym lub zmiennym polega na tym, że natężenie takiego prądu jest mniejsze, niż gdyby prąd płynął ciągle. Wydaje się, jak gdyby przewodnik stawiał ogromny opór prądowi; stąd ten ostatni zowie się *oporem pozornym* albo *zawadą elektryczną*.

Z powodu bowiem przeciwnej siły elektrowzbudzającej ε, zamiast $I = \frac{E}{R}$ będzie $I' = \frac{E-\varepsilon}{R}$; przy bardzo częstych zmianach prądu ε może urosnąć tyle, że dorównywa E i znosi prąd główny. Tak np. przy telegrafowaniu na wielką odległość, telefonowaniu, a zwłaszcza przy wyładowaniach iskrowych (pt.), do oporu rzeczywistego czyli omicznego dołącza się opór pozorny, który tłumi prąd działający.

5. Prądy wirowe (Foucault) stanowią zawile prądy indukcyjne, powstające w dużej masie metalu, gdy się porusza w stałym polu magnetycznym, albo gdy leży choćby nieruchomo w polu zmiennym. Skutkiem tego energja elektryczna zamienia się na ciepło.

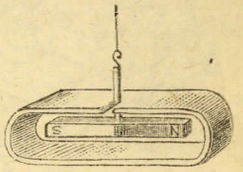


Rys. 679.

Np. magnes, wahający się (rys. 679) tuż po nad płytą miedzianą, zatrzymuje się niebawem. W masie bowiem miedzi powstają dwa prądy indukcyjne: po stronie opuszczonej prąd y_1 o kierunku zgodnym z xy w magnesie, po stronie zaś nadchodzącej prąd x_1 o kierunku przeciwnym. Prąd y_1 hamuje ruch magnesu przyciąganiem; prąd x_1 odpychaniem.

Z n a c z e n i e p r a k t y c z n e, 1) *Hamowanie elektrodynamiczne* służy do szybkiego uspokojenia igły galwanometru. W tym celu umieszcza się igłę wewnątrz grubej ramki miedzianej (rys. 680).

2) O g r z e w a n i e mas metalowych. Jeżeli krążek miedziany obraca się między biegunami silnego elektromagnesu, doznaje wybitnego oporu, który wzrasta w miarę szybkości obrotu, przyczym krążek mocno się rozgrzewa (doświadczenie Faraday'a).



Rys. 680.

Ażeby uniknąć ogrzewania elektromagnesu do prądów przerywanych, rdzeń żelazny rozcina się, albo też składa go się z wiązki cienkich drutów lub blaszek izolowanych, np. w transformatorach, dynamomaszynach (pt.).

6. Znaczenie praktyczne indukcji. Indukcja daje najpotężniejsze i najtańsze źródło prądu. To też wszelkie urządzenia elektryczne na wielką skalę, jak oświetlenie miast, tramwaje i koleje elektryczne, przenoszenie energji, telefony, telegrafy bez drutu, czynności elektrochemiczne i t. p., korzystają z indukcji za pośrednictwem prądnic i transformatorów.

§ 118. Prądnice.

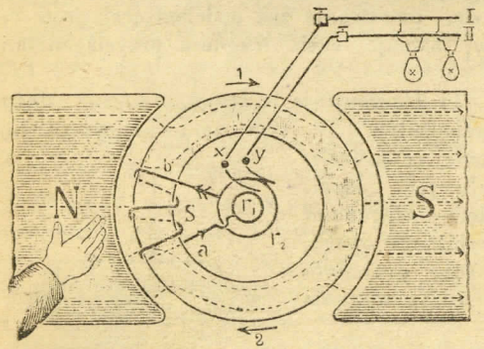
1. Prądnice albo **dynamomaszyny** przemieniają energję mechaniczną na elektryczną przez obracanie zwojów drutu w polu magnetycznym. Wytwarzają one przez indukcję magnetyczną *prąd zmienny*, t. j. prąd przebiegający naprzemian to w jednę, to w drugą stronę. Prąd taki można przekształcić na *prąd stały*, o własnościach prądu galwanicznego; stąd dwa główne rodzaje prądnic.

Część wirująca każdej maszyny stanowi *rotor*, zwany też *twornikiem*, skoro prąd wytwarza; część nieruchoma stanowi w maszynie *stator*. Pomieszczenia prądnic z ich motorami i przyborami dodatkowymi stanowią *elektrownię*.

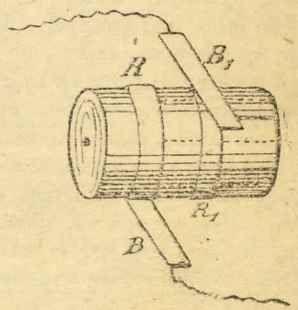
Mechaniczne wytwarzanie prądu wypada nierównie dogodniej i taniej, niż chemiczne, t. j. ze stosów; to też prądnice stanowią obecnie powszechne i potężne źródło elektryczności.

2. Wytwarzanie prądu zmiennego. Gdyby przewodnik (*AB*, rysunek 675) poruszano tam i z powrotem między biegunami magnesu, przebiegałby w nim prąd zmienny.

Ten sam skutek sprawia obracanie drutu, nawiniętego w postaci cewki na pierścień żelazny (rys. 681). Linje magnetyczne idą wyłącznie prawie przez ten pierścień, pomimo jego obracania. Indukcja więc odbywa się tak, jak gdyby pierścień był nieruchomy, a zwój drutu (*S*) przesuwał się po nim dokoła.



Rys. 681.
Pochodzenie prądu zmiennego.



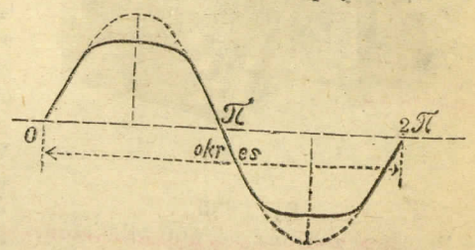
Rys. 682.
Kolektor prądu zmiennego.

Końce drutu (*S*) łączą się z *kolektorem* w kształcie dwu obrączek miedzianych (r_1 i r_2), izolowanych i osadzonych na wspólnej osi. Do każdej z obrączek dotyka *szczotka* (*x* i *y*) czyli kontakt sprężynowy, zbierający prądy z kolektora; szczotki więc stanowią bieguny przyrządu. Rys. 682 objaśnia rzeczywiste położenie szczotek i pierścieni.

Działanie. Przy obracaniu rotora w kierunku skazówki, zwoje cewki *S* przecinają linje sił, mianowicie te części zwojów, które leżą na zewnętrznym obwodzie pierścienia (drut czynny). Wskutek tego wzbudza się w nich prąd, osiągający najwyższe napięcie tam, gdzie najwięcej się zmienia ilość linji, objętych zwojem, t. j. przed biegunami *N* i *S*; natomiast w pasie obojętnym (1, 2) zmian w linjach niema, zatym niema indukcji.

Kierunek prądu można wyznaczyć z reguły dłoni (§ 117, art. 2). Prąd idzie przez *a* do obrączki r_1 kolektora i wychodzi przez szczotkę *x*. Gdy cewka przejdzie pas obojętny (w 1) i zbliża się do *S*, kierunek prądu się zmienia: prąd idzie przez *b* do r_2 i wychodzi szczotką *y*. Tak więc, podczas jednego obrotu pierścienia zachodzi całkowita zmiana prądu.

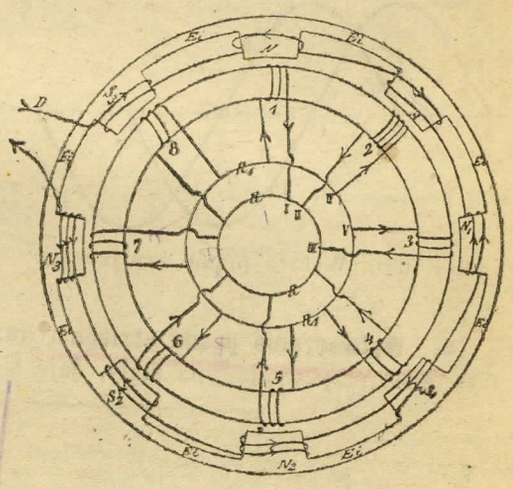
Magnesy stałe mają zastosowanie tylko w małych i słabych maszynach, zwanych *magnetoelektrycznemi*, których użytek jest niewielki. Dynamomaszyny posługują się wyłącznie elektromagnesami, które dają nierównie silniejsze natężenie pola, a wymagają zasilania prądem stałym (pt. poniżej).



Rys. 683. Wykres prądu zmiennego.

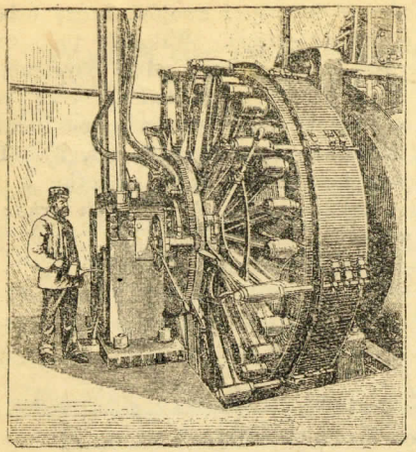
Rys. 683 daje wykres napięcia. W pasie obojętnym linje sił przez chwilę nie wstępują ani wychodzą z cewki. Rzeczywista linja napięcia jest bliska do sinusoidy (kropkowanej). Zmiany kierunku mają miejsce w π i 2π, t. j. przy połowie i przy całym obrocie. Przebieg prądu zmiennego wykreśla się podobnie jak ruchu harmonicznego (rys. 371).

Alternator czyli maszyna do prądów zmiennych (rysunek 684) posiada na pierścieniu kilka lub więcej cewek, a dokoła pierścienia tyleż biegunów magnetycznych, naprzemian północnych i południowych; w sąsiednich cewkach drut jest nawinięty w przeciwną stronę, końce zaś całego uzwojenia łączą się z dwiema obrączkami kolektora.

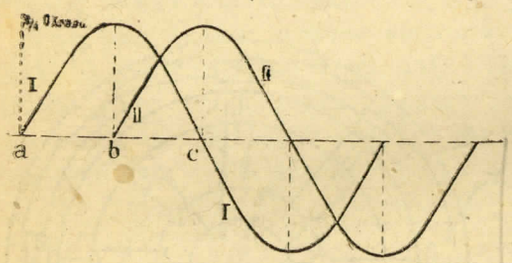


Rys. 684. Zarys maszyny o prądzie zmiennym.

O rzeczywistych wymiarach dynamomaszyn w elektrowni daje pojęcie rys. 685. Liczba zmian wynosi zwykle 50 na sekundę. Napięcie do przesyłania prądu wytwarzać należy jak najwyższe, w miastach 5000 do 10 000 W, na dalsze odległości nawet 30 000 W i wyżej, gdyż wtedy wypada mniejsze natężenie prądu, a zatym mniejsza strata napięcia w przewodnikach. Na miejscu zapotrzebowania napięcie można zniżyć odpowiednio do potrzeby (pt. „Transformatory").



Rys. 685.
Prądnica zmienna na 500 kilowatów.



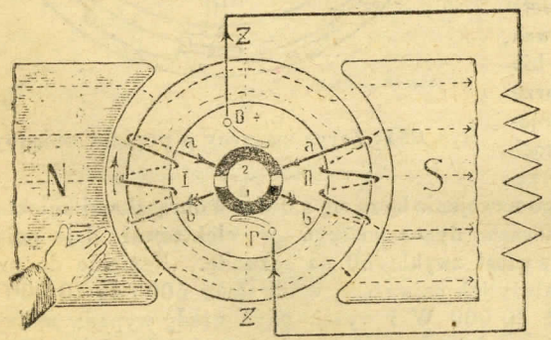
Rys. 686. Wykres prądu dwufazowego.

3. Prąd wielofazowy (Ferraris 1888) stanowi najczęściej używaną postać prądu zmiennego. Jest to prąd złożony z dwu lub więcej prądów zmiennych w ten sposób, że jeden prąd zmienny opóźnia się względem drugiego, czyli jest p r z e s u n i ę t y w f a z i e.

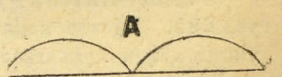
Gdyby prostopadle do cewki S (rys. 681) nasunięto taką samą drugą cewkę, połączoną z osobnym kolektorem obrączkowym, maszyna dawałaby dwa niezależne prądy zmienne o jednakowym okresie i napięciu, lecz drugi opóźniałby się stale względem pierwszego o $\frac{1}{4}$ okresu. W chwili gdy prąd I osiąga najwyższe napięcie, prąd II=0, i nawzajem; jest to *prąd dwufazowy* (rys. 686). Oba napięcia sumują się podług zasad ruchu harmonicznego (rys. 373).

Prąd trójfazowy składa się z 3 prądów jednakowych zmiennych, przesuniętych względem siebie o $\frac{1}{3}$ okresu. Tutaj tworznik posiada 3 grupy cewek w odstępie 120°. Jest to najczęściej używany z prądów zmiennych, np. prąd elektrowni miejskich w Warszawie i Łodzi: nadaje się zwłaszcza do motorów i oświetlenia.

4. Wytwarzanie prądu stałego (Gramme 1871). Aby prąd zmienny (rys. 681) przekształcić na stały, daje się inny kolektor, złożony z tylu wycinków izolowanych, ile jest cewek. Jako wzorzec służy maszyna o dwu cewkach, z kolektorem o dwu półobrączkach, które łączą się z końcami każdej cewki (rysunek 687).



Rys. 687. Pochodzenie prądu stałego.

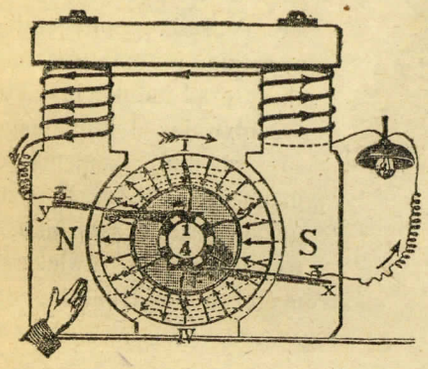


Rys. 688. Wykres prądu maszyny obocznej.

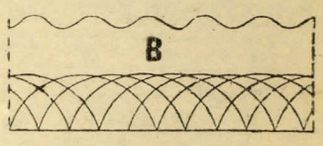
Szczotki prowadzą z kolektora prąd o kierunku stałym, a napięciu wahającym się od zera do normalnej wartości. Przy większej liczbie cewek i wycinków kolektora (rys. 689) wahania są znikome, tak iż prąd nie różni się od galwanicznego.

D z i a ł a n i e (rys. 687). W położeniu I prąd według reguły kieruje się przez a, połówkę górną (2) i wychodzi szczotką B. Poza pasem obojętnym ZZ prąd zmienia kierunek, ale jednocześnie zmienia się położenie kolektora, który teraz zwraca się do góry połówką 1; prąd więc dąży znów do górnej połówki i wychodzi szczotką B. Tak więc, szczotka B stanowi zawsze biegun dodatni, P ujemny.

Napięcie prądu, zatym i natężenie wzrasta z ilością przecinanych linji sił; najwyższe bywa przy N i S, a w ZZ spada do zera. Wyjaśnia to rys. 688, gdzie A odpowiada ZZ.



Rys. 689.
Zarys maszyny o prądzie stałym.

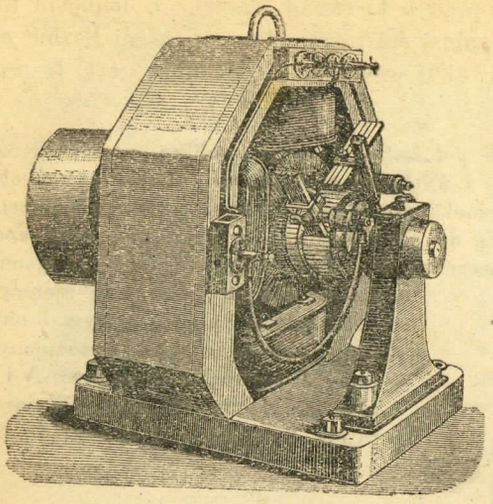


Rys. 690.
Wykres prądu stałego.

Maszyna o kilkudziesięciu cewkach na pierścieniu, połączonych z tyluż wycinkami kolektora (rys. 689), wyrównywa wahania w napięciu, tak iż prąd jest praktycznie stały. Na rys. 690 grzbiety krzywych tworzą prawie linję prostą. C a ł y t w o r n i k d z i a ł a j a k d w a o g n i w a g a l w a n i c z n e, p o ł ą c z o n e z s o b ą r ó w n o l e g l e: bieguny dodatnie są w punkcie 4, ujemne w punkcie 1 (rys. 689). Cewki bowiem po lewej stronie pasa obojętnego I — IV działają jak jedna cewka (I rys. 687), po prawej jak druga cewka (II), dająca prąd do tej samej szczotki B.

Pierwsza maszyna praktyczna posiadała tworznik p i e r ś c i e n i o w y, opisany powyżej, a zwany *pierścieniem Gramme'a*. Nowsze maszyny mają tworznik b ę b n o w y, zwany *bębnem Hefnera* (1872), w postaci walca pełnego, gdzie cały drut mieści się na powierzchni. Napięcie w maszynach o prądzie stałym nie przekracza 600 woltów, gdyż trudno o skuteczną izolację cewek i wycinków kolektora, z konieczności bardzo skupionych. To też wytwarzają one prąd korzystny przy małych odległościach, zarówno do światła i motorów, jak do elektrolizy, metalurgji elektrycznej i nabijania akumulatorów, do czego prądy zmienne nie są przydatne (dlaczego?).

Większe maszyny posiadają nie jednę, ale 2 lub 3 pary biegunów magnetycznych; pozwala to osiągnąć żądane napięcie przy mniejszej szybkości obrotu. Rys. 691 wyobraża prądnicę czterobiegunową.



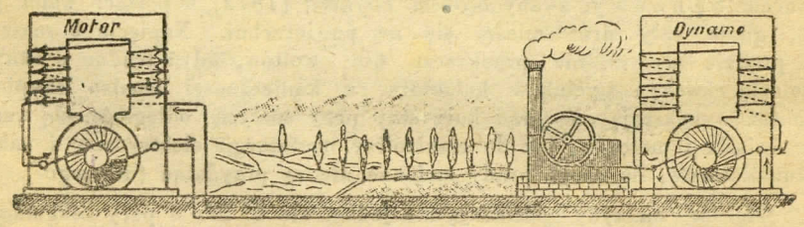
Rys. 691. Dynamomaszyna prądu stałego.

5. Zasada samowzbudzania (Siemens i Wheatstone 1867). Żelazo handlowe zawiera zawsze ślady magnetyzmu, zwłaszcza jeżeli choć raz przepuszczono dokoła niego prąd elektryczny. Gdy stator dynamomaszyny stanowi taki szczątkowy magnes i w jego polu obraca się twornik prądu stałego, powstaje w ostatnim nader słaby prąd indukcyjny, który przepływając dokoła magnesu (rys. 689) wzmacnia jego magnetyzm. Przez to wzmaga się prąd w tworniku, co wywołuje znów zwiększenie siły magnetycznej i t. d., aż żelazo elektromagnesu dojdzie do stanu nasycenia. Maszyny więc o prądzie stałym wzbudzają same w sobie magnetyzm.

Elektromagnesy maszyn do prądu zmiennego muszą być zasilane odrębną maszyną o prądzie stałym.

6. Silniki elektryczne czyli **elektromotory**. Prądnice dają przykład odwracalności: obracane siłą mechaniczną, wytwarzają elektryczność; nawzajem, otrzymując prąd elektryczny, wydają pracę mechaniczną. Tak więc każda dynamomaszyna, zasilana odpowiednim prądem elektrycznym, staje się motorem (rys. 692).

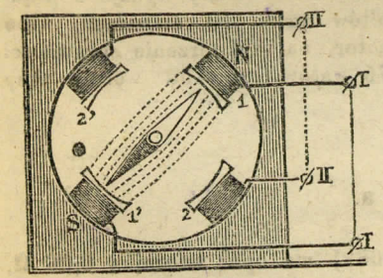
Silniki prądu stałego są najdogodniejsze, pozwalają bowiem na dowolne zmiany szybkości; silniki zaś prądu zmiennego lub trójfazowego muszą stosować liczbę obrotów do częstości zmian prądu, czyli są synechroniczne.



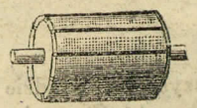
Rys. 692. Przenoszenie energji mechanicznej za pomocą elektryczności.

Ponieważ prąd zmienny osiąga w technice znacznie wyższe napięcie, niż prąd stały, ten ostatni ma zastosowanie ograniczone do niewielkich odległości. Prąd zmienny może obsługiwać rozległe miejscowości, zwłaszcza przy napięciu podniesionym jeszcze za pomocą transformatorów (pt.).

Najprostszą budowę posiada silnik trójfazowy, gdzie stosuje się *wirujące pole magnetyczne*. Mianowicie prąd wielofazowy wywołuje taką zmianę biegunów magnetycznych, że krążą one po obwodzie koła.



Rys. 693. Pole wirujące.



Rys. 694. Twornik indukcyjny.

Np. prąd zasila cewki magnesów (rys. 693) w ten sposób, że każdy z prądów przechodzi przez cewki biegunów naprzeciwległych: prąd I przez cewki 1-1′, prąd II przez 2-2′; igła magnesowa nabiera tu ruchu wirowego. Mianowicie prąd I w chwili *b* (wykres rys. 686) dochodzi do najwyższego napięcia, prąd II = 0, zatym pole magnetyczne tworzą tylko cewki 1-1′ (rys. 693) i *N* przypada w 1. W chwili *c* prąd II jest największy, bieguny są w 2-2′, *N* jest w 2. W następnej fazie prąd II przechodzi przez 0, prąd I dosięga najwyższego, ale przeciwnego napięcia, czyli *N* jest w 1′. Wreszcie prąd II wzrasta do największości, znaku przeciwnego, *N* jest w 2′. Igła więc magnesowa dąży swym biegunem *S* za wędrówką elektromagnetycznego bieguna *N*.

Zamiast igły magnesowej można w polu wirującym umieścić twornik (rys. 694) w kształcie walca, złożonego z prętów podłużnych, spojonych obręczami na obu ścianach szczytowych. W tworniku powstają prądy indukcyjne, które go wprawiają w ruch obrotowy. Jest to więc motor elektryczny, przytym najprostszy, bez kolektora i szczotek; używa się do mniejszych sprawności, np. 1 HP, i zowie się *motorem indukcyjnym*.

Licznik elektryczności jest to mały motorek, którego szybkość obrotu jest proporcjonalna do sprawności; stąd liczba obrotów w ciągu danego czasu wykazuje zużytą pracę elektryczną. Licznik domowy podaje ilość tej pracy w *kilowatogodzinach*, jako jednostkach handlowych, od których ustalono zapłatę za elektryczność. Np. skoro mieszkanie oświetlono 6 żarówkami po 50 świec, sprawność wynosi $1\frac{1}{4} \cdot 50 \cdot 6 = 375$ watów (§ 116, art. 5) czyli 0,375 kilowata; licznik po 8 godzinach wskaże $0{,}375 \cdot 8 = 3$ kilowatogodziny.

Kilowatogodzina = 3 600 000 dżulów = $36 \cdot 10^{12}$ ergów; kilowat bowiem = 1000 $\frac{\text{dżul}}{\text{sek}}$, godzina = 3600 sekund, dżul = 10^7 ergów.

7. Wydajność prądnic i elektromotorów dochodzi około 90%, a w największych maszynach do 95%, czyli zaledwie 5% pracy marnuje się w postaci tarcia i rozgrzewania wewnętrznego; są to więc najdoskonalsze z maszyn pod względem wydajności (por. silnik parowy i turbinę).

Ponieważ 1 HP = 736 watów, każdy koń mechaniczny wydaje z prądnicy 736 . 0,95 = 700 watów, np. 70 woltów przy 10 amperach, albo 50 woltów przy 14 amp. i t. p. Elektromotor na wytworzenie sprawności każdego konia potrzebuje 736 . $\frac{100}{95}$ = 775 watów, np. 155 woltów przy 5 amperach.

Zadania.

1. Maszyna o prądzie stałym (rys. 689) ma opór twornika 0,06 Ω, a opór statora 44 Ω; napięcie biegunowe = 110 W. Jakie natężenie ma prąd na linji o oporze 2,2 Ω, oraz prąd magnesujący? Jaką jest siła el.-wzbudzająca? Odp. $I' = 50$ A; $I'' = 2{,}5$ A; $I = I' + I'' = 52{,}5$ A, stąd strata napięcia w tworniku = 52,5 . 0,06 = okr. 3 W, zatem E = = 110 + 3 = 113 W.

2. Ile światła daje 1 koń parowy za pomocą prądnicy o wydajności 90%, zasilającej: 1) żarówki, 2) lampę łukową o 44 W?

Odp. 1) 736 . 0,9 = 662 waty; licząc $1\frac{1}{4}$ wata na świecę, wypada 529 świec, np. 33 żarówki po 16 świec. 2) 662 waty = 44 W × 15 A; 1 A wydaje około 100 świec, zatym lampa łukowa daje 1500 świec.

§ 119. Przetwornice.

1. Przetwornicą albo **transformatorem** elektrycznym zowie się przyrząd, który przeobraża prąd o danych własnościach na prąd o własnościach odmiennych. Odróżniamy przetwornice dwojakiego rodzaju: wirowe i stałe.

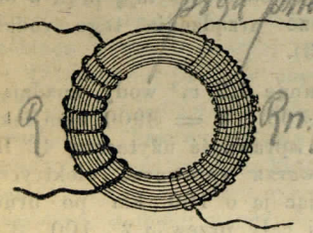
1) Przetwornice wirowe, zwane wprost *przetwornicami*, przeobrażają jeden rodzaj prądu na inny: stały na zmienny lub trójfazowy i nawzajem; jednocześnie zmienia się w razie potrzeby napięcie i natężenie prądu. Przetwornica tego rodzaju składa się z prądnicy i elektromotoru; dany prąd, np. trójfazowy, pędzi motor, ten zaś obraca prądnicę, dającą prąd stały, albo też przeciwnie.

2) Przetwornice nieruchome, zwane *transformatorami*, nadają się tylko do prądów zmiennych, zwykłych lub wielofazowych; zmieniają one tylko napięcie i natężenie, czyli przerabiają słaby prąd zmienny o wysokim napięciu na silniejszy prąd zmienny o niższym napięciu, albo przeciwnie.

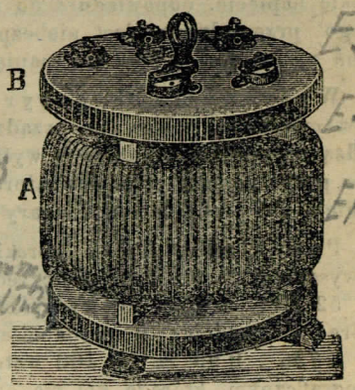
Teoretycznie zmieniają się czynniki iloczynu $EI = K$, t. j. napięcie zwiększa się n razy, a natężenie zmniejsza się tyleż razy, lub nawzajem, przyczym sprawność K pozostaje bez zmiany:

$$K = (n\,E) \cdot \left(\frac{I}{n}\right) \qquad K = \left(\frac{E}{n}\right) \cdot (n\,I).$$

Osiąga się to przez nawinięcie dwu cewek na rdzeń żelazny (rysunek 695): jednej z drutu grubego, w niewielu zwojach, drugiej z cienkiego, o liczbie zwojów n razy większej. Stosunek n stanowi *spółczynnik przemiany*; wyraża on zarazem stosunek napięć, a jednocześnie odwrotny stosunek natężeń prądu głównego i przetworzonego.



Rys. 695. Zasada transformatora.



Rys. 696. Transformator.

Transformator zamknięty posiada zamknięty w sobie rdzeń żelazny, tak iż linje sił przebiegają w żelazie bez przerwy, niema więc prawie rozpraszania: tyleż linji przechodzi przez jednę, ile przez drugą cewkę, a strata energji wynosi zaledwie 3 do 5%, t. j. wydajność transformatora wynosi 95 do 97%. Najprostszą postać ma transformator pierścieniowy (rys. 695 i 696). Rdzeń składa się z wiązki drutu lub taśmy żelaznej, aby osłabić histerezę (pt.).

Przykład. Cewka pierwotna zawiera 80 zwojów drutu, wtórna 2000 zwojów; spółczynnik n = 2000 : 80 = 25. Skoro pierwsza cewka otrzymuje prąd o sprawności 6000 watów = 120 W × 50 A, druga przetwarza go na prąd (120 . 25) W × $(\frac{50}{25})$ A = 3000 W × 2 A = 6000 watów; przy odwrotnej roli cewek, t. j. zasilaniu cewki o 2000 zwojach prądem 3000 W × 2 A, transformator wytwarza z cewki o 80 zwojach prąd 120 W × 50 A. W obu wypadkach należy uwzględnić nadto wydajność; skoro wynosi ona 95%, otrzymana sprawność = 6000 . 0,95 = 5700 watów; napięcie więc i natężenie prądu wypada cokolwiek mniejsze od teoretycznych, tak iż iloczyn ich daje 5700 zamiast 6000.

2. Zastosowania. Rozprowadzanie energji elektrycznej w miastach czyli *kanalizacja elektryczności*. Prąd zmienny elektrowni miejskiej o napięciu 5000 W przerabia się przy użyciu przetwornic i transformatorów: bądź na prąd zmienny o 125 W do światła żarowego, bądź na prąd stały o 600 W do tramwajów, albo na prąd stały o 4 W do platerowania i t. p. (objaśnić bliżej.)

Przewodzenie energji na wielką odległość. Przeprowadzenie prądu stałego lub zmiennego o niskim napięciu, przydatnym do oświetlenia, metalurgji i t. p., staje się niewykonalne praktycznie, gdy chodzi o prąd potężny, wielu tysięcy amperów; wymagałoby to bowiem przewodów zbyt grubych, o małym oporze, aby uniknąć zbytniego rozgrzewania, oraz dużej straty napięcia (w myśl wzorów $Q = 0{,}24\ I^2Rt$ oraz $E=IR$). Należy więc wytworzyć prąd o napięciu jak najwyższym, a natężeniu słabym; taki prąd idzie zwykłym drutem miedzianym lub żelaznym, grubości kilku mm, byleby starannie izolowanym w miejscach oparcia, do odległego miejsca zapotrzebowania, gdzie przyjmuje go transformator i przerabia na niskie napięcie, odpowiednio do światła, motoru i t. p. Ujemną stroną takiego przewodzenia jest niebezpieczeństwo, jakie zagraża życiu za dotknięciem przewodów o wysokim napięciu.

Wyzyskanie sił przyrody, jak potoków, wodospadów, przypływów morskich, polega na urządzeniu odnośnych silników, np. turbin, które pędzą na miejscu prądnice o wysokim napięciu, i stąd rozsyłają prąd w okolice przy pomocy transformatorów. Największe urządzenia tego rodzaju istnieją nad wodospadem Niagary (§ 78, art. 3).

Przykłady. Potok górski daje na sekundę 1,3 m^3 wody, spadającej z wysokości 3 m. Sprawność teoretyczna = 1300 . 3 = 3900 kgm/sek = = 52 HP; turbina o wydajności 81% daje sprawność użyteczną 42 HP, która w prądnicy o wydajności 95% wytwarza sprawność elektryczną 42 . 736 . 0,95 = 29 400 watów. Przesyłając ją o 100 km po drucie telegraficznym, którego km ma opór 8 Ω, czyli cały przewód 2 . 100 . 8 = = 1600 Ω, wywołuje się na każdy amper prądu stratę napięcia $E = 1 . 1600 =$ = 1600 W.

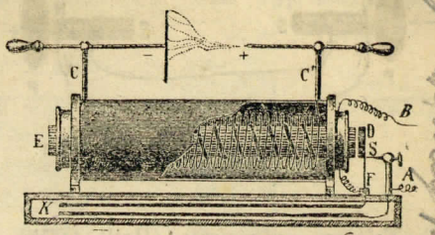
Przy prądzie 1 A pod napięciem 29 400 W pozostaje napięcie użyteczne 29 400 — 1600 = 27 800 W, przesyła się zatym 27 800 : 29 400 = 94½% sprawności potoku, czyli 39,7 HP.

Przy prądzie 3 A pod napięciem 9 800 W strata napięcia w drucie wynosiłaby 3 . 1600 = 4800 W, pozostałoby napięcie użyteczne 9800 — = 4800 = 5000 W; zatym do miejsca przeznaczenia doszłoby 5000 : : 9800 = 51% sprawności potoku, czyli 21,4 HP.

W pierwszym więc przypadku traci się na przewodzeniu energji 5½% w drugim 49%. Ponieważ jednak prądu o napięciu 29 400 W niepodobna wytworzyć wprost z dynamomaszyny, wypada turbiną pędzić maszynę o niższym napięciu, np. 2940 W, i prąd jej transformować, przy spółczynniku 10; mimo straty energji w transformatorze, wynoszącej około 5%, wypada to korzystniej, niż przesyłanie prądu 3 A o napięciu 9800 W.

3. Induktor Ruhmkorffa czyli **cewka Ruhmkorffa** (1851, rys. 697) stanowi transformator otwarty, t. j. gdzie linje sił przebiegają w powietrzu. Składa się z dwu cewek, nasuniętych jedna na drugą: zewnętrznej o cienkim drucie i wewnętrznej o grubym; ta ostatnia zawiera rdzeń żelazny, utworzony z wiązki drutu. Przerywanie prądu odbywa się zwykle za pomocą młotka Neefa (§ 114, art. 4). Dla osłabienia iskier ekstraprądu miejsca przerwy są połączone z kondensatorem.

Cewka Ruhmkorffa rozprasza bezużytecznie dużo energji (dlaczego?); nadaje się głównie do wyładowań iskrowych i zastępuje z korzyścią maszyny elektrostatyczne w wielu przypadkach.



Rys. 697. Cewka Ruhmkorffa.

Działanie. Prąd kilku silnych ogniw przechodzi przez młotek Neefa, cewkę środkową i wraca do stosu. Magnesując żelazo, wytwarza w zwojach zewnętrznych prąd indukcyjny o wysokim napięciu, a kierunku przeciwnym do głównego. Po chwili, gdy młotek, pociągnięty siłą magnesu, przerywa prąd, powstaje w cienkich zwojach nowy prąd indukcyjny o kierunku zgodnym z prądem głównym. Wogóle przerwy w prądzie i magnetyźmie wytwarzają zmienne pole magnetyczne, o bardzo szybkich zmianach, a stąd przebiega w cewce wtórnej prąd zmienny o wysokim napięciu; końcówki C i C' stanowią bieguny naprzemian to dodatni, to ujemny.

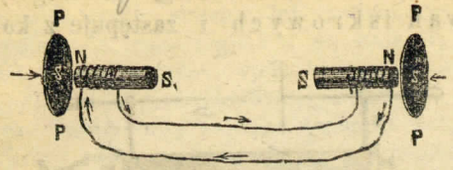
Rola kondensatora. Z powodu znacznej samoindukcji w cewce głównej, za każdą przerwą prądu utworzyłby się w miejscu przerwania chwilowy łuk woltaiczny, któryby czynił przerwy mniej nagłymi, a nadto zniszczył kontakty nawet platynowe. Przy połączeniu zaś kontaktów z kondensatorem o dużej pojemności, np. w cynfolji, przekładanej papierem parafinowym, oba ich naboje o wysokim napięciu idą do kondensatora, i prąd przerywa się nagle, prawie bez iskry. Następnie, przy zamknięciu prądu, nagromadzone elektryczności wyładowują się w miejscu zetknięcia.

Prąd indukcyjny otwarcia jest silniejszy, niż prąd zamknięcia (§ 117). Ujawnia się to mianowicie przy rozsuwaniu końcówek wtórnych: napięcie między nimi jest tak wysokie, że biją iskry. Im dłuższe są iskry, tym więcej przeważa w nich prąd otwarcia, tak iż wreszcie on tylko wyłącznie przechodzi. W ten sposób, t. j. przy wyładowaniu iskrowym cewka posiada bieguny stałe, dodatni i ujemny: podobnież zawsze, gdy między końcówki włączono bardzo wielki opór (pt. rurki Geisslera, Crookesa, Roentgena).

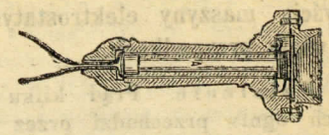
Napięcie prądu wtórnego już w małych cewkach wynosi kilka tysięcy woltów, w wielkich dochodzi miljona, tak iż biją iskry do 1 m długości. Napięcie to jest znacznie wyższe, niż wypada ze stosunku zwojów (n) w cewkach; można je przypisać wpływowi ekstraprądu i wzajemnym oddziaływaniom obu prądów na siebie.

Zastosowania. Większe cewki Ruhmkorffa służą do wyładowań w rurkach opróżnionych, wywołując promieniowanie elektryczne (pt.), do wytwarzania fal elektrycznych, a stąd do telegrafji bez drutu (dt.), do ulatniania ciał w badaniach widmowych. Małe cewki mają zastosowanie w lecznictwie (por. § 109, art. 7), do telefonów i dzwonków na wielką odległość.

4. Telefon służy do przenoszenia głosu na znaczną odległość, na zasadzie indukcji magnetycznej oraz transformacji prądu.



Rys. 698. Zasada telefonu.

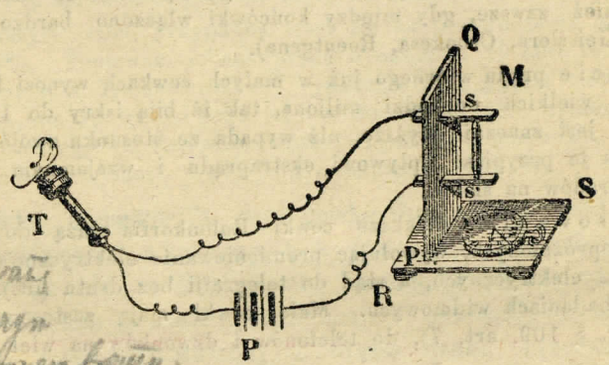


Rys. 699. Telefon.

Telefon właściwy (Bell 1875) składa się w zasadzie z magnesu (*NS*, rys. 698), na którego końcu nawinięto cewkę z cienkiego drutu; tuż przed cewką mieści się wiotka blaszka żelazna. Gdy się głos rozlega w pobliżu, blaszka drga, przyczym jej odległość od magnesu zmienia się ustawicznie, a stąd pole magnetyczne to wzmaga się, to osłabia. Stąd powstają w cewce prądy indukcyjne, które dążą po drutach do takiegoż przyrządu na drugiej stacji, wywołując takie same zmiany w magnetyźmie, a przez to drgania blaszki w drugim telefonie. Drgania te odtwarzają głos, jaki brzmi przy pierwszym telefonie. Przyrząd przenosi dobrze głosy donośne, jest wszakże niedość wrażliwy na dźwięki mowy.

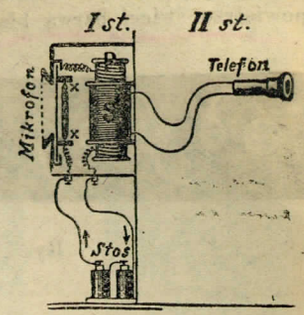
W wykonaniu praktycznym (rys. 699) magnes mieści się w rączce drewnianej, dogodnej do trzymania; przed blaszką rozszerza się ona w trąbkę, czyli rezonator dla wzmocnienia głosu.

Mikrotelefon czyli *telefon praktyczny* do rozmowy jest połączeniem telefonu z mikrofonem (Hughes 1878) i umożliwia przenoszenie głosów najsubtelniejszych. Działanie jego polega na szybkich zmianach oporu elektrycznego pod wpływem drgań głosowych.



Rys. 700. Mikrotelefon.

Sam *mikrofon* (*M*, rys. 700) składa się z pręcika lub ziarn węgla, które są ujęte luźno w oprawy (*ss*) również węglowe. Wszystko włącza się wraz z telefonem (*T*) do obwodu stosu (*P*). Pod wpływem dźwięków w mikrofonie drga węgielek, przez co zetknięcie jego z oprawami staje się to słabsze, to silniejsze, i opór elektryczny naprzemian to rośnie, to maleje. W telefonie zaś, przez który przebiega ten prąd zmienny, powstają głosy, odpowiednio do liczby drgań i ich rodzaju w mikrofonie. W praktyce więc mówimy do mikrofonu, który zowiemy potocznie *trąbką*, telefon zaś czyli *słuchawkę* przykładamy do ucha.



Rys. 701. Urządzenie telefoniczne.

Obie części mieszczą się bądź w jednej oprawie, w postaci rączki, bądź osobno: telefon w rączce, mikrofon w szafce (rys. 701).

Telefon jednej ze stacji tworzy obwód zamknięty z mikrofonem drugiej stacji, i nawzajem. Nadto dla wzmocnienia głosu wtrąca się mały transformator *S* tak, iż telefon łączy się z cewką wtórną, a cewkę pierwotną zasila prąd stosu, idący przez mikrofon. W ten sposób na linji telefonicznej panuje prąd wyższego napięcia, niż w mikrofonie, co sprzyja pokonywaniu oporu na długich linjach.

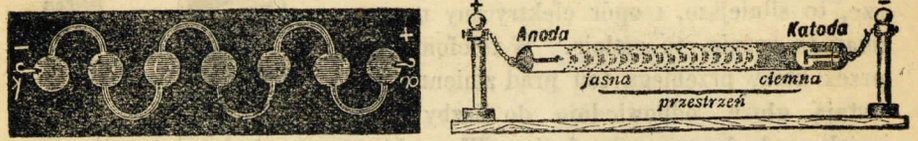
D) PROMIENIOWANIE ELEKTRYCZNE.

§ 120. Prąd elektryczny w gazach.

1. Zjawiska świetlne w gazach rozrzedzonych. Wyładowanie elektryczne objawia się w postaci iskry między biegunami maszyny influencyjnej, cewki Ruhmkorffa lub kondensatora, skoro bieguny znajdują się w powietrzu lub innym gazie, pod zwykłym ciśnieniem. Gęste i długie iskry, zwłaszcza z dużej cewy Ruhmkorffa, tworzą wspaniałe wiechy świetlane, którym towarzyszy trzask ogłuszający (rys. 603).

W miarę rozrzedzenia powietrza między biegunami, przewodnictwo jego się powiększa do pewnego stopnia; iskra się rozszerza i wydłuża w jasną wstęgę, bez trzasku, błękitną przy katodzie, różową przy anodzie. Naczynia o rozrzedzeniu odpowiednim do takich wyładowań zowią się, niezależnie od postaci, rurkami Geisslera.

Rozrzedzenie słabe, około 1 lub 2 mm rtęci, daje światło ciągłe (rysunek 702); silniejsze, około 0,1 mm, daje światło przerywane, przyczym cofa się ono coraz bardziej ku anodzie, katodę zaś otacza przestrzeń ciemna (rysunek 703). Barwa światła w rurce zależy od gazu i daje widmo właściwe; powietrze świeci barwą blado fijołkową.



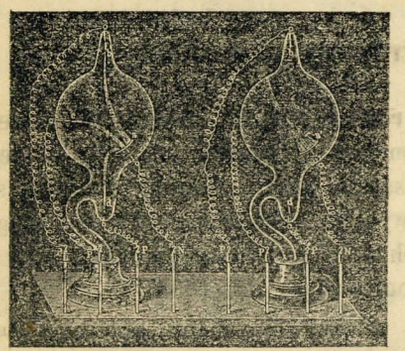
Rys. 702 i 703. Rurki Geislera.

2. Promienie katodowe. Przy rozrzedzeniach bardzo wysokich światło wewnątrz rurki znika prawie zupełnie; natomiast szkło naprzeciw katody świeci czyli fluoryzuje pod wpływem szczególnych promieni, wypływających z katody, czyli *promieni katodowych*. Rurki do wyładowań w takim rozrzedzeniu zowią się *rurkami Crookesa*.

Promienie katodowe rozchodzą się prosto, odbijają się i załamują według praw ogólnych; pod wpływem magnesu zbaczają z drogi prostej; wywołują skutki cieplne, świetlne, mechaniczne, elektryczne.

Rozrzedzenie w rurkach Crookesa wynosi średnio 0,002 do 0,010 mm rtęci. Dalsze rozrzedzenie osłabia wyładowania, tak iż w próżni najdokładniejszej, jaką można osiągnąć, ustaje wszelki przepływ elektryczności.

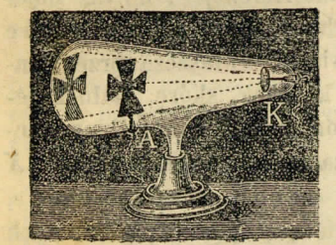
Rys. 704 daje porównanie wyładowań świetlnych w rurce Geisslera (*I*) i Crookesa (*II*). Rurki te mają po 3 anody i po 1 katodzie w kształcie lusterka wklęsłego. W *I* smugi światła łączą przeciwne bieguny; w *II* niema ich wcale, a na szkle wprost katody, niezależnie od miejsca anody, powstaje plama świetlna.



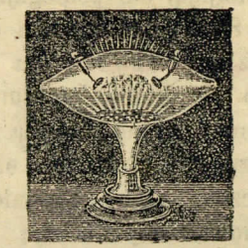
Rys. 704. Rurka Geislera i Crookesa.

Na rys. 705 promienie katodowe rzucają cień metalowego krzyżyka na ścianę rurki. Na rys. 706 kryształki spatu wapiennego fluoryzują pod ich wpływem. W rurce rys. 707 promienie katodowe zbierają się w ognisku katody, którą stanowi lusterko wklęsłe; umieszczona w tem miejscu platyna rozżarza się do białości.

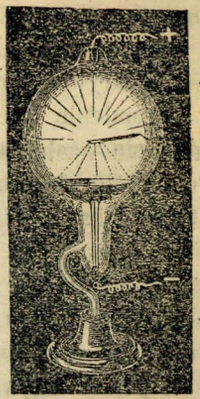
Na rys. 708 wiatraczek, umieszczony wewnątrz rurki Crookesa, osią prostopadle do kierunku promieni, obraca się żywo pod ich wpływem. Na rysunku 709 magnes odchyla wiązkę promieni katodowych, działając na nią jak na ruchomy prąd elektryczny, zgodnie z prawami Ampere'a (§ 111, art. 4).



Rys. 705.

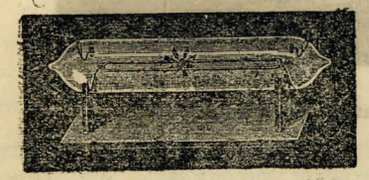


Rys. 706.



Rys. 707.

Objawy powyższe, oraz zbaczanie promieni katodowych pod działaniem nabojów elektrycznych, każą przypuszczać, że nie są one natury falowej jak promienie światła, ale stanowią potok nikłych pyłków o naboju ujemnym, zwanych *elektronami* (I. I. Thomson). Szybkość ich dochodzi do $\frac{1}{3}$ szybkości światła; nie zależy ona od rodzaju gazu w rurce, ani od materjału katody. Bliższe szczegóły pt. „Elektrony".



Rys. 708.

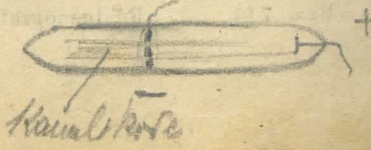


Rys. 709.

Można wypuścić promienie katodowe z rurki przez okienko z cienkiej blaszki glinowej; znikają one zaraz w powietrzu, podobnie jak światło w dymie, przytym jonizują powietrze, czyniąc je przewodnikiem elektryczności, np. rozbrajają elektroskop (Lenard 1894).

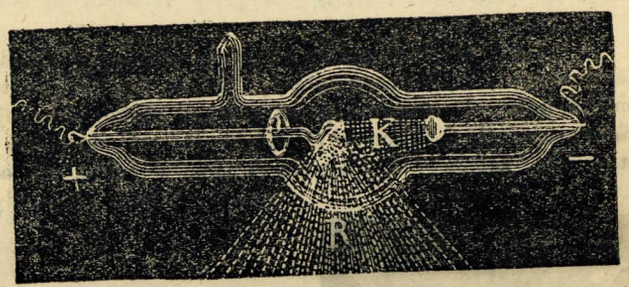
3. Promienie kanalikowe. Od bieguna dodatniego w rurce Crookesa wychodzą promienie o własnościach odmiennych; można je wypuścić przez wąski otworek w katodzie. Promienie te otrzymały nazwę *kanalikowych* (Goldstein) albo *anodowych* (Righi). Posiadają one dodatni nabój elektryczny, odchylają się w polu magnetycznym słabo, w stronę przeciwną, niż promienie katodowe; zresztą podlegają zupełnemu prawie pochłanianiu przez wszelkie materje, nawet gazy, stąd jonizują silnie powietrze (dodatnio).

Szybkość tych promieni jest daleko mniejsza, niż katodowych: wynosi około $\frac{1}{500}$ szybkości światła. Sprawia je przypuszczalnie prąd atomów materjalnych, obdarzonych dodatnim nabojem elektrycznym, czyli prąd jonów dodatnich.



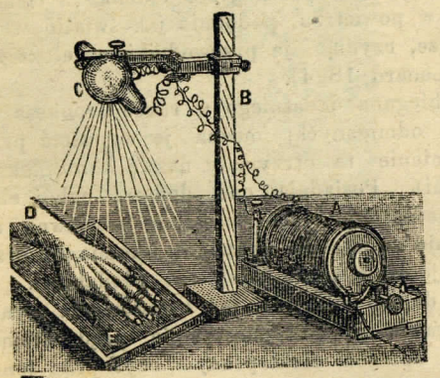
4. Promienie Roentgena (X). W miejscu, gdzie promienie katodowe trafiają szkło lub inną materję, powstaje nowy rodzaj promieni, o własnościach odmiennych od wszelkich znanych promieni. W. Roentgen, odkrywca tych promieni (1895), nazwał je *promieniami X.*

Promienie Roentgena nie zbaczają w polu magnetycznym, nie załamują się wcale, ani odbijają, ani podlegają interferencji i innym objawom ruchu falowego. Szczególną zaś ich cechę stanowi przenikanie przez ciała nieprzezroczyste dla światła, zwłaszcza przez materje organiczne, jako to: drzewo, tekturę, kauczuk, skórę, ciało zwierzęce; metale są najmniej przenikliwe dla promieni X, z wyjątkiem metali lekkich: glinu, magnezu i t. p. Do okazania obecności promieni X służy klisza fotograficzna, albo dogodniej ekran fluoryzujący, czyli papier sztywny, powleczony materją świecącą pod wpływem tych promieni (zwykle platynocjankiem baru).



Rys. 710. Rurka Roentgena.

Najskuteczniej wytwarza promienie Roentgena rurka z lusterkiem platynowym naprzeciw katody czyli *antykatoda* (rys. 710). Lusterko to, umieszczone w ognisku promieni katodowych (K), jest siedliskiem promieni Roentgena (R).



Rys. 711. Rentgenografja.



Rys. 712.

Istotę promieni X wypada upatrywać w szczególnych drganiach, jakie wzbudzają uderzenia promieni katodowych o antykatodę. Promienie X więc można nazwać *promieniami wtórnymi.*

Zastosowania. Prześwietlanie ciała ludzkiego w celach chirurgicznych, jak wykrycia kul, odłamków metalu, złamań kości, złogów w organach (kamieni). — Leczenie chorób skórnych. — Badanie metalów pod względem jednostajności, np. na rysy, skazy wewnętrzne. — Odróżnianie djamentów od imitacji, polegające na większej przepuszczalności djamentu.

Rys. 711 wskazuje sposób wykonania zdjęcia *rentgenograficznego.* Cewkę Ruhmkorffa, zasilaną prądem, łączy się drutami z rurką Roentgena C, umocowaną na podstawie izolującej B, bacząc, aby ujemny biegun cewki był połączony z katodą rurki. Naprzeciw katody kładzie się np. rękę na kasecie, gdzie zamknięto kliszę. Po krótkim naświetleniu (rys. 711 wskazuje kierunek promieni X; przebieg ich nie jest widoczny), wywołuje się kliszę; ukazuje się na niej obraz (rys. 712), gdzie szkielet zaznacza się ciemniej od mięśni i skóry, jako mniej przepuszczalny dla promieni X.

§ 121. Fale elektromagnetyczne.

1. Powstawanie fal elektromagnetycznych. Prąd elektryczny wytwarza naokoło pole elektromagnetyczne (§ 111). Skoro zmienia się szybko i perjodycznie stan elektryczny przewodnika, powstają równie szybkie i perjodyczne wahania w polu, mianowicie w otaczającym eterze. Rozchodzą się one na wszystkie strony, jako *fale elektromagnetyczne*, podobnie jak drgania mechaniczne rozchodzą się w powietrzu jako fale głosowe.

Każdą falę elektromagnetyczną wzbudzają zmiany w polu elektrycznym i magnetycznym, przebiegające prostopadle do siebie, a zarazem prostopadle do biegu fali; są to więc fale poprzeczne (§ 73, art. 5, oraz § 74).

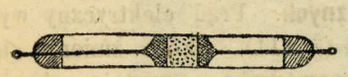
2. Źródło fal elektromagnetycznych. Najpowszechniejszym źródłem fal elektromagnetycznych jest iskra elektryczna; stanowi ona chwilowy prąd elektryczny, przytym zmienny, o nadzwyczajnej częstości zmian, t. j. składa się z mnóstwa iskierek poszczególnych, bijących naprzemian to w jednę, to w drugą stronę i stopniowo słabnących. Stąd powstają raptowne, równie częste zmiany w otaczającym eterze, czyli fale elektromagnetyczne. Przyrząd, w którym przebiegają iskry, zowie się wogóle *iskiernikiem* (np. przy cewce Ruhmkorffa, § 119, art. 3); w poszczególnych postaciach zowie się także *wibratorem, radjatorem, oscylatorem.*

Iskra ma charakter wahadłowy, podobnie jak przepływ raptowny cieczy w rurze, łączącej dwa naczynia o rozmaitym poziomie (§ 77, art. 7).

Jeżeli np. zbliżymy do siebie dwie kulki połączone z okładkami kondensatora, przeskoczy między kulkami iskra, złożona przy bliższym zbadaniu z kilkudziesięciu i więcej iskierek cząstkowych. Skoro pierwsza bije od prawej kulki do lewej, t. j. prawa kulka stanowi biegun dodatni w czasie przejścia tej iskry, napięcie raptownie spada i wywołuje ekstraprąd w tym samym kierunku, tak iż przypływa nieco więcej elektryczności dodatniej, niż potrzeba do zobojętnienia. Stąd powstaje następna iskierka, od lewej kulki do prawej, przenosząca znów nadmiar + el. na prawo i t. d., bieguny kondensatora wciąż się zmieniają, a różnica potencjałów maleje i wreszcie znika zupełnie.

3. Wykrywanie fal elektromagnetycznych. 1) Skoro w przestrzeni, przebieganej przez fale elektryczne, mieści się przewodnik odpowiednich wymiarów z maleńką przerwą pośrodku, np. kabłąk z drutu, ukazują się w tej przerwie iskierki elektryczne; jest to *rezonator elektryczny* (Hertz 1889).

2) Opiłki metalowe, napełniające luźno rurkę szklaną, stawiają tak wielki opór elektryczny, że nie przepuszczają słabych prądów, np. ze zwykłego stosu. Skoro jednak opiłki znajdą się w polu fal elektrycznych, stają się dobrym przewodnikiem prądu, co łatwo wykryć galwanometrem lub dzwonkiem elektrycznym. Podobna rurka z opiłkami, nadzwyczaj czuła na fale elektryczne, stanowi *koherer* (Branly 1890, rys. 713).



Rys. 713. Koherer.

Koherer, raz poddany działaniu fal, przepuszcza prąd dalej, pomimo ustania fal. Aby go przywrócić do stanu pierwotnego, t. j. nieprzewodnictwa, należy go wstrząsnąć, przez co opiłki się rozluźniają.

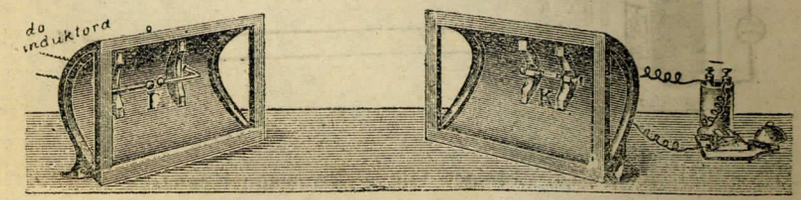
3) Przyrząd elektrolityczny, podobny do przerywacza Wehnelta (rysunek 655), ale zasilany prądem o napięciu zaledwie zdolnym rozłożyć wodę, przepuszcza prąd znikomo słaby; pod wpływem zaś fali elektromagnetycznej prąd nagle się wzmaga. Jest to *wykrywacz* czyli *detektor* elektrolityczny, nader wrażliwy (Schlömilch 1903).

4. Własności fal elektromagnetycznych. Podobnie jak promienie światła, fale elektromagnetyczne rozchodzą się prosto na wszystkie strony; stąd kierunki biegu tych fal nazwał ich odkrywca, Hertz, *promieniami siły elektrycznej* albo krócej *promieniami elektrycznymi*. Przenikają one łatwo przez izolatory, np. szkło, kauczuk, drzewo suche, powietrze; natomiast zatrzymują się na przewodnikach, np. metalach, przyczym wystarcza krata z drutów prostopadłych do kierunku drgań.

Promienie (fale) elektryczne *odbijają* się i *załamują*, podobnie jak światło; odbicie zachodzi najdokładniej na blachach lub kratach metalowych, załamanie w bryłach asfaltu, siarki, kauczuku. Przy odbiciu fal od blach prostopadłych, albo od końców przewodnika, wracają one w kierunku wstecznym, tworząc *fale stojące*, podzielone *węzłami elektrycznymi*, podobnie jak to zachodzi w sznurze za szarpnięciem (rys. 388) albo w rurze za poruszaniem tłoka (rys. 395).

Szybkość fal elektromagnetycznych jest równa szybkości światła = 300 000 km na sek.

Liczba drgań elektrycznych waha się w granicach bardzo obszernych, zależnie od pojemności iskiernika i samoindukcji; średnio wynosi od miljona do miljarda na sekundę. Długość fal elektrycznych wynosi najczęściej od kilkuset metrów do kilku centymetrów.



Rys. 714.

Doświadczenia Hertza. Urządzenie ogólne wyobraża rys. 714. Wibrator I mieści się w ognisku zwierciadła parabolicznego; naprzeciwko ustawia się drugie takie zwierciadło, w którego ognisku znajduje się koherer K, włączony w obwód ogniwa i dzwonka.

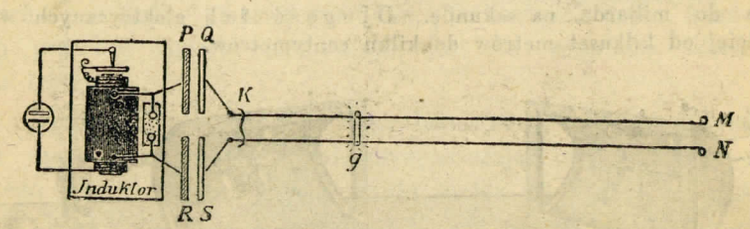
1) Zwierciadła ustawia się równolegle do siebie; za połączeniem iskiernika z induktorem Ruhmkorffa, skoro w I ukażą się iskry, dzwonek zaczyna dzwonić (odbicie i zbieranie się fal elektromagnetycznych; objaśnić).

2) Pomiędzy zwierciadła rownolegle ustawia się arkusz blachy tak, aby zasłaniał je od siebie; pomimo iskier w I dzwonek milczy. Zamiast blachy wstawia się szybę szklaną; dzwonek się odzywa (przewodnictwo ciał względem fal elektromagnetycznych).

3) Zwierciadła ustawia się prostopadle do siebie, jak na rys. 714; trzymając przed nimi blachę pionową tak, aby kierunek wibratora i koherera tworzył ze środkiem blachy kąt 45°, wywołuje się dzwonienie, przy innym zaś położeniu blachy dzwonek milczy (kąt odbicia fal = kątowi padania).

4) Pomiędzy zwierciadła równolegle wstawia się wielki pryzmat ze smoły, krawędzią do góry i równolegle do osi zwierciadeł; dzwonek nie działa. Skoro pryzmat zostanie cokolwiek uniesiony, zaczyna się dzwonienie (załamanie fal elektromagnetycznych).

5. Fale stojące. Doświadczenie Lechera (1890). Do biegunów induktora włącza się wibrator oraz kondensatory PQ i RS, od tych zaś prowadzą dwa druty izolowane i wyprężone równolegle, jak wskazuje rys. 715. W ten sposób po drutach przebiegają naboje o znakach zmiennych, wytwarzając w nich fale elektromagnetyczne. Można je wykryć rezonatorem Hertza albo łatwiej rurką Geisslera, ustawioną wpoprzek drutów, na końcach M i N: rezonator daje iskierki, a rurka świeci. Stąd wniosek, że istnieje tu stała różnica napięć elektrycznych, zatem wzdęcie *stojącej fali elektrycznej*; powstaje ona przez interferencję fal, odbitych od końców M i N, z falami, nadbiegającemi od wibratora (por. § 74, art. 5). Zachodzi więc podobieństwo do drgań powietrza w piszczałce otwartej (rysunek 450); drgania tam jednak są podłużne, drgania zaś elektryczne są poprzeczne, jak wynika z położenia rezonatora względem drutów.



Rys. 715. Stojące fale elektromagnetyczne.

Można tą drogą oznaczyć długość fali. Skoro oba druty złączono trzecim poprzecznym, czyli mostkiem K, a rurka Geisslera przestaje świecić, przesuwa się mostek dalej, aż rurka znów zaświeci; wtedy mostek znajduje się na węźle fali stojącej, gdzie niema żadnego napięcia. Za przesunięciem rurki ku mostkowi światło jej gaśnie, dalej znów się zjawia; miejsca zgaśnięcia odpowiadają węzłom, miejsca świecenia wzdęciom fali elektrycznej; odległość dwu węzłów wynosi $\frac{1}{2}$ długości fali.

Kondensatory PQ i RS, zmieniając pojemność wibratora, służą do wytworzenia fal dość silnych, lecz krótkich, aby ich kilka zmieściło się na długości drutów. Jeżeli np. węzły przypadają co $1\frac{1}{2}$ metra, długość fali=3 m, to liczba drgań elektrycznych, wedle wzoru ogólnego

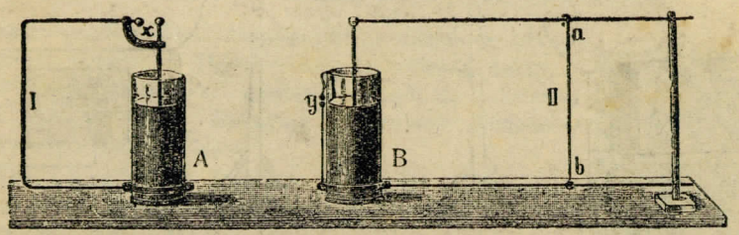
$$n = c/\lambda \text{ (§ 76, art. 5), gdzie } c = 300\,000\,000 \text{ m/sek, } \lambda = 3 \text{ m,}$$

wynosi 100 000 000 na sekundę.

Wraz z falą elektryczną przebiega wzdłuż drutów fala magnetyczna; pierwszą wywołują zmiany napięcia prądów przebiegających, drugą zmiany natężenia. Można sprawdzić przez świecenie rurki lub iskrzenie rezonatora, oraz położenie tegoż, że obie fale są przesunięte względem siebie o $\frac{1}{4}$ okresu, t. j. węzłom jednej odpowiadają wzdęcia drugiej, oraz że drgania zachodzą w płaszczyznach wzajemnie prostopadłych do siebie. Tworzą one razem całokształt fali elektromagnetycznej.

6. Rezonans elektryczny. Gdy fale elektromagnetyczne trafiają przewodnik o wymiarach odpowiednich, t. j. taki przewodnik, którego okres drgań własnych zgadza się z okresem fal działających, wywołują w tym przewodniku drgania elektryczne; ujawnia się to iskrzeniem w rezonatorze, albo zmianą przewodnictwa w koherere.

Przyrząd odpowiadający na fale określonej długości, jest dostrojony elektrycznie Można takie dostrojenie osiągnąć przez zmianę długości drutów, wtrącenie kondensatorów i t. p.



Rys. 716. Rezonans elektryczny.

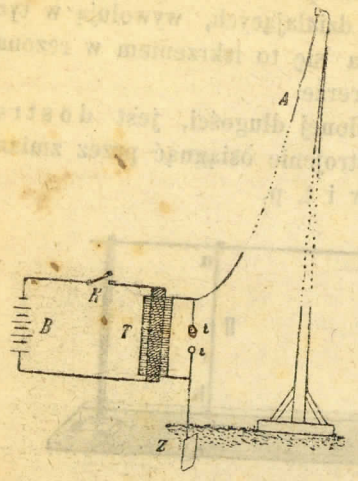
Doświadczenie Lodge'a (1890, rys. 716). Dwie jednakowe butelki lejdejskie ustawia się blisko siebie. Każda butelka posiada ramkę z drutu: A stałą, B przesuwaną. Skoro butelka w x wyładowuje się iskrą, ukazuje się iskra i w maleńkiej przerwie y rezonatora, połączonego z okładkami drugiej butelki; ułatwia się powstawanie iskierek y, zmieniając wielkość II ramki przesuwaniem drutu ab. Dostrajanie takie jest konieczne ze względu, że niepodobna zbudować dwu butelek o pojemności ściśle jednakowej.

Porównanie. Rezonans akustyczny dwu kamertonów (rys. 442).

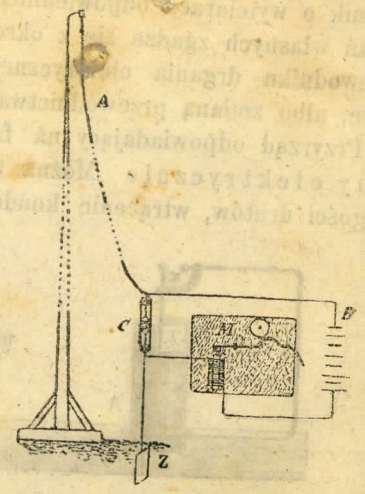
7. Telegraf bez drutu, czyli **telegraf iskrowy** (Marconi 1897), przesyła znaki telegraficzne za pomocą fal elektromagnetycznych. Główną jego część stanowi na jednej stacji iskiernik czyli wibrator, zasilany wyładowaniem silnego induktora, na drugiej koherer, połączony z przyrządem telegraficznym.

Stacja nadawcza (rys. 717) zawiera stos B, cewkę Ruhmkorffa T z iskiernikiem ii oraz kluczem K. Stacja odbiorcza (rys. 718) mieści koherer C, przyrząd Morsego M i stos B, włączone w jeden obwód.

Póki niema iskier w ii, koherer nie przepuszcza prądu i aparat M stoi. Przy zamknięciu K, w ii ukazują się iskry, a wytworzone stąd fale elektromagnetyczne trafiają opiłki; prąd przechodzi przez nie i przyrząd M robi znak na taśmie. Po ustaniu prądu w K opiłki zachowują swe przewodnictwo; należy więc je wstrząsnąć, aby powróciły do stanu pierwotnego. Zadanie to spełnia sam przyrząd telegraficzny, za pomocą odpowiedniego przerywacza (pominiętego na rysunku). Przy następnym naciśnięciu klucza K ma miejsce nowy znak w M, zarazem wstrząśnienie rurki i t. d.



Rys. 717. Stacja nadawcza.



Rys. 718. Stacja odbiorcza.

Wysokie słupy z drutem A na obu stacjach, t. zw. *anteny*, mają na celu wzmocnienie fal i dostrojenie elektryczne koherera do długości fali (długość drutu $= \frac{1}{4}$ fali), zarazem potęgują czułość przyrządów, zwłaszcza przy odpowiednim połączeniu z ziemią. Na wielkich stacjach antenny składają się z potężnych pęków drutu, rozpiętych na rusztowaniu w kształcie parasola (Nauen pod Berlinem) albo kosza (Poldhu w Kornwalji); wysokość ich dochodzi 200 m, podstawa zajmuje kilkanaście hektarów. Przesyłają one depesze iskrowe aż do Afryki i Ameryki; na morzu donośność jest daleko większa, niż na lądzie, przyczym ruch statku bynajmniej nie przeszkadza. Dostrojenie elektryczne przyrządów nie daje się osiągnąć dokładnie, tak iż koherer odpowiada na rozmaite fale i umożliwia przejmowanie depesz.

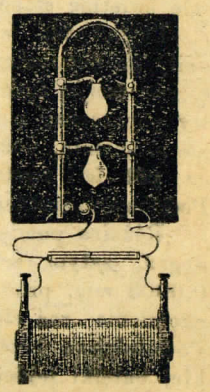
8. Prądy częstozmienne czyli **prądy Tesli** (1890), dokładniej „prądy o wysokim napięciu i częstej zmienności" powstają przy wyładowaniu cewki Ruhmkorffa lub dynamomaszyny o prądach zmiennych przez transformator odpowiednio urządzony, przyczym w obwodzie cewki jest iskiernik, połączony z kondensatorem.

Prądy Tesli polegają na własności iskry, że składa się ona z mnóstwa wyładowań częściowych; jeżeli więc te wyładowania iskrowe przechodzą przez nowy transformator z iskiernikiem, częstość wyładowań wzrasta niezmiernie, a napięcie przytym potęguje się odpowiednio do stosunku zwojów w transformatorze.

Stąd pochodzą odrębne własności prądów częstozmiennych. Nie przenikają one w głąb przewodników, ale spływają prawie po ich powierzchni, podobnie jak zmiany temperatury dają się tym mniej odczuwać wewnątrz przewodników, im są częstsze. W rozgałęzieniach prądy Tesli przechodzą nie w stosunku do ich oporu, ale zależnie od samoindukcji, zatym i od postaci przewodnika. W polu częstozmiennym, t. j. koło biegunów transformatora wtórnego, rozpalają się żarówki, świecą rurki Geisslera i Crookesa bez przewodników.

Napięcie prądów Tesli dochodzi kilku miljonów woltów, częstość przerw do 100 miljonów na sekundę. Iskry, bijące z transformatorów, zasilanych prądnicą o kilku tysiącach koni parowych, dosięgają 17 metrów długości i przypominają istne piorany.

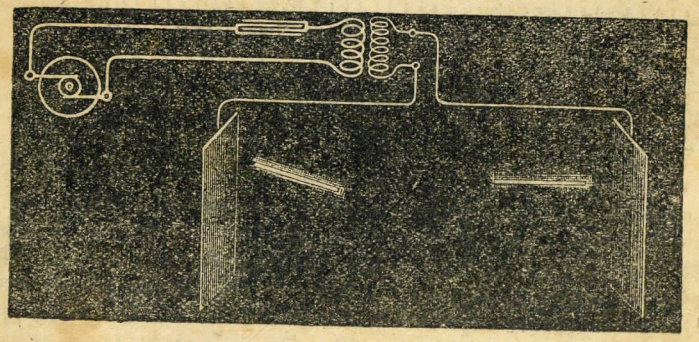
Doświadczenia Tesli. 1) Zwój drutu lub kabłąk miedziany (rys. 719), włączony do obwodu iskiernika z kondensatorem, okazuje tak silną samoindukcję, że przeważa ona opór żarówek, włączonych równolegle, i prąd idzie głównie przez żarówki. Kabłąk stawia *opór pozorny* czyli stanowi *zawadę* elektryczną (por. § 117, art. 4).



Rys. 719. Opór pozorny.

2) Jeżeli w doświadczeniu poprzednim zamiast kabłąka włączymy do biegunów Ruhmkorffa cewkę główną transformatora, możemy za bieguny cewki wtórnej ująć rękoma, bez uczucia wstrząśnień elektrycznych, chociaż napięcie może wynosić miljon woltów. Prądy Tesli przenikają w głąb ciała tym mniej, im są częstsze.

3) Końcówki wtórne transformatora o prądach częstozmiennych, połączone dużymi blachami (rys. 720), wytwarzają pole elektromagnetyczne, w którym wyładowuje się tyle energji, że świeci w nim każda rurka lub bańka szklana, zawierająca jakiś gaz rozrzedzony; przytym prawie się nie rozgrzewa: drgania elektryczne przechodzą w drgania świetlne. Stąd nazwa *zimne światło*.



Rys. 720. Zimne światło.

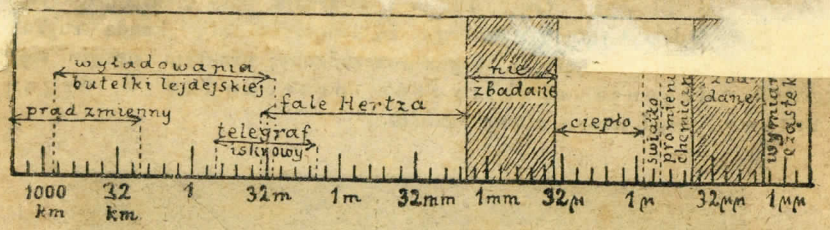
Doświadczenie Thompsona. Na ustawiony pionowo prosty elektromagnes o prądzie zmiennym, bądź przerywanym sposobem Wehnelta (rys. 655), nakłada się obrączkę miedzianą; ulega ona ciągłemu odpychaniu, tak iż unosi się w powietrzu. Wskutek bowiem indukcji powstają w obrączce prądy przeciwne głównemu. Jednocześnie obrączka mocno się rozgrzewa skutkiem prądów wirowych (§ 117, art. 5).

9. Znaczenie teoretyczne fal elektromagnetycznych. Szybkość fal elektromagnetycznych, równa szybkości światła, sposób rozchodzenia się w przestrzeni, odbicie, załamanie, interferencja i inne właściwości każą przypuszczać, że istnieje związek przyczynowy między światłem i elektrycznością; fale świetlne stanowią szczególny rodzaj fal elektromagnetycznych.

Pogląd ten wypowiedział Maxwell i uzasadnił matematycznie, a stwierdziły go doświadczenia Hertza. Odtąd przyjęła się w nauce *elektromagnetyczna teorja światła*: wzdłuż promienia świetlnego rozchodzi się ruch falowy poprzeczny natury elektromagnetycznej, t. j. cząstki, leżące na promieniu, doznają zmian elektrycznych i magnetycznych: w odstępach co pół fali występują kolejno przeciwne potencjały (por. § 97, art. 2). Podobny charakter ma promieniowanie cieplne i wogóle energja promienista.

Różnica pomiędzy falami światła, ciepła i elektryczności polega na ilości drgań, zatym na długości fali: promienie światła posiadają fale najdłuższe 0,0008 mm, promienie cieplne czyli pozaczerwone dochodzą do 0,05 mm, promienie zaś elektryczne Hertza zaczynają się przy długości fali 3 mm. Powolniejsze jeszcze drgania eteru, czyli fale dłuższe, wytwarza iskra zwykłej butelki lejdejskiej, gdzie długość fali mierzy się na kilometry, wreszcie prąd zmienny dynamomaszyny, gdzie wahania elektryczne mają długość setki lub tysiąca kilometrów.

Następująca tabelka daje zestawienie fal eteru wszelkiej poznanej dotąd długości i rodzaju, czyli całkowite *widmo elektromagnetyczne* Lebiediewa.



Rys. 722. Skala długości fal eteru.

Na dolnej linji poziomej podano długości fal oktawami, t. j. każda działka oznacza długość podwójną względem sąsiedniej prawej.

Pomiędzy falami elektrycznymi a ciepłem i światłem istnieje obecnie przedział dość znaczny: gdyby udało się wytworzyć drgania elektryczne o częstości 60 razy większej od fal Hertza, powstałoby ciepło promieniste, a przy jeszcze większej częstości powstałoby światło. Do osiągnięcia takiej bezpośredniej przemiany elektryczności na światło dąży technika współczesna (Tesla).

§ 122. Promieniotwórczość.

1. Materje promieniotwórcze. Niektóre pierwiastki chemiczne oraz ich związki są siedliskiem szczególnego promieniowania, które wzbudza fluorescencję, czerni kliszę fotograficzną, przenika ciała nieprzezroczyste, nie załamuje się i t. p., a nadto wywiązuje dużą ilość ciepła.

Własność tę, zwaną *promieniotwórczością* (radjoaktywnością), wykrył Becquerel w rudzie uranowej; stąd nazwa *promienie Becquerela* (1896). Następnie zauważono ją w związkach toru (Schmidt 1898), zwłaszcza zaś w preparatach *radu* (Piotr Curie i jego żona Marja ze Skłodowskich, 1898).

W bardzo słabym stopniu promieniotwórczość jest powszechna w całej przyrodzie martwej; zdradza ją mnóstwo minerałów i wód, zwłaszcza źródlanych.

Co do istoty promieniotwórczości pt. § 123.

2. Własności radu. Czystego radu, t. j. w stanie metalicznym, dotąd nie udało się otrzymać; natomiast oznaczono jego stanowisko śród pierwiastków, jako metalu zbliżonego do baru. Widmo radu zawiera kilka linji wyraźnych, po których można go wykryć.

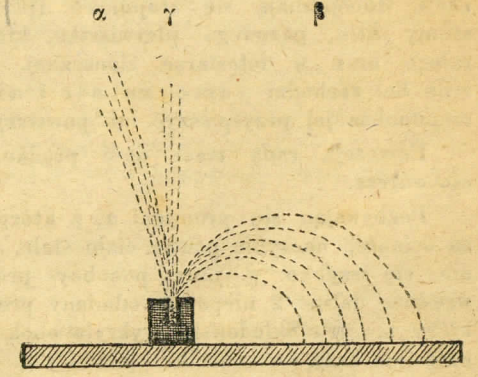
Związki radu wywiązują stale ciepło, tak iż temperatura ich jest o 2° lub 3° C. wyższa od otoczenia. Obliczono, że 1 g radu wytwarza na godzinę około 100 kalorji, przyczym nie dostrzeżono dotąd osłabienia tej działalności z biegiem czasu. Poza tym związki radu wydają słabe światło, w rodzaju fosforescencji, bez obcego naświetlania.

Rad występuje w ilościach tak znikomych, że z tysiąca kg najobfitszej rudy (smółki uranowej) p. Curie-Skłodowska otrzymała ¼ grama radu w postaci bromku radowego ($Ra\,Br_2$). Promieniowanie radu w najlepszych preparatach jest 1 800 000 razy silniejsze niż uranu.

3. Rodzaje promieni radowych. Umieszczając preparat radowy w rurce ołowianej, u spodu zamkniętej, aby nadać promieniowaniu określony kierunek, można za pomocą silnego magnesu wyodrębnić 3 rodzaje promieni, które według Rutherforda oznaczono literami α, β, γ (rys, 723).

Promienie α odchylają się mało, ulegają znacznemu osłabieniu w powietrzu, a zatrzymaniu w najcieńszych nawet blaszkach metalowych; posiadają dodatni nabój elektryczny, jonizują silnie powietrze.

Właściwości te oraz szybkość promieni α, znacznie mniejsza niż światła, każą przypuszczać, że promienie α w istocie nie różnią się od anodowych (§ 120); stanowią prąd jonów dodatnich, o masie 2 razy większej od atomu wodoru.



Rys. 723. Rozdział promieni radu.

Spintaryskop Crookesa daje możność ocenienia względnej promieniotwórczości tych promieni; polega na świeceniu blendy cynkowej pod ich wpływem. Warstwa blendy, widziana przez lupę w ciemnym pudełeczku, zawierającym preparat radowy, iskrzy się w sposób szczególny: pomiędzy pyłkami blendy ukazują się mikroskopijne iskierki, które zdradzają częstość uderzeń promieni α.

Promienie β odchylają się w polu magnetycznym bardzo znacznie i w stronę przeciwną, względem α; przenikają łatwo powietrze, jonizują je słabo; wywołują fluorescencję i działają fotograficznie; posiadają ujemny nabój elektryczny.

Szybkość tych promieni równa się prawie szybkości światła. Promienie β więc nie różnią się od katodowych (§ 120); stanowią prąd elektronów (pt.), których masa stanowi zaledwie $\frac{1}{1800}$ masy atomu wodoru.

Promienie γ nie ulegają wcale odchyleniu i posiadają zdolność przenikania wszelkich ciał, nawet grubych płyt metalowych. Wykryć je najłatwiej na zasadzie fluorescencji, jaką wzbudzają; natomiast okazują słabe działanie jonizujące i fotograficzne.

Promienie γ przypominają promienie Roentgena i powstają zapewne w sposób podobny, t. j. przez spotkanie promieni β z materją otaczającą.

Zresztą w każdym z trzech rodzajów promieni występują ich właściwości w rozmaitym stopniu, jak to widać już z niejednakowego odchylenia np. wiązki γ (podobnie jak w widmie świetlnym istnieją promienie o różnym załamaniu, barwie, jaskrawości, działaniu cieplnym, chemicznym).

4. Emanacja. Związki radowe wywiązują, obok promieni, pewną materję gazową, zwaną *emanacją*; jest to gaz promieniotwórczy (zwany także *emanem*), mianowicie wydziela obficie promienie α, które jonizują powietrze i samą emanację, przyczym świeci ona fosforycznie.

Emanacja daje się porwać prądem powietrza, przechodzi wraz z nim przez materje wybitnie dziurkowate, jak wata, pianka, przyczym nie pozbywa się przez to promieniotwórczości. Za oziębieniem do — 150° skrapla się i tą drogą daje się oddzielić od innych gazów. Chemicznie zachowuje się zupełnie obojętnie, t. j. nie podlega działaniu żadnych odczynników.

5. Przemiana pierwiastków. Jony, stanowiące promienie α radu i emanacji, zobojętniają się stopniowo (pt. „Elektrony") i zamieniają się na atomy *helu*, gazowego pierwiastka, który poznano oddawna w wielu minerałach oraz w fotosferze słonecznej. Taka przemiana radu na emanację i na hel zachodzi samorzutnie i niezależnie od wpływów obcych: niepodobna jej przyśpieszyć lub powstrzymać.

Emanacja radu traci dość prędko, sama przez się, własności promieniotwórcze.

Pozbywając się promieni α, z których powstaje hel, emanacja zostawia na ścianach naczynia pewne ciało stałe, zwane radem A; produkt ten zmienia się szybko w inny podobny produkt, rad B, ten zaś w rad C, wreszcie dalsze 2 niepewne odmiany prowadzą do powstawania radu F, który p. Curie-Skłodowska wykryła obok radu w rudzie uranowej i poczytywała na razie za odrębny pierwiastek *polon* (do takich czasowych odmian radu wypada prawdopodobnie zaliczyć t. zw. radjo-tellur, radjo-ołów, radjo-bizmut, otrzymane przez różnych badaczów z rud promieniotwórczych).

W kilku innych pierwiastkach wykryto podobne przemiany, emanację swoistą i produkty wtórne, np. toru, uranu, zresztą mniej trwałe.

Tak więc niektóre pierwiastki chemiczne ulegają zmianom; każdy z nich posiada pewien okres trwałości, co do którego pierwiastki różnią się ogromnie (Rutherford).

Epokowe to odkrycie nie obala poglądu na istotę pierwiastków, jako materji nierozkładalnych środkami fizycznymi i chemicznymi; nie pozwala też przypuszczać, aby można było dowolnie zmieniać jeden pierwiastek w drugi (dążenie alchemji). Pierwiastki mogą tylko ulegać zmianom naturalnym, stopniowemu jakby rozwojowi, czyli ewolucji. Nie zmienia się również zasada niezniszczalności materji, którą należy rozumieć ilościowo, t. j. że ogólna ilość materji jest stałą, pomimo wszelkich przemian, czy to w oddziaływaniu wzajemnym obcych pierwiastków (zwykłe reakcje chemiczne), czy też przetwarzaniu wewnętrznemu tego samego pierwiastka (reakcje promieniotwórcze).

6. Rozpad atomów promieniotwórczych. Działanie promieniotwórcze nie zależy bynajmniej od rodzaju związków, w jakich znajduje się rad lub inny pierwiastek promieniotwórczy; zależy ono tylko od ilości samego pierwiastka. Stąd wniosek, że wydzielanie promieni i materji wtórnych odbywa się w samych atomach, które się częściowo rozpadają, tworząc nowe atomy, np. z radu atomy emanacji i helu.

Odkrycia rozpadu atomów nie obala atomistyki chemicznej, w której rozumieniu atom stanowi najmniejszą część materji, niepodzielną środkami chemicznymi, t. j. nie ulegającą zmianom wewnętrznym przy jakichbądź reakcjach chemicznych. Natomiast upada pojęcie atomów, jako najmniejszych części materji, na jakie wogóle ona może się rozpadać. Obecny rozpad atomów jest objawem naturalnym, samorzutnym, zachodzi wewnątrz atomów, bez udziału odczynników obcych.

Ze skutków promieniotwórczych można wnosić o względnej ilości danego pierwiastka. Jeżeli więc promieniotwórczość słabnie w pewnym stosunku, odpowiednia ilość atomów tego pierwiastka ulega rozpadowi. Przy badaniach ciał promieniotwórczych co do ich trwałości przyjęto za normę *okres półrozpadu*, czyli czas, w ciągu którego energja promieniowania spada do połowy.

Do badania promieniotwórczości służy bardzo czuły elektrometr, nabity pewną ilością elektryczności; promienie badanego ciała jonizują powietrze i stąd rozbrajają elektrometr mniej lub więcej szybko, zależnie od obfitości promieni. Jest to metoda tak subtelna, że wykrywa np. ilości radu, niedostępne dla analizy spektralnej.

7. Początek i koniec radu. Rad rozpada się do połowy w ciągu mniej więcej 2000 lat. Wynika stąd, że rad obecnie zawarty w ziemi nie mógł istnieć od początku utworzenia ziemi, ale musiał powstać z innego, trwalszego pierwiastka i z nim tylko razem może występować. Tym pierwiastkiem musi być uran.

Istotnie, w minerałach, zawierających uran, występuje zawsze rad, i to w stosunku stałym, mianowicie 1 : 2 630 000 (Boltwood). Stosunek tych dwu pierwiastków uregulował się tak w ciągu wieków, że ilość radu, ulegająca rozpadowi, odtwarza się znów z uranu.

Z radu powstaje hel, obok całego szeregu produktów emanacji; w ten sposób rad stanowi jakby ogniwo łączne w rozwoju pierwiastków, już dawniej poznanych jako niezależne i zgoła niepodobne do siebie: uran-rad-hel.

8. Energja radu. Zasób energji, nagromadzonej w radzie, jest tak wielki, że wszelkie inne źródła energji w porównaniu są znikome; słowem, rad jest najpotężniejszym siedliskiem energji na świecie. Doświadczenie wskazuje, że ciepło, wyzwalane z grama radu na sekundę $=\frac{1}{15}$ kalorji, czyli odpowiada sprawności $\frac{1}{6}$ konia mechanicznego; że zasób ten maleje ustawicznie, ale tak wolno, że wynosi on jeszcze po dwu tysiącach lat połowę tej wartości, t. j. w okresie półrozpadu.

Porównanie ze spaleniem 1 g wodoru w tlenie wykazuje, że rad wydaje miljon razy więcej ciepła.

Miarę energji radu stanowi głównie ciepło, jakie on wyzwala; inne bowiem rodzaje energji w promieniach α, β, γ są nieznaczne. Ciepło radu pochodzi z przemiany energji kinetycznej promieni α, które są najbardziej energiczne, a ulegają pochłonięciu przeważnie w masie radu. Przemianie tej towarzyszy rozpad atomowy radu.

9. Zastosowania materji promieniotwórczych i rola w przyrodzie. 1) Działanie fotograficzne radu, podobne do działania promieni Roentgena, może służyć do zdjęć czyli radjografji; jest ono jednak słabsze.

2) Zbliżone do ciała preparaty radowe działają na skórę, wywołując stan zapalny, a nawet rany trudne do uleczenia. Natomiast dają się z korzyścią stosować w leczeniu chorób skórnych, wilka, raka. Promienie radu zabójcze są dla wielu bakterji.

3) Obecności materji promieniotwórczych w wodach mineralnych przypisują skutki lecznicze wielu źródeł.

4) Zawartość materji promieniotwórczych w glebie i morzach, a stąd jonizacja powietrza, ma związek z elektrycznością atmosferyczną. Powietrze atmosferyczne zawiera stale pewną ilość emanacji, i to tym więcej, im mocniej jest zjonizowane (Elster i Geitel).

5) Na ciepło wewnętrzne ziemi, zatym i objawy wulkaniczne, może mieć wpływ energja zawartych w niej materji promieniotwórczych.

6) Ciepło słoneczne ma związek prawdopodobny z promieniotwórczością. Radu wprawdzie dotąd na słońcu nie dostrzeżono; natomiast jego produkt, hel, występuje tutaj tak wyraźnie, że wykryto go właśnie na słońcu (stąd nazwa, od „helios" = słońce), dopiero po niejakim czasie udało się wykazać i wydobyć hel z minerałów. Rachunek wyjaśnia, że gdyby w słońcu na każdy metr sześcienny przypadało tylko $3\frac{1}{2}$ g radu, pokryłoby to olbrzymią stratę ciepła, jaką słońce ustawicznie ponosi (Righi).

§ 123. Elektrony.

1. Elektrony. Przy elektrolizie wydzielają się równoważne ilości pierwiastków, oddając zawsze tę samą ilość elektryczności, mianowicie 96 540 kulombów na każdy atom gramowy (§ 115, art. 5). Każdy więc atom rzeczywisty pierwiastka jest związany z jednakowym nabojem elektrycznym, podobnie jak przed elektrolizą był związany np. z jednym atomem wodoru. Stąd można wnosić, że elektryczność składa się z pewnych minimalnych, już dalej niepodzielnych nabojów (ε) czyli *atomów elektrycznych*; otrzymały one nazwę *elektronów* (Stoney 1881).

Elektrony występują w wielu innych zjawiskach, jak żarzenie pewnych materji, naświetlanie promieniami pozafijołkowymi, wyładowanie iskrowe itp. Naboje ujemne mogą się oddzielać od atomów, t. j. elektrony ujemne mogą istnieć w stanie wolnym; prąd elektronów stanowi np. promienie katodowe, oraz promienie β materji promieniotwórczych. Elektronów dodatnich nie zdołano wyodrębnić. Stąd pod nazwą elektronów rozumiemy wyłącznie ujemne naboje elementarne, oddzielone od materji.

Rozwijająca się obecnie *teorja elektronowa* dąży do objaśnienia wszelkich zjawisk elektrycznych, wypierając teorję dwu rodzajów elektryczności, dodatniej i ujemnej. Upowszechnia się pogląd, że elektrony stanowią istotę elektryczności: istnieje tylko elektryczność ujemna, mianowicie w postaci niezmiernie małych nabojów, przywiązanych do atomów materji, lecz zdolnych oderwać się od niej. Dodatnia elektryczność w ciałach tłómaczy się odszczepieniem elektronów od atomów obojętnych. Jest to więc *atomistyczna teorja elektryczności.*

Poza tym, rola elektronów w dziedzinie światła, ciepła, magnetyzmu występuje coraz wyraźniej, w miarę postępu badań w chemji zaś rzuca nowe światło na istotę reakcji, a nawet na budowę materji.

2. Wielkość elektronów i masa pozorna. Chemja teoretyczna oblicza, że każdy atom gramowy zawiera około 10^{24} atomów rzeczywistych, np. 1 g wodoru zawiera 10^{24} atomów (Planck 1901). Ilość ta posiada w stanie jonu nabój 96 540 kulombów czyli $96\,540 \cdot 3 \cdot 10^9$ jednostek elektrostatycznych (*ES*). Stąd nabój 1 atomu, czyli wartość ε wynosi okrągło $3 \cdot 10^{-10}$ *ES*.

Odmienna metoda obliczenia (Thomson 1903) polega na własności elektronów, że skraplają dokoła siebie parę wodną; w polu elektrycznym zmienia się szybkość spadku tych kropelek, skąd można obrachować nabój każdej kropelki, zatym i elektronu. Sposób ten daje wyniki mało różniące się od poprzednich $\varepsilon = 3{,}4 \cdot 10^{-10}$ *ES*. Inne pomiary dały $\varepsilon = 3{,}1 \cdot 10^{-10}$ do $4{,}2 \cdot 10^{-10}$ *ES* (Perrin 1911). Wobec nieustalenia pierwszej liczby zatrzymujemy tu wartość $\varepsilon = 3 \cdot 10^{-10}$ *ES*.

Jak niesłychanie drobną jest ta wielkość, można pojąć np. stąd, że prąd elektryczny 1 ampera, czyli 1 kulomba na sekundę, przenosi 10^{19} elektronów; najsłabsze prądy, jakie można zauważyć tylko na galwanometrze, przenoszą 10^8 czyli 100 miljonów elektronów na sekundę.

Zamiast 96540 bierze 100 000 $= 10^5$ razy

$\frac{10^5 \cdot 3 \cdot 10^9}{10^{24}} = \frac{3 \cdot 10^{14}}{10^{24}} = 3 \cdot 10^{-10}$

Masę elektronów można obliczyć ze stosunku ich naboju ε do poszukiwanej masy m. Stosunek ten ε/m oznacza się doświadczalnie z odchylenia, jakiego doznają elektrony, np. promienie katodowe, w polu magnetycznym; wynosi on średnio $5{,}5 \cdot 10^{17}$ *ES*. Ponieważ dla jonu wodoru, o masie M, stosunek: $\varepsilon/M = 3 \cdot 10^{-10} : 10^{-24} = 3 \cdot 10^{14}$ *ES*, wypada:

$$\frac{\varepsilon}{m} : \frac{\varepsilon}{M} = \frac{5{,}5 \cdot 10^{17}}{3 \cdot 10^{14}}$$

czyli $m : M =$ okr. $\frac{1}{1800}$, t. j. masa elektronu stanowi około $\frac{1}{1800}$ masy atomu wodoru.

Z doświadczeń wynika, że stosunek ε/m zmienia się niewiele w rozmaitych warunkach; np. gdy szybkość elektronów wzrasta o 14%, wartość ε/m zmniejsza się przeszło 2 razy. Ponieważ nabój minimalny ε, czyli atom elektryczny ma wartość stałą, zmienia się m czyli masa elektronu; nie może to więc być masa rzeczywista, której zasadniczą cechą jest stałość, ale *masa pozorna*, t. j. czynnik, odgrywający rolę masy.

3. Elektronowa teorja materji. Wszystkie pierwiastki zawierają elektrony. Można te elektrony odszczepić różnymi środkami, jak światłem pozafijołkowym, wyładowaniem elektrycznym, rozżarzeniem, jako też przez rozpad atomowy ciał promieniotwórczych. Różnice między pierwiastkami można objaśnić liczbą, układem i ruchem elektronów wewnątrz atomów.

Każdy atom składa się z wielkiej stosunkowo części, dodatnio elektrycznej, z którą jest związana ruchomo pewna liczba elektronów. Nabój dodatni tej wielkiej części jest wielokrotnością ujemnego naboju elektronu, tak iż zobojętnia się odpowiednią ilością elektronów. Tracąc elektrony, atom staje się jonem dodatnim; przyłączenie zaś elektronów do atomu obojętnego czyni z niego jon ujemny. Masa atomu nie zmienia się w sposób wyraźny od przyłączenia lub straty elektronów, gdyż te ostatnie mają niklą masę w porównaniu z atomem.

Materja składa się z cząstek, a te z atomów o nabojach elektrycznych; zatem materja nie istnieje bez elektryczności. Jednakże elaktrony, istotne składniki materji, posiadają masę zmienną w polu magnetycznym; nie mają więc one masy rzeczywistej, tylko masę elektromagnetyczną, masę pozorną.

4. Elektronowa teorja przewodnictwa. a) W przewodnikach stałych, metalach, elektrony są wolne pośród atomów i nadzwyczaj ruchliwe, tak iż pod wpływem siły elektrowzbudzającej pędzą w przewodnikach z wielką szybkością (aż do 750 m/sek, Lecher 1902). Elektrony, jako niepomiernie drobne w porównaniu z atomami, a tym samym i z porami międzycząstkowymi, przenikają je z łatwością, podobnie jak przy osmozie gaz płynie przez dziurkowatą przegrodę. Metale więc są zawsze zjonizowane całkowicie, t. j. w całej masie. Rozgrzewanie przewodników pochodzi od ścierania się elektronów z materjalnymi częściami przewodnika.

b) W przewodnikach płynnych, elektrolitach, elektrony są związane z atomami i posuwają się razem z nimi (wędrówka jonów, § 115, art. 4); stąd ruch jest znacznie wolniejszy, niż w metalach. Płyny przewodzące są zjonizowane częściowo.

c) Przewodnictwo gazów, jakkolwiek bardzo nieznaczne, można wytłómaczyć obecnością jonów gazowych. Jeżeli gaz w pewnych warunkach więcej, w innych mniej przepuszcza wyładowania elektryczne, pochodzi to z rozmaitej, a wogóle słabej, chwilowej jonizacji. Każdy gaz traci zupełnie przewodnictwo, skoro przenika przez wąskie kanały, np. rurki metalowe, watę, piankę; pozbywa się on tu jonów.

Gaz daje się jonizować w sposób rozmaity: 1) działaniem wysokiej temperatury, np. w płomieniu, w zetknięciu z powierzchnią rozżarzoną; 2) światłem pozafijołkowym; 3) promieniami katodowymi, anodowymi, Roentgena; 4) działaniem ciał promieniotwórczych; 5) działaniem wyładowań elektrycznych.

Doświadczenia. Elektroskop rozbraja się: 1) za zbliżeniem do płomienia, do węgla rozżarzonego; 2) za naświetleniem lampą łukową; 3) za umieszczeniem przed rurką Roentgena; 4) w pobliżu soli radu, toru, uranu; 5) około biegunów maszyny elektrycznej.

5. Inne zastosowania teorji elektronowej. 1) Istota elektryczności i światła. Elektrony w stanie spoczynku wywołują zjawiska elektrostasyczne, elektrony w ruchu ciągłym wywołują prąd elektryczny; elektrony w ruchu drgającym wytwarzają zjawiska elektromagnetyczne, czyli światło.

2) Elektryzacja w zetknięciu i potarciu. Metale rozpadają się elektrycznie w rozmaitym stopniu. Przy zetknięciu więc część elektronów przechodzi z jednego metalu do drugiego, podobnie jak gaz w naczyniach połączonych o nierównym ciśnieniu; stąd przeciwne naboje elektryczne, których oddziaływanie coraz wzrasta, aż wreszcie powstrzymuje przepływ elektronów, i pozostaje napięcie kontaktowe. Podobne zjawiska, tylko w słabszym stopniu, mogą zachodzić w nieprzewodnikach przy pocieraniu. W zetknięciu metalu z płynem, w którym sole tego metalu są rozpuszczalne, przechodzi do płynu część jonów dodatnich metalu; powstaje dodatni nabój płynu i ujemny metalu, które osiągają pewną granicę, stanowiąc napięcie elektryczne metalu (Nernst).

3) Termoelektryczność. Elektrony uchodzą z metalu stopniowo za ogrzewaniem. W razie spojenia dwu metalów przechodzi z jednego do drugiego prąd elektronów, zależny od napięcia kontaktowego. Zjawisko to możnaby porównać do dystylacji wody, gdyby parę prowadzono rurą przez oziębialnię znów do kotła.

4) Łuk woltaiczny. Z katody wyzwalają się obficie elektrony i, trafiając anodę, rozżarzają do wysokiego stopnia; stąd rozpylone cząstki materjalne trafiają nawzajem katodę, rozgrzewając ją, jako też łuk elektryczny, swą energją kinetyczną. Następstwem tych zjawisk jest większe zużycie anody; szybkość cząstek w pierwszej chwili oderwania od anody wynosi 2000 m na sekundę, zaraz jednak maleje wskutek tarcia o cząsteczki gazowe.

5) Iskra elektryczna, jako też błyskawica stanowi chwilowy łuk woltaiczny, przyczym utorowana droga przewodząca (rurka powietrzna) jest bardzo wąska. Zygzakowaty kształt iskier długich należy tłómaczyć nierówną jonizacją powietrza w miejscach dość odległych.

6) Promienie katodowe stanowią elektrony w ruchu po linji prostej,

7) Promienie Roentgena. Nagła zmiana szybkości elektronu, np. zatrzymanie, wytwarza w eterze falę elektromagnetyczną, podobnie jak uderzenie kamienia lub wody wywołuje falę głosową czyli huk, plusk; przytym elektron nie zatrzymuje się odrazu, ale po niejakich wahaniach, prędko słabnących, skąd fale eteru są nierówne. Miljardy elektronów trafiają antykatodę w ciądu sekundy; powstające tu więc promienie Roentgena stanowią szereg takich impulsów eterycznych. Okres każdego z drgań poszczególnych impulsu jest daleko krótszy, niż drgań świetlnych, zatym i fale są daleko krótsze, tak iż mieszczą się w granicach wielkości cząstek; dlatego promienie Roentgena nie załamują się ani odbijają.

8) Promieniotwórczość. Promienie α radu i innych ciał promieniotwórczych stanowią prąd jonów dodatnich; promienie β = prąd wolnych elektronów; promienie γ = promienie Roentgena = nieregularne fale elektromagnetyczne.

9) Przewodnictwo cieplne. Nie tylko bliski związek między ciepłem i światłem, ale i zależność między przewodnictwem ciepła w metalach a przewodnictwem elektrycznym każe przypuszczać, że ciepło polega nie na samym ruchu cząsteczkowym, ale i na ruchu wolnych elektronów.

10) Elektroliza. Przy wędrówce jonów w roztworze dążą one do elektrody, oddają tam swe elektrony, pozostawiając atomy chemiczne; elektrony zaś wstępują do obwodu, tworząc prąd elektryczny.

11) Reakcje chemiczne polegają na wymianie elektronów, to jest odszczepianiu ich od jednych atomów i przyłączaniu do innych. Wartościowość stanowi liczba wymienianych elektronów. Układ perjodyczny pierwiastków daje się zasadniczo wytłómaczyć układem i liczbą elektronów.

12) Elektryczność atmosferyczna. Powietrze jest zawsze słabym przewodnikiem elektryczności, wskutek obecności jonów. Górne warstwy powietrza jonizują się przez wchłanianie promieni pozafijołkowych, przyczym z powodu silnego rozrzedzenia jony są tu ruchliwsze, sprawiają znacznie większe przewodnictwo, niż w dolnych warstwach; tylko powietrze w pieczarach, piwnicach i wogóle powietrze wyssane z ziemi, jest bardzo zjonizowane, co się tłómaczy obecnością wszędzie w ziemi ciał promieniotwórczych. Atmosfera zawiera średnio 700 jonów w 1 cm^3. Potencjał atmosfery rośnie w miarę wyniesienia, średnio około 150 woltów na 1 metr w warstwach niższych. Pole elektryczne atmosfery sprawia ciągłą wędrówkę jonów dodatnich na dół, ku ziemi, ujemnych zaś do góry.

Rozpraszanie elektryczności z ciał zachodzi przez jony, bądź przez podstawki zwilgocone lub niedokładnie izolujące, nie zaś przez parę wodną w powietrzu; powietrze suche stanowi przewodnik lepszy od wilgotnego.

p.5322