Z DRUKARNI W. A. SZYJKOWSKIEGO, LWÓW, UL. ZIMOROWICZA 14 TEL. 7[illegible]

Dr. Fr. TOMASZEWSKI i A. M. KAWECKI

FIZYKA
I KRÓTKI RYS KOSMOGRAFJI

PODRĘCZNIK DLA GIMNAZJÓW
WYDZIAŁU HUMANISTYCZNEGO I KLASYCZNEGO

PRZYSTOSOWAŁ DO PROGRAMU GIMNAZJUM PAŃSTWOWEGO
KAROL CZAJKOWSKI

ZESZYT II

ZAWIERA
RUCH FALOWY, AKUSTYKĘ, OPTYKĘ, MAGNETYZM,
ELEKTRYCZNOŚĆ I KOSMOGRAFJĘ

LWÓW MCMXXVI
NAKŁADEM KSIĘGARNI NAUKOWEJ
POLSKIE TOW. PEDAGOGICZNE, LWÓW — M. ARCT, WARSZAWA
SPÓŁKA Z OGR. ODP.
LWÓW — DROHOBYCZ — RÓWNE

1. RUCH FALOWY.

§ 1 Ruch harmoniczny i drgający.

1 Poznaliśmy w I § 27*) **ruch kołowy** (Powtórzyć!)

Jeśli ciało o masie m obiega ruchem jednostajnym okrąg koła o promieniu r, w czasie T, to prędkość tego ruchu kołowego jest

$$\boxed{v = \frac{2\pi r}{T} = \omega r,}$$

gdzie $\omega = \frac{2\pi}{T}$ jest **prędkością kątową**.

Wtedy na to ciało musi działać siła **siła dośrodkowa**, zwrócona ku środkowi koła, której **przyśpieszenie** ma wartość **stałą,** ale jest zmienne co do kierunku

$$\boxed{a = \frac{v^2}{r} = 4\pi^2 \frac{r}{T^2} = \omega^2 r.}$$

2. Rozłóżmy teraz ruch kołowy na dwa ruchy składowe wzdłuż dwóch średnic koła, do siebie prostopadłych i rozważmy jeden z tych ruchów składowych, odbywający się po osi poziomej. Ruch ten, który jest r z u t e m r u c h u k o ł o w e g o n a ś r e d n i c ę k o ł a, nazywamy **ruchem harmonicznym**. (Ryc. 1 Ruch kołowy $ABCDA$, ruch harmoniczny $A'B'C'D'A'$ albo $OBODO$). Także prędkość i przyśpieszenie w ruchu harmonicznym będą rzutami przyśpieszenia w ruchu kołowym na tę samą oś poziomą. Gdy więc czas w ruchu kołowym zaczniemy liczyć od punktu A, to kąt $AOU = \phi = \omega t$, a wtedy

*) Oznaczenie I § 27, 3 należy rozumieć: Zeszyt I, § 27, ustęp 3.

w ruchu kołowym.

droga $s = vt = r\omega t = r\phi$,
prędkość (stała): $v = \omega r$,
przyśpieszenie (stałe) $a = \frac{v^2}{r}$ $\cancel{\omega^2 r}$; ωv

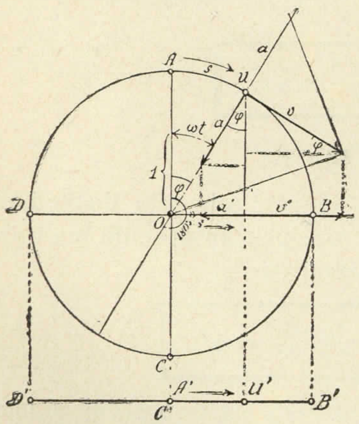
w ruchu harmonicznym

odchylenie (elongacja) · $s' = r \sin \phi = r \sin \omega t$,
prędkość (zmienna). $v' = v \cos \phi = \omega r \cos \omega t$,
przyśpieszenie (zmienne) $a' = -a \sin \phi = \omega^2 r \sin \omega t$.

Znak — w przyśpieszeniu pochodzi stąd, że wektor przyśpieszenia dośrodkowego a tworzy z promieniem początkowym OA (ryc. 1) kąt $180^0 + \phi$, a $\sin(180 + \phi) = -\sin \phi$.

3. Czy ruch harmoniczny może istnieć, jako ruch samoistny, nie będąc składowym ruchu kołowego?

Stosunek $\frac{a'}{s'} = -\frac{a}{r} = -\omega^2$ ma stałą wartość odjemną. Zatem przyśpieszenie w ruchu harmonicznym jest proporcjonalne do odchylenia od położenia środkowego i jest zawsze zwrócone do środka. Aby więc powstał ruch harmoniczny, musi być czynna siła proporcjonalna do odchylenia od położenia równowagi. Jest to **charakterystyka ruchu harmonicznego.**



Ryc. 1.

Przypomnijmy sobie (I § 36), że w obrębie granicy sprężystości wielkość odkształcenia jest proporcjonalna do siły działającej **(prawo Hoocke'a)**. Stąd wniosek, że wszelki ruch, odbywający się wśród działania sił sprężystości, odbywa się według praw ruchu harmonicznego. Ruchy takie nazywamy **drgającemi.**

4. Ruch po drodze *OBODO* nazywa się jednem **drgnieniem**, *T* jest **czasem drgnienia**, *r* największem odchyleniem albo **obszernością drgania (amplitudą)**. Chwilowy stan ruchu, określony kątem $\phi = \omega t$, przy znanym czasie drgnienia T, nazywamy **fazą**. Znając aplitudę r i czas drgnienia T, można obliczyć dla każdej

fazy ruchu drgającego odchylenie, prędkość i przyśpieszenie, używając odpowiednich równań ruchu harmonicznego.

Z równań tych wynika, że s', v' i a' przybierają te same wartości, gdy t wzrasta o T, $2T$, $3T$, czyli że te same fazy powtarzają się w równych odstępach czasu. Ruch drgający jest więc **ruchem okresowym**. Czas drgnienia T nazywamy także **okresem**.

Pytania:

1. Wymień znane ci rodzaje ruchów (jednostajny, jednostajnie zmienny, wahadłowy) i podaj, jak w każdym z nich zmienia się droga (odchylenie), prędkość i przyśpieszenie. Jak musi działać siła, aby każdy z tych ruchów mógł się odbywać?

2. Porównaj ruch wahadłowy z ruchem harmonicznym. Jaka jest charakterystyka obu ruchów? (I § 28, 1).

3. Uzasadnij na podstawie równań ruchu harmonicznego i zasad dynamicznych, dlaczego ruch harmoniczny nie jest jednostajnym (I § 15) dlaczego nie jest jednostajnie zmiennym (I § 16, 5 b), w których częściach jest przyśpieszony, w których opóźniony (I § 16, 5 a).

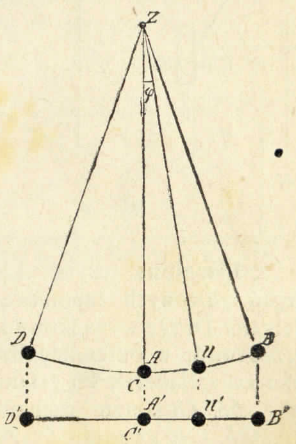
Ćwiczenia.

*1. Na obwodzie krążka gramofonu przytwierdź lichtarzyk (używany do oświetlania choinki) z żarzącym się węglem. Gdy krążek wprawisz w ruch obrotowy, ujrzysz koło, elipsę lub linję prostą, nakreśloną żarzącym się węglem, zależnie od tego, czy płaszczyznę krążka ustawisz prostopadle, ukośnie, czy równolegle do osi widzenia.

*2. Nad krążkiem poziomym z żarzącym się węglem, jak w ćw 1, zawieszam wahadło i dobieram jego długość tak, aby jeden obrót wypadał na dwa wahnienia wahadła. Zapomocą tego urządzenia sprawdź, że ruch wahadłowy odbywa się według praw ruchu harmonicznego, (Ryc. 2).

*3. Ruchy harmoniczne można składać w wypadkowy z innemi ruchami. Jaki otrzymasz wynik złożenia ruchu harmonicznego z ruchem postępowym jednostajnym o kierunku prostopadłym do kierunku drgania?

Do jednego końca dużych widełek stroikowych przyklej woskiem krótki drucik tak, aby był prostopadły do płaszczyzny drgania. Widełki utwierdź w ciężkim stojaku w położeniu poziomem tak, aby drucik końcem dotykał poziomego skrawka szyby szklanej, oprószonej proszkiem widłakowym. (Przed oprószeniem należy płytkę z lekka powlec waseliną i wytrzeć bibułą). Po pobudzeniu widełek do drgania (zapomocą korkowego młotka) przesuń

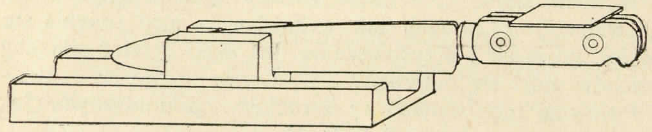


Ryc. 2.

płytkę w takim kierunku, aby koniec szczeci, dotykający jej, nakreślił na niej **linję falową**.

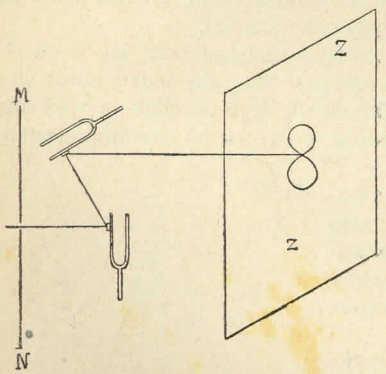
*4. Dwa ruchy drgające, do siebie prostopadłe, można złożyć w ruch harmoniczny złożony.

U rogu stołu przytwierdź do krawędzi dwa ślusarskie imadła, a w nich umocuj dwa noże kuchenne tak, aby były do siebie prostopadłe i aby rękojeść jednego z nich znajdowała się cokolwiek nad rękojeścią drugiego. (Zamiast imadła można użyć urządzenia, przedstawionego na ryc. 3. Nóż jest wciśnięty w klocek drewniany, który zapomocą smoły na gorąco przyklejony jest do żelaza, 30 *cm* długiego,

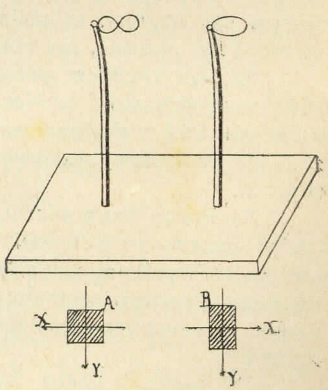


Ryc. 3.

kształtu litery C). Na końcu dolnej rękojeści przyklej lakiem szybkę szklaną w położeniu poziomem, na końcu zaś drugiej rękojeści przyklej drucik w położeniu pionowem i zbliż noże tak, aby drucik pewnie stykał się z szybką. Gdy szybka jest okopcona lub posypana proszkiem widłakowym, wtedy drucik wyrysuje na niej podczas drgania obu noży linję krzywą, wypadkową obu ruchuów drgających.



Ryc. 4.



Ryc. 5.

Lissajous (czytaj: Lisażu) podał (ryc. 4) sposób uwidocznienia drgań złożonych zapomocą widełek stroikowych, opatrzonych zwierciadełkami. Drogę wypadkową kreśli na białem tle Z promień słoneczny, który przez otwór w okiennicy MN wpada do ciemnego pokoju i odbija się od obu zwierciadełek ku ścianie.

*5. Złożonym ruchem mogą drgać pręty graniaste (ryc. 5). Gdy przekrój jest kwadratowy A, powstają za potrąceniem w kierunku X i Y drgania o jednakowym okresie; przy przekroju B o różnym okresie.

Gdy pręty kończą się połyskującemi główkami, oko widzi drogę wypadkową w kształcie połyskującej linji.

Zadania.

1 Gdy krążek gramofonu w ćw 2 odbywa 100 obrotów w 55·*sek*, jaka musi być długość wahadła, którego dwa wahnienia wypadają na jeden obrót krążka? (27,2 *cm*).

2. Oblicz energję kinetyczną E_k cząstki o masie m, poruszającej się ruchem harmonicznym o okresie drgania T i o amplitudzie r. Jaka jest największa, jaka najmniejsza wartoćć tej energji? (Według I § 32,1 $E_k = \frac{1}{2} mv'^2 = \frac{1}{2} m\omega^2 r^2 \cos^2 \omega t$).

3. Jaką pracę wykonywa się, wychylając cząstkę z położenia równowagi siłą P na odległość s' wbrew siłom sprężystości? (Patrz I § 34, ćw. 2).

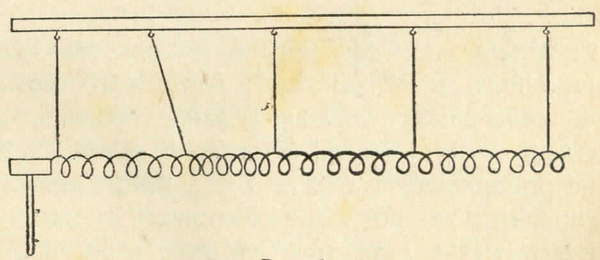
4. Oblicz energję potencjalną E_p cząstki drgającej. (Według I, § 33 i wyniku ćw. 3, $E_p = \frac{1}{2} Ps'$, $P = ma'$, $a' = \omega^2 r \sin \omega t$, $s' = r \sin \omega t$, $E_p = \frac{1}{2} m\omega^2 r^2 \sin^2 \omega t$. Znak opuszczono, ponieważ energja jest wielkością bezkierunkową).

5. Czy wyniki zadań 2 i 4 godzą się z zasadą zachowania energji? Jaka jest zatem energja ruchu drgającego? (Według I § 34 suma obu rodzajów energji ma w każdej fazie ruchu drgającego stałą wartość: $E_k + E_p = \frac{1}{2} m\omega^2 r^2$).

6. Wykreśl linję falową, jako wypadkową dwóch ruchów, pionowego, drgającego o $T = 12$ *sek*, $r = 6$ *cm* i poziomego postępowego o prędkości $c = \frac{2\pi}{T} = \frac{2\pi}{12}$ *cm/sek*. Jakie jest równanie tej linji wypadkowej? (Przyjąć $\pi = 3^1/_7$; kąt 2π odpowiada 360° Równanie ruchu drgającego $y = r \sin \frac{2\pi}{T} t$, ruchu postępowego $x = \frac{2\pi}{T} t$, zatem $y = r \sin x$. Wypadkowa jest **sinusoidą**).

§ 2. Ruch falowy w przewodniku linjowym.

1 W sprężystem ciele wywołuje przemieszczenie jednej cząstki zaburzenie równowagi wszystkich cząstek. Gdy zatem jedna cząstka pobudzona zostanie do ruchu drgającego, ruch ten udziela się coraz dalszym cząstkom. N p. ruch drgający udziela się coraz dalszym zwojom sprężyny (ryc. 6), gdy pierwszy zwój uderzeniem do drgań pobudzimy. Ruch, w ten sposób w całym układzie powstający, nazywamy **ruchem falowym**, a ogół cząstek, na które przenosi się



Ryc. 6.

ruch drgający w czasie jednego drgnienia, **falą**. Ciało, w którem odbywa się ruch falowy, nazywamy **przewodnikiem**.

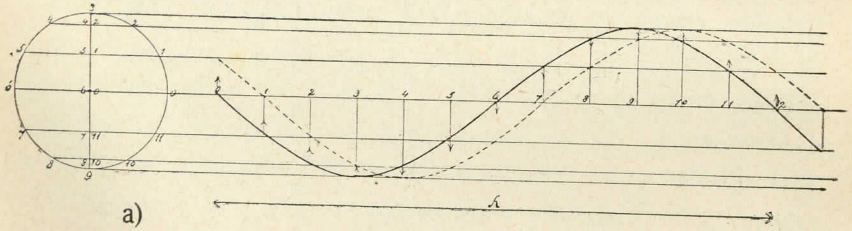
Na razie rozpatrujemy **przewodniki linjowe**, których cząstki ułożone są w linji prostej.

Fale mogą być **podłużne** lub **poprzeczne**. W falach podłużnych cząstki drgają w kierunku rozchodzenia się fal, w poprzecznych prostopadle do tego kierunku.

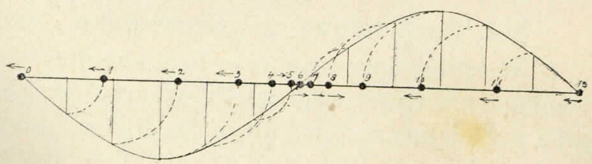
Poprzecznie drgają n. p. cząstki szarpniętej struny, podłużnie cząstki pręta, uderzonego młotem w kierunku jego długości.

2. **Fala poprzeczna**. Mając cząstki ułożone w linji prostej, pobudźmy początkową do drgania poprzecznego. Ruch ten przeniesie się do pierwszej cząstki sąsiedniej, od niej do drugiej, trzeciej i następnych. Wreszcie każda cząstka przewodnika linjowego odbywać będzie takie same drgania jak początkowa, z tą tylko różnicą, że ta sama faza pojawi się tem później, im dalej znajduje się cząstka badana od początkowej. (ryc. 7).

a)



b)



Ryc. 7

Przyjmijmy, że, gdy cząstka początkowa, oznaczona cyfrą 0 przechodzi przez położenie równowagi, cząstce 1-szej brakuje do położenia równowagi $\frac{1}{12}$ całego drgania, cząstce 2-giej $\frac{2}{12}$, cząstce 3-ciej $\frac{3}{12}$ i t. d., to jasne, że czątki 12, 24, 36,..., odległe od początkowej o λ, 2 λ, 3 λ,..., będą równocześnie z nią przechodziły przez położenie równowagi, a cząstki pomiędzy niemi leżące wykażą wszystkie możliwe położenia, różniące się od siebie o $\frac{1}{12}$ drgnienia i układać się będą w **linji sinusowej** (ryc. 7a.) Najmniejsze oddalenie dwóch cząstek, posiadających równocześnie tę samą fazę, nazywamy **długością fali** λ.

Po upływie $\frac{1}{12}$ czasu drgnienia wszystkie cząstki przewodnika linjowego wykazywać będą fazę o $\frac{1}{12}$ posuniętą, po $\frac{2}{12}$ czasu drgnienia fazę o $\frac{2}{12}$ posuniętą i t. d. Zatem powyższa sinusoida przesuwa się wzdłuż przewodnika linjowego z pewną prędkością c, a punkt jej O, mający w pewnej chwili fazę 0, przesunie się po przewodniku do cząstki 12, 24, 36, po czasie T, $2T$, $3T$, .., przebywając drogi λ, 2λ, 3λ, , zatem

$$\boxed{c = \frac{\lambda}{T} \text{ albo } \lambda = cT}$$

Gdy wprowadzimy tu zamiast okresu T **liczbę drgnień** (albo **częstość drgania)** N, otrzymamy, ponieważ $N = \frac{1}{T}$,

$$\boxed{c = \lambda N \text{ albo } N = \frac{c}{\lambda}.}$$

c nazywamy **prędkością przewodzenia fali**.

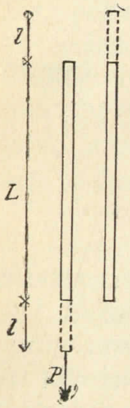
*Falowanie poprzeczne można okazać na przyrządzie, zwanym **falownicą**. Jest to szereg wahadeł równej długości, których płaszczyzna wahnień zabezpieczona jest zawieszeniem dwunitkowem, kulki ich zaś tworzą linję prostą. Gdy wahadła tak są ustawione, że wahać się mogą poprzecznie, wtedy zapomocą długiej linji odchyla się je wszystkie od położenia równowagi, a następnie wysuwając ruchem jednostajnym linję w kierunku poziomym, pobudza się je po kolei do ruchu wahadłowego. Powstaje w ten sposób **fala poprzeczna**. Fala ta przez powolną, równoczesną u wszystkich wahadeł zmianę płaszczyzny wahań może być zamieniona na falę podłużną.

3. **Fala podłużna**. Wynik opisanego doświadczenia można przedstawić rysunkiem, gdy wszystkie wychylenia cząstek fali poprzecznej obrócimy o kąt prosty, t. zn. wychylenia w górę położymy n. p. w lewo, a wychylenia w dół w prawo, (ryc. 7 b). Widzimy, że kulki, przedstawiające cząstki linji drgającej podłużnie, są w pewnych miejscach więcej skupione, niż w innych. W ciele więc, przez które przebiega fala podłużna, niema zmiany postaci, lecz następuje zmiana gęstości, naprzemian **zgęszczenie i rozrzedzenie**.

Położeniom równowagi cząstek w fali poprzecznej odpowiadają w fali podłużnej miejsca największego zgęszczenia lub rozrzedzenia. Cząstki poruszają się w częściach zgęszczonych w kierunku postępującej fali, a w częściach rozrzedzonych w kierunku przeciwnym.

Zgęszczenia i rozrzedzenia w fali podłużnej przesuwają się wzdłuż przewodnika linjowego z prędkością $c = \frac{\lambda}{T} = \lambda N$, gdzie λ jest długością fali czyli oddaleniem dwóch cząstek, posiadających tę samą fazę ruchu.

4. **Prędkość przewodzenia fal podłużnych.** Pomyślmy, pręt o długości L, przekroju q, z materjału, którego gęstość jest d, a moduł sprężytości E (I str 169, tabl. X), to zn. siła P (ryc. 8) powiększa jego długość o $l = \frac{1}{E} L . \frac{P}{q}$ (I § 36, ćw 2), przyczem siła $P = \frac{Eql}{L}$ wykonywa pracę (według I § 34, ćw 2) $P \frac{l}{2} = \frac{Eql^2}{2L}$. Gdy ustanie działanie siły, cząstki powracają do swego pierwotnego położenia, oddając swoją energję coraz dalszym cząstkom, a gdy fala po czasie t osiągnie drugi koniec pręta, okaże się tam wychylenie l w stronę przeciwną. Wynik jest taki, jakgdyby cały ten pręt o masie $m = qLd$ przesunął się w czasie t o długość l, to zn. z prędkością $\frac{l}{t}$, z czego oblicza się energję kinetyczną pręta drgającego $\frac{qLd}{2}\left(\frac{l}{t}\right)^2$, która równa się pracy, potrzebnej na odkształcenie pręta $\frac{Eql^2}{2L}$. Po uproszczeniu i podstawieniu, że $\frac{L}{t} = c$, otrzymujemy



Ryc. 8.

$$\boxed{c = \sqrt{\frac{E}{d}}.}$$

Prędkość przewodzenia fal poprzecznych w prętach zależną jest jeszcze od wymiarów i kształtu pręta, ale przy jednakowych wymiarach proporcjonalna do $\sqrt{\frac{E}{d}}$.

Prędkość przewodzenia fal poprzecznych w strunach jest od prędkości przewodzenia fal podłużnych znacznie mniejsza. W II § 7, ćw 2 stwierdzimy doświadczalnie, że prędkość ta $c = \sqrt{\frac{P}{\delta}}$, gdzie P oznacza siłę napięcia struny, δ zaś masę jednostki długości struny

Pytania.

1. Uzasadnij, że ruch falowy jest przeniesiem energji wzdłuż przewodnika. (Przewodnik może być materjalny, ale nie materja się w nim przenosi.

Głos przenosi się drutem telefonicznym, ciepło przewodami, doprowadzającemi prąd do żarówki. Czasem brak przewodnika materjalnego, n. p. dla światła).

2. Zastanów się, o ile ruch otrzymany na falownicy przedstawia rzeczywisty ruch falowy w przewodniku linjowym. (Ruch falowy powstaje w ośrodku sprężystym. Falownica tylko naśladuje ruch falowy).

3. Opisz powstawanie i rozchodzenie się fal na wodzie. W jakim kierunku drgają cząstki wody? W jakich kierunkach rozchodzą się fale? Jakie siły są czynne podczas falowania wody?

Ćwiczenia.

*1 U powały albo w górnej futrynie drzwi otwartych zawieś w oddaleniu od siebie 50 *cm* dwa zupełnie jednakowe wahadła o długości przynajmniej 2 *m*, których masy wahające się mają po 1 *kg*. Wahadła te są w połowie długości połączone nitką poziomą, która w środku swej długości obciążona jest ciężarkiem n. p. 50 *gr* Wpraw w ruch wahadłowy jedno wahadło. Przekonasz się, że drugie wahadło zaczyna wahać się coraz obszerniejszym ruchem w miarę, jak pierwsze wahadło traci swój ruch, aż wreszcie po pewnej liczbie wahnień pierwsze przestaje wahać się, a drugie waha się pełnym ruchem pierwszego. Natychmiast jednak następuje wymiana odwrotna, i trwa to tak długo, aż wskutek oporów ruchu wahanie obu wahadł zniknie zupełnie.

Mówimy że takie dwa wahadła są z sobą **sprzęrzone.** Gdy czasy wahnień (drgań) dwóch ciał z sobą sprzężonych są zupełnie zgodne, energja ruchu wahadłowego (drgającego) z jednego ciała przenosi się w zupełności na drugie.

*2. Powyższe doświadczenie zmień w ten sposób, że ciężarek 50-gramowy obciążający nitkę poziomą, zastąp cięzarkiem dwa razy większym, a potem dwa razy mniejszym. Jaki ma to wpływ na szybkość przeniesienia energji z jednego wahadła na drugie?

*3. Ułóż dwie rurki szklane obok siebie równolegle na desce poziomej tak, aby z nich utworzyła się rynienka, opadająca ku środkowi. (Rurki można odrobinę zgiąć w szerokim płomieniu). Ułóż w tak przygotowanej rynience pewną liczbę kulek stalowych, które stoczą się zawsze w najniższy punkt rynienki. Odsuwając teraz jedną lub więcej kulek na najwyższy punkt rynienki, to zn. na którykolwiek koniec, pozwalaj im staczać się na pozostałe i zapisz otrzymane wyniki, a) gdy jedna kulka stacza się i uderza o drugą równej wielkości, b) jedna na drugą mniejszą, c) na większą, d) jedna na kilka jednakiej wielkości, e) kilka na kilka innych tej samej wielkości, f) kilka mniejszych na równą liczbę większych i g) odwrotnie. (Powtórz I § 37 o zderzeniu się kul sprężystych).

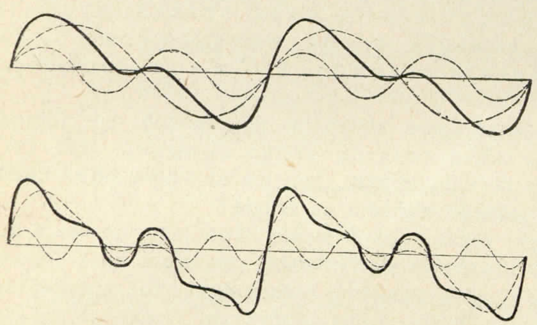
*4. Miękki drut mosiężny lub miedziany o grubości 2 *mm* nawija się na walec o średnicy 7 *cm* tak, aby otrzymeć 72 zwoje sprężyny. Na desce długości ponad 2,16 *m*, szerokości 10 *cm*, w odstępach po 3 *cm* wykrawa się karby. Tak przygotowaną deskę przytwierdza się w położeniu poziomem do haków wbitych w ścianę i zaczynając od pierwszej karby przewleka nić tak, aby każdy zwój sprężyny wisiał w podwójnem zawieszeniu na nitkach 60 *cm* długich. Na takiej **falownicy sprężynowej** okazać fale podłużne postępujące!

*5. Rurę szklaną o dostatecznie wielkiej zewnętrznej średnicy (szkło do lampy) oklej w koło długim skrawkiem papieru w linji śrubowej. Gdy rurę taką obracać będziesz około osi, ujrzysz falę poprzeczną postępującą.

§ 3. Fale złożone.

1 Gdy dwie fale przechodzą przez jeden punkt, to cząstka, w tym punkcie znajdująca się, musi drgać **ruchem drgającym złożonym**. Gdy zaś dwie fale przesuwają się wzdłuż tego samego przewodnika linjowego, to wszystkie cząstki tego przewodnika drgają ruchem złożonym, a ogół cząstek w ten sposób drgających tworzy **falę złożoną**.

W przypadku dwóch fal składowych jednego rodzaju, poprzecznych w tej samej płaszczyźnie drgania albo podłużnych, składanie fal w falę złożoną odbywa się zapomocą dodawania lub odejmowania odchyleń składowych. Mówimy, że f a l e **nakładają się** j e d n a n a d r u g ą **(superpozycja fal)**, jak to widoczne na ryc. 9, gdzie jedna fala nałożona na drugą daje falę wypadkową.



1.

2

Ryc. 9.

2. Gdy fale składowe mają tę samą długość i jednakowe amplitudy, nazywamy składanie ich w falę złożoną **interferencją fal.** Gdy fale takie są względem siebie przesunięte o połowę swej długości, wtedy **znoszą się**, bo wypadkowe odchylenie w każdym punkcie przewodnika jest zerem.

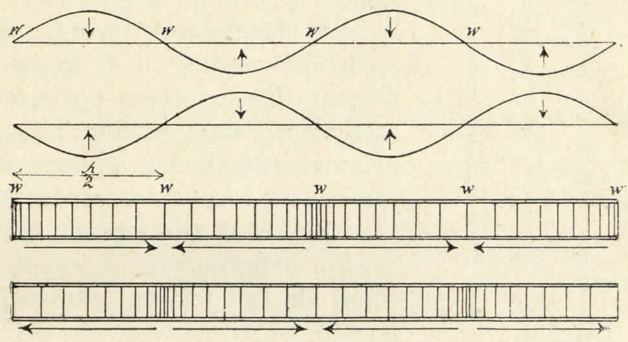
3. Przez interferencję dwóch fal, biegnących przeciwko sobie, powstaje **fala miejscowa.** W niej punkty, oddalone od siebie o $\frac{\lambda}{2}$ są stale w spoczynku, nie biorą udziału w ruchu, nazywamy je **węzłami** (*w* na ryc. 10 a). Pomiędzy dwoma węzłami znajduje się miejsce największych odchyleń, miejsca te nazywamy **strzałkami.** Oddalenie dwóch najbliższych węzłów czyli d ł u g o ś ć

f a l i m i e j s c o w e j r ó w n a s i ę p o ł o w i e d ł u g o ś c i f a l i p o s t ę p u j ą c e j.

W fali podłużnej miejscowej są węzły miejscami perjodycznie po sobie następujących największych zgęszczeń i rozrzedzedzeń, w strzałkach zaś fali takiej panuje największa prędkość ruchu cząstek drgających wskutek największych odchyleń (ryc. 10 b).

a)

b)



Ryc. 10.

Pytania.

1. Czy dwie lub więcej fal, przechodzących przez jeden wspólny punkt, wpływa na siebie, to zn. czy jakaś fala, przechodząca przez pewien punkt, zmienia się wskutek tego, że inne przez ten sam punkt przechodzą? Uzasadnij odpowiedź prawem niezależności ruchów (I § 16).

2. Opisz dokładnie różnicę pomiędzy falą postępującą, a falą miejscową co do faz drgania cząstek i amplitud? Jak drgają cząstki w strzałkach dwóch sąsiednich fal miejscowych?

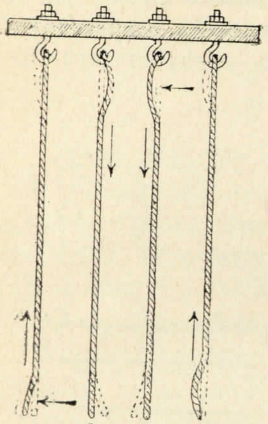
3. Czy fala złożona musi być falą sinusową? Jaką jednak musi posiadać cechę? (Musi być falą perjodyczną).

4. Stwierdź na podstawie rysunku fali miejscowej podłużnej, że ruch cząstek odbywa się zawsze od miejsc największej gęstości ku miejscom, gdzie gęstość jest najmniejsza. Po jakim czasie w węźle zgęszczenie staje się rozrzedzeniem? W których miejscach gęstość nie doznaje zmiany?

5. Jak może drgać pręt w dwóch punktach podparty, jak utwierdzony w jednym punkcie? Jak może drgać struna? (W punktach podparcia lub utwierdzenia muszą powstać węzły).

§ 4. Zachowanie się fali na granicy przewodnika linjowego.

*1 Z powały (w sali gimnastycznej) zwisa gruba lina, służąca do wspinania się. W dolny jej koniec, swobodny, uderzmy krótko laską, powstanie fala poprzeczna postępująca, która jako wygięcie n. p. w lewo biegnie do powały i stamtąd powraca wygięciem w stronę przeciwną (ryc. 11 a, b).



Ryc. 11.

Uderzmy linę bezpośrednio pod punktem jej zawieszenia n. p. w lewo, wytworzona fala poprzeczna biegnie wygięciem w lewo w dół i powraca takiem samem wygięciem w górę (ryc. 11, c, d).

*2. Na falownicy sprężynowej, sporządzonej według II § 2 ćw 4, wytwarzam falę podłużną postępującą zgęszczeniem. Fala ta powraca od stale przytwierdzonego końca zgęszczeniem, od swobodnego końca rozrzedzeniem.

Zjawisko powracania fali po tym samym przewodniku nazywamy **odbijaniem się fali** fala postępująca pierwotna powraca odbita od końca przewodnika.

3. Gdy pewien punkt przewodnika jest pobudzany do ruchu drgającego tak, że z punktu tego wciąż biegną fale postępujące, to fale te z odbitemi od końca przewodnika tworzą przez interferencję falę miejscową, opisaną w II § 3, 3.

4. Zdarzyć się może, że gęstość przewodnika linjowego od pewnego miejsca zmienia swą wartość. Jeżeli przyjmiemy, że w przypadku fal podłużnych moduł sprężystości nie ulega zmianie (przy falach poprzecznych napięcie przewodnika), to w myśl równania $c = \sqrt{\frac{E}{d}}$ dla fal podłużnych ($c = \sqrt{\frac{P}{\delta}}$ dla fal poprzecznych), zmienia się także i prędkość przewodzenia fal. Gdy fala przechodzi z przewodnika rzadszego w gęstszy, prędkość przewodzenia fal staje się mniejsza, gdy fala przechodzi z przewodnika gęstszego w rzadszy, prędkość przewodzenia staje się większa

W tym przypadku fala pierwotna doznaje na granicy dwóch prewodników podziału na dwie części jedna część fali przenosi się w nowy przewodnik ze zmniejszoną amplitudą jest to **fala przepuszczona**, druga zaś część fali pierwotnej powraca od granicy dwóch przewodników — jest to **fala odbita**

Fala przepuszczona jest zawsze tego samego typu, co fala pierwotna, zatem, gdy fala pierwotna posuwa się górą lub zgęszczeniem, to i fala przepuszczona idzie w dalszym ciągu górą lub zgęszczeniem. Typ fali odbitej zależy od tego czy nowy przewodnik jest rzadszy, czy gęstszy, od rzadszego przewodnika odbija się fala pierwotna tak, jak od końca swobodnego, od gęstszego przewodnika odbija się, jak od końca przytwierdzonego.

Pytania.

1. Wyjaśnij zjawisko odbijania się i przepuszczania fali podłużnej, postępującej zgęszczeniem, na podstawie II § 2, ćw. 3, i uzasadnij twierdzenie, że fala od gęstszego przewodnika odbija się fazą przeciwną, od rzadszego zaś fazą zgodną z fazą fali postępującej, podłużnej lub poprzecznej.

2. Opisz odbijanie się fal podłużnych na przykładzie pociągu kolejowego, a) gdy lokomotywa uderzy w pierwszy wagon stojącego pociągu, b) gdy szarpnie pierwszy wagon stojącego pociągu.

Ćwiczenia.

*1. Na falownicy sprężynowej okaż fale miejscowe podłużne a) gdy oba końce są swobodne, b) jeden swobodny, drugi utwierdzony, c) oba utwierdzone. (Utwierdza się końce sprężyny przez przywiązanie ich do ciężkiego stojaka).

*2. Wysoko na pionowej, czarnej tablicy zawieś przerywacz (dzwonek) elektryczny, zwrócony młoteczkiem wdół. Do młoteczka przywiąż nitkę białą bawełnianą o długości 1 do 2 *m*, obciążoną ciężarkiem 20 do 50 *g*. Gdy przerywacz jest w ruchu, widzimy w nitce fale miejscowe, których kształt zależny jest od szybkości drgania przerywacza, od długości nici i od obciążenia.

II. NAUKA O GŁOSIE (AKUSTYKA).

§ 5. Powstawanie głosu.

1 Ciała drgające wywołują w otaczającem powietrzu kuliste fale podłużne, które uderzając o ciała sprężyste, mogą je do ruchu drgającego pobudzić (ryc. 12).

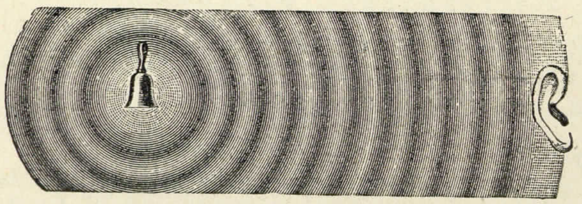
Gdy duży dzwon silnie dzwoni, kartka papieru drży nawet w dość znacznej odległości.

Fale powietrzne, wpadające w małżowinę uszną, dostają się przez przewód uszny do błony bębenkowej i wprawiają ją w drgania, które przenoszą się zapomocą kosteczek na płyn błędnika i nerwy

Drgania te odczuwamy jako **głos**.

G ł o s e m n a z y w a m y w r a ż e n i a, k t ó r e o d b i e r a m y z a p o m o c ą s ł u c h u.

Głos wydają ciała, pobudzone do ruchu drgającego.



Ryc. 12.

*Drganie cząstek dźwięczącego dzwonu można odczuć ręką. Dźwięczące płyty lub błony wprawiają w ruch piasek, którym są posypane. Struna dźwięcząca milknie za dotknięciem, zatem drganie nie jest dodatkowem zjawiskiem, lecz istotną przyczyną głosu.

Dla człowieka głuchego nie istnieje głos, lecz istnieją drgania, które może wyczuć ręką lub w pewnych przypadkach nawet ujrzeć.

2. Nietylko powietrze, lecz także inne gazy, jakoteż płyny i ciała stałe mogą przewodzić głos zapomocą fal, które w nich powstają.

Nurek słyszy w wodzie głos osób na brzegu. Tykotanie zegarka, położonego na jednym końcu belki, słyszymy dokładnie, gdy ucho przyłożymy do drugiego końca belki.

*Doświadczenie z budzikiem, umieszczonym pod kloszem pompy rozrzedzającej, wskazuje, że przez próżnię głos nie przechodzi.

§ 6. Tony strun.

Głosy, używane w muzyce nazywamy **tonami**. Z następstwa tonów, dobywanych na instrumencie muzycznym, — takim instrumentem jest także krtań ludzka, — powstają **melodje**.

Najprostsze następstwo tonów tworzy znaną **skalę diatoniczną**. Składa się ona z siedmiu **stopni**, postępujących w górę, ósmy zaś stopień, zwany **oktawą** stopnia pierwszego, odczuwamy jako wyższe powtórzenie stopnia pierwszego.

*Zaśpiewać skalę diatoniczną, wymawiając: pierwszy, drugi trzeci i t. d. (rozumie się, stopień).

*Najzwyklejszym instrumentem muzycznym są skrzypce. Na pudle osobliwego kształtu naciągnięte są cztery struny, różnej grubości, napinane zapomocą pokręcania kołków. Grający wprawia strunę w drganie przez pociąganie po niej smykiem, a przyciskając strunę palcami do deski, pod strunami umieszczonej, skraca ją wedle potrzeby, wskutek czego struna wydaje tony rozmaitej **wysokości**.

Z doświadczenia ze skrzypcami widzimy, że t o n s t r u n y j e s t t e m w y ż s z y a) i m s t r u n a j e s t c i e ń s z a, b) i m b a r d z i e j j e s t n a p i ę t a i c) i m j e s t k r ó t s z a.

To samo można stwierdzić na t. zw. **monokordzie**. Jest to długie pudło z naciągniętemi na niem strunami.

*2. Zajmiemy się zbadaniem, jak wysokość tonu zależy od długości struny

Na monokordzie napięta jest struna o długości 120 *cm*, której ton nazywamy **tonem zasadniczym**. Gdy struny dotknę palcem w połowie długości albo podeprę ją w tem miejscu prożkiem, dającym się przesuwać, ton połowy długości struny jest oktawą tonu zasadniczego czyli ósmym tonem skali diatonicznej, której pierwszym jest ton zasadniczy Gdy strunę podzielę na trzy części i zbadam ton $\frac{2}{3}$ długości struny, przekonam się, że jest piątym stopniem skali. Postępując dalej w ten sposób, znajdziemy, jakim długościom struny odpowiadają tony skali, a prócz tego natrafimy na tony, których w skali diatonicznej brak, lecz które uczniowie muzykalni określą, jako tony t. zw. **skali molowej (minorowej)** powstające przez obniżenie niektórych tonów skali **durowej (majorowej)**. Za każdym razem uczniowie śpiewają skalę, wychodząc od tonu zasadniczego struny i zatrzymując się na tonie badanym, wypowiadając równocześnie wyrazy: pierwszy, drugi, trzeci i t. d.

Im ton jest wyższy tem większe jest jego oddalenie od tonu zasadniczego. Oddalenie dwóch tonów nazywamy **interwałem** muzycznym. Interwały, zależnie od tego, który stopień skali z tonem zasadniczym zestawiamy, mają nazwy: **prima, sekunda, tercja, kwarta, kwinta, seksta, septyma, oktawa.**

3. Długości struny, odpowiadające im stopnie skali i interwały, jakie tworzą te stopnie z tonem zasadniczym, zebrane są w następującem zestawieniu:

Długość struny	Stopień skali	Interwał
$1 = 120$ *cm*	I	prima
$\frac{1}{2} = 60$ „	VIII	oktawa
$\frac{2}{3} = 80$ „	V	kwinta
$\frac{3}{4} = 90$ „	IV	kwarta
$\frac{4}{5} = 96$ „	III	tercja
$\frac{3}{5} = 72$ „	VI	seksta
$\frac{5}{6} = 100$ „	♭ III	tercja mała
$\frac{5}{8} = 75$ „	♭ VI	seksta mała
$\frac{8}{9} = 106\frac{2}{3}$ „	II	sekunda
$\frac{5}{9} = 66\frac{2}{3}$ „	♭ VII	septyma mała
$\frac{8}{15} = 64$ „	VII	septyma

W zestawieniu tem pomieszczone są wyniki podziału struny na 2, 3, 4,... części, aż do 15, przyczem jednak opuszczono ułamki utworzone z liczb 7, 11, 13 w liczniku lub mianowniku, a dalej ułamki mniejsze od $\frac{1}{2}$, te bowiem dawałyby tony, wychodzące poza oktawę. Opuszczono także podział struny na 10 części, gdyż dawałby on tylko jeden ton nowy dla długości struny $\frac{9}{10} = 108$ *cm*, a ten ton jest tylko bardzo nieznacznie niższy od stopnia II. Podział na 7, 11, 13 i 14 $= 2 \times 7$ odrzucamy, ponieważ praktyka wykazuje, że wszystkie interwały muzyczne dadzą się złożyć z samych tylko tercyj i kwint czyli z liczb 2, 3, 5, ich wielokrotności i ilorazów.

Zadanie.

1. Nakreśl odcinek o długości 120 *mm*, który ma przedstawiać strunę i oznacz na nim, w których punkach struna ma być skrócona, aby otrzymać wszystkie tony wymienione w powyższem zestawieniu.

2. Wypisz ułamki, przedstawiające długości struny dla stopni skali diatonicznej durowej, w szeregu malejącym od 1 do $\frac{1}{2}$.

§ 7 Wysokość tonu.

*1 Nałóżmy na wirownicę krążek blaszany, posiadający ośm szeregów otworków w współśrodkowe kręgi ułożonych. Liczby otworków są

24, 27, 30, 32, 36, 40, 45, 48.

Gdy podczas jednostajnego wirowania krążka przesuwamy rurkę z prądem powietrza od kręgu z 24 otworkami do kręgu

z 48 otworkami, słyszymy tony skali diatonicznej. Tony te powstają wskutek tego, że prąd powietrza, uderzający o którykolwiek szereg otworków, jest podczas wirowania krążka jednostajnie przerywany; otrzymujemy więc falę głosową, jak od ciała drgającego. Przyrząd ten pozwala nam także obliczyć liczbę drgań powietrza dla każdego tonu. Przypuśćmy bowiem, że krążek wiruje jednostajnie z szybkością 10 obrotów na sekundę, to tonom skali diatonicznej, wygrywanym podczas takiego wirowania odpowiadają następujące liczby drgnień

240, 270, 300, 320, 360, 400, 450, 480.

Gdy skutkiem drgań powietrza słyszymy ton, to liczbę drgnień na sekundę nazywamy **bezwzględną wysokością tonu.**

Tonem nazywamy wrażenie głosowe tylko wtedy, gdy wszystkie cząstki ciała brzmiącego drgają z tą samą częstością czyli, gdy mają jednakowe okresy drgnień. Gdy częstość drgania cząstek ciała jest ustawicznie zmienna, wrażenie, wywołane takiemi wstrząśnieniami powietrza, określamy wyrazami szmer, szelest, trzask, zgrzyt, turkot i t. d. Gdy zaś cząstki ciała brzmiącego drgają ruchami, złożonemi z drgań o różnej częstości, wrażenie takie, które jest mieszaniną tonów, nazywamy **dźwiękiem.**

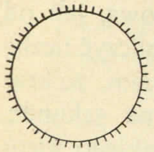
2. Podzielmy wysokości tonów skali diatonicznej, którą otrzymaliśmy wskutek opisanego powyżej doświadczenia, przez 240. Otrzymamy szereg ułamków

$$1,\ \tfrac{9}{8},\ \tfrac{5}{4},\ \tfrac{4}{3},\ \tfrac{3}{2},\ \tfrac{5}{3},\ \tfrac{15}{8},\ 2,$$

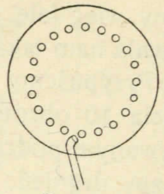
które oznaczają, ile razy którykolwiek ton skali wyższy jest od jej tonu zasadniczego. Ponieważ zaś odległość dwóch tonów nazywamy interwałem, przeto każda z tych liczb czyli stosunek wysokości (bezwzględnych) dwóch tonów (zawsze wyższego do niższego) przedstawia wielkość interwału między temi tonami. Liczby te nazywać będziemy także **wysokościami względnemi** tonów skali diatonicznej.

Porównajmy otrzymany szereg ułamków z długościami struny, odpowiadającemi tym tonom skali, z II § 6 Zad. 2. Przekonamy się, że ułamki jednego szeregu są odwrotnościami ułamków szeregu drugiego. Stąd wynika ważny wniosek, że wysokości (względne lub bezwzględne) tonów są do długości struny odwrotnie proporcjonalne.

*3. Wysokość tonu można wyznaczyć zapomocą przyrządów, zwanych syrenami.



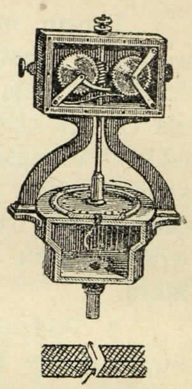
Ryc. 13.



Ryc. 14.

Syrena Savarta jest to kółko zębate (ryc. 13), a **syrena Seebecka** krążek z otworkami na obwodzie (ryc. 14). Iloczyn z liczby obrotów na sekundę i liczby zębów lub otworów jest wysokością tonu.

Syrena Cagniard'a de Latour słada się z walcowatej puszki metalowej (ryc. 15), której pokrywa opatrzona jest blisko obwodu ukośnie wierconymi otworami. Nad tą pokrywą obraca się na osi krążek, opatrzony taką samą ilością otworów, wierconych ukośnie w przeciwnym kierunku.



Ryc. 15.

Gdy otworki krążka znajdują się nad otworkami pokrywy, wiatr z miecha wpadający do puszki, uderza o ukośne ściany górnych otworów i wprawia krążek w szybki ruch obrotowy. Stąd powstaje ton, którego wysokość można wyznaczyć, odczytując na dodanem liczydle, ile otworków krążka przesunęło się w sekundzie nad każdym otworem pokrywy.

Wysokość tonu wyznaczyć można także zapomocą **wibrografu,** który polega na tem, że do ciała, wydającego ton, przytwierdza się rysik, a ten, drgając, na posuwającej się powierzchni kreśli linję falową. Liczba fal nakreślonych w sekundzie jest wysokością tonu.

Ćwiczenia.

*1 Na krążek gramofonu nałóż płytę gramofonową tak, aby strona gładka płyty była zwrócona do góry. Płytę natrzyj wprzód odrobiną tłuszczu zapomocą waty i posyp równomiernie proszkiem widłakowym (lycopodium). Gdy do obracającej się płyty zbliżysz duże widełki stroikowe, z przytwierdzonym na jednym końcu kawałkiem drucika, otrzymasz, przy stosownem trzymaniu widełek, na płycie wyraźną linję falową (sinusoidę). Aby oznaczyć wysokość tonu widełek należy zmierzyć prędkość obrotu płyty gramofonowej i policzyć, ile fal wypada na jeden obrót. Prędkość obrotu oznacza się w ten sposób, że do płyty na okręgu przykleja się mały skrawek papieru i liczy się, ile czasu potrzeba na 100 obrotów płyty (N. p. 100 obrotów trwa 57 *sek.* fal na jednym obwodzie 124, wysokość tonu 217,5/*sek*).

*2. Sprawdzić doświadczalnie równanie $N = \frac{1}{2L}\sqrt{\frac{P}{\delta}}$, w którem N oznacza wysokość tonu, L długość struny, P ciężar napinający strunę, a δ masę jednostki długości struny.

Równanie powyższe wyprowadza się w następujący sposób:

Z II, § 2, 2 wiemy, że $c = \lambda N$, z III, § 3, 3, że $L = \frac{\lambda}{2}$, bo końce struny są węzłami fali miejscowej. Stąd $c = 2LN$. W II § 2, 3 nauczyliśmy się, że prędkość rozchodzenia się fal poprzecznych w strunach wyraża się $c = \sqrt{\frac{P}{\delta}}$. Z tego otrzymujemy $N = \frac{1}{2L}\sqrt{\frac{P}{\delta}}$

Celem sprawdzenia tego równania należy monokord zawiesić na ścianie, a odwinąwszy strunę stalową z dolnego kółka obciążyć ją dość wielkim ciężarem (kilkunastu kg). Następnie podłożyć pod strunę prożek, a przesuwając go, skracać strunę lub też zdejmować stopniowo obciążenie, aż struna szarpnięta palcem, wyda ton zgodny z tonem widełek, a który już co do wysokości został zbadany w poprzedniem ćwiczeniu. Stąd otrzymamy wielkości L i P. Dalej ważymy kawałek drutu o długości l z tego samego materjału, który stanowi strunę. Niech jego masa będzie m, to $\delta = \frac{m}{l}$ gr/cm. Pamiętać, że P należy wyrazić w **dynach.** Po podstawieniu wartości i wykonaniu obliczenia powinniśmy otrzymać liczbę zgodną z wynikiem Ćw 1.

*3. W Ćw. 2 zmieniać ciężar P i długość struny L tak, aby ton struny był ciągle tej samej wysokości N t. j. zgodny z tonem widełek. Przekonamy się, że gdy N i δ są stałe, także $P : L^2$ zachowuje stałą wartość $= 4N^2\delta$ Oblicz tę wartość!

Zadania.

1. Gdy w Ćw. 1 100 obrotów płyty gramofonowej trwa 57 *sek,* a fal na jednym obwodzie jest 124, obliczyć wysokość tonu widełek (217,5/*sek*).
2. Jakie jest napięcie struny, która przy długości 80 *cm* daje ton o wysokości 100/*sek*, gdy masa jednostki długości jest 0,03 *gr/cm?*
3. Oblicz interwał między tonami zasadniczemi dwóch strun, zupełnie jednakowo grubych i jednakowo napiętych, gdy jedna jest z glinu o gęstości 2,6, druga zaś ze srebra o gęstości 10,4 gr/cm^3.
4. Struna, napięta ciężarem 6 *kg,* daje pewien ton. Jakie musi być napięcie struny, aby ton podniósł się o kwintę?
5. Struna w zad. 4 ma długość 48 *cm.* Jak musi być skrócona, aby przy tem samem napięciu dała ton o sekstę wyższy?
6. Jaka jest wysokość tonu struny, napiętej siłą P, o masie M i długości L? $\left(N = \frac{1}{2}\sqrt{\frac{P}{ML}}\right)$.
7. Wiele oktaw obejmuje głos ludzki, zawarty w granicach wysokości 64 i 1500/*sek.*

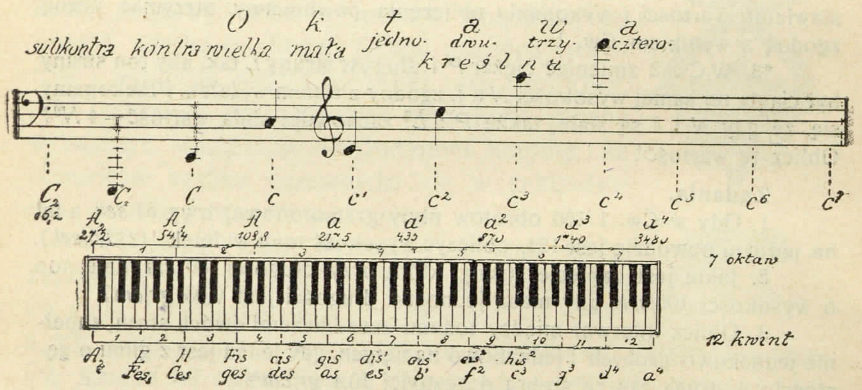
§ 8. Tony używane w muzyce.

1 Powolne drgania nie wywołują wrażenia głosu, lecz rownież nie odczuwamy drgań, których częstość przekracza pewną granicę.

Gdy prosta sprężyna, na jednym końcu przymocowana, drga tak powolnie, że możemy drgania policzyć, nie słyszymy dźwięku.

Granice słyszenia zakreślają różni badacze rozmaicie, od 16 lub 24 do 24000 lub 40000/*sek*. Wrażliwość na wysokie tony jest u rozmaitych osób niejednakowa. W muzyce używamy tonów w granicach od 24 do 5000/*sek*.

Wysokości tych tonów określane są zapomocą osobnego pisma nutowego, a cały ich obszar podzielony na oktawy, które noszą nazwy: subkontra, kontra, wielka, mała, jednokreślna, dwukreślna, trzykreślna i t. d. oktawa (ryc. 16). W obrębie każdej oktawy tony mają po porządku te same nazwy *c*, *d*, *e*, *f*, *g*, *a*, *h*, i tworzą skalę diatoniczną z tonem *c* jako zasadniczym czyli tak zwaną skalę *c*-dur. Jeżeli tony te są nastrojone według interwałów, podanych w II § 7, 2, strój taki nazywamy **naturalnym** albo **harmonicznym**.



Ryc. 16.

Dla tonu a^1 przyjęto wysokość 435/*sek*.

2. Skalę diatoniczną można rozpocząć na jakimkolwiek innym tonie, jako zasadniczym; to jednak prowadzi do coraz nowych tonów, z których jedne różnią się od tonów skali *c*-dur tylko bardzo nieznacznie, inne muszą być uważane jako nowe tony. Pouczy nas o tem przykład skali *d*-dur:

c-dur.	c	d	e	f	g	a	h	c^1	
	1	$\frac{9}{8}$	$\frac{5}{4}$	4	$\frac{3}{2}$	5	$\frac{15}{8}$	2	
d-dur		d	e	fis	g	a	h	cis^1	d^1
		$\frac{9}{8}$	$\frac{81}{64}$	$\frac{45}{32}$	$\frac{3}{2}$	$\frac{27}{16}$	$\frac{15}{8}$	$\frac{135}{64}$	$\frac{9}{4}$

Wysokości tonów skali *d*-dur otrzymamy, mnożąc wysokości tonów skali *c*-dur przez $\frac{9}{8}$ czyli podnosząc tony skali *c*-dur o jeden ton (o sekundę).

Ton *e* w skali *c*-dur ma wysokość $\frac{5}{4}$, w skali *d*-dur wysokość $\frac{81}{64}$. Interwał między temi dwoma *e* wynosi $\frac{81}{64}\ \frac{5}{4}=\frac{81}{80}$. Taki sam interwał znajdziemy między oboma *a*, $\frac{27}{16}:\frac{5}{3}=\frac{81}{80}$. Interwał ten, zwany **komą syntoniczną**, jest tak mały, że w praktycznej muzyce uważa się powyższe tony, oba *e* i oba *a*, za jednakowe. Tony jednak *fis* i *cis* w *d*-dur różnią się od *f* i *c* tak znacznie, że stanowią nowe tony, połowiące odległość *f*, *g* i *c*, *d*.

Gdy w ten sposób uzupełnimy zasób tonów przez wprowadzanie coraz to nowych tonów, połowiących odległość między tonami skali *c*-dur, dojdziemy do **skali chromatycznej**:

$$c,\ \begin{matrix} cis, \\ des, \end{matrix}\ d,\ \begin{matrix} dis, \\ es, \end{matrix}\ e,\ f,\ \begin{matrix} fis, \\ ges, \end{matrix}\ g,\ \begin{matrix} gis, \\ as, \end{matrix}\ a,\ \begin{matrix} ais, \\ b, \end{matrix}\ h,\ c^1,$$

w której tony *cis*, *dis*, i t. d. powstają przez podwyższenie tonów *c*, *d* i t. d., a *des*, *es* i t. d. przez obniżenie tonów *d*, *e* i t. d. o półtonu. Tony dodane, nad sobą umieszczone, wcale nie muszą być tej samej wysokości. N. p. *gis* jest o tercję wyższe od *e*, zatem ma wysokość $\frac{5}{4}\ \frac{5}{4}=\frac{25}{16}$, zaś *as* jest o tercję niższe od c^1, zatem ma wysokość $2\ \frac{5}{4}=\frac{8}{5}$, stąd obliczy się, że *as* jest wyższe od *gis* o interwał $\frac{8}{5}:\frac{25}{16}=\frac{128}{125}=1{,}024$, większy od komy syntonicznej $\frac{81}{80}=1{,}0125$.

3. Już z tych przykładów widzimy, że muzyka **absolutnie czysta,** oparta wyłącznie na stroju naturalnym, jest niemożebna, gdyż dla każdej nowej skali trzebaby używać innych tonów, różniących się od siebie o komę, co w ostateczności prowadziłoby do tak wielkiej liczby tonów w obrębie jednej tylko oktawy, że ani instrumentu takiego nie możnaby zbudować, ani żaden muzyk w tej obfitości tonów nie mógłby się zorjentować.

Szczęściem ucho ludzkie ma tą pożyteczną własność, że tylko na czystość oktaw jest bardzo wybredne, na czysość kwint i kwart jest jest także dość czułe, ale przy innych interwałach z łatwością się godzi na mniejszą czystość i znosi dość nawet znaczne odstępstwa od stroju naturalnego.

4. Postawmy sobie za zadanie wystroić skalą chromatyczną tak, aby oktawy, kwinty i kwarty były doskonale czyste. Stroić będziemy kwintami w górę, co uzyskamy przez mnożenie tonu niższego przez $\frac{3}{2}$, a wyjdziemy od najniższego tonu fortepianu, A_2, którego wysokość względną przyjmiemy za 1 i skorzystamy z faktu, który można stwierdzić na klawiaturze fortepianowej

(ryc. 16), że dwanaście kwint równa się siedmiu oktawom. Na tym fakcie oparta jest nowoczesna muzyka chromatyczna, która żąda możności swobodnej **modulacji**, to zn. swobodnej zmiany tonu zasadniczego **(toniki)** obranej skali **(tonacji)** tak, aby po szeregu dowolnych przejść można wrócić znów do tonu początkowego, do pierwotnej toniki. Szereg tych dwunastu kwint, obejmujących obszar siedmiu oktaw, nazywamy także **kołem kwintowem**.

$$\begin{array}{ccccccccccccc} A_2 & E_1 & H_1 & Fis, & cis, & gis, & dis^1, & ais^1, & f^2, & c^3, & g^3, & d^4, & a^4, \\ 1 & \frac{3}{2} & (\frac{3}{2})^2 & (\frac{3}{2})^3 & (\frac{3}{2})^4 & (\frac{3}{2})^5 & (\frac{3}{2})^6 & (\frac{3}{2})^7 & (\frac{3}{2})^8 & (\frac{3}{2})^9 & (\frac{3}{2})^{10} & (\frac{3}{2})^{11} & (\frac{3}{2})^{12} > 2^7 \end{array}$$

Ponieważ $(\frac{3}{2})^{12} = 129{,}74$, a $2^7 = 128$, przeto widoczne, że koło kwintowe przy interwale kwinty $\frac{3}{2}$ nie zamyka się, że dwunasta kwinta nie równa się siódmej oktawie, lecz jest od niej wyższa o interwał $129{,}74 : 128 = 1{,}014$, cokolwiek większy od komy syntonicznej $\frac{81}{80} = 1{,}0125$.

Aby przecież to koło kwintowe zamknąć, jest tylko jedno wyjście: zmniejszyć interwał kwinty do wartości takiej x, aby $x^{12} = 2^7$, $x = \sqrt[12]{2^7} = 1{,}4983$. Jest to wartość tak nieznacznie mniejsza od $\frac{3}{2} = 1{,}5000$, że interwał ten może uchodzić za interwał czystej kwinty

Strój na takiej zasadzie oparty nazywamy **jednostajnie temperowanym.** Skala chromatyczna w stroju jednostajnie temperowanym składa się z 12 jednakowych **półtonów.** Jeżeli interwał temperowanego półtonu nazwiemy q, to $q^{12} = 2$, skąd $q = \sqrt[12]{2} = 1{,}0595$.

Zadania.

1. Jaka jest bezwzględna wysokość tonu temperowanego d^4, gdy $a^1 = 435$?

2. Ile drgnień ma najniższy, ile najwyższy ton fortepianu, A_2 i a^4 i jaka jest długość ich fal w powietrzu, gdy $c = 340 m/sek$?

3. Ponieważ obliczenia interwałów wymagają mnożeń i dzieleń ułamków zwyczajnych, przeto, aby tego uniknąć, można użyć logarytmów wysokości tonów, które pozwolą mnożenia i dzielenia zastąpić łatwiejszemi dodawaniami i odejmowaniami. Można to uczynić zapomocą podstawienia $X = 12 . \frac{\log n}{\log 2}$, gdzie n oznacza wysokość względną tonu. Tak otrzymaną liczbę X będziemy nazywali **wysokością logarytmiczną.**

Obliczyć wysokości logarytmiczne tonów skali diatonicznej naturalnej (z dokładnością dwóch miejsc dzies.) i skali temperowanej. Podać różnicę między tonami odpowiedniemi obu skal. (N. p. V stopień skali

naturalnej $\overline{V}_n = 12 . \frac{\log 3 - \log 2}{\log 2} = 7{,}02$, zaś w skali temperowanej $\overline{V}_t = 12 . \frac{\log \sqrt[12]{2^7}}{\log 2} = 7$. (Różnica $+ 0{,}02$).

4. Obliczyć odległości (interwały) między poszczególnemi tonami skali diatonicznej naturalnej i temperowanej (różnice wysokości logarytmicznych).

Interwał 2,04 nazywamy **wielkim całym tonem,** 1,82 **małym całym tonem,** 1,12 **wielkim półtonem.** Różnicę między wielkim i małym całym tonem, 0,22 nazywamy **komą syntoniczną.** Odpowiada ona interwałowi $\frac{81}{80}$.

5. Wystroić tony skali diatonicznej tak, aby wszystkie kwinty i kwarty były czyste, to zn. aby kwinta równała się 7,02, kwarta 5,98. Sprawdzić, że wynik rachunku jest taki, iż II, III, VI i VII stopień skali są wyższe o komę syntoniczną od odpowiednich wysokości skali naturalnej. Jakie są teraz odległości między poszczególnemi stopniami skali?

Tercję 4,08, odpowiadającą interwałowi $\frac{3^4}{2^6} = \frac{81}{64}$, nazywamy **tercją Pitagorejską,** interwał zaś 0,90 **małym półtonem.** Tak strojoną skalę nazywamy **melodyjną.**

6. Koło kwintowe byłoby zamknięte, gdyby 12 kwint równało się 7 oktawom. Oblicz, w wysokościach logarytmicznych, o ile 12 kwinta naturalna wyższa jest od siódmej oktawy.

Interwał 0,235 nazywa się **komą Pitagorejską,** która tylko nieznacznie różni się od komy syntonicznej.

§ 9. Współbrzmienie (Resonancja).

Gdy za sznur ciężkiego dzwonu lekko pociągniemy, powstaje małe, ledwie dostrzegalne wahnienie. Lecz przez często po sobie następujące szarpnięcia w chwilach, w których sznur się obniżać poczyna, może się dzwon dobrze rozkołysać. Podobnie ciało, wydające dźwięk, może za pośrednictwem powietrza lub innego przewodnika pobudzić do drgań ciało, którego okres drgań jest taki sam. Zjawisko to nazywamy **współbrzmieniem resonancją.**

Każde ciało drga wskutek zewnętrznego pobudzenia z właściwym sobie okresem. Gdy więc pobudzenia następują w odstępach czasu równych okresowi drgań ciała, natenczas amplituda powiększa się za każdem uderzeniem. Gdy okres pobudzeń różni się od okresu naturalnych drgań ciała, amplitudy czasem się powiększają, czasem pomniejszają i silne współbrzmienie powstać nie może.

*Mamy dwoje widełek stroikowych, nastrojonych zgodnie (unisono). Jedne z nich są przytwierdzone na pudle drewnianem, drugie zaś bez pudła. Te drugie pobudzamy do drgania i stawiamy na pudle pierwszych widełek. Gdy po kilku sekundach drgające widełki usuniemy i przez dotknięcie ręką uspokoimy, będziemy słyszeli ton wydawany przez pierwsze widełki. Jest to skutek słabych uderzeń, które otrzymały widełki za pośrednictwem powietrza i cząstek pudła.

Jeżeli jedne widełki odstroimy przez przyklejenie kawałeczka wosku, nie będzie współbrzmienia.

*Szczególnie łatwo następuje współbrzmienie, jeżeli masa ciała pobudzanego jest mała. Powietrze np. zawarte w pudle widełek może drgać bardzo silnie, jeżeli o otwór naczynia uderzają fale w odstępach czasu, równych okresowi naturalnego drgania powietrza. Dla tonu $a^1 = 435/sek$, pudło ma długość około 18 *cm*.

2. Gdy pobudzający ruch perjodyczny jest złożony, to z pomiędzy ruchów składowych zostaną przez ciało przyjęte te, których okres zgadza się z okresem drgań ciała.

Ciało sprężyste można także zmusić do drgań, różniących się od jego drgań naturalnych (np. widełki stroikowe zapomocą elektromagnesu, przez którego zwoje krąży prąd przerywany). Lecz nienaturalny okres drgań utrzymuje się tylko tak długo, jak długo trwają pobudzenia. Takim **przymusowym drganiom** ulegają łatwo błony (np. błona bębenkowa w uchu, płyty, ściany pudeł resonansowych w instrumentach muzycznych).

Pytania:

1. Użyj doświadczeń opisanych w II. § 2 Ćw. 1, 2, do objaśnienia zjawiska współbrzmienia.
2. Dlaczego ton widełek wzmacnia się, gdy brzmiące widełki oprzemy trzonkiem o stół?

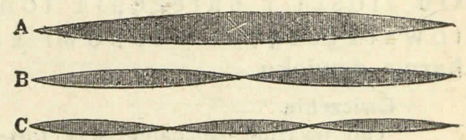
Ćwiczenie.

*Gdy w pobliżu fortepianu, w którym naciśnięto prawy podał (podniesiono tłumik), zaśpiewamy jakiś ton, zauważymy, że fortepian powtarza ten ton. Czego to dowodzi?

§ 10. Tony harmoniczne strun.

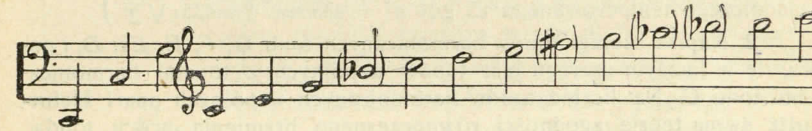
*1 Gdy strunę na monokordzie podzielimy na dwie, trzy, cztery lub więcej części i dotknąwszy jej lekko końcem palca w punkcie podziału takim, aby oddzielona część była $\frac{1}{2}, \frac{1}{3}, \frac{1}{4}, \ldots$ struny, pociągniemy po krótszej części smykiem, przekonamy się zapomocą papierowych koników zawieszonych w różnych miejscach na strunie, że i reszta struny drga, dzieląc się na części (ryc. 17). Papierowe koniki spadają ze struny w wszystkich miejscach z wyjątkiem punktów węzłowych.

2. Wysokości tonów, powstających z podziału struny na części, łatwo oznaczymy, obniżając je dzieleniem przez 2, 4, 8 (według potrzeby) do pierwszej oktawy i porównywając z wysokościami względnemi tonów skali diatonicznej. Prowadząc podział struny aż do liczby 16, otrzymujemy następujące tony, które poniżej przedstawiono także i w piśmie nutowem. Nazywamy je tonami **harmonicznemi** albo **górnemi**.



Ryc. 17.

W poniższym przykładzie za ton zasadniczy przyjęte jest wielkie *C*. Tony, odpowiadające podziałowi struny na 7, 11 13 części, oznaczono lierami *i*, *k*, *l*, ponieważ, jak wiadomo, tonów tych brak w skali diatonicznej i w muzyce nie są używane (ryc. 18).



Ryc. 18.

1,	2,	3,	4,	5,	6,	7,	8,	9,	10,	11,	12,	13,	14,	15,	16,
C,	c,	g,	c^1	e^1,	g^1,	i^1,	c^2,	d^2,	e^2,	k^2,	g^2,	l^2,	i^2,	h^2,	c^3

*3. Naciśnijmy ostrożnie klawisz *C* na fortepianie tak, aby tłumik z tej struny zdjąć, ale aby młotek o strunę nie uderzył. Następnie uderzajmy krótko klawisze c, g, c^1, e^1, g^1, b^1, c^2, d^2, e^2, fis^2, g^2, h^2, c^3 Usłyszymy wyraźnie zjawisko współbrzmienia. Stąd wniosek, że struna, wydająca ton *C*, dzieliła się za każdym razem na 2, 3, 4,... części, chociaż jako całość nie drgała.

Naciskajmy teraz ostrożnie klawisze, odpowiadające tonom harmonicznym tonu *C* i za każdym razem uderzajmy krótko ton *C*. Usłyszymy również zjawisko współbrzmienia u jednych tonów wyraźniej, u innych mniej wyraźnie, co jest dowodem, że w dźwięku struny *C* zawarte są tony harmoniczne, że struna, pobudzona do drgania, dzieli się także na części, że więc t o n s t r u n y s k ł a d a s i ę z t o n u z a s a d n i c z e g o i t o w a r z y s z ą c y c h m u t o n ó w h a r m o n i c z n y c h, że jest mieszaniną tonów i że właściwie nie powinniśmy mówić o tonie struny, ale o jej **dźwięku**.

4. Ilość natężenie tonów harmonicznych, towarzyszących tonowi zasadniczemu struny, zależą od materjału struny, od

miejsca, gdzie struna jest do ruchu pobudzona i od sposobu, jak została w drgania wprawiona. Dlatego inny jest dźwięk struny fortepianowej, inny struny na skrzypcach, pociągniętej smykiem, inny szarpniętej palcem, chociaż ton zasadniczy będzie ten sam. Od ilości i natężenia tonów harmonicznych, towarzyszących tonowi zasadniczemu, zależy **barwa dźwięku.**

Ćwiczenie.

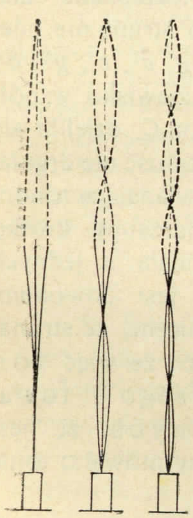
*Gdy uważnie słuchamy przy fortepianie współbrzmienia tonu *e* w dźwięku *C*, możemy zauważyć, że ton współbrzmiący jest cokolwiek niższy To samo odnosi się do tonu *b*. Prócz tego zjawisko współbrzmienia jest w tych tonach o wiele słabsze, niż dla tonów *g*, *c*, d^2, h^2,. Skąd to pochodzi? (Tony harmoniczne są tonami naturalnemi, tony fortepianu są temperowane).

Zadania.

1. Oblicz wysokości bezwzględne tonów harmonicznych dla tonu zasadniczego temperowanego *C*, gdy $a^1 = 435/sek.$ $\left(n.435:\sqrt[12]{2^9}\right)$.

2. Napisz szeregi tonów harmonicznych tonu *G*, *F*, *E*, *Es*, *D*, i policz, ile w każdym szeregu jest tonów wspólnych z tonami harmonicznemi tonu *C*. Na liczbie tonów harmonicznych wspólnych oparł **Helmholtz** swoją teorję zgodności równoczesnego brzmienia dwóch tonów, czyli **konsonancji.**

§ 11. Tony prętów i słupów powietrza.

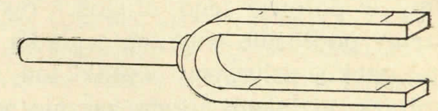


Ryc. 19.

*1 Pręt stalowy około 1 *m* długi, 1,5 *mm* gruby, na jednym końcu przytwierdzony w imadle ślusarskiem, drgać może, jak wskazuje ryc. 19. Widzimy więc, że na swobodnem końcu powstaje zawsze strzałka, w miejscu przytwierdzenia zaś węzeł, prócz tego mogą jeszcze powstać węzły dodatkowe takie, jak w strunie o podwojonej długości, gdy dzieli się na nieparzystą liczbę części. Zatem w pręcie na jednym końcu przytwierdzonym powstają tony harmoniczne nieparzyste, parzystych zaś brak.

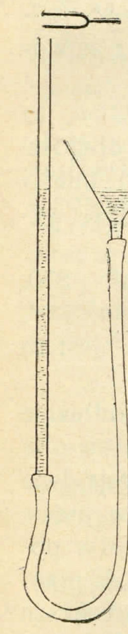
*Widełki stroikowe posiadają zawsze węzły w pobliżu zgięcia. Oba końce widełek równocześnie zbliżają się do siebie i oddalają naprzemian. Drgania te przenoszą się, jako drgania podłużne na trzonek, a z niego na cząstki stołu lub pudła resonacyjnego.

*Gdy poziomo ustawione widełki a^1 (dostatecznie szerokie) posypiemy piaskiem i pociągając po nich smykiem, pobudzimy je do drgania takiego, aby powstał ton harmoniczny (ryc. 20), ujrzymy, że piasek ułożył się w cienką wyraźną linię, ton zaś, który słyszymy, jest kwintą oktawy tonu zasadniczego widełek, czyli tonem e^2. Jest to ton harmoniczny o wysokości 3.



Ryc. 20.

*2. Rura szklana o szerokości przynajmniej 3 *cm*, a długości 60 *cm*, z obu stron otwarta, połączona jest rurą gumową z naczyniem, zawierającem wodę (ryc. 21). Podnosząc naczynie, możemy podnieść poziom wody w rurze do dowolnej wysokości. Gdy nad rurą trzymamy widełki brzmiące ($a^1 = 435/sek$), a wypełniwszy całą rurę wodą, powoli poziom wody w rurze obniżamy, usłyszymy, że dla pewnych wysokości poziomów wody zjawisko współbrzmienia występuje szczególnie wyraźnie. Wysokości, dla których to zachodzi, zależne są cokolwiek od szerokości rury i od wysokości ustawienia widełek nad rurą, ale zawsze oddalenie poziomów, w których zjawisko współbrzmienia występuje najwyraźniej, wynosi dla tonu a^1 39 *cm*.

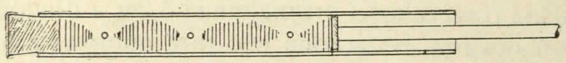


Ryc. 21

Należy zwrócić uwagę na zależność, jaka zachodzi pomiędzy wysokością tonu widełek, a długością słupa powietrza. W rurze powstaje fala miejscowa o długości 39 *cm*, zatem fala postępująca dla tonu a^1 w powietrzu ma długość $2.39\ cm = 78\ cm$. Taką drogę przebiega głos w czasie jednego drgnienia widełek, to jest w czasie $\frac{1}{435}$ *sek*. Stąd obliczamy prędkość głosu w temperaturze zwyczajnej

$$78\ cm\ \frac{1}{435}\ sek = 33930\ cm/sek = 339{,}3\ m/sek.$$

*3. Fale miejscowe w powietrzu możemy uczynić widocznemi. Bierzemy rurę o średnicy około 3 *cm*, długości około 80 *cm*. Do wnętrza rury wsypujemy trochę proszku korkowego, powstałego przez starcie korka pilnikiem i rozmieszczamy go w poziomej rurze równomiernie wzdłuż całej długości. Jeden koniec rury zamykamy korkiem, przez drugi zaś wprowadzamy pręt szklany o długości n. p. 110 *cm*, grubości około 5 *mm*. Na końcu pręta, tkwiącym w rurze, naklejamy krążek z tektury albo z korka o średnicy nieco mniejszej od wewnętrznej średnicy rury Gdy taki pręt, tkwiący jednym końcem w rurze chwycimy w połowie jego długości ręką, a wystającą połowę potrzemy podłużnie wilgotną szmatką (watą albo kawałkiem mokrej gąbki), usłyszymy wysoki ton, a proszek korkowy w rurze podczas brzmienia pręta zacznie wyraźnie drgać i układać się w charakterystyczny sposób (ryc. 22). Przez wsuwanie i wysuwanie pręta ustalamy położenia, dla których drganie proszku korkowego jest najsilniejsze. Są to strzałki fal miejscowych, których długość, odpowiadającą wysokości tonu pręta szklanego, daje się z łatwością zmierzyć.



Ryc. 22.

Przypuśćmy, że 10 takich fal zajmuje długość 73 *cm*, to jedna fala miejscowa ma długość 7,3 *cm*, zatem na długości 340 *m* (prędkość rozchodzenia się głosu w powietrzu) mieści się takich fal 34000 14,6 = 2328. Zatem 2328/*sek* jest wysokością tonu pręta szklanego.

Możemy tę wysokość bliżej określić. $a^1 = 435$, $a^2 = 870$, $a^3 = 1740$, $a^4 = 3480$. Ton badany zawarty jest między a^3 i a^4. Interwałem jego z tonem a^3 jest 2328 1740 = 1,34 $\backsim \frac{4}{3}$. Jest to więc interwał kwarty. Zatem ton pręta jest d^4

*4. Pręt w połowie długości przytwierdzony drga podłużnie tak, że w miejscu przytwierdzenia powstaje węzeł, a na obu końcach strzałki. Zatem na jego długości 110 *cm* powstają dwie połówki fali miejscowej. Skoro więc fala miejscowa w pręcie szklanym ma długość 110 *cm*, a fala tego samego tonu w powietrzu ma długość 7,3 *cm*, to wynika z tego, że prędkość przewodzenia fal głosowych w szkle jest 110 7,3 = 15 razy większa niż w powietrzu czyli, że wynosi 15 340 *m/sek* = 5100 *m/sek*. Ponieważ prędkość przewodzenia fal podłużnych oblicza się z równania $c = \sqrt{\frac{E}{d}}$, to znając gęstość szkła $d = 2{,}5\ gr/cm^3$, można przy pomocy znalezionej prędkości głosu w szkle obliczyć moduł sprężystości tego szkła. $E = c^2d = 510000^2\ cm^2/sek^2$ $2{,}5\ gr/cm^3 = 650250\ \ 10^6\ dyn/cm^2 = 663000\ kg/cm^2$

Jest to **akustyczna metoda wyznaczania modułu sprężystości ciał.**

Ćwiczenia.

*1. Dwie pary widełek stroikowych, zupełnie jednakowych, wykręć z pudeł i uderz końcami o siebie. W ten sposób obie pary powinny drgać zupełnie jednakowo aż do zniknięcia tonu. Jedne z nich po uderzeniu oprzyj trzonkiem o stół, drugie trzymaj w ręce i czekaj, aż ton widełek pierwszych zniknie prawie zupełnie. Gdy wtedy drugie postawisz na stole, brzmieć będą jeszcze całkiem wyraźnie. Wyjaśnij, dlaczego widełki oparte trzonkiem o stół rychlej utraciły energję ruchu drgającego.

*2. Płytę metalową lub szklaną, jednostajnej grubości, o brzegach szlifowanych, w jednym punkcie poziomo przytwierdzoną w statywie, posypuje się piaskiem i pociąga z brzegu smykiem. Płyta, drgając, wydaje pewien ton, a piasek układa się na linjach węzłowych w linje zwane **figurami Chladniego**. Oznaczaj przy pomocy widełek wysokości tonów i sporządzaj rysunki, odpowiadające każdemu tonowi figury.

*3. Nalej do trzech słojów tyle wody, aby w każdym z nich wystąpiło zjawisko współbrzmienia z widełkami trzymanemi nad słojem. Wlej do jednego słoja kilka kropel eteru, do drugiego bezwodnika węglowego, zebranego w innem naczyniu. Współbrzmienia w tych słojach staje się wyraźnie słabsze. Czego to dowodzi? Czy wody należy dodać, czy też ująć, aby współbrzmienie poprawić?

*4. Powtórz doświadczenie opisane w ust. 3, z taką odmianą, że *a)* wprzód ogrzej rurę z proszkiem korkowym płomieniem gazowym do dość wysokiej temperatury, *b)* rurką szklaną, przechodzącą przez korek zamykający rurę z proszkiem, wprowadź wodór *c)* bezwodnik węglowy, i mierz za każdym razem długość fali, a z tego oblicz prędkość przewodzenia głosu a) w powietrzu ogrzanem, b) w wodorze, c) w bezwodniku węglowym.

*5. Zmierz metodą akustyczną moduł sprężystości drzewa dębowego, używając pręta dębowego, wprawionego w drgania, jak uczyniono w ust. 3 z prętem szklanym.

§ 12. Instrumenty muzyczne.

W muzyce używamy zwykle dźwięków strun poprzecznie drgających (instrumenty **strunowe)** i dźwięków słupów powietrza (instrumenty **dęte)**.

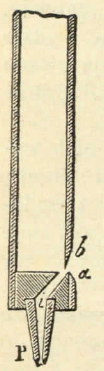
Prętów, płyt i błon drgających nie używa się jako samoistnych instrumentów, mają one jedynie zastosowanie w orkiestrze.

Na instrumentach strunowych otrzymuje się tony rozmaitej wysokości albo zapomocą wielkiej ilości strun rozmaitej długości i grubości, z których każda tylko jeden ton wydaje (fortepian), albo zapomocą kilku strun, skracanych przez przyciśnięcie palcem w odpowiedniem miejscu (skrzypce).

W fortepianie pobudza się strunę do brzmienia przez przyciśnięcie klawisza, który zapomocą mechanizmu dźwigniowego wprawia w ruch młotek, uderzający o strunę; w **harfie** struny szarpie się palcami.

W instrumentach **rzniętych,** których przedstawicielem są **skrzypce,** pobudza się struny do drgania przez pociąganie po nich smykiem. **Altówka, wiolonczela** i **bas** są tylko powiększonemi skrzypcami.

Najprostszym instrumentem dętym jest piszczałka organowa, zwana **piszczałką fletową.** W piszczałkach fletowych prąd powietrza płynący z miecha dzieli się w otworze, (ab), zwanym **wargą** (ryc. 23). Jedna część wychodzi na zewnątrz, druga wpada do piszczałki i wywołuje chwilowe zgęszczenie, które nie dopuszcza dalszego dopływu tak, że cały prąd na zewnątrz wychodzi. W następnej więc chwili następuje przy wardze rozrzedzenie.



Ryc. 23.

Piszczałki fletowe są **otwarte** lub **kryte,** t. j. na jednym końcu zamknięte. Ton zasadniczy piszczałki otwartej ma wysokość taką samą jak krytej o połowie długości. Piszczałka otwarta wydaje wszystkie tony harmoniczne tonu zasadniczego, kryta tylko nieparzyste

Piszczałką otwartą jest **flet.** Piszczałki **organowe** są w części kryte, w części otwarte.

W piszczałkach **stroikowych** ma pobudzający prąd powietrza rytm zależny od drgań sprężystej blaszki, stroika. **Klarnet, fagot, oboj,** są piszczałkami stroikowymi. Przy **trąbach** czynność stroika spełniają wargi grającego.

Krtań ludzka działa jak piszczałka stroikowa. Stroikiem są więzadła.

Pytania.

1. Opisz z jakich części składają się organy. Jak z miecha dostaje się powietrze do piszczałek? Co to są **rejestry**?
2. Pedał znajduje się w fortepianie, w harfie i w organach. Jaką czynność spełnia pedał w tych instrumentach?
3. Jaki cel mają otwory i klapy w flecie, klarnecie? Czy w pobliżu otworu może powstać węzeł?
4. Jakie tony wydaje trąbka sygnałowa (bez wentyli)? Czy zatem wszystkie melodje można na niej wygrywać?
5. Jak zachowują się instrumenty muzyczne przy zmianach temperatury? (Struny w podwyższonej temperaturze przedłużają się, powietrze w piszczałkach staje się rzadsze).

Ćwiczenia.

*1. Przekonaj się, że ton zasadniczy piszczałki zależy od jej szerokości (na dwóch piszczałkach jednakowej długości, ale niejednakowego przekroju).

*2. Sporządź instrument do grania z próbówek różnej długości, nastrojonych tak, aby przez zadęcie otrzymać tony skali diatonicznej. (Rurki można stroić przez wlewanie w nie roztopionej parafiny).

§ 13. Prędkość głosu.

Aby wyznaczyć prędkość głosu w powietrzu, strzelano w dwóch miejscach odległych A i B naprzemian z armat. Między błyskiem armaty na jednej stacji, a hukiem, słyszanym na drugiej, upływa pewien czas. Iloraz z odległości AB przez średnią arytmetyczną notowanych na obu stacjach czasów, jest prędkością głosu. Prędkość światła (300000 *km/sek)* jest tak wielka, że ułamek sekundy upływający między powstaniem błysku, a ujrzeniem go, można uważać za zero.

Kierunek wiatru nie wpływa na wynik rachunku, bo o ile wiatr czas przebiegania głosu jednej armaty skraca, o tyle w przeciwnym kierunku przedłuża.

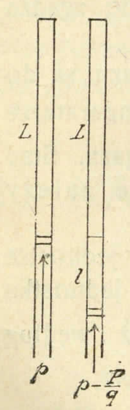
W suchem powietrzu, w temperaturze 0^0 C, prędkość głosu wynosi 330 *m/sek.*

2. Prędkość głosu obliczyć można także z równania $c = \sqrt{\frac{E}{d}}$ (II § 2, 4), trzeba tylko zastanowić się, co oznaczać ma moduł sprężystości E dla gazów, który dla ciał stałych określony był jako $E = \frac{PL}{ql}$ (P siła, napinająca przewodnik o przekroju q i powodująca wydłużenie o l przy długości przewodnika L).

Wyobraźmy sobie, że w rurze o długości L i o przekroju q zawarty jest gaz o prężności p (ryc. 24). Gdy ciśnienie zewnętrzne zmniejszy się cokolwiek przez obciążenie tłoka ciężarem P, to gaz powiększy swoją w rurze objętość o długość l, a prężność gazu będzie wynosiła $p - \frac{P}{q}$. Zastosujmy tu prawo Boyle-Mariotte'a:

$$pL = \left(p - \frac{P}{q}\right)(L + l) = pL + pl - \frac{P}{q}(L + l);$$

z niego otrzymujemy $p = \frac{P}{q} \cdot \frac{L+l}{l}$, a gdy założymy że P jest bardzo małą siłą, powodującą wydłużenie l, bardzo małe w stosunku do pierwotnej długości L, to można zamiast ułamka $\frac{L+l}{l}$



Ryc. 24.

napisać $\frac{L}{l}$, a wtedy otrzymujemy dla p to samo wyrażenie, które powyżej było napisane dla $E = \frac{PL}{ql}$, czyli że $E = p$.

Stąd wynika, że prędkość głosu w gazach wynosi

$$\boxed{c = \sqrt{\frac{p}{d}}} \quad \text{(Wzór \textbf{Newtona}).}$$

3. Podstawiając tu dla powietrza w temperaturze 0° pod ciśnieniem normalnem $p = 1\,013250$ *dyn/cm*² (I Tabl. XVI), $d = 0{,}001293$ *gr/cm*³ (I Tabl. V), znajdziemy dla c wartość 280 *m/sek*. Wynik ten nie jest zgodny z doświadczeniem, które dało liczbę 330 *m/sek* na prędkość głosu w temperaturze 0°. **Laplace** wskazał na przyczynę błędu. Zgęszczenia i rozrzedzenia powietrza przy rozchodzeniu się fal głosowych odbywają się tak szybko, iż powstające przy zgęszczeniach podwyższenie temperatury, (przy rozrzedzeniach obniżenie) wytwarza znacznie większy przyrost prężności i zmniejszenie gęstości powietrza (przy rozrzedzeniach przeciwnie), niżby to wypadało według prawa Boyle-Mariotte'a, które Newton wziął za podstawę swego obliczenia. Laplace okazał, że w tym przypadku należy d pomnożyć jeszcze przez liczbę $k = \frac{c_p}{c_v}$ (I § 70, 5), która dla powietrza i wielu innych gazów ma wartość 1,4 (I Tabl. V).

Zatem

$$\boxed{c = \sqrt{k\frac{p}{d}}} \quad \text{(Wzór \textbf{Laplace'a}).}$$

Z obliczenia otrzymujemy na prędkość głosu w powietrzu w temperaturze 0° wartość 331,6 *m/sek*, co znakomicie zgadza się z wynikami doświadczeń i pomiarów.

4. Według prawa Boyla gęstość i prężność gazu są do siebie wprost proporcjonalne, zatem $\frac{p}{d}$ przy stałej temperaturze zachowuje stałą wartość, niezależną od prężności gazu. Stąd wniosek, że prędkość głosu w powietrzu nie zależy od stanu barometrycznego.

Gęstość gazu d jest to masa gazu zawarta w jednostce objętości (1 *cm*³). Jeżeli v jest objętością, jaką zajmuje jednostka masy (1 *gr*), to $d = \frac{1}{v}$, wtedy $\frac{p}{d} = pv$, a ponieważ według prawa Boyla-Charles'a $pv = RT$ (I § 69, 2), przeto:

$$\boxed{c = \sqrt{kRT}.}$$

Prędkość głosu w powietrzu jest proporcjonalna do pierwiastka z temperatury bezwzględnej.

5. Prędkość głosu w wodzie wyznaczyli **Colladon i Sturm** (1826) na jeziorze Genewskiem. W chwili, w której młot uderzał w dzwon pod wodą umieszczony, zapalał się sygnał optyczny nad wodą. W pewnem oddaleniu słuchano przez trąbkę słuchową, zanurzoną w wodzie. Prędkość głosu w wodzie wynosi 1435 *m/sek*.

Zadania.

1. Obliczyć prędkość głosu w powietrzu w temperaturze 15°. (W temperaturze 0° jest $c_o = \sqrt{kR.273}$, w temperaturze t° jest $c_t = \sqrt{k.R\,(273+t)}$, stąd $c_t = c_o\sqrt{1 + \frac{t}{273}}$. Jaką wartość otrzymano z doświadczenla, opisanego w II § 11, 2?)

2. Przerobić równanie z zad. 1, opierając się na przybliżeniu $\sqrt{1+a} \backsim 1 + \frac{a}{2}$, które jest tem prawdziwsze, im mniejsze jest a, i obliczyć, o ile przyrasta prędkość głosu na 1° temperatury. [$c_t = (331{,}6 + 0{,}61\,t)$ *m/sek*].

3. Obliczyć, jąką wartość ma moduł sprężystości dla wody, gdy prędkość głosu w wodzie równa się 1435 *m/sek*. ($E = c^2 d$).

4. Jaka jest prędkość głosu w żelazie, gdy moduł sprężystości żelaza równa się 20000 *kg/mm*²

5. Jaki ton wydaje piszczałka zadęta wodorem, gdy zadęta powietrzem daje $a^1 = 435$/*sek*? (Długość piszczałki otwartej L, długość fali $\lambda = 2\,L$, prędkość głosu $c = \lambda N = 2\,LN = \sqrt{\frac{p}{d}}$; dla powietrza $N_1 = a^1 = 435$/*sek*, $d_1 = 0{,}001293$, dla wodoru n_2 nieznane, $d_2 = 0{,}000090$ (I Tabl V). Z równań $2\,LN_1 = \sqrt{\frac{p}{d_1}}$, $2\,LN_2 = \sqrt{\frac{p}{d_2}}$ wynika $N_1^2\,d_1 = N_2^2\,d_2$. Po podstawieniu wartości wypadnie $N_2 = 1649$/*sek*).

6. Okazać, że ton o wysokości $N_2 = 1649$/*sek* jest prawie dokładnie temperowanem *gis*³. (Jest to ton o półtonu niższy od $a^3 = 4\;435 = 1740$/*sek*. Dla sprawdzenia obliczyć należy wyrażenie $1740 : \sqrt[12]{2}$).

III. NAUKA O ŚWIETLE (OPTYKA).

A. FALOWA NATURA ŚWIATŁA.

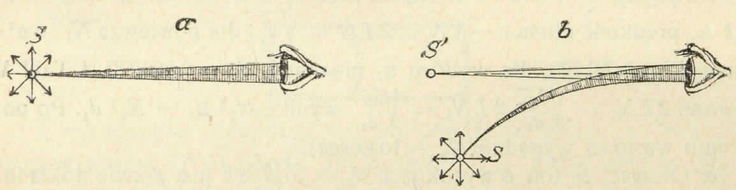
§ 14. Rozchodzenie się światła.

1 Światłem nazywamy przyczynę wrażeń wzrokowych. Przedmioty widzimy tylko wtenczas, gdy świecą lub są oświetlone i gdy na drodze między okiem i przedmiotem świecącym

znajdują się ciała, przepuszczające światło czyli **przezroczyste**, jak n. p. powietrze, szkło, woda. Przez ciało **nieprzezroczyste** (drzewo, metal) światło nie przechodzi.

Przedmiot świecący, który jest **źródłem światła,** możemy wyobrazić sobie, jako złożony z **punktów świecących**. Z punktu świecącego rozchodzi się światło na wszystkie strony po linjach prostych. Kierunki rozchodzenia się światła nazywamy **promieniami.** Prostolinijność jednak rozchodzenia się światła zachowana jest tylko wtedy, gdy promień w całej swej długości przechodzi przez **ośrodek jednolity,** t. j. jednostajnie gęsty, n. p. przez powietrze wszędzie jednakowo ogrzane, przez wodę, przez szkło.

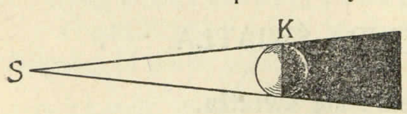
2. Promienie, wychodzące z punktu świecącego *S* (ryc. 25 a), padają **wiązką rozbieżną** w jednolitym przewodniku na źrenicę oka. Skutkiem tego widzimy punkt świecący przed sobą w właściwem położeniu. Gdy jednak promienie przechodzą wskutek niejednostajnej gętości przewodnika po linjach nieprostych (ryc. 25 b), oko widzi punkt świecący tam, gdzie się przecinają wsteczne przedłużenia promieni, dochodzących do oka. Punkt ten *S'* nazywamy **obrazem pozornym** pynktu świecącego *S*.



Ryc. 25.

Jeżeli do oka dochodzi **wiązka równoległa** promieni, wtedy obraz punktu świecącego oddala się w nieskończoność.

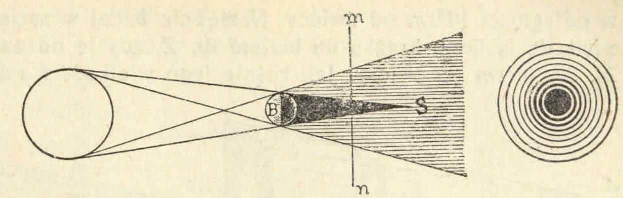
*3. Ciało nieprzezroczyste *K* (ryc. 26), ustawione w drodze promieni świetlnych, wychodzących z punktu *S*, powstrzymuje je, zostawiając za sobą przestrzeń ciemną, którą nazywamy **cieniem**.



Ryc. 26

Gdy źrodłem światła jest przedmiot świecący (ryc. 27), w pobliżu którego znajduje się ciało, rzucające cień, to w prze-

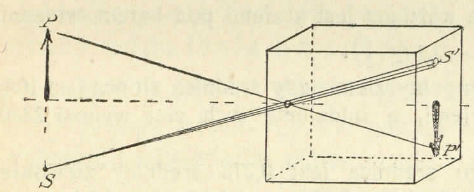
strzeni zajętej cieniem, są miejsca, do których żaden promień światła nie dochodzi i inne, które są oświetlone częścią przedmiotu świecącego. W tym razie rozróżniamy **cień zupełny** i **półcień**.



Ryc. 27.

Kształt cienia wyznaczyć można konstrukcyjnie, opierając się na prostolinjowem rozchodzenia się światła.

*4. Pudło kartonowe posiadające w jednej ścianie mały, okrągły otwór, podczas gdy ścianę przeciwległą stanowi szyba matowa (**matówka),** nazywamy **ciemnią optyczną** (ryc. 28). Wiązka promieni, wychodząca z punktu świecącego *S*, przechodzi przez otwór i padając na matówkę, wytwarza na niej plamkę jasną *S'*, tem mniejszą, im mniejszy otwór i im większe oddalenie punktu świecącego w stosunku do głębokości ciemni. Przedmiot świecący *P*, znajdujący się przed ciemnią, da na matówce **obraz rzeczywisty** *P'* tem wyraźniejszy, im mniejsze plamki jasne daje każdy punkt przedmiotu. Obraz ten jest **odwrócony**



Ryc. 28.

Pytania.

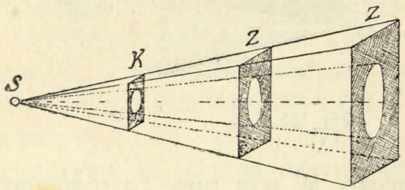
1 Wymień najważniejsze źródła światła. Czy świecenie źródeł światła połączone jest z wyczerpywaniem się ich energji?

2. Czy promienie światła są widoczne w przeźroczystem powietrzu? W jaki sposób bieg promieni można uczynić widocznym w powietrzu, w wodzie? (Cząsteczki kurzu, zawiesiny).

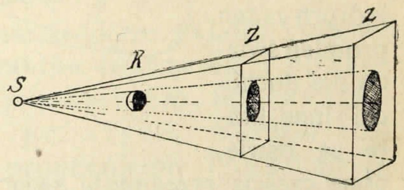
Ćwiczenia.

*1 Z pudełka kartonowego sporządź **ciemnię optyczną**. (W przedniej ścianie pudełka wywierć gwoździem otwór, tylną ścianę zastąp szybką matową). Badaj bieg promieni, ostrość obrazu na matówce w zależności od wielkości otworu, wielkość obrazu w zależności od oddalenia ciemni optycznej od przedmiotu świecącego.

*2. Świeca z krótko uciętym knotem, zapalona, przedstawia źródło światła *S* (ryc. 29), które uważać będziemy za punkt świecący. Wytnij w czarnym kartonie *K* otwór okrągły o 5 *cm* średnicy i ustaw karton w odległości 10 *cm* od świecy Następnie badaj w zaciemnionym pokoju wielkość jasnego krążka na białem tle *Z*, gdy je odsuwasz na odległość 20, 30, 40 *cm* od świecy. Jak rośnie jego wielkość z odległością?



Ryc. 29.



Ryc. 30.

*3. Kulka drewniana lub metalowa *K*, ustawiona przed punktem świecącym *S*, rzuca cień na białe tło *Z* (ryc. 30). Jak zależy jego wielkość od wielkości kulki *K* i stosunku oddaleń *K* i *Z* od *S*?

Zadania.

1. Jak wielki jest obraz słońca w ciemni optycznej o głębokości $d = 1$ *m*, gdy średnica słońca widziana jest z ziemi pod kątem widzenia $\alpha = 32'$? (Średnica obrazu $a = 2d \operatorname{tg} \frac{\alpha}{2}$).

2. Jak długi jest cień zupełny ziemi, gdy średnica słońca jest 108,7 razy większa od średnicy ziemi, a oddalenie tych ciał wynosi 23307 promieni ziemskich?

3. Czy księżyc, którego średnica jest 0,273 średnicy ziemskiej, i który krąży około ziemi w oddaleniu 60,28 promieni ziemskich, może cały zmieścić się w cieniu zupełnym ziemi (zupełne zaćmienie księżyca)?

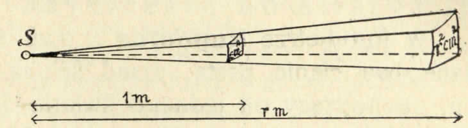
§ 15. Natężenie światła.

1. Źródło światła wysyła we wszystkich kierunkach promienie, które oświetlają powierzchnie ciał. Ilość promieni padających prostopadle na 1 cm^2 powierzchni, nazywamy **natężeniem oświetlenia** albo **oświetleniem** powierzchni. Natężenie to zależne jest od **natężenia promieniowania** źródła i od oddalenia badanej powierzchni od źródła.

Przy porównywaniu różnych źródeł światła pod względem natężenia ich promieniowania, przyjęto za jednostkę **świecę amylową.** Stanowi ją płomień spalającego się octanu amylowego w lampie z knotem bawełnianym, o określonej grubości knota i wysokości płomienia. Oświetlenie białej płaszczyzny, ustawionej prostopadle do promieni w odległości 1 *m* od świecy amylowej, nazywają **świecą metrową** albo **luxem**.

2. Pomyślmy kulę, zakreśloną promieniem 1 *m* około punktu *S*, gdzie umieszczona jest świeca amylowa (ryc. 31). Ilość promieni, przechodzących przez 1 cm^2 tej powierzchni kulistej,

przy natężeniu oświetlenia równem 1 *luxowi*, równa się 1 *lux*/cm^2 Gdy w punkcie *S* ustawimy źródło światła o natężeniu promieniowania $\mathfrak{J}$ świec amylowych, to w oddaleniu 1 *m* od *S* oświetlenie będzie $\mathfrak{J}$ *luxów*. Ponieważ w oddaleniu *r m* ta sama ilość promieni pada na powierzchnię r^2 razy większą, zatem natężenie oświetlenia tej powierzchni będzie $\frac{\mathfrak{J}}{r^2}$ *luxów*, a na 1 cm^2 w oddaleniu *r m* od źródła światła pada promieni $\frac{\mathfrak{J}}{r^2}$ *lux*/cm^2.

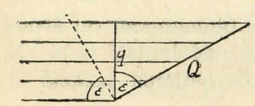


Ryc. 31.

Oświetlenie powierzchni białej, ustawionej prostopadle do promieni, jest wprost proporcjonalne do natężenie źródła światła, a odwrotnie do kwadratu oddalenia od źródła.

Jest to **prawo odwrotnych kwadratów.**

3. Gdy promienie nie padają na powierzchnią prostopadle natężenie oświetlenia zmiejsza się z dostawą kąta ϵ, który tworzą promienie padające z prostopadłą do powierzchni *Q* (ryc. 32). Ponieważ $q = Q \cos \epsilon$, przeto gdy natężenie oświetlenia powierzchni *q* jest $\mathfrak{J}$, to oświetlenie powierzchni *Q* jest $\mathfrak{J} \frac{q}{Q} = \mathfrak{J}.\cos \epsilon$.



Ryc. 32.

Z powyższego wynika, że gdy natężenie promieniowania źródła światła wynosi $\mathfrak{J}$ świec amylowych, to powierzchnia biała, umieszczona w oddaleniu *r m* od źródła i nachylona do promieni tak, że kąt podania wynosi ϵ, otrzymuje na 1 cm^2 promieni oświetlnych $\frac{\mathfrak{J} \cos \epsilon}{r^2}$ czyli, że natężenie oświetlenia *E* wynosi w *lux*ach

$$\boxed{E = \frac{\mathfrak{J}.\cos \epsilon}{r^2}.}$$

*4. **Fotometry** są to przyrządy, służące do mierzenia natężenia promieniowania, a polegają na tej zasadzie, że natężenia dwóch źródeł światła, oświetlających z różnych odległości jednakowo tę samą płaszczyznę, prostopadłą do promieni, są proporcjonalne do kwadratów odległości źródeł światła od płaszczyzny

W fotometrze **Rumforda** z dwu świateł padają na białą ścianę dwa cienie pręta, przed ścianą ustawionego. Ponieważ cień, pochodzący od jednego światła, jest oświetlony przez promienie drugiego, przeto światło jaśniejsze daje cień ciemniejszy, Odległość obu świateł od ściany zmieniamy tak długo, dopóki oba cienie nie będą jednakowo ciemne.

W fotometrze **Bunsena** oświetloną płaszczyzną jest kartka papieru na środku zatłuszczona. Jeżeli na plamę patrzeć będziemy z tej strony, z której papier jest oświetlony, wtedy plama będzie się wydawała ciemniejszą od reszty papieru, bo plama mniej światła odbija, niż reszta papieru, jeżeli będziemy patrzali na nią z przeciwnej strony, plama wydawać się będzie jaśniejszą, bo więcej światła przepuszcza, niż reszta papieru. Z jednej strony tej kartki papieru umieszcza się jednostkę światła, z drugiej światło badane, które przesuwa się, dopóki nie zniknie różnica w oświetleniu plamy i papieru.

Pytania.

1. Jak zmienia się natężenie światła z oddaleniem od źródła światła? (Według prawa odwrotnych kwadratów).

2. Jak zmienia się natężenie fal wodnych z oddaleniem od środka fal? (W stosunku odwrotnym do pierwszej potęgi oddalenia).

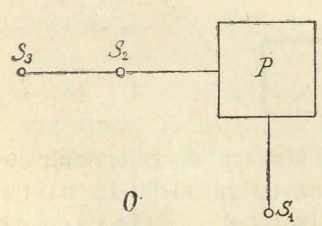
3. Przy dłuższem czytaniu należy używać oświetlenia książki nie mniejszego od 50 *luxów*. Co to znaczy?

4. Doświadczenie uczy, że jasność ciał świecących jest niezależna od pochylenia powierzchni świecącej ku linji patrzenia. Jest to prawo **Lamberta.** Jak je uzasadnisz?

5. Ciała niebieskie są kulami. Dlaczego słońce i księżyc przedstawiają się nam w postaci tarcz świecących, równomiernie jasnych od środka aż do brzegów? (Prawo Lamberta).

Ćwiczenia.

*1. W zaciemnionym pokoju ustaw wielkie pudło białe, P (ryc. 33). Przed ścianami pudła do siebie prostopadłemi ustaw w równych odległościach po jednej świecy S_1 i S_2 i patrz na obie ściany równocześnie z O.



Ryc. 33.

Gdy jedno światło ustawisz w dwa razy większem oddaleniu S_3, trzeba zamiast jednej świecy wziąć cztery, aby oświetlenie ścian było jednakowe.

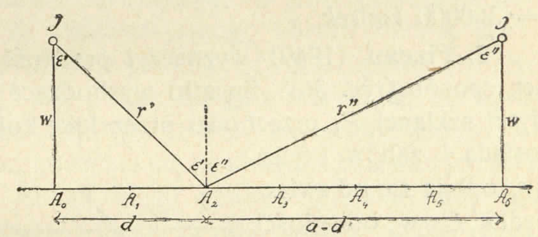
(Płomienie świec muszą być jednakiej długości; uzyskuje się to przez stosowne skracanie knotów).

*2. Wbij nóż kuchenny ostrzem w stół, na koniec zaś trzonka naklej lakiem kulkę rowerową. Gdy nóż drga, każde światło wpobliżu odbija się w poruszającej się kulce, jako jasna linja. Do porównania natężenia promienowania dwóch świateł, ustawiaj je do drgającego noża w takich oddaleniach, aby obie linje w zaciemnionym pokoju przedstawiały się jednako jasne. Wtedy stosunek natężeń promienowania równy jest odwrotnemu stosunkowi kwadratów oddaleń.

Zadania.

1. W oddaleniu od siebie $a = 2{,}2\,m$ umieszczone zą dwie żarówki, których natężenia promienowania mają się do siebie, jak 25:36. Prostopadle do prostej, łączącej je, ustawiamy zasłonę w takiem miejscu, aby oświetlenia obustronne były jednakowe. Znaleźć to miejsce. (Rozwiązać równania $\frac{\mathfrak{J}_1}{a_1^2} = \frac{\mathfrak{J}_2}{a_2^2}$, $a_1 + a_2 = a = 2{,}2$, $\mathfrak{J}_1 : \mathfrak{J}_2 = 25 : 36$).

2. Jeżeli oddalenie dwóch jednakowych żarówek wynosi $a = 1\,m$, a wzniesienie ich nad stołem $w = 1m$, obliczyć natężenie oświetlenia E powierzchni stołu w miejscach, dzielących oddalenie świateł na 6 części (w punktach A_0, A_1, A_2,.. A_6), gdy natężenie promieniowania każdej żarówki wynosi $\mathfrak{J} = 50$ świec (ryc. 34). Czy w środku oddalenia świateł oświetlenie jest największe, czy też najmniejsze?



Ryc. 34.

[Obliczenie dla A_2:

$$E' = \frac{I \cos \epsilon'}{r'^2} = \frac{Iw}{r'^3}, \quad r' = \sqrt{w^2 + d^2},$$

$$E'' = \frac{I \cos \epsilon''}{r''^2} = \frac{Iw}{r''^3}, \quad r'' = \sqrt{w^2 + (a-d)^2},$$

$$E = E' + E'' = Iw\left(\frac{1}{r'^3} + \frac{1}{r''^3}\right).\Big]$$

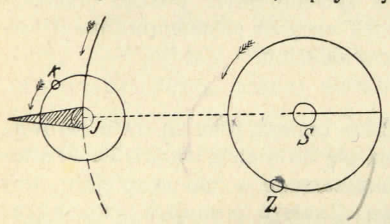
3) Gdy otwór ciemni optycznej zwróconej ku słońcu, wynosi 1 *mm*, oświetlenie białej zasłony jest takie, jakby pochodziło ze źródła o natężeniu promieniowania równem 155 świecom. Jakie jest natężenie oświetlenia obrazu słońca w ciemni optycznej o głębokości 1 *m*? (Powierzchnia obrazu słońca, według II § 14 zad. 1 jest $\left(\frac{a}{2}\right)^2 \pi$, na niej świeci 155 świec, zatem natężenie oświetlenia $\frac{155}{\left(\frac{a}{2}\right)^2 \pi}$ *luxów).*

§. 16. Prędkość światła.

1 **Prędkość światła** w próżni wynosi około 300000 *km/sek*, jest więc prawie miljon razy większa od prędkości głosu w powietrzu.

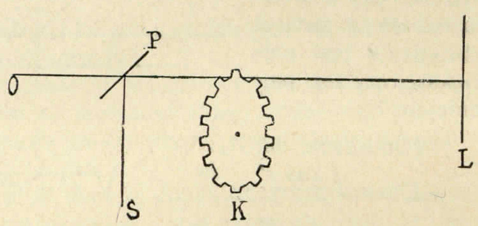
Olaf Römer wyznaczył (w 1676 r.) pierwszy prędkość światła.

Księżyce Jowisza (ryc. 35) znikają dla oka, gdy wejdą w cień Jowisza. Czas, upływający między dwoma zaćmieniami, wynosi dla pierwszego księżyca 42 *godz* 27 *min* 33 *sek*. Jest to czas obiegu księżyca około Jowisza. Gdy ziemia oddala się, czas ten, upływający między dwoma zaćmieniami, przedłuża się, a gdy ziemia z najmniejszego oddalenia od Jowisza przejdzie w największe, suma tych opóźnień wynosi około 1000 *sek*. Pochodzi to stąd, że światło przebiegło średnicę drogi ziemskiej 300000000 *km* w 1000 *sek*, zatem $c = 300000\ km/sek$.



Ryc. 35.

2. **Fizeau** (1849) wyznaczył prędkość światła w następujący sposób (ryc. 36) Światło wychodzące z S, odbija się od płytki szklanej P, przechodzi przez lukę koła zębatego K, które posiada k zębów i tyleż luk, odbija się od zwierciadła L, w odległości l, napowrót do K i wpada przez lukę i płytkę P do oka O. Gdy koło robiło na sekundę N obrotów, światło do oka nie wracało, bo przeszedłszy od P przez lukę, znajdowało, wracając od L, na miejscu luki następujący po niej ząb. Światło przebiegło więc podwójną odległość między kołem K a zwierciadłem L, to jest drogę $2\,l$, w czasie, w którym kółko o jeden ząb się obróciło, to jest w czasie $t = \frac{1}{2\,kN}$, zatem $c = 4\,lkN$.



Ryc. 36.

3. Istnieje jeszcze kilka innych sposobów, które pozwalają obliczyć prędkość światła na drodze zaledwie kilka metrów. Można było zatem mierzyć tę prędkość nie tylko w powietrzu, lecz i w innych ciałach przezroczystych, n. p. w wodzie. Znaleziono, że prędkość światła w wodzie jest mniejsza niż w powietrzu, mianowicie wynosi 225000 *km/sek*, a oprócz tego, że prędkość ta zależy i od barwy światła. W p r ó ż n i (a w przy-

bliżeniu i w powietrzu) p r ę d k o ś ć ś w i a t ł a n i e z a l e ż y o d b a r w y.

Zadanie.

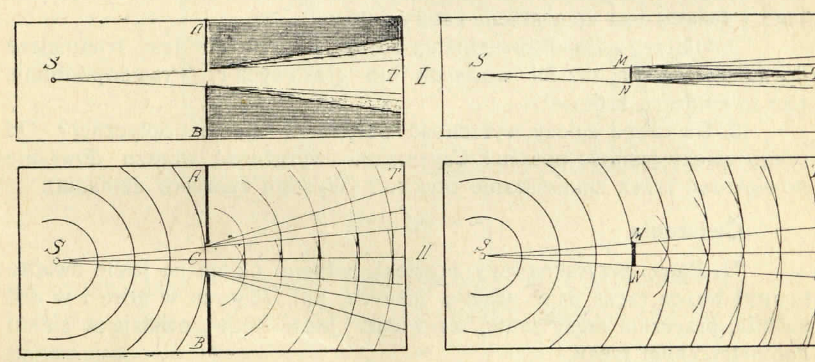
1. Jaki jest stosunek prędkości światła w powietrzu do prędkości w wodzie; jaki do prędkości w szkle, gdy prędkość w szkle równa się 200000 *km/sek*?

2. W doświadczeniu Fizeau wynosiła odległość koła zębatego od zwierciadła $l = 8633\,m$, koło miało $k = 720$ zębów i tyleż luk i gdy obracało się z prędkością $N = 12{,}6/sek$, wtedy promień światła S do oka O nie dochodził. Obliczyć stąd prędkość światła.

§ 17. Uginanie światła i głosu.

1 W II § 14 ćw 2 badaliśmy wielkość jasnego obrazu otworu, który jest oświetlony promieniami, wychodzącemi z punktu świecącego, a w ćw 3. wielkość cienia, rzuconego przez kulkę, w promieniach punktu świecącego. W obu przypadkach mogliśmy stwierdzić, że wielkość jasnego obrazu otworu, jak i cienia, zmienia się proporcjonalnie z odległością zasłony. Mówimy, że tak obraz, jak i cień, są **geometryczne**, bo powstają z geometrycznej konstrukcji, opartej na stwierdzonym fakcie prostolinjowego rozchodzenia się promieni w ośrodku jednolitym.

Zjawisko to jednak ulega pewnej odmianie, gdy otwór, przez który przechodzi wiązka światła, lub gdy kulka, rzucająca cień, zmniejszają się poniżej pewnej granicy Obraz otworu wówczas rozszerza się, cień niknie. Mówimy, że promienie, przechodząc przez wązki otwór na krawędziach uginają się (ryc. 37, I).



Ryc. 37

*2. Uginanie promieni wyjaśnić można na falach wodnych, wytworzonych w obszernem płaskiem naczyniu. Naczynie to, kształtu tacy o 1 *m* szerokości, 2 *m* długości, 10 *cm* wysokości, ustawione na zbitych deskach, poczernione, wypełnia się prawie po wierzch wodą i zapomocą pręta umieszczonego poziomo nad wodą, drgającego w płaszczyźnie pionowej i końcem dotykającego powierzchni wody, wytwarza się na niej fale kołowe. Gdy w połowie długości naczynia wstawimy pionową przegrodę *AB*, z otworem o szerokości 2 *cm* (ryc. 37, II) fale wychodzące z punktu *S* nie przejdą do drugiej połowy naczynia bez zmiany Otwór *C* działać będzie tak, jak gdyby w nim umieszczone było nowe źródło fal kołowych, a ponieważ promienie są do powierzchni fal prostopadłe, przeto promienie, wychodzące z *S* do *C*, doznają w punkcie *C* ugięcia.

Podobnie zrozumieć można, jak promienie ugięte na krawędzi pręta (blaszki *MN*), wstawionego w wodę, w pewnem oddaleniu za prętem odtwarzają pierwotne fale, wychodzące z *S*, tak, że cień zanika.

3. Szczególnie łatwo uginają się fale głosowe w powietrzu. Przykładem muzyka, grająca po drugiej stronie wysokiej i szerokiej kamienicy Obserwator znajduje się wtedy w cieniu głogłosowym; mimo to słyszy muzykę, gdyż promienie głosowe uginają się na zarysach budynku. Przytem możemy zauważyć, że niskie tony instrumentów słychać o wiele lepiej, niż wysokie, zatem fale długie łatwiej uginają się, niż krótkie.

Pytania.

1. Na co wskazuje podobieństwo zachowania się promieni światła, fal wodnych i fal głosowych pod względem uginania się? (Prawdopodobnie i światło jest zjawiskiem natury falowej).

2. Dlaczego zjawisko uginania się fal świetlnych jest trudniejsze do sprostrzeżenia, niż fal wodnych lub głosowych? (Prawdopodobnie fale świetlne są krótsze).

3. Od czego zależy wyraźność obrazu w ciemni optycznej? Od czego zależy jasność obrazu? Czy można wyraźność obrazu dowolnie powiększać przez zmniejszanie otworu? (Wystąpi zjawisko uginania).

Ćwiczenia.

*1. Patrz, przymknąwszy powieki, jednem okiem na jasne światło lampy! Każda rzęsa daje wiązkę jasnych linij, idących w górę i w dół światła, przyczem rzęsy samej nie widać. Jasne linje powstają w cieniu geometrycznym rzęsy.

*2. Zbliż nóż do oka tak, aby zakrywał równocześnie większą część źrenicy światło lampy, zostawiając tylko brzeg płomienia. Ujrzysz światło lampy, sięgające w głąb noża barwą czerwoną, a zewnątrz noża niebieski brzeg płomienia i jasne i ciemne prążki. (Uginanie się promien na krawędzi).

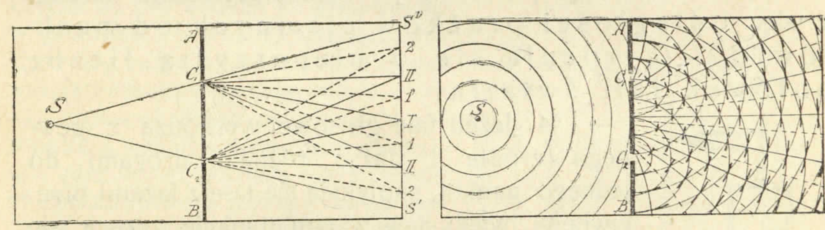
§ 18. Interferencja światła i głosu.

1. Zjawisko uginania się promieni połączone jest zwykle z innem, nie mniej interesującem. Dokoła jasnego krążka, który jest obrazem geometrycznym otworu *C* (ryc. 37, I), spostrzedz możemy na tle, zamiast jednostajnego przejścia od białej jasności do ciemności przez promienie ugięte, szereg pierścieni, naprzemian jasnych i ciemnych, a na ich brzegach pojawiają się zabarwienia czerwone i niebieskie. Tak się dzieje, gdy otwór w przysłonie oświetlony jest światłem białem. Gdy zamiast niego użyjemy **światła jednobarwnego**, n. p. czerwonego, przez wstawienie szkła czerwonego w droge promieni białych, okażą się pierścienie naprzemian czerwone i czarne.

Wyraźniej występuje to zjawisko, gdy zamiast okrągłego otworu użyjemy wąskiej szczeliny Wtedy zamiast pierścieni widzimy prążki po obu stronach szczeliny i do niej równoległe. Nazywamy to zjawisko **dyfrakcyjnym obrazem** szczeliny.

2. Łatwiej zrozumieć to można na innym przykładzie uginania się promieni światła.

W przysłonie *A B* znajdują się dwie szczeliny C_1 i C_2 oświetlone punktem świecącym *S* (ryc. 38). Na tle *T* pojawią się wówczas, prócz geometrycznych obrazów *S'* i *S''*, rozszerzenia ich wskutek ugięcia się promieni. Gdy szczeliny C_1 i C_2 są dostatecznie blisko siebie tak, że rozszerzenia te częściowo się pokrywają, wtedy na ich części wspólnej pojawiają się smugi, na-



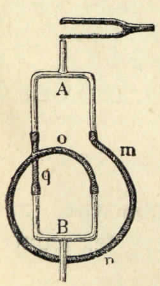
Ryc. 38.

przemian jasne i ciemne, różnobarwne, lub jednobarwne, zależnie od tego, czy pochodzą od światła białego czy też jednobarwnego.

*3. Zjawisko to posiada także swoją analogię w zachowaniu się fal wodnych, wytworzonych jak w II § 17. 2, z tą różnicą, że w przegrodzie *AB* są wycięte dwa otwory C_1 i C_2 po 2 *cm* szerokości w oddaleniu 20 *cm* od siebie. Z obu otworów wychodzą fale kołowe, które muszą się przecinać w pewnym systemie linij, symetrycznie ułożonych I, II, III. Po linjach tych biegną fale o podwójnej amplitudzie każdej fali częściowej, wskutek dodawania się wychyleń zgodnych co do kierunku (w dół lub w górę). Zaś pomiędzy temi linjami są linje 1, 2 w których niema żadnych fal, gdyż w nich fale częściowe, wychodzące z C_1 i C_2 spotykają się ciągle fazami przeciwnemi i znoszą się.

Takie składanie się fal w falę złożoną nazwaliśmy w II § 3, 2 **interferencją fal.** Charakterystyką tego zjawiska jest to, że w pewnych miejscach fale dodane do siebie znoszą się. W powstawaniu prążków ciemnych w obrazie dwóch szczelin zachodzi właśnie analogiczne zjawisko, że dwa światła dodane do siebie w pewnych miejscach dają ciemność. Jest to dowodem, że zjawisko to jest natury falowej, dlatego nazywamy je **interferencją światła,** promieniem zaś światła nazywamy kierunek, w którym odbywają się pewne, bliżej nam jeszcze nieznane zmiany, o których jednak wiemy to, że przesuwają się z prędkością 300000 *km/sek*.

Jeżeli tak jest, to można mówić o **długości fali światła**; będzie to oddalenie dwóch najbliższych punktów, w których zmiany, będące istotą światła, posiadają tę samą fazę. Odległość punktów o fazach przeciwnych będzie połową długości fali. Widocznie do prążków ciemnych w obrazie interferencyjnym światła dochodzą fale świetlne z punktów C_1 i C_2 z przeciwnemi fazami, a więc odległości prążków ciemnych od punktów C_1 i C_2 różnią się o nieparzystą liczbę połówek fali światła.



Ryc. 39.

*4. Jeżeli fale głosowe, wychodzą z pewnego źródła i dążąc różnemi drogami do jednego punktu, spotykają się tam z fazami przeciwnemi, wtedy fale w tym punkcie znoszą się i głosu tam niema. Przykładem tego doświadczenie na przyrządzie **Quinckego** (ryc. 39.), gdzie ucho nie słyszy tonu widełek, gdy różnica dróg: $BonmA \quad BqA = \frac{1}{2}\lambda$ tonu widełek. Gdy rurę kauczukową *onm* zamkniemy, ściskając ją palcami, ton widełek usłyszymy

Pytania.

1. Jaki wniosek należy wyprowadzić ze zjawiska, że z światła białego powstają prążki interferencyjne różnobarwne? (Światło białe jest widocznie mieszaniną fal rozmaitej długości).

2. Jak można użyć przyrządu Quinckego do zmierzenia długości fali głosowej?

Ćwiczenia.

*1. Wyciągnij rękę z palcami ciasno złożonemi i patrz przez wąską szczelinę pomiędzy dwoma palcami z oddalenia 10 do 20 *cm* na jasne niebo. Widać w szczelinie ciemne prążki. (Obraz dyfrakcyjny).

*2. Patrząc ku słońcu przez chorągiewkę pióra ptasiego, trzymanego w pobliżu oka, widzimy smugi barw tęczowych. (Obrazy interferencyjne).

*3. Patrz w zaciemnionym pokoju ku oddalonej świecy przez gęstą materję jedwabnego parasola rozpiętego albo przez cienki batyst naciągnięty na szybie szklanej. Okazują się dwa szeregi, do siebie prostopadłe, barwnych obrazów świecy.

*4. Natrzyj szybkę szklaną odrobiną waseliny, wytrzyj ją bibułą posyp jednostajnie proszkiem widłakowym (lycopodium). Patrz przez tę szybkę ku odległemu jasnemu światłu. Okazuje się krąg barwny dokoła światła. (Interferencja promieni ugiętych).

W ten sam sposób powstają kręgi barwne dokoła światła latarni, oglądanej przez zapocone szyby, dokoła księżyca przez chmury.

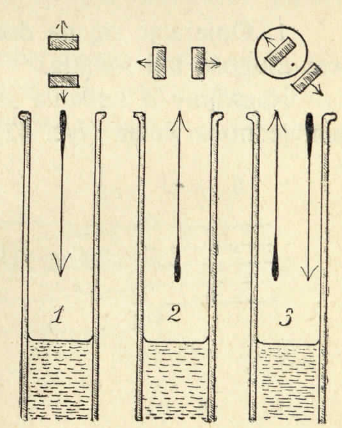
*5. Natrzyj szybę dłonią ręki, zwilżonej mydłem, i usuń nadmiar mydła, ścierając szybę dłonią lub ręcznikiem w jednym kierunku. Odległe światło, oglądane przez szybę, daje na szybie jasne smugi, prostopadłe do kierunku ścierania. (Interferencja promieni ugiętych).

*6. Widełki stroikowe, drgające, dają w płaszczyźnie, poprowadzonej przez końce widełek prostopadle do ich osi, obraz fal głosowysh podobny do fal na wodzie, wychodzących równocześnie z dwóch punktów (ryc. 38). Obracaj widełki drgające w pobliżu ucha około osi; w pewnych położeniach głosu widełek nie słychać.

*7. To samo zjawisko można okazać zapomocą współbrzmienia słupa powietrza w rurze (ryc. 40). Nastrójmy słup powietrza w słoju dokładnie na ton widełek (II § 11, Ćw. 3).

W położeniu 1 i 2 widełki drgające, wykręcone z pudła, poziomo trzymane, wywołują doskonałe współbrzmienie. Przy stosownem obróceniu osi widełek w położenie 3, współbrzmienie zanika zupełnie, gdyż w rurę wpadają równocześnie ze zgęszczeniem z jednego końca widełek, rozrzedzenie z drugiego końca.

Gdy jednak na jeden koniec widełek nałożymy rurkę papierową, niedotykającą widełek podczas drgania, współbrzmienie jest znów wyraźne.



Ryc. 40.

*8. Nad szerokim słojem, nastrojonym na ton widełek trzymany poziomo dwie pary jednakowych widełek, aby od obu otrzymać doskonałe współbrzmienie. Gdy jedne widełki cokolwiek odstroimy przez naklejenie na koniec widełek grudki wosku, to przy równoczesnem brzmieniu obu par słyszymy perjodyczne nabrzmiewanie i zaninikanie współbrzmienia. Widocznie w pewnych chwilach obie pary równocześnie wysyłają zgęszczenia i rozrzedzenia, w innych zaś chwilach jedne widełki wysyłają zgęszczenie, gdy drugie równocześnie dają rozrzedzenie.

Zjawisko powyższe nazywamy **dudnieniem**.

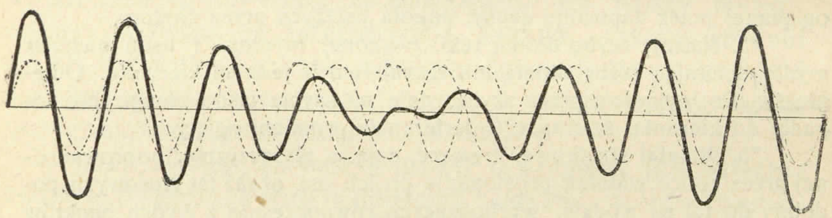
Zadanie.

1. Obliczyć, ile dudnień na sekundę dają dwa tony o wysokościach n_1 i n_2 $(n_2 > n_1)$.

Od jednego nabrzmienia tonu do następnego, co stanowi jedno dudnienie, upływa czas taki, w którym na p drgień jednego tonu wypada $p+1$ drgnień tonu drugiego. Ponieważ wtedy $n_1 : n_2 = p : p+1$, zatem $p = \frac{n_1}{n_2 - n_1}$.

Gdy pierwszy ton ma n_1 drgnień w sekundzie, to na sekundę mamy dudnień $\frac{n_1}{p} = \frac{n_2}{p+1} = n_2 - n_1$.

2. Przedstawić rysunkiem falę złożoną poprzeczną, wypadkową dwu fal dających dudnienia, gdy $p = 5$. Przykład dla $p = 8$ (ryc. 41).



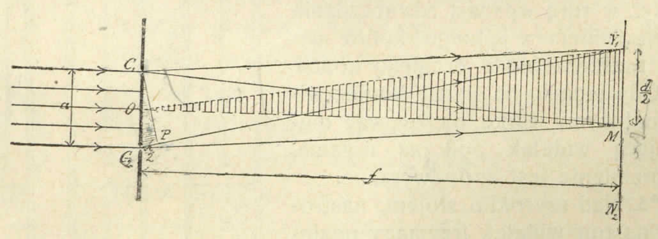
nabrzmienie osłabienie nabrzmienie

Ryc. 41

§ 19. Obliczenie długości fali świetlnej.

1 Opierając się na doświadczeniu II § 18, 3 można obliczyć długość fali światła.

Nazwijmy a oddanie szczelin C_1 i C_2, oświetlonych światłem jednobarwnem (ryc. 42), d oddalenie prążków ciemnych



Ryc. 42.

N_1 i N_2, między któremi znajduje się prążek jasny M, f oddalenie szczelin od tła. Wtedy w szczelinach C_1 i C_2 będą jednakie

fazy, a zgaszenie światła w N_1 nastąpi wtedy, gdy różnica dróg światła C_2N_1 $C_1N_1 = C_2P = \frac{\lambda}{2}$.

Z podobieństwa $\triangle C_1C_2P \sim ON_1M$ i z uwagi, że a i d są bardzo małe wobec f, wynika $\frac{\lambda}{2} \cdot a = \frac{d}{2} \cdot f$, skąd

$$\boxed{\lambda = \frac{ad}{f}.}$$

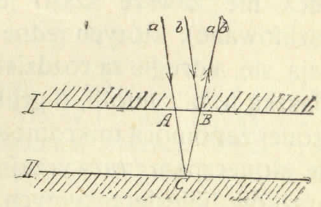
W pewnem doświadczeniu ze światłem czerwonem zmierzono wielkości $a = 0{,}5\ mm$, $d_{cz} = 0{,}8\ mm$, $f = 600\ mm$. Stąd oblicza się $\lambda_{cz} = 0{,}5\ \ 0{,}8\ \ 600 = 0{,}00066\ mm$. Dla światła niebieskiego: $a = 0{,}5\ mm$, $d_n = 0{,}55\ mm$, $f = 600\ mm$, $\lambda_n = 0{,}5 . 0{,}55 \cdot 600 = 0{,}00046\ mm$.

Znając prędkość światła i długość fali pewnej barwy, można obliczyć z równania $c = \lambda n$ (II § 2, 2) liczbę drgnień, odpowiadającą tej barwie. Obliczamy $n_{cz} = 450.10^{12}/sek$, $n_n = 650.10^{12}/sek$.

Ponieważ promienie światła powstają zawsze w ciele materjalnem, należy więc przypuścić, że przyczyną światła muszą być drgania, króre odbywają się w najdrobniejszych cząstkach materji z częstością setek biljonów na sekundę. Jakiego rodzaju są te drgania, poprzeczne, czy podłużne, co właściwie drga w promieniu, tego ze zjawisk interferencji i uginania wywnioskować nie można.

3. Wiele innych zjawisk interferencji światła posłużyć może także do zmierzenia długości fali świetlnej. Do nich należą **barwy cienkich płytek**.

Pomyślny promień światła jednobarwnego, padający w szkle w kierunku prawie prostopadłym na cieńką warstewkę powietrza o grubości a (ryc. 43). Promienie padające a i b mają w punktach A i B jednakowe fazy, one częściowo odbijają się od powierzchni granicznej I, częściowo zaś przechodzą przez warstewkę powietrza, odbijają się od powierzchni II i wracają znów w szkło tak, że w punkcie B mamy oba promienie, które jednak z powodu różnicy dróg i odbicia się w C mogą



Ryc. 43.

mieć w tym punkcie B różne fazy Różnica dróg przebytych wynosi $AC + CB = 2d$. Prócz tego promień a nie odbija się w punkcie C tą samą fazą, z jaką do C przyszedł. Według

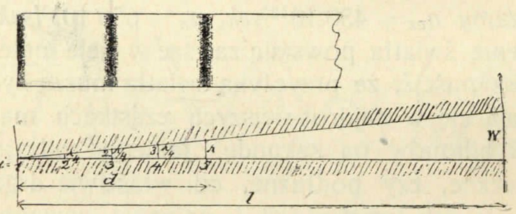
II § 4 Pyt. 1 fala odbita od gęstszego przewodnika odbija się fazą przeciwną, to znaczy tak, jak gdyby droga promienia jeszcze o $\frac{\lambda}{2}$ została przedłużona. Jeżeli sumę tych dróg $2d+\frac{\lambda}{2}$ położymy równą $i.\frac{\lambda}{2}$, to wskutek interferencji nastąpi w B dla i nieparzystego zgaszenie światła, a wzmocnienie dla i parzystego.

Z równania $2d+\frac{\lambda}{2}=i\frac{\lambda}{2}$, otrzymujemy $d=(i\ \ 1)\frac{\lambda}{4}$, zatem

dla	$i=1$,	2,	3,	4,	5,
jest	$d=0$,	$1\frac{\lambda}{4}$,	$2.\frac{\lambda}{4}$,	$3\frac{\lambda}{4}$,	$4.\frac{\lambda}{4}$,
prążek	ciemny	jasny	ciemny	jasny	ciemny

co daje nam warunki, pod jakiemi warstewka powietrza w promieniach światła jednobarwnego jest jasna lub ciemna.

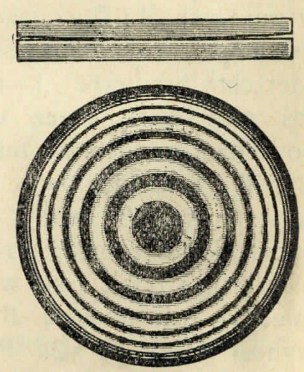
Gdy grubość warstewki jest zmienna, otrzymujemy **prążki interferencyjne**. Dla cienkiego klina powietrznego (ryc. 44), w którym d jest podwójnem oddaleniem prążków, l długością, a w grubością, jest $\lambda\ \ w=d\ \ l$, skąd $\lambda=\frac{wd}{l}$.



Ryc. 44.

N. p. zmierzono w świetle czerwonem $w=0{,}07\,mm$, $d_{cz}=2\ mm$, $l=200\ mm$, skąd oblicza się $\lambda_{cz}=0{,}07.2\ \ 200=0{,}0007\ mm$.

*Cienki klin powietrza otrzymać możemy przez położenie dwóch płytek szkła lustrzanego (2 do 3 *cm* szerokich, 20 *cm* długich, co najmniej 8 *mm* grubych, (lecz nie zawsze szkło jest dobrze oszlifowane), których jedne końce stykają się, a drugie są rozdzielone cienką blaszką n. p. cynfolji, o grubości zmierzonej zapomocą mikrometru. W świetle słonecznem zazwyczaj nie widać prążków interferencyjnych, wyraźnie widoczne stają się one w świetle jednobarwnem, które możemy otrzymać (n. p. żółte), gdy duży płomień spirytusowy lub gazowy zabarwimy na żółto przez stapianie w nim skrawka szyby szklanej.



Ryc. 45.

$2d+\frac{\lambda}{2}=i\frac{\lambda}{2}$ $2d=i\frac{\lambda}{2}-\frac{\lambda}{2}$ $2d=(i-1)\frac{\lambda}{2}$ $d=(i-1)\frac{\lambda}{4}$

Newton użył do okazania tego zjawiska dwóch płytek szklanych okrągłych, z których jedna była płaska, druga cokolwiek wypukła (ryc. 45). Oglądając płytki w świetle słonecznem odbitem, widzimy w miejscu zetknięcia się płytek ciemną plamę, a dokoła niej **barwne pierścienie**. Przez przykręcenie śrub, przyciskających szkła do siebie, pierścienie barwne powiększają się i przesuwają.

4. Zamiast cienkiej warstwy powietrza między płytkami szklanemi można do badania zjawisk interferencji użyć cienkiej warstewki ciała przeźroczystego w powietrzu. Wynik rachunku będzie zupełnie podobny do przeprowadzonego powyżej z tą tylko różnicą, że w miejscu o grubości warstewki *0* powstaje zamiast ciemnego prążka prążek jasny. Takiemi warstewkami są cienkie błony w bańkach mydlanych, niektóre ciecze rozlane na wodzie i t. p.

Pytania.

1. Jak należałoby urządzić doświadczenie w ust. 3 z klinem powietrza, aby zapomocą niego można było mierzyć małe długości? (Znając λ, d, l, obliczać w. Może to być użyteczne n. p. do mierzenia rozszerzalności ciał, do sprawdzania wymiarów i t. p. Mierzenie długości zapomocą fal świetlnych należy do najważniejszych zastosowań interferencji światła).

2. Według II § 2 Pyt. 1 ruch falowy jest przeniesieniem energji; w II § 14 Pyt. 1 stwierdziliśmy, że świecenie jest połączone z wyczerpywaniem się energji źródła światła. Stąd wnosić należy, że gdy na ciało padają promienie światła, a ciało to część promieni w sobie zatrzymuje czyli pochłania, to wtedy musi w ciele odbyć się przekształcenie energji świetlnej na jakąś inną. Czy są ci znane przykłady, uzasadniające ten wniosek? [Ciała oświetlone ogrzewają się (wzrost energji kinetycznej cząsteczkowej), promienie światła fotografują (energja chemiczna), poruszają wiatraczek w **radjometrze Crookesa** (czytaj: Kruks). energja mechaniczna)]

Ćwiczenia.

*1. Ustaw szkiełko zegarkowe z wodą na czarnem tle, a na wodę spuść kroplę terpentyny (nafty, benzolu). Kropla rozlewa się na wodzie i tworzy warstewkę, okazującą **barwy cienkich blaszek**. Zważ kroplę terpentyny przez zważenie 50 kropel, oblicz stąd objętość kropli, znając jej gęstość z I str. 166 Tablica III, oceń powierzchnię kropli rozlanej na wodzie, porównując ją z powierzchnią wody w naczyńku i oblicz stąd grubość warstewki, dającej zabarwienia interferencyjne.

*2. Utwórz z drutu miedzianego 1 *mm* grubego pierścień o średnicy 5 *cm*. Utwierdź go w drewnianej podstawce, aby mógł stać w płaszczyźnie pionowej. Zanurz go w czysty roztwór mydła z dodatkiem gliceryny aby utworzyła się błonka [mydlana na pierścieniu i nakryj to wraz z podstawką kloszem szklanym. Po krótkim czasie powstają na błonce barwne smugi, przyczem górna część błonki wydaje się całkiem czarną.

*3. Oglądaj w żółtem świetle sodowem prążki interferencyjne, powstające w płytkach ze szkła lustrzanego (o wymiarach 3 *cm* × 6 *cm*), nakreśl otrzymaną figurę i odczytaj z niej, jaki kształt mają powierzchnie stykające się. (Płytki należy wprzód troskliwie wymyć i osuszyć, aby wystąpiło, przez samo tylko położenie jednej na drugą, wyraźne przyleganie między powierzchniami. W kierunku prostopadłym do prążków, idąc od strony wklęsłej prążka ku wypukłej, płytki oddalają się od siebie, a różnica ich oddaleń wynosi pół długości fali światła żółtego, t. j. 0,0003 *mm* w punktach, przez które przechodzą dwa sąsiednie prążki (ryc. 44).)

Zadania.

1. Światło widzialne złożone jest z barw, których fale w powietrzu mają następujące długości:

część	czerwona	od	0,00074	*mm*
"	pomarańczowa	"	65	"
"	żółta	"	59	"
"	zielona	"	55	"
"	niebieska	"	49	"
"	błękitna	"	45	"
"	fiołkowa	"	42	"
		do	37	"

Obliczyć jakie liczby drgnień odpowiadają tym długościom fal światła. (Według II § 2, 2: $c = \lambda N$).

2. Porównajmy barwy światła z tonami skali diatonicznej. Gdy fala tonu zasadniczego ma długość ·74, to długości fal tonów skali otrzymamy, mnożąc tę długość przez liczby 1, $\frac{8}{9}$, $\frac{4}{5}$, $\frac{3}{4}$, $\frac{2}{3}$, $\frac{3}{5}$, $\frac{8}{15}$, $\frac{1}{2}$.

Okaże się, że z wielkiem przybliżeniem, gdy ton zasadniczy nazwiemy *C*, odstępom między tonami

	C	*D*	*E*	*F*	*G*	*A*	*J*	*c*
odpowiadają części:	czerwona	pomarańcz.	żółta	zielona	niebieska	błękitna	fiołkowa	

Skalę diatoniczną dur zmieniono tylko przez zastąpienie septymy wielkiej *H* septymą naturalną *J*, dla której długość fali wynosi $\frac{4}{7}$.

§ 20. Zasada fal elementarnych.

1. Zjawisko uginania się promieni światła w wąskich otworach odbywa się tak, jak gdyby otwór oświetlony sam stawał się źródłem fal świetlnych (Porównaj II § 17, 2 i § 18, 2 i 3).

Możnaby przypuścić, że tylko promienie na krawędziach otworu ulegają ugięciu. W takim razie zjawisko ugięcia w otworze o szerokości *a* powinnoby dać wynik zgodny z interferencją w dwóch szczelinach, odległych od siebie o *a*. Doświadczenie jednak przeczy takiemu rozumowaniu: wynik ugięcia w otworze

o szerokości *a* będzie zgodny z interferencją w dwóch szczelinach, ale wtedy, gdy ich oddalenie wynosi $\frac{a}{2}$. Aby to wyjaśnić, należy przyjąć, że nie tylko promienie przechodzące obok krawędzi otworu uginają się, ale że wszystkie promienie w otworze ulegają ugięciu.

Stąd dalszy wniosek, że promienie uginają się nie tylko w wąskim otworze, ale że uginają się ciągle i w każdym punkcie, dokąd dochodzą, na wszystkie strony. Za wąskim otworem istnieją jednak warunki, że interferencję promieni ugiętych możemy spostrzegać, podczas gdy jasność wiązki szerokiej uniemożliwia widzenie prążków interferencyjnych.

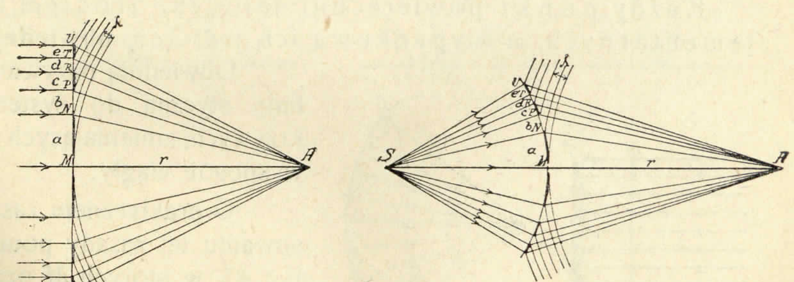
Ale co w tym razie oznacza promień światła i jak wyjaśnić prostolinjowe rozchodzenie się światła wobec ciągłego uginania się promieni?

2. Z punktu świecącego rozchodzą się na wszystke strony **promienie** czyli kierunki, po których biegną fale. Jeśli przewodnik (ośrodek), w którym to się odbywa, ma wszędzie jednakie własności, to zn jeśli światło we wszystkich kierunkach rozchodzi się z tą samą prędkością, to wszystkie punkty fali, mające tę samą fazę, znajdują się na powierzchni kuli. Taką powierzchnię nazywamy **powierzchnią fali**. W tym razie mamy **falę kulistą**.

Dla bardzo odległego źródła światła powierzchnia fali jest płaszczyzną. Nazywamy ją **falą płaską**.

W każdym przypadku promienie są do powierzchni fali prostopadłe, w fali kulistej promienie są **rozbieżne** w fali płaskiej **równoległe**.

3. Wyobraźmy sobie falę płaską albo wypukłą (ryc. 46),



Ryc. 46.

pomyślmy, że każdy punkt tej fali wysyła promienie ugięte do punktu dowolnego *A* i zastanówmy się, co się z temi promieniami w tym punkcie dzieje. Bez wątpienia wystąpi tam interferencja tych wszystkich promieni; promienie różniące się o $\frac{\lambda}{2}$ zniszczą się. Aby wynaleźć te promienie znoszące się, zatoczymy z punktu A kule o promieniach $AM = r$, $AN = r + \frac{\lambda}{2}$, $AP = r + 2\frac{\lambda}{2}$,... Otrzymamy na powierzchni fali pierścienie o szerokości a, b, c, d,.. i to takie, że każdemu promieniowi z pierścienia a odpowie jakiś promień z pierścienia b, różniący się w długości o $\frac{\lambda}{2}$. Działania więc promieni z pierścieni a i b w punkcie A zniosą się; tak samo z pierścienie c i d i t. d., pozostanie zaś działanie tylko samego punktu M wraz z najbliższem otoczeniem, dające p r o m i e ń MA p r o s t o p a d ł y d o p o w i e r z c h n i f a l i.

Na tem zasadza się **prawo prostolinijnego rozchodzenia się światła.**

4. Tę samą myśl można wyrazić jeszcze inaczej.

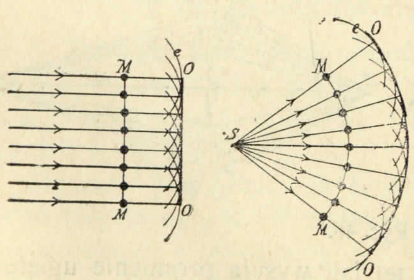
Opierając się na okazanej analogji fal świetlnych z wodnemi (ryc. 38), można powiedzieć, że każdy punkt przestrzeni, do którego dochodzą fale świetlne, staje się środkiem nowych fal kulistych Wskutek tego do punktu A dochodzi w pewnej chwili nieskończenie wiele fal z wszystkich punktów oświetlonej przestrzeni. Jednakowoż tylko te z nich mogą się składać w światło, które w p u n k c i e A m a j ą r ó w n o c z e ś n i e t ę s a m ą f a z ę i w s p ó l n ą s t y c z n ę, zatem tylko te, które mają swe środki w punkcie M i jego najbliższem otoczeniu.

Jest to **zasada fal elementarnych Huygensa**, którą tak można wyrazić:

K a ż d y p u n k t p o w i e r z c h n i f a l i j e s t ź r ó d ł e m f a l e l e m e n t a r n y c h, a w y p a d k o w ą i c h j e s t i c h **obwiednia.**

Obwiednią nazywamy linję styczną do systemu krzywych, zmieniających się w sposób ciągły

O praktycznem zastosowaniu tej zasady pouczą ryc. 47, w których M oznaczają środki fal elementarnych e, dających jako obwiednię linję OO.



Ryc. 47

Ćwiczenia.

*1. W naczyniu, opisanem w II § 17, 2 wywołuj fale zapomocą pręta drgającego, dotykającego wody w dwóch punktach, odległych o 20 *cm*. Przekonasz się, że otrzymamy obraz interferencji fal zgodny z ryc. 38. Czego to dowodzi?

*2. W naczyniu tem samem wywołuj fale zapomocą pręta drgającego, na który nałożona jest pozioma linijka drewniana, dotykająca wody całą swą długością 30 *cm*. Powstaje fala płaska.

*3. Zamiast linijki drewnianej w poprzedniem ćwiczeniu nałóż na pręt drgający linijkę poziomą z nabitemi na niej pionowo gwoździami (7 gwoździ w oddaleniach po 5 *cm*). Powstaje również fala płaska.

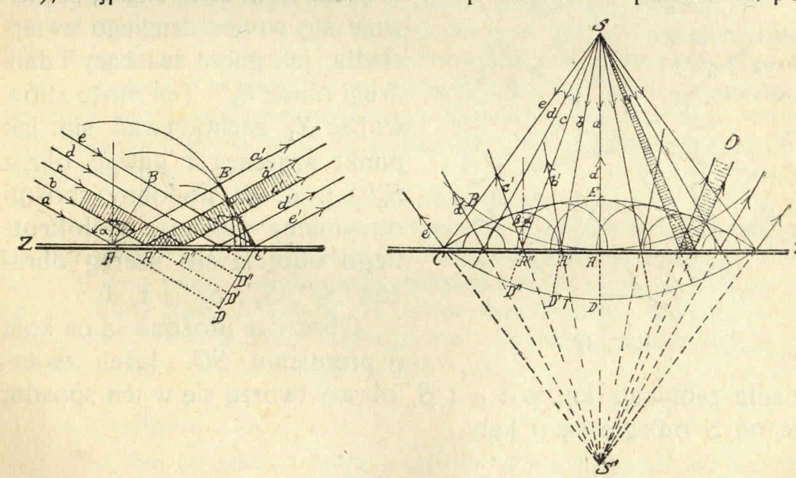
B. ODBIJANIE ŚWIATŁA (REFLEKSJA).

§ 21 Zwierciadła płaskie.

1. Gdy fala świetlna, rozchodząca się w pewnym przewodniku, padnie na powierzchnię ciała o gęstości różnej od gęstości przewodnika, (patrz II § 4, 4), wtedy następuje odbicie się fali od tej powierzchni. Powierzchnia ta może być chropawa lub wygładzona. W pierwszym przypadku światło odbite jest **rozprószone**, w drugim odbija się prawidłowo i wtedy powierzchnię odbijającą nazywamy **zwierciadłem**.

Zachowanie się fali, odbitej od zwierciadła płaskiego, zbadamy, używając zasady fal elementarnych.

Gdy fala płaska lub kulista AB pada na zwierciadło Z (ryc. 48), najpierw uderza o zwierciadło promień a w punkcie A, potem b, c, d, a wreszcie e w punkcie C. Każdy punkt zwierciadła, na który pada promień, staje się źródłem fal elementarnych



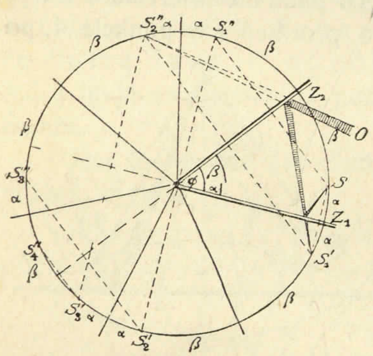
Ryc. 48.

Zażądajmy fali wypadkowej odbitej, utworzonej w chwili, gdy promień e dochodzi do C. Wtedy promień a wytworzy falę elementarną o wielkości AD, a inne promienie fale elementarne o wielkości, równej odcinkowi promienia, zawartego między zwierciadłem a powierzchnią fali DC. Obwiednia tych fal CE jest falą odbitą, a prostopadłe do tej obwiedni, to promienie odbite a', b', c', d', e'

2. Kąt α, zawarty między promieniem padającym i prostopadłą do zwierciadła (**prostopadłą padania**), nazywamy **kątem padania**, kąt β między promieniem odbitym i prostopadłą padania nazywamy **kątem odbicia**. Ze względów geometrycznych wynika, że k ą t o d b i c i a r ó w n y j e s t k ą t o w i p a d a n i a.

Gdy w drodze promieni odbitych rozbieżnych znajduje się oko O, to ono widzi punkt świecący S tam, gdzie przecinają się wsteczne przedłużenia promieni (II § 14, 2). Tam jest **obraz pozorny** S' punktu świecącego S. Ze względów geometrycznych wynika, że p u n k t ś w i e c ą c y i j e g o o b r a z w z w i e r c i e d l e p ł a s k i e m s ą p o ł o ż o n e s y m e t r y c z n i e p o o b u s t r o n a c h z w i e r c i a d ł a.

Jeżeli promienie, odbite od jednego zwierciadła Z_1, padają na drugie Z_2 (ryc. 49), tworzące z pierwszem pewien kąt ϕ, wówczas obraz S_1', utworzony w pierwszem zwierciedle, zachowuje się wobec drugiego zwierciadła, jak punkt świecący i daje drugi obraz S_2'' Ten może znów wobec Z_1 zachowywać się jak punkt świecący i dawać obraz S_3' i t. d. W podobny sposób otrzymamy wskutek **wielokrotnego odbicia się** szereg obrazów S_1'', S_2', S_3'' i t. d.



Ryc. 49.

Obrazy te ułożone są na kole o promieniu SO. Jeżeli zwierciadła zamykają kąt $\phi = \alpha + \beta$, obrazy tworzą się w ten sposób, że od S odległe są o kąty

S_1',	S_2',	S_3'
$2\ \alpha$,	$2\,(\alpha+\beta)$,	$2\ \alpha+\beta+\alpha)$,
S_1'',	S_2''	S_3'',
$2\ \beta$,	$2\,(\beta+\alpha)$,	$2\,(\beta+\alpha+\beta)$, .

Gdybyśmy to koło promieniami podzielili na wycinki o kącie ϕ, to w każdym wycinku byłby jeden obraz, z wyjątkiem wycinka przeciwległego zwierciadłu, gdzie wogólę mogą być dwa obrazy; obrazy te jednak spadają w jeden, gdy kąt ϕ mieści się parzystą liczbą razy w 360°. W tym przypadku o b r a z ó w w r a z z p u n k t e m ś w i e c ą c y m j e s t t y l e, i l e r a z y k ą t, j a k i t w o r z ą z w i e r c i a d ł a, m i e ś c i s i ę w 360°

4. Także fale głosowe, uderzające o ścianę, odbijają się od niej i wywołują wrażenie, zwane **odgłosem** albo **echem.** Gdy odległość odbijającej ściany jest zbyt mała, echo zlewa się z pierwotnym dźwiękiem, przedłuża go i wzmacnia. To wzmocnienie i przedłużenie dźwięku nazywamy **pogłosem.**

Aby nastąpiło odbicie fal głosowych w pewnym kierunku, musi powierzchnia odbijająca być płaską lub regularnie zakrzywioną.

W wielkich salach, teatrach, odgłos i pogłos często przeszkadzają dobremu słyszeniu lub psują wrażenie muzyki, śpiewu. Usuwa się je przez umieszczenie framug, filarów, przez rozwieszenie draperyj. (Akustyczność sal).

Pytania.

1. Z jakich materjałów robimy zwierciadła? Czy barwa materjału ma wpływ na bieg promieni odbitych, czy ma wpływ na barwę promieni odbitych? Czy zwierciadło musi być ciałem nieprzezroczystem?

2. Czy dla fal głosowych zwierciadło musi być tak wypolerowane, jak dla promieni świetlnych? (Fale głosowe są setki tysięcy razy dłuższe od fal świetlnych, w takim też stosunku mogłaby być powiększona chropowatość zwierciadła, przeznaczonego dla promieni światła, aby w równym stopniu dobrze odbijało głos. Dlatego głos może odbijać się od ściany budynku, góry, lasu).

3. Co to jest **echo wielozgłoskowe**, co **wielokrotne?**

4. Do XIX wieku wyobrażano sobie, że ciała świecące wyrzucają z siebie materję świetlną w postaci drobnych ciałek sprężystych i nieważkich. Była to tak zwana **teorja emisyjna** światła, która ustąpiła **teorji falowej**. Jakie zjawiska świetlne można wytłumaczyć przy pomocy teorji emisyjnej? [Zjawiska prostolinjowego rozchodzenia się światła (I § 15, b) i odbijania się promieni (I § 38, c, 2)].

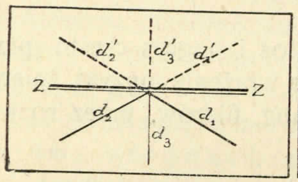
Ćwiczenia.

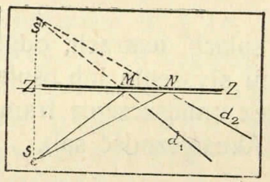
*1. Oklej lusterko ciemnym papierem z wyciętą szczeliną szerokości 3 *mm.* Lusterko, ustawione w promieniach słonecznych, odbija linję świetlną, którą można skierować na inne, większe zwierciadło, leżące na stole i która odbija się od niego, dając na ścianie (zasłonie, tle) jasny obraz szczeliny Ustaw na stole, w promieniach linji świetlnej, pionowo, duży kątomierz tekturowy tak, aby tak promień padający, jak i odbity, widoczne były na kątomierzu. Sprawdź, że kąt odbicia równy jest kątowi padania.

*2. W drogę promienia, wychodącego ze szczeliny, (odbitego od lusterka w Ćw 1), wprowadź czystą szybkę szklaną i badaj jasność obrazu szczeliny na tle. Czy jasność zależy od kąta, jaki tworzy szybka z promieniem padającym? (Szybka część promieni odbija, resztę zaś przepuszcza). Kiedy jasność obrazu jest najmniejsza? Szukaj obrazu odbitego od szybki na powale i na ścianach pokoju.

*3. Zamiast zwierciadła z Ćw 1 połóż na stole arkusz białego papieru. Na tle nie będzie obrazu, ale kartka papieru trzymana ukośnie nad arkuszem będzie we wszystkich kierunkach rozjaśniona światłem rozprószonem.

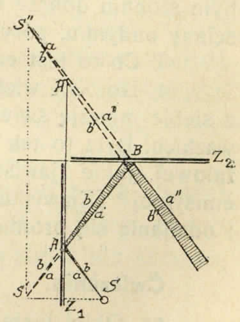
*4. Przygotuj zwierciadło Z, stojące na stole pionowo, arkusz papieru i trzy cienkie, długie, dokładnie proste druty. Ułóż je, jak wskazano na ryc. 50, aby d_2 stanowił przedłużenie obrazu d_1', a wtedy także i d_1 d_2' stanowić będą linję prostą. Wreszcie d_3 ma być przedłużenim d_3' Wykreśliwszy linję zwierciadła ZZ i proste d_1, d_2, d_3, przekonaj się, że $d_3 \perp ZZ$, i $\sphericalangle (d_1 d_3) = (d_2 d_3)$.


Ryc. 50.


Ryc. 51.

*5. Ustaw zwierciadło pionowo na poziomo rozpiętym arkuszu papieru. Naznacz przed zwierciadłem na papierze ołówkiem punkt dowolny S (ryc. 51), a z niego poprowadź do zwierciadła dwie dowolne proste SM i SN. Następnie ułóż dwa druty d_1, d_2 tak, aby były przedłużeniami obrazów odcinków SM i SN, widzianych w zwierciedle. Wykreśl d_1 i d_2, usuń druty i zwierciadło, przedłuż d_1 i d_2 do przecięcia się w punkcie S' i połącz prostą S z S'. Przekonaj się, że $SS' \perp ZZ$ i $SP = S'P$

*6. Nakreśl na arkuszu papieru obraz, powstający wskutek dwukrotnego odbicia się w zwierciadłach Z_1 i Z_2, tworzących kąt prosty (ryc, 52). Następnie ustaw wzdłuż nakreślonych linij zwierciadła i patrz w kierunku promieni ostatnio odbitych. Ujrzysz cały przebieg promienia, jako linję prostą, chociaż promień jest dwukrotnie wskutek odbicia załamany.

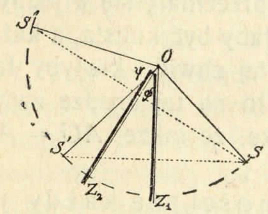

Ryc. 52.

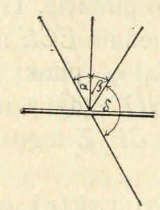
*7. Ustaw dwa zwierciadła tak, aby z poziomem tworzyły kąty 45°, a krawędź ich była pozioma. Gdy umieścimy głowę swoją, mniej-więcej na wysokości krawędzi, ujrzymy obraz twarzy odwrócony. Nakreśl bieg promieni objaśniający odwrócenie obrazu.

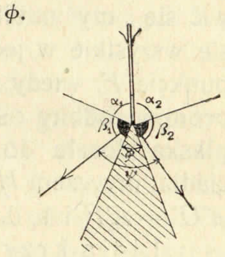
Zadania.

1. Zwierciadło oddala się od punktu świecącego, w kierunku prostopadłym do powierzchni zwierciadła, z prędkością c; z jaką prędkością oddala się obraz od punktu świecącego?

2. Zwierciadło obróciło się około pewnej osi o kąt ϕ. O jaki kąt ψ około tej samej osi przesunął się obraz punktu (ryc. 53)? $\sphericalangle SOS' = 2. Z_1OS'$, $\sphericalangle SOS'' = 2. Z_2OS''$, stąd $\psi = 2\phi$.


Ryc. 53.

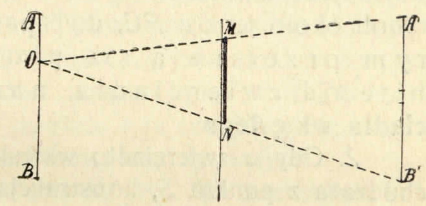

Ryc. 54.


Ryc. 55.

3. Promień pada na zwierciadło pod kątem α (ryc. 54); jakie jest **zboczenie** δ tego promienia wskutek odbicia [$\delta = 180 - 2\alpha = 2\,(90 - \alpha)$].

4. Promień pada na krawędź kryształu w płaszczyźnie do tej krawędzi prostopadłej (ryc. 55). Znaleźć kąt między promieniami odbitemi ψ, gdy kąt dwuścienny kryształu jest ϕ. ($\phi = 180 \quad (\alpha_1 + \alpha_2)$, $\psi = 360 - 2(\alpha_1 + \alpha_2)$, stąd $\psi = 2\phi$).

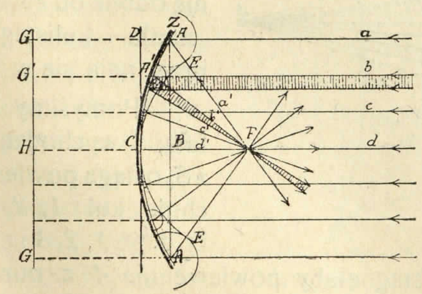
5. Jaką wysokość musi mieć zwierciadło, aby człowiek całą swoją postać mógł w niem oglądać? (Ryc. 56). AB człowiek, $A'B'$ jego obraz, O oko, MN wielkość zwierciadła. $MN : A'B' = OM : OA' = 1 : 2$).


Ryc. 56

§ 22. Zwierciadła kuliste.

1. Zwierciadła kuliste mogą być **wklęsłe** lub **wypukłe**.

Gdy **fala płaska** ABA (ryc. 57) pada na zwierciadło wklęsłe Z, najpierw uderza o nie promień a w punkcie A, potem b, c, a wreszcie d w punkcie C. Każdy punkt zwierciadła, na który pada promień, staje się źródłem fal elementarnych. Zażądajmy fali wypadkowej odbitej, wytworzonej w chwili, gdy promień d dochodzi do C. Wtedy promień a wytworzy falę elementarną o wiel-

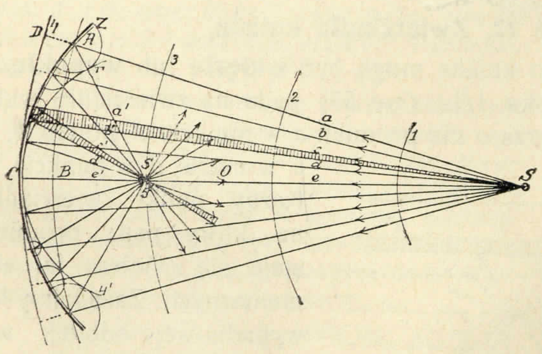

Ryc. 57.

kości AD, a inne promienie fale elementarne o wielkości, równej odcinkowi promienia, zawartego między zwierciadłem a powierzchnią fali DC. Obwiednia tych fal ECE jest falą odbitą, a prostopadłe do tej obwiedni, to promienie odbite a', b', c', d'

Promienie odbite są zbieżne, jednakowoż należy zastanowić się, czy odbite od zwierciadła kulistego, mogą przeciąć się wszystkie w jednym punkcie. Gdyby przecinały się w jednym punkcie F, wtedy obwiednia ECE musiałaby być kulistą, a każdy promień odbity osiągnąłby punkt F w tej chwili, kiedyby fala płaska doszła do GHG, gdyby nie było na tej drodze zwierciadła, przyczem $HC = CF$. Z tego wynika, że także $AG = AF$, $A'G' = A'F$ i t. d.

L i n j a k r z y w a o t a k i e j w ł a s n o ś c i, ż e k a ż d y j e j p u n k t j e s t j e d n a k o w o o d d a l o n y o d p e w n e j p r o s t e j i o d p e w n e g o p u n k t u, n a z y w a s i ę **parabolą**. Prosta GG nazywa się **kierownicą**, punkt F **ogniskiem**, a prosta przechodząca przez C i F **osią** paraboli. Zatem nie kulą musi być zwierciadło wklęsłe, w którem promienie równoległe po odbiciu przecinają się w jednym punkcie, lecz powierzchnią, powstającą z obrotu paraboli około jej osi FC, czyli **paraboloidą**. P u n k t F, w k t ó r y m p r z e c i n a j ą s i ę p r o m i e n i e r ó w n o l e g ł e, o d b i t e o d z w i e r c i a d ł a, n a z y w a m y **ogniskiem zwierciadła wklęsłego**.

2. Gdy o zwierciadło wklęsłe Z uderza fala kulista, wychodząca z punktu S, konstrukcja fali odbitej, uskuteczniona za pomocą fal elementarnych (ryc. 58), prowadzi także do promieni odbitych, zbieżnych w punkcie S' Tu znów należy się zastanowić, czy wszystkie promienie odbite od zwierciadła kulistego przecinają się w S'



Ryc. 58.

Pomyślmy, że fala, wychodząca z S, osiąga powierzchnie kul *1*, *2*, *3* i t. d. po 1, 2, 3 i t. d. chwilach. W chwili 4 fala osiągnęłaby powierzchnię *4* z punktem C, lecz już w tej samej chwili mamy falę odbitą *4'*, która

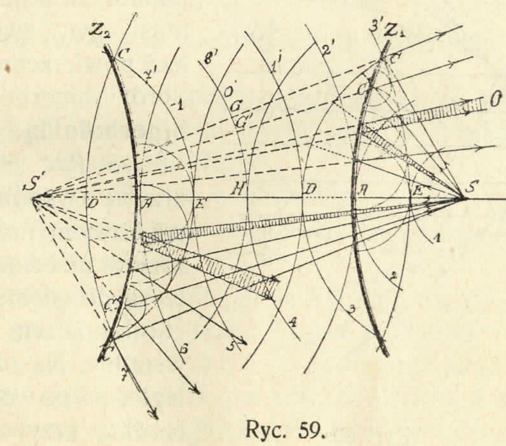
w dalszym ciągu posuwa się, malejąc w chwili 5 do punktu S'. Z powyższego wynika, że w s z y s t k i e p r o m i e n i e, wychodzące z S, odbite od zwierciadła i dochodzące do S', o d b y w a j ą s w o j e d r o g i w t y m s a m y m c z a s i e, a ponieważ odbywają je w jednym przewodniku, a więc ze stałą prędkością, p r z e t o d r o g i, j a k i e o d b y w a j ą p r o m i e n i e o d S d o S' s ą r ó w n e.

$$SA + AS' = SA' + A'S' = \ldots = SC + CS'.$$

*Gdy w punktach S i S', wbijmy w tablicę gwoździe, przywiążemy do nich sznurek o długości $SC + CS'$ i założywszy w punkcie C kredę, nakreślimy linję krzywą o powyższej własności, otrzymamy nie koło, lecz linję krzywą o takiej własności, że s u m a **promieni wodzących** SA i $S'A$ m a s t a ł ą w a r t o ś ć. Taką linję krzywą nazywamy **elipsą,** punkty S i S' są jej **ogniskami,** a prosta, przechodząca przez ogniska, **osią wielką** elipsy.

Zatem nie kulą musi być zwierciadło wklęsłe o tej własności, że promienie, wychodzące z jednego punktu, po odbiciu przecinają się w jednym punkcie, lecz powierzchnią, powstająca z obrotu elipsy około jej osi czyli **elipsoidą,** a punkt świecący i jego obraz są tej elipsoidy ogniskami. Do oka, umieszczonego na drodze promieni poza S', dochodzą promienie rozbieżne zupełnie tak samo. jak gdyby w punkcie tym znajdował się punkt świecący. Dlatego obraz ten nazywamy **rzeczywistym.**

3. Gdy na zwierciadło wklęsłe Z_1 (ryc. 59) uderza fala kulista, wychodząca z punktu S, położonego między zwiarciadłem A a jego ogniskiem F, konstrukcja fali odbitej zapomocą fal elementarnych prowadzi nas do promieni odbitych, rozbieżnych, których wsteczne przedłużenia przecinają się w punkcie S'. Oko zatem O, umieszczone na drodze promieni, widzi **obraz pozorny** punktu świecącego S w punkcie S' Tu także należy roz-



Ryc. 59.

ważyć, czy zwierciadło kuliste wklęsłe odbija tak promienie, jak gdyby wszystkie wychodziły z jednego punktu poza zwierciadłem. Pomyślmy, że fala wychodząca z S, w chwili 2 dotyka zwierciadła w punkcie A, w chwili 3 zaś osiągnęłaby powierzchnię kuli 3, lecz odbita od zwierciadła wtej samej chwili daje falę odbitą $3'$, która powiększając się posuwa się dalej. Z rysunku widoczne jest, że $SC = CG$, $SC' = C'G'$, . , $SA = AH$, bo każdy z tych odcinków, powiększony o odpowiedni promień fali elementarnej jest drogą przebywaną w trzech chwilach. Zatem do oka dochodzą fale, które już powinny były tworzyć powierzchnię GH, gdy fala wychodziła z punktu S, a więc z punktu S' powinny były wyjść w chwili 4. Znaczy to geometrycznie, że odcinki SC i $S'C$ różnią się od siebie o stałą wartość, czyli że $S'C \quad CS = S'C' \quad C'S = \ . \ = S'A \quad AS = S'H$

Linja krzywa o własności, że różnica promieni wodzących ma stałą wartość, nazywa się **hiperbolą.** S i S' są jej **ogniskami,** prosta przez S i S' przechodząca jest jej **osią.**

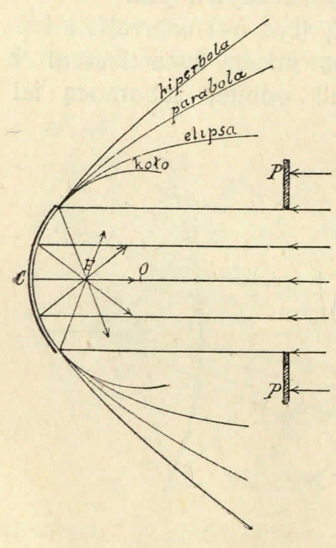
4. To samo oddalenie punktu świecącego i obrazu znajdziemy dla **zwierciadła wypukłego** (ryc. 59). Fala 7', odbita od zwierciadła Z_2, przedstawia koło o promieniu 3 jednostek, jak gdyby wychodziła z punktu S' dopiero w chwili 4. Zwierciadło wypukłe jest tu drugą gałęzią tej samej hiperboli, gdzie

$$SC \quad CS' = SC' - C'S' = . \ . = SH.$$

I tu promienie odbite są rozbieżne, dają więc **obraz pozorny.**

Z obu ostatnich przypadków widzimy, że, aby obraz pozorny punktu świecącego był punktem, musi być zwierciadło nie kulą, lecz powierzchnią utworzoną przez obrót hiperboli około osi czyli **hiperboloidą.**

5. Ryc. 60 przedstawia cztery krzywe o wspólnym **wierzchołku** C, tak bowiem nazywamy punkt, gdzie krzywe przecinają się z osią. Krzywe te są do siebie styczne w wierzchołku i tam tylko mają punkty wspólne. Na niewielkiej jednak odległości po obu stronach wierzchołka, krzywe te różnią się od



Ryc. 60.

siebie bardzo nieznacznie. Na tem opiera się możność zastąpienia zwierciadła eliptycznego, parabolicznego lub hiperbolicznego zwierciadłem kulistem, trzeba tylko wiązkę promieni padających na zwierciadło kuliste ograniczyć do promieni, tworzących z osią niewielkie kąty lub nieznacznie od osi oddalonych, czyli do **promieni przyosiowych,** a wykluczyć promienie inne tak, aby obraz punktu świecącego, który w zwierciadle kulistem jest zawsze mniejszem lub większem kółkiem, mógł być dowolnie zmniejszony

To ograniczenie promieni uskutecznia się zapomocą odpowiednich **przysłon.** Są to nieprzezroczyste płaszczyzny z wyciętemi otworami kołowemi (PP ryc. 60).

Pytania.

1. Dlaczego punkt, w którym skupiają się promienie równoległe, odbite od zwierciadła wklęsłego, nazywamy ogniskiem?
2. Stwierdź na rycinach 58 i 59, że punkt świecący i obraz są zamienne.
3. Wymień zastosowania zwierciadeł kulistych.

Ćwiczenia.

*1. W naczyniu opisanem w II § 17, 2 ustaw w pobliżu ściany skrawek blachy, zgięty w kształt zwierciadła kołowego. W różnych odległościach od niego wytwarzaj na wodzie fale płaskie i kołowe i badaj kształt fali odbitej w zwierciedle wklęsłem i wypukłem.

Zadania.

1. Wykreśl falę płaską odbitą w zwierciadle wypukłem? (Obraz punktu nieskończenie odległego jest **ogniskiem pozornem).**
2. Znaleźć obraz, gdy punkt świecący jest w środku kulistości zwierciadła.

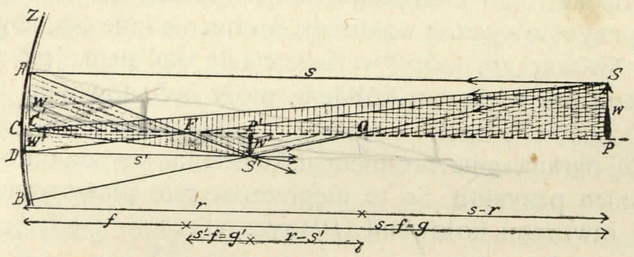
§ 23. Wielkość obrazu w zwierciadłach kulistych.

1. Nazywamy (ryc. 61) O **środkiem kulistości,** C **wierzchołkiem,** CO **osią,** F **ogniskiem** zwierciadła Z. Położenie ogniska jeszcze bliżej nie jest określone.

Przedmiot świecący SP ma **wielkość** w.

Obraz przedmiotu świecącego w zwierciedle wklęsłem wykreślimy następującą konstrukcją.

Promień równoległy SA odbija się ku ognisku F, **promień główny** SB, przechodzący przez środek kulistości zwierciadła O, odbija się sam w sobie, ponieważ pada prostopadle do elementu zwierciadła w punkcie B, **promień ogniskowy** SD, przechodzący przez ognisko F, odbija się równolegle do osi, wreszcie **promień wierzchołkowy** SC odbija się, jak i wszystkie inne, tak, że kąt odbicia się równy jest kątowi padania. Wszystkie te promienie wychodzące z S przecinają się po odbiciu w jednym punkcie S', który jest obrazem



Ryc. 61.

punktu S, pod warunkiem, że wszystkie te promienie są przyosiowe, co będzie ziszczone wtedy, gdy wysokość przedmiotu wobec promienia kulistości zwierciadła będzie nieznaczna. Wtedy także przedmiot SP, prostopadły do osi, da obraz $S'P'$ również do osi prostopadły Widzimy, że w przypadku przedstawionym na ryc. 61, obraz jest **pomniejszony** i **odwrócony**

2. Nazwijmy mierzoną od zwierciadła odległość przedmiotu świecącego s, obrazu s', ogniska (**ogniskowa**) f, środka kulistości (**promień kulistości**) r, a odległość punktu świecącego i obrazu od ogniska g i g' Z podobieństwa trójkątów jednakowo cieniowanych, wynikają proporcje

$$w.w'=s:s'=(s-r)\cdot(r-s')=(s-f).f=f:(s'-f),=g\cdot f=f\cdot g' \qquad \text{I}$$

bo dla promieni przyosiowych można bez popełnienia wielkiego błędu uważać, że C' i C przedstawiają tensam punkt.

Z powyższych proporcyj otrzymujemy równania

$$\boxed{\frac{1}{s}+\frac{1}{s'}=\frac{2}{r}=\frac{1}{f},} \qquad \text{II}$$

z czego wynika, że

$$\boxed{f=\frac{r}{2},} \qquad \text{III}$$

a dalej

$$\boxed{gg'=f^2} \qquad \text{IV}$$

3. Z równań powyższych wynikają następujące wnioski·

z III: Ognisko w zwierciedle kulistem znajduje się w punkcie połowiącym promień kulistości.

z II Punkt świecący i jego obraz są zamienne.

Gdy punkt świecący zbliża się do zwierciadła, jego obraz oddala się od zwierciadła.

z IV Punkt świecący i obraz są po tej samej stronie ogniska, oba przed niem albo oba za niem, bo f^2 ma zawsze wartość dodatnią, zatem g i g' muszą być jednakowego znaku.

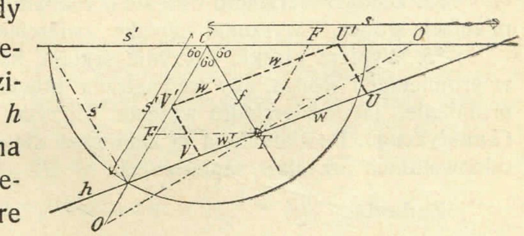
Punkt świecący i obraz są po obu stronach środka kulistości albo też są rozdzielone zwierciadłem, bo gdy $g > f$, musi być $g' < f$.

z I Powiększenie obrazu równe jest stosunkowi oddaleń obrazu i przedmiotu od zwierciadła, gdyż **powiększeniem** u nazywamy stosunek $w'\ w$, zatem

$$\boxed{u=\frac{s'}{s}.} \qquad \text{V}$$

4. Aby dla danego zwierciadła znaleźć punkty, odpowiadające sobie, przedmiotu i obrazu jakoteż wielkość obrazu, używamy następującej konstrukcji

Kreślimy trzy proste s, f, s' z jednego punktu, tworzące kąty po 60° (ryc. 62), a na środkowej odcinamy ogniskową zwierciadła $f=\frac{r}{2}$. Gdy przez punkt końcowy tego odcinka poprowadzimy dowolną prostą h to prosta ta odetnie na dwóch innych promieniach odcinki s i s', które z f związane są równaniem II



Ryc. 62.

$$\frac{1}{s}+\frac{1}{s'}=\frac{1}{f}.$$

Prawdziwości tego twierdzenia dowodzi się, dopełniając rysunek trójkątem równobocznym o bokach s'; odczytamy wtedy proporcję $\frac{s'+s}{s'}=\frac{s}{f}$, która po przerobieniu daje równanie II.

Aby znaleźć wielkość obrazu, odcinamy wielkość przedmiotu $w = TU$, prowadzimy $UU' \| f$, $U'V' \| h$, $V'V \| f$, wtedy $TV = w'$ Nietrudno udowodnić, że $w' . w = s' : s$.

Pytania.

1 Czy można skonstruować zwierciadło, któreby z matematyczną dokładnością dawało obraz przedmiotu, to zn. aby wszystkie promienie, wychodzące z dowolnego punktu przedmiotu przecinały się zawsze w jednym punkcie obrazu? (Nie. Dla pewnej pary odpowiadających sobie punktów przedmiotu i obrazu istnieje jedna tylko elipsoida, dla każdej pary inna.

2. Jakie obrazy powstają w zwierciedle kołowo-walcowem wypukłem, parobolicznem-walcowem wklęsłem? Jakie są jeszcze inne możliwe zwierciadła? (Stożkowe).

Ćwiczenia.

*1 Okaż za pomocą zwierciadła wklęsłego. że obraz rzeczywisty świecy (żarówki) może być rzucony na tło.

*2. W białej zasłonie blaszanej wywierć trzy otworki o średnicy 1 *mm*, tworzące trójkąt równoboczny o boku 1 *cm*. Ustaw zasłonę w pobliżu jasnego światła, oświetlającego ten trójkąt, a w stosownem oddaleniu zwierciadło wklęsłe. Oddalenie zwierciadła zmieniaj dopóty, aż na zasłonie otrzymasz wyraźny obraz odwrócony trójkąta, jak najmniej różniący się wielkością otworków od otworków wierconych w blasze.

Oddalenie zwierciadła od zasłony jest **promieniem kulistości** zwierciadła. (Zrównania I dla $s = s'$ wynika, że $r = s$).

*3. Przygotuj dwie jednakowe siatki druciane. Jedną ustaw w pobliżu jasnego światła, a w pewnem oddaleniu zwierciadło wklęsłe, które rzuca obraz rzeczywisty siatki na ścianę lub tło. Gdy obraz jest całkiem wyraźny, nałóż na niego drugą siatkę, i policz, ile jej kratek wypada na jedną kratkę obrazu. Jest to **powiększenie obrazu** $u = w' : w$. Zmierz następnie oddalenia przedmiotu i obrazu od zwierciadła sprawdź rownanie $u = s' : s$.

*4. Ustaw zwierciadło wklęsłe o znanem promieniu kulistości w promieniach słońca, i wyszukaj ognisko zwierciadła. Sprawdź równanie III.

*5. Wybierz płaskie naczynie szklane kształtu walca. Ustaw je tak w promieniach słońca, aby wewnętrzna powierzchnia naczynia odbijała promienie, jak zwierciadło wklęsłe. Ujrzysz **powierzchnię ogniskową (kaustyczną)**. Powierzchnia ta zmniejsza się aż do punktu przy użyciu odpowiednich przysłon papierowych.

Zadania.

1. Zbadać przy pomocy konstrukcji, podanej w ust. 4, ruch obrazu w zwierciedle kulistem, gdy punkt świecący biegnie wzdłuż osi optycznej zwierciadła od $+\infty$ do $-\infty$. (Wynik przedstawiony na ryc. 63. Droga IV należy do zwierciadła wypukłego).

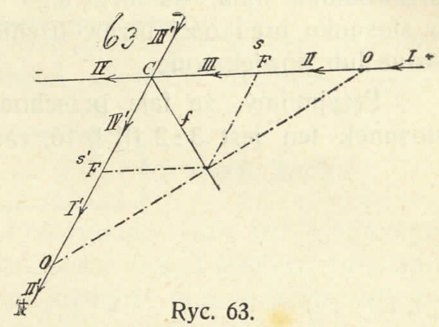
2. Nakreśl powierzchnię ogniskową w zwierciedle półkulistem. (Kreślić promienie równoległe i odbite tak, aby kąt odbicia był równy kątowi padania. Powierzchnia ogniskowa jest obwiednią promieni odbitych).

3. Podać konstrukcję obrazu w zwierciedle wklęsłem dla $r = 6\,cm$, $s = 2\,cm$, $w = 1\,cm$ i sprawdzić równanie II.

4. To samo uczynić dla zwierciadła wypukłego, gdy $r = -6\,cm$, $s = 6\,cm$, $w = 1\,cm$.

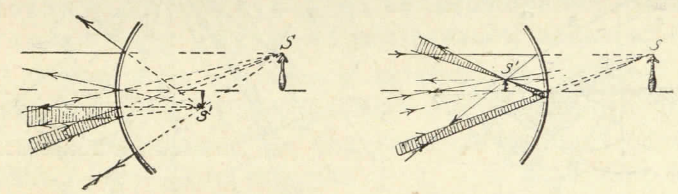
5. Wykreślić obrazy **przedmiotu pozornego** w zwierciedle wypukłem i wklęsłem. (Punkt świecący pozorny tworzy wiązka zbieżna (ryc. 64), padająca na zwierciadło; obrazy mogą być pozorne lub rzeczywiste).

6. Wyprowadzić proporcję $w : w' = \sqrt{g} : \sqrt{g'}$ i wyrazić ją słowami. (Z proporcyj $w : w' = g : f = f : g'$ wyrugować f).



Ryc. 63.

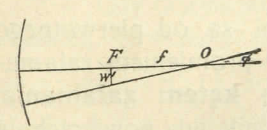
7 Jaki związek zachodzi między oddaleniami przedmiotu i obrazu od środka kulistości, a między promieniem kulistości zwierciadła?



Ryc. 64.

(Nazywając te odległości $h = s - r$ i $h' = r - s'$, z tych równań i z II wyrugować s i s' Wynik $\frac{1}{h'} - \frac{1}{h} = \frac{1}{r}$) Przeprowadzić dyskusję tego równania.

8. Zastosować równania II i V do zwierciadła płaskiego. (Położyć $r = \infty$).



Ryc. 65.

9. W teleskopie Herschela było zastosowane zwierciadło o promieniu kulistości 16 *m*. Jak wielki był w niem obraz słońca, gdy wiemy, że pozorna średnica tarczy słonecznej ma 32'? (Ryc. 65. $\phi = 16'$, $w' = f\,tg\,\phi = \frac{r}{2}\,tg\,\phi$, $tg\,\phi \approx arc\,\phi = \frac{\phi^0 . \pi}{180^0} = \frac{\phi' . \pi}{180 \cdot 60'}$).

C. ZAŁAMANIE ŚWIATŁA (REFRAKCJA).

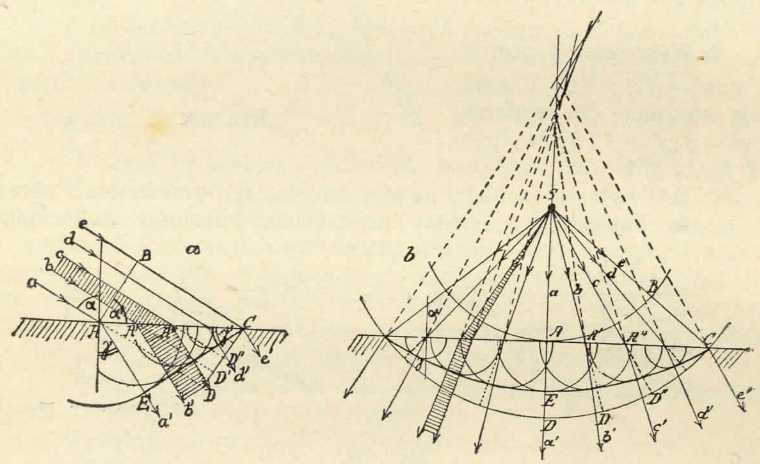
§ 24. Załamanie promieni.

(Tablica III.)

1 Gdy fala płaska albo wypukła dojdzie do powierzchni granicznej innego przewodnika przezroczystego, wiemy, że

częściowo odbija się od tej powierzchni (**fala odbita**), częściowo zaś przechodzi do drugiego przewodnika (**fala przepuszczona**). (Patrz II § 4, 4). Prędkość przewodzenia fali jest w drugim przewodniku inna, wskutek tego fale elementarne muszą być w stosunku prędkości przewodzenia obu przewodników zmniejszone lub powiększone.

Przyjmijmy, że fale przechodzą z powietrza w szkło, to stosunek ten jest 3.2 (II § 16, zad. 1), w tym też stosunku



Ryc. 66.

skrócone są promienie AD, $A'D'$, $A''D''$, (ryc. 66) i tak skróconemi promieniami są zakreślone fale elementarne, których obwiednią jest $C'E$.

Promienie prostopadłe do obwiedni są od pierwotnego kierunku **załamane**. Kąt, zawarty między promieniem załamanym i prostopadłą padania, nazywa się **kątem załamania**. Fala płaska przepuszczona w inny przewodnik, gdy powierzchnia graniczna jest płaszczyzną, pozostaje falą płaską o innym kierunku. Fala kulista przepuszczona w tych warunkach jest również falą wypukłą, ale nie kulistą, gdyż promienie a', b', c', d', przedłużone wstecz nie przecinają się w jednym punkcie S', któryby był obrazem punktu świecącego S.

2. Z trójkąta ABC (ryc. 66a) otrzymujemy $BC = AC \sin\alpha'$, z trójkąta AEC otrzymujemy $AE = AC \sin\gamma'$; ponieważ $\alpha' = \alpha$, $\gamma' = \gamma$, przeto BC $AE = \sin\alpha$ $\sin\gamma$ Ale, $BC = AD$, zatem

BC AE jest stosunkiem prędkości przewodzenia w obu przewodnikach c_1 c_2. Stąd

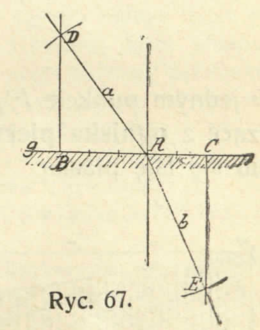
$$\boxed{\frac{c_1}{c_2} = \frac{\sin\alpha}{\sin\gamma}.}$$

Wartość stosunku c_1 $c_2 = n$ jest dla pewnej pary ciał stała, niezależna od kierunku promieni Liczbę n nazywamy **współczynnikiem załamania**.

$$\boxed{n = \frac{\sin\alpha}{\sin\gamma}.}\quad \textbf{(Prawo Snella)}.$$

Podobnie jak w II § 4, 4, nazywamy i dla fal światła przewodnik, w którym prędkość przewodzenia jest większa, **optycznie rzadszym**, niż inny, w którym prędkość przewodzenia fal jest mniejsza, a który nazywamy **gęstszym**. Ponteważ dla $c_1 > c_2$, jest $\sin\alpha > \sin\gamma$, a więc także $\alpha > \gamma$, przeto promień światła, przechodzący z przewodnika rzadszego w gęstszy, załamuje się **ku prostopadłej padania**, w przeciwnym razie **od prostopadłej padania**.

3. **Konstrukcja promienia załamanego** widoczna jest z ryc. 67. Dany jest promień padający a z punktem przebicia A powierzchni granicznej g. Po obu stronach punktu A odmierza się odcinki AB i AC o stosunku c_1 $c_2 = n$, (na rycinie 3 : 2). Z punktów końcowych tych odcinków wykreśla się prostopadłe do g. Otrzymujemy punkt D i promieniem AD zakreślamy łuk, przecinający drugą prostopadłą w E, tak, że $CD = AE$. Prosta b jest promieniem załamanym.



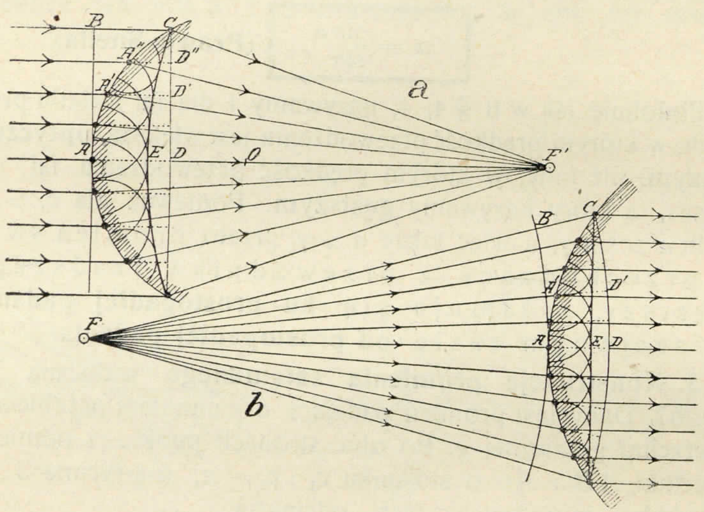
Ryc. 67.

4. Gdy fale światła przechodzą z przewodnika gęstszego w rzadszy, to $c_1 : c_2 = \sin\alpha$ $\sin\gamma = n < 1$, a ponieważ $\sin\gamma = \frac{\sin\alpha}{n}$ musi być < 1, przeto także, gdy ma istnieć promień załamany, musi być $\sin\alpha < n$. Dla $\sin\alpha \geqq n$, wypada $\sin\gamma \geqq 1$ W pierwszym przypadku $\gamma = 90^0$, promień **ślizga się** po powierzchni granicznej, gdy zaś $\sin\alpha > n$, promień załamany nie istnieje, rzadszy przewodnik zachowuje się jak ciało nieprzezroczyste, a promienie od powierzchni granicznej w zupełności się odbijają. Nazywamy to **całkowitem odbiciem**, a kąt α taki, iż $\sin\alpha = n$ nazywamy **kątem granicznym załamania**.

*Załamanie promieni okazać można na tarczy optycznej Hartla.

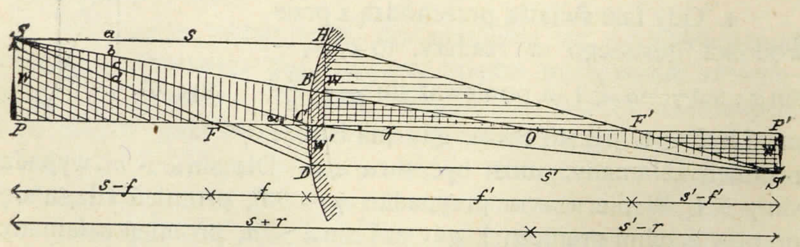
5. Gdy powierzchnia graniczna jest kulista, fala padająca płaska lub kulista przejdzie w nowy przewodnik i da falę wypadkową, jako obwiednią fal elementarnych.

Ryc. 68 a przedstawia falę płaską, której promienie po załamaniu się w powierzchni granicznej wypukłej przecinają się



Ryc. 68.

w jednym punkcie F', w **ognisku drugiem.** Promienie wychodzące z **ogniska pierwszego** F na ryc. 68 b tworzą po załamaniu się falę płaską.



Ryc. 69.

6. $S'P'$ (ryc. 69) jest obrazem przedmiotu SP, utworzonym w szkle przez załamanie promieni w powierzchni granicznej wypukłej $ABCD$, a mianowicie

a, promień **równoległy**, załamany przechodzi przez ognisko drugie F',

b, promień **główny** przechodzi przez środek kulistości O bez załamania,

d, promień **ogniskowy**, przechodzący przez ognisko pierwsze F, po załamaniu staje się równoległym,

c, promień **wierzchołkowy** załamuje się tak, że $\sin\alpha : \sin\gamma = n$.

Z oznaczeń uwidocznionych na rycinie otrzymujemy

$$w : w' = s\,\mathrm{tg}\,\alpha : s'\,\mathrm{tg}\,\gamma \sim \frac{s}{s'} : n,$$

ponieważ z powodu małości kątów α i γ można napisać

$$\mathrm{tg}\,\alpha : \mathrm{tg}\,\gamma \sim \sin\alpha : \sin\gamma = n.$$

Z podobieństwa zaś odpowiednich trójkątów otrzymujemy

$$w : w' = (s-f) : f = f' : (s-f') = (s+r) : (s'-r) = \frac{s}{s'} : n. \qquad \mathrm{I}$$

Z tych równań wynikają następujące:

$$\boxed{\frac{1}{s} + \frac{n}{s'} = \frac{1}{f} = \frac{n}{f'} = \frac{n-1}{r},} \qquad \mathrm{II}$$

skąd wynika także, że

$$f = \frac{r}{n-1},\ f' = \frac{nr}{n-1},\ f' = nf \qquad \mathrm{III}$$

W szczególności dla szkła ($n = \frac{3}{2}$) jest

$$f = 2r,\ f' = 3r,\ \frac{2}{s} + \frac{3}{s'} = \frac{1}{r} \qquad \mathrm{IV}$$

Pytania.

1. W II § 16, 3 wspomniano, że prędkość światła należy także od barwy światła. Ponieważ według II § 19 zad. 1 światło białe złożone jest z rozmaitych barw, co musi zachodzić przy każdem załamaniu promieni światła białego? (**Rozszczepienie** na barwy). Jaki to ma związek ze współczynnikiem załamania? (Nazwijmy prędkość światła w próżni (powietrzu) C, w szkle dla promieni czerwonych C_{cz}, niebieskich C_n,

$$C : C_{cz} = \sin\alpha : \sin\gamma_{cz} = n_{cz},\quad C : C_n = \sin\alpha : \sin\gamma_n = n_n.$$

ponieważ $C_{cz} > C_n$, zatem $\gamma_{cz} > \gamma_n$ i $n_{cz} > n_n$ Światło niebieskie jest bardziej łamliwe, niż czrwone).

2. Wyobraźmy sobie ciało przezroczyste, bezbarwne, o tym samym współczynniku załamania, co woda, zanurzone w wodę. Czy może być w wodzie widziane?

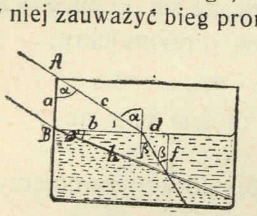
3. Dlaczego ciała takie, jak piana, chmury, mgła, śnieg, sól kuchenna (warzonka) są nieprzezroczyste, chociaż utworzone są z ciał (woda, lód, kryształ soli) przezroczystych? (**Rozprószenie** się światła wskutek całkowitego odbicia

4. Astronomowie obliczyli, że gwiazda, widoczna jeszcze na horyzoncie, w rzeczywistości znajduje się już 35' pod horyzontem. Wyjaśnić to zjawisko przy pomocy załamania promieni światła w atmosferze, której gęstość, a więc i współczynnik załamania, wzrasta w miarę, jak promień światła dochodzi do ziemi? Jaki to ma wpływ na długość dnia? (Jest to **refrakcja astronomiczna**. Pozorna średnica słońca 32').

Ćwiczenia.

*1. Naczynie szklane ze ścianami równoległemi (wannę pneumatyczną) ustaw na poziomym stole w promieniach słonecznych tak, aby naczynie pokrywało własny cień. Wtedy promienie padają prostopadle do jednej pary poziomych krawędzi.

Gdy do wody nalejemy trochę mleka (fluoresceiny, siarczanu chininy, atramentu czerwonego, wyciągu z kory dzikiego kasztana), będzie można w niej zauważyć bieg promieni słonecznych (ryc. 70). Mianowicie krawędź naczynia A rzuca cień na wodę, cień ten załamany widoczny jest jako ciemna linja. Również promienie, przechodzące przez krawędź wody B są widoczne w wodzie z powodu różnic oświetlenia. Można je uczynić widoczniejszemi, gdy się ustawi nieprzezroczystą zasłonę na szkle poniżej linji B.


Ryc. 70.

Aby dokonać potrzebnych pomiarów, powleka się ścianę boczną naczynia rzadkim roztworem gumy arabskiej albo dekstryny i rysuje się na zaschłej popowłoce ołówkiem atramentowym potrzebne linje, poziom wody i oba promienie. Następnie przykłada się na szkło cienki papier zwilżony, dorysowuje się brzeg poziomy i pionowy, a linje wprzód nakreślone ołówkiem atramentowym przebiją wyraźnie przez papier Po zdjęciu papieru i wysuszeniu robi się nim pomiary długości a, b, c, d, f, g, h, zaznaczonych na ryc. 70.

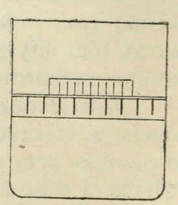
$$\sin\alpha = \frac{b}{c}, \quad \sin\beta = \frac{d}{g}, \quad n = \frac{bg}{cd},$$

$$\cos\alpha = \frac{a}{c}, \quad \sin\gamma = \frac{f}{h}, \quad n = \frac{ah}{fc}$$

Z pomnożenia wynika $n^2 = \frac{abgh}{c^2df}$

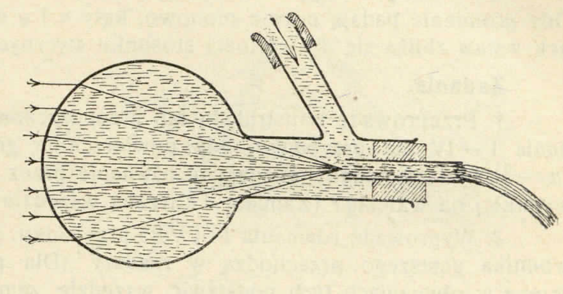
Dwie pierwsze wartości na n wskażą nam, czy nie popełniono jakich rażących błędów, trzecie równanie pozwoli obliczyć średnią wartość współczynnika załamania wody

*2. W szeroką zlewkę (szklankę) o cienkich ścianach nalewamy wody do $^2/_3$ wysokości. Na skrawku cienkiego papieru rysujemy długie kreski, oddalone od siebie o 2 *mm* i naklejamy go poziomo zewnątrz na szkle tak, aby kreski były widoczne jednocześnie i przez powietrze i przez wodę (ryc. 71). Które kreski zgadzają się z sobą? Jakie więc jest powiększenie obrazu? (W równaniu II str 64 należy zmienić r na $-r$, ponieważ przedmiot S (podziałka) znajduje się po stronie wklęsłej powierzchni granicznej, dalej należy podstawić $s = 2r$ $n = \frac{3}{4}$. Obliczymy stąd $s' = -3r$. Z równań I obliczymy $w : w' = -\frac{1}{2}$. Co znaczą tu znaki minus?


Ryc. 71

*3. Wybrać kolbkę destylacyjną kształtu kulistego, jak na ryc. 72. Zatkać ją zatyczką gumową, przez którą przechodzi rurka prosta. Rurkę boczną kolbki połączyć z kranem wodociągowym, ustawić kolbkę poziomo

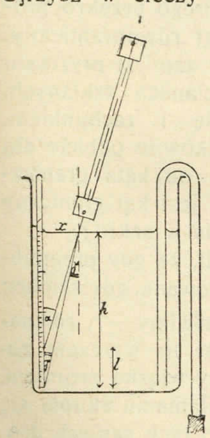
i oświetlić kuliste jej dno promieniami słonecznemi, odbitemi poziomo zapomocą zwierciadła. Wodę w kolbce można zabarwić kilku kroplami mleka. Rurkę w korku należy przesunąć tak, aby dotykała stożka światła w miejscu najwęższem. Wtedy w strudze wody wystąpi zjawisko całkowitego odbijania się promieni: cała struga świecić będzie, jak rozpalony płynny metal.


Ryc. 72.

*4. Napełnij zlewkę (szklankę) wodą. Zewnętrzna powierzchnia ma być sucha. Chwyć zlewkę palcami poniżej poziomu wody. Dlaczego patrząc się z góry na powierzchnię wody nie widzisz palców? Dlaczego palce stają się widoczne, gdy powierzchnia zewnętrzna zlewki jest wilgotna? Gdzie zatem występuje całkowite odbicie, czy między wodą i szkłem, czy też między szkłem i powietrzem? Jak należy patrzeć, aby ujrzeć całkowite odbicie między wodą i powietrzem? Objaśnić to rysunkiem.

*5. Napełnij zlewkę (szklankę) wodą. Należy wybrać zlewkę z dnem zupełnie płaskiem. Nakreśl szereg linij równoległych różnokolorowych na kartce papieru, ustaw zlewkę na rysunku i badaj obrazy utworzone przez całkowite odbicie się promieni w zwierciedle wklęsłem walcowem. Patrzeć trzeba jednem okiem.

*6. Napełnij próbówkę wodą, do której dodano kroplę mleka, albo proszku kredy, lepiej siarczanu chininy albo fluoresceiny i zatkaj korkiem tak, aby wewnątrz nie było powietrza. Zwróć ją wypukłą stroną ku słońcu. Ujrzysz w cieczy stożek światła i powierzchnię ogniskową. Zmierz ogniskową Czy pomiar zgadza się z wynikiem obliczenia dla $n = \frac{4}{3}$?


Ryc. 73.

*7 W zlewkę dość wysoką, pełną wody, wstaw białą deszczułkę lub blachę, na której czarnemi linjami (tuszem) nakreślona jest wyraźnie podziałka milimetrowa. Przygotuj rurkę szklaną, czystą, o 5—10 *mm* średnicy, 30 *cm* długą, na której oba końce nałożone są korki odpowiednio wydrążone, a przez każdy przebita cienka igła. Skręć korki tak, aby obie igły tworzyły równoległe średnice. Taki **celownik** utwierdź prawie pionowo w stojaku nad zlewką z wodą, aby zerowa kreska podziałki była na linji celownika (ryc. 73). Odczytaj wysokość poziomu wody h. Następnie usuń wodę ze zlewki zapomocą lewara i nie zmieniając kierunku celownika, odczytaj kreskę podziałki l, znajdującą się teraz na linji celownika. Z pomiarów tych oblicz współczynnik załamania wody.

$$\left(n = \frac{\sin\alpha}{\sin\gamma} \backsim \frac{\operatorname{tg}\alpha}{\operatorname{tg}\gamma},\ \operatorname{tg}\alpha = \frac{x}{h-l},\ \operatorname{tg}\gamma = \frac{x}{h},\ n \backsim \frac{h}{h-l}\right).$$

Gdy promienie padają prawie pionowo, kąty α i γ są tak małe, że stosunek wstaw zbliża się do wartości stosunku stycznych tych kątów

Zadania.

1 Przeprowadź konstrukcję fali przepuszczonej i wyprowadź równania I—IV dla przypadku, gdy powierzchnia graniczna jest wklęsła ($n = \frac{3}{2}$). Jakiej zmiany doznają te równania przez zamianę powierzchni wypukłej na wklęsłą? (Zamiast $+r$ trzeba wszędzie położyć $-r$).

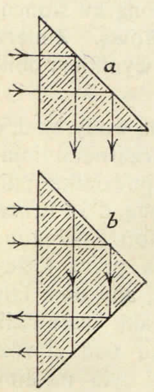
2. Wyprowadź równania I—IV dla przypadku, gdy promienie z przewodnika gęstszego przechodzą w rzadszy (Dla powierzchni wypukłej trzeba w równaniach tych podstawić wszędzie zamiast n odwrotność $\frac{1}{n}$, przyczem $n > 1$, dla powierzchni wklęsłej nadto zamiast r podstawić $-r$).

3. Wykreślić obrazy punktu świecącego w wodzie, 4 *cm* pod powierzchnią, dla rozmaitych położeń oka ($n = \frac{3}{4}$).

4. Jaki obraz światła nadwodnego i podwodnego widzi nurek w głębokości 4 *m* pod powierzchnią.

5. Obliczyć prędkość rozchodzenia się światła czerwonego i fiołkowego w wodzie o temp. 20°, gdy współczynniki załamania tych promieni są $n_{cz} = 1{,}331$, $n_f = 1{,}340$.

6. Jaki jest współczynnik załamania dla promieni przechodzących z wody w szkło, gdy bezwzględny średni współczynnik załamania dla wody jest $\frac{4}{3}$, dla szkła zaś $\frac{3}{2}$? ($n_{w/sz} = c_w : c_{sz} = (c_p : c_{sz}) : (c_p : c_w) = n_{sz} : n_w$; c_p, c_{sz}, c_w prędkość światła w próżni (powietrzu), w szkle, w wodzie, n_{sz}, n_w (bezwzględne) współczynniki załamania w szkle, w wodzie, $n_{w,sz}$ współczynnik załamania (względny) przy przejściu promienia z wody w szkło).



Ryc. 74.

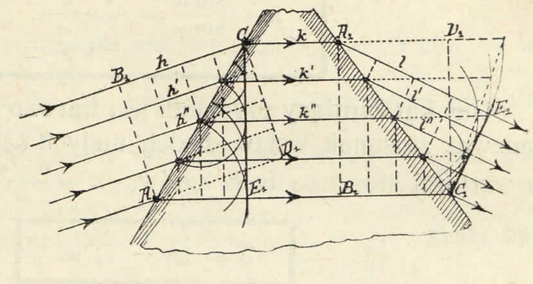
7 Często jest używany w przyrządach optycznych zamiast zwierciadła **pryzmat refleksyjny** (ryc. 74 a) albo **pryzmat odwracający** (ryc. 74 b), którego przekrój prostopadły do krawędzi stanowi trójkąt równoramienny, prostokątny. Czy możnaby używać zamiast pryzmatu szklanego pełnego, pryzmatu o ścianach szklanych, napełnionego wodą? (Wykreślnie i rachunkiem. W pryzmacie szklanym zachodzi całkowite odbicie dla promieni o kącie padania większym od kąta granicznego załamania, bo 45° > 42°; jaki jest kąt graniczny dla promieni przechodzących z wody w szkło?)

10. Okaż na równaniach I—III, że gdy przemienimy litery kreskowane i nie kreskowane, gdy zamiast n podstawimy $\frac{1}{n}$, a zamiast r podstawimy $-r$, równania przechodzą same w siebie. (Jest to wyrazem **zasady odwracalności promieni**; gdy wiązka promieni, wychodząca z S po odbiciu lub załamaniu skupia się w S' to i na odwrót, promienie wychodzące z S' po tych samych drogach powracając, skupiają się w S).

§ 25. Załamanie promieni w pryzmacie.

1 **Pryzmatem** (optycznym) nazywamy ciało przezroczyste, ograniczone dwiema nierównoległemi płaszczyznami.

Gdy fala płaska przechodzi przez pryzmat, promienie jej ulegają dwukrotnie załamaniu, raz dla $n > 1$, drugi raz dla $\frac{1}{n} < 1$ Konstrukcja zapomocą fal elementarnych widoczna jest z ryc. 75.



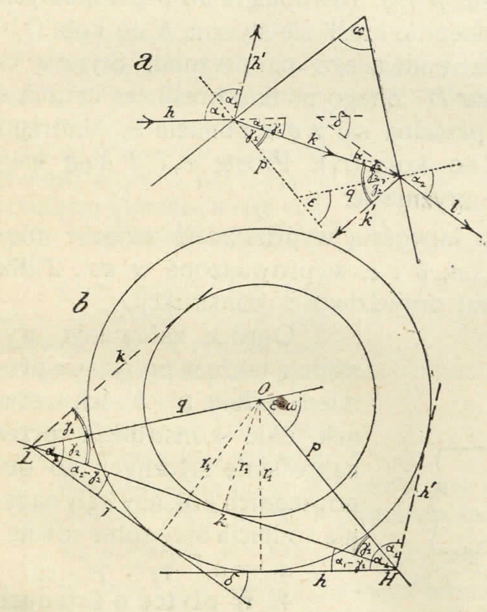
Ryc. 75.

2. Z ryc. 76 a odczytujemy

$$\sin\alpha_1 = n\sin\gamma_1,$$
$$\sin\alpha_2 = n\sin\gamma_2,$$

$$\delta = (\alpha_1 - \gamma_1) + (\alpha_2 - \gamma_2) = \alpha_1 + \alpha_2 - (\gamma_1 + \gamma_2),\quad \omega = \epsilon = \gamma_1 + \gamma_2,$$

$$\boxed{\delta = \alpha_1 + \alpha_2 - \omega}$$



Ryc. 76.

δ jest **zboczeniem promienia** załamanego w pryzmacie, ω nazywamy **kątem łamiącym** pryzmatu.

*Jeżeli promień przebiega przez pryzmat symetrycznie tak, że $\alpha_1 = \alpha_2$ i $\gamma_1 = \gamma_2$, to $\delta = 2\alpha_1 - \omega$,

$$\alpha_1 = \frac{\delta + \omega}{2},\quad \gamma_1 = \frac{\omega}{2}.$$

Doświadczenie i rachunek wykazują, że wtedy odchylenie δ jest najmniejsze (**minimum odchylenia**).

Wymierzenie kąta δ może posłużyć

do obliczenia **współczynnika załamania** tego materjału, z którego utworzony jest pryzmat, bo

$$\boxed{n = \frac{\sin\alpha}{\sin\gamma} = \frac{\sin\frac{\delta+\omega}{2}}{\sin\frac{\omega}{2}}.}$$

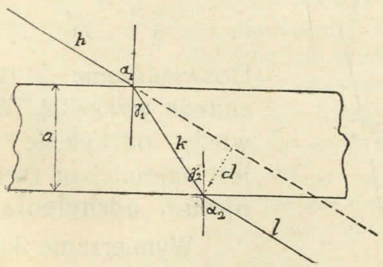
Gdy **kąt łamiący** pryzmatu jest **bardzo mały**, wtedy mamy, ponieważ stosunek wstaw dwóch małych kątów zdąża w granicy do wartości stosunku tych kątów, $n = \frac{\delta+\omega}{\omega} = \frac{\delta}{\omega} + 1$,

skąd także $$\boxed{\delta = (n-1)\,\omega.}$$

W takim ostrym pryzmacie *zboczenie promienia jest proporcjonalne do kąta łamiącego pryzmatu i w wielkich granicach niezależne od kierunku promienia padania.*

3. **Konstrukcja promienia załamanego** w pryzmacie jest następująca. Kreśli się dwa koła współśrodkowe o promieniach proporcjonalnych do prędkości rozchodzenia się światła w powietrzu i pryzmacie $r_1 \; r_2 = c_1 \; c_2 = n$ (ryc. 76 b). Ze środka koła O prowadzi się proste p i q, równoległe do prostopadłych padania w pryzmacie. Następnie kreśli się styczną h do koła (r_1), równoległą do promienia padającego na pryzmat. Styczna ta przecina się z p w punkcie H Z tego punktu kreśli się styczną k do koła (r_2). Styczna ta przecina się z q w punkcie L, z którego prowadzi się styczną l do koła (r_1). Proste h, k, l dają bieg promienia załamanego w pryzmacie.

Z ryc. 76b można z łatwością wyprowadzić związki między kątami α_1, γ_1, α_2, γ_2, n, δ i ϵ, wyprowadzone w ust. 2 dla ryc. 76a. Jest to dowodem prawdziwości konstrukcji.



Ryc. 77

Oprócz załamania występują także w pryzmacie promienie odbite h' i k' Ich kierunek daje konstrukcja przez nakreślenie stycznych do odpowiednich kół, aby kąty padania i odbicia były sobie równe $\alpha_1 = \alpha_1'$, $\gamma_2 = \gamma_2'$.

4. **W płytce o ścianach równoległych** *promień*

światła przechodzi bez zmiany kierunku, nie jest odchylony, a tylko przesunięty (ryc. 77). $\sin\alpha_1 = n\sin\gamma_1$, $\sin\alpha_2 = n\sin\gamma_2$, a ponieważ $\gamma_1 = \gamma_2$, przeto także $\alpha_1 = \alpha_2$.

Pytania.

1 Wiadomo, że pieniądz w naczyniu, niewidoczny dla obserwatora, może się stać widocznym, gdy do naczynia nalejemy wody. Podobnie stać się może widoczną ryba na dnie naczynia. Czy w takim przypadku ryba widzi także człowieka?

2. Na ryc. 75 powierzchnia fali płaskiej A_1B_1 po przejściu przez pryzmat przyjmuje położenie E_2C_2. Co można powiedzieć o drogach promieni B_1E_2 i A_1C_2? (Drogi te nie są równe, ale są przebiegane w tym samym czasie tak, że gdy prędkości w powietrzu i szkle są c_1 i c_2, musi być

$$\frac{h}{c_1}+\frac{k}{c_2}+\frac{l}{c_1} = \frac{h'}{c_1}+\frac{k'}{c_2}+\frac{l'}{c_1} = \frac{h''}{c_1}+\frac{k''}{c_2}+\frac{l''}{c_1} = \ldots$$

albo, gdy $\frac{c_1}{c_2} = n$, wtedy·

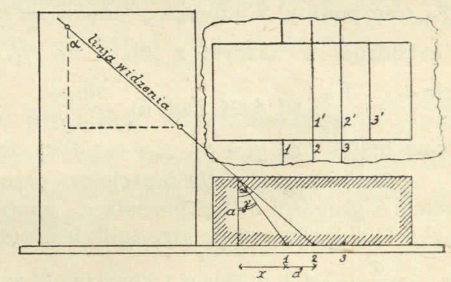
$$h + nk + l = h' + nk' + l' = h'' + nk'' + l'' =$$

3. Niech żołnierze, idący marszem frontowym (to zn. każdy żołnierz idzie w kierunku prostopadłym do linji frontowej), poruszają się w terenie twardym i równym, w którym część, odpowiadająca pryzmatowi na ryc. 75. jest zorana. Gdy $A_1 B_1$ jest linją frontu, a długość kroku żołnierza przy przechodzeniu przez teren zorany jest o 1/3 krótsza, czy kierunek marszu nie musi uledz zmianie? Gdyby zaś chciano zachować kierunek marszu, czy byłby to marsz frontowy?

Ćwiczenia.

*1. Na ćwiartce papieru kreślimy proste równoległe w oddaleniu 2 *mm*. Na to kładziemy grubą płytkę szklaną i patrzymy z boku tak, aby linje widziane przez szkło były o jedną przesunięte. Zmierzyć grubość płytki i kąt padania promienia widzenia, a stąd obliczyć współczynnik załamania szkła.

(Aby zmierzyć kąt padania α, ustawiamy wzdłuż linji widzenia, jak na ryc. 78, prostokątną deszczułkę albo pudełko i zapomocą szpilek zaznaczamy dwa punkty, przez które przechodzi linja widzenia.

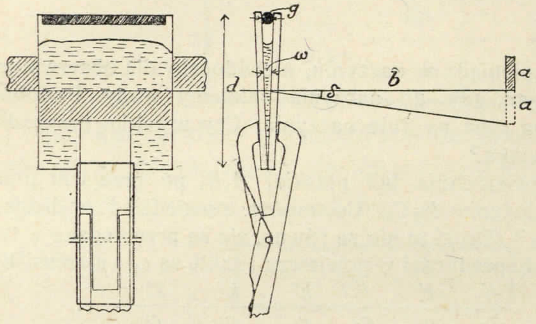


Ryc. 78.

Nakreśliwszy przez punkty zaznaczone szpilkami linję poziomą i pionową, obliczymytg α, a stąd α. Następnie rachujemy

$$x + d = a\,\mathrm{tg}\,\alpha,\quad x = a\,\mathrm{tg}\,\gamma,\quad \text{stąd } \mathrm{tg}\,\gamma = \mathrm{tg}\,\alpha - \frac{d}{a} \text{ i } n = \frac{\sin\alpha}{\sin\gamma}\Big).$$

*2. Oblicz kąt łamiący cienkiego pryzmatu wodnego ($n = \frac{4}{3}$). utworzonego z dwóch cienkich płytek szlanych ($5\,cm \times 5\,cm$), które z jednej strony są rozwarte przez włożenie między nie kawałka drutu, z drugiej zaś ściśnięte łapką drewnianą (kleszczami fotograficznemi). Klin w ten sposób powstały wypełniamy wodą, która na podstawie włoskowatości utrzymuje się między płytkami. Przez taki pryzmat, ustawiony tak, aby krawędź łamiąca była pozioma (ryc. 79), patrzymy na poziomy lineał, utwierdzony w stojaku i oddalamy się z pryzmatem tak daleko, aż górna krawędź lineału, widzianego w pryzmacie zgodzi się z dolną krawędzią, widzianą wprost. Gdy szerokość lineału jest a, oddalenie jego od pryzmatu b, $n = \frac{4}{3}$, to z równania



Ryc. 79.

dla cienkiego pryzmatu $\delta = (n - 1)\,\omega = \frac{\omega}{3}$ otrzymujemy $\omega = 3\delta \backsim 3\operatorname{tg}\delta = 3\cdot\frac{a}{b}$

Pomiar skontrolować przez zmierzenie grubości drutu g i długośc d ramienia kąta ω, obliczając ω z proporcji $\omega : 360 = g : 2\pi d$.

*3. Zmierz przy pomocy cienkiego pryzmatu o znanym kącie łamiącym współczynniki załamania dla alkoholu, benzolu, gliceryny, oliwy, dwusiarczku węgla.

(Pomiar kąta δ, jak w ćw. 2; stąd $n = 1 + \frac{\delta}{\omega}$).

Zadania.

1. Promień światła przechodzi z powietrza przez dwie płytki o ścianach równoległych o współczynnikach załamania (bezwzględnych) n_a, n_b i natępnie wychodzi znów w powietrze. Jaki jest jego kierunek? (Są trzy punkty, w których promień się załamuje; nazwijmy kąty padania i załamania w każdym z nich: α_1, γ_1, α_2, γ_2, α_3, γ_3, to $\frac{\sin\alpha_1}{\sin\gamma_1} = n_a$. $\frac{\sin\alpha_2}{\sin\gamma_2} = \frac{n_b}{n_a}$ (II § 24 Zad. 6), $\frac{\sin\alpha_3}{\sin\gamma_3} = \frac{1}{n_b}$ Z powodu równoległości ścian płytek jest $\gamma_1 = \alpha_2$, $\gamma_2 = \alpha_3$; okaż, że $\gamma_3 = \alpha_2$).

2. Promień światła przechodzi przez płytkę o ścianach równoległych o grubości a, kąt padania α, współczynnik załamania (bezwzględny) n. Oblicz równoległe przesunięcie promienia. [Z ryc. 77 $d = b \sin(\alpha - \gamma)$, $b = \frac{a}{\cos\gamma}$, $d = a\,(\sin\alpha - \cos\alpha \operatorname{tg}\gamma)$, a ponieważ $\operatorname{tg}\gamma = \frac{\sin\gamma}{\sqrt{1 - \sin^2\gamma}} = \frac{n\sin\alpha}{\sqrt{1 - n^2\sin^2\alpha}}$, przeto $d = a\sin\alpha\left(1 - \frac{n\cos\alpha}{\sqrt{1 - n^2\sin^2\alpha}}\right)$].

3. Przeprowadzić obliczenie, jak w ust. 2, dla pryzmatu, gdy kąt padania α_1 jest odjemny, to zn. leży po przeciwnej stronie prostopadłej padania p. (Konstrukcję promienia załamanego przeprowadzić na pryzmacie, którego kąt łamiący jest mniejszy od kąta granicznego załamania, n. p. $\omega = 20^0$ Gdy weźniemy kąt padania n. p. $\alpha_1 = -15^0$, można będzie przeprowadzić konstrukcję, z której okaże się, że równania ust. 2,

są ogólnie prawdziwe, także dla odjemnych wartości kąta α_1, wtedy jednak i γ_1 jest odjemne)

4. Kiedy w pryzmacie ($n = \frac{3}{2}$, $\omega = 60^0$) występuje całkowite odbicie? (Całkowite odbicie zaczyna się od kąta γ_2 większego od granicznej wartości załamania, t. zn. od $\sin\gamma_2 > \frac{1}{n}$ ponieważ zaś $\gamma_1 = \omega - \gamma_2$, przeto $\sin\gamma_1 = \sin\omega\cos\gamma_2 - \cos\omega\sin\gamma_2 = \sin\omega\sqrt{1 - \sin^2\gamma_2} - \cos\omega\sin\gamma_2 < \sin\omega\sqrt{1 - \frac{1}{n^2}} - \cos\omega\,\frac{1}{n} = \frac{1}{n}\left(\sin\omega\sqrt{n^2 - 1} - \cos\omega\right)$. Wreszcie

$$\sin\alpha_1 = n\sin\gamma_1 < \sin\omega\sqrt{n^2 - 1} - \cos\omega = \frac{\sqrt{15} - 2}{4},\ \alpha_1 < 29^0).$$

5. W pryzmacie wybrać punkt, około którego ma się obracać promień k (ryc. 76) i wyznaczyć dla każdego obranego kierunku promienia k, kierunki promieni h i l. Co ozuacza, 1) gdy w figurze konstrukcyjnej (ryc. 76b) h i k lub k i l przecniają się na okręgu koła (r_1), 2) co oznacza, gdy h lub l przecinają się z k na polu pierścienia między kołami (r_1) i (r_2), 3) co oznacza, gdy h lub l jest równoległe do p lub q, 4) co oznacza, gdy k jest prostopadłe do p lub q, co; gdy jest do nich równoległe?

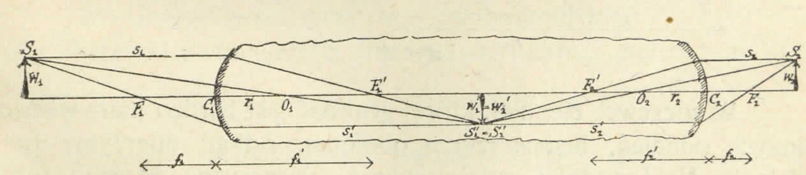
6. Jaki jest kąt łamiący pryzmatu, w którym każdy promień zawsze doznaje całkowitego odbicia? Jaka jest wogóle największa wartość odchylenia promienia w pryzmacie? Z figury konstrukcyjnej ryc. 76b wynika, że gdy k przecina się z p i q, jakoteż h i l na okręgu koła (r_1), promienie h i l ślizgaią się po ścianach pryzmatu. W tym razie $\sin\frac{\omega}{2} = \frac{r_2}{r_1} = \frac{1}{n}$, a $\delta = 180^0 - \omega$. Zatem, **gdy kąt łamiący pryzmatu jest mniejszy od podwójnej wartości kąta granicznego, pryzmat może jeszcze promienie załamywać; gdy kąt łamiący jest od tej wartości większy, każdy promień w pryzmacie ulega całkowitemu odbiciu.**

7 Nakreśl obraz punktu świecącego w pryzmacie ($n = \frac{3}{2}$, $\omega = 60^0$), używając konstrukcji podanej na ryc. 76 b.

8. Jakie jest minimum odchylenia dla pryzmatu szklanego o $n = \frac{3}{2}$, $\omega = 60^0$? (Z równania $\sin\frac{\delta + \omega}{2} = n\sin\frac{\omega}{2}$, wyszukać $\frac{\delta + \omega}{2}$, a stąd obliczyć δ).

§ 26. Załamanie promieni w soczewkach.

1 **Soczewką** nazywamy ciało przezroczyste, ograniczone z przeciwległych stron powierzchniami kulistemi. Jedna powierzchnia może być także płaska.



Ryc. 80.

Zajmiemy się soczewką obustronnie wypukłą, szklaną, o grubości $d = s_1' + s_2'$ Przy oznaczeniach podanych na ryc. 80, gdzie obraz S_1' jest zarazem przedmiotem świecącym S_2', możemy napisać na podstawie II § 24, 5 równ. II i Zad. 2

$$\frac{1}{s_1}+\frac{n}{s_1'}=\frac{1}{f_1}=\frac{n}{f_1'}=\frac{n-1}{r_1},$$
$$\frac{1}{s_2}+\frac{n}{s_2'}=\frac{1}{f_2}=\frac{n}{f_2'}=\frac{n\quad 1}{r_2}$$

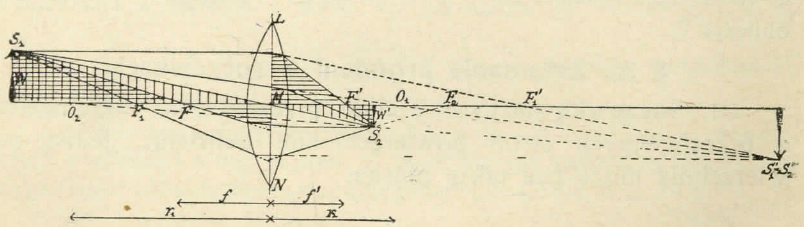
Przez dodanie tych równań otrzymujemy

$$\frac{1}{s_1}+\frac{1}{s_2}+\underline{n\left(\frac{1}{s_1'}+\frac{1}{s_2'}\right)}=\frac{1}{f_1}+\frac{1}{f_2}=n\left(\frac{1}{f_1'}+\frac{1}{f_2'}\right)=(n\quad 1)\left(\frac{1}{r_1}+\frac{1}{r_2}\right)$$

2. Wyraz podkreślony $n\left(\frac{1}{s_1'}+\frac{1}{s_2'}\right)=\frac{nd}{s_1's_2'}$ ma wartość tem mniejszą, im mniejsza grubość soczewki. Przez zbliżenie obu powierzchni kulistych, ograniczających soczewkę, s_2 staje się odjemne; wtedy $d=s_1'-s_2'$, a wyraz podkreślony, równy $\frac{nd}{s_1's_2'}$ może być bez wielkiego błędu opuszczony, gdy d jest dostatecznie małe wobec s_1' i s_2' Stąd otrzymujemy dla **soczewki cienkiej** równania

$$\boxed{\frac{1}{s_1}+\frac{1}{s_2}=\frac{1}{f_1}+\frac{1}{f_2}=(n-1)\left(\frac{1}{r_1}+\frac{1}{r_2}\right)} \quad . \ . \quad \mathrm{I}$$

Bieg promieni będzie w tym razte inny, bo przez zbliżenie obu powierzchni kulistych padają na drugą powierzchnię graniczną promienie zbieżne i S_2' jest dla niej przedmiotem pozornym (ryc. 81); równania jednak żadnej z tego powodu nie doznają zmiany, bo są ważne dla wszystkich położeń przedmiotu świecącego.



Ryc. 81

W soczewce cienkiej, której grubość jest bardzo mała wobec innych oddaleń, będzie rzeczą obojętną, odkąd mierzymy oddalenia. Najdogodniej będzie wybrać płaszczyznę przechodzącą przez krawędź soczewki LMN, od niej mierzyć oddalenia i na niej załamywać promienie. Wtedy konstrukcja będzie znacznie uproszczona, bo zamiast dwóch par ognisk F_1, F'_1, F'_2, F_2,

użyjemy tylko jednej pary F, F', a z podobieństwa odpowiednich trójkątów wynikną proporcje:

$$\frac{w}{w'}=\frac{s}{s'}=\frac{s-f}{f}=\frac{f'}{s'-f'},$$

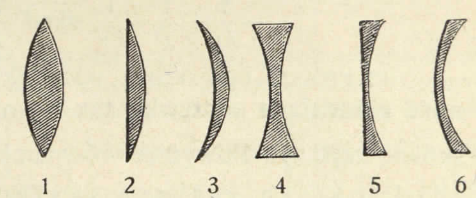
z których otrzymujemy

$$\boxed{\frac{1}{s}+\frac{1}{s'}=\frac{1}{f}=\frac{1}{f'}} \qquad \mathrm{II}$$

Z równania powyższego widzimy, że **cienka soczewka posiada dwa ogniska, położone po obu jej stronach w jednakowej odległości**, bo $f=f'$, porównanie zaś równań II z równaniami I, gdzie $s_1=s_2$, a $s_2=s'$ pozwala obliczyć wielkość ogniskowej.

$$\boxed{\frac{1}{f}=\frac{1}{f_1}+\frac{1}{f_2}=(n-1)\left(\frac{1}{r_1}+\frac{1}{r_2}\right).} \quad . \ . \quad \mathrm{III}$$

3. Różne rodzaje soczewek podaje ryc. 82. Gdy znaki obu promieni kulistości przyjmiemy w soczewce dwuwypukłej za dodatnie, otrzymamy dla innych rodzaji rozmaite kombinacje znaków i wartości, a mianowicie



Ryc. 82.

w soczewce	r_1	r_2			
1. dwuwypukłej	$+$	$+$			
4. „ wklęsłej	$-$	$-$			
2. płasko-wypukłej	∞	$+$	albo	$+$	∞
5. „ wklęsłej	∞	$-$		$-$	∞
3. wklęsło-wypukłej	$-$	$+$	albo	$r > r_+$	
6. wypukło-wklęsłej	$+$	$-$		$r_+ > r_-$	

W szczególności przy $n=\frac{3}{2}$ otrzymujemy dla soczewki dwuwypukłej i jednakowypukłej, gdy $r_1=r_2=r$,

$$\frac{1}{f}=(n\quad 1)\ \frac{2}{r}=\frac{1}{r},\ \text{czyli}\ f=r;$$

dla soczewki dwuwklęsłej i jednakowklęsłej, gdy $r_1=r_2=r$,

$$\frac{1}{f}=(n\quad 1)\quad\frac{2}{r}=\quad\frac{1}{r}\ \text{czyli}\ f=\quad r;$$

w soczewce dwuwypukłej lub dwuwklęsłej ogniska znajdują się w środku kulistości,

gdzie obraz S_1' jest zarazem przedmiotem świecącym S_2', możemy napisać na podstawie II § 24, 5 równ. II i Zad. 2

$$\frac{1}{s_1}+\frac{n}{s_1'}=\frac{1}{f_1}=\frac{n}{f_1'}=\frac{n-1}{r_1},$$

$$\frac{1}{s_2}+\frac{n}{s_2'}=\frac{1}{f_2}=\frac{n}{f_2'}=\frac{n-1}{r_2}$$

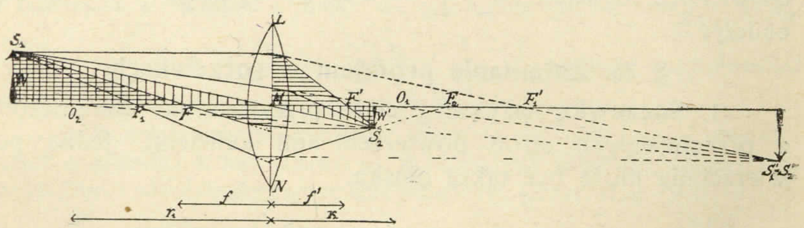
Przez dodanie tych równań otrzymujemy

$$\frac{1}{s_1}+\frac{1}{s_2}+\underline{n\left(\frac{1}{s_1'}+\frac{1}{s_2'}\right)}=\frac{1}{f_1}+\frac{1}{f_2}=n\left(\frac{1}{f_1'}+\frac{1}{f_2'}\right)=(n-1)\left(\frac{1}{r_1}+\frac{1}{r_2}\right)$$

2. Wyraz podkreślony $n\left(\frac{1}{s_1'}+\frac{1}{s_2'}\right)=\frac{nd}{s_1's_2'}$ ma wartość tem mniejszą, im mniejsza grubość soczewki. Przez zbliżenie obu powierzchni kulistych, ograniczających soczewkę, s_2 staje się odjemne; wtedy $d=s_1'-s_2'$, a wyraz podkreślony, równy $\frac{nd}{s_1's_2'}$ może być bez wielkiego błędu opuszczony, gdy d jest dostatecznie małe wobec s_1' i s_2' Stąd otrzymujemy dla **soczewki cienkiej** równania

$$\boxed{\frac{1}{s_1}+\frac{1}{s_2}=\frac{1}{f_1}+\frac{1}{f_2}=(n-1)\left(\frac{1}{r_1}+\frac{1}{r_2}\right)} \quad . \quad . \quad \mathrm{I}$$

Bieg promieni będzie w tym razte inny, bo przez zbliżenie obu powierzchni kulistych padają na drugą powierzchnię graniczną promienie zbieżne i S_2' jest dla niej przedmiotem pozornym (ryc. 81); równania jednak żadnej z tego powodu nie doznają zmiany, bo są ważne dla wszystkich położeń przedmiotu świecącego.



Ryc. 81

W soczewce cienkiej, której grubość jest bardzo mała wobec innych oddaleń, będzie rzeczą obojętną, odkąd mierzymy oddalenia. Najdogodniej będzie wybrać płaszczyznę przechodzącą przez krawędź soczewki LMN, od niej mierzyć oddalenia i na niej załamywać promienie. Wtedy konstrukcja będzie znacznie uproszczona, bo zamiast dwóch par ognisk F_1, F'_1, F'_2, F_2,

użyjemy tylko jednej pary F, F', a z podobieństwa odpowiednich trójkątów wynikną proporcje:

$$\frac{w}{w'}=\frac{s}{s'}=\frac{s-f}{f}=\frac{f'}{s'-f'},$$

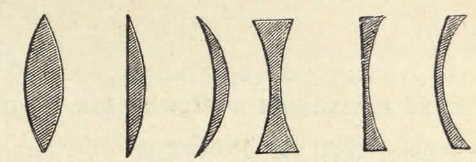
z których otrzymujemy

$$\boxed{\frac{1}{s}+\frac{1}{s'}=\frac{1}{f}=\frac{1}{f'}} \quad . \quad \mathrm{II}$$

Z równania powyższego widzimy, że c i e n k a s o c z e w k a p o s i a d a d w a o g n i s k a, p o ł o ż o n e p o o b u j e j s t r o n a c h w j e d n a k o w e j o d l e g ł o ś c i, bo $f=f'$, porównanie zaś równań II z równaniami I, gdzie $s_1=s_2$, a $s_2=s'$ pozwala obliczyć wielkość ogniskowej.

$$\boxed{\frac{1}{f}=\frac{1}{f_1}+\frac{1}{f_2}=(n-1)\left(\frac{1}{r_1}+\frac{1}{r_2}\right).} \quad . \quad . \quad \mathrm{III}$$

3. Różne rodzaje soczewek podaje ryc. 82. Gdy znaki obu promieni kulistości przyjmiemy w soczewce dwuwypukłej za dodatnie, otrzymamy dla innych rodzaji rozmaite kombinacje znaków i wartości, a mianowicie



1 2 3 4 5 6

Ryc. 82.

w soczewce	r_1	r_2			
1. dwuwypukłej	+	+			
4. „ wklęsłej	—	—			
2. płasko-wypukłej	∞	+	albo	+	∞
5. „ wklęsłej	∞	—	albo	—	∞
3. wklęsło-wypukłej	—	+	albo	$r_- > r_+$	
6. wypukło-wklęsłej	+	—	albo	$r_+ > r_-$	

W szczególności przy $n=\frac{3}{2}$ otrzymujemy dla soczewki dwuwypukłej i jednakowypukłej, gdy $r_1=r_2=r$,

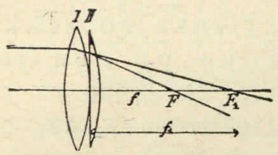
$$\frac{1}{f}=(n-1)\,\frac{2}{r}=\frac{1}{r}, \text{ czyli } f=r;$$

dla soczewki dwuwklęsłej i jednakowklęsłej, gdy $r_1=r_2=r$,

$$\frac{1}{f}=(n-1)\,-\frac{2}{r}=-\frac{1}{r} \text{ czyli } f=-r;$$

w s o c z e w c e d w u w y p u k ł e j l u b d w u w k l ę s ł e j o g n i s k a z n a j d u j ą s i ę w ś r o d k u k u l i s t o ś c i, W ogólności *soczewki wypukłe posiadają ogniska rzeczywiste, soczewki wklęsłe ogniska pozorne*, dlatego soczewki wypukłe czyli **cienkobrzeżne** nazywawy **skupiającemi**, soczewki wklęsłe czyli **grubobrzeżne** nazywamy **rozrzucającemi** promienie równoległe.

4. Dwie lub więcej soczewek o wspólnej osi optycznej tworzą **system soczewek**. Zajmiemy się przypadkiem, gdy soczewki przylegają do siebie (ryc. 83).



Ryc. 83.

Promienie równoległe, przechodzące przez soczewkę I, załamują się ku jej ognisku F_1. To zaś może być uważane za przedmiot pozorny dla soczewki II, której własna ogniskowa jest f_2. Obraz tego punktu F_1 wytworzony w soczewce II, jest ogniskiem F systemu soczewek, a położenie jego znajdziemy według równania

$$\frac{1}{f_1}+\frac{1}{f}=\frac{1}{f_2},\ \text{skąd}\ \frac{1}{f}=\frac{1}{f_1}+\frac{1}{f_2}.$$

Im krótsza ogniskowa soczewki, tem większa jest **zdolność zbierająca** soczewki, tak też nazywamy odwrotność ogniskowej czyli $\frac{1}{f}$. Powyższe równanie można zatem odczytać. *zdolność zbierająca systemu soczewek równa się sumie zdolności zbierających soczewek, tworzących ten system.*

Za jednostkę zdolności zbierającej przyjęto zdolność zbierającą soczewki o ogniskowej $1\,m$ i nazwano ją **dioptrją**. Według tego soczewka o ogniskowej $25\,cm$ ma zdolność zbierającą $1 \cdot 0{,}25 = 4$ dioptrje. Soczewki wklęsłe (rozrzucające) mają zdolność zbierającą odjemną.

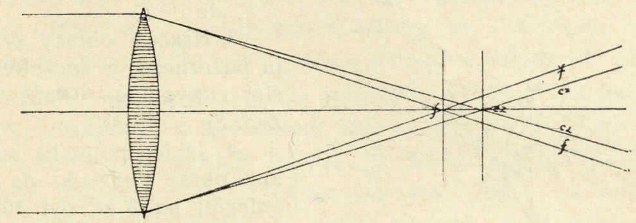
Pytania.

1. Zastosuj II § 25 Pyt. 3 do soczewek. Jakie są warunki, aby promienie, wychodzące z S, dały obraz w S' (*Światło przebywa wszystkie drogi od S do S' w tym samym czasie*, a to jest w związku z drugim warunkiem, że *wszystkie promienie, wychodzące z S, dochodzą do S' z temi samemi fazami*).

2. W II § 24 Pyt. 1 stwierdzono, że światło białe już przy jednokrotnem załamaniu rozszczepia się na barwy. Opierając się na Pyt. 1, wyprowadź wniosek, jaki to ma wynik na powstawanie obrazu. (Ponieważ $c_{cz} > c_n$, promienie niebieskie utworzą obraz bliżej soczewki, niż promienie czerwone.

W S'_n (ryc. 84) obraz jest punktem niebieskim z obwódką czerwoną, w S'_{cz} jest punktem czerwonym z rąbkiem niebieskim.

3. Wyjaśnij równanie III, odnoszące się do ogniskowych, na podstawie twierdzenia o systemie soczewek, wyłożonego w ust. 4. (Nie tylko



Ryc. 84.

w systemie soczewek twierdzenie o zdolności zbierającej ma zastosowanie, ale także w jednej soczewce cienkiej dla zdolności zbierających obu jej powierzchni $\frac{1}{f}=\frac{1}{f_1}+\frac{1}{f_2}$).

Ćwiczenia.

*1. Oznaczyć ogniskową soczewki wypukłej. (Obok silnego źródła światła stawia się siatkę drucianą, w pewnej odległości od niej soczewkę, a jeszcze dalej tło papierowe w takiej odległości, aby powstał wyraźny obraz siatki. Wtedy $f=\frac{s\,s'}{s+s'}$ Z tą samą soczewką wykonać szereg pomiarów. Otrzymane pary wartości przenieść na ramiona kąta $2 \times 60°$, jak na ryc. 62, łączyć punkty końcowe odcinków s i s', do siebie należących i przekonać się, czy te proste h przecinają się w jednym punkcie T Zmierzyć f i porównać z wartością obliczoną).

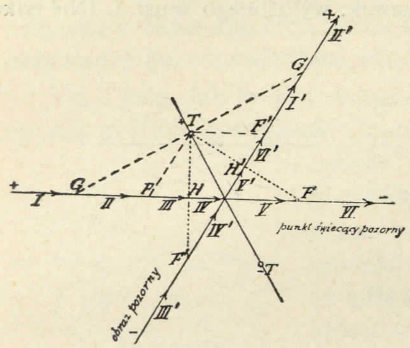
*2. Oznaczyć ogniskową soczewki wypukłej **metodą Bessela**. [Ustawia się siatkę oświetloną i tło w oddaleniu a, a pomiędzy niemi przesuwa się soczewkę tak, aby na tle powstał wyraźny obraz. Są dwa takie położenia soczewki, oddalone od siebie o b. Ponieważ $a=s+s'$, $b=s-s'$, przeto $f=\frac{s\,s'}{s+s'}=\frac{1}{4}\left(a \quad \frac{b^2}{a}\right)$].

*3. Oznaczyć ogniskową soczewki wklęsłej. (Zestawia się tę soczewkę z soczewką wypukłą o znanej ogniskowej f_2 tak, aby system ten tworzył soczewkę wypukłą, której ogniskową f oznacza się metodami Ćw. 1 lub. 2. Wtedy oblicza się szukaną ogniskową f_1 na podstawie ust. 4 z równania $\frac{1}{f_1}+\frac{1}{f_2}=\frac{1}{f}$. Dla f_1 wypadnie wartość odjemna).

Zadania.

1 Zbadać, jak przesuwa się obraz w soczewce wypukłej, gdy punkt świecący przebiega całą oś optyczną. (Wynik przedstawiony jest na ryc. 85. Oś pozioma przedstawia ruch punktu świecącego, ukośna ruch obrazu; części odjemne osi należą do punktu świecącego pozornego lub obrazu pozornego).

2. Zbadać ruch obrazu w soczewce wklęsłej, gdy punkt świecący przebiega całą oś optyczną. (Wynik przedstawić, jak w Zad. 1. Jako punkt obrotu prostej *h*, przecinającej obie osi, należy wziąć nie $+T$, ale T).



Ryc. 85.

3. Nakreśl obrazy przedmiotu pozornego w soczewce wklęsłej i wypukłej. (Patrz II § 23, Zad. 5).

4. Jakiej potrzeba soczewki, aby obraz podziałki na ścianie, odległej na 3 *m*, był 10-krotnie powiększony? ($s + s' = 3, s : s' = \frac{1}{10}$, $\frac{1}{s} + \frac{1}{s'} = \frac{1}{f}$; wyrugpwać s i s' i obliczyć f).

5. W odległości $s = 36\,cm$ za soczewką rozrzucającą o ogniskowej $f = -12\,cm$ znajduje się przedmiot świecący W jaklej odległości x przed soczewką należy umieścić oko, aby ujrzeć wyraźny obraz przedmiotu, gdy **odległość wyraźnego widzenia** wynosi $d = 25\,cm$? Jakie jest pomniejszenie obrazu? (Piszemy równania tak, jak gdyby to było dla soczewki wypukłej: $\frac{1}{s} + \frac{1}{s'} = \frac{1}{f}$, $s' = x \quad d$, rugujemy s' obliczamy $x = d + \frac{fs}{s \quad f} = 16\,cm$. Inaczej rozumując, łatwo pobłądzić).

6. Soczewka dwuwypukła szklana ($n = \frac{3}{2}$) ma promienie kulistości $r_1 = 20\,cm$ i $r_2 = 25\,cm$. Jaka jest jej ogniskowa? Jaka jest zdolność zbierająca pierwszej, jaka drugiej powierzchni soczewki, jaka jest zdolność zbierająca soczewki? ($f = 2{,}22\,cm$, $\frac{1}{f_1} = \frac{n-1}{r_1} = 2{,}5$ dioptrji, $\frac{1}{f_2} = \frac{n-1}{r_2} = 2$ dioptrje, $\frac{1}{f} = \frac{1}{f_1} + \frac{1}{f_2} = 4{,}5$ dioptrji).

D. INSTRUMENTY OPTYCZNE.

§ 27. Aparat fotograficzny i oko.

1 Ciemnia optyczna, opisana w II § 14, 4, opatrzona w przedniej ścianie otworem, zamkniętym soczewką zbierającą **(objektywem),** która na tylną ścianę **(matówkę)** rzuca rzeczywiste i odwrócone obrazy oświetlonych przedmiotów, stanowi **aparat fotograficzny** Aby obraz na matówce dla różnych odległości przedmiotu od soczewki był wyraźny, musi także odległość matówki od objektywu odpowiednio zmieniać się, w tym celu matówka lub objektyw dają się w pewnych grani-

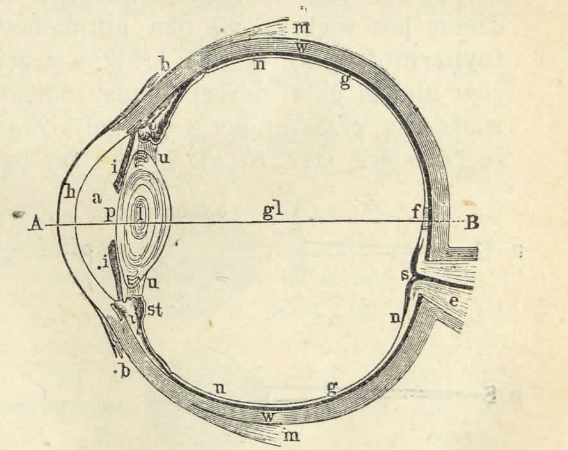
cach wobec siebie przesuwać. Aby powiększyć wyraźność obrazu, ogranicza się wiązkę promieni, przechodzącą przez objektyw, zapomocą odpowiednich **przysłon.** Użycie jednak przysłony o mniejszej średnicy zmniejsza jasność obrazu na matówce.

Po otrzymaniu wyraźnego obrazu na matówce, wstawia się w jej miejsce płytę, pokrytą związkiem czułym na działanie światła. Jeżeli więc na płytce szklanej, która jest powleczona żelatyną, zmieszaną z bromkiem srebra, wytworzymy w aparacie fotograficznym rzeczywisty obraz, to srebro wydzieli się pod wpływem słabych ciał redukujących najłatwiej na miejscach, które zajmowały najjaśniejsze części obrazu, na innych powolniej. Ponieważ wydzielone srebro jest czarne, przeto powstaje obraz, na którym jasne miejsca przedmiotu są ciemne, a części ciemne jasne. Powstały obraz nazywamy **obrazem ujemnym** albo **negatywem.** Czynność tą nazywamy **wywołaniem obrazu.**

W obrazie ujemnym na miejscach, odpowiadających ciemnym częściom przedmiotu, jest nierozłożony bromek srebra, który rozłożyłby się pod wpływem światła. Dlatego zmywa się płytkę płynem rozpuszczającym sól srebra. (**Utrwalenie obrazu**).

Z obrazu ujemnego otrzymuje się dodatni **(pozytyw)**, wystawiając na działanie światła papier, powleczony chlorkiem srebra, który nakryty obrazem ujemnym, rozłoży się pod jasnemi, a nie zmieni pod ciemnemi częściami ujemnego obrazu (**kopjowanie**).

2. **Oko** ludzkie (ryc. 86) i podobnie zbudowane oko zwierząt składa się z kuli, wypełnionej dwoma przezroczystemi ciałami, między któremi znajduje się ciało przezroczyste, silniej łamiące kształtu soczewki. Światło dostaje się do oka przez przezroczystą **rogówkę** *h* i **źrenicę** *p* a wskutek załamania się powstaje na przeciwległej ścianie kuli, wyścielonej siatką wrażliwych nerwów **(siatkówka)**, rzeczywisty, odwrócony i pomniejszony obraz oświetlonego przedmiotu. Miejsce wejścia nerwów do oka *s* jest


Ryc. 86.

niewrażliwe na promienie światła **(plamka Mariotte'a)**. O k o j e s t w i ę c c i e m n i ą o p t y c z n ą.

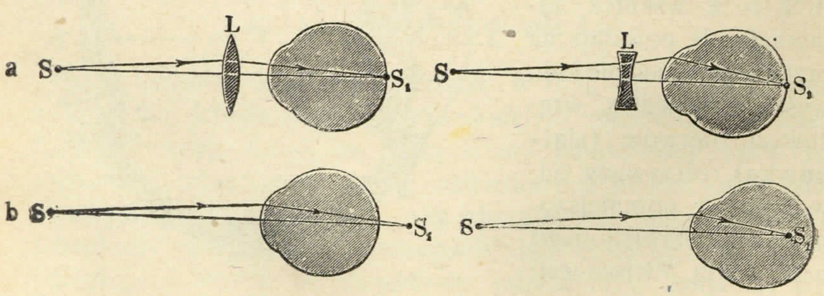
Oko jest również podobne do przyrządu fotograficznego, bo światło wywołuje na oświetlonych częściach siatkówki zmiany chemiczne, polegające na szybkiem odbarwieniu czerwonego barwnika, zawartego w siatkówce.

Wrażenie światła powstaje w oku w jednej chwili. Możemy widzieć iskry, trwające tylko przez miljonową część sekundy, ale wrażenie światła nie ustaje razem z niem.

Gdy żarzącym się węglem szybko poruszamy, widzimy świecącą linję, chociaż węgiel w każdem położeniu tylko na jednem miejscu siatkówki obraz wytwarza. Szybko po sobie następujące wrażenia łączą się z sobą. Szybko wirujący krążek, którego wycinki są pomalowane w barwy widma, wydaje się białawym. Gdy patrzymy na szybko zmieniające się obrazy, przedstawiające jakiś przedmiot w położeniach, jakie zajmuje w następujących po sobie chwilach, doznajemy złudzenia, że przedmiot rzeczywiście się porusza. **(Kinematograf)**.

3. Odległość wyraźnego widzenia **oka normalnego** wynosi około 25 *cm*, czyli oko przystosowuje się najlepiej na rozbieżność 4 dioptryj, a zdolność **przystosowania (akomodacji)** sięga od 12 *cm*, aż do nieskończonej odległości.

Oko, którego odległość dokładnego widzenia jest znacznie mniejsza, które może się przystosować tylko do odległości nieznacznych, często bardzo małych, nazywa się **krótkowidzące (myopia)**. Oko, którego najmniejsza odległość wyraźnego widzenia jest większa, niż oka normalnego, jest **dalekowidzące (hypermetropia)**. W oku krótkowidzącem powstają, z powodu zbyt długiej gałki ocznej, obrazy odległych przedmiotów przed siatkówką, przedłużamy więc ogniskową oka zapomocą soczewki rozrzucającej (ryc. 87 a). W oku zaś dalekowidzącem powstają

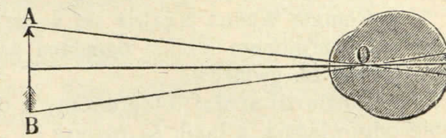


Ryc. 87

z powodu zbyt krótkiej gałki ocznej, obrazy bliskich przedmiotów za siatkówką, dlatego skracamy ogniskową zapomocą soczewki skupiającej (ryc. 87 b) **(Okulary)**.

W starości oko traci zdolność przystosowywania się do bliskich przedmiotów **(presbyopia)**.

4. **Kątem widzenia** nazywamy kąt między promieniami, wykreślonemi z końców przedmiotu *AB* do punktu skrzyżowania promieni. Od tego kąta zależy wielkość obrazu *ab* tego przedmiotu na siatkówce czyli jego **pozorna wielkość** (ryc. 88).



Ryc. 88.

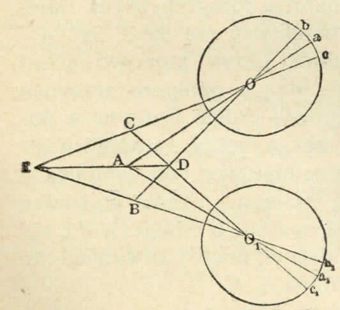
S t y c z n a (tg) k ą t a w i d z e n i a j e s t w p r o s t p r o p o r c j o n a l n a d o w i e l k o ś c i p r z e d m i o t u, a o d w r o t n i e p r o p o r c j o n a l n a d o o d l e g ł o ś c i o d o k a.

Gdy punkty *a*, *b* bardzo blisko na siatkówce się schodzą, widzimy tylko jeden punkt, podobnie jak dwa bardzo bliskie siebie kolce zapomocą dotykania odczuwamy jako jeden

Miernie oświetlonych przedmiotów nie widzimy, jeżeli kąt widzenia wynosi mniej niż $^1/_2$'

5. Przedmioty, na które oko jest skierowane, widzimy wyraźnie, z boku leżące niewyraźnie. Pochodzi to stąd, że najwyraźniej widzimy jednem miejscem siatkówki, tak zwaną **plamą żółtą** *f* (ryc. 86). Prosta, łącząca środek żółtej plamy z punktem krzyżowania promieni, nazywa się **osią widzenia**.

Obrazy punktu (ryc. 89), w który się wpatrujemy, padają w obu oczach na żółtą plamę *a*, a_1 Widzimy ten punkt pojedyńczo. Również pojedyńczo widzimy punkty B, C, podwójnie zaś punkty D, E. Gdybyśmy przesunęli oko prawe tak, aby nakryło lewe, to utworzone na siatkówce obrazy pojedynczo widzianych punktów, nakryłyby się. Miejsca tych obrazów nazywają się **odpowiadającemi sobie**. Gdy obrazy punktu padają na nie, powstaje jedno wrażenie, w przeciwnym razie dwa.



Ryc. 89.

Pytania.

1. Dlaczego osoby krótkowidzące zmrużają powieki, gdy patrzą na przedmioty odległe?

2. Czy przedmiot bardzo jasno oświetlony można widzieć wyraźnie także z odległości mniejszej od odległości wyraźnego widzenia? (Zwężenie źrenicy działa, jak przysłona).

3. Planeta Wenus pojawia się w fazach podobnie, jak księżyc. Dlaczego nieuzbrojonem okiem oglądana przedstawia się, jak każda inna, tylko jaśniejsza, gwiazda?

4. Porównaj aparat fotograficzny z okiem, które części składowe sobie odpowiadają, a jakie są różnice?

Ćwiczenia.

*1. Z odległości mniejszej od odległości wyraźnego widzenia druku czytać nie można, gdyż obrazy powstające na siatkówce, nie są wyraźne. Patrz jednak na druk z odległości 3 do 5 *cm* przez otwór uczyniony igłą w kartonie. Obraz jest zupełnie wyraźny. Objaśnij to rysunkiem. Co czyni fotograf, jeśli chce aby obraz fotograficzny posiadał znaczną głębokość, to zn. aby przedmioty dalsze i bliższe wypadały na fotografji równie wyraźnie? (Zastosowanie przysłon. Im bardziej promienie są przyosiowe, tem trudniej oznaczyć ich punkt przecięcia się z osią).

*2. Zmierz odległość wyraźnego widzenia swego oka prawego i lewego **sposobem Ohma**. (Nić białą kilku metrów długości przytwierdź jednym końcem u górnego brzegu czarnej tablicy, drugi zaś jej koniec, nawinięty na lewy palec wskazujący, trzymaj przed okiem. Wtedy naciągnięta nić przedstawi się w postaci długiego, jasnego trójkąta, opartego podstawą o oko, a którego długość jest odległością wyraźnego widzenia. U krótkowidzących długość ta jest niewielka, a za wierzchołkiem trójkąta wygląd nici znów się rozszerza).

*3. Nakreśl 10 czarnych linij, 4 *cm* długich 1 *mm* grubych w oddaleniu 1 *mm* od siebie. Przypnij rysunek na ścianie dobrze oświetlonej i oddalaj się od niego, aż staniesz w takiem miejscu, z którego nie rozeznasz już poszczególnych linij, lecz widzieć będziesz prostokąt jednostajnie ciemny. Zmierz to oddalenie i oblicz stąd najmniejszy kąt widzenia swego oka.

*4. Zmierz ogniskową objektywu w aparacie fotograficznym. (Mierzenie oddalenia matówki i przedmiotu od objektywu nie może być dokładne. Lepiej wykonać pomiar drogą pośrednią. Ustaw pionowo przed aparatem podziałkę milimetrową, jasno oświetloną, z punktem zerowym u góry. Na matówce nakreśl ołówkiem dwie dwie proste poziome w dowolnem oddaleniu w' Aparat ustaw tak, aby wyraźny obraz górnego końca podziałki znajdował się na dolnej linji na matówce i odczytaj liczbę podziałki w_1, zgadzającą się z górną równoległą. Następnie przesuń podziałkę równolegle do pierwotnego położenia na osi aparatu o odległość d i wykonaj znów pomiar długości podziałki w_2, widzianej między równoległemi na matówce. Ponieważ

$$\frac{1}{s_1} + \frac{1}{s'_1} = \frac{1}{f} \qquad \frac{1}{s_2} + \frac{1}{s_2'} = \frac{1}{f}, \qquad \frac{w_1}{w'} = \frac{s_1}{s_1'}, \qquad \frac{w_2}{w'} = \frac{s_2}{s_2'}, \qquad s_2 - s_1 = d,$$

przeto $f = \frac{dw'}{w_2 \quad w_1}$ Równania 1 i 2 pomnożyć przez s_1 i s_2, zastąpić w nich s przez w zrównań 3 i 4, odjąć równania stronami i obliczyś f).

Zadania.

1. Oko jest systemem zbiorowym, utworzonym z powierzchni rogówki, łamiącej promienie światła, przechodzące z powietrza do cieczy ocznej o współczynniku załamania w przybliżeniu równym współczynnikowi wody i z soczewki o gęstości cokolwiek większej. Ogniskowa oka jest w pewnych granicach zmienna, gdyż podlega **przystosowaniu (akomodacji)**. Z pomiarów oka ludzkiego wynika, że promienie załamują się w niem, jak gdyby rogówka miała promień kulistości 5 *mm*, a długość oka, mierzona od wierzchołka rogówki do siatkówki, wynosiła 20 *mm*. Jest to zarazem wewnętrzna ogniskowa oka. Oblicz średni współczynnik załamania w oku i ogniskową zewnętrzną. (Z równania II § 24, 6 Równ. II: $\frac{1}{s} + \frac{n}{s'} = \frac{n \quad 1}{r}$, gdzie $s = \infty$, $s = 20$, $r = 5$, obliczymy n z równania zaś $\frac{1}{f} = \frac{n}{f'}$, gdzie $f' = 20$, obliczymy f.

2. Dla oka daleko widzącego, o odległości wyraźnego widzenia $D = 50\,cm$, dobiera się okularów, które czynią wyraźnemi przedmioty z odległości $d = 25\,cm$. Znaleźć ogniskową tych szkieł. (Gdy zewnętrzną ogniskową oka nazwiemy F ogniskową soczewki okularów f, ogniskową systemu soczewka —oko F', głębokość oka S, współczynnik załamania w oku n, to mamy równania, II § 24, 6, równ. VI $\frac{1}{D} + \frac{n}{S} = \frac{1}{F}$, $\frac{1}{d} + \frac{n}{S} = \frac{1}{F'}$ i II § 26, 4: $\frac{1}{F'} = \frac{1}{F} + \frac{1}{f}$, z których otrzymujemy: $\frac{1}{f} = \frac{1}{d} \quad \frac{1}{D}$. Zdolność zbierająca tych szkieł wynosi 2 dioptrje).

3. Odległość wyraźnego widzenia dla pewnego oka krótkowidzącego wynosi 15 *cm*. Jakich potrzeba szkieł, aby oko to widziało wyraźnie z odległości 25 *cm*? (Na podstawie zadania 2 wypadnie zdolność zbierająca — 2,67 dioptrji).

4. Dwa punkty widzimy tylko wtenczas oddzielnie, gdy kąt ich widzenia wynosi conajmniej $\frac{1}{2}'$ Obliczyć, jakiej to odpowiada wielkości na siatkówce, gdy przyjmiemy dane oka według zadania 1. (Promienie przecinają się bez załamania w ośrodku kulistości rogówki i dają obraz na siatkówce oka, odległej o 15 *mm*. Obliczyć łuk koła o promieniu 15 *mm*, należący do kąta $\frac{1}{2}'$. Wynik będzie oznaczać oddalenie zakończeń nerwów wzrokowych na siatkówce).

§ 28. Mikroskop prosty i złożony

1. **Mikroskopy** są to przyrządy optyczne, służące do oglądania drobnych przedmiotów.

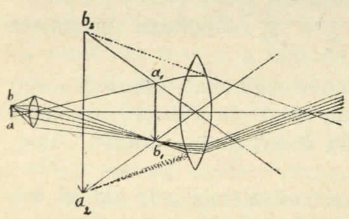
Jeżeli przedmiotu drobnego z powodu zbyt małego kąta widzenia nie widzimy wyraźnie, możemy go ujrzeć wyraźnie, jeżeli między oko a przedmiot wstawimy soczewkę zbierającą, o krótkiej ogniskowej, a przedmiot umieścimy między soczewką a ogniskiem tak, aby dla oka, tuż za soczewką umieszczonego, powstał w dalekości wyraźnego widzenia obraz pozorny drobnego przedmiotu. Promienie wpadające do oka będą miały taki kierunek, jak gdyby wychodziły z przedmiotu umieszczonego w dalekości wyraźnego widzenia i tak wielkiego, jak powiększony obraz pozorny.

Soczewkę wypukłą w ten sposób użytą nazywamy **mikroskopem** prostym albo **lupą.**

Powiększenie lupy $v = \frac{w'}{w} = \frac{s'}{s}$. A ponieważ obraz pozorny powstaje w dalekości wyraźnego widzenia d, przeto $\frac{1}{d} + \frac{1}{s} = \frac{1}{f}$ skąd $s = \frac{df}{d+f}$, zatem $v = 1 + \frac{d}{f}$. Powiększenie jest tem większe, im mniejsza ogniskowa soczewki, a im większa odległość dokładnego widzenia. Aby więc powiększenie było znaczne, musi ogniskowa być mała (mały promień krzywizny).

Przy lupach zadowalamy się miernem powiększeniem, bo soczewki o bardzo małej ogniskowej dają z powodu aberacji sferycznej niewyraźne obrazy.

2. Do otrzymania znacznego powiększenia służy **mikroskop złożony**, składający się z dwóch soczewek. Soczewka **przedmiotowa (objektyw)** o bardzo małej ogniskowej daje rzeczywisty, powiększony obraz $a_1 b_1$ przedmiotu $a\ b$ (ryc. 90), znajdującego się przed jej ogniskiem. Na ten obraz patrzymy przez soczewkę **oczną (okular)** tak ustawioną, aby w dalekości wyraźnego widzenia powstał pozorny obraz $a_2\ b_2$ rzeczywistego obrazu $a_1\ b_1$.

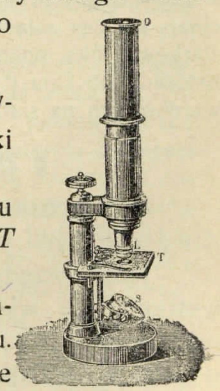


Ryc. 90.

Powiększenie $v = \frac{a_2 b_2}{a\,b} = \frac{a_2 b_2}{a_1 b_1} \cdot \frac{a_1 b_1}{a\,b}$, t. z. równa się iloczynowi z powiększenia soczewki przedmiotowej i ocznej.

Ryc. 91 przedstawia urządzenie mikroskopu złożonego. Przedmiot umieszcza się na stoliku T i oświetla zwierciadłem S.

3. **Granicę powiększenia** mikroskopu zakreśla wzgląd na jasność i wyrazistość obrazu. Jednostka pola obrazu rzeczywistego otrzymuje tyle światła, ile go wysyła odpowiednia wielkość



Ryc. 91.

pola przedmiotu, jasność więc maleje z kwadratem powiększenia. Przy bardzo znacznych powiększeniach potrzeba silnego oświetlenia. Powiększenia dzisiejszych mikroskopów dochodzą do przeszło 3000. Najmniejszy rozmiar jeszcze widzialnego przedmiotu wynosi około $\frac{1}{4000}$ *mm*.

Pytania.

1. Czy w zwykłej lupie potrzeba przysłony? (Przysłoną jest źrenica oka).

2. Dlaczego przy użyciu lupy należy oko trzymać jak najbliżej soczewki? (W tem położeniu wzrok obejmuje największy obszar obrazu; prócz tego promienie, dostające się do oka, przechodzą przez środek soczewki, co zmniejsza ich aberację sferyczną).

Zadania.

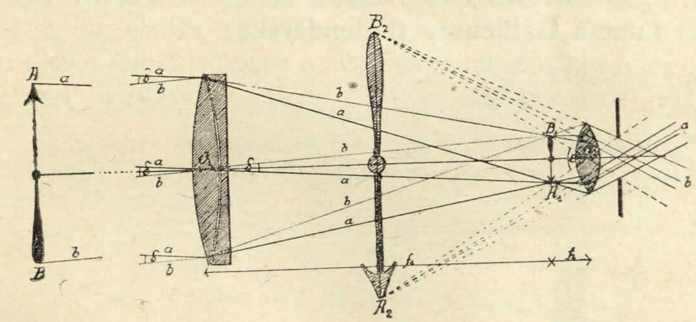
1. Jaką ogniskowę powinna mieć lupa, powiększająca 6-krotnie dla oka normalnego ($d = 25\ cm$)?

2. Ile razy powiększa ta sama lupa dla oka krótkowzrocznego ($D = 10\,cm$)?

3. Okaż, że powiększenie mikroskopu jest równe powiększeniu kąta widzenia. (Oba kąty widzenia przedmiotu i obrazu, należy brać przy tej samej odległości wyraźnego widzenia. Kąty te są bardzo małe, zatem stosunek ich równa się stosunkowi ich tangensów).

§ 29. Lunety (Teleskopy).

Lunety (teleskopy) służą do widzenia szczegółów na przedmiotach odległych, których oko nieuzbrojone nie widzi z powodu bardzo małego kąta widzenia. W lunetach, podobnie jak w mikroskopie złożonym, powstaje przed soczewką oczną obraz rzeczywisty przedmiotu.



Ryc. 92.

a) **Luneta astronomiczna** jest takiem samem zestawieniem soczewek skupiających, jak mikroskop, z tą różnicą, że soczewka przedmiotowa ma znaczną ogniskowę (ryc. 92).

Rzeczywisty, pomniejszony, odwrócony obraz powstaje w ognisku soczewki przedmiotowej. Z punktu O_2 widziałoby oko przedmiot AB pod kątem $AO_1B = A_1O_1B_1 = \delta$, a obraz pozorny widzi pod kątem $A_2O_2B_2 = \epsilon$.

Powiększenie więc $v = \frac{\epsilon}{\alpha}$, a ponieważ α, ϵ są małe kąty, przeto $v = \frac{\operatorname{tg}\epsilon}{\operatorname{tg}\alpha} = \frac{A_1B_1}{A_1O_2} \cdot \frac{A_1O_1}{A_1B_1} = \frac{A_1O_1}{A_1O_2}$

Ponieważ A_1B_1 jest prawie w ognisku soczewki ocznej i przedmiotowyj, przeto $A_1O_1 = f_1$, $A_1O_2 = f_2$, więc także $v = \frac{f_1}{f_2}$

Powiększenie lunety astronomicznej równa się stosunkowi ogniskowych soczewki przedmiotowej i ocznej.

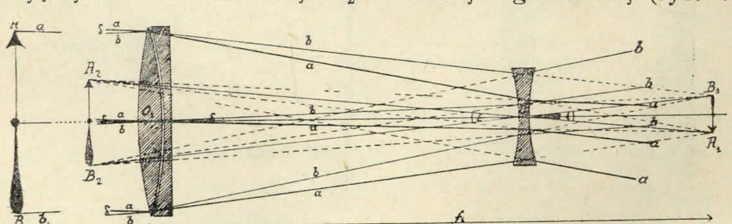
Długość lunety astronomicznej równa się sumie ogniskowych $f_1 + f_2$.

Podobnie jak przy użyciu mikroskopów, dochodzi się w lunetach do pewnych granic powiększenia. Przekroczenie ich zmniejsza jasność i wyrazistość obrazu. Ze względu na stan naszej atmosfery używa się najwyżej 1000 krotnego powiększenia.

W lunetach i mikroskopach, służących do ścisłych pomiarów, znajduje się w płaszczyźnie rzeczywistego obrazu **krzyżyk** z nitek pajęczych lub szereg kresek na szklanej płytce. Krzyżyk, który przez soczewkę oczną widzimy w powiększeniu, służy do skierowania lunety na ściśle określony punkt.

b) **Luneta ziemska.** Ażeby uniknąć odwróconych obrazów przy patrzeniu na ziemskie przedmioty, używa się lunety, w której między soczewką przedmiotową a oczną znajduje się jeszcze jedna soczewka, odwracająca obraz rzeczywisty $A_1 B_1$

c) **Luneta Galileusza (holenderska)** składa się ze zbierającej soczewki przedmiotowej O_1 o znacznej ogniskowej i rozrzucającej soczewki ocznej O_2 o małej ogniskowej (ryc. 93).



Ryc. 93.

Promienie, wychodzące z przedmiotu AB, utworzyłyby po załamaniu w O_1 obraz $A_1 B_1$, lecz rozrzucająca soczewka oczna

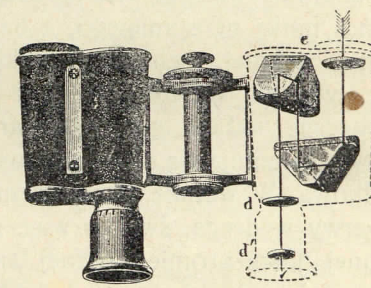
zmienia je w rozbieżne wiązki, wychodzące pozornie z A_2 B_2. Oko więc widzi w A_2 B_2 prosty, powiększony, pozorny obraz przedmiotu. Powiększenie tej lunety $= \frac{f_1}{f_2}$, długość $f_1 - f_2$

Lunety holenderskiej używa się z powodu jej krótkości jako teatralnej i polowej.

Pole widzenia jest małe, gdyż z powodu rozbieżności promieni tylko z punktów objektywu, blizko osi soczewki leżących, promienie do oka dojść mogą. Dlatego lunety polowe powiększają najwyżej 20 30 razy Lunety teatralne 2 — 3 razy

d) **Luneta pryzmatyczna** jest lunetą astronomiczną, w której promienie przebiegają trzykrotnie tę samą drogę, odbijając się całkowicie w pryzmatach szklanych (ryc. 94). Wskutek tego nie tylko długość rury lunety skraca się, ale także uzyskuje się przez dwukrotne odbicie obrazy proste.

e) **W teleskopach** jest soczewka przedmiotowa zastąpiona zwierciadłem wklęsłem. Obraz rzeczywisty, w niem wytworzony ogląda się przez szkło oczne.



Ryc. 94.

Pytanie.

Jak należy rozumieć „powiększenie lunety“? Okazać, że powiększenie kąta widzenia równoznaczne jest z przybliżeniem obrazu.

Ćwiczenia.

*1. Z soczewek o znanych ogniskowych, ustawionych na szerokich korkach, złóż lunetę astronomiczną, ziemską i holenderską.

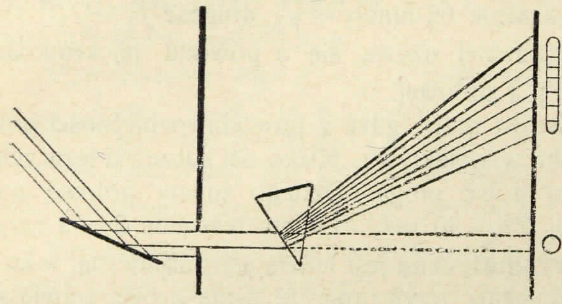
*2. Z czteru zwierciadełek sporządź pryzmaty całkowitego odbicia i przekonaj się, że obrazy odwracają się, gdy użyjemy pryzmatów, jak w lunecie pryzmatycznej.

E. ZJAWISKA BARWNE ŚWIATŁA.

§ 30. Rozszczepienie światła.

1 Gdy promień słoneczny (lampy, świecy) wskutek załamania, n. p. w pryzmacie, zbacza z pierwotnego kierunku, roz-

kłada się równocześnie na promienie barwne. Zjawisko to nazywamy **rozszczepieniem światła**. Jeżeli światło słoneczne pada przez szczelinę okiennicy zaciemnionego pokoju, równoległą do łamiącej krawędzi pryzmatu (ryc. 95), a po załamaniu na białe tło, ustawione za pryzmatem, ujrzymy na tle



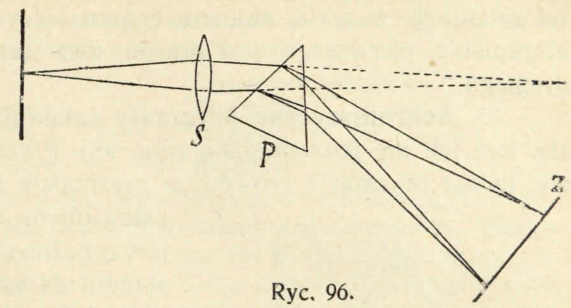
Ryc. 95.

zabarwioną wstęgę, zwaną **widmem**, złożoną, poczynając od końca mniej przesuniętego, z barw czerwonej, pomarańczowej, żółtej, zielonej, niebieskiej, błękitnej, fiołkowej. Doświadczenie to wykonał **Newton** (1666) i wywnioskował, że 1) światło słoneczne składa się różnobarwnych promieni, 2) że różne barwy załamują się niejednakowo najmniej czerwona, najwięcej fiołkowa. W widmie słonecznem jedna barwa przechodzi bez przerwy w drugą, światło więc słoneczne składa się z nieskończonej ilości promieni różnej łamliwości. Pewne grupy promieni wywołują jednakże w oku jednakowe wrażenia. Wszystkie barwy widma razem nazywamy światłem białem. Że barwy widma nie powstają dobiero w pryzmacie, lecz są rzeczywiście w świetle białem zawarte, wynika stąd, że pryzmaty z różnych ciał rozszczepiają białe światło na takie same barwy i że przez zebranie rozszczepionych barw (n. p. zapomocą soczewki) otrzymuje się napowrót światło białe.

*2. Widmo składa się z różnobarwnych obrazów szczeliny. Te obrazy jednak nakrywają się w znacznej części, gdy szczelina jest szeroka. Czyste widmo otrzymuje się, jeżeli przed bardzo wąską szczeliną ustawi się soczewkę tak, aby na zasłonie powstał wyraźny obraz szczeliny Gdy następnie w drodze promieni umieści się pryzmat krawędzią łamiącą do szczeliny równolegle tak, iżby odchylenie było najmniejsze, a tło ustawi prostopadle do załamanych promieni, różnobarwne obrazy szczeliny ułożą się obok siebie w **czyste widmo** (ryc. 96).

Że załamanie promieni każdej barwy jest inne, potwierdzają następujące doświadczenia

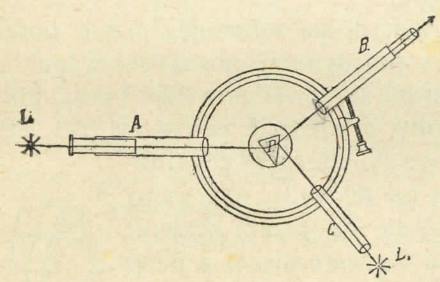
Gdy z czystego widma, wytworzonego pryzmatem P_1, jednobarwna wiązka światła pada przez szczelinę w zasłonie na pryzmat drugi P_2, wiązka ta



Ryc. 96.

w pryzmacie P_2 załamuje się, ale nie rozszczepia. Gdy pryzmat P_1 obracamy, coraz inna barwa pada na P_2, a każda doznaje innego odchylenia

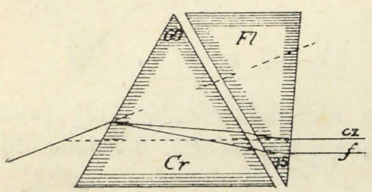
*3. Do badania widma służy **spektroskop** (ryc. 97). Szczelina rury A znajduje się w ognisku soczewki, zatem na pryzmat P pada równoległa wiązka promieni. Rozszczepione światło wchodzi do lunety B, zapomocą której widzimy widmo w powiększeniu Rura C jest na końcu zwrócym do pryzmatu, zamknięta soczewką, w której ognisku umieszczona jest fotografja skali milimetrowej około 15 razy pomniejszonej. Skalę oświetla się osobnem światłem L_2. Gdy osi rur B i C mają do ściany pryzmatu jednakowe nachylenia, promienie, padające na pryzmat z L_2, odbijają się od ściany pryzmatu tak, że widzi się przez lunetę B widmo na tle skali. Można w ten sposób miejsce w widmie dokładnie określić.



Ryc. 97.

*4. Pryzmaty różnych ciał dają widma niejednakowej długości, zatem różnica między odchyleniem promieni czerwonych a fiołkowych jest dla różnych ciał rozmaita. Różnicę między współczynnikiem załamania promieni skrajnych czerwonych i fiołkowych, czyli $n_f - n_c = d$, nazywamy **wielkością rozszczepienia** danego ciała, a stosunek wielkości rozszczepienia do średniego współczynnika załamania **zdolnością rozszczepienia**. Wielkość rozszczepienia nie jest u różnych ciał do średniego współczynnika załamania proporcjonalna; tak np. załamanie średnie w szkle, zwanem **flint**, jest trochę tylko większe od załamania w szkle, zwanem **crown**, (czytaj kraun) a rozszczepienie pierwszego jest prawie dwa razy tak wielkie, jak drugiego.

*5. **Achromatyczne pryzmaty** załamują promienie światła, lecz ich nie rozszczepiają (ryc. 98). Pryzmat takl otrzymuje się, łącząc pryzmat z crownu z pryzmatem z flintu, odwrotnie ustawionym, którego kąt łamiący jest o połowę mniejszy. Pryzmat z flintu da więc widmo tej samej długości, jak pryzmat z crownu, lecz w odwrotnem położeniu; a więc rozszczepienie zniesie się, a odchylenie tylko zmniejszy się o połowę.



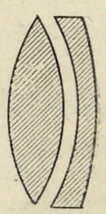
Ryc. 98.

Pryzmat „à vision directe“ (Amici), który rozszczepia promienie światła, lecz ich nie odchyla, otrzymuje się przez połączenie stosownych pryzmatów u flintu i crownu. Pryzmat taki ma zastosowanie w spektroskopach, jeżeli chodzi o to, aby badane światło leżało w przedłużeuiu lunety (np. przy badaniu widm ciał niebieskich lub widm ciał, badanych przez mikroskop).

Ponieważ każda barwa inaczej się załamuje, przeto obraz białego punktu świecącego w pojedynczej soczewce wypukłej jest obrazem barwnym; najbliżej soczewki powstaje obraz fiołkowy, nieco dalej zielony, żółty, a wreszcie czerwony (ryc. 84).

Wada ta soczewki nazywa się **aberacją chromatyczną,** soczewkę zaś, wolną od tej wady, nazywamy **achromatyczną.** Otrzymuje się ją przez złożenie soczewki skupiącej z crownu i rozrzucającej z flintu o odpowiednich promieniach kulistości (ryc. 99).

Soczewkę skupiającą achromatyczną, wolną także od wady aberacji sferycznej, tak zwany **aplanat**, otrzymuje się przez symetryczne złożenie dwóch soczewek achromatycznych.


Ryc. 99.

Ćwiczenia.

*1. W desce wytnij dwa okrągłe otwory o średnicy 5 *cm* tak, aby ich brzegi były oddalone na 8 *cm*. Przygotuj zbiór szkieł barwnych o wymiarach większych od 5 *cm* $\times$ 5 *cm* i przyklej do deski wąskie listewki drewniane tak, aby dowolna para szkieł, wstawiona między listewki, zakrywała otwory Z tyłu za deską, pionowo postawioną, umieść dwa jednakowe światła (żarówki, świece, lampy), oddzielone od siebie nieprzezroczystym kartonem, przed deską zaś ustaw białe tło, na którym powstaną dwa barwne

koła. Przez odpowiednie rozsunięcie świateł można uzyskać nakrycie się barwnych kół i w ten sposób badać **mieszanie się barw**. (Jeżeli barwy widma ułożymy w takie dwa szeregi (półwidma):

czerwona,	niebieskawo-zielona,
pomarańczowa,	niebieska,
żółta,	błękitna,
zielonawo-żółta,	fiołkowa,

to barwy obu szeregów sobie odpowiadające dopełniają się parami do białej. Nazywamy je **barwami dopełniającemi**. Zielona nie ma dopełniającej pośród barw widma, ale z trzech barw: czerwonej, zielonej i fiołkowej można złożyć białą. Barwy te nazywamy **zasadniczemi,** bo z nich, odpowiednio ustosunkowanych, można otrzymać wszystkie istniejące odcienie barwne. Druk trójbarwny. Fotografja w barwach naturalnych).

*2. Jako przedmiot świecący, który ma dać obraz w soczewce wypukłej, bierzemy karton, oklejony papierem, w połowie czerwonym, w połowie niebieskim i owinięty cienką nicią czarną. Przedmiot ten oświetlony jest światłem jasnem, białem, okrytem po stronie odwróconej od kartonu nieprzezroczystą zasłoną. Z tego przedmiotu wytwarza się zapomocą dużej soczewki o długiej ogniskowej obraz na białem tle. Oddalenie obrazu, oceniane według wyraźnych obrazów nici, inne będzie dla połowy czerwonej, a inne dla niebieskiej; różnica ta wynosi prawie $\frac{1}{10}$ ogniskowej. Z dokonanych pomiarów obliczyć ogniskowe soczewki dla promieni czerwonych i fiołkowych.

$$\left(\frac{1}{s}+\frac{1}{s'_{cz}}=\frac{1}{f_{cz}},\quad \frac{1}{s}+\frac{1}{s'_f}=\frac{1}{f_f}\right).$$

*3. Pocztówka zapisana gęsto dwoma barwnemi atramentami: czerwonym i zielonym, nie daje się z łatwością odczytać. Gdy jednak oglądamy ją przez szkło czerwone, znika pismo czerwone, a zielone zdaje się czarnem na czerwonem tle, gdy zaś oglądamy pismo przez szkło zielone, znika pismo zielone i widoczne jest tylko czerwone.

*4. Zastosowanie ćwiczenia 3, do sporządzania **obrazów stereoskopowych (anaglify)**. Przygotuj szybę szklaną i kartkę papieru, formatu ćwiartki arkusza, pokratkowane w jednakowy sposób czarnemi linjami w jednocentymetrowe kratki. Ustaw w dowolnem oddaleniu na jasnem tle jakiś model stereometryczny, najlepiej z drutu, ale może być i inny, byle posiadał dostateczną głębokość, n. p. kula przed graniastosłupem. Pomiędzy okiem a modelem w odległości wyraźnego widzenia umieść w położeniu pionowem szybę pokrątkowaną, a bezpośrednio przed oczyma ustaw na stojaku deszczułkę albo grubą tekturę z otworami półcentymetrowej średnicy, oddalonemi od siebie na odległość oczu, t. j. około 7 *cm*, aby patrząc obojgiem oczu równocześnie można było widzieć przez szybę model. Patrząc raz przez lewy otwór, potem przez prawy, naszkicuj na kratkowanym papierze ołówkiem oba obrazy widziane. Jeśli następnie wyciągniesz kontury lewego obrazu atramentem czerwonym, prawego zaś zielonym i patrzeć będziesz na obraz obojgiem oczu, ale mając przed lewem okiem szkło zielone, przed prawem zaś czerwone, ujrzysz obraz modelu przestrzenny (plastyczny).

Zadania.

1. Oblicz oddalenie ogniska czerwonego od fiołkowego dla soczewki równowypukłej o promieniu kulistości $r = 1\ m$

	n_{cz}	n_f
z flintu	1,628	1,671
z crownu	1,526	1,547.

[Weźmy II § 26,2 Równ. III

$$\frac{1}{f_{cz}} = (n_{cz} - 1)\ \frac{2}{r} \quad \text{i} \quad \frac{1}{f_f} = (n_f - 1)\ \frac{2}{r}.$$

Z nich otrzymujemy

$$f_{cz} - f_f = \frac{r}{2} \cdot \frac{n_f - n_{cz}}{(n_f - 1)\,(n_{cz} - 1)}\Big]$$

2. W ust. 5 przyjęto, że długość widma jest proporcjonalna do kąta łamiącego pryzmatu. Okaż, że to jest prawdziwe tylko dla pryzmatów o małym kącie łamiącym. [Według II § 25,2 $\delta_{cz} = (n_{cz} - 1)\ \omega$, $\delta_f = (n_f - 1\ \omega$, skąd $\delta_f - \delta_{cz} = (n_f - n_{cz})\ \omega$].

§ 31. Niewidzialne części widma.

1 Badając widmo zapomocą czułego termometru, znaleziono, że działanie ogrzewające wzrasta ku końcowi czerwonemu. Gdy zamiast termometru zastosowano do badania widma bardzo czułe stosy termoelektryczne lub jeszcze czulszy **bolometr,** polegający na zmianie oporu elektrycznego w drucie wskutek ogrzania, przekonano się, że działanie ogrzewające istnieje nie tylko w widmie widzialnem, lecz i poza jego czerwonym krańcem.

Jeżeli widmo rzucimy na papier fotograficzny, spostrzeżemy, że zczernienie papieru sięga poza kraniec fiołkowy W widmie więc istnieją obok promieni światła, także promienie, nie działające na nasz narząd wzrokowy. Długość fal krańcowych promieni czerwonych wynosi 770 $\mu\mu$, ($1\ \mu\mu = 0{,}000001\ mm$), częstość drgań 390 biljonów na sekundę; długość fal krańcowych fiołkowych 360 $\mu\mu$, częstość drgań 835 biljonów. Podobnie więc jak ucho, odczuwa i oko tylko drgania, których częstość mieści się w pewnych granicach. **Promieni podczerwonych** i **nadfiołkowych** nie widzimy. Drgania pierwszych są dla oka za powolne, drugich za szybkie.

2. **Skutki fal świetlnych** są stosownie do ich długości i ciała, na które padają, rozmaite a) **optyczne** (działanie na wzrok), b) **termiczne,** c) **chemiczne.**

Fale, których długość mieści się w granicach 360 — 770 $\mu\mu$, mogą wywoływać każdy z tych skutków Fale dłuższe niż 770 $\mu\mu$ nie działają na nerw wzroku, chemicznie tylko wyjątkowo, lecz

uderzając o cząsteczki ciała, mogą zwiększyć ich energję ruchu, który istotę ciepła stanowi. Te długie fale światła, podczerwone, nazywano dawniej **ciepłem promienistem**. Wyśledzić je możemy zmysłem czucia, gdy n. p. zbliżymy rękę do gorącego ciała. Fale krótsze niż 360 $\mu\mu$, nie działają na nerw wzroku i nie mają w zwyczajnych źródłach promieniowania siły ogrzewającej, zato uderzając o cząstki ciała, wywołują ruch ich atomów, który staje się przyczyną zmian chemicznych. Dawniej promienie nadfiołkowe nazywano **promieniami chemicznemi**, niesłusznie, bo także podczerwone i widzialne mogą sprawiać skutki chemiczne.

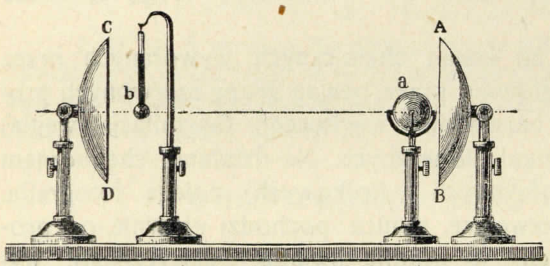
Najważniejszą ze zmian chemicznych wywołanych przez promienie światła (głównie przez pewną grupę czerwonych promieni) jest rozkład bezwodnika węglowego (asymilacja węgla) pod wpływem promieni słonecznych. Na działaniu chemicznem promieni (głównie błękitnych i fiołkowych) polega fotografja.

Działanie ogrzewające słońca pochodzi głównie od promieni podczerwonych. W widmie światła elektrycznego, wytworzonem zapomocą pryzmatu z kwarcu (szklany pryzmat pochłania znaczną część krótkich fal), jest część nadfiołkowa 6 — 8 razy dłuższa od widzialnej. W widmie słońca jest część nadfiołkowa niezupełna z powodu chłonienia krótkich fal przez atmosferę.

3. **Promieniowanie ciał.** Wszystkie ciała promieniują. W temperaturach niskich wysyłają tylko ciemne i długie fale, im zaś wyższa jest temperatura, tem krótsze fale powstają i łączą się z długiemi. W temperaturze 525° C, wszystkie ciała stałe wysyłają czerwone promienie (temperatura czerwonego żaru). W temperaturach jeszcze wyższych poczynają ciała wysyłać także żółte, zielone, niebieskie, fiołkowe, pozafiołkowe promienie tak, że w najwyższych temperaturach wysyłają światło białe (1300° temperatura białego żaru, 1500° światło olśniewające).

4. **Wymiana energji zapomocą promieniowania** odbywa się między ciałami w przestrzeni nieustannie w ten sposób, że ciała o wyższej temperaturze wysyłają więcej energji, niż od zimniejszych otrzymują. Ciała więc gorętsze tracą energję, zimniejsze zyskują. Ciało ma stałą temperaturę, gdy otrzymuje tyle energji, ile przez promieniowanie traci. Jeżeli ciało otoczone jest ze wszystkich stron innemi ciałami, natenczas wszystkie ciała przyjmują po pewnym czasie jednakową temperaturę (n. p. kula gorąca w pokoju).

* Że promienie z ciał nieświecących wychodzą, dowodzą następujące doświadczenia. Gdy usuniemy zasłonę, ustawioną między rozgrzanym piecem żelaznym a ręką, odbieramy w tej chwili wrażenie ciepła. Przez przewodnictwo tak złego przewodnika, jak powietrze, ciepło do ręki tak prędko dojśćby nie mogło. Gdy w ognisku zwierciadła wklęsłego *AB* (ryc. 100), ustawimy ciemne gorące ciało *a*, podnosi się termometr w ognisku drugiego zwierciadła wklęsłego *CD*, ustawionego w odległości kiku metrów Mała załona, ustawiona między ciałem *a* a termometrem, nie zmienia rzeczy Natomiast działanie na termometr ustaje, gdy wstawimy zasłonę między *a* i *AB*, lub między *b* i *CD*. Widocznie więc ciepło nie dochodzi do termometru przez przewodnictwo, lecz w postaci promieni, jak światło. Gdy w miejsce ciała gorącego ustawimy w ognisku zwierciadła *AB* kawałek lodu, termometr traci więcej energji, niż odbiera. Stwierdzono, że promienie niewidzialne, wysyłane przez ciała ciemne, uginają się, odbijają się i załamują według tych samych praw, jak światło, że zatem różne zjawiska promieniowania są objawami tego samego rodzaju, różniącemi się od siebie tylko długością wysyłanych fal.



Ryc. 100.

Pytania.

1 Dlaczego płomień świecy ma odcień żółtawy, a lampa łukowa niebieskawy? (Temperatura płomienia).

2. Dlaczego górne warstwy atmosfery są zimne? (Atmosfera pochłania fale bardzo długie podczerwone; fale o długości od 3500 $\mu\mu$ = 0,0035 *mm* począwszy przepuszcza, aż do nadfiołkowych o długości 300 $\mu\mu$; Maximum natężenia promieniowania słonecznego znajduje się w widmie słonecznem dla fal długości 620 $\mu\mu$, co odpowiada wysokiej średniej temperaturze słońca około 4500°. Powierzchnia ziemi pochłania w znacznej części promieniowanie słoneczne, ogrzewa się jednak do temperatury o wiele niższej wysyła fale tej temperaturze odpowiadające. Jeżeli przyjmiemy za średnią temperaturę powierzchni ziemi 10°, to tej temperaturze odpowiada maximum promieniowania dla fal o długości 1000 $\mu\mu$, zatem promienie te muszą być przez atmosferę pochłonięte i muszą ją ogrzewać. Stąd wniosek, że z i e m i a s w e g o c i e p ł a n a z e w n ą t r z

w w s z e c h ś w i a t n i e w y p r o m i e n i o w y w a d z i ę k i s w e j a t m o s f e r z e

Ćwiczenia.

*1. Napełnij małą kulistą kolbkę o średnicy 10 *cm* dwusiarczkiem węgla, w którym rozpuszczono trochę jodu. Ciecz ta jest dla promieni widzialnych nieprzezroczysta, przepuszcza jednak promienie podczerwone, o czem przekonasz się, ponieważ zapomocą takiej kuli, użytej, jak soczewka zbierająca, możesz zapalić papier poczerniony lub proch strzelniczy.

*2. Napełnij próbówkę roztworem eskuliny t. j. wyciągu kory dzikiego kasztana. Badaj nią widmo słoneczne. Okaże się, że także w części nadfiołkowej, gdzie już widma widzialnego niema, próbówka świeci piękną barwą.

*3. Spodrządź roztwór siarczanu chininy w kwasie cytrynowym. Narysuj cokolwiek tą cieczą na białym papierze rysunkowym, a następnie sfotografuj ten niewidoczny obraz. Na negatynie fotograficznym, krótko wywoływanym, obraz wystąpi całkiem wyraźnie.

§ 32. Pochłanianie promieni (absorbcja).

1 Część promieni, padających na ciało, zostaje w zewnętrznych lub głębszych warstwach **pochłonięta**, t. zn. część energji fal przechodzi na cząsteczki i zamienia się na ruch cząsteczkowy lub atomowy Niepochłonięta część promieni albo przechodzi przez ciało, albo się odbija, albo w części się odbija, w części przez ciało przechodzi. Ciało, które przepuszcza promienie światła nazywa się **przezroczystem**, w przeciwnym razie jest **nieprzezroczyste**. Pewne ciała nie przepuszczają żadnego rodzaju promieni, inne zaś przepuszczają tylko promienie pewnych rodzajów. Ciało, przezroczyste dla promieni podczerwonych, nazywamy **diatermicznem.**

Sól kuchenna, powietrze, woda są przezroczyste. Sól i powietrze przepuszczają także ciemne promienie podczerwone, których woda nie przepuszcza (jest ona **diatermiczna**). Roztwór jodu w dwusiarczku węgla jest nieprzezroczysty, lecz diatermiczny. Szkło jest przezroczyste, lecz dla promieni podczerwonych w wysokim stopniu adiatermiczne. (Znaczenie okien w cieplarniach).

Ciało, przepuszczające wszystkie widzialne i niewidzialne promienie, nie może się ogrzać.

Promienie słońca nie ogrzewają czystego górskiego powietrza. Gdy przechodzą przez czysty lód, topią go w małym stopniu. (Soczewka z lodu).

2. Od przepuszczonych lub odbitych promieni światła zależy **barwa ciała**. Ciała przezroczyste są **bezbarwne,** jeżeli

przepuszczają wszystkie barwy białego światła w tym samym stosunku, lub są **zabarwione**, jeżeli pochłaniają pewne barwy obficiej.

Między ciałami przezroczystemi, przezroczystemi bezbarwnemi a zabarwionemi i nieprzezroczystemi niema ścisłej granicy. Bardzo cienka warstwa metalu przepuszcza światło, a grube szkło jest nieprzezroczyste. Woda jest w grubych warstwach nieprzezroczysta. W głębi oceanu panuje zupełna ciemność.

Ciało nieprzezroczyste jest **białe**, jeżeli wszystkie składniki białego światła odbija w tym samym stosunku, **czarne**, gdy wszystkie pochłania.

Proszek bezbarwnego przezroczystego ciała jest nieprzezroczysty, biały, bo promienie przez zupełne odbicie na wszystkie strony się rozpraszają. Z tego samego powodu piana wodna jest biała.

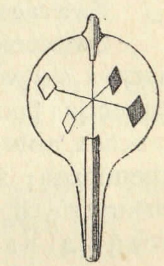
Ciało wydaje się we właściwej barwie tylko wtenczas, gdy na nie padają albo promienie tej samej barwy, albo białe; w przeciwnym razie jest czarne, bo inne promienie pochłania. Jeżeli ciało przezroczyste pochłania te promienie, które drugie ciało przepuszcza, to przez oba ciała razem światło nie przechodzi.

Białe ciało przy czerwonem oświetleniu wygląda czerwono, zielone czarno.

3. **Związek między promieniowaniem a pochłanianiem.** Gdybyśmy między uchem a źródłem potężnego dźwięku umieścili zasłonę, utworzoną z bardzo gęsto rozpiętych strun, nastrojonych n. p. na ton a^1, to struny przyjęłyby drgania odpowiadające tonowi a^1, zawartemu w dźwięku i rozprószyłyby je na wszystkie strony Ten składnik dźwięku doszedłby przez zasłonę do ucha z natężeniem, mniejszem od reszty składników. Podobnie dzieje się, skoro mieszanina fal świetlnych uderza o układ cząstek, które są dostrojone do pewnych okresów drgania. Wówczas cząstki te przyjmują energję drgań tych samych okresów, a przez to opowiednie fale zostają w części pochłonięte.

Każde ciało pochłania ten rodzaj promieni, który przy tej samej temperaturze wysyła. **(Prawo Kirchhoffa).** Rozmaite ciała pochłaniają przy tej samej temperaturze ciemne promienie w różnym stopniu. Czarna sadza pochłania i wysyła więcej promieni niż powierzchnia biała, ciała szorstkie więcej, niż gładkie.

Z powodu różnicy w pochłanianiu promieni ciepła może powstać ruch mechaniczny, czego przykładem jest radjometr **Crookesa** (czytaj. Kruksa). Jest to lekki, łatwo się obracający wiatraczek, zrobiony z cienkich płytek (glinu, miki), z jednej strony poczernionych. Płytki te są zwrócone poczernioną powierzchnią w tę samą stronę. Wiatraczek ten umieszczony w naczyniu szklanem (ryc. 101), w którem znajduje się gaz znacznie rozrzedzony, obraca się pod wpływem promieni w kierunku niepoczernionych stron płytek. Zjawisko to można objaśnić tem, że poczernione, zatem silniej ogrzane strony płytek prędzej odrzucają w ruchu będące cząstki gazu, a zarazem same się przed niemi cofają.



Ryc. 101.

4. Pochłanianie promieni światła bada się w spektroskopie przez rozszczepienie światła, przepuszczonego przez ośrodek pochłaniający. Widmo takie nazywa się **absorbcyinem.** Ponieważ rozżarzone pary wysyłają promienie tylko pewnej barwy, przeto gdy białe światło przejdzie przez parę, w widmie jego te promienie będą osłabione, a miejsca im odpowiadające będą się wydawały ciemnemi. Gdy przed szczeliną spektroskopu ustawimy żółty promień sodowy, a za nim białe światło *gorętsze* od płomienia sodowego, dostrzeżemy w widmie ciągłem ciemny prążek w tem miejscu, w którem powstaje żółta linja sodowa. (**Odwrócenie widma**). Widmo absorbcyjne pary jest zatem niejako ujemnym obrazem jego **widma emisyjnego.**

5. Światło może pobudzić niektóre ciemne ciała do świecenia. Świecenie trwające tak długo, jak długo pada na ciało światło, nazywa się **fluorescencją,** jeżeli trwa dłużej, **fosforescencją.** Ciała wysyłają przytem światło sobie właściwej barwy, bo światło, pochłonięte przez ciała, pobudza ich cząstki do drgań o okresach niezależnych od częstości drgań pochłoniętych, lecz od natury cząstek ciała. Zatem zjawisko to niestosuje się do prawa Kirchhoffa. Zielony rozczyn zieleni (chlorofilu) ma fluorescencję czerwoną, żółtawe szkło uranowe żółtawo-zieloną, bezbarwna eskulina niebieską, brunatny rozczyn kurkumy zieloną, nafta wydaje światło niebieskawe. Najpierw spostrzeżono fluorescencję na fluorycie.

Fluorescencję widać wyraźnie, gdy zapomocą soczewki wpuścimy do ciała fluoryzującego stożek światła.

W ogólności wzbudzają fluorescencję fale krótsze od tych, które ciało pobudzone do świecenia wysyła. Fluorescencję szkła uranowego wywołują tylko promienie począwszy od zielonych do nadfiołkowych, fluorescencję eskuliny tylko fiołkowe i nadfiołkowe.

Fosforescencja polega na tem, że ciało, przez pewien czas oświetlone, świeci następnie w ciemności.

Wywołują ją szczególniej długie fale. Silną fosforencencję okazują połączenia wapniowe.

Świecąca **farba Balmaina** świeci przez kilkanaście godzin.

Świecenie ciał wskutek przyczyn innych, niż rozżarzenie, nazywa się wogóle **luminescencja** albo **jarzeniem się.** Fosforescencja i fluorescencja są **fotoluminescencją.** Świecenie fosforu, próchna, robaczków świętojańskich i t. p. jest **luminescencją chemiczną;** świecenie gazów i t. p. pod wpływem rozbrojeń elektrycznych, **elektroluminescencją.** W ogólmości luminescencją nazywamy świecenie się ciała w temperaturze niskiej.

Pytania.

1. Woda w grubych warstwach jest niebieska, szyba szkła bezbarwnego, oglądana na krawędzi, jest zielona. Skąd pochodzi ta zmiana barwy? (Widocznie pochłanianie, nie dające się zauważyć w cienkich warstwach, potęguje się w warstwach grubych).

2. Co nazwiemy ciałem **doskonale czarnem, doskonale białem, doskonale przezroczystem,** co nazwiemy **doskonałem zwierciadłem?** (Pierwsze wszystkie promienie chłonie, n. p. sadza, drugie wszystkie promienie rozprasza, n. p. gips alabastrowy, trzecie wszystkie promienie przepuszcza, n. p. kryształ soli kamiennej, czwarte wszystkie promienie odbija, n. p. zwierciadło srebrne).

Ćwiczenia.

1. Próbówki z dnami półkulistemi napełnić cieczami fluoryzującemi i badać barwy w świetle przepuszczonem i padającem, ustawiając próbówki zatkane korkiem tak, jak opisano w II § 24 ćw. 6.

	barwa w świetle	
(Ciecze fluoryzujące	przepuszczonem	padającem (stożek światła)
nafta	bezbarwna	jasno-niebieska
chlorofil w alkoholu i eterze	ciemno-zielona	krwista
eozyna w wodzie (rozcieńczona)	różowa	zielonkawo-żółta
fluoresceina w wodzie (z dodaniem ługu sodowego, rozcieńczona)	pomarańczowo-żółta	zielona
lakmus w alkoholu	ciemno-purpurowa	brudno-pomarańczowa
siarczan chininy w wodzie, zakwaszony kwasem siarkowym	bezbarwna	błękitna
eskulina, roztwór świeżej kory dzikiego kasztana	żółta	błękitna).

§ 33. Rozbiór widmowy (Analiza spektralna).

(Tablica IV).

1 Skład światła ciała świecącego poznajemy z jego widma

a) Rozżarzone ciało stałe lub ciekłe daje **widmo ciągłe.**

N. p. światło elektryczne, płomienie lamp i świec, w których żarzą się cząstki węgla. Jeżeli światło jest białe, w widmie znajdują się promienie wszelkich możliwych łamliwości; jeżeli żar jest czerwony, niema w widmie łamliwszej połowy

b) Gazy świecące dają widmo emisyjne **nieciągłe,** złożone z poszczególnych linij barwnych na ciemnem tle, a mianowicie·

w wysokiej temperaturze i przy nieznacznej gęstości, pary rozżarzone dają **widmo linjowe,** złożone z barwnych linij t. j. z barwnych obrazów szczeliny,

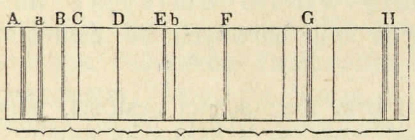
świecące pary połączeń i pierwiastków w niskiej temperaturze dają **widmo prążkowe,** złożone z szeregu barwnych prążków, z których każdy zaczyna się jasną krawędzią i przechodzi stopniowo w ciemność.

2. **Kirchhoff** i **Bunsen** wykryli, że widmo rozżarzonego gazu zależy tylko od jego natury i że każdy pierwastek ma właściwe sobie widmo. Sód daje n. p. żółte, lit czerwone linje. Jeżeli w świetle ciała, ulatniającego się w nieświecącym płomieniu gazowym, znajdziemy linje sodu i litu, wnosimy, że *Na* i *Li* w ciele badanem się znajdują. W temperaturze świecenia związki zwyczajnie rozpadają się, dlatego w świetle ciała ulotnionego występują widma pierwiastków

Z widma można zatem rozpoznać skład chemiczny ciała, a więc zapomocą spektroskopu wykonać rozbiór chemiczny W tym celu zbadano widma pierwiastków i zestawiono je w tablice, podające, jakiej łamliwości promienie są w widmach rozmaitych pierwiastków zawarte. W celach spektralnej analizy ustawia się przed szczeliną spektroskopu płomień bezbarwny, wprowadza się weń na druciku platynowym dane ciało i porównywa jego widmo, na tle skali widziane, z tablicami.

Zaletami spektralnej analizy są nadzwyczajna czułość i pewność. Czułość jest tak wielka, że ulotnienie się 3 miligramów soli kuchennej w obszernym pokoju wystarcza do wywołania w widmach wszystkich płomieni, palących się w tym pokoju, linji sodowej. Metodą tą odkryto kilka rzadkich pierwiastków. Ważne także usługi oddała analiza spektralna przy badaniu nieba.

3. W czystem widmie słońca można już wolnem okiem dostrzec kilka ciemnych poprzecznych linj. W spektroskopie dostrzegamy ich bardzo wiele. Najnowsze fotografje widma słonecznego wykazują wiele tysięcy linij, zwanych **linjami Fraunhofera,** który pierwszy dokładniej je badał. Najważniejsze linje poznaczał Fraunhofer dużemi i małemi literami. Służą one do dokładnego określenia miejsca w widmie. Ryc. 102 przedstawia **widmo absorbcyjne** słońca.



Ryc. 102.

Linje Fraunhofera dowodzą, że w widmie słońca brak fal pewnej długości, albo raczej, że pewne fale są znacznie osłabione. Widma gwiazd stałych są podobne, lecz mają inne ciemne prążki. Niektóre linje Fraunhofera powstają nie wskutek pochłaniania promieni w atmosferze ziemskiej, lecz wskutek pochłaniania w parach, otaczających ciała niebieskie.

4. Według Kirchhoffa słońce składa się z rozżarzonej kuli, wywołującej widmo ciągłe i z osłony gazowej, złożonej z par pierwiastków, t. zw. **fotosfery.** Fotosfera pochłania promienie wewnętrznej kuli, przez co powstają linje Fraunhofera. Te zatem pierwiastki znajdują się w fotosferze, których jasne linje widma emisyjnego odpowiadają falom tej długości, co linje Fraunhofera. Pewne linje powstają także przez pochłanianie w ziemskiej atmosferze. Niewidzialne części widma słonecznego okazują także mnóstwo linij Fraunhofera.

Ćwiczenia.

*1. Do sali zaciemnionej wchodzi wiązka promieni słonecznych, skierowana poziomo zapomocą heljostatu, przez wąską szczelinę o szerokości 1 *mm.* Obraz tej szczeliny rzucony jest na białą zasłonę przez soczewkę o długiej ogniskowej, a gdy w drodze promieni ustawimy pryzmat, otrzymamy na zasłonie widmo.

Przygotuj następujące roztwory w próbówkach o cienkich ścianach i badaj powstające widma absorcyjne. Próbówki ustawia się przy samej szczelinie i to tak, aby tylko jedną jej połowę zasłaniała; wtedy otrzyma się oba widma absorbcyjne i słoneczne, jedno obok drugiego, co ułatwia ich porównanie.

a. Wino czerwone ciemne prążki.

b. Krew z wodą brak niebieskiego końca, w zielonem i żółtem dwie szerokie smugi.

c. Jod rozgrzany w małej kolbce.

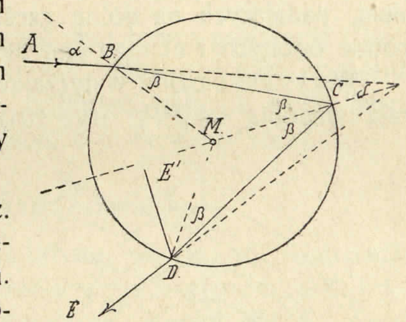
d. Roztwór jodu w dwusiarczku węgla.

e. Roztwór jodu w alkoholu etylowym.

f. Brunatne pary NO_2, unoszące się nad żółtym kwasem azotowym.

§ 34. Zjawiska barwne w atmosferze.

1 **Tęczę** widzimy, gdy za sobą mamy słońce, a przed sobą krople deszczu. Jest to łuk, złożony z barw widma słonecznego, na zewnętrznym brzegu czerwony, na wewnętrznym fiołkowy Środek koła, którego łuk tęczę stanowi, leży na prostej, łączącej oko widza ze słońcem Na zewnętrznej stronie tego łuku pojawia się często drugi bledszy z fiołkowym brzegiem zewnętrznym, a czerwonym wewnęrznym, **tęcza poboczna**. Zjawisko tęczy tłómaczy się w następujący sposób:


Ryc. 103.

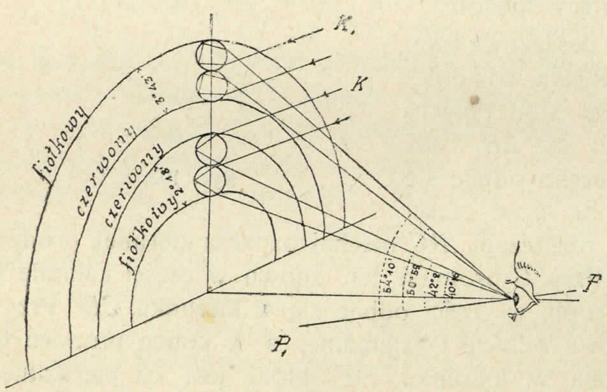
Na kroplę deszczową (ryc. 103) pada wiązka równoległych promieni słonecznych. Jednym z nich jest AB. Promień ten w części odbije się od powierzchni, a w części załamie się i rozszczepi. BC niechaj oznacza kierunek promieni czerwonych. Przy C promień ten znowu w części załamie się i wyjdzie z kropli, w części odbije się w kierunku CD. Przy D następuje znowu odbicie i załamanie, a w końcu promień dochodzi do oka w kierunku DE, który jest od pierwotnego o kąt δ odchylony.

Ponieważ $\beta = \frac{\delta}{2} + \alpha - \beta$, przeto odchylenie $\delta = 4\beta - 2\alpha$.

Rachunkiem można okazać, że dla kątów padania między 59^0 i 60^0 kąt odchylenia δ przybiera wartość największą, zawartą w granicach $42^030'$ dla promieni czerwonych ($n_{cz} = 1{,}330$) i $40^020'$ dla promieni fiołkowych ($n_f = 1{,}344$). Ponieważ każda wielkość zmienna w pobliżu swego maximum (lub minimum) najmniejszym ulega zmianom, przeto promienie te, opuszczające kroplę, dochodzą do oka jako wiązka równoległa, w której jednak z powodu różnicy dróg, a zatem i różnych faz, z jakiemi fale do oka dochodzą, występuje zjawisko interferencji (II § 18). Gdyby światło słoneczne było jednobarwne, widzielibyśmy prążki interferencyjne zamiast tęczy W świetle białem obrazy różnobarwne nakładają się i dają znany obraz tęczy, w którym szerokość, następstwo i natężenie poszczególnych barw zależne jest od wielkości kropel wody zawieszonych w atmosferze. Im mniejsze są krople wody, tem szersze byłyby prążki interferencyjne i tem szersza powstaje tęcza. Że tęcza nie pochodzi tylko z rozszczepienia się promieni słonecznych w kroplach wody, dowód także w tem, że bezpośrednio po jednem następstwie barw po fiołkowej następuje często druga ich kolej, czasem nawet od czerwonej barwy się zaczynająca.

Tęcza poboczna powstaje w podobny sposób, wskutek promieni, padających na dolną część kropli i wewnątrz niej dwukrotnie odbitych i dlatego jest bledsza.

Wszystkie stożki, wytyczające na chmurze barwne koła, mają wspólną oś PP_1, (ryc 104) t. j. prostą równoległą do promieni słonecznych. Jeżeli słońce znajduje się na poziomie, natenczas na równym terenie widzimy tęczy w postaci półkola. Im wyżej słońce się wznosi nad poziom, tem więcej zniża się oś PP_1 pod poziom, tem mniejszy łuk tęczy widzimy. Gdy wysokość słońca wynosi 42°, przestaje być widzialną główna tęcza, a przy wysokości 54° nie można także widzieć pobocznej



Ryc. 104.

2. Gdy niebo zaciągnięte jest delikatnemi chmurami, widzi się czasem dookoła słońca lub księżyca **barwne kręgi.** Powstają one przez ugięcie się promieni światła w pęcherzykach wodnych chmur Kręgi te z zewnątrz są czerwone, od środka fioletowe, średnica ich 2° do 5°.

Niekiedy widoczne są także **wielkie kręgi (halo)**, które otaczają słońce lub księżyc w oddaleniu 22°. Te powstają wsku-

tek załamania się promieni światła w kryształkach lodowych, zawieszonych w atmosferze. Wielkie kręgi są z zewnątrz niebieskie, od środka czerwone.

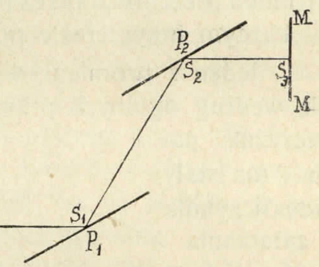
3. **Barwa nieba.** Część światła słonecznego pochłania atmosfera, znaczniejszą część odbija i rozprasza. Gdyby tak nie było, słońce świeciłoby na ciemnem tle, a jasność panowałaby tylko w miejscach, do których dochodzą bezpośrednio promienie słońca.

Niebieską barwę nieba tłómaczymy sobie w ten sposób, że od cząstek powietrza odbijają się głównie krótkie fale i te zostają rozproszone bardziej, niż promienie czerwone, żółte, pomarańczowe.

Gdy jednakże rano i wieczór przechodzą promienie słońca przez parę wodną bliską nasycenia, natenczas para pochłania krótkie fale zielone, niebieskie, fiołkowe, wskutek czego następuje purpurowe zabarwienie nieba, t. j. zjawisko zorzy

§ 35. Polaryzacja światła.

1. Promień słoneczny odbija się zawsze od zwierciadła, jakiekolwiek byłoby jego położenie względem promienia. Jeżeli jednak promień słoneczny S, odbity pod kątem 56° od płytki szklanej P_1 (ryc. 105), pada na drugą taką samą płytkę P_2 pod tym samym kątem, a po tem powtórnem odbiciu na białe tło MM, spostrzegamy, obracając P_2 około S_1 S_2, że biała plama na tle zmienia jasność. Doświadczenie wykazuje, że natężenie odbitego promienia S_2 S_3 jest największe, gdy płaszczyzny odbicia obu zwierciadeł są równoległe, a tem mniejsze, im bardziej zbliża się kąt obrotu zwierciadła P_2 około prostej S_1 S_2 do 90°. Gdy obrót ten wynosi 90°, promień S_1 S_2 wcale się nie odcija od P_2. Przy dalszym obrocie natężenie promienia S_2 S_3 wzrasta, a przy obrocie o 180° znowu jest największe.



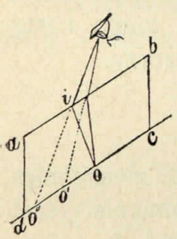
Ryc. 105.

Z tego wynika, że promień odbity od szkła pod kątem 56° posiada różne własności w kierunkach poprzecznych. Promień taki nazywa się **spolaryzowanym**, a płaszczyzna odbicia jego, **płaszczyzną polaryzacji.** Polaryzację można objaśnić tylko na podstawie drgań poprzecznych, bo przy drganiach podłużnych kierunek drgań względem zwierciadła nie ulegałby przy obrocie zwierciadła żadnej zmianie, promień więc odbijałby się zawsze jednakowo.

Promienie światła polaryzują się nietylko przez **odbicie,** lecz także przez kilkakrotne **załamanie,** tudzież przez tak zwane **załamanie podwójne.**

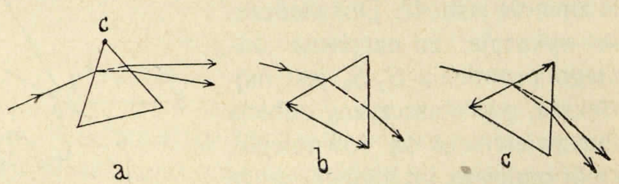
Każdy przyrząd, który służy do polaryzowania naturalnego światła, nazywa się **polaryzatorem,** a przyrząd, który służy do badania światła spolaryzowanego, **analizatorem.** Na ryc. 105 n. p. zwierciadło P_1 jest polaryzatorem, a P_2 analizatorem.

2. W wielu ciałach promień światła rozdwaja się przy załamaniu. Zjawisko to nazywa się **podwójnem załamaniem.** Gdy przez szpat islandzki (ryc. 106), położony na białym papierze, patrzymy na czarny punkt *o*, na tym papierze naznaczony, widzimy dwa obrazy tego punktu. Z szpatu islandzkiego można wyciąć pryzmat. Jeżeli krawędź łamiąca *C*, pryzmatu jest równoległa do osi głównej kryształu, promień słoneczny po przejściu przez pryzmat daje dwa widma (ryc. 107 a). Jeżeli pryzmat jest tak wycięty, że oś główna jest prostopadła do krawędzi łamiącej, to powstaje jedno widmo, wtedy promień przechodzi przez pryzmat równolegle do osi (ryc. 107, b). W każdym innym razie powstają dwa widma (ryc. 107, c).



Ryc. 106.

Jeden z promieni, wychodzących z pryzmatu, zachowuje się według ogólnych praw załamania, t. j. leży zawsze w płaszczyźnie padania i ma stały współczynnik załamania 1,66, dlatego nazywa się **zwyczajnym.** Drugi nie ulega prawu Snella, nie zawsze bowiem leży w płaszczyźnie padania, ma współczynnik zmienny w granicach od 1,49 do 1,66, zależnie od kierunku względem osi kryształu i nazywa się **nadzwyczajnym.** Jak szpat islandzki, zachowuje się także kwarc z tą różnicą, że w kwarcu promień zwyczajny jest słabiej załamany od nadzwyczajnego.



Ryc. 107

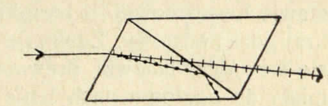
Kierunek, w którym ciało podwójnie załamujące załamuje pojedynczo, nazywa się **osią optyczną.** W szpacie i kwarcu osią optyczną jest oś główna kryształu.

Płaszczyzna, przesunięta przez promień równolegle do osi optycznej, nazywa się **przecięciem głównem.**

3. **Polaryzacja wskutek podwójnego załamania.** Badania wykazały, że oba promienie zwyczajny i nadzwyczajny są spolaryzowane w płaszczyznach względem siebie prostopadłych.

Z tego powodu używa się ciał podwójnie łamiących jako polaryzatorów lub analizatorów Najprostszym przyrządem polaryzacyjnym są, tak zwane, **szczypczyki turmalinowe**, w których polaryzatorem i analizatorem są płytki turmalinu, wycięte równolegle, do osi kryształu. Płytki takie mają własność pochłaniania promienia zwyczajnego.

Pryzmat Nicola, często używany jako polaryzator lub analizator, składa się z dwóch kawałków szpatu islandzkiego, spojonych balsamem kanadyjskim (ryc. 108). Promień zwyczajny odbija się całkowicie na balsamie kanadyjskim, a przechodzi tylko nadzwyczajny, którego drgania są do przecięcia głównego równoległe.



Ryc. 108.

Gdy więc patrzymy przez dwa nikole i jeden z nich obracamy, jasność pola widzenia nieustannie się zmienia, a podczas pełnego obrotu jest pole dwa razy najjaśniejsze i dwa razy całkiem ciemne. Podobnie płytki turmalinowe dają jasne pole widzenia, gdy osi ich są równoległe, a ciemne, gdy są prostopadłe. Jeżeli patrząc przez Nicole na miejsce oświetlone, dostrzegamy przy obracaniu Nicola zmianę jasności pola widzenia, jest to oznaką, że w świetle, z tego miejsca wychodzącem, jest światło spolaryzowane.

4. Gdy promień spolaryzowany przechodzi przez cienką warstwę krystaliczną, n. p. przez blaszkę miki (łyszczku), rozdziela się na dwa spolaryzowane w płaszczyznach do siebie prostopadłych. Promienie te posiadają różne prędkości, przeto po wyjściu powinnyby dać zjawisko interferencji z powodu różnicy faz, gdyby nie przeszkadzało temu drganie w różnych płaszczyznach. Ponieważ analizator sprowadza je do jednej płaszczyzny, przeto cienka blaszka miki, oglądana w świetle spolaryzowanem jednobarwnem przez analizator, daje obraz w którym obok części jasnych znajdują się ciemne, (n. p. koła współ-

środkowe z krzyżem), w świetle zaś białem otrzymujemy obok siebie barwy widmowe. Przez obrót analizatora o 90^0 barwy te zmieniają się na dopełniające.

5. Niektóre ciała mają własność **skręcania płaszczyzny polaryzacji.** Tę własność okazuje n. p. blaszka kwarcu, jakoteż wiele cieczy organicznych. Zgaszenie światła spolaryzowanego, przechodzącego przez takie ciało, nie następuje wtedy, gdy analizator jest skrzyżowany z polaryzatorem, lecz gdy od tego położenia prostopadłego analizator jest obrócony jeszcze o pewien kąt w prawo lub lewo. Ponieważ n. p. roztwór cukru skręca płaszczyznę polaryzacji w prawo o tem większy kąt, im bardziej roztwór jest stężony, przeto pomiar kąta skręcenia może służyć do oznaczenia zawartości cukru w roztworze. **Polarymetr,** do tego celu nadający się, nazywa się **sacharymetrem.**

Ćwiczenia.

1. **Aparat polaryzacyjny (polaryskop) zwierciadłowy** zbudować w następujący sposób. Wybrać dwa pudełka, najlepiej drewniane, o podstawie kwadratowej, o wysokości przynajmniej półtora razy większej od krawędzi podstawy. Zdejmuje się z pudełek jedną ścianę boczną i nakleja się wewnątrz listewki drewniane tak, aby na nich oparte szyby szklane miały do poziomu nachylenie kąta $\alpha = 56^0$, których $\operatorname{tg}\alpha = \frac{3}{2}$ (ryc. 109 a). Na dno dolnego pudełka nakłada się szkło zwierciadlane Z, szyba S_1 jest ze szkła zwykłego, szyba S_2 ze szkła, które po jednej stronie jest poczernione lakiem asfaltowym (lub jakimkolwiek innym). Pudełka są ustawione jedno na drugiem i w ścianie, którą się stykają posiadają wycięcie kołowe. Zwierciadło dolne jest polaryzatorem, górne analizatorem. Bieg promieni: a odbija się od S_1, jako promień spolaryzowany b, ten odbija się od Z, jako c, przechodzi częściowo przez S_1 i pada na S_2, od którego odbija się, jako d.

Aparat ustawia się przed oknem, aby patrząc w S_2 widzieć część jasnego nieba. Przy obróceniu pudełka S_2 o 90^0 niebo wyraźnie się ściemnia, a po obróceniu o 180^0 jest znów jasne.

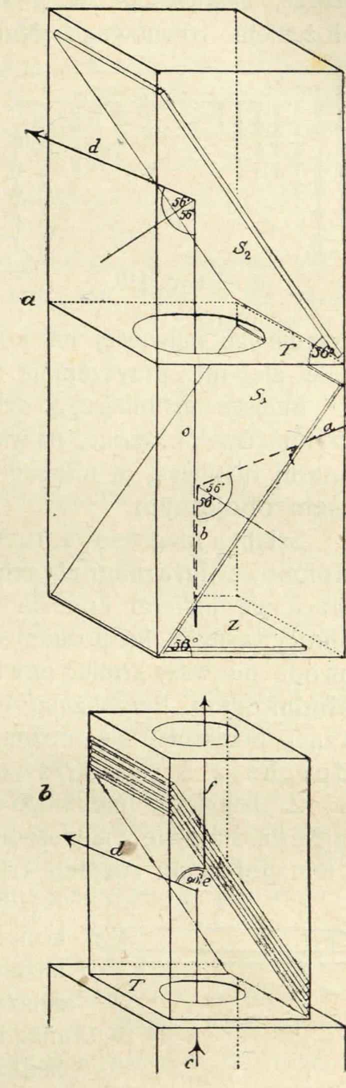
2. **Aparat polaryzacyjny (polaryskop)** z analizatorem, polaryzującym przez załamanie. Zamiast zwierciadła S_2 połóż na listewkach (ryc. 109 b) zbiór szybek cienkich (szkiełek mikroskopowych nakrywkowych, 10 do 20). Promień spolaryzowany c załamuje się w zbiorze szkiełek, jako promień e, prostopadły do d, i wychodzi w powietrze, jako f, równoległy do c. Zauważymy, że promień odbity d i załamany f są spolaryzowane w płaszczyznach do siebie prostopadłych, bo promień f znika, gdy d jest najjaśniejszy i na odwrót.

*3. W braku kryształu szpatu wapiennego do okazania podwójnego załamania można wytworzyć sobie kryształy z roztworu siarczanu magnezowego. W tym celu sporządza się wrzący roztwór nasycony tej soli, dodaje się kilka kryształków boraksu, filtruje na gorąco i pozostawia do oziębienia. Natychmiast rozpoczyna się nagła krystalizacja, a gdy ta się skończy, odlewa się resztę roztworu do szerokiego naczynia szklanego, zawiesza się w niem dość blisko dna na cienkim druciku, przyklejony do drucika woskiem, mały kryształek siarczanu magnezowego i pozostawia się w zupełnym spokoju. W niedługim czasie wyrośnie wielki kryształ, który okazuje zjawisko **podwójnego załamania.** Aby kryształ ochronić od zwietrzenia, zanurza się go na chwilę do roztworu kolodjum, z którego utworzy się na krysztale cieniutka warstewka, zabezpieczająca go przed zwietrzeniem

*4. Na zwierciadło Z polaryskopu (ryc. 109 a lub b) połóż cienki kawałek miki i oglądaj ją przez analizator (Barwa płytki zależy od jej grubości i od kierunku).

*5. Na stolik T polaryskopu (ryc. 109 a lub b) połóż kawałek szyby szklanej, której brzegi w płomieniu zostały otopione. Naprężenia, jakie po ostygnięciu w takiej szybie występują, powodują niejednakową prędkość przechodzenia przez nią promieni spolaryzowanych, skąd pochodzi, że pewne smugi na szybie są ciemne (nieprzezroczyste), podczas gdy reszta jest jasna.

*6. Użyj jako polaryzatora czarnej ceraty (z notatki), jako analizatora szklanej płytki fotograficznej (wywołanej) i badaj skrawki miki i szkła otopionego.



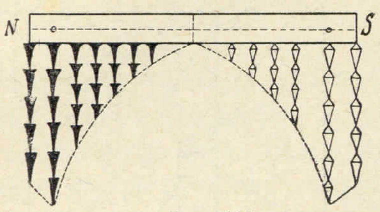
Ryc. 109.

IV. MAGNETYZM.

§ 36. Własności magnesów

1. **Magnesem** nazywamy takie ciało, które przyciąga i przytrzymuje drobne kawałki żelaza, a gdy się może swobodnie

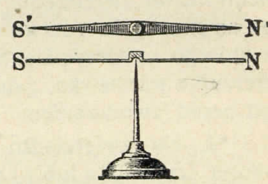
obracać, ustawia się w pewnem położeniu, które jest jego położeniem równowagi. **Naturalnym magnesem** jest **magnetyt**, ruda żelazna Fe_3O_4. **Sztuczne magnesy** otrzymujemy ze sztab stalowych, n. p. przez pocieranie ich magnesem naturalnym.



Ryc. 110.

Magnes kształtu sztabki, zanurzony w opiłki żelazne lub drobne gwoździe, przytrzymuje ich najwięcej na końcach. W połowie sztabki opiłki wcale się nie przyczepiają (ryc. 110).

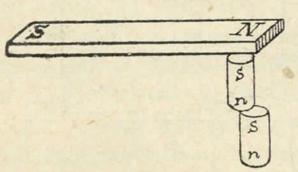
Miejsca najsilniejszego działania, blisko końców położone, nazywamy **biegunami** magnesu, a miejsce w środku **pasem obojętnym**.



Ryc. 111.

Sztabka magnesowa, ruchoma koło osi pionowej (**igła magnetyczna** ryc. 111), zwraca się jednym końcem prawie ku północy, drugim ku południowi; z tego powodu pierwszy koniec zowie się **biegunem północnym**, drugi **południowym**. Przybliżając magnes do ruchomej igiełki magnetycznej, przekonać się można, że bieguny równoimienne odpychają się, a różnoimienne się przyciągają.

2. Sztabka z miękkiego żelaza, zbliżona do bieguna silnego magnesu, staje się magnesem i jest nim tak długo, dopóki się w tem położeniu znajduje (ryc. 112).



Ryc. 112.

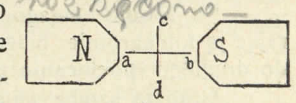
Biegun magnesu wzbudza w bliższym końcu sztabki biegun różnoimienny Im bliżej bieguna magnesu umieścimy sztabkę żelazną, tem silniejszy wzbudzi się w niej magnetyzm. Oczywiście przy zetknięciu będzie sztabka najsilniej namagnesowana. Zjawisko magnesowania się żelaza, znajdującego się w pobliżu magnesu, nazywamy **indukcją magnetyczną.** Stal w tym razie magnesuje się trwale, miękkie żelazo tylko czasowo. Przyciąganie żelaza przez magnes jest następstwem namagnesowania przez indukcję.

3. Natężenie indukowanego magnetyzmu, ma pewne granice, które zależą od rozmiarów magnesu, od jego siły i od gatunku żelaza, w którem magnetyzm wzbudzamy

Nawiększe natężenie magnetyzmu, jakie pewne żelazo osiągnąć może, zowiemy **stanem nasycenia.**

Daleko trudniej wzbudzić magnetyzm w stali, niż w żelazie miękkiem; lecz także trudniej stal pozbawić magnetyzmu, niż żelazo. Stal objawia większą **oporność (koercję)** przeciw namagnesowaniu, niż miękkie żelazo. W miękkiem żelazie, raz namagnesowanem, pozostają ślady magnetyzmu, co zowiemy **pozostałością magnetyczną.** histereza

4. Pręcik żelazny między biegunami silnego magnesu kształtu podkowy, poziomo na nitce zawieszony, ustawia się osiowo, t. j. w kierunku *ab* (ryc. 113). Tak samo ustawiają się pręciki niklu i kobaltu; te ciała zwiemy **ferromagnetycznemi.** Pręcik manganu, glinu, platyny zachowuje się podobnie, ale do okazania ich własności magnetycznych potrzeba olbrzymich magnesów; te ciała zwiemy **paramagnetycznemi.**



Ryc. 113.

Inne ciała, jak bizmut, cynk, srebro, miedź, złoto, tak samo zawieszone, ustawiają się między biegunami magnesu równikowo, t. zn. w kierunku *cd*. Te ciała zowiemy **diamagnetycznemi.**

Wykryto także między cieczami i gazami ciała paramagnetyczne (n. p. rozczyny soli żelazowych, powietrze, tlen) i ciała diamagnetyczne (n. p. woda, rtęć, argon, hel).

Ciałami diamagnetycznemi są ciała, które ulegają indukcji magnetycznej w mniejszym stopniu, niż powietrze. Wtedy warstwa powietrza, znajdująca się między biegunami magnesu, układa się osiowo i wypiera ciało diamagnetyczne w położenie równikowe.

Wynika więc z tego, że diamagnetyzm jest względny i że każde ciało zachowuje się, jak diamagnetyczne, jeżeli znajduje się w ośrodku silniej magnetycznem od niego. N. p. szkło zawierające ślady żelaza jest paramagnetycznem w powietrzu, a w rozczynie chlorku żelaza, diamagnetycznem.

Pytania.

1 Stwierdzono, że działania magnetyczne odbywają się także w próżni. Jak zachowuje się próżnia wobec fal głosowych, świetlnych? Czy próżnia powstrzymuje przyciąganie się ciał niebieskich?

2. Opisz dokładnie przyciągnięcie żelaznego gwoździa przez silny magnes. Co dzieje się z gwoździem, gdy oddalenie jego od magnesu się zmniejsza?

Ćwiczenia.

*1. Przygotuj cztery płytki równej grubości, tekturową, szklaną, drewnianą i żelazną i badaj, która z nich powstrzymuje działanie magnesu na igiełkę magnetyczną.

*2. Połóż busolę na pasie obojętnym magnesu sztabowego. Obracaj magnes w płaszczyźnie stołu około środka. Jak zachowuje się igiełka busoli?

*3. Połóż na arkuszu papieru silny magnes sztabowy, odrysuj jego kontur, ustawiaj w różnych miejscach małą busolę, zaznaczaj kierunek igiełki zapomocą szpilek, wtykanych w papier i kreśl kierunki ustawiania się igiełki, kładąc strzałkę w kierunku bieguna północnego. Przechowaj rysunek do późniejszego ćwiczenia.

*4. Trwale namagnesować można cienką sztabkę stalową, pocierając ją kilkakrotnie biegunem silnego magnesu od jednego jej końca do drugiego (**pocieranie pojedyncze**).

Grubszą sztabę stalową pociera się naraz dwoma magnesami, które ustawia się w jej środku różnoimiennemi biegunami pod kątem rozwartym i posuwa się je równocześnie jeden ku jednemu końcowi sztaby, drugi ku drugiemu końcowi (**pocieranie podwójne**).

Magnesuj w ten sposób kawałki żelaza, stali, druty, pręty, igły, podłużne blaszki stalowe.

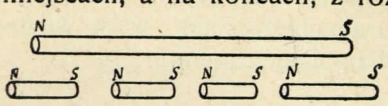
*5. Namagnesowane druty stalowe, jednakiej długości, złóż biegunami równoimiennymi w jedną stronę i owiń żelaznym drucikiem. Otrzymasz magnes o wiele silniejszy od sztabowego tej samej grubości.

*6. Dwie igły niemagnetyczne zawieszamy obok siebie pionowo na cienkich nitkach. Od dołu zbliżamy do nich biegun magnesu. Igły odpychają się. Dlaczego?

*7. Kilka igieł jednakowo namagnesowanych wciskamy w małe korki i puszczamy na wodę, aby pływały pionowo i jednakowemi biegunami były zwrócone w górę. Do nich zbliżam z góry różnoimienny biegun magnesu sztabowego. Igły ustawią się tak, że będą tworzyły wierzchołki prawidłowego wieloboku. Objaśnić!

§ 37. Wewnętrzna budowa magnesu.

*1 Jeżeli magnes rozłamiemy, otrzymamy dwa magnesy, każdy o dwóch biegunach. Pierwotne bieguny pozostają na swych miejscach, a na końcach, z rozłamania pochodzących, powstają bieguny przeciwne (ryc. 114). Te kawałki można dalej dzielić, a każdy odłamek będzie zupełnym magnesem. Jest więc rzeczą prawdopodobną, że każda najdrobniejsza cząstka magnesu jest zupełnym magnesem.



Ryc. 114.

*2. Pocierając magnesem rurkę szklaną, zawierającą opiłki żelazne, dostrzegamy, że opiłki szykują się podczas tego w sposób

szczególny, poczem cała rurka okazuje własności magnesu. Z tego wnosić wypada, że także cząstki magnesu na podobieństwo tych opiłek układają się podczas magnesowania równoimiennemi biegunami w tę samą stronę. Takie układanie się cząstek w łańcuchy nazywamy **polaryzacją magnetyczną**.

*3. Hipotezę powyższą stwierdzają nadto następujące zjawiska.

Drut stalowy, trwale namagnesowany, traci zupełnie swoje własności magnetyczne, gdy go wyżarzymy w silnym płomieniu gazowym (do 800°). Widocznie zbyt wielkie prędkości ruchu cząsteczkowego uniemożliwiają polaryzację magnetyczną.

Stan **nasycenia magnetycznego** osiągnięty będzie wtedy, gdy polaryzacja będzie doskonała, bo silniejsze magnesowanie w polaryzacji żadnej już nie może sprawić zmiany.

Przy szybkiem, perjodycznie powtarzającem się magnesowaniu i odmagnesowywaniu żelaza, żelazo ogrzewa się. Widocznie podczas obracania się cząstek i ich tarcia wewnętrznego wytwarza się ciepło.

Pytania.

1 Dlaczego magnes nie przyciąga na całej swojej powierzchni? Objaśnić rysunkiem.

2. Co stanie się, gdy strunę stalową, namagnesowaną, zwiniemy w koło zamknięte? (Będzie to magnes bez biegunów).

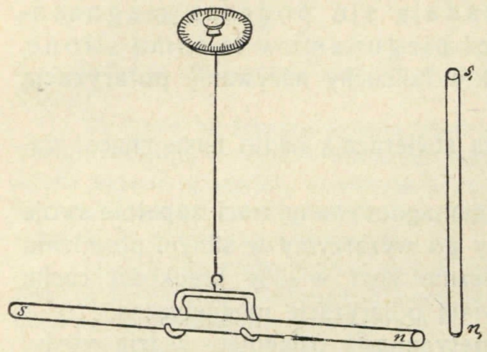
3. Objaśnij rysunkiem magnesowanie przez pocieranie. Czy można pocierać tym samym biegunem tam i napowrót? Czy można pocierać jednym tam, a drugim napowrót?

4. Dlaczego wstrząsanie magnesu osłabia go? Dlaczego przeciwnie kucie kawałka stali może ją w pewnych przypadkach namagnesować?

§ 38. O siłach magnetycznych.

1 Mając dwa cienkie i długie (70 *cm*) pręty magnetyczne (ryc. 115), umieszczamy jeden z nich poziomo w strzemionku, zawieszonem na druciku, którego górny koniec jest przytwierdzony do osi skazówki, obiegającej podziałkę kątową. Pręt ten ustawi się w pewnem położeniu równowagi, gdy jednak przybliżymy do niego drugi magnes biegunem równoimiennym, trzymając go pionowo z odległości *nn'* równej n. p. 10 *cm*, wtedy z powodu działania siły odpychającej biegun *n* magnesu ruchomego odchyli się od pierwotnego położenia. Aby go spro-

wadzić do pierwotnego położenia, należy skręcić drut na górnym końcu o kąt odpowiedniej wielkości. Ten kąt skręcenia jest miarą siły odpychania. Gdy odległość nn' podwoimy lub o połowę zmiejszymy, potrzeba będzie drut skręcić w pierwszym razie o kąt 4 razy mniejszy, w drugim o kąt 4 razy większy, aby magnes sprowadzić do pierwotnego położenia.



Ryc. 115.

Przy działaniu na siebie biegunów różnoimiennych potrzeba będzie drut skręcać w kierunku wprost przeciwnym, aby pokonać ich wzajemne przyciąganie.

Z tego poznajemy, że **s i ł a w z a j e m n e g o o d d z i a ł y w a n i a n a s i e b i e b i e g u n ó w d w ó c h m a g n e s ó w j e s t o d w r o t n i e p r o p o r c j o n a l n a d o k w a d r a t u i c h o d l e g ł o ś c i.**

2. Gdy powtórzymy te same doświadczenia, z tą jednak odmianą, że zamiast jednego pręta zawieszonego w strzemionku weźmiemy 2 lub 3 pręty, zgodnie biegunani skierowane odpychanie będzie 2 lub 3 razy silniejsze. To samo otrzymamy, gdy zamiast jednego pręta trzymanego pionowo, ustawimy takie same 2 lub 3 zgodnie biegunami skierowane.

Biegunowi magnesu przypisujemy pewną **ilość magnetyzmu** albo pewną **masę magnetyczną**; zatem możemy powiedzieć, że s i ł a w z a j e m n e g o o d d z i a ł y w a n i a n a s i e b i e b i e g u n ó w j e s t w p r o s t p r o p o r c j o n a l n a d o i l o c z y n u i c h m a s m a g n e t y c z n y c h.

Przyjmujemy, że biegun ma **jednostkę magnetyzmu** *(j. m.)* gdy działanie jego na drugi biegun, mający równą ilość magnetyzmu, z odległości 1 *cm*, wynosi 1 *dynę*; natenczas siła F wzajemnego działania na siebie biegunów o masach magnetycznych m, m' z odległości d wyraża się

$$\boxed{F = \frac{m \cdot m'}{d^2}}$$ **(Prawo Coulomba).**

Pytania.

1. W prawie Coulomba siła jest odwrotnie proporcjonalna do kwadratu odległości dwóch magnesów. Gdzie spotkaliśmy się już z podobnem wyrażeniem? (Prawo odwrotnych kwadratów II § 15, 1).

2. Jak daleko sięga działanie magnesu? (Teoretycznie dopiero dla $r = \infty$ jest $F = 0$; praktycznie z powodu odwrotnego kwadratu odległości siła F maleje bardzo szybko).

Ćwiczenia.

(Przy wszystkich pomiarach magnetycznych należy usunąć znajdujące się w sąsiedztwie przedmioty żelazne, n. p. statywy, klucze i t. p).

*1. Wyznaczyć położenie bieguna magnesu sztabowego.

Dwie małe, jednakowe busole ustawia się obok siebie na arkuszu papieru w takiem oddaleniu, aby między niemi zmieściła się sztaba magnetyczna, której biegun mamy oznaczyć i obraca się arkusz dopóty, aż igiełki ustawią się prostopadle do prostej, łączącej ich środki. Wtedy wsuwa się wpoprzek tej prostopadłej między busole sztabę magnetyczną tak daleko, aż obie igiełki ustawią się prostopadle do osi magnesu i utworzą jedną linję prostą. Linję tę zaznacza się na magnesie atramentem. Następnie wsuwa się ten sam biegun między igiełki ze strony przeciwnej i postępuje się tak samo. Średnie położenie między oboma znakami atramentu daje biegun magnetyczny sztaby, który najlepiej zaznaczyć farbą olejną. Przy tem ćwiczeniu należy potrzebne linje nakreślić wprzód na papierze, aby magnes przesuwany był dokładnie prostopadłe do linji, łączącej środki igiełek.

*2. Porównać masy magnetyczne biegunów dwóch magnesów.

Ustawia się busolę na arkuszu papieru i kreśli się dwie proste przez środek igiełki, jedną o kierunku igiełki, drugą do niej prostopadłą. Wzdłuż tej prostopadłej przysuwamy do igiełki z przeciwnych stron dwa magnesy, zwrócone do niej równoimiennemi biegunami. W pewnych oddaleniach działania magnesów znoszą się i igiełka przyjmuje swój pierwotny kierunek.

W tedy stosunek mas magnetycznych biegunów obu magnesów, k, oblicza się w następujący sposób: Przyjmujemy, że długość igiełki jest bardzo mała w porównaniu z długościami badanych magnesów $2l_1$ i $2l_2$ (odległości biegunów magnesu, nie długości sztab) i z oddaleniami środków magnesów (pasa obojętnego) od igiełki, r_1 i r_2; masy magnetyczne biegunów niech będą $+m_1$ i $+m_2$, to na każdy biegun igiełki, n. p. $+\mu$ działają siły:

od jednego magnesu $+\dfrac{m_1 \mu}{(r_1 - l_1)^2} - \dfrac{m_1 \mu}{(r_1 + l_1)^2}$,

od drugiego magnesu $+\dfrac{m_2 \mu}{(r_2 - l_2)^2} - \dfrac{m_2 \mu}{(r_2 + l_2)^2}$.

Te siły są równe, zatem

$$m_1 \mu \left(\frac{1}{(r_1 - l_1)^2} - \frac{1}{(r_1 + l_1)^2}\right) = m_2 \mu \left(\frac{1}{(r_2 - l_2)^2} - \frac{1}{(r_2 + l_2)^2}\right),$$

skąd oblicza się

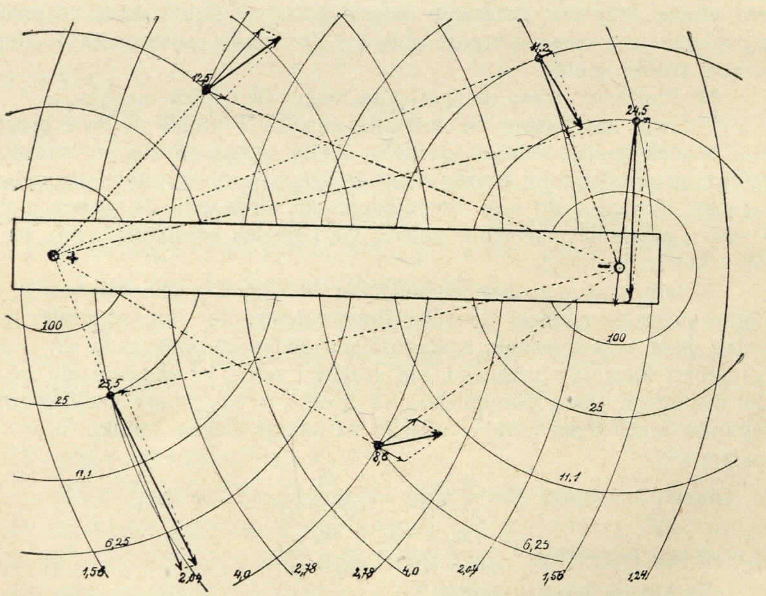
$$k = \frac{m_1}{m_2} = \frac{(r_1^2 - l_1^2)^2 r_2 l_2}{(r_2^2 - l_2^2)^2 r_1 l_1}.$$

*3. Oznaczyć masę magnetyczną bieguna magnesu sztabowego. Jeden z dwóch magnesów, których stosunek mas magnetycznych oznaczyliśmy w ćw. 2, kładziemy poziomo na talerzyku wagi i tarujemy. Na pionowej pod biegunem tego magnesu kładziemy biegun drugiego magnesu, w niewielkiej odległości i to tak, aby można było zaniechać siły występujące między innemi biegunami. Magnes ten jest także ułożony poziomo, a oba leżą w jednej prostej (jeden jest przedłużeniem drugiego, ale w innej wysokości). Ponieważ teraz równowaga jest zakłócona, przeto potrzeba dodatkowych ciężarków, aby doprowadzić do równowagi. Ciężarki te przedstawiają wielkość siły F, działającej między biegunami magnesów m_1 i m_2, których stosunek już znamy, $m_1 = km_2$, z oddalenia d, które zmierzymy. Z równania $F = \frac{km_2\ m_2}{d^2} = \frac{km_2^2}{d^2}$ obliczamy $m_2 = d\sqrt{\frac{F}{k}}$, a $m_1 = kd\sqrt{\frac{F}{k}} = d\sqrt{Fk}$.

Zadania.

Oznaczyć rozkład natężeń i kierunki sił magnetycznych w płaszczyźnie dokoła magnesu sztabowego.

Na arkuszu papieru wykreśla się zarysy badanego magnesu i położenia biegunów. Z biegunów zatacza się koła spółśrodkowe promieniami 2, 3, 4, 5, . *cm*. Koła te przecinają się z sobą w punktach, w któ-



Ryc. 116.

rych będziemy oznaczali natężenie siły magnetycznej, wypadkowej działającej na biegun północny o masie magnetycznej $+1$.

Jeżeli masa magnetyczna bieguna północnego jest $+m$, a południowego $-m$, to w punkcie, oddalonym od biegunów o r_1 i r_2, siły składowe działające na biegun $+1$, tam umieszczony, są $\frac{+m\ +1}{r_1^2} = +\frac{m}{r_1^2}$ i $\frac{-m\ +1}{r_2^2} = \frac{m}{r_2^2}$. Siły te wyrażone są w *dynach*. Przenosimy je w odpowiedniej podziałce do punktu badanego (ryc. 116), odcinając je na r_1 r_2 i zważając na ich kierunki (jedna siła $+$ oznacza odpychanie, druga przyciąganie), kreślimy równoległobok sił i wypadkową, odmierzamy wypadkową i oznaczamy jej wielkość w *dynach* wedle przyjętej dla tego wykresu podziałki. Wreszcie należy w badanym punkcie zaznaczyć strzałką kierunek wypadkowej i zapisać przy niej jej wielkość w *dynach*.

(Zadanie to wykonywa zbiorowo cała klasa: każdy uczeń oznacza wielkość siły i kierunek w pewnym punkcie, każdy w innym. Z tych prac poszczególnych składa się następnie obraz pola magnetycznego na jednym arkuszu. Wynik przechować wraz z rysunkiem uzyskanym z II § 37 ćw. 3

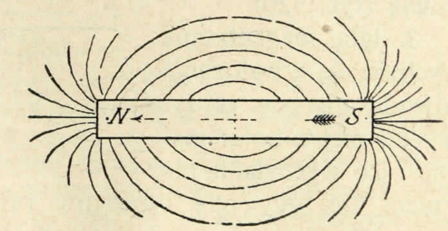
§ 39. Pole magnetyczne.

1 Przestrzeń, otaczającą magnes, w której działają siły magnetyczne, nazywany **polem magnetycznem**.

*Gdy na magnesie położymy kartkę sztywnego papieru i posypiemy ją opiłkami żelaznemi, to po lekkiem wstrząśnieniu ułożą się one w linjach krzywych. Jest to obraz przekroju pola magnetycznego. Mała igiełka, na nitce zawieszona i oprowadzana nad tą kartką papieru, przybiera w każdem miejscu położenie styczne do odnośnej linji krzywej. Te krzywe, otaczające magnes z wszystkich stron, nazywamy **linjami sił magnetycznych.** Gdyby można oddzielić biegun magnetyczny północny, przeszedłby on w ruch po linji krzywej od bieguna północnego ku południowemu.

Styczna do linji magnetycznej, w którymkolwiek punkcie wykreślona, wyznacza kierunek siły magnetycznej w tem miejscu pola

Linje magnetyczne tworzą zamknięte obwody i nigdy się nie przecinają. Wychodzą one z bieguna północnego i dążą zewnątrz magnesu do bieguna południowego, a wewnątrz od południowego ku północnemu. Rozróżniamy więc pole zewnętrzne i pole wewnętrzne (ryc. 117).

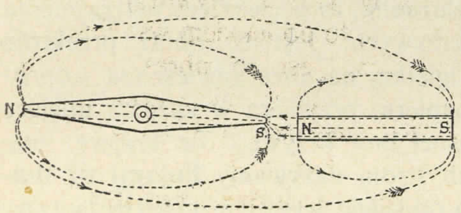


Ryc. 117

Ponieważ przekrój magnesu jest mniejszy od przekroju pola zewnętrznego, stąd wniosek, że żelazo posiada większą **przenikliwość** dla linij sił magnetycznych, niż powietrze, gdyż w tym samym przekroju może się ich tam więcej pomieścić, niż w powietrzu. W pobliżu biegunów jest przeto **gęstość** linij sił magnetycznych w powietrzu największa; tam także i wielkość siły magnetycznej jest największa. Dlatego umówimy się, że w pewnym punkcie pola tyle linij sił magnetycznych przechodzi przez 1 cm^2 powierzchni, prostopadłej do linij sił, ile *dyn* w tym punkcie wynosi wielkość siły magnetycznej, działającej na biegun jednostkowy północny. Wielkość tę nazywamy **natężeniem pola magnetycznego** w uważanym punkcie.

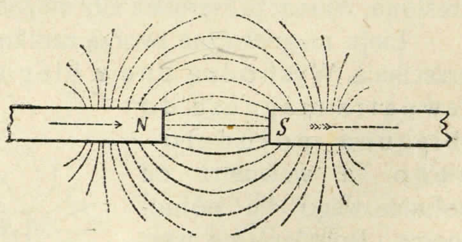
Pole magnetyczne, w którem linje sił są do siebie równoległe, zwiemy **polem jednorodnem.** Takiem jest pole magnetyzmu ziemskiego, uważane na małej przestrzeni. W polu jednorodnem natężenie ma wszędzie tę samą wartość i ten sam kierunek.

2. Ciało magnetyczne, mogące się obracać, ustawia się w polu magnetycznem tak, aby jak najwięcej linij magnetycznych przez nie przechodziło w kierunku jego własnych wewnętrznych linij, przez co dopełnia się naturalne zamknięcie obwodu (ryc. 118).



Ryc. 118.

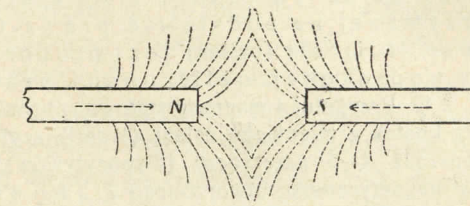
W polu magnetycznem, wytworzonem dwoma biegunami różnoimiennemi, linje sił wychodzą z bieguna północnego i zdążają ku biegunowi południowemu (ryc. 119). Linje te między dwoma biegunami równoimiennemi nawzajem się wymijają (ryc. 120).



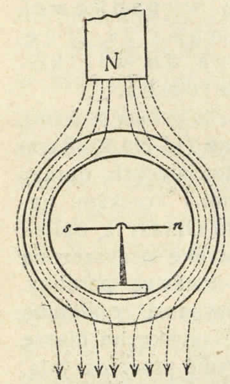
Ryc. 119.

3. Igła magnetyczna wychyla się z położenia równowagi, gdy zbliżymy do niej z boku magnes. To wychylanie nie zmieni się, gdy igłę otoczymy rurą z papieru lub rurą drewnianą, szklaną, kauczukową, mosiężną, miedzianą i t. p. Te

ciała w niczem nie zmieniają pola magnetycznego, przez nie przechodzą linję magnetyczne prawie tak, jak przez powietrze



Ryc. 120.



Ryc. 121

lub próżnię. (Ciała para albo diamagnetyczne). Gdy jednak igłę otoczymy grubą rurą żelazną (ryc. 121), wówczas wychylenia nie będzie, gdyż wszystkie linje magnetyczne, omijając wnętrze rury, przechodzą przez żelazo (ciało ferromagnetyczne). Taką rurę żelazną zwiemy **osłoną magnetyczną.**

Pytania.

1. Wyjaśnić indukcyjne magnesowanie się żelaza w polu magnetycznem.

2. Jaki cel ma **zwora** w magnesie podkowiastym?

3. Czy może być magnes z jednym tylko biegunem? Czy może być jeden biegun magnesu słabszy, drugi silniejszy? (Linje magnetyczne tworzą pasma zamknięte; ile ich wchodzi w magnes, tyle też musi z niego wyjść. Mogą jednak zachodzić rozliczne nieprawidłowości w namagnesowaniu sztaby stalowej, (n. p. przez pocieranie podwójne równoimiennemi biegunami można sztabę tak namagnesować, że będzie posiadała trzy bieguny), ale zawsze suma ilości magnetyzmu biegunów (+) północnych równa się sumie magnetyzmu biegunów (—) południowych).

4. Jaka jest gęstość linij sił magnetycznych w polu obliczanem w II § 38 Zad. 1? (Przez każdy cm^2 przekroju, prostopadłego do wypadkowej sił magnetycznych, przechodzi tyle linij, ile wynosi zapisane w tym punkcie natężenie).

Ćwiczenia.

*1 Magnes, którego używano do II § 36 Ćw. 3 i § 38 Zad. 1, ułóż pod arkuszem twardego i gładkiego papieru i posyp papier równomiernie żelaznemi opiłkami. Opiłki nabiera się małym magnesem i z pewnej wysokości zrzuca się je na papier, uderzając lekko drewienkiem w mały magnes. Przytem można także w stół lekko uderzać, aby papier wprawić w drgania, co ułatwia opiłkom układanie się w linje. Następnie należy obraz pola utrwalić. W tym celu rozpyla się nad papierem z opiłkami zapomocą rozpylacza, roztwór kalafonji w alkoholu i eterze. Wreszcie porównywamy trzy obrazy tego samego pola, wytworzone zapomocą kompasu, rachunkiem i zapomocą opiłek i przekonywamy się, że 1) igiełka magnetyczna w polu magnetycznem układa się w kierunku stycznym do linij sił i w kierunku wypadkowej, otrzymanej na podstawie prawa Coulomba i że 2) gęstość linij sił (opiłek) jest proporcjonalna do wielkości wypadkowej, obliczonej z prawa Coulomba.

*2. Przygotuj 4 magnesy stalowe o wymiarach (1 *cm* $\times$ 1 *cm* $\times$ 5 *cm*), kilka kostek z miękkiego żelaza (1 cm^3), szybki szklane (13 *cm* $\times$ 18 *cm*) i sporządź 4—5 przezroczy (diapozytywów), przedstawiających obrazy pola magnetycznego, utworzonego 2, 3 lub 4 magnesami i kostkami namagnesowanemi indukcyjnie w rozmaitych położeniach. Obrazy z opiłek na szkle można utrwalić następującym sposobem: Szybkę oczyszczoną powleka się na gorąco z jednej strony cieniutką warstewką parafiny. Po ostygnięciu wytwarza się na niej, zapomocą posypania opiłkami, obraz pola magnetycznego, a następnie ogrzewa się szybkę na blasze ogrzanej, aż do stopienia parafiny. Aby płytkę uczynić przezroczystą, można ją powlec fotograficznym lakierem negatywnym.

Zadania.

1. Obliczyć natężenie pola magnetycznego magnesu bardzo długiego i cienkiego, w punkcie odległym od bieguna o $d = 5\ cm$. Biegun tego magnesu ma $m_1 = 150\ j\ m$. (Ponieważ oddalenie biegunów jest bardzo wielkie, drugi biegun magnesu $-m_1$ nie będzie miał wpływu na przyciąganie bieguna $+m_1$. Dodatnia więc jednostka magnetyzmu będzie przez niego odpychana siłą $F = \frac{+m_1 . +1}{d^2} = \frac{m_1}{d^2} = 6\ dyn$. Wyrażenie $\frac{m_1}{d^2}$ jest właśnie **natężeniem pola magnetycznego**, wytworzonego biegunem m_1, w odległości d; oznaczmy je $H = \frac{m_1}{d^2}$. Jednost. natężenia jest: $j.\ m./cm^2$, co krótko nazywamy **Gaussem**. Zatem natężenie pola magnetycznego w tem zadaniu w danym punkcie wynosi 6 $j.\ m./cm^2 = 6$ *Gaussów*.

2. Obliczyć siłę, wywieraną przez magnes Zad. 1 na biegun $m_2 =$ 40 jednostek magnetyzmu? ($F = \frac{m_1}{d^2} \cdot m_2 = Hm_2 = 6$ *Gaussów*. 40 *j. m.* $= 240\ dyn$. Zatem: *Gauss* $\times$ *j. m.* = *dyna*).

3. Ile linij sił magnetycznych wychodzi w powietrze z bieguna magnesu w Zad. 1? Przez 1 cm^2 w oddaleniu d od bieguna przechodzi linij $H = \frac{m_1}{d^2} = 6$. Ponieważ kula, zakreślona promieniem d dokoła bieguna, ma powierzchnię $4\pi d^2$, a linje wychodzą z bieguna promieniście na wszystkie strony, przeto wszystkich linij, wychodzących z bieguna, jest $4\pi d^2\ H = 4\pi m_1 = 4\pi .\ 150 = 1885$).

§ 40. Magnetyzm ziemski.

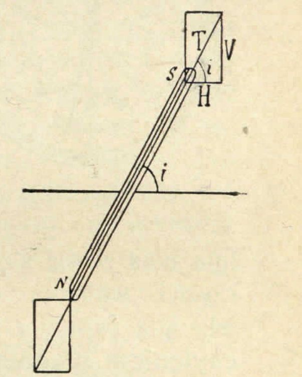
(Tablica V).

Igła magnetyczna, w środku ciężkości swobodnie zawieszona, zachowuje się w różnych punktach powierzchni ziemskiej

podobnie, jak igła magnetyczna w różnych miejscach pola magnetycznego, wytworzonego silnym magnesem sztabowym. Z tego powodu można ziemię uważać za magnes o magnetyźmie południowym na półkuli północnej, a północnym na półkuli południowej. Linje sił magnetyzmu ziemskiego idą w przybliżeniu w kierunku południków ziemskich. Ponieważ rozmiary magnesów, używanych do doświadczeń, są bardzo małe w porównaniu z odległością biegunów magnetycznych ziemi, można na niewielkim obszarze linje te uważać za równoległe, a pole, otaczające ziemię, za jednorodne. Igiełka swobodnie zawieszona ustawia się w kierunku tych linij sił magnetyzmu ziemskiego.

Na półkuli północnej nachyla się ona biegunem północnym w dół, a na półkuli południowej biegunem południowym w dół. Te nachylenia zwiększają się w miarę zbliżania się do biegunów ziemskich.

Natężenie pola magnetycznego ziemi w różnych miejscach jej powierzchni jest także różne. Całkowite działanie T magnetyzmu ziemskiego t. zn. siłę magnetyzmu ziemskiego, działającą na jednostkę bieguna igły magnetycznej, swobodnie zawieszonej (ryc. 122), można rozłożyć na **składową poziomą** H i **składową pionową** V magnetyzmu ziemskiego. Jeżeli igła jest do poziomu pod kątem i nachylona, wtedy: $H = T \cos i$, $V = T \sin i = H \operatorname{tg} i$.



Ryc. 122.

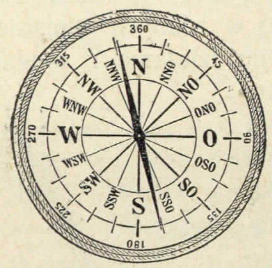
Siły te, tak całkowite natężenie T, jak i składowe H i V, działając na oba bieguny magnesu w kierunkach przeciwnych, tworzą pary sił (I § 40, 3), które sprawiają obrót igiełki, ale nie mogą wywołać ruchu postępowego. Obrót ten trwa tak długo, aż igiełka przyjmie położenie równowagi, w którem moment pary sił jest zerem. Dzieje się to wtedy, gdy kierunek igiełki jest zgodny z kierunkiem działania sił.

2. Igła magnetyczna, osadzona na osi pionowej, jest pod działaniem tylko poziomych składowych magnetyzmu ziemskiego, bo składowe pionowe zniesione są podparciem igły w punkcie, położonym zewnątrz środka ciężkości. Igła taka nie wskazuje dokładnie na północ i południe. Płaszczyzna pionowa, przesunięta przez oba bieguny tej igły, w równowadze będącej, zwie się **południkiem magnetycznym** tego miejsca. Kąt między

południkiem magnetycznym a geograficznym nazywa się **zboczeniem magnetycznem (deklinacją),** a igła, zawieszona na osi pionowej, **igłą zboczenia** lub **deklinacyjną.** Zboczenie magnesu może być zachodnie lub wschodnie, co pochodzi stąd, że bieguny magnetyczne ziemi różne są od biegunów geograficznych.

Idąc w kierunku od południa ku północy, znajdujemy takie miejsca na ziemi, w których zboczenia są jednakowe. Linja łącząca punkty ziemskie o jednakowych zboczeniach, zwie się **izogoną.** Linja, na której zboczenie wynosi 0°, zwie się **agoną.** Dzieli ona ziemię na dwie części: na Europę, Afrykę i Ocean Atlantycki o zboczeniu zachodniem i na Azję, Ocean Wielki i Amerykę o zboczeniu wschodniem.

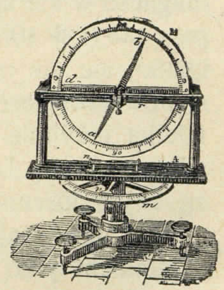
Igła zboczenia ma praktyczne zastosowanie w **kompasie** (ryc. 123), który został wynaleziony przez Chińczyków (2300 przed Chr.). Jest to igła zboczenia, a pod nią róża wiatrów na dnie puszki mosiężnej. Puszka ta jest osadzona w dwóch pierścieniach ruchomych tak, że zawsze jest w położeniu poziomem. Kompas służy do orjentowania się na morzu.



Ryc. 123.

3. Igła magnetyczna, obracająca się około osi poziomej, przez jej środek ciężkości przechodzącej, może się ty ko wahać w płaszczyźnie pionowej. Igła taka zowie się **igłą nachylenia** (ryc. 124), bo gdy jej płaszczyzna wahania pada w południk magnetyczny, wtedy kąt, jaki igła tworzy z poziomem, nazywamy **nachyleniem magnetycznem (inklinacją).**

Nachylenie magnesu w różnych miejscach ziemi jest różne, lecz w kierunku od wschodu ku zachodowi są miejsca, w których jest to samo nachylenie. Linja, łącząca punkty o jednakowych nachyleniach zwie się **izokliną.** Izoklinę, na której nachylenia wynoszą 0°, nazywamy **równikiem magnetycznym.** Przecina się on z równikiem geograficznym w dwóch punktach. Punkty, w których nachylenie jest 90°, nazywamy **biegunami magnetycznemi ziemskiemi.**


Ryc. 124.

Aby igłę dokładnie ustawić w południku magnetycznym, potrzeba ją najpierw tak obrócić, aby się zupełnie pionowo

ustawiła, co nastąpi, gdy jej płaszczyzna wahania będzie prostopadła do południka magnetycznego, bo wtedy składowe poziome są zniesione oporem osi obrotu. Z tego położenia należy obrócić igłę o 90°, a znajdować się będzie w południku magnetycznym.

Bieguny magnetyczne ziemi znajdują się na wybrzeżu północnej Ameryki w pobliżu wyspy Mellville i w pobliżu południowego geograficznego bieguna na południe od Tasmanji.

Zboczenie magnetyczne zmienia się powolnie w ciągu wieków, perjodycznie w ciągu doby, a nadto zachodzą zmiany nieregularne, **perturbacje.** Przed rokiem 1663 n. p. było zboczenie w Paryżu wschodnie, w 1663 r wynosiło 0°, a odtąd jest zachodnie i zmniejsza się obecnie corocznie o 9,5'. Zboczenie wzrasta przed południem, maleje po południu. Zmiany dzienne są większe w lecie, niż w zimie. Perturbacje następują często w czasie pojawiania się zorzy północnej **(burze magnetyczne).**

Zmiany nachylenia magnetycznego są mniej wybitne.

4. Żelazo i magnes można uwolnić od wpływu magnetyzmu ziemskiego 1) przez umieszczenie go w pudle żelaznem, które dla niego stanowi osłonę magnetyczną, 2) przez stałe połączenie go z drugim takim samym magnesem, zwróconym przeciwnemi biegunami w te same strony **(igiełka astatyczna),** 3) przez użycie **magnesu astatyzującego,** t. j. magnesu ułożonego w południku magnetycznym, w pewnem oddaleniu od igiełki, biegunami zgodnie z igiełką magnetyczną tak, że przy niewielkich wychyleniach igiełki magnes ten taką siłą bieguny jej odpycha, jaką magnetyzm ziemski jej bieguny przyciąga.

Pytania.

1. Ziemia zachowuje się, jak wielki magnes, najprostszem więc byłoby przypuszczenie, że wnętrze ziemi utworzone jest z żelaza magnetycznego. Co przemawia przeciw tej hipotezie?

Ponieważ ciepło w głębi ziemi wzrasta o 1 *st.* na 37 *m* zbliżenia się do środka ziemi, przeto już w głębokości 30 *km* prawdopodobnie panuje temperatura ponad 800°, a w tej temperaturze żelazo jest pozbawione własności magnetycznych. Zatem tylko w warstwie o grubości mniej, niż $^1/_{200}$ promienia ziemskiego, mogą być rudy żelazne, które są źródłem magnetyzmu ziemskiego.

2. Czy można przypuścić, że magnetyzm ziemski pochodzi tylko od warstw wierzchnich ziemi?

Za tą hipotezą przemawia fakt istnienia miejscowych nieprawidłowości w rozmieszczeniu magnetyzmu na ziemi; n. p. izogony tworzą linje w niewytłumaczony sposób pozaginane. Przeciwko tej hipotezie przemawiają zmiany magnetyzmu ziemskiego dzienne, roczne, wiekowe, burze magnetyczne, które wskazują na pewien wpływ słońca.

3. Czy ciężar żelaza powiększa się skutkiem namagnesowania?

4. Gdy zapomocą silnego magnesu badamy bieguny małej igiełki magnetycznej, zdarza się, że magnes oba bieguny przyciąga. Objaśnić to i podać, w jaki sposób można się przed tem zabezpieczyć. (Magnesowanie indukcyjne było silniejsze od magnetyzmu własnego igiełki. Należy badać bieguny igiełki z oddalenia, stopniowo się do niej zbliżając).

Ćwiczenia.

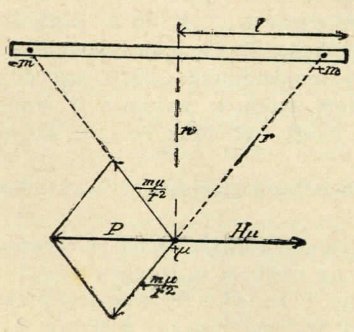
*1. Pręt z miękkiego żelaza (wykręcony z podstawy stojaka) ustawiamy w kierunku sił magnetyzmu ziemskiego (w płaszczyźnie południka, pod kątem 66° do poziomu) i uderzamy w jeden koniec kilka razy młotkiem Pręt okaże się namagnesowanym i posiada biegun północny u dołu. Obróćmy ten sam pręt przeciwnie, a po wstrząśnięciu zmienią się także bieguny.

*2. Dwa jednakowe magnesy sztabowe ułożone są na deszczułce i pływają w położeniu poziomem na powierzchni wody; tak jednak są z sobą połączone, że albo są do siebie równoległe, obok siebie lub w przedłużeniu, albo są pod kątem prostym, ułożone na sobie środkami. Wyrozumować, a potem sprawdzić doświadczeniem, jak ustawia się deszczułka w polu magnetycznem ziemi przy różnych kombinacjach położenie magnesów.

*3. Dwa jednakowe magnesy możemy otrzymać, gdy pręt stalowy jednostajnie namagnesowany, przetniemy w środku długości piłką. Utwórz z takich połówek namagnesowanego drutu stalowego igiełkę astatyczną. (Połączenie igiełek wykonaj z drutu miedzianego).

*4. Zbadaj, w jakiej odległości musisz ustawić magnes sztabowy nad igiełką, aby uwolnić ją od działania magnetyzmu ziemskiego. (Koniecznym warunkiem dobrego ustawienia magnesu astatyzującego jest, aby był ustawiony w południku magnetycznym i aby środki magnesu i igiełki znajdowały się na linji pionowej. Gdy oddalenie ich jest zbyt, wielkie, igiełka zwraca się biegunem północnym na północ, przy zbyt małem oddaleniu na południe; w oddaleniu właściwem igiełka obraca się zupełnie swobodnie).

*5. Znaleźć poziomą składową magnetyzmu ziemskiego H zapomocą magnesu sztabowego, (używanego w ćw. 4) o długości $2\,l$, o biegunach $+m$ i $-m$, astatyzującego igiełkę magnetyczną z wysokości w.



Ryc. 125.

Odległość r biegunów igiełki, bardzo krótkiej, od biegunów magnesu wynosi $r = \sqrt{l^2 + w^2}$ (ryc. 125), siły odpychania i przyciągania bieguna igiełki $+\mu$ przez oba bieguny magnesu $+m$ i m: są $+\frac{m\,\mu}{r^2}$ i $\frac{m\,\mu}{r^2}$; wypadkową tych sił P obliczymy z podobieństwa trójkątów: $P : \frac{m\,\mu}{r^2} = 2\,l : r$, skąd $P = \frac{2\,m\,l\,\mu}{r^3}$. Ponieważ magnes ustawiony jest w południku ma-

gnetycznym, przeto i siła P ma taki sam kierunek. Przy działaniu astatyzującem magnesu musi być $P = H\mu$, skąd wynika $H = \frac{2\,ml}{r^3}$.

Zadanie.

1. Składowa pozioma magnetyzmu ziemskiego w Warszawie wynosi $H = 0{,}19$ *Gaussa*, jakie jest całkowite natężenie magnetyzmu ziemskiego w Warszawie, gdy nachylenie wynosi tam 66°? ($T = H : \cos i = 0{,}47$ *Gaussa*).

V. ELEKTRYCZNOŚĆ.

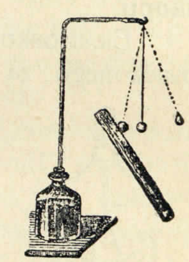
A. ELEKTROSTATYKA.

§ 41. Stan elektryczny ciał.

1 Ciała takie, jak żywica, siarka, szkło, porcelana, potarte jedwabiem, wełną lub futrem, przyciągają skrawki papieru lub kulki rdzenia bzowego, a potem je odtrącają.

O takich ciałach mówimy, że są **naelektryzowane**, że wytwarzają dokoła siebie **pole elektryczne**, że w przestrzeni naokół nich działają **siły elektryczne.**

Jedna lub dwie kulki z rdzenia bzowego, przyczepione do nitek jedwabnych, zawieszonych na pręcie szklanym, stanowią **wahadełko elektryczne** (ryc. 126). Jest to najprostszy przyrząd do badania stanu elektrycznego ciał.



Ryc. 126.

Zapomocą tego przyrządu przekonywamy się, że obie kulki odpychają się, gdy je zetkniemy z naelektryzowaną laską szklaną lub z laską laku, również odpychają się, gdy do nich zbliżymy jedwabną chustkę, której użyliśmy do pocierania szkła, ale nie odpychają się, gdy do nich zbliżymy laskę szklaną, owiniętą pocieradłem; że pomiędzy laską szklaną, naelektryzowaną przez pocieranie i nieelektryczną kulką wahadełka występuje przyciąganie, po dotknięciu kulki tą laską odpychanie, ale laska laku potarta przyciąga tę kulkę, którą laska szklana odpychała.

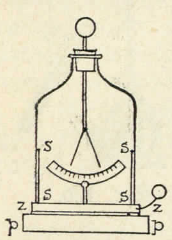
Z tych i innych doświadczeń widzimy, że istnieją dwa rodzaje elektryczności, elektryczność szkła i elektryczność laku i że wszystkie inne ciała pocierane elektryzują się albo jedną, albo drugą elektrycznością, że *oba ciała, pocierające i pocierane, elektryzują się, jedno elektrycznością szkła, drugie laku*, ale zetknięte z sobą nie okazują własności elektrycznych, że więc oba rodzaje elektryczności zachowują się względem siebie tak, jak ilości dodatnie i odjemne. Przyjęto, aby elektryczność szkła nazywać **dodatnią,** a elektryczność laku **odjemną.**

Widzimy dalej, że *ciała naelektryzowane przyciągają się, jeżeli ich elektryczności są przeciwnego znaku, odpychają się, gdy mają ten sam znak.*

2. Gdy laskę metalową, trzymaną w ręce, pocieramy kawałkiem jedwabiu, wtedy tylko jedwab naelektryzuje się. Gdy jednakże osadzimy laskę metalową na rączce szklanej i tylko szkło w ręce trzymamy, natenczas przy pocieraniu naelektryzuje się także laska metalowa i to cała, bez względu na to, w którem miejscu ją pocieramy. Widocznie więc elektryzowała się laska metalowa także wtenczas, gdyśmy ją bezpośrednio w ręce trzymali, lecz elektryczność przy dotykaniu metalu ręką nie mogła się na niej utrzymać.

Dokładniej można te zjawiska zbadać zapomocą **elektroskopu.**

Elektroskop (ryc. 127) składa się z pręta metalowego, osadzonego za pośrednictwem zatyczki kauczukowej w szyjce dzwonu szklanego. Na górnym końcu pręta jest kulka lub talerzyk, na dolnym są obok siebie przyklejone dwa listki malarskiego złota lub dwa listki glinu. Wewnątrz dzwonu naprzeciw listków są naklejone dwa skrawki stanjolu, które przylegają do płyty metalowej, stanowiącej podstawę dzwonu.



Ryc. 127.

Za dotknięciem się kulki ciałem naelektryzowanem następuje rozchylenie listków i to tem większe, im większa ilość elektryczności zostanie na elektroskop wprowadzona. Jeżeli na elektroskopie jest już rozchylenie listków, n. p. z powodu elektryczności dodatniej, rozchylenie to powiększy się za dotknięciem się kulki ciałem dodatnio naelektryzowanem, a pomniejszy się za dotknięciem się ciałem odjemnie naelektryzowanem. Tym sposobem bada się rodzaj elektryczności jakiegoś ciała.

Elektroskop z listkami rozchylonemi wskutek zetknięcia z ciałem naelektryzowanem, pozostawiony w spokoju, zatrzymuje przez pewien czas stan elektryczny; listki jego jednak prędzej, czy później, opadną. Gdy kulki elektroskopu dotkniemy laską szklaną lub laską laku, ale nie potartą, nie ujrzymy żadnej zmiany w rozchyleniu listków; dotknięcie kulki prętem metalowym, trzymanym w ręce, albo palcem, albo zetknięcie kulki z płomieniem zapałki powoduje natychmiastowe opadnięcie listków. Wyobrażamy sobie, że stan elektryczny, którego objawem jest rozchylenie listków, pochodzi od jakiejś nieznanej nam jeszcze materji, którą nazywamy elektrycznością, która przez jedne ciała może przepływać bez przeszkody, inne zaś ciała nie pozwalają tej materji przenosić się z jednego miejsca na inne. Pierwsze nazywamy **dobremi przewodnikami elektryczności** albo **konduktorami,** drugie **złemi przewodnikami** albo **izolatorami.** Jednakże i najlepsze przewodniki stawiają przejściu elektryczności pewien opór, a najgorsze nawet przewodzą elektryczność w małym stopniu.

Do dobrych przewodników zaliczają się metale, węgiel retortowy, roztwory soli i kwasów, ziemia wilgotna, ciało ludzkie.

Izolatorami są porcelana, jedwab, szkło, lak, siarka, kauczuk, ebonit, parafina, stearyna, oliwa, nafta. Gazy pod zwyczajnem ciśnieniem są izolatorami — gdyby tak nie było, nie poznalibyśmy nigdy elektryczności. Gazy jednak rozrzedzone lub rozżarzone (płomień) są dobremi przewodnikami.

Woda destylowana jest izolatorem, ale już niewielkie ilości ciał w niej rozpuszczonych (jak w zwyczajnej wodzie źródlanej), robią ją wcale dobrym przewodnikiem. Wskutek tego ciała wilgotne (n. p. zimne izolatory przeniesione do ciepłego pokoju) są złemi izolatorami.

Gdy ciało jest otoczone ze wszech stron izolatorami, mówimy, że jest **izolowane.** Przy dobrej izolacji można stan elektryczny ciała utrzymać nawet przez kilka dni; zła izolacja może w przeciągu bardzo nawet krótkiego czasu rozproszyć elektryczność ciała.

3. Listki elektroskopu, bardziej rozchylone, wskazują, że stan naelektryzowania elektroskopu jest wyższy, niż przy listkach słabo rozchylonych. Gdy talerzyk elektroskopu pocieramy pendzelkiem, suchym, osadzonym na pręciku szklanym albo ptasiem piórem, przekonywamy się, że każdemu muśnięciu pendzelkiem odpowiada przyrost rozchylenia listków Mówimy, że

na elektroskopie wytworzyliśmy przez pocieranie **nabój elektryczny** i że za każdem muśnięciem wielkość naboju przyrasta. Zatem rozchylenie listków może być miarą naboju elektrycznego, wprowadzonego na elektroskop. Elektroskop, opatrzony stosowną podziałką, którym można mierzyć wielkość nabojów elektrycznych, nazywamy **elektrometrem**.

Przez dotknięcie ręką elektroskopu lub konduktora izolowanego czyli przez połączenie go dobrym przewodnikiem z ziemią niszczymy w nim stan elektryczny czyli odprowadzamy nabój do ziemi. Nazywamy to **rozbrojeniem** konduktora.

Pytania.

1. W jaki sposób rozbroić można konduktor, jak można rozbroić izolator? (Konduktor łączy się z ziemią. Izolator naelektryzowany rozbroić jest często bardzo trudnem zadaniem; najłatwiej prowadzi do celu ogrzewanie w płomieniu. Dlaczego?)

2. Czy kulki wahadła elektrycznego powinny być utworzone z dobrego, czy ze złego przewodnika elektryczności? (Z dobrego, aby się z łatwością rozbrajały. Dlatego kulki z rdzenia bzowego powleka się proszkiem metalicznym, n. p. glinowym.

Ćwiczenia.

*1. Na dwóch nitkach jedwabnych zawieś druciane strzemiączko, w które włożyć można laskę laku, ebonitową lub szklaną. Sprawdź, że p r z y c i ą g a n i e c i a ł n a e l e k t r y z o w a n y c h j e s t w z a j e m n e, bo ręka przyciąga laskę szklaną naelektryzowaną tak samo, jak to czyni naelektryzowana laska ebonitowa.

*2. Chustkę jedwabną, którą pocieraliśmy szkło, zbliżam do laski ebonitowej, potartej wełną, zawieszonej w strzemiączku. Czy wystąpi przyciąganie, czy odpychanie?

*3) Zmieszaj w słoiku sproszkowaną minję (czerwoną) z kwiatem siarczanym (żółtym) i obwiąż słoik muślinem. Gdy po wstrząśnięciu posypiesz tą pomarańczową mieszaniną ciała naelektryzowane, ujrzysz, że ciała dodatnio naelektryzowane zabarwią się żółto, odjemnie naelektryzowane czerwono. Czego to dowodzi? **(Proszek elektroskopowy).**

*4. Sporządź elektroskop! (Najważniejszą rzeczą jest dobra izolacja w szyjce. W tym celu wytnij zatyczkę z parafiny, w nią wetknij rurkę szklaną, przez którą przechodzi z tarciem pręt elektroskopu).

*5. Przygotuj deskę, ustawioną na czterech parafinowych nóżkach (stolik izolowany), dużą puszkę blaszaną po konserwach (wiaderko), elektroskop, laskę szklaną i rurę gumową grubą, która ma służyć jako pocieradło. Wiaderko ustawiasz na stoliku izolowanym i łączysz je cienkim drucikiem z elektroskopem. Następnie pocierasz laskę na jednym końcu i nie zdejmując rury gumowej, wstawiasz laskę do wiaderka. Elektroskop nie okazuje rozchylenia listków, podczas gdy listki rozchylają się, gdy sama tylko laska lub samo pocieradło w wiaderku się znajdują. Czego to dowodzi?

*6. Badaj przewodnictwo różnych gatunków szkła. (Wprowadź jakiś nabój na elektroskop i mierz z zegarkiem w ręce, ile czasu upływa, aby listki od pewnego rozchylenia opadły, aż do jakiegoś mniejszego. Następnie stykaj z kulką elektroskopu różne gatunki szkła, trzymanego na jednym końcu ręką i mierz znów czas opadnięcia listków w takich, jak poprzednio, granicach. Przekonasz się, że najlepszym izolatorem jest flint, najgorszym crown. Dobrym izolatorem jest także szkło jenajskie).

*7 Kulkę rowerową (ogrzaną) osadź na słupku z parafiny, a ten wetknij w otwór próbówki ze szkła jenajskiego. Będzie to t. zw. **kulka próbna.**

Gdy dotkniesz kulką próbną konduktora naelektryzowanego, część naboju przejdzie z niego na kulkę i to część tem większa, im większa była **gęstość** elektryczności na konduktorze. Nabój ten, wprowadzony następnie na elektroskop, rozchyli jego listki w stopniu, zależnym od wielkości naboju kulki. Badaj kulką próbną wiaderko naelektryzowane, dotykając nią powierzchni zewnętrznej i wewnętrznej wiaderka. Stąd wyprowadzisz wniosek, ż e e l e k t r y c z n o ś ć g r o m a d z i s i ę t y l k o n a z e w n ę t r z n e j p o w i e r z c h n i p r z e w o d n i k ó w.

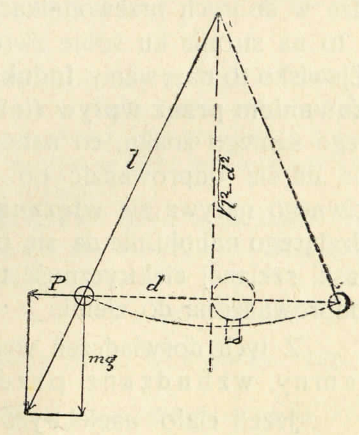
*8. Na stoliku izolowanym ustaw wiaderko, połączone z jednym elektroskopem. Nad wiaderkiem utwierdź w izolowanym krążku parafinowym lejek szklany, wewnątrz wyklejony stanjolem i połączony z drugim elektroskopem. Przygotuj piasek oczyszczony najpierw w wodzie potem w kwasie solnym, siarkowym, a wreszcie wypłukany znów w wodzie i wysuszony. Piasek ten nasyp do lejka, aby spływał do wiaderka. Na obu elektroskopach okażą się rozchylenia listków, listki jednak opadają po połączeniu elektroskopów. Czego to dowodzi?

*9. Stolik izolowany, silny, można zrobić przez przyklejenie do deski trzech porcelanowych telegraficznych izolatorów. Stań na tym stołku, dotknij ręką elektroskopu, a ktoś drugi niech ci ubranie czyści szczotką albo ryżową miotełką. Listki elektroskopu rozchylają się, ale nie rozchylą się, gdy sam się będziesz czyścił. Dlaczego?

*10. Z dostarczonych materjałów: ebonitu, drzewa powleczonego siarką, szkła, porcelany, celuloidu, mosiądzu z rączką szklaną, futerka kociego, flaneli, jedwabiu, skóry amalgamowanej, kauczuku, ustaw szereg, w którymby każde ciało pocierane następnem elektryzowało się dodatnio, a to następne odjemnie. (Badaj przy pomocy dwóch elektroskopów jednego naelektryzowanego dodatnio, drugiego odjemnie).

Zadanie:

Kulka ważąca 4 *gr* ($m = 4$ *gr*) wisi na nitce o długości $l = 49$ *cm* i przez zbliżenie konduktora naelek-

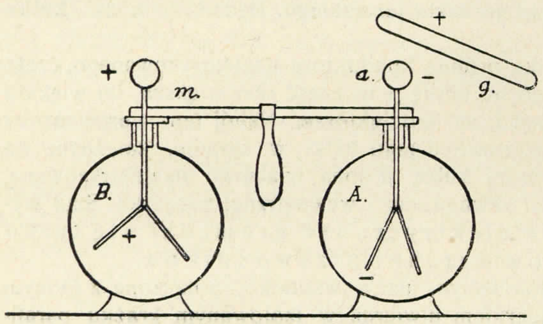


Ryc. 128.

tryzowanego odchyla się od pionowego położenia na odległość $d = 3\,cm$. Obliczyć siłę odpychającą P (Z ryc. 128 wynika: $P : mg = d : \sqrt{l^2 - d^2} \sim d : l$).

§ 42. Indukcja elektrostatyczna.

*1. Połączmy kulki dwu elektroskopów (ryc. 129) zapomocą pręta metalowego, opatrzonego izolującą rączką. Gdy do elektroskopu A zbliżymy ciało dodatnio naelektryzowane (n. p. potartą laskę szklaną), listki elektroskopu B rozchylą się. Gdy następnie oddalimy pręt metalowy, a zaraz potem laskę szklaną, rozchylą się także listki elektroskopów A i pokaże się, że elektroskop A naładowany jest odjemnie, a B dodatnio. Gdy teraz połączymy kulki elektroskopów prętem metalowym, listki obu elektroskopów znowu opadną. Gdy ponownie zbliżymy laskę szklaną, dotkniemy którejkolwiek kulki palcem, następnie odsuniemy pręt, a potem laskę szklaną, wtedy okaże się, że elektroskop A nie straci swego odjemnego naboju, natomiast elektroskop B stracił swój nabój dodatni. Doświadczenie to wskazuje, że nabój elektryczny wzbudza w dobrych przewodnikach z odległości naboje elektryczne i to na stronie ku sobie zwróconej nabój przeciwnego znaku. Zjawisko to nazywamy **indukcją elektrostatyczną** albo **elektryzowaniem przez wpływ (influencja).** Elektryczność wzbudzona tego samego znaku, co nabój wzbudzający, nazywa się **wolną,** bo da się odprowadzić do ziemi. Elektryczność znaku przeciwnego nazywa się **wiązaną,** bo wskutek przyciągania wzbudzającego naboju nie da się odprowadzić do ziemi. Po usunięciu laski szklanej elektryczność ta także się uwalnia i może być odprowadzona do ziemi.



Ryc. 129.

Z tych doświadczeń wynika: N a b o j e, d o d a t n i i o d j e m n y, w z b u d z a n e p r z e z i n d u k c j ę, s ą s o b i e r ó w n e.

Jeżeli ciało naelektryzowane znajduje się w przestrzeni, ze wszystkich stron zamkniętej przewodzącemi ścianami, wtedy

ściany mają zawsze nabój równy nabojowi ciała, lecz przeciwnego znaku po stronie wewnętrznej.

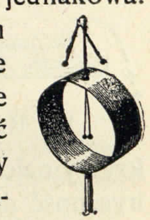
Jeżeli n. p. ciało naelektryzowane znajduje się w pokoju, wtedy na ścianach znajduje się nabój związany z nabojem ciała, równej wielkości, a przeciwnego znaku.

W s z e l k a i l o ś ć e l e k t r y c z n o ś c i j e s t z a w s z e z w i ą z a n a z r ó w n ą i l o ś c i ą e l e k t r y c z n o ś c i p r z e c i w n e g o z n a k u.

2. Jeżeli w przewodniku znajduje się elektryczność, natenczas pod wpływem wzajemnego odpychania oddalają się od siebie cząstki elektryczne, dopóki nie zostaną zatrzymane przez izolator, a więc dopóki nie znajdą się na powierzchni. Zatem e l e k t r y c z n o ś ć m o ż e w p r z e w o d n i k u z n a j d o w a ć s i ę t y l k o n a j e g o p o w i e r z c h n i z e w n ę t r z n e j, g d z i e p r z e w o d n i k s t y k a s i ę z i z o l a t o r e m.

Gdy naelektryzujemy otwarty walec metalowy (ryc. 130), rozchyla się tylko wahadełko elektryczne, umieszczone na jego powierzchni zewnętrznej.

Gęstość elektryczności, t. j. ilość przypadająca na jednostkę powierzchni, jest na powierzchni kulistej wszędzie jednakowa. Na powierzchniach innego kształtu, jest gęstość w tych miejscach największa, gdzie powierzchnia występuje na zewnątrz, a zwłaszcza tam, gdzie tworzy ostre krawędzie lub naroża. Tam więc nabój ma dążność do opuszczenia przewodnika. Dlatego konduktory z ostremi kolcami lub krawędziami szybko rozbrajają się.


Ryc. 130.

Pytania.

1. Opisz, jak elektryzuje się elektroskop, gdy do jego kulki przyłożę laskę szklaną. Czy elektryczność spływa z laski na kulkę? (Nie spływa, bo na lasce niema ruchu elektryczności, lecz przeciwnie z elektroskopu elektryczność różnoimienna spływa na laskę w miejscu zetknięcia, przyczem laska się w tem miejscu rozbraja).

2. Czy na izolatorze mogą się okazywać zjawiska indukcji? (Tak, ale tylko w miejscach, gdzie izolator styka się z nabojem indukującym. Izolator taki jest w tych miejscach naelektryzowany).

Ćwiczenia.

*1. Naelektryzuj elektroskop laską laku, raz dodatnio, drugi raz odjemnie.

*2. Sprawdź przy pomocy laski laku, czy elektroskop naelektryzowany jest dodatnio, czy odjemnie.

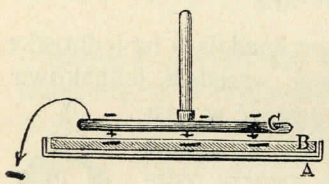
*3. Do elektroskopu naelektryzowanego dodatnio zbliżasz z oddalenia laskę laku potartą. Listki opadają, lecz przy dalszem zbliżaniu znów rozchylają się. Wyjaśnij!

*4. Konduktor izolowany połączony jest z elektroskopem. Do konduktora zbliżam laskę szklaną potartą i oddalam, listki elektroskopu rozchyliły się i opadły. Powtarzam to samo doświadczenie, gdy na konduktorze znajduje się igła, wetknięta w korek, przyklejony do powierzchni konduktora i gdy laskę przybliżam do igły. Elektroskop okaże nawet po oddaleniu laski rozchylenie listków, które jednak wkrótce także opadną. Wyjaśnić działanie kolca!

*5. **Doświadczenie Faradaya.** Wiaderko, ustawione na stoliku izolującym, połączone jest z elektroskopem. Badaj zachowanie się elektroskopu, 1) gdy wsuwam do wiaderka nabój izolowany, nie dotykając nim ścian, 2) gdy równocześnie dotknę wiaderka palcem, 3) gdy potem wyjmę nabój z wiaderka, 4) gdy nabój z powrotem wprowadzę do wiaderka i dotknę nim ściany wewnętrznej.

§ 43. Przyrządy do wytwarzania nabojów elektrycznych.

*1 **Elektrofor** (ryc. 131), składa się z **krążka** żywicznego lub ebonitowego, oklejonego z jednej strony stanjolem i z przykrywy metalowej, opatrzonej rękojeścią izolującą.



Ryc. 131.

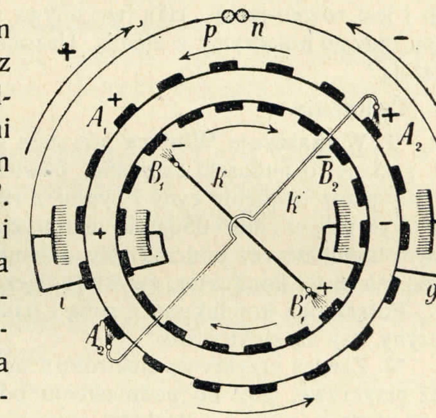
Na krążku powstaje elektryczność odjemna, gdy go natrzemy futerkiem Elektryczność ta ze złego przewodnika nie może ujść do ziemi. Gdy przykrywę położymy na krążku, wzbudzi on w niej przez indukcję oba rodzaje elektryczności. Za dotknięciem **przykrywy** palcem, elektryczność odjemna uchodzi do ziemi, a elektryczność dodatnia na niej pozostaje i można ją po podniesieniu przykrywy dowolnie zużytkować. Czynność tę można dowolną liczbę razy powtórzyć.

Nabity elektrofor przechowuje elektryczność dłuższy czas, bo elektryczności przeciwnego znaku, w krążku i przykrywie, wiążą się.

Podnosząc przykrywę elektroforu po dotknięciu się jej ręką, oddalamy jej nabój dodatni od ujemnego naboju krążka, a więc wykonywamy pracę wbrew przyciąganiu elektrycznemu. Praca zużyta pojawia się jako energja elektryczna w konduktorze.

2. Z pośród wielu typów maszyn, służących do wytwarzania nabojów elektrycznych, najbardziej jest rozpowszechniona samowzbudzająca się **maszyna influencyjna Wimshursta.** Maszyna ta składa się z dwóch jednakowych tafli szklanych lub ebonitowych, oklejonych wycinkami stanjolu, wirujących równolegle do

siebie w oddaleniu kilku milimetrów w przeciwnych kierunkach. Naprzeciwko każdej tafli umieszczony jest nieruchomy łącznik, zakończony pendzelkami metalowemi, dotykającemi wycinków tafli. Dwa grzebienie, obejmujące obie tafle, są połączone z rozsuwalnemi konduktorami. Dla wyjaśnienia działania maszyny pomyślmy sobie dwa współśrodkowe wirujące bębny i przyjmijmy na chwilę, że zewnętrzny bęben jest w spoczynku. Wycinek A_1 (ryc. 132) niechaj posiada nabój dodatni. Gdy pod czas obrotu bębna wewnętrznego stanie pod nim wycinek B_1, natenczas przez indukcję otrzyma nabój odjemny, a nabój dodatni przejdzie za pośrednictwem pendzelka i łącznika na B_1'. Przechodząc przed kolcami grzebienia g, działa B_1 na grzebień tak, że elektryczność odjemna zostaje odepchnięta do n, a dodatnia wypływa z grzebienia, zobojętnia nabój wycinka B_1 i ładuje go dodatnio



Ryc. 132.

Podobnie, gdy dodatnio naelektryzowany wycinek B_1' dojdzie do grzebienia i, nabój jego zmienia się na odjemny, a dodatnia elektryczność zostaje odepchnięta do p. Gdy także zewnętrzny bęben wiruje w przeciwnym kierunku, natenczas ładuje się wycinek A_2 przez wpływ wycinka B_2 dodatnio, podczas gdy A_2' ładuje się odjemnie za pośrednictwem pręta k' A_2 zatrzymuje nabój dodatni, dopóki nie dojdzie do grzebieni i, gdzie taki sam skutek wywiera, jak przedtem B_1', A_2' zatrzymuje nabój odjemny, dopóki nie dojdzie do grzebieni g, gdzie taki sam skutek wywiera, jak przedtem B_1.

Podobnie we wszystkich innych typach maszyn influencyjnych naboje wycinków metalicznych są unoszone aż do grzebieni, wysysających je i doprowadzających do biegunów maszyny. Przytem naboje te wzrastają, aż do granicy, zakreślonej izolacją. Aby maszyna Wimshursta działała, wystarczy ślad naboju na jednym wycinku, ślad ten może być pozostałością elektryczną tafli ebonitowej lub może powstać przez tarcie pendzelków metalowych o tafle. Dlatego nazywamy ją „samowzbudzającą“ w przeciwieństwie do innych, które wymagają uprzedniego wzbudzenia zewnętrznego.

Pytania.

1. Co jest źródłem energji elektrycznej w elektroforze i w maszynie influencyjnej? (Praca przy oddalaniu dwóch konduktorów o przeciwnych nabojach, przyczem należy pokonać ich wzajemne przyciąganie).

2. Energję elektryczną naboju na elektroskopie możnaby obliczyć, jako pracę, potrzebną do rozchylenia jego listków. Jest ona równa pracy, potrzebnej do przeniesienia tego naboju od związku z ziemią na elektroskop i jest równa pracy, jaką wykonywa nabój, odpływający z elektroskopu, gdy go połączymy z ziemią. Uzasadnij te zdania! Jakie prawo one wyrażają?

Ćwiczenia.

*1. W **maszynie Wintera** powstaje elektryczność przez pocieranie tafli szklanej o poduszki skórzane, powleczone amalgamem, który tworzy się przez stopienie cyny i cynku z rtęcią. Grzebienie, zwrócone ku tafli, wysysają z niej dodatnią elektryczność, która gromadzi się na jednym konduktorze, podczas gdy odjemna elektryczność spływa z poduszek na drugi konduktor, zwykle połączony z ziemią.

Połącz oba konduktory z sobą i badaj elektroskopem różne części maszyny, czy są elektryczne.

*2. Zawieś przykrywę elektroforu na wadze, staruj ją, a następnie zważ przykrywę, gdy po podniesieniu od krążka elektroforu znajduje się od niego w pewnej odległości.

*3. Połącz przykrywę elektroforu z elekroskopem i badaj, jak zachowuje się elektroskop, gdy przykrywę nakładamy na krążek, gdy dotykamy jej palcem i gdy ją podnosimy.

*4. Naelektryzować elektrofor przez połączenie przykrywy, leżącej na krążku, z którymkolwiek biegunem maszyny influencyjnej, podczas gdy drugi biegun połączony jest z ziemią, **uziemiony**, to zn. połączony drutem przewodnim z rurami gazowemi, wodociągowemi, albo wreszcie z murami budynku.

Posypać proszkiem elektroskopowym obie strony krążka i badać rodzaj naelektryzowania.

Odwrócić krążek i postępując, jak zwykle z elektroforem, zbadać znak naboju podniesionej przykrywy zapomocą elektroskopu.

*5. Krążek elektroforu jest zwykle położony na podstawie metalowej. Po podniesieniu przykrywy, usuń krążek i rozsyp na podstawie trochę kulek bzowych. Gdy zbliżysz przykrywę, rozpocznie się **taniec** kulek. Lepiej to się udaje, gdy przykrywę izolowaną połączysz z biegunem maszyny influencyjnej, czynnej, i zawiesisz go w odległości kilku *cm* od podstawy, na której są rozsypane kulki. Wyjaśnij!

§ 44. Prawo Coulomba.

1. Do badania, jak siły elektrycznego przyciągania i odpychania zależą od oddalenia ciał, na których znajdują się naboje,

używał Coulomb ważki skręceń, podobnej do opisanej w II § 38, 1, z tą różnicą, że bieguny magnesów zastąpione były naelektryzowanemi kulkami. Także i prawo, wyprowadzone z tych doświadczeń, zgodne jest z prawem Coulomba dla magnetyzmu tak, że jeżeli q_1 i q_2 oznaczają dwa naboje elektryczne, d ich oddalenie, F siłę przyciągania lub odpychania, a c współczynnik proporcjonalności, to

$$\boxed{F = \pm\, c\, \frac{q_1 q_2}{d^2},}$$

Dla równoimiennych naboi iloczyn $q_1 q_2$ jest dodatni, więc znak $+$ oznacza odpychanie, dla różnoimiennych naboi znak $-$ iloczynu oznacza przyciąganie.

Późniejsze pomiary potwierdziły prawo Coulomba w zupełności, ale tylko pod warunkiem, że naboje te znajdują się na ciałach o rozmiarach punktu. Gdy rozmiary ciał są wielkie, a oddalenie między niemi nieznaczne, prawo samo nie przestaje być prawdziwem, ale wtedy rozmieszczenie naboi na tych ciałach jest wskutek wzajemnej indukcji nierównomierne, a przeto wielkość d jest nieoznaczona.

2. Prawo Coulomba podaje nam wygodny sposób mierzenia naboi i określenia jednostki naboju.

Ponieważ wymiaru jednostki naboju z góry nie zakładamy więc i współczynnik c możemy przyjąć jako 1, a wtedy jednostka, naboju odpowiadać musi równaniu $dyna = \frac{(nabój)^2}{cm^2}$.

Jednostkę naboju ma ten nabój, który odpycha równy sobie nabój z odległości 1 cm siłą 1 dyny.

Tę jednostkę naboju, z prawa Coulomba wyprowadzoną, będziemy nazywali **elektrostatyczną jednostką naboju** i będziemy ją oznaczali: *j. e. s. nab.*

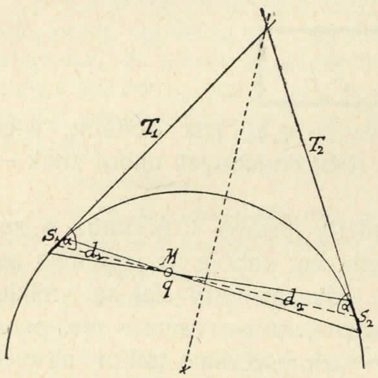
Zadania.

1 Dwie jednakowe kulki, każda o masie $m = 4\,gr$, wiszą obok siebie na nitkach o długości $l = 49\,cm$, a naelektryzowane równoimiennie odpychają się tak, że oddalenie ich środków wynosi $2\,d = 6\,cm$. Gdy przyjmiemy, że na obu kulkach znajdują się jednakowe naboje q, obliczyć ich wielkość. (Patrz ryc. 128. $P = \frac{q^2}{4d^2} = \frac{mgd}{l}$).

2. Jeżeli promień kulki $a = 1\,cm$, obliczyć gęstość δ elektryczności na jej powierzchni dla naboju, obliczonego w zadaniu poprzedniem $\left(\delta = \frac{q}{4\pi a^2}\ \frac{j.e.s.nab.}{cm^2}\right)$.

3. Okazać, że w e w n ą t r z k o n d u k t o r a k u l i s t e g o, na którego powierzchni nabój Q rozmieszczony jest równomiernie (stała gęstość δ), s i ł y d z i a ł a j ą c e w k a ż d y m p u n k c i e s ą w r ó w n o w a d z e.

Pomyślmy w dowolnym punkcie M nabój q (ryc. 133) i weźmy pod uwagę części powierzchni kuli S_1 i S_2, wycięte bardzo wąskim stożkiem o wierzchołku w M. Stożki te są podobne, ponieważ podstawy ich, jako części dwóch płaszczyzn T_1, T_2, stycznych do powierzchni kuli, zawierają z prostą, łączącą środki podstaw, równe kąty α. Stąd zaś wynika proporcja:



Ryc. 133.

$$S_1 : S_2 = d_1{}^2 : d_2{}^2 \text{ czyli } \frac{S_1}{d_1{}^2} = \frac{S_2}{d^2}.$$

Na powierzchni S_1 znajduje się nabój δS_1, na S_2 nabój δS_2, zatem siły działające między temi nabojami, a nabojem q, umieszczonym w M, wyrażają się

$$F_1 = \frac{\delta S_1 \cdot q}{d_1{}^2} \text{ i } F_2 = \frac{\delta S_2 \cdot q}{d_2{}^2}$$

z powodu jednak powyższej proporcji siły te są równe i znoszą się ponieważ są przeciwnie skierowane. To samo odnosi się do wszystkich stożków, jakie przez M przechodzą, czyli do całej powierzchni kuli.

Doświadczenie z wiaderkiem okazuje, że każdy konduktor dowolnego kształtu, zachowuje się tak, jak kula; stąd wniosek, że na takim konduktorze gęstość elektryczności nie może być stała, że największa jest na miejscach wystających, na ostrzach.

To zachowanie się elektryczności jest najlepszem stwierdzeniem prawdziwości prawa Coulomba.

§ 45. Pole elektrostatyczne.

1 Przestrzeń, w której działają siły elektryczne, nazywamy **polem elektrostatycznem** (albo też **elektrycznem**). Pole to może pochodzić od jednego albo od więcej nabojów, w pewien sposób w niem rozmieszczonych. Gdy w przestrzeń tę wprowadzimy jakiś nowy nabój, to ten nabój nie tylko będzie doznawał przyciągań i odpychań od innych nabojów pola, ale on przez indukcję zmieni także wartości tych nabojów Aby to jego działanie indukcyjne było jak najmniejsze, załóżmy, że wprowadzamy w pole elektrostatyczne nabój ogromnie mały wobec nabojów pola. Wtedy nabój ten poruszy się w polu elektrostatycznem po jakiejś linji, która w k a ż d y m s w y m p u n k c i e m a k i e r u n e k s t y c z n y d o w y p a d k o w e j w s z y s t-

k i c h s i ł w p o l u d z i a ł a j ą c y c h. Linja taka nazywa się **linją siły elektrycznej**, a wielkość tej siły w pewnym punkcie, wypadająca dla jednostki elektrostatycznej naboju, nazywa się **natężeniem pola** w tym punkcie.

Jeżeli tak określone natężenie pola w pewnym punkcie nazwiemy K, to siła działania elektrycznego, wywartego na nabój q, wynosić będzie $F = Kq$ *dyn.* Kierunek tej siły jest dodatni dla naboju dodatniego — nazywamy wtedy działanie siły odpychaniem odjemny zaś dla naboju odjemnego i wtedy zachodzi przyciąganie.

Jeżeli natężenie pola K pochodzi od jednego naboju Q, a odległość między nabojami Q i q wynosi d, to według II § 44 $F = \frac{Qq}{d^2}$ Z porównania obu wyrażeń na F wynika, że

$$\boxed{K = \frac{Q}{d^2},}$$

n a t ę ż e n i e p o l a m a l e j e z k w a d r a t e m o d d a l e n i a o d n a b o j u, w y t w a r z a j ą c e g o t o p o l e. (**Prawo odwrotnych kwadratów** II § 15, 2).

2. Aby przedstawić sobie pole elektrostatyczne w najprostszym przypadku, gdy pochodzi tylko od jednego naboju, pomyślmy, że w stawie zupełnie spokojnym znajduje się w jakiemś miejscu źródło, z którego wypływa woda na wszystkie strony. Gdzieś na powierzchni stawu znajduje się maleńka łódka, tak mała, aby nie stawiała wodzie żadnego oporu podczas swego ruchu, łódka płynąć będzie po jakiejś linji (w tym przypadku po linji prostej). Aby łódkę zatrzymać w pewnem miejscu, trzeba zarzucić kotwicę. linewka kotwicy wtedy pokazywać będzie **kierunek** działania siły, a sprężyna wstawiona między linewkę i łódkę mierzyć będzie swojem wydłużeniem **wartość** tej siły

Puśćmy łódkę swobodnie ona popłynie aż w te okolice stawu, gdzie woda już nie płynie, gdzie niema już żadnej siły popychającej. Aby wrócić napowrót w pobliże źródła, należy wiosłować przeciw prądowi wody, trzeba więc wykonać pracę. Ta praca jednak pojawia się jako energja potencjalna w czółnie, bo jak tylko puścimy je swobodnie, zaraz zacznie znów odbywać swój ruch; wtedy siły prądu wykonują pracę.

Gdy czółno jest na kotwicy, w spoczynku, wtedy ani siły zewnętrzne nie pracują, ani siły prądu wody To samo byłoby, gdyby kotwica była zarzucona w samem źródle, wtedy łódka mogłaby krążyć dokoła źródła i do utrzymania tego ruchu nie trzebaby żadnej pracy.

3. Zupełnie podobny obraz możemy utworzyć sobie w polu elektrostatycznem. Gdy nabój elektryczny odpychany oddala się od naboju pola, na pewnej drodze, wtedy jego energja potencjalna maleje o wielkość pracy, jaką wykonały siły elektryczne na tej drodze i równa się pracy, jaką trzebaby wykonać, aby nabój napowrót zbliżyć do naboju pola.

Potencjałem w jakimś punkcie pola elektrostatycznego, nazywamy pracę, która przypada na jednostkę naboju, kiedy ten nabój przesuwa się pod działaniem sił elektrycznych z tego punktu aż w miejsce, gdzie już siły elektryczne nie działają. Przytem nabój ten ma być tak mały, aby jego obecność w polu nie sprawiała zmiany samego pola wskutek indukcji. Jeżeli więc potencjał w jakimś punkcie pola jest V, to praca jaką wykonuja siły elektryczne przy przesunięciu naboju q w miejsce, gdzie siły elektryczne nie działają, wynosi Vq *ergów.*

Powierzchnie, na których każdy punkt ma tę samą wartość potencjału, nazywamy **powierzchniami jednakowego potencjału (ekwipotencjalnemi).** Przesunięcie naboju na powierzchni jednakowego potencjału nie wymaga wykonania pracy, gdy jednak siły pola przesuwają nabój q z powierzchni o potencjale V_A na powierzchnię o potencjale V_B, praca wykonana będzie równa $(V_A - V_B)\,q$

Gdy na dobrym przewodniku w każdym punkcie jest ten sam potencjał, to nabój elektryczny znajdujący się na nim, musi być w spoczynku. Gdy jednak potencjał na przewodniku niema wszędzie tej samej wartości, n. p. $V_A > V_B$, to musi nastąpić ruch, przeniesienie elektryczności czyli **prąd elektryczny**, który trwa tak długo, dopóki na całym przewodniku potencjał nie przybierze jednakowej wartości. Praca wykonana i tu ma wartość

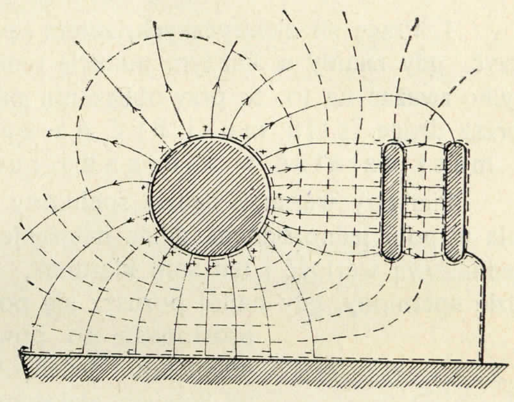
$$\boxed{W=(V_A - V_B)\,q.}$$

Pytania.

1. Elektryczność zawsze związana jest z ciałami materjalnemi. Jak zachowuje się na przewodnikach, jak na izolatorach? Powtórzyć poznane zjawiska. (Izolatory mogą elektryzować się w całej swej masie, konduktor ma nabój tylko na powierzchni, można zatem powiedzieć, że nie konduktor, lecz powietrze, z nim się stykające, jest naelektryzowane i że

elektryzować się mogą tylko izolatory. W izolatorach nabój poruszyć się może tylko razem z cząstkami ciała n. p. wiatr elektryczny, ruch wahadełka; w przewodnikach poruszają się naboje same, niematerjalne).

2. Podobieństwa i różnice między polem elektrostatycznem i magnetycznem. (Linje sił magnetycznych tworzą pasma zamknięte, linje sił elektrycznych, wychodzące z konduktorów, na ich powierzchni urywają się (Ryc. 134). Konduktor jest **osłoną elektryczną** dla przestrzeni, którą zamyka swoją powierzchnią. Podobieństwo do osłony magnetycznej. Wszystkie linje sił elektrycznych kończą się zawsze na powierzchni ziemi albo na powierzchni ciał uziemionych. Na powierzchnię konduktora izolowanego, elektryzowanego przez indukcję, tyle linij sił elektrycznych wchodzi, ile ich wychodzi po stronie przeciwnej.



Ryc. 134.

Powierzchnie jednakowego potencjału są do linij sił prostopadłe. Powierzchnia konduktora i cała przestrzeń wewnątrz niego ma jednakowy potencjał).

Ćwiczenia.

*1. Szybę szklaną powlecz warstewką parafiny. Na dwóch oddalonych końcach naklej dwa kółka, wykrojone ze stanjolu. Jedno z nich połącz z ziemią, drugie z biegunem maszyny influencyjnej. Płytę obsyp krótkiemi włóknami, naciętemi z sznura konopnego i rozbrajaj maszynę zapomocą małych iskier, bijących z maszyny do jednego kółka stanjolu. Włókna poukładają się w kierunku linij sił. Obraz można utrwalić przez ogrzanie szyby i po utrwaleniu skopjować na papierze fotograficznym.

*2. Do powierzchni dwóch kulistych konduktorów przyklej końcami kawałki włóczki długości około 10 *cm.* Połącz konduktory z biegunami maszyny influencyjnej. Nici jeżyć się będą, skupiać się do ręki zbliżonej, a przy zbliżeniu obu konduktorów do siebie, nici ułożą się w kierunku linij sił i dadzą obraz pola elektrostatycznego. Zamiast włóczki można użyć skrawków cienkiej bibułki.

Zadania.

1. Natężenie pola może być mierzone liczbą linij sił elektrycznych, przechodzących przez 1 cm^2 powierzchni, prostopadłej do kierunku siły. Jeżeli przez 1 cm^2 w oddaleniu d od naboju Q przechodzi linij $K=\frac{Q}{d^2}$ ile ogółem linij sił wychodzi z tego naboju? (Patrz II § 39 Zad. 3).

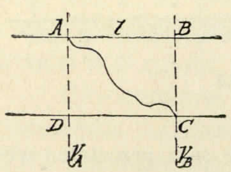
2. Jakie są związki między j. e. s. natężenia pola a innemi znanemi jednostkami? ($K = \frac{F}{q} = \frac{Q}{d^2}$; stosownie do tego napiszemy

$$j.\,e.\,s.\ natęż.\ pola = \frac{dyna}{j.\,e.\,s.\,nab.} = \frac{j.\,e.\,s.\,nab.}{cm^2}\Big).$$

§ 46. Obliczenie potencjału elektrycznego.

1 Pracę sił elektrycznych, zatem i potencjał, możemy obliczyć, gdy znamy w każdym punkcie natężenie pola K. Trzeba tylko zważać na to, że przy obliczaniu pracy, jako iloczynu siły przez drogę, siła musi być na całej drodze stała i musi działać w kierunku ruchu (Patrz I § 30, 2).

Pierwszy warunek będzie spełniony bez żadnego ograniczenia w polu jednorodnem, gdzie natężenie ma w każdym punkcie jednakową wartość i ten sam kierunek, drugi zaś warunek będzie spełniony, gdy nabój porusza się po linji siły elektrycznej, prostopadle do powierzchni jednakowego potencjału. Jeżeli A i B są dwa punkty na linji siły elektrycznej (ryc. 135), a K natężenie pola, to siła F, działająca na nabój q równa się Kq, a praca, jaką siły elektryczne wykonują, przenosząc nabój q od A do B czyli od powierzchni potencjału V_A na powierzchnię potencjału V_B, równa się $Fl = Kql$.



Ryc. 135.

Z drugiej strony pracę tę możemy także wyrazić na podstawie określenia potencjału, jako $(V_A - V_B)\,q$. Z porównania otrzymujemy:

$$\boxed{K = \frac{V_A - V_B}{l} = \frac{V_{A|B}}{l}.}$$

V_A i V_B są to **bezwzględne wartości potencjałów** w punktach A i B, $V_A - V_B$ nazywamy **różnicą potencjałów** albo krótko **napięciem** $V_{A|B}$ w punktach A i B, stosunek różnicy potencjałów w dwóch punktach do odległości tych punktów, $V_{A|B}\ l$, nazywamy **spadkiem potencjału** na drodze l. Zatem można powiedzieć, że natężenie pola równe jest spadkowi potencjału, mierzonemu wzdłuż linji siły elektrycznej.

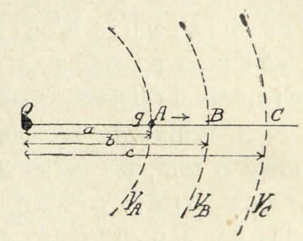
2. W polu niejednorodnem natężenie nie jest stałe. Określenia i obliczenia w ust. 1 podane, będą ważne pod tym warunkiem, że punkty A i B wybierzemy tak blisko

siebie, aby pomiędzy niemi można uważać natężenie pola za stałe.

Pracę, wykonaną przez pole naboju Q przy przeniesieniu naboju q z punktu A do B, t. j. z oddalenia a w oddalenie b (ryc. 136), przy założeniu, że te punkty tak są bliskie siebie, iż natężenie pola ma między niemi stałą wartość, obliczymy w następujący sposób:

$$(V_A - V_B)\,q = Kq\,(b - a),$$

skąd $V_A - V_B = K(b - a)$.



Ryc. 136.

Do obliczenia natężenia użyjemy równania z II § 45, 1 $K = \frac{Q}{d^2}$, w którem kwadrat oddalenia d^2 zastąpimy iloczynem ab, co jest konieczne, gdy K ma mieć średnią wartość na odcinku AB. Zatem

$$V_A - V_B = Q.\frac{b-a}{ab} = \frac{Q}{a} - \frac{Q}{b}.$$

Podobnie wyprowadzimy dla odcinka BC i dalszych, aż do YZ

$$V_B - V_C = Q\,\frac{c-b}{bc} = \frac{Q}{b} - \frac{Q}{c},$$

$$\cdots\cdots\cdots$$

$$V_Y - V_Z = Q\,\frac{z-y}{yz} = \frac{Q}{y} - \frac{Q}{z}.$$

Z dodania tych równań wynika

$$V_A - V_Z = \frac{Q}{a} - \frac{Q}{z}.$$

Miejsce pola, gdzie już siły elektryczne naboju Q nie działają, ma potencjał $V_Z = 0$, oddalenie tego miejsca od naboju Q jest $z = \infty$. Podstawiając to w poprzedniem równaniu, otrzymujemy **bezwzględną wartość potencjału** w punkcie A.

$$\boxed{V_A = \frac{Q}{a}.}$$

Mnożąc różnicę wartości potencjałów przez nabój q, otrzymujemy wyrażenie na pracę, wykonaną przez pole, n. p. między punktami A i M (a i m oddalenia naboju q od Q w punktach A i M):

$$W_{A|M} = \left(V_A - V_M\right) q = \frac{Qq}{a} - \frac{Qq}{m}.$$

Praca ta jest dodatnia, gdy $m > a$, w przeciwnym razie jest odjemna, co zachodzi wtedy, gdy nabój q przenosimy wbrew siłom elektrycznym od miejsca niższego potencjału V_A na miejsce potencjału wyższego V_M.

Praca ma wartość odjemną także wtedy, gdy nabój q jest odjemny I w tym przypadku musimy wbrew przyciąganiu naboju q oddalić go, czyli wykonać pracę.

Praca ma wartość dodatnią, gdy wykonywają ją siły pola, odjemną zaś, gdy siły zewnętrzne pracują wbrew siłom pola. W pierwszym przypadku energja potencjalna układu (Q,q) maleje, w drugim rośnie.

3. Ponieważ w wyrażeniu $(V_A - V_M)\, q$ niema zupełnie mowy o tem, po jakiej drodze nabój ma się posuwać, zatem praca przy przeniesieniu naboju w polu nie zależy od drogi, po jakiej to przeniesienie się odbywa, ale jedynie od wartości potencjałów jej punktów końcowych.

Gdy $V_A = V_M$, wtedy praca równa jest 0, zatem praca, wykonana po drodze zamkniętej, równa się zeru.

4. **Jednostkę elektrostatyczną potencjału** (*j. e. s. pot.*) ma przewodnik, gdy potrzeba 1 *erga* pracy, aby *j. e. s. naboju* przenieść z miejsca, leżącego poza jego polem, na jego powierzchnię:

$$j.\ e.\ s.\ potencjału = \frac{j.\, erg}{j.\ e.\ s.\ naboju}$$

Pytania.

1. Jaką wartość ma potencjał wewnątrz naelektryzowanego przewodnika? (Ponieważ wewnątrz przewodnika nie działają siły elektryczne, przeto do przeniesienia naboju z powierzchni do jakiekobądź punktu wewnątrz przewodnika nie potrzeba żadnej pracy; zatem wartość potencjału jest tam taka sama, jak na powierzchni).

2. Co stanie się, gdy dwa konduktory naelektryzowane połączymy z sobą? (Ponieważ po połączeniu oba tworzyć będą jeden przewodnik, przeto potencjały konduktorów, połączonych z sobą, wyrównują się. Przytem przejdzie część naboju z konduktora o potencjale wyższym na konduktor o potencjale niższym).

3. Jaki jest potencjał konduktora połączonego z ziemią? (Taki, ak potencjał ziemi, który przyjmujemy za zero).

4. Czy dwie różne powierzchni ekwipotencjalne mogą się z sobą przecinać? (Nie, bo wtedy ich punkty wspólne musiałyby mieć równocześnie dwie różne wartości potencjału).

5. Czy elektroskop (elektrometr), który służy do mierzenia naboi, może służyć także do mierzenia potencjałów? (Tak, bo gdy go połączymy z konduktorem, potencjały elektroskopu i konduktora wyrównają się, a na elektroskop spłynie nabój elektryczny, odpowiadający potencja-

łowi konduktora. Trzeba tylko uważać, aby konduktor był dosyć oddalony od elektroskopu, bo przy zbliżeniu oddziaływać nań będzie indukcyjnie).

Ćwiczenia.

*1. Na konduktor izolowany stawiam stożek papierowy, oklejony stanjolem. Po wprowadzeniu nań naboju badam gęstość elektryczności zapomocą kulki próbnej. Okaże się, że elektryczność pobrana z wierzchołka stożka, przeniesiona zapomocą kulki próbnej na elektroskop, bardziej rozchyla jego listki, niż pobrana z innych punktów konduktora. Jak to wyjaśnić, skoro potencjał na całym konduktorze jest jednakowy?

*2. Wiaderko naelektryzowane na izolującym stoliku badaj zapomocą kulki próbnej. Dlaczego z wnętrza wiaderka nie otrzymam naboju, chociaż potencjał wewnątrz i zewnątrz wiaderka ma być ten sam? Gdy jednak wiaderko połączę drutem z oddalonym elektroskopem, jest rzeczą obojętną, gdzie dotykam drutem wiaderka.

Zadania.

1. Udowodnij, opierając się na poznanych prawach, że praca przy przeniesieniu naboju w polu elektrycznem nie zależy od drogi, że jest jednakowa, czy nabój elektryczny porusza się po drodze AB, czy AC na ryc. 135. (Drogę AC rozkładamy na składowe AB i BC. Praca W będzie sumą dwóch prac $W_{AB} = Kql$ i $W_{BC} = 0$, zatem zawsze $W = W_{AB} = Kql$ Porównaj I § 30, 2 Przykład).

2. Jeżeli pole elektrostatyczne pochodzi od nabojów Q_1, Q_2, , w znany sposób rozmieszczonych, jaki jest potencjał tego pola w punkcie, oddalonym od nabojów o a_1, a_2, . . ? (Potencjał jest tak, jak praca, wielkością bezkierunkową (porównaj I § 30, 3), zatem potencjał wypadkowy jest sumą potencjałów częściowych: $V = \frac{Q_1}{a_1} + \frac{Q_2}{a_2} + \cdot \cdot$)

3. Jaki jest potencjał konduktora kulistego o promieniu a, posiadającego nabój Q? (W punktach zewnątrz konduktora nabój, równomiernie na nim rozmieszczony, zachowuje się tak, jakgdyby był zebrany w środku kuli i od środka kuli liczy się odległości. Takie zachodzą stosunki aż do samej powierzchni kuli, na której potencjał jest $\frac{Q}{a}$; taką samą wartość posiada potencjał także wewnątrz kuli).

4. Obliczyć potencjał kuli o promieniu 1 *cm*, gdy na jej powierzchni znajduje się *j. e. s. naboju?*

5. Jakie są związki między *j. e. s. potencjału* a innemi poznanemi? $\left(V = \frac{W}{q} = Kl = \frac{Q}{a}\right.$; zatem $j.\ e.\ s.\ potencjału = \frac{erg}{j.\ e.\ s.\ naboju} = j.\ e.\ s.\ natęż.$ *pola* $c\,m = \left.\frac{j.\ e.\ s.\ naboju}{c\,m}\right)$.

6. Nakreślić powierzchnie jednakowego potencjału, różniące się od siebie o 100 *e. s. potencjału* dla 400 *e. s. naboju*, znajdujących się na kuli o promieniu 1 *cm*

§ 47 Pojemność elektryczna. Kondensatory.

(Tablica VI.)

*1. Połączmy konduktor kulisty o promieniu a z biegunem maszyny elektrycznej o potencjale bezwzględnym V. Na powierzchnię konduktora spłynie wtedy ilość elektryczności $Q = Va$, proporcjonalna do potencjału źródła elektryczności i do promienia konduktora.

Jeśli konduktor ma kształt dowolny, to zawsze można znaleść konduktor kulisty, który przy tym samym potencjale źródła taką samą ilość elektryczności na siebie przyjmie. Promień konduktora kulistego, a, który nabojem Q elektryzuje się do tego samego potencjału V, co konduktor dowolnego kształtu, jest wielkością charakterystyczną dla tego konduktora i nazywa się jego **pojemnością**, $C = \frac{Q}{V}$.

Promień mierzy się w *cm*, dlatego

$$j\ e.\ s.\ pojemności = \frac{j.\ e.\ s.\ naboju}{j.\ e.\ s.\ potencjału} = cm.$$

*2. Powtórzmy doświadczenie z elektryzowaniem konduktora w ust. 1, z tą odmianą, że połączymy go jeszcze z odległym elektroskopem. Gdy już elektroskop rozchyleniem swych listków wskazuje osiągnięcie pewnego potencjału, przybliżmy do konduktora drugi konduktor, połączony z ziemią, n. p. rękę. Listki elektroskopu opadają, podnoszą się zaś, gdy konduktor, połączony z ziemią, oddalamy.

Jest to znany nam z II § 42 wpływ indukcji, ale zarazem okazuje się, że nabój indukowany obniża potencjał naboju indukującego. A gdy się potencjał obniżył, może ze źródła napłynąć jeszcze pewna ilość elektryczności, aż potencjał konduktora osiągnie wartość potencjału źródła. Możemy to wyrazić także inaczej, że przez sąsiedztwo ciał, połączonych z ziemią, pojemność konduktora zwiększa się.

Układ dwóch konduktorów, z których jeden połączony jest z źródłem elektryczności **(kolektor)**, drugi zaś z ziemią, nazywamy **kondensatorem. Pojemność kondensatora** jest większa od pojemności samego kolektora.

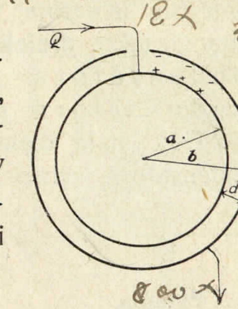
3. Wyobraźmy sobie **kondensator kulisty** (ryc. 137). Kolektor jest kulą o promieniu a; nabój Q wytwarza na nieosło-

$Q = \frac{1600x}{12}$

nionym kolektorze potencjał $V = \frac{Q}{a}$. Wskutek indukcji powstaje na kuli zewnętrznej o promieniu b nabój indukowany Q, zatem potencjał na tej kuli i w jej wnętrzu wynosi $-\frac{Q}{b}$. Ponieważ potencjały składa się w wypadkowy potencjał, dodając je arytmetycznie, więc na powierzchni kolektora powstaje potencjał

$$V' = \frac{Q}{a} - \frac{Q}{b} = \frac{Q}{a} \cdot \frac{b-a}{b} = V \cdot \frac{d}{b},$$

gdzie $d = b - a$ oznacza oddalenie powierzchni kondensatora czyli jego grubość.



Ryc. 137.

Nazwijmy literą C pojemność kondensatora, to $C = \frac{Q}{V'} = \frac{ab}{d}$, podczas gdy pojemność kolektora jest a; zatem pojemność kondensatora kulistego jest powiększona w stosunku $\frac{b}{d}$ i w tym samym stosunku pomniejszony jego potencjał.

Jeśli d jest bardzo małe wobec a i b, albo jeśli a i b są sobie prawie równe, można powierzchnię kondensatora obliczyć wyrażeniem $S = 4\pi ab$ zamiast $4\pi a^2$ albo $4\pi b^2$. Wtedy pojemność kondensatora można wyrazić. $C = \frac{4\pi ab}{4\pi d} = \frac{S}{4\pi d}$.

Wzór powyższy przydatny jest także do obliczenia pojemności **kondensatora płaskiego**, który można wyobrazić sobie jako część nieskończenie wielkiego kondensatora kulistego. Pojemność kondensatora jest wprost proporcjonalna do jego powierzchni, a odwrotnie do grubości

$$\boxed{C = \frac{S}{4\pi d}.}$$

*4. Wykonajmy doświadczenie z konduktorem płaskim. Jedna z jego **okładek** (kolektor) połączona jest z źródłem elektryczności i elektroskopem, druga uziemiona. Wstawmy teraz między obie okładki płytę szklaną, albo ebonitową, albo parafinową. Listki elektroskopu wyraźnie opadają, zatem pojemność konduktora zwiększa się, gdy przestrzeń między okładkami jest zajęta przez inny izolator, niż powietrze. Ten wpływ izolatora na pojemność kondensatora wskazuje na to, że podczas elektryzowania zachodzić muszą w izolatorze jakieś zmiany i że zmianom tym różne izolatory w różnym stopniu ulegają. Ze względu na to zachowanie się izolatora między ciałami naelektryzowanemi nazywamy go także **dielektrykiem**, a s t o s u n e k p o j e m n o ś c i k o n d e n s a t o r a z p e w n y m d i e l e k t r y k i e m d o k o n d e n s a t o r a p o w i e t r z n e g o **stałą dielektryczną.**

Gdy stałą dielektryczną oznaczymy literą ϵ, pojemność kondensatora wyrazi się·

$$\boxed{C = \epsilon . \frac{S}{4\pi d}.}$$

Pytania.

1 Ziemia jest kulą o znanej pojemności. Czy możemy poznać jej potencjał bezwzględny? (Nie, bo po pierwsze nie znamy nabojów, jakie istnieją na ziemi; po drugie elektroskop nie da pod tym względem żadnej wskazówki, gdyż rozchylenie listków jest tylko znakiem różnicy potencjałów między elektroskopem a otoczeniem, t. j. ziemią; po trzecie wszelkie elektryzowanie jest zawsze tylko miejscowem rozdzieleniem elektryczności dodatniej i odjemnej).

2. Na czem polega elektryzowanie się dielektryka? (Należy wyobrazić sobie, że każda cząstka materji posiada oba naboje. W przewodnikach oba naboje albo przynajmniej jeden z nich z łatwością się oddziela. W izolatorach jest to niemożebne; elektryzowanie w nich polega na obrocie cząstek albo na jakiemś przesunięciu naboi równoimiennych w jedną stronę. **Faraday** nazwał to **polaryzacją dielektryczną,** a d z i a ł a n i e s i ł e l e k t r y c z n y c h n a o d l e g ł o ś ć o d b y w a s i ę w e d ł u g n i e g o z a p o ś r e d n i c t w e m d i e l e k t r y k ó w, o t a c z a j ą c y c h p r z e w o d n i k i.

3. Na jakiej zasadzie opiera się użycie elektrometru, jako przyrządu, służącego równocześnie do mierzenia i naboi i potencjałów? (Porównaj II § 46, Pyt. 5. Jeżeli pojemność elektrometru jest C, to $Q = CV$, potencjał elektrometru jest proporcjonalny do naboju, jaki nań spłynął, zatem z rozchylenia listków można wnosić i o jednym i o drugim).

Ćwiczenia.

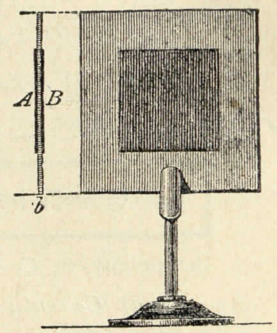
*1. Kolektor naelektryzowanego kondensatora połączmy z elektroskopem. Co dzieje się podczas rozsuwania płyt? (Listki elektroskopu podnoszą się, ponieważ pojemność kondensatora się zmniejsza, nabój zaś nie ulega zmianie, według równania $Q = CV$).

*2. Czy w kondensatorze musi być jedna płyta połączona z ziemią? [Nie, aby tylko na płytach była różnica potencjałów. Można także obie okładki kondensatora, izolowane, połączyć z biegunami maszyny influencyjnej; wtedy $Q = C\,(V_A \quad V_B)$].

*3. Opisz działanie elektroforu z uwzględnieniem jego zachowania się, jako kondensatora. (Krążek naelektryzowany indukuje nabój w przykrywie. Przy podnoszeniu przykrywy zachowuje się elektrofor, jak kondensator; pojemność kolektora (przykrywy) zmniejsza się, potencjał rośnie, w dielektryku powstaje polaryzacja. Konieczną się staje podstawa

metalowa dla krążka, która jest drugą okładką kondensatora. Linje sił przebiegają między okładkami).

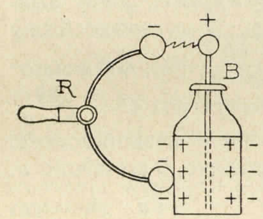
*4. Są różne formy kondensatorów: **Tablica Franklina** (ryc. 138) składa się z płyty szklanej, po obu stronach powleczonej stanjolem, z wyjątkiem brzegów, pokrytych szelakiem.



Ryc. 138.

Butelka lejdejska jest to słój szklany, wewnątrz i zewnątrz wyklejony stanjolem z wyjątkiem brzegów, powleczonych, szelakiem (ryc. 139). Okładka wewnętrzna jest połączona z prętem zakończonym u góry kulką.

Oba te przyrządy nabija się elektrycznością w ten sposób, że się łączy jedną okładkę z źródłem elektryczności, a drugą z ziemią. Rozbrojenie ich następuje, gdy obie okładki połączymy dobrym przewodnikiem n. p. **rozbrajaczem** R.



Ryc. 139.

Zamiast powyższych używa się często **kondensatorów płytowych**, sporządzanych z parafinowanego papieru albo miki (łyszczku).

Do pewnych celów używane są **kondensatory przestawialne**, których pojemność daje się zmieniać, przez zmianę powierzchni albo oddalenia okładek.

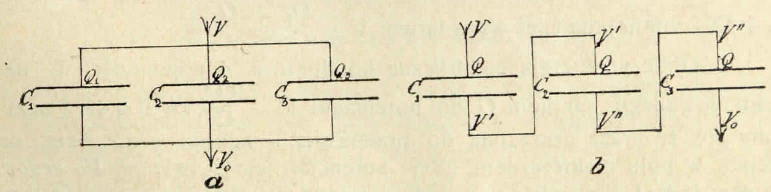
*5. Okazać wpływ dielektryka na **rozkładanej butelce lejdejskiej.** Gdy butelkę naelektryzujemy, potem rozłożymy ją i każdą okładkę z osobna rozbroimy, okaże się, że po złożeniu butelki jest ona znów bardzo silnie naładowana. Widocznie naboje nie mieściły się na okładkach butelki, ale wskutek nabojów spolaryzował się dielektryk, rozdzielający okładki butelki.

Zatem e l e k t r y z o w a n i e k o n d u k t o r ó w n a l e ż y r o z u m i e ć, jako e l e k t r y z o w a n i e i z o l a t o r a, s t y k a j ą c e g o s i ę z p r z e w o d n i k i e m. (Porównaj II § 45 Pyt. 1).

Zadania.

1. Jaką pojemność ma tablica Franklina, której szkło ma grubość 0,15 *cm*, a każda okładka ma powierzchnię 70 cm^2? ($\epsilon = 5$).

2. Kondensatory można z sobą łączyć **równolegle** (ryc. 140, a) lub w **szereg** (ryc. 140, b). Jaka jest ich **pojemność całkowita** C_c, gdy poszczególne pojemności są C_1, C_2, C_3?



Ryc. 140.

a) Łączenie równoległe:

$$Q_1 = C_1 \; (V \quad V_o),$$
$$Q_2 = C_2 \; (V \quad V_o),$$
$$Q_3 = C_3 \; (V \quad V_o),$$

$$Q = Q_1 + Q_2 + Q_3 = (C_1 + C_2 + C_3)(V \quad V_o),$$

$$\boxed{C_c = C_1 + C_2 + C_3}$$

b) Łączenie w szereg:

$$Q = C_1 \; (V \quad V' \quad V - V' = \frac{Q}{C_1},$$
$$Q = C_2 \quad V' - V''), \; V' - V'' = \frac{Q}{C_2},$$
$$Q = C_3 \; (V'' - V_o), \; V'' - V_o = \frac{Q}{C_3},$$

$$V - V_o = Q \left(\frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_3} \right),$$

$$\boxed{\frac{1}{C_c} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_3}}$$

Przyjmijmy, że $C_1 = C_2 = C_3 = C$ i że liczba ich jest ***n***, to

a) $C_c = nC$, *b)* $C_c = \frac{C}{n}$.

3. W prawie Coulomba II § 44, 1 przyjęliśmy, że działanie sił odbywa się w powietrzu i położyliśmy spółczynnik proporcjonalności $c = 1$. Czy nie należałoby tej stałej c nadać innej wartości, gdyby działanie odbywało się w innym dielektryku? (W ust. 3 wyprowadziliśmy na pojemność kondensatora kulistego wyrażenie $\frac{ab}{b-a}$ gdy zaś izolatorem jest dielektryk o stałej ϵ, pojemność kondensatora jest $C = \epsilon \frac{ab}{b-a}$. Pomyślmy, że w tym kondensatorze promień b rośnie w nieskończoność, to otrzymamy na pojemność kondensatora nieosłoniętego, o promieniu a, w dielektryku o stałej ϵ, wartość $C = \epsilon \left. \frac{ab}{b-a} \right|_{b=\infty} = \epsilon a$, skutkiem czego nabój Q będzie miał na tym konduktorze potencjał $V = \frac{Q}{\epsilon a}$, będzie więc ϵ razy mniejszy, niż na tym samym konduktorze w powietrzu. To samo zachodzić będzie w każdym innym punkcie pola tak, że i natężenie pola według II § 46, 1, a z niem i s i ł a, d z i a ł a j ą c a m i ę d z y d w o m a n a b o j a m i w t y m d i e l e k t r y k u, według II § 45, 1 b ę d z i e ϵ r a z y m n i e j s z a, n i ż w p o w i e t r z u. Z tego wynika, że prawo Coulomba należy pisać w formie

$$\boxed{F = \frac{1}{\epsilon} \, \frac{q_1 \, q_2}{d^2},}$$

gdzie ϵ jest stałą dielektryczną, dla powietrza równą 1).

4. Na dwóch przewodnikach C_1 i C_2 znajdują się naboje Q_1 i Q_2. Przewodniki te łączymy cienkim drutem o znikomej pojemności. Obliczyć potencjał wypadkowy. (Oba przewodniki połączone stanowić będą jeden przewodnik o pojemności $C_1 + C_2$, na którym znajduje się nabój $Q_1 + Q_2$; zatem potencjał wypadkowy $V = \frac{Q_1 + Q_2}{C_1 + C_2}$.)

5. Obliczyć energję elektryczną konduktora o pojemności C naelektryzowanego nabojem Q do potencjału $V = \frac{Q}{C}$ (W II § 45, 3 uczyliśmy się, że praca potrzebna do przeniesienia naboju q od ziemi do miejsca w polu elektrycznem, gdzie potencjał jest V, wynosi Vq *ergów*, przytem jednak założyliśmy, że nabój q jest tak mały, iż obecność jego nie zmienia pola. W rzeczywistości nabój q podniesie wartość potencja-

łów w każdym punkcie pola tak, że do przeniesienia nowego naboju q w to samo miejsce potrzeba już będzie pracy cokolwiek większej. Pomyślmy, że nabój Q przenosimy od związku z ziemią na powierzchnię konduktora takiemi dowolnie małemi porcjami $q = \frac{Q}{n}$ Dla pierwszej porcji praca wykonana będzie 0, ponieważ konduktor jeszcze był nieelektryczny, druga porcja wymaga już małej pracy równej $\frac{q}{C} q$, trzecia $\frac{2q}{C} q$, i t. d., aż wreszcie ostatnia $\frac{(n-1)\,q}{C} q$. Suma tych prac jest pracą całkowitą przy przeniesieniu naboju Q i równa się sumie postępu arytmetycznego:

$$0 \, . \, q + \frac{q}{C} \cdot q + \frac{2q}{C} \, q + \quad + \frac{(n-1)\,q}{C} \, q = \frac{(n-1)\,q \quad nq}{2C} = \frac{Q^2}{2C},$$

gdyż n jest liczbą dowolnie wielką, więc $(n-1)\,q = nq = Q$. Zatem energja elektryczna tego konduktora jest:

$$\boxed{W = \frac{Q^2}{2C} = \tfrac{1}{2} \, QV = \tfrac{1}{2} \, CV^2.}$$

6. Obliczyć energję kondensatora płaskiego o pojemności $C = \frac{\epsilon S}{4\pi d}$, którego jedna okładka połączona jest z ziemią, a na drugiej jest potencjał V (Nabój na kolektorze $Q = CV = \frac{\epsilon S}{4\pi d} V$, natężenie pola między okładkami, według II § 46, 1, $K = \frac{V}{d}$, zatem

$$\boxed{W = \frac{\epsilon S V^2}{8\pi d} = \frac{2\pi d Q^2}{\epsilon S} = \frac{\epsilon S d K^2}{8\pi}.}$$

W ostatnim wyrażeniu Sd jest objętością dielektryka, zatem e n e r g j a k o n d e n s a t o r a j e s t p r z y s t a ł e m n a t ę ż e n i u p o l a d o o b j ę t o ś c i d i e l e k r y k a p r o p o r c j o n a l n a.

7 Obliczyć energję kondensatora, danego w Zad. 1, gdy różnica potencjałów okładek wynosi 1000 *e. s.* Obliczyć energję, wypadającą na 1 cm^3 dielektryka. $\left(\frac{W}{Sd} = \frac{\epsilon K^2}{8\pi} \right)$.

8. Gdy cała energja rozbrajającego się konduktora zamienia się w ciepło, podać ilość ciepła w kalorjach. (Według I § 82,1, 1 $kal = 42.10^6$ *ergów* Zatem gdy energję mierzymy w ergach, ilość ciepła

$$U = \tfrac{1}{2} \, QV \; ergów = \tfrac{1}{2} \, QV \; \frac{1}{42.10^6} \; kal = 12.10^{-9} \, QV \; kal.)$$

§ 48. Zjawiska rozbrojeń elektrycznych.

1. Energja elektryczności, w spoczynku będącej, objawia się tylko odpychaniem lub przyciąganiem drugiego ciała, podobnie, jak energja potencjalna ciała, podniesionego na pewną wysokość, objawia się tylko ciśnieniem na podstawę. Gdy ciało spada z tej wysokości, wówczas jego energja potencjalna może

zamienić się w pracę mechaniczną, głos, ciepło i t. p. Również energja elektryczna, nagromadzona na konduktorze, przy rozbrajaniu się wywołać może różne zjawiska: dynamiczne, fizjologiczne, chemiczne, także głos, światło, ciepło i magnetyzm.

2. **Zjawiska fizjologiczne.** W chwili rozbrojenia kondensatora za pośrednictwem rąk doznaje się bolesnych wstrząśnień.

Zjawiska chemiczne. Iskra elektryczna zamienia tlen powietrza w ozon.

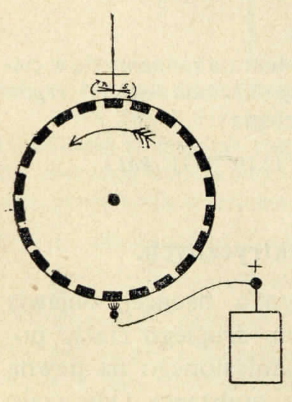
Ciepło. Elektryczność, przechodząca przez cienki drut, ogrzewa go. Iskra elektryczna zapala ciała łatwo palne.

Skutki dynamiczne. Jeżeli wielką butelkę ledejską ustawimy na izolatorze, a okładki jej połączymy z biegunami maszyny influencyjnej i nabijemy ją dostatecznie, to gdy przestaniemy obracać maszynę, nastąpi ruch jej płyt w kierunku wprost przeciwnym pod działaniem elektryczności, uchodzącej z butelki. Praca przy obracaniu maszyny zamienia się w energję elektryczną, która później znowu przekształca się w pracę.

Przebicie papieru, drzewa, szkła iskrą elektyczną, wiatr elektryczny są również zjawiskami dynamicznemi energji elektrycznej

3. **Zjawiska magnetyczne.** Sztabki żelazne i stalowe stają się magnesami, jeżeli są umieszczone w spiralnym zwoju drutu, przez który rozbraja się elektryczność. Widocznie *elektryczność w ruchu wytwarza w przestrzeni otaczającej pole magnetyczne.*

Dla zbadania pola magnetycznego naboi poruszających się wykonał **Rowland** (czytaj: Rolend) następujące doświadczenia. Krążek ebonitowy pionowy, wirujący bardzo szybko dokoła osi poziomej, ma na obwodzie naklejone wycinki stanjolu (ryc. 141). U dołu krążka przylega do wycinków miotełka druciana, połączona z wewnętrzną okładką silnej butelki lejdejskiej, u góry zaś nad krążkiem zwisa igiełka astatyczna, której kierunek jest zrazu równoległy do płaszczyzny krążka. Podczas ruchu krążka, igiełka skręca się w prawo lub lewo zależnie od znaku naboi, unoszonych w wycinkach stanjolowych, i zależnie od kierunku wirowania krążka. A mianowicie:



Ryc. 141.

a) *biegun północny igiełki wychyla się prawoskrętnie, gdy patrzymy w kierunku ruchu naboi dodatnich,* lewoskrętnie, gdy patrzymy w kierunku ruchu naboi odjemnych,

b) *ruch naboi dodatnich odchyla igiełkę tak samo, jak naboje odjemne poruszające się w przeciwnych kierunkach;*

c) wielkość odchylenia igiełki zależna jest od wielkości naboju unoszonego q i od prędkości jego ruchu v, zatem gdy *nabój w ruchu sprawia taki sam skutek, jak odpowiedni biegun magnesu,* to iloczyn tego naboju przez jego prędkość możemy uważać za proporcjonalny do ilości magnetyzmu bieguna, któryby w taki sam sposób odpychał biegun igiełki, jak to czyni poruszający się nabój. Gdy ilości elektryczności (naboje) q i ilości magnetyzmu μ mierzymy w odpowiednich jednostkach, to można napisać, że

$$qv = \mu.$$

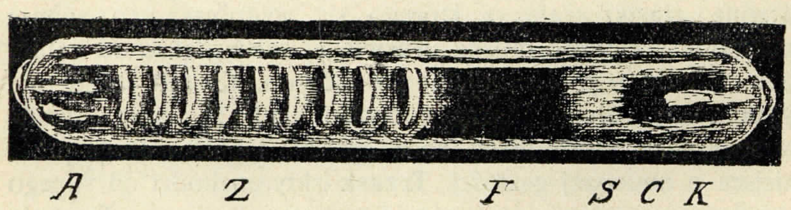
4. **Zjawiska świetlne** podczas rozbrojeń odznaczają się wielką różnorodnością. Gdy bieguny maszyny influencyjnej są od siebie w dość znacznem oddaleniu, powstają podczas jej działania **rozbrojenia ciche**: wszystkie ostre krawędzie i kolce w maszynie świecą w ciemności mdłem światłem, dodatnia elektryczność tworzy fioletowe miotełki, odjemna niebieską osłonę z białemi punkcikami. Pierwszy raz występuje tu różnica w zachowaniu się obu rodzajów elektryczności. Przy zbliżeniu biegunów przeskakuje między niemi iskra, tem świetniejsza, im więcej elektryczności się rozbraja wskutek zastosowania kondensatorów i tem dłuższa, im wyższy jest potencjał biegunów maszyny.

W powietrzu o zwyczajnej gęstości jest iskra elektryczna wąziutką smugą świecącą, wytworzoną przez oderwane i rozżarzone cząstki ciała, z którego się wydobywa, co analizą spektralną stwierdzić można. **Barwa** jej zależy także od natury gazu, w którym to rozbrojenie się odbywa. **Kształt** falisty (nie zygzakowaty) długiej iskry pochodzi stąd, że iskra wymija warstwy gazu, które przed sobą zgęściła i obiera drogę przez miejsca o mniejszej gęstości. **Trzask** iskry pochodzi od silnego i nagłego rozprężania się gazu pod wpływem jej ciepła. **Trwanie** iskry, jakkolwiek bardzo krótkie, można ocenić, fotografując jej obraz, odbity od zwierciadła szybko wirującego. W ten sposób przekonać się można, że na jedno rozbrojenie składa się szereg iskier, przeskakujących naprzemian to z jednego, to z drugiego bieguna.

5. W miarę **rozrzedzenia gazu**, w którym odbywają się rozbrojenia elektryczne, zmienia się też i wygląd zjawisk świetlnych. Do tych badań używa się rurek (naczyń) szklanych napełnionych rozrzedzonemi gazami i zaopatrzonych wewnątrz w pręciki lub płytki metalowe, które zapomocą drucików, platynowych, wtopionych w szkło, mogą być połączone z biegunami maszyny influencyjnej. Przewodniki te, doprowadzające elektryczność do wnętrza rurki, nazywamy **elektrodami**; jedną elektrodę, którą wchodzi elektryczność dodatnia, nazywamy **anodą**, drugą zaś, która doprowadza elektryczność odjemną, nazywamy **katodą**.

Gdy rurkę, napełnioną jakimś gazem, połączymy z pompą rozrzedzającą, możemy zauważyć wszystkie zmiany po kolei, jakim ulega wygląd **rozbrojeń w gazach rozrzedzonych.** Zrazu, mimo załączonej rurki, przeskakują iskry tylko między biegunami maszyny influencyjnej. Przy miernem jednak rozrzedzeniu iskry już bić przestają, a rozbrojenie w rurze zmienia się stopniowo na nieprzerwany przepływ elektryczności między elektrodami (przy prężności gazu 4 do 6 *cm* rtęci). Przy dalszem rozrzedzaniu wstęgi rozbrojeniowe rozszerzają się, tracą blask i zabarwiają się zależnie od natury gazu (w powietrzu na czerwono), a przy prężności około 6 *mm* rtęci rozszerzają się na cały przekrój rury, która wygląda, jakgdyby była wypełniona różowo świecącą mgłą (rurki **Geisslera, Plückera**).

Gdy prężność w rurce opadnie do 1 *mm* rtęci, zaczyna znów występować różnica w wyglądzie elektród. Mgła świecąca, wypełniająca dotychczas całą długość rurki (ryc. 142) — nazywamy ją **zorzą dodatnią**, *Z* — oddziela się od fioletowego światła,



Ryc. 142.

otaczającego katodę *K*, ciemną przestrzenią, którą nazywamy **ciemnią Faradaya** *F*. Przy dalszem obniżaniu się prężności

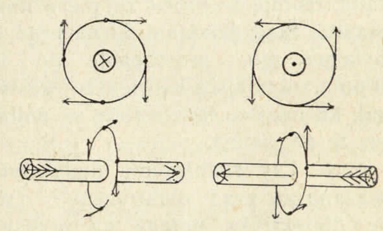
w rurce zorza dodatnia stopniowo skraca się, ciemnieje i przedstawia widok warstw naprzemian jasnych i ciemnych, podczas gdy **światło odjemne (katodowe)** *S* zyskuje na jasności, rozszerza się, wreszcie oddziela się od katody, na której powstaje nowa warstwa świecąca. Przy dalszem rozrzedzaniu gazu ciemna przestrzeń przy katodzie **(ciemnia Crookesa)** *C*, powiększa się, jasność światła katodowego zmniejsza się, a przy prężności gazu mniejszej od 0,001 *mm* rtęci wszelkie świecenie gazu ustaje i ciemnia Crookesa wypełnia całą rurkę (**rurka katodowa, Hittorfa, Crookesa**).

Pytania.

1. Rozbrojenia elektryczne odbywają się w gazach. Co dzieje się podczas rozbrojenia w przewodnikach, doprowadzających naboje ze źródła elektryczności do elektród? (Podczas rozbrojenia powstaje krótkotrwały p r ą d e l e k t r y c z n y).

2. Na czem polega rozbrojenie w gazach? (Na unoszeniu naboi elektrycznych, które dobywają się z jednej elektrody i wraz z cząstkami powietrza przenoszą się na drugą elektrodę. R o z b r o j e n i e j e s t w i ę c p r ą d e m u n o s z o n e j e l e k t r y c z n o ś c i, jak w doświadczeniu Rowlanda).

3. Co oznacza wyrażenie, że „biegun północny magnesu wychyla się prawoskrętnie, gdy patrzymy w kierunku ruchu naboi dodatnich"? (Jeżeli kółko z krzyżykiem (ryc. 143.) oznacza nabój dodatni, oddalający się od patrzącego — upierzenie strzały, a kółko z punktem nabój dodatni, zbliżający się ku patrzącemu — ostrze strzały, to biegun północny okrążać będzie poruszający się nabój dodatni w pierwszym przypadku zgodnie z wskazówką zegarową, w drugim przypadku przeciwnie). L i n j a m a g n e t y c z n a, po której porusza się biegun północny, jest k o ł e m, o k r ą ż a j ą c e m n a b ó j u n o s z o n y).



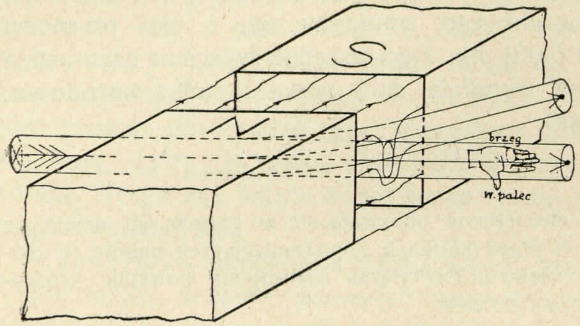
Prąd elektryczności unoszonej.

Ryc. 143.

4. Gdy biegun magnesu jest stały, a prąd elektryczności unoszonej ruchomy, czy nastąpi odchylenie prądu i w jakim kierunku? (Wyobraźmy sobie dwa magnesy, zwrócone ku sobie przeciwnemi biegunami, a między nimi prąd elektryczności unoszoszonej (ryc. 144). Gdyby magnesy były ruchome, poruszyłyby się oba wdół; jeżeli jednak magnesy są stałe, musi prąd elektryczności unoszonej odchylić się wgórę i to w płaszczyźnie prostopadłej do linij sił pola magnetycznego.

Kierunki odchylania się magnesów lub prądów wyznaczyć można zapomocą następującej regułki:

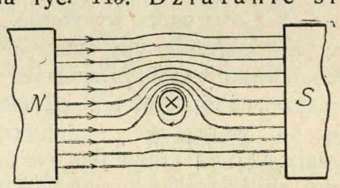
Gdy rękę prawą umieścimy w prądzie tak, aby **palce** wskazywały kierunek płynięcia dodatniej elektryczności,
a **dłoń** była zwrócona prostopadle do linij magnetycznych (wychodzących z bieguna północnego),
to **palec wielki** w bok wyciągnięty, wskaże kierunek odchylenia się bieguna północnego, prąd zaś odchyli się ku **brzegowi dłoni)**.



Ryc. 144.

5. Jak objaśnisz odchylanie się prądu elektryczności, unoszonej w polu magnetycznem, przy pomocy obrazu pola?

(Oba pola magnetyczne, magnesów i prądu elektryczności, składają się i dają obraz, przedstawiony na ryc. 145. Działanie sił w polu jest takie, jak gdyby linje sił dążyły do skrócenia się. Linje te, odkształcone obecnością prądu, usiłują powrócić do pierwotnego kształtu. Stąd działanie sił na prąd, odchylające go, prostopadle do linij sił pola, od miejsca największej gęstości linij, ku miejscu, gdzie linie są najrzadsze, to zn. wdół).



Ryc. 145.

6. Czy rozbrojenie dielektryka w kondensatorze ma być także uważane za prąd elektryczny? (Według II § 47 Pyt. 2 naelektryzowanie dielektryka polega na przesunięciu naboi naturalnych izolatora w pewnym kierunku. Rozbrojenie będzie wskutek tego powrotem tych naboi na swoje miejsca. Zatem tak naelektryzowanie, jak i rozbrojenie dielektryka musi być traktowane jako prąd, który wytwarza wokół siebie pole magnetyczne).

Ćwiczenia.

*1. Okaż wysoką temperaturę iskry, rozbrajającej kondensator. (Jedną kulkę rozbrajacza (ryc. 139) owiń kłębkiem waty, osypanej miałko utartą kalafonją. Iskra zapala watę).

*2. Okaż działanie magnesujące prądu, rozbrajającego kondensator. (Wewnętrzną okładkę dużej butelki lejdejskiej połącz zapomocą grubego mokrego sznura konopnego, długości $^1/_4 m$, ze **zwojnicą** drutu cienkiego, której drugi koniec jest połączony z kulką **rozbrajacza**. Zwojnicę sta-

nowią skręty drutu izolowanego, nawiniętego na rurę tekturową lub drewnianą. Rozbrajacz zaś jest to pręt metalowy, odpowiednio zgięty zakończony kulkami, a w pośrodku osadzony na rączce izolującej, służy do rozbrajania butelki lejdejskiej. Do wnętrza zwojnicy wkłada się druty stalowe. Gdy butelkę elektryzujemy zapomocą maszyny influencyjnej, a między rozbrajaczem i zewnętrzną okładką butelki przeskakują iskry, druty stalowe okażą się trwale namagnesowanemi).

§ 49. Układ jednostek elektromagnetycznych i praktycznych.

1 W doświadczeniu Rowlanda nabój w ruchu równoważny jest biegunowi magnesu. Możnaby się zapytać, jaką prędkość musi mieć *j. e. s. naboju*, aby ta jednostka była równoważna jednostkowemu biegunowi magnesu. Aby to pytanie było lepiej określone, trzeba doświadczenie Rowlanda cokolwiek odmienić.

Północny biegun magnetyczny jednostkowy umieścimy w środku krążka, obracającego się z prędkością obwodową v. Promień krążka, niech będzie równy r *cm*, a nabój na całym krążku — wycinki stanjolowe mogą tworzyć jedną całość — niech będzie równy q *e. s. naboju*. Wtedy działanie naboju na biegun północny jednostkowy, pochodzące od wszystkich punktów obwodu wirującego krążka, będzie skierowane zgodnie od płaszczyzny rysunku ku patrzącemu i wytworzy pole magnetyczne o natężeniu $H = \frac{\mu}{r^2} = \frac{qv}{r^2}$ (II § 39 Zad. 1). Pytanie powyższe teraz brzmieć będzie: Jaką prędkość v musi mieć $q = j$ *e. s. naboju*, aby krążąc po obwodzie koła o promieniu $r = 1$ *cm* wytwarzała pole H, działające na biegun jenostkowy, w środku koła umieszczony, siłą 1 *dyny*?

Odpowiedzi na to pytanie nie można wymyśleć; można ją otrzymać tylko z doświadczenia pomiarowego. Doświadczenia takie wykonywano i znaleziono, że krążek musiałby się obracać tak, aby naboje na jego obwodzie miały prędkość równą prędkości światła; zatem dla $q = j$. *e. s. naboju* musi być $v = 300000$ *km/sek* $= 3.10^{10}$ *cm/sek*, aby prąd qv był równoważny ilości magnetyzmu μ. Albo też można zmniejszyć prędkość obrotu v, zato jednak powiększyć w tym samym stosunku q, aby tylko qv było stałe i równe 3.10^{10} *e. m. naboju. cm/sek*; zatem dla $q = 3.10^{10}$ *e. s. naboju* będzie prędkość obrotu $v = 1$ *cm/sek*.

2. Zachodzi jednak w równaniu $qv = \mu$ pewna niezgodność, która musi być usunięta; mianowicie wymiary obu stron

równania nie są jednakowe. **Wymiarem** wielkości fizycznej nazywamy wyrażenie, przedstawiające się w kształcie iloczynu pewnych potęg długości, masy i czasu. W układzie C-G-S (I § 5) iloczyn ten ma kształt $gr^{\alpha}\, cm^{\beta}\, sek^{\gamma}$, gdzie liczby α, β, γ mogą mieć wartości dodatnie lub ujemne, całkowite lub ułamkowe.

N. p. dla

prędkości, którą mierzymy w *cm/sek*, jest $\alpha = 0, \beta = 1, \gamma = -1$,
przyśpieszenia, które „ w *cm/sek²*, „ $\alpha = 0, \beta = 1, \gamma = 2$,
masy, którą mierzymy w *gr*, jest $\alpha = 1, \beta = 0, \gamma = 0$,
siły, którą „ w *dynach*, jest $\alpha = 1, \beta = 1, \gamma = 2$.

Obliczmy wymiar **ilości magnetyzmu** $[\mu]$. Użyjmy równania określającego z II § 38: $F = \frac{\mu_1 \mu_2}{d^2}$, z którego wynika, że $[\mu]^2 = dyna\ cm^2 = gr\ cm^3\ sek^{-2}$, zatem

$$[\mu] = j.\ m. = gr^{\frac{1}{2}}\ cm^{\frac{3}{2}}\ sek^{-1} \qquad \alpha = \tfrac{1}{2}, \beta = \tfrac{3}{2}, \gamma = 1.$$

Zupełnie to samo otrzymamy dla *j. e. s. naboju*, ponieważ określenie tej jednostki opiera się również na prawie Coulomba (II § 44): $F = \frac{q_1 q_2}{d^2}$ (w powietrzu $c = \frac{1}{\epsilon} = 1$); zatem

$$[q]_e = j.\ e.\ s.\ naboju = gr^{\frac{1}{2}}\ cm^{\frac{3}{2}}\ sek^{-1}, \qquad \alpha = \tfrac{1}{2}, \beta = \tfrac{3}{2}, \gamma = -1;$$

Widzimy, że równanie $qv = \mu$ żadną miarą nie może być spełnione przy użyciu wymiarów, dla q i μ powyżej wyprowadzonych, że nabój elektryczny w ruchu, wytwarzający w swojem otoczeniu pole magnetyczne, musi być innemi jednostkami mierzony. Wymiar tej jednostki, zwanej elektromagnetyczną (*j. e. m. naboju*) obliczymy według równania $q = \mu : v$,

$$[q]_m = gr^{\frac{1}{2}}\ cm^{\frac{3}{2}}\ sek^{-1}\ \ cm\ sek^{-1} = gr^{\frac{1}{2}}\ cm^{\frac{1}{2}}; \quad \alpha = \tfrac{1}{2}, \quad \beta = \tfrac{1}{2}, \quad \gamma = 0.$$

Zbierając w jedno, co wyżej powiedziano, napiszemy

$$\boxed{j.\ e.\ m.\ naboju = 3.10^{10}\ \frac{e.\ s.\ naboju}{cm/sek}}$$

i powiemy **jednostka elektromagnetyczna naboju, unoszona z prędkością 1 *cm/sek* po obwodzie koła o promieniu 1 *cm*, wytwarza pole magnetyczne, które w środku tego koła ma natężenie 1 *Gaussa***, czyli na biegun magnetyczny jednostkowy, tam umieszczony, działa siłą 1 *dyny*.

3. Rozważanie nad równaniem $H = \frac{qv}{r^2}$ można jeszcze rozszerzyć w ten sposób, że dla prędkości v wprowadzimy wyra-

żenie $v = 2\pi r : T$ (porównaj I § 27, 5), gdzie T oznacza czas jednego obrotu krążka. Wtedy $H = \frac{2\pi}{r} \cdot \frac{q}{T}$.

Znaczenie wielkości $\frac{q}{T}$ łatwiej zrozumiemy, gdy wprowadzimy liczbę obrotów krążka w jednostce czasu $N = \frac{1}{T}$, wtedy $\frac{q}{T} = Nq$ oznacza, gdy wyobrazimy sobie naboje poruszające się na obwodzie nieruchomego krążka, że przez każdy punkt obwodu przesuwa się w sekundzie nabój o wielkości Nq. Ilość elektryczności przepływającej w sekundzie przez przekrój przewodnika nazywamy **natężeniem** prądu elektrycznego. Oznaczamy je literą J, zatem $J = \frac{q}{T} = Nq$, a

$$\boxed{H = \frac{2\pi\ J}{r}.}$$

Wymiar **jednostki elektromagnetycznej natężenia**, obliczymy z równania $J = q\ .\ T$

$$j.\ e.\ m.\ natężenia = j\ e.\ m.\ naboju\ \ 1\ sek = gr^{\frac{1}{2}}\ cm^{\frac{1}{2}}\ sek^{-1}$$

W podobny sposób można także określić **jednostkę elektrostatystyczna natężenia**

$$j.\ e.\ s.\ natężenia = j\ \ e.\ s.\ naboju\ \ 1\ sek = gr^{\frac{1}{2}}\ cm^{\frac{3}{2}}\ sek^{-2},$$

zatem

$$j\ \ e.\ s.\ natężenia = 3.10^{10}\ \frac{e.\ s.\ natężenia}{cm/sek}$$

4. Znając *j e. m. naboju* możemy i dla innych wielkości poznanych, jak potencjału i pojemności, wyznaczyć jednostki elektromagnetyczne.

Potencjał określiliśmy (II § 46, 4) jako pracę (mierzoną w *ergach*), wypadającą na jednostkę naboju, a potrzebną do przeniesienia tego naboju do pewnego punktu pola. Zatem

$$j\ \ e.\ m.\ potencjału = \frac{1\ erg}{j.\ e.\ m.\ naboju} = \frac{1\ erg.\ cm/sek}{3\ \ 10^{10}\ e.\ s.\ naboju} =$$

$$= \frac{1}{3\ \ 10^{10}}\, e.\ s.\ potencjału\ .\ cm/sek.$$

Pojemność określona była wyrażeniem $C = Q\ \ V$ (II § 47), zatem

$$j\ \ e.\ m.\ pojemności = \frac{j.\ e.\ m.\ naboju}{j.\ e.\ m.\ potencjała} = \frac{3.10^{10}\ \ e.\ s.\ naboju : cm/sek}{\frac{1}{3.10^{10}}\ e.\ s.\ potencjału.\ cm/sek} =$$

$$= 9.10^{20}\ \ e.\ s.\ pojemności : (cm/sek)^2.$$

5. Oba układy jednostek . **elektrostatyczny** (*e. s.*) i **elektromagnetyczny** (*e. m.*) zarówno są używane w badaniach teore-

tyczno naukowych; o wyborze jednostek rozstrzyga tylko kwestja wygody W technice jednak i praktyce codziennej używany jest układ trzeci **praktyczny,** w którym $\frac{1}{10}$ *e. m. naboju* przyjęto za jednostkę i nazwano ją **Coulombem** (oznaczenie *C*), zatem

$$\boxed{1\ C = \tfrac{1}{10}\ e.\ m.\ naboju = 3.10^9 \frac{e.\ s.\ naboju}{cm/sek}.}$$

W układzie praktycznym *C G-S* jednostką pracy (energji) jest **Joule** (oznaczenie *J*, I § 30, 1), zatem **jednostka praktyczna potencjału,** którą nazywamy **Voltem** (oznaczenie *V*) jest.

$$1\ V = \frac{1\ J}{1\ C} = \frac{10^7\ erg}{\frac{1}{10}\ e.\ m.\ naboju} = 10^8\ e.\ m.\ potencjału =$$
$$= \tfrac{1}{300}\ e.\ m.\ potencjału.\ cm/sek.$$

W elektrotechnice zamiast *Joula* używają także często nazwy **Voltcoulomb** (oznaczenie *VC*).

Jednostka praktyczna pojemności ma nazwę **Farad** (oznaczenie *F*), wyprowadza się ją ze związku

$$1\ F = \frac{1\ C}{1\ V} = \frac{\frac{1}{10}\ e.\ m.\ naboju}{10^8\ e.\ m.\ potencjału} = 10^{-9}\ e.\ m.\ pojemności =$$
$$= 9\ 10^{11}\ e.\ s.\ pojemności \cdot (cm/sek)^2$$

Jednostka praktyczna natężenia ma nazwę **Amper** (oznaczenie *A*); wyprowadza się ją ze związku

$$1\ A = \frac{1\ C}{sek} = \frac{\frac{1}{10}\ e.\ m.\ naboju}{sek} = \tfrac{1}{10}\ e.\ m.\ natężenia =$$
$$= 3\ 10^9\ \frac{e.\ s.\ natężenia}{cm/sek}.$$

Większe lub mniejsze jednostki tworzy się, dodając przed nazwą jednostki praktycznej

wyrazy	mega-,	kilo-,	mili-,	mikro-,
(oznaczenia	*M*,	*k*,	*m*,	μ,)
co przedstawia wielokrotność jednostki zasadnicze :	10^6,	10^3,	10^{-3},	10^{-6}

N. p. kilowolt, $kV = 10^3\ V$, miliamper, $mA = 10^{-3}\ A$,
mikrofarad, $\mu F = 10^{-6}\ F$

W elektrotechnice używają nazwy **Ampersekunda** (oznaczenie *Asek*), zamiast *Coulomba* i **Ampergodzina** (oznaczenie *Ah*).

$$1\ Ah = 3600\ Asek = 3600\ C.$$

Ćwiczenia.

*1. Połącz bieguny maszyny influencyjnej z dwiema płytami płaskiemi, kołowemi, doskonale do siebie równoległemi, których odległość

można mierzyć z dokładnością 1 *mm* **(kondensator rozsuwalny).** Gdy oddalenie płyt wynosi 1 *cm*, a między niemi przeskakują iskry, wtedy napięcie na płytach wynosi 35000 $V = \frac{350}{3}$ (= 116,7) *e. s. potencjału* i rośnie proporcjonalnie do oddalenia płyt od siebie, na każdy milimetr o 3500 V = 11,7 *e. s. potencjału.*

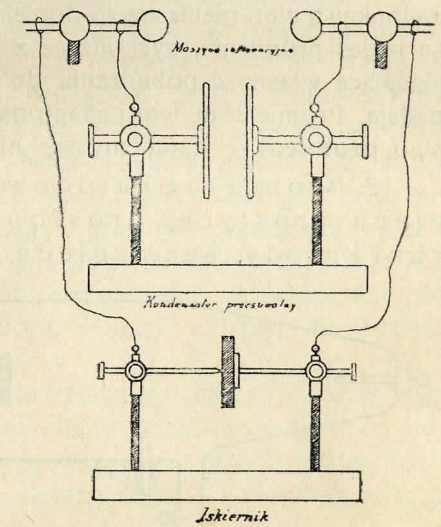
Gdy promień każdej płyty n. p. $r = 6\ cm$, oddalenie ich $d = 1\ cm$, to pojemność kondensatora, który one tworzą, jest $C = \frac{\pi r^2}{4\pi d} = \frac{r^2}{4d} = 9\ cm.$

Obliczmy naboje na okładkach tego kondensatora:

$$Q = CV = \left(9\ \tfrac{350}{3} =\right)\ 1050\ e.\ s.\ naboju.$$

*2. Zbadaj **wytrzymałość dielektryka na przebicie.**

Łączy się z biegunami maszyny influencyjnej równolegle (ryc. 146) kondensator przesuwalny i iskiernik, w którym zamiast kulek, jest płytka i ostrze. Pomiędzy płytkę i ostrze wstawia się badany dielektryk (płytka szklana, tektura gruba i t. p.). Zrazu płyty kondensatora prawie się stykają, iskry więc przychodzą przez kondensator Powiększając jednak oddalenie płyt, dochodzimy do takich napięć, iż iskra raczej przebija dielektryk, niż warstwę powietrza w kondensatorze. Z odległości tej obliczymy wytrzymałość dielektryka w Voltach.



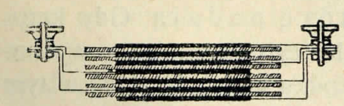
Ryc. 146.

Zadania.

1. Pojemność kondensatora płaskiego można napisać w postaci $C = B\ \frac{S}{d}$ Jaką wartość ma stała B dla powietrza, gdy chcemy C otrzymać w μF?

2. Oblicz w μF pojemność **kondensatora arkuszowego,** składającego się z 501 arkuszy stanjolu 25 $cm \times 25\ cm$, oddzielonych od siebie arkuszami papieru parafinowanego o grubości 0,05 *cm* (ryc. 147).

3. Kondensator jest utworzony z dwóch płyt formatu $2\ m \times 2\ m$, oddalonych od siebie na 1 *cm*. Jaka jest jego pojemność?



Ryc 147.

4. Jaka jest pojemność tego kondensatora w nafcie, której stała dielektryczna $\epsilon = 2,04$?

5. Okładki tego kondensatora połączone są ze źródłem elektryczności o napięciu 110 *V* (n. p. prądu stałego miejskiego) Znaleźć naboje na okładkach energję elektryczną kondensatora.

$$\left(Q = C.V \quad W = \frac{Q^2}{2C}\right)$$

6. Jedną okładkę tego kondensatora, odizolowaną od źródła prądu, odsunąć na 2 *cm* od drugiej, połączonej z ziemią. Jak zmieni się różnica potencjałów, jak energja kondensatora?

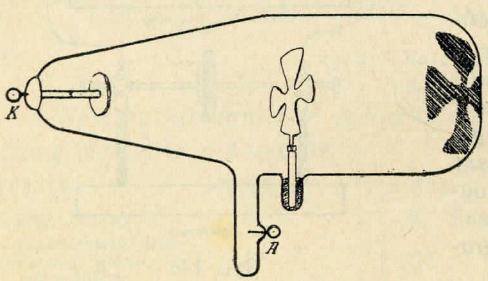
7. Energja zwiększyła się o wartość pracy wykonanej na drodze 1 *cm*. Jakiej siły trzeba było użyć do rozsunięcia okładek kondensatora? (Pole między okładkami kondensatora płaskiego, o wielkiej powierzchni w stosunku do oddalenia okładek, jest jednorodne, t. zn. siła jest niezależna od oddalenia okładek).

8. Nabój 15 *C* rozbraja się w ciągu 0,03 *sek*. Jaka jest przeciętna wartość natężenia prądu?

§ 50. Promienie katodowe.

1 Zanim światło katodowe, wskutek zmniejszenia się zawartości gazu w rurce, zupełnie zaniknie, występuje nowe zjawisko ściany rurki szklanej w pobliżu katody i naprzeciwko niej zaczynają świecić żywą barwą, zależnie od gatunku szkła, zielonkawą albo niebieskawo-popielatą. Przyczyną tego świecenia są jakieś promienie, wychodzące z katody, niewidzialne, ale posiadające własność pobudzania do fluorescencji ciał, na które padają. Promieniom tym nadano nazwę **promieni katodowych** albo **promieni** β. Zajmiemy się niektóremi ich własnościami

2. Promienie katodowe rozchodzą się w liniach prostych, prostopadłych do powierzchni katody, bez względu na położenie anody Okazać można tę ich własność **w rurze z krzyżem glinowym.** Krzyż ten ustawiony w drodze promieni katodowych, rzuca na przeciwległą ściankę rurki cień (ryc. 148).



Ryc. 148.

Promienie katodowe podnoszą temperaturę ciał, na które padają. Gdy katodzie nadamy kształt zwierciadła wklęsłego, promienie wychodzące z niego zbierają się w jego środku kulistości. Gdy w tym punkcie umieścimy blaszkę platynową, ta rozgrzewa się do białego żaru.

Promienie katodowe tak w polu magnetycznem, jak i elektrycznem, ulegają odchy-

leniu Widocznem jest to już przy użyciu rurki z krzyżem. Zbliżenie magnesu do rurki wywołuje przesunięcie się cienia. W polu magnetycznem lub elektrycznem promienie katodowe zachowują się tak, jak struga cząstek elektryczności odjemnej.

Jeżeli w doświadczeniach Rowlanda (II § 48, 3) poruszające się naboje odchylają igiełkę magnetyczną, to nawzajem magnes musi odchylać ruchomą strugę naboi elektrycznych (II § 48 Pyt. 4). Z kierunku odchylenia promienia katodowego, wywołanego zbliżeniem bieguna magnesu, wynika, że promień katodowy polega na ruchu naboi odjemnych. Do tego samego wyniku dochodzimy, gdy promień katodowy odchyla się w polu elektrycznem kondensatora: dodatnia okładka przyciąga go, odjemna odpycha.

3. Wielkość odchylenia się promienia katodowego w polu magnetycznem zależy od natężenia pola i od napięcia biegunów maszyny influencyjnej. Im większe jest to napięcie, tem większa jest prędkość pędzących cząstek elektryczności odjemnej, tem bardziej płaska ich droga. Im większe natężenie pola magnetycznego, tem bardziej zakrzywiona jest droga cząstek elektryczności. Ruch ich zupełnie jest podobny do rzutu poziomego ciała w polu przyciągania grawitacyjnego ziemi (I § 25).

Zupełnie to samo można powiedzieć o odchylaniu się promienia katodowego w polu elektrycznem wytworzonem zapomocą okładek kondensatora, między któremi ma przejść promień katodowy

Jak z kształtu drogi ciała rzuconego można obliczyć jego prędkość, a z siły przyciągania ziemi jego masę, tak i z odchylenia promienia katodowego w znanych polach można obliczyć prędkość ruchu cząstek elektrycznych v i stosunek naboju elektrycznego cząstki do jej masy $\frac{e}{m}$

Gdy bowiem praca przy przeniesieniu naboju e od katody do pewnego punktu drogi promienia katodowego, na której spad potencjału jest V, równa się (na podstawie II § 45, 3) Ve, to masa tej cząstki elektrycznej m osiągnie w tym punkcie prędkość taką, że (podług I § 32, 1)

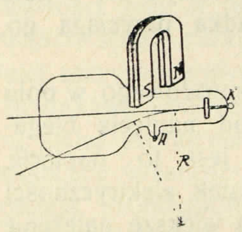
$$Ve = \frac{mv^2}{2} \quad . \quad . \qquad \text{I.}$$

Promień katodowy w polu magnetycznem odchyla się. Gdy natężenie pola jest H, a nabój e, pędzący z prędkością v, równoważny jest biegunowi magnesu μ, to siła magnetyczna, działająca na ten nabój, równa się (według II § 39 Zad. 2) $H\mu$ i równa się (według II § 48, 3) Hev. Ta siła odchyla promień katodowy tak, że nabój porusza się po łuku koła o promieniu R (ryc. 149), zatem siła ta równa się (według I § 27, 3) $\frac{mv^2}{R}$ Stąd otrzymujemy drugie równanie:

$$Hev = \frac{mv^2}{R} \quad \text{albo} \quad RHe = mv \quad . \qquad \text{II.}$$

Z obu równań I i II wynika

$$v = \frac{2V}{RH} \quad \text{i} \quad \frac{e}{m} = \frac{2V}{R^2H^2} \quad . \qquad \text{III.}$$



Ryc. 149.

Ponieważ wielkości V, R i H mogą być zmierzone, przeto równania III pozwalają nam obliczyć v $\frac{e}{m}$

Z wielkiej liczby pomiarów można wyprowadzić następujące wnioski.

Prędkość cząstek elektrycznych w promieniu katodowym waha się w granicach od 60000 do 100000 *km/sek*, bo zależna jest od napięcia elektryczności, dostarczanej przez maszynę infuencyjną i od rozrzedzenia gazu, natomiast prędkość ta nie zależy od rodzaju gazu, którego resztki znajdują się w rurce, ani od materjału elektrod.

Stosunek $\frac{e}{m}$ ma wartość 5,3 10^{17} *e. s. naboju/gr* Wartość ta nie zależy ani od rodzaju gazu rozrzedzonego, znajdującego się w rurce, ani od materjału elektrod, ani (w promieniach katodowych) od prędkości cząstek; jest to **stała powszechna**. Ta jednak stałość musi nas zadziwiać wobec tego, że atomy różnych pierwiastków (m) mają różne masy (ciężary atomowe), podczas gdy nabój cząstki elektrycznej (e), złączonej z atomem pierwiastka, musimy uważać za stały, od jego ciężaru atomowego niezależny Stąd nasuwa się przypuszczenie, że m nie jest wcale masą atomu, że c z ą s t k i e l e k t r y c z n o ś c i o d j e m n e j, s t a n o w i ą c e p r o m i e ń k a t o d o w y, n i e s ą m a t e r j a l n e, l e c z s ą a t o m a m i e l e k t r y c z n o ś c i, o d e r w a n e m i o d m a t e r j a l n e g o a t o m u. Te elementarne ilości elektryczności nazywamy **elektronami**.

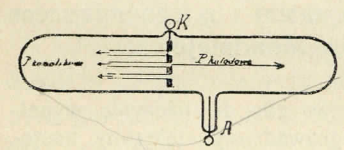
4. Możnaby się dalej zapytać, co się dzieje z atomami, gdy od nich zostaną oderwane elektrony Odpowiedź na to daje

doświadczenie Goldsteina z promieniami kanalikowemi albo **promieniami** α, które powstają w katodzie, ale skierowane są w przeciwnym kierunku do promieni katodowych. Katoda jest w tym celu dziurkowana, a promienie dobywają się z otworków, jakby z kanalików (ryc. 150).

Promienie kanalikowe świecą słabem światłem, pobudzają szkło do fluorescencji i ulegają odchyleniu w polu elektrycznem, ale kierunek odchylenia jest przeciwny do tego, jakie okazują promienie katodowe. Stąd wnosić należy, że są to p r o m i e n i e n a b o i e l e k t r y c z n y c h d o d a t n i c h. Różnią się jednak od katodowych tem, że z d o l n o ś ć p r z e n i k a n i a i n n y c h c i a ł p o s i a d a j ą w s t o p n i u o w i e l e m n i e j s z y m i tem, że w s p e k t r o s k o p i e o k a z u j ą w i d m a g a z o w, z których powstały Jest to wskazówką, że c z ą s t k i, t w o r z ą c e p r o m i e n e k a n a l i k o w e, s ą t o a t o m y p i e r w i a s t k ó w g a z o w y c h, o p a t r z o n e n a b o j a m i e l e k t r y c z n o ś c i d o d a t n i e j.

Naboju dodatniego dotychczas nie odosobniono, prawdopodobnie n a b o j e d o d a t n i e n i e i s t n i e j ą, a występują tylko jako reszta neutralnego atomu, z którego oderwano pewną liczbę elektronów.

Atom pierwiastka, opatrzony nabojem elektrycznym, nazywamy **jonem**, jony odjemne nazywamy **anjonami**, dodatnie **katjonami**. W otworkach katody (ryc. 150) następuje rozdział atomu według równania



Ryc. 150.

atom = katjon + elektron,

który to proces nazywamy **jonizacją**.

Promienie kanalikowe poddawano także pomiarom, lecz znaleziono dla nich wartości całkiem różne od znalezionych dla promieni katodowych, mianowicie znaleziono dla **wodoru**

v około 100 razy mniejsze, $\frac{e}{m}$ mniejsze 1847 razy

Ponieważ nabój katjonu ma taką wielkość, jak nabój elektronu, bo zawsze tyle powstaje elektryczności dodatniej, co odjemnej, przeto musi się przypuścić, ż e m a s a e l e k t r o n u j e s t 1847 r a z y m n i e j s z a o d m a s y a t o m u w o d o r u.

5. Przypuszczamy według teorji **Rutherforda** (czytaj Raderförd) i **Bohra**, że a t o m y p i e r w i a s t k ó w s k ł a d a j ą s i ę z j ą d r a m a t e r j a l n e g o i p e w n e j d l a k a ż d e g o

pierwiastka ściśle określonej liczby elektronów, które krążą dokoła jądra według praw zbliżonych do praw, według których odbywa się ruch ciał niebieskich. Jądro atomu wodorowego nazywają **protonem**. Atomy wszystkich innych pierwiastków zbudowane są z protonów i elektronów Elektrony najbliższe protonów tworzą z niemi rdzeń **atomu**. Żadne czynniki zewnętrzne składu rdzenia atomu zmienić nie mogą. Tylko **w ciałach promieniotwórczych (radjoaktywnych)** zmiany takie w rdzeniu atomu odbywają się nieustannie, ale żadnemi sposobami ani przyśpieszyć, ani opóźnić ich nie umiemy

Elektrony, najbliższe jądra, krążące dokoła niego, mogą pod wpływem promieni katodowych lub innych silnych czynników być od niego odsunięte, a nawet oderwane, co zawsze połączone jest z świeceniem gazu. Świecenie to objawia się w spektroskopie w postaci widma linjowego, charakterystycznego dla danego pierwiastka (II § 33).

Są jeszcze elektrony dalsze, krążące na obwodzie atomu Od nich przedewszystkiem zależą własności chemiczne i optyczne pierwiastka, a więc te, które podlegają takim wpływom zewnętrznym, jak ciśnienie lub temperatura.

Powyższa **budowa atomu** pozostaje w ścisłym związku z ciężarem atomowym pierwiastka, a zatem i z jego miejscem w systemie perjodycznym pierwiastków **Mendelejewa.**

Zadania.

1. Przekonamy się w I! § 51 Ćw 9, że gdy do naczynia, wypełnionego parą wodną bliską skroplenia, wprowadzimy elektrony, następuje skraplanie się pary Każdy elektron przyłącza się do jednego pęcherzyka wody; znając więc liczbę pęcherzyków wody, a tę liczbę obliczyć możemy z szybkości opadania mgły w atmosferze gazu, znamy liczbę elektronów, wydalonych z atmosfery. Tą drogą znaleziono, że najmniejsza ilość elektryczności, z jaką się spotykamy, atom elektryczności czyli elektron równy jest nabojowi $e = 4{,}77 \ 10^{-10}$ *e. s. naboju.* Znając tę liczbę, obliczyć **masę elektronu.** ($\frac{e}{m} = 5{,}3 \ 10^{17}$ *e. s. nab/gr*, $e = 0{,}9 \ 10^{-27}$ *gr.*)

2. Jaka jest **masa atomu wodoru?** (Według ust. 4 jest 1847 razy większa od elektronu, 1,66 10^{-24} *gr*).

3. Ile jest atomów w **atomie gramowym** wodoru? (Atom gramowy stanowi tyle *gr* pierwiastka, ile wynosi jego ciężar atomowy. Ponieważ $H = 1{,}008$, przeto wypadnie 1,008 *gr* : 1,66 10^{-24} *gr* = 6,06 10^{23}. Jest to **liczba Avogadry**).

4. Jaka jest **objętość atomowa** wodoru? (Objętością atomową nazywamy objętość, jaką zajmuje atom gramowy pierwiastka w warun-

kach normalnych, 760 *mm* rtęci, 0°. Oblicza się ją, dzieląc atom gramowy pierwiastka przez jego gęstość. Dla wodoru: 1,008 *gr* : 0,00009 gr/cm^3 = 11200 cm^3 = 11,2 dm^3. Ponieważ H_2 zawiera dwa atomy wodoru, przeto **cząsteczka gramowa** wodoru ma 2,016 *gr* w objętości 22,4 dm^3).

5. Ile cząsteczek zawiera 1 cm^3 gazu lub pary w warunkach normalnych? (Obliczyć dla wodoru, bo według **prawa Avogadry** różne gazy lub pary w tych samych warunkach objętości, prężności i temperatury zawierają tę samą liczbę cząsteczek. Wiemy ile jest atomów w atomie gramowym wodoru i wiemy, jaką zajmuje objętość. Stąd obliczymy, ile atomów wypada na 1 cm^3 objętości, cząsteczek zaś jest dwa razy mniej. Wynik 2,7 $10^{19} cm^3$. Jest to **liczba Loschmidta).**

6. Ile elektronów odpowiada nabojowi odjemnemu 1 *C*? (6,3 10^{18}. Taka liczba elektronów, przepływająca przez przewodnik wciągu 1 *sek*, stanowi prąd o natężeniu 1 *A*).

§ 51. Jonizacja gazów Promienie Röntgena.

1. Gdy młot uderzy o kowadło, energja kinetyczna młota znika, a pojawia się w zmienionej formie, jako ciepło i głos, które znów nie są niczem innem, jak energją kinetyczną cząstek materjalnych. W ostateczności jednak w obu przypadkach powstaje promieniowanie podczerwone, bo i głos na ciepło się zmienia. Opisane zjawisko można i w ten sposób rozumieć, że jeden rodzaj energji (mechanicznej młota) został przez materję pochłonięty, a wskutek tego rozpoczęła się emisja energji innego rodzaju.

Przykładu podobnego dostarczają także promienie katodowe w całem swem zachowaniu się, tak w rurce z rozrzedzonym gazem, jak i w powietrzu. Elektron porusza się w rurce pod wpływem napięcia na elektrodach ruchem przyśpieszonym (ryc. 142). Jak długo prędkość jego jest niewielka, ruch jego w rozrzedzonym gazie odbywa się bez przeszkód, elektron przebija atomy z wszelką łatwością. Tym stanom ruchu odpowiadają w rurce ciemne przestrzenie (*C*, *F*). Gdy jednak prędkości elektronów przekroczą pewną granicę, zależną od prędkości gazu w rurce, wpływ ich ruchu na atomy gazu staje się widoczny elektrony mogą z atomów oderwać ich własne elektrony czyli wywołać **jonizację gazu,** skutkiem czego gaz świeci — tym stanom odpowiadają świecące części rurki katodowej (*S* i *Z*) — ale przytem elektrony jonizujące same tracą część swej energji kinetycznej — dlatego części świecące w rurce katodowej są pooddzielane ciemnemi smugami, są uwarstwowione (*Z*).

2. Gdy promienie katodowe wyprowadzimy z rurki przez malutkie okienko, zamknięte cienką blaszką glinu, w powietrze

o zwyczajnej gęstości, promienie te mogą przebyć tylko krótką drogę, bo wskutek niezliczonej liczby spotkań z atomami, zostają już na krótkiej drodze pochłonięte. Zato powietrze jest w tej przestrzeni w wysokim stopniu zjonizowane, co poznajemy po tem, iż konduktor (elektroskop) naelektryzowany, znajdujący się w pobliżu, natychmiast się rozbraja.

Gazy są wogóle złemi przewodnikami elektryczności, są dobremi izolatorami Przewodzenie w gazach jest możliwe tylko wskutek unoszenia nabojów przez atomy naelektryzowane (wiatr elektryczny), albo przez atomy zjonizowane i elektrony.

Czynnikiem jonizującym gazy mogą być prócz promieni katodowych: wyładowania elektryczne, naświetlenie promieniami nadfiołkowemi, ciała rozżarzone (płomienie) i ciała promieniotwórcze.

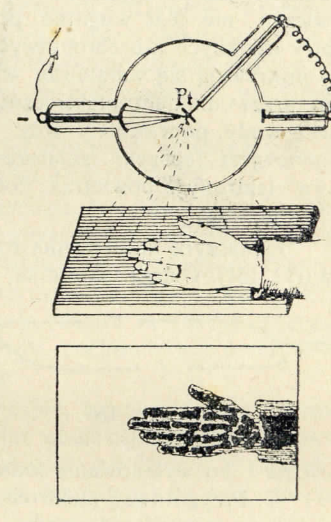
W ciałach stałych atomy materjalne nie mają swobodnego ruchu, natomiast wybitne różnice mogą zachodzić w zachowaniu się ich elektronów. W dielektrykach (izolatorach) elektrony związane są z atomami, mogą się co najwyżej nieco **przesunąć** w pewnym kierunku (polaryzacja dielektryczna), w metalach zaś musi istnieć pewna liczba elektronów wolnych, które w zwykłym stanie metalu poruszają się wewnątrz jego masy swobodnie w rozmaitych kierunkach, pod wpływem zaś różnicy potencjałów, istniejącej w dwóch punktach przewodnika, przenoszą się tak długo z jednego punktu na drugi, aż potencjały się wyrównają. Powstaje więc **prąd elektronów** czyli prąd elektryczności odjemnej. Przeciwny jemu **prąd elektryczny** nazywamy dodatnim, chociaż wiemy, że jony materjalne w metalach zmieniać miejsca swego nie mogą i prądu elektrycznego nie tworzą.

Z przewodników elektrony na zewnątrz wydobyć się nie mogą, ponieważ prędkość ich jest zbyt mała. W podwyższonej jednak temperaturze prędkości elektronów mogą osiągnąć takie wartości, że uchodzą w powietrze, jonizując je, podczas gdy przewodnik sam elektryzuje się dodatnio. Stąd pochodzi **działanie jonizujące metali rozżarzonych i płomieni.**

3. Gdy w rurce katodowej promienie katodowe uderzają w jakieś ciało stałe, muszą wywołać w jego atomach wielkie zmiany Same tracąc swoją energję ruchu, oddają ją atomom ciała stałego, gdzie wskutek tego występuje podwyższenie temperatury, a w niektórych ciałach także fluorescencja. Gdy katoda ma kształt zwierciadła wklęsłego, blaszka platynowa, umieszczona w jego środku kulistości ogrzewa się do białego żaru

i topi się przy dłuższem ogrzewaniu Prócz tego każde ciało stałe, na które padają promienie katodowe, gdzie elektrony ulegają nagłej zmianie prędkości ruchu, wysyła ze swej powierzchni innego rodzaju promienie, zwane **promieniami Röntgena (promienie X** albo **promienie** γ.)

Promienie te przenoszą się, jak światło, w linjach prostych. Mają wielką zdolność przenikania niektórych ciał, nieprzezroczystych dla promieni świetlnych n. p. drzewa, papieru, mięśni, cienkich warstw metalu, rozbrajają naelektryzowane ciała wskutek jonizacji powietrza, nie odchylają się pod wpływem magnesu. nie są więc prądem elektronów Ponieważ działają na płytę fotograficzną, można otrzymać z przedmiotów, dla promieni Röntgena mało przenikliwych, otoczonych przenikliwą osłoną (n. p. metali w skrzynce drewnianej), sylwetki cieniowe (fotografie Röntgena ryc. 151).



Ryc. 151.

Promienie Röntgena przenikają daleko lepiej skórę i mięśnie, niż kości i krew. Jeżeli więc ciało ludzkie prześwietli się temi promieniami, można na ekranie fluoryzującym lub na płycie fotograficznej widzieć kości i naczynia w ich budowie, złamania kości lub zwichnięcia, ciała obce, znajdujące się w ciele ludzkiem, a nawet oznaki stanu chorobliwego w płucach, wątrobie i t. d. W ten sposób oddają promienie Röntgena sztuce lekarskiej znakomite usługi.

4. Istota promieni Röntgena długi czas była niewyjaśniona. Nie są prądem elektryczności ani dodatniej, ani odjemnej, nie odbijają się, jak promienie światła, ani nie załamują, ani nie okazują zjawisk polaryzacji. Dziś wiemy, że promienie Röntgena są promieniam światła o bardzo krótkich falach, tak krótkich, że struktura materji jest zbyt grubą, aby zjawiska odbicia się i załamania tych promieni mogły być w niej zauważone.

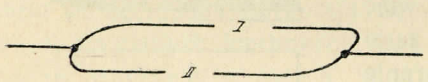
Udowodnił to fizyk Laue, używając zamiast szczelin siatki dyfrakcyjnej do wywołania zjawisk interferencji (II § 18, 3) w promieniach Röntgena, o wiele delikatniejszej siatki, jaką daje nam przyroda gotową w kryształach. Dawno już bowiem przypuszczano, że kryształy składają się z cząsteczek prawidłowo względem siebie rozmieszczonych. Doświadczenia te nie tylko dozwoliły na stwierdzenie natury promieni Röntgena i zmierzenie długości ich fal od 2 10^{-7} do 1 10^{-7} *cm*), ale umożliwiły także dokładniejsze poznanie budowy kryształów, jakoteż budowy atomów

Pytanie.

Doświadczenia z elektrycznością statyczną lepiej się udają w suchem powietrzu, niż w wilgotnem, lepiej z przyrządami ogrzanemi, niż z zimnemi. Jak to wyjaśnić? (W istocie przyczyną nieudawania się doświadczeń nie jest wilgotne powietrze, lecz zła izolacja prętów lub słupów szklanych lub ebonitowych, które w powietrzu zimnem i wilgotnem pokrywają się warstewką wody, a woda zanieczyszczona jest dobrym przewodnikiem elektryczności. Przez ogrzanie usuwamy tę warstewkę wody, poprawiamy więc izolację. Natomiast powietrze wilgotne i zimne jest lepszym izolatorem od suchego i ciepłego, bo wilgoć usuwa elektrony z powietrza. Porównaj II § 50 Żad. 1).

Ćwiczenia.

*1 Maszynę influencyjną rozbrajamy zapomocą podwójnego iskiernika (ryc. 151). Ostrza iskiernika, przesuwalne, ustawia się w jednakowych oddaleniach od siebie tak, aby iskry równie dobrze przebijały przestrzeń I, jak II.



Ryc. 151.

Gdy wyładowania przechodzą przez I, mogę je zdmuchnąć i przenieść na II, a z II na I, bo wyładowania jonizują powietrze.

* 2. Przygotować elektroskop i zmierzyć czas, potrzebny, aby listki z pewnego rozchylenia opadły n. p. do połowy. Będzie to **normalny czas rozbrojenia**. Przekonać się, czy dla obu elektryczności czas ten jest jednakowy

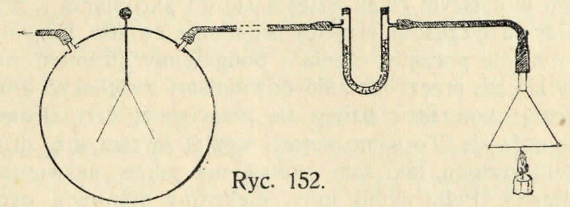
Do kulki elektroskopu zbliżyć płomień świecy, zapałki, węgiel żarzący i mierzyć czas rozbrojenia obu elektryczności. (Czas rozbrojenia jest krótszy od normalnego, ktoś mógłby przypuszczać, że wysoka temperatura albo wilgoć są potrzebne, aby gaz uczynić przewodnikiem).

*3. W osłonę metalową elektroskopu wprawiam dwie rurki, na które nakładam rurki gumowe; jedna z nich prowadzi do pompki wodnej, rozrzedzającej (do aspiratora), druga długości przeszło 1 *m* zakończona jest odwróconym lejkiem (ryc. 152).

a) Przekonywam się, że prąd powietrza nlema wpływu na czas rozbrojenia. Elektroskop jednak rozbraja się natychmiast, gdy pod lejkiem zapali się świecę.

b) Wstawiam rurkę **U**, napełnioną wapnem palonem, które pochłania parę wodną. (Przekonywam się, że wilgoć nie jest czynnikiem rozbrajającym).

c) Wstawiam rurkę **U** w mieszaninę oziębiającą. (Przekonywam się, że wysoka temperatura nie jest czynnikiem rozbrajającym).



Ryc. 152.

d) Przeprowadzam gazy płonącej świecy α) przez płóczkę z rozcieńczonym kwasem siarkowym, β przez cienką rurkę metalową, która jest połączona z ziemią. Czas rozbrojenia normalny. (Czynnik rozbrajający *a*) może być pochłonięty przez ciecz, *b*) jest natury elektrycznej).

e) Pod lejkiem ustawiam rurę z promieniami Röntgena. Rurę osłaniam blachą ołowianą, aby bezpośrednio nie oddziaływała na elektroskop. Powtarzam z nią doświadczenie d)

We wszystkich przypadkach powyżej opisanych doświadczeń, elektroskop rozbraja się niezależnie od znaku elektryczności.

*4. Kulę żelazną, ogrzaną do czerwoności, zawieszam na pręcie izolującym, łączę z elektroskopem, wprowadzam nabój dodatni, potem odjemny, i mierzę czas rozbrojenia. W pierwszym przypadku czas rozbrojenia krótszy, w drugim dłuższy od normalnego. (Widocznie kula taka wysyła jony dodatnie. Po długiem żarzeniu różnica ta zanika; przypuszczają, że jony dodatnie pochodzą od gazów, pochłoniętych przez żelazo, które podczas ogrzewania uwalniają się).

*5. Z biegunami maszyny influencyjnej łączę **iskiernik płytowy,** i równolegle niezbyt czuły elektrometr lub elektroskop. Płytki iskiernika rozsuwam na odległość 1 *cm*. Przy napięciu trzydziestu kilku tysięcy *V* następuje rozbrojenie. Płytki ogrzewam palnikami gazowemi do coraz wyższej temperatury. Usuwam płomień i oceniam napięcie rozbrojenia, które coraz bardziej się obniża. (Jonizacja powietrza skutkiem ogrzania. W temperaturze czerwonego żaru napięcie rozbrojenia wynosi kilka *V*.)

*6. Owinąć lampkę żarową paskiem stanjolu, szerokości 1 *cm*, obwiązać ten pasek cienkim drucikiem i połączyć z elektroskopem. Naelektryzować elektroskop dodatnio i zaświecić lampkę. Listki elektroskopu rychło opadną. Odjemnie naelektryzowany elektroskop zatrzymuje rozchylenie listków. Objaśnić! (Z rozżarzonego drucika dobywają się elektrony, które przechodzą przez szkło i rozbrajają nabój dodatni (elektroskopu)

*7 Płytkę cynkową, starannie wypolerowaną i amalganowaną, zawieszam w położeniu pionowem na pręcie izolującym i łączę z czułym elektroskopem. Oznaczam czas normalnego rozbrojenia. W odległości 1 *m* od płytki oświecam ją promieniami płonącej wstążki magnezowej. Elektroskop naelektryzowany odjemnie rozbraja się w czasie krótszym, naelektryzowany dodatnio w czasie dłuższym od normalnego. Płytka mosiężna, użyta zamiast cynkowej, tych różnic nie wykazuje Objaśnić! (Z płytki cynkowej, naświetlonej promieniami nadfiołkowemi, dobywają się elektrony).

*8. W czystem naczyniu zamkniętem ogrzewaj wodę dystylowaną do wrzenia i wypuszczaj parę przez rurkę cienkim strumieniem w powietrze. Strumień pary jest na kilka *cm* od otworu zupełnie przezroczysty, dopiero w dalszym ciągu oziębia się do skroplenia i przybiera barwę białą. Gdy na tę część skierujemy promienie światła, ujrzymy na tle cień Zaznaczmy na tle początek cienia i podgrzejmy strumień pary zapałką. Zdawałoby się, że przez ogrzanie powinniśmy zwiększyć długość części przezroczystej; tymczasem dzieje się przeciwnie, cały strumień bieleje, cień na tle cofa się. To samo sprawi węgiel żarzący się, drucik ogrzany prądem elektrycznym, taki sam skutek ma także naświetlenie promieniami Röntgena. (Pyłki dymu, jony, elektrony stanowią ośrodki, około których para ulega skropleniu.)

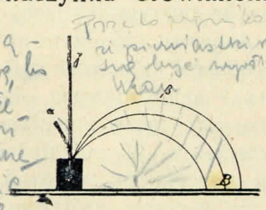
*9. Postarajmy się o klosz szklany do pompy rozrzedzającej, który posiada u góry rurkę, zamykaną kurkiem. Na rurkę szklaną nakłada się rurkę gumową, której drugi koniec zakończony jest lejkiem szklanym (jak na ryc. 152). Na talerz pompy stawia się szkło zegarkowe z wodą. Podczas pompowania powietrze, nasycone parą wodną, oziębia się, lecz nie widać skraplania się pary wodnej. Gdy jednak wprowadzimy, otwierając kurek, do wnętrza klosza pyłki dymu, jony lub elektrony, za każdym ruchem tłoka pompy rozrzedzającej powstaje mgła, zalegająca wnętrze klosza i powoli opadająca na dno. Lejek służy do tego, aby zbierać powietrze zjonizowane i doprowadzić je pod klosz.

§ 52. Ciała promieniotwórcze.

1 Niektóre ciała mają własność wysyłania pewnych promieni, które sprawiają skutki podobne do promieni katodowych, kanalikowych i promieni Röntgena. Ciała takie nazywamy **promieniotwórczemi** albo **radjoaktywnemi.** Odkrycie ich zawdzięczamy **Becquerelowi,** który zauważył, że **uran** i jego związki wysyłają z siebie bezustannie promienie niewidzialne, działające na płytkę fotograficzną nawet przez czarny papier i drzewo, jakoteż **Skłodowskiej-Curie,** która wyodrębniła pierwiastek **rad,** odznaczający się szczególną promieniotwórczością zbadała, na czem jego promieniowanie polega.

polon

2. Gdybyśmy ciało promieniotwórcze umieścili w małem naczyńku ołowianem o bardzo grubych ścianach i pozostawili tylko wąski otwór, którym mogą się promienie na zewnątrz dobywać (ryc. 153), to ustawiwszy naczyńko w silnem polu magnetycznem, (biegun północny przed płaszczyzną rysunku, południowy poza nią), na płycie powleczonej jakiemś ciałem fluoryzującem, moglibyśmy zauważyć w pewnem miejscu na płycie jasną plamę *B*, której położenie zmienia się ze zmianą położenia bie-



Ryc. 153.

gunów Zapomocą ekraniku próbnego można się przekonać, że plamę tą wywołują promienie β, które wychodzą z naczyńka i łukiem, rozszerzając się, padają na *B*.

Z kierunku odchylenia tych promieni w polu magnetycznem przekonać się można, że promienie β są promieniami odjemnemi, podobnemi do promieni katodowych. Różnią się one jednak od promieni katodowych, wytworzonych w rurce, tem, że mają w powietrzu zasiąg o wiele większy, skąd wniosek, że także prędkość elektronów musi w nich być większa. Rzeczywiście, pomiary wykazują, że w promieniach β elektrony poruszają się z prędkością, zbliżoną do prędkości światła.

3. Promienie α, które także wykryć można ekranikiem fluoryzującym, odchylają się w stronę przeciwną do promieni β, jonizują bardzo silnie powietrze, lecz zasiąg ich w powietrzu jest bardzo krótki. Wszystko to wskazuje, że promienie α są promieniami dodatniemi, podobnemi do promieni kanalikowych. Dokładniejsze badania wykazały, że cząstka α jest atomem helu, pozbawionym dwóch elektronów (jest jądrem atomu helu), który więc ma na sobie podwójny nabój elementarny dodatni

Promienie γ, wykazujące także fluorescencję, odznaczają się ogromną przenikliwością i nie dają się odchylić od drogi prostolinijnej żadnem, najsilniejszem nawet polem, ani magnetycznem, ani elektrycznem. Promienie γ powstają zawsze w towarzystwie promieni β, są więc promieniami Röntgena. Ten ich charakter stwierdzono za pomocą ugięcia w siatkach krystalicznych, lecz długość ich jest jeszcze mniejsza od najkrótszych fal Röntgena t. j. mniejsza od 10^{-9} *cm*.

4. Promieniowanie ciał promieniotwórczych jest zjawiskiem, towarzyszącem przeobrażeniom, jakim ciała te bezustanku ulegają. I tak każdy atom radu wysyła cząsteczkę α w chwili, gdy się zmienia w atom **emanacji.** Przytem dodatnia elektryczność jądra zmniejsza się o dwa naboje elementarne. Oderwanie się cząstki β powiększa elektryczność jądra o jeden nabój elementarny. W obu przypadkach powstaje atom nowego pierwiastka, który także w szeregu perjodycznym Mendelejewa przesuwa się wprzód lub wstecz i zajmuje inne miejsce i posiada inną wartościowość, niż pierwiastek pierwotny, który uległ rozpadowi.

chlor 35,36
35,46 w przyrodzie

Liczba ciał promieniotwórczych, poznanych dotychczas, wynosi 40. Tworzą one dwa szeregi, na których czele znajduje się **uran** i **tor. Rad** jest produktem rozpadu uranu. Końcowemi członami tych szeregów są pierwiastki o ciężarze atomowym ołowiu, które już rozpadowi nie ulegają, albo ulegają rozpadowi tak powolnemu, że tego spostrzec nie możemy

5. Badaniem ciał promieniotwórczych wykryto pierwiastki, których miejsce pozornie w szeregu perjodycznym Mendelejewa jest już zajęte. Jednakowoż brak wszelkich różnic w zachowaniu się chemicznem tych pierwiastków zmusza nas do przypuszczenia, że t o s a m o m i e j s c e s z e r e g u p e r j o d y c z n e g o m o ż e z a j m o w a ć w i ę c e j c i a ł, k t ó r e c h e m i c z n i e i f i z y c z n i e s ą z u p e ł n i e j e d n a k o w e, a l e p o s i a d a j ą r ó ż n e c i ę ż a r y a t o m o w e. Pierwiastki te nazwano **izotopami,** a c i ę ż a r a t o m o w y p i e r w i a s t k a j e s t ś r e d n i ą w a r t o ś c i ą c i ę ż a r ó w a t o m o w y c h j e g o i z o t o p ó w Tak n. p. u chloru znaleziono dwa izotopy o ciężarach atomowych 35 i 37, stąd zwykły chlor, który jest mieszaniną tych izotopów o pewnym stałym stosunku, ma ciężar atomowy 35,46.

Uderzającem tu jest jeszcze to, że ciężary atomowe bardzo wielu pierwiastków wyrażają się liczbami całkowitemi, te zaś pierwiastki, których ciężar atomowy jest liczbą ułamkową, występują jako izotopy

Potwierdza się więc przypuszczenie, że a t o m y w s z y s t k i c h p i e r w i a s t k ó w z b u d o w a n e s ą z a t o m ó w w o d o r u, z p r o t o n ó w i e l e k t r o n ó w (II § 49, 5), a temsamem i hipoteza, wygłoszona przed stu laty przez $\boxed{\textbf{Prouta,}}$ że wszelka materja powstała z zagęszczenia materji wodorowej

Jężeli więc pierwiastki promieniotwórcze niczem się w szeregu perjodycznym nie odznaczają, tylko tem, że rozpad ich jest widoczny i czas ich życia da się zmierzyć, to powstaje pytanie, czy i reszta pierwiastków zwyczajnych nie jest tylko potomstwem jakichś pierwiastków promieniotwórczych, które może już nie istnieją i czy pierwiastki zwyczajne nie są promieniotwórczemi, tem tylko od tamtych się różniącemi, że tempo przemian, w jakich powstają i giną, jest zbyt powolne, byśmy je mogli dostrzec. Zjawisko izotopji przemawia bardzo za takiem właśnie pojmowaniem jedności materji, z której świat jest zbudowany

X

[illegible]

Zadania.

1. Sposobami, opisanemi w II § 50, 3, znaleziono wartość stosunku $e:m$ dla promieni α ciał promieniotwórczych, mianowicie

$$\frac{e}{m} = 1{,}446 \quad 10^{14} \; e.s.\,naboju/gr$$

Ponieważ cząstki α są atomami helu, $He = 4$, przeto masa atomu helu m ma się do masy atomu wodoru, obliczonej w II § 50 Zad 2, jak 4 : 1,008. Jak wielki nabój e znajduje się na cząstce α?

$$e = 1{,}446 \quad 10^{14} \quad 1{,}66 \,.\, 10^{-24} \quad 4 : 1{,}008 = 9{,}53 \quad 10^{-10} \; e.\ s.\ naboju.$$

Wypada liczba równa podwójnemu elektronowi, zgodnie z tem, co powiedziano w ust. 3.)

2. Według pomiarów **Rutherforda** i innych 1 gr radu wydziela w ciągu roku 40 mm^3 helu w warunkach normalnych ciśnienia i temperatury. Ile atomów helu wydziela z siebie 1 gr radu na sekundę, to zn. ile atomów z 1 gr radu ulega rozpadowi w ciągu 1 sek? (W 1 cm^3 gazu mieści się cząsteczek 2,7 10^{19} (według II § 50 Zad. 5), a ponieważ hel jest pierwiastkiem jednoatomowym, tyleż atomów helu, a w 40 $mm^3 = 0{,}04\ cm^3$ mieści się atomów helu 0,04 $2{,}7 \,.\, 10^{19} = 1{,}08 \; 10^{18}$. Tyle atomów radu z 1 gr substancji rozpada się w ciągu roku, zatem na sekundę

$$[0{,}04 \quad 2{,}7 \quad 10^{19} : 365{,}25 \quad 24 \quad 60 \quad 60 = 3{,}43 \quad 10^{10}).$$

3. Ile atomów zawiera 1 gr $Ra = 226$? (Ponieważ masa atomu wodoru wynosi 1,66 10^{-24} gr (II § 50 Zad. 2), zatem masa atomu radu $\frac{226 \quad 1{,}66 \quad 10^{-24}}{1{,}008}$ gr, przeto na 1 gr radu składa się atomów

$$\frac{1{,}008}{226 \quad 1{,}66 \quad 10^{-24}} = 2{,}69 \quad 10^{21}).$$

4. Jaka część pewnej ilości radu rozpada się w ciągu roku? (Na $2{,}69 \,.\, 10^{21}$ atomów, zawartych w 1 gr radu, ulega rozpadowi $1{,}08 \,.\, 10^{18}$ w ciągu roku. Jest to $\frac{1}{2490}$ część).

5. Po jakim czasie pewna ilość radu rozpadnie się do połowy, gdy w ciągu roku znika $\frac{1}{2490}$ część?

Z początkiem 1 roku jest ilość radu 1,

$$\text{z końcem } 1 \text{ „ „ „ „ } 1 - \frac{1}{q} = \frac{q-1}{q},$$

$$\text{„ „ } 2 \text{ „ „ „ „ } \left(\frac{q-1}{q}\right)^2,$$

$$\cdots\cdots\cdots$$

$$\text{„ „ } n \text{ „ „ „ „ } \left(\frac{q-1}{q}\right)^n = \frac{1}{2},$$

gdzie $q = 2490$. Wynik: $n = 1730$ lat. Czas ten nazywamy **okresem połowicznego zaniku** radu,

B. Prądy trwałe.

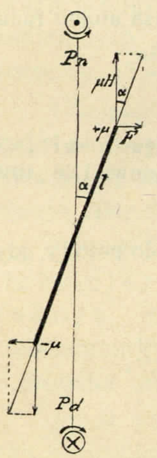
§ 53. Ogniwo galwaniczne jako źródło elektryczności.

*1 Dwa pręty metalowe, n. p. cynku i miedzi, wstawione w roztwór jakiegoś kwasu, n. p. siarkowego, stanowią źródło elektryczności, pod pewnym względem o wiele potężniejsze od największej maszyny influencyjnej albo baterji kondensatorów.

Gdy bowiem końce prętów metalowych, wystające z cieczy, połączymy drutem miedzianym, nad którym w części, mającej kierunek południka magnetycznego, ustawiona jest igiełka magnetyczna, zauważymy tak wielkie wychylenie igiełki, jakiego w doświadczeniu Rowlanda nigdy nie zdołalibyśmy otrzymać. Widocznie przez drut przepływają olbrzymie ilości elektryczności, a jej źródłem jest **ogniwo galwaniczne,** t. j. zestawienie dwóch różnych metali w cieczy, będącej dobrym przewodnikiem elektryczności.

Skąd się te naboje biorą, nad tem szczegółowo zastanawiać się będziemy w II § 59. Tu nas przedewszystkiem obchodzi a) ile elektryczności daje ogniwo w pewnym czasie i b) jakim zmianom ulega ogniwo po wydzieleniu się pewnej ilości elektryczności.

*2. Aby zmierzyć ilość elektryczności, wytwarzanej przez ogniwo, nadajmy drutowi przewodniemu kształt koła (jak w II § 49, 3) o promieniu r i badajmy (ryc. 154) odchylenie bardzo krótkiej igiełki, gdy przed połączeniem z końcówkami **(biegunami)** ogniwa i płaszczyzna koła i igiełka ustawione były w płaszczyźnie południka magnetycznego (*Pd–Pn*). Siła magnetyczna F prądu elektrycznego o natężeniu J (*e. m. natężenia),* działającego na biegun o ilości magnetyzmu μ w środku koła o promieniu r, wyraża się (według II § 49, 3)



Ryc. 154.

$$F = \frac{2\pi J \mu}{r} \quad . \quad . \quad . \qquad \mathrm{I}$$

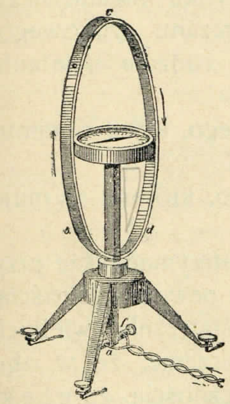
Igiełka wychyla się o kąt α od południka magnetycznego, ponieważ znajduje się pod działaniem dwóch par sił równoległych jednej pary, którą tworzą poziome składowe magnetyzmu ziemskiego μH *dyn* (II § 40 Ćw 5) i drugiej pary, którą stanowi siła magnetyczna prądu, F Siły te są w równowadze, gdy ich wypadkowa przechodzi przez środek obrotu igiełki (I § 39, 1), albo gdy kierunek igiełki zgodny jest z kierunkiem wypadkowej (II § 40, 1), a wtedy

$$F = \mu H \operatorname{tg} \alpha \quad . \quad . \quad . \quad . \qquad \mathrm{II}$$

Z równań I i II wynika

$$J = \frac{rH}{2\pi} \operatorname{tg} \alpha = B \operatorname{tg} \alpha \qquad \mathrm{III}$$

Natężenie prądu jest tu proporcjonalne do stycznej (tg) kąta odchylenia igiełki, stąd przyrząd, przedstawiony na ryc. 155, nazywamy **busolą stycznych.** Wartość stałej B, zależna od r i H, może być obliczona; może być też wyznaczona, gdy użyjemy takiego natężenia, aby $\alpha = 45^0$, wtedy bowiem $B = \frac{rH}{2\pi} = J$. Znając wartość stałej tego przyrządu, można nim wygodnie mierzyć prądy w *j. e. m. natężenia* lub też w *Amperach,* gdy wartość stałej pomnożymy przez 10 (II § 49, 5).



Ryc. 155.

*3. Przyczyną prądu w ogniwie muszą być działania chemiczne, jakie zachodzą między cieczą **(elektrolitem)** a metalami w nią wstawionemi **(elektrodami).** Aby mieć stosunki jak najprostsze, zastąpmy elektrodę miedzianą przewodnikiem, który nie ulega działaniu kwasu siarkowego, zamiast pręta miedzianego użyjmy **węgla retortowego,** takiego, jakiego używają do lamp łukowych. Badanie zmian chemicznych w ogniwie rozciągać się będzie na to, co się dzieje przy elektrodzie cynkowej i węglowej i co się dzieje w elektrolicie. Wynik jest następujący Gdy bieguny ogniwa połączone są drutem przewodnim,

a) na elektrodzie węglowej wydzielają się banieczki gazu, które zebrane okażą się czystym **wodorem,**

b) elektroda cynkowa, zważona przed doświadczeniem i po niem, okaże **stratę masy;**

c) elektrolit, badany termometrem, okaże **podwyższoną temperaturę,** areometrem **zmianę gęstości,** analiza chemiczna wykryje w nim pewną ilość **siarczanu cynkowego.**

Wszystkie te wielkości mogą być zmierzone i z pomiarów tych okaże się, *a)* że są proporcjonalne do czasu przepływania prądu i *β)* że są zależne od natężenia prądu, który umiemy już mierzyć zapomocą busoli stycznych

Wybierzmy pomiar najłatwiejszy do przeprowadzenia, a mianowicie stratę masy elektrody cynkowej. Z doświadczeń pomiarowych okazuje się, że ilość cynku, która przechodzi w roztwór, jest proporcjonalna do natężenia prądu, płynącego przez pewien czas, a mianowicie, aby ogniwo dawało prąd o natężeniu 1 A, czyli aby wytwarzało elektryczności 1 C/sek, musi z elektrody cynkowej ubywać co minuty po 20,32 *mgr* albo w 1 *sek* 0,0003386 *gr* cynku metalicznego i tyleż przechodzić w roztwór w postaci siarczanu cynkowego.

4. Poznaliśmy dotychczas dwojakiego rodzaju działania prądu, dostarczanego przez ogniwo. Są to

działania magnetyczne prądu elektrycznego, które obejmujemy nazwą **elektromagnetyzmu** (II § 54) i

działania chemiczne prądu elektrycznego, któremi zajmuje się **elektroliza** (II § 61).

Ponieważ te same skutki moglibyśmy otrzymać także przy pomocy nabojów elektrycznych, unoszonych z pewną prędkością, gdybyśmy tylko umieli wytwarzać je w dostatecznie wielkich ilościach, przeto uzasadnione jest przypuszczenie, że w obu razach mamy do czynienia z tą samą elektrycznością, że elektryczność statyczna, występująca w postaci naboju q, przebiegającego przewodnik o długości l w czasie t, t. zn. z prędkością $v = \frac{l}{t}$, równoważna jest pewnej ilości magnetyzmu $\mu = qv = q.\frac{l}{t} = \frac{q}{t}\; l = Jl$ (porównaj II § 49, 3) czyli że sprawia takie samo działanie elektromagnetyczne, jak prąd ogniwa galwanicznego o natężeniu $J = \frac{q}{t}$, płynący przez przewodnik o długości l.

Zatem pomiędzy elektrycznością statyczną a elektrycznością ogniwa zachodzą różnice tylko ilościowe, nie jakościowe.

Prąd, pochodzący z ogniwa, nazywamy **prądem trwałym** albo **stałym**, podczas gdy prądy elektryczności statycznej, objawiające się najczęściej jako rozbrojenia w postaci iskier, są prądami niezmiernie krótko trwającemi, **nietrwałemi**.

Ćwiczenia.

*1 Do probówki z rozcieńczonym kwasem siarkowym wsyp okruchy czystego cynku. Działanie chemiczne bardzo powolne, ($Zn + H_2SO_4 = ZnSO_4 + H_2$), a termometr wstawiony w ciecz wykazuje tylko nieznaczne podniesienie temperatury. Po wrzuceniu kilku skrawków miedzi wytwarzanie się wodoru i podniesienie temperatury stanie się gwałtowne. Objaśnić! ($Zn\ H_2SO_4|Cu|Zn$ stanowią ogniwa, w których płyną prądy o olbrzymiem natężeniu.)

*2. Okaż, że przez elektrolit płynie także prąd.

Dwie zlewki jedną napełnioną rozcieńczonym kwasem siarkowym, drugą stężonym roztworem siarczanu miedziowego, połącz rurką pełną cieczy tak, aby powstały naczynia połączone. Do pierwszej zlewki wstaw

elektrodę cynkową, do drugiej miedzianą; bieguny tego ogniwa połącz również drutem miedzianym. Tak rurkę łączącą naczynia, jak i drut ustaw w kierunku południka magnetycznego i zbliżaj do nich igiełkę magnetyczną. Z odchylenia igiełki zapomocą regułki prawej ręki stwierdź, że a) zewnątrz ogniwa prąd płynie od miedzi do cynku, że b) wewnątrz ogniwa płynie prąd od cynku do miedzi i że c) natężenia tych prądów są jednakowe.

Zadania.

1 Ile elektronów potrzeba na prąd 1 A? (Według II § 50 Zad. 1 nabój elektronu $e = 4{,}77\ 10^{-10}$ *e. s. naboju*, wobec tego na *j. e. s. naboju* potrzeba $0{,}21\ 10^{10}$ elektronów; ponieważ zaś 1 $C = 3\ 10^{9}$ *e. s. naboju*, przeto na 1 C potrzeba elektronów $6{,}3\ 10^{18}$ Dokładniej $6{,}28\ 10^{18}$). Tyle elektronów płynie przez każdy przekrój przewodnika w czasie 1 *sek*, gdy prąd ma natężenie 1 A).

2. Z ilu atomów składa się 1 *gr* cynku? (Według II § 50 Zad. 3 atom gramowy składa się z $6{,}06\ 10^{23}$ atomów liczba Avogadry); ponieważ ciężar atomowy cynku $Zn = 65{,}37$, przeto na 1 *gr* cynku wypada atomów $6{,}06\ 10^{23} : 65{,}37 = 9{,}27\ 10^{21}$.)

3. Jakie natężenie musiałby mieć prąd, któryby w 1 *sek* zużywał 1 *gr* cynku? (Prąd 1 A zużywa w 1 *sek* 0,0003386 *gr* cynku; zatem na 1 *gr* cynku wypada prąd 2953 A. Inaczej, aby 1 *gr* cynku przeszedł w roztwór, potrzeba do tego 2953 C).

4. Ile elektronów wypada na przejście 1 atomu cynku w roztwór? (Na 1 *gr* cynku potrzeba 2953 C; 1 C elektryczności zawiera $6{,}28\ 10^{18}$ elekronów, zatem na rozkład 1 *gr* cynku potrzeba elektronów $18{,}54\ 10^{21}$. Ponieważ w 1 *gr* cynku jest $9{,}27\ 10^{21}$ atomów, przeto na 1 atom cynku wypadają 2 elektrony Oczywista, musi wypaść liczba całkowita, gdyż elektron jest już niepodzielny. Zatem 2 elektrony powstają w elektrodzie cynkowej na miejsce jednego atomu cynku, który przeszedł w ciecz. Tę liczbę 2 nazywamy **wartościowością** cynku).

5. Przerobić zadanie 4 ogólnie, dla jakiegobądź pierwiastka, oznaczając wartościowość literą w, ciężar atomowy a, masę pierwiastka rozłożonego 1 *Coulombem* elektryczności czyli **równoważnik] elektrochemiczny** R.

(Otrzymamy $w = \frac{a\ 6{,}28\ 10^{18}}{R\ 6{,}06\ 10^{23}} = \frac{a}{R\ 96470}$, skąd $\frac{a}{w} : R = 96470$.

Jeżeli $\frac{a}{w}$ nazwiemy **chemicznym równoważnikiem** cynku, to liczba **96470** oznacza ilość elektryczności w *Coulombach*, potrzebną do rozłożenia tylu *gr* cynku, ile wynosi jego równoważnik chemiczny Jest to **liczba Faradaya**; oznaczają ją literą F).

§ 54. Pole elektromagnetyczne.

1 Pole sił magnetycznych, działających w przestrzeni, otaczającej przewodnik prądu, nazywamy **polem elektromagnetycznem**.

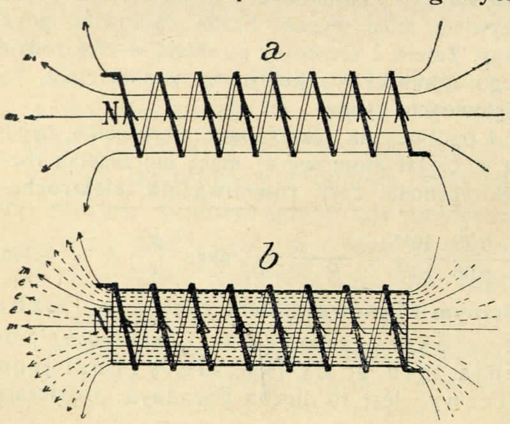
Kształt pola elektromagnetycznego poznaliśmy już w II § 48 Pyt. 3, linje sił magnetycznych okrążają przewodnik w linjach kołowych, gdy patrzymy w kierunku płynięcia prądu (dodatniego), prawoskrętnie.

Kierunek sił elektromagnetycznych wyznaczy **regułka prawej ręki**, wyłożona w II § 48 Pyt. 4, według której biegun magnetyczny północny w polu elektromagnetycznem odchyla się w stronę wielkiego palca prawej ręki, ułożonej w prądzie, zwróconej palcami w kierunku prądu, a dłonią prostopadle do linij magnetycznych, z tego bieguna północnego wychodzących.

Natężenie pola elektromagnetycznego dla prądu, płynącego w przewodniku o kształcie dowolnym, jest trudne do obliczenia, dlatego, iż każdy punkt prądu ma inne oddalenie od bieguna magnesu, na który swe działanie wywiera. W przypadku prądu kołowego o promieniu r natężenie pola elektromagnetycznego w środku koła ma wartość (II § 49, 3) $H = \frac{2\pi J}{r}$, a siła, działająca na biegun o ilości magnetyzmu μ, w środku koła znajdujący się (II § 53, 2)

$$F = \frac{2\pi J \mu}{r}.$$

2. Natężenie pola elektromagnetycznego możemy powiększyć dowoli, gdy zamiast jednego koła użyjemy większej liczby skrętów, zwój, utworzony z n skrętów, przez które przepływa prąd o natężeniu J *Amperów*, wywołuje takie pole elektromagnetyczne, jak jeden skręt o natężeniu prądu nJ A. Zwykle nawinięte są zwoje przewodnika izolowanego na rurze drewnianej, skręt obok skrętu. Przewodnik tak ukształtowany nazywamy **zwojnicą** albo **solenoidem**. **Kształt pola** elektromagnetycznego zwojnicy jest identyczny z polem magnetycznem magnesu sztabowego (ryc. 156 *a*), o czem przekonamy się w Ćw 4.



Ryc. 156.

Bieguny zwojnicy oznaczamy zapomocą regułki prawej ręki, a mianowicie, wielki palec prawej ręki, ułożonej na zwojach palcami w kierunku prądu, wskazuje biegun północny zwojnicy

Tylko wnętrzem swojem różni się zwojnica od magnesu sztabowego w zwojnicy istnieje także **pole wewnętrzne**, podczas gdy w magnesie o takiem polu mówić nie można. Pole wewnętrzne zwojnicy jest niemal dokładnie jednorodne.

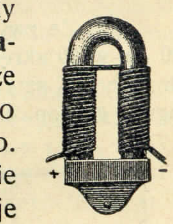
3. **Zewnętrzne pole** elektromagnetyczne zwojnicy można znakomicie powiększyć przez wypełnienie jej wnętrza **rdzeniem** żelaznym, przyrząd taki nazywamy **elektromagnesem**.

Gdy przez zwojnicę elektromagnesu płynie prąd stały, powstaje zjawisko zupełnie zgodne z tem, co nazwaliśmy **indukcją magnetyczną** (II § 36, 2), a która tu objawia się w ten sposób, że do linij pola elektromagnetycznego zwojnicy (e) przybywają nowe, o wiele liczniejsze, linje **indukcyjnego namagnesowania** (m) (ryc. 156 *b*).

Gdy rdzeń zwojnicy jest żelazem miękkiem, które posiada wielką zdolność indukcyjnego magnesowania się, ale równie łatwo traci magnetyzm po usunięciu indukcyjnego działania prądu, to otrzymujemy w takim elektromagnesie przyrząd, niezmiernie ważny w rozlicznych zastosowaniach elektrotechniki (dzwonek elektryczny, telegraf elektromagnetyczny, prądnice i silniki elektryczne i t. p.).

Indukcyjne namagnesowanie jest zrazu proporcjonalne do natężenia prądu, opływającego rdzeń żelazny Gdy jednak namagnesowanie żelaza osiągnie stan **magnetycznego nasycenia** (II § 36, 3), wtedy dalsze powiększanie natężenia prądu zmienia już tylko bardzo nieznacznie ogół linij pola magnetycznego.

Przytem działanie magnesujące prądu będzie tem lepiej wyzyskane, im dokładniej zmusimy linje indukcyjnego namagnesowania do przechodzenia przez masy żelaza, zamiast żeby ginęły w powietrzu. Dlatego elektromagnesom dajemy kształt **podków**, zamykanych **zworą** (ryc. 157).



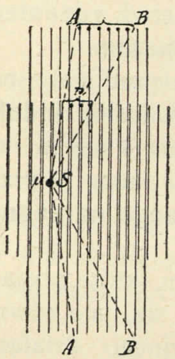
Ryc. 157.

Pytania.

1 Rachunkiem można okazać, że dla przewodnika prostego, bardzo długiego, przez który przepływa prąd o natężeniu J, działanie na biegun μ w odległości prostopadłej od przewodnika d, ma wartość $F = \frac{2J\mu}{d}$.

Zatem **natężenie pola elektromagnetycznego** w tym przypadku **jest odwrotnie proporcjonalne do oddalenia, a nie do kwadratu oddalenia.** Czy znane ci są jakie analogje i jak tę zależność objaśnić? (Można się przekonać, że iloczyn wymiarów $J\mu$ przedstawia energję, zatem $\frac{2J\mu}{d}$ oznacza spadek energji pola elektromagnetycznego. Energja tu rozchodzi się w kołach spółśrodkowych, gęstość więc jej maleje z długością obwodu czyli z wielkością promienia. Porównaj II § 15 Pyt. 2).

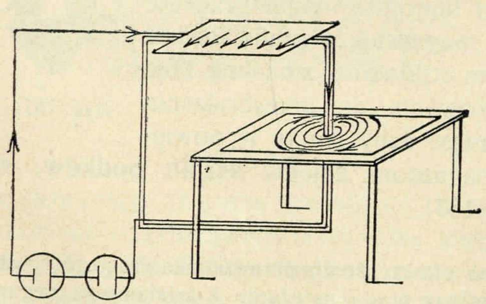
2. Okazać, że w dwóch zwojnicach o różnych średnicach, ale jednakowej gęstości nawinięcia, t. zn. o jednakowem oddaleniu skrętów, ten sam prąd wytwarza to samo natężenie pola wewnętrznego. (Ryc. 158 przedstawia dwie zwojnice spółosiowe o jednakowo gęstem nawinięciu. Weźmy pod uwagę część przestrzeni, zawartą między stożkami ASA i BSB. Na biegun magnetyczny μ, w ich wierzchołku S znajdujący się, działa n skrętów jednej zwojnicy i n' skrętów drugiej. Liczby te są wprost proporcjonalne do promieni zwojnic. W takim więc stosunku większa zwojnica powinna mieć większy wpływ na pole magnetyczne wewnętrzne. Lecz z powodu równania $H = \frac{2\pi J}{r}$ w takim samym stosunku większa zwojnica ma wpływ mniejszy. Stąd wynika, że **pole wewnętrzne zwojnicy nie zależy od jej promienia, lecz tylko od gęstości nawinięcia i od natężenia prądu.** Rachunkiem można okazać, że natężenie pola wewnętrznego zwojnicy $H = \frac{4\pi J}{\delta}$, gdzie δ jest oddaleniem skrętów).



Ryc. 158.

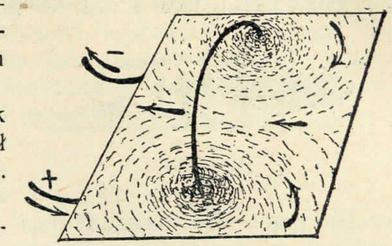
Ćwiczenia.

*1 Ze zwykłego drutu dzwonkowego tworzy się kwadrat o boku 20 cm w 20 skrętach. Całą tę ramę obwiązuje się nićmi, aby posiadała dostateczną sztywność i ustawia się pionowo, połączywszy ją z baterją ogniw galwanicznych (ryc. 159). W środku wysokości boku pionowego ramy ustawia się poziomo tekturę z odpowiedniem wycięciem, na którą kładzie się karton gładki, także do środka przecięty, aby go można było wsunąć na drut. Jeżeli ogniwa dają prąd o natężeniu 5 A, to prąd płynący w wiązce drutów ramy wynosi 100 A, jest więc tak silny, że przez osypanie kartonu opiłkami otrzymamy


Ryc. 159.

wyraźny obraz **przekroju poprzecznego** pola elektromagnetycznego prostego przewodnika. Igiełka oprowadzana około drutu przyjmuje kierunek styczny do linij magnetycznych i zwraca się biegunem północnym w kierunku wskazanym regułką prawej ręki.

*2. Połóżmy karton na bok poziomy ramy (ryc. 159). Linje sił będą prostopadłe do przewodnika. Jest to **przekrój podłużny** pola.

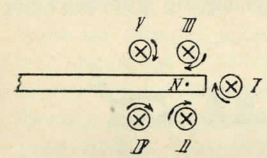


Ryc. 160.

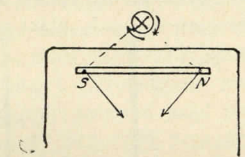
*3. Zbadać pole elektromagnetyczne prądu kołowego. Utworzymy zwój z 20 skrętów kołowych o średnicy 20 cm, ustawimy go pionowo i nałożymy karton poziomy, tak wielki, aby dzielił koło na dwa półkola (ryc. 160 zawiera tylko jedno półkole).

*4. Zbadać pole elektromagnetyczne zwojnicy. Z drutu utworzyć 24 skręty o średnicy 6 cm, o odległości skrętów $\frac{1}{2}$ cm. Do wnętrza rury włożyć poziomo odpowiedniej wielkości tekturę białą, połączyć zwojnicę z baterją i obsypywać tekturę opiłkami. We wszystkich ćwiczeniach należy obraz pola utrwalić.

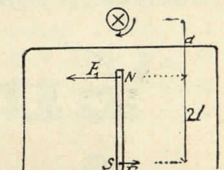
*5. Połóż na talerzyku wagi magnes sztabowy i zbliżaj do jego



Ryc. 161.



Ryc. 162.



Ryc. 163.

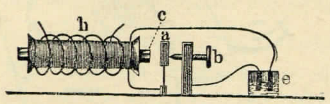
bieguna poziomy bok ramy z Ćw 1 (ryc. 161). W jakich położeniach ramy (I, II, III, IV, V) prąd wywiera nacisk w dół, w jakich ciągnienie w górę i dlaczego?

*6. Umieść na wodzie magnes sztabowy, krótki, pływający na deszczułce, tak, aby znajdował się w pobliżu jednej ściany naczynia (ryc. 162). Z drugiej strony ściany ustaw pionowo jeden bok ramy z Ćw. 1 tak, aby był na osi symetrji magnesu. Jakie będzie zachowanie się magnesu, gdy przez ramę przejdzie prąd w jednym, potem w przeciwnym kierunku?

*7 Do magnesu na wodzie, jak w Ćw 6, przybliż bok ramy, ale tak, aby bok ten wypadał w przedłużenie osi magnesu (ryc. 163). Jakie siły działać będą na bieguny, jaka jest ich wypadkowa? (Wielkości tych sił są $F_1 = \frac{2J\mu}{d}$ (Pyt. 1), gdy d jest odległością bliższego bieguna od prądu i $F_2 = -\frac{2J\mu}{d+2l}$, gdzie $2l$ jest oddaleniem biegunów magnesu od siebie. Wypadkowa $F_1 + F_2$ z punktem zaczepienia w środku ciężkości magnesu i moment obrotu $(F_1 \quad F_2)\, l$. Patrz I § 40, 2 i Zad. 8. Magnes przesunie się i równocześnie się obróci).

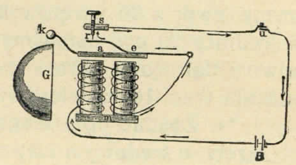
*8. Opisać działanie przerywacza (dzwonka) elektromagnetycznego.

Przerywacz elektromagnetyczny (ryc. 164) składa się z elektromagnesu *c* i młoteczka *a*, t. j. kawałka miękkiego żelaza na sprężystym pasku metalowym, do którego przylega platynowy koniec śrubki *b*, tkwiącej w słupku metalowym. Między końcem śrubki a młoteczkiem następuje przerwanie prądu w chwili, gdy elektromagnes przyciągnie miękkie żelazo, lecz równocześnie z przerwaniem prądu elektromagnes traci zdolność przyciągania, a młoteczek z powodu sprężystości paska powraca do pierwotnego położenia, wskutek czego prąd zostaje znowu zamknięty i t. d. W ten sposób prąd sam się naprzemian zamyka i otwiera.



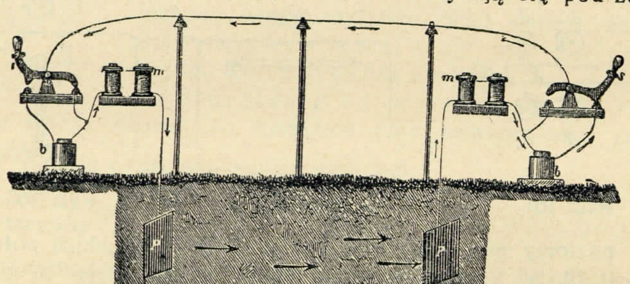
Ryc. 164.

Dzwonek elektromagnetyczny (ryc. 165) jest przerywaczem z tym dodatkiem, że na przedłużeniu młoteczka jest kuleczka *k*, która uderza o dzwonek *G*, obok umieszczony.



Ryc. 165.

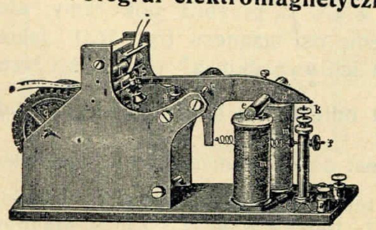
Drut miedziany, w którego obwodzie znajduje się dzwonek i baterja galwaniczna jest w jednem miejscu przerwany, a końce jego połączone są z metalowemi płytkami sprężystemi, które stykają się pod zewnętrznym naciskiem; wtedy dopiero prąd jest zamknięty, a dzwonek zaczyna dzwonić. (**Przyciskacz**).



Ryc. 166.

*9. Opisać telegraf elektromagnetyczny

Telegraf elektromagnetyczny Morsego (ryc. 166) składa się z klucza, przyrządu piszącego, baterji galwanicznej i przewodów. **Kluczem** zwiemy dźwignię metalową, która służy do otwierania i zamykania prądu elektrycznego. **Przyrząd piszący** (ryc. 167) składa się z elektromagnesu i dźwigni, opatrzonej na jednym końcu sztabką z miękkiego żelaza, którą elektromagnes przyciąga, gdy prąd kluczem zamkniemy, a na drugim końcu tej dźwigni znajduje się tępy kolec, który wytłacza na pasku papierowym znaki: kropkę przy chwilowem, kreskę przy dłuższem trochę zamknięciu prądu. Pasek ten przesuwa się między dwoma wałkami mosiężnemi, które obraca mechanizm zegarowy. Z kropek i kresek ułożony jest alfabet.

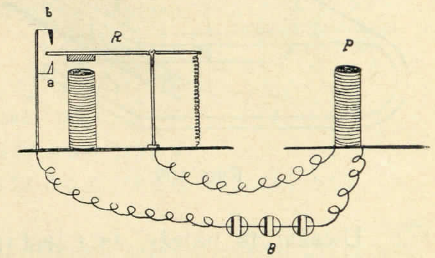


Ryc. 167.

Przewodnikiem prądu jest drut żelazny, ocynkowany, rozpięty na słupach, od których jest izolowany dzwonkami porcelanowemi.

Do połączenia dwóch stacyj telegraficznych wystarcza jeden drut przewodni, jeżeli końce jego na obu stacjach połączy się z płytami miedzianemi, zakopanemi w wilgotnej ziemi.

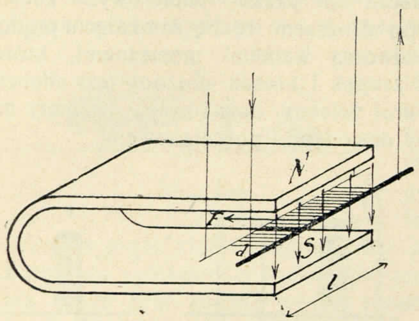
Na ryc. 166 jest uwidocznione połączenie dwóch stacyj telegraficznych. Prąd baterji, znajdującej się na stacji nadawczej, po przejściu przez długi przewodnik do stacji odbiorczej słabnie tak, że nie zdoła tam poruszyć dźwigni przyrządu piszącego; przeto wprowadza się prąd do tak zwanego **przekaźnika (relais)** (ryc. 168), który składa się z dźwigni metalowej *R*, opatrzonej na jednym końcu lekką zworą, a pod nią znajdują się bieguny elektromagnesu. Przedłużenie tej dźwigni porusza się między dwoma kolcami, z których dolny jest metalowy, a górny z materjału izolującego. Gdy słaby prąd obiega elektromagnes przekaźnika i przyciągnie zworę, wtedy zetknięcie się dźwigni *R* z dolnym kolcem zamyka prąd baterji miejscowej *B*, w którego obwód włączony jest przyrząd piszący *P*.



Ryc. 168.

§ 55. Działania elektrodynamiczne.

1 Działanie pola magnetycznego na ruchomy przewodnik prądu nazywamy **działaniem elektrodynamicznem**. Poznaliśmy je już na przykładzie promieni katodowych, odchylanych w polu magnetycznem (II § 50, 2), o kierunku działania **siły elektrodynamicznej** była mowa w II § 48 Pyt. 4, a mianowicie według **regułki prawej ręki** przewodnik prądu odchyla się ku **brzegowi** prawej ręki (ryc. 144) ułożonej w prądzie, zwróconej palcami w kierunku prądu, a dłonią prostopadle do linij magnetycznych pola, wychodzących z bieguna północnego. Kierunek siły elektromotorycznej jest zawsze prostopadły do płaszczyzny, przechodzącej i przez przewodnik prądu i przez linje magnetyczne pola (ryc. 169).



Ryc. 169.

Prąd o natężeniu J (*e. m. natężenia*), płynący przez przewodnik o długości $l\,cm$, równoważny jest ilości magnetyzmu $\mu = Jl$ (II § 53, 4), doznaje więc w polu jednorodnem o natężeniu H (*Gaussów*) działania $F = H\mu$ *dyn*, zatem

$$\boxed{F = HJl.}$$

Uważać tu należy, że l jest prostopadłe do linij sił pola magnetycznego, a długość ta jest równa szerokości pola magnetycznego.

2. Gdy przewodnik o długości l, ulegając działaniu sił elektrodynamicznych, przesunie się w kierunku ich działania o długość d (ryc. 169), wtedy siły te wykonały pracę

$$W = Fd = HJld.$$

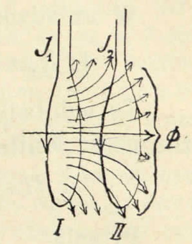
Przewodnik przytem zakreślił powierzchnię prostokąta ld. Ponieważ H, jako natężenie pola magnetycznego, równe jest liczbie linij sił magnetycznych, wypadających na 1 cm^2 prostopadłego przekroju (II § 39, 1), przeto Hld oznacza liczbę linij sił magnetycznych, przeciętych przez przewodnik o długości l, który siłą F został przesunięty na drodze d. Tę liczbę linij sił nazywamy **strumieniem magnetycznym** i oznaczamy literą $\Phi = Hld$, zatem praca wykonana przez prąd

$$\boxed{W = \Phi J}$$

Wyrażenie powyższe jest z tego względu ważne, bo nie zawiera żadnego ograniczenia, ani co do kierunku przewodnika l, ani co do kierunku działania siły F; zawsze gdy przewodnik prądu o J *e. m. natężenia* przecina Φ linij sił magnetycznych (Φ jednostek magnetyzmu), praca wykonana równa się ΦJ *ergów*.

3. Skoro prąd płynący w przewodniku równoważny jest pewnej ilości magnetyzmu, to dwa prądy płynące obok siebie,

muszą na siebie także oddziaływać pewną siłą. Jeden z nich I (ryc. 170) wytwarza pole elektromagnetyczne, omówione w II § 54), drugi zaś II ulega działaniu elektrodynamicznemu tego pola. Rozumie się, że działanie to jest wzajemne; taki sam wynik otrzymamy, gdy powiemy, że przewodnik I ulega działaniu elektrodynamicznemu pola, wytworzonego przez prąd II



Ryc. 170.

Kierunek działania tych sił łatwo wyznaczyć zapomocą regułki prawej ręki prądy płynące w tę samą stronę przyciągają się, płynące w strony przeciwne, odpychają się.

Gdybyśmy przewodnik II usunęli wbrew siłom przyciągającym, w miejsce gdzie już siły elektrodynamiczne nie działają, to praca wykonana musi się tak samo obliczyć jak w ust. 2

$$W = \Phi_1 J_2,$$

gdzie Φ_1 oznacza strumień magnetyczny, pochodzący od przewodnika I, objęty przewodnikiem II Ale z równem prawem wolno napisać

$$W = \Phi_2 J_1$$

1677

Z obu równań wynika

$$\frac{\Phi_1}{J_1} = \frac{\Phi_2}{J_2} = L, \text{ albo } W = LJ_1J_2.$$

Wielkość L nazywamy **spółczynnikiem indukcji wzajemnej**; jest ona zależna od postaci, wielkości i wzajemnego położenia przewodników, a więc tylko od geometrycznych własności przewodników, a nie zmienia się ze zmianą natężenia prądu w przewodnikach.

4. Linje magnetyczne pewnej części przewodnika mogą przecinać także inną część tego samego przewodnika. Wybitnym przykładem tego jest zwojnica, gdzie linje magnetyczne jednego zwoju objęte są innemi zwojami. Stąd pochodzą siły przyciągające między zwojami tego samego przewodnika, co będzie okazane w ćwiczeniu 4. W tym przypadku $W = LJ^2$, a wielkość L nazywamy tu **spółczynnikiem indukcji własnej** albo **samoindukcji**.

Wymiar spółczynnika indukcji wzajemnej lub **własnej** obliczymy z równania $W = LJ^2$

W układzie elektromagnetycznym

$$[L]_m = \frac{erg}{(j.\ e.\ m.\ \text{natężenia})^2} = \frac{gr\ cm^2\ sek^{-2}}{(gr^{1/2}\ cm^{1/2}\ sek^{-1})^2} = cm,$$

W układzie praktycznym

$$[L]_p = \frac{Joule}{(Amper)^2} = \frac{10^7\ erg}{(^1/_{10}\ e.\ m.\ \text{natężenia})^2} = 10^9\ cm.$$

Tę jednostkę nazywają **Henr** (oznaczenie H), a jej tysiączną część **Milihenr** (mH), zatem

$$1\ H = 10^9\ cm, \quad 1\ mH = 10^{-3} H = 10^6\ cm.$$

Pytania.

1 Jakie działanie elektromagnetyczne występuje między dwiema częściami przewodnika, tworzącemi kąt? Jaki więc kształt powinny przyjmować przewodniki prądu, zupełnie wiotkie? (W częściach przewodnika, tworzących ramiona kąta, prąd płynie w kierunkach przeciwnych, do wierzchołka, a następnie od wierzchołka, zatem te części przewodnika odpychają się, aż do wyprostowania ramion kąta w jedną prostą. Zupełnie wiotki przewodnik zamknięty przyjąłby kształt koła).

2. Przez przewodnik l na ryc. 169 płynie prąd o natężeniu J wtedy, gdy niema pola magnetycznego lub w polu magnetycznem, gdy go siłą F przytrzymujemy, aby nie zmieniał swego położenia. Gdy jednak przewodnik oswobodzimy tak, że poruszy się w kierunku działania siły elektrodynamicznej, czy podczas tego ruchu natężenie prądu nie musi ulec zmianie? (Ruch przewodnika wymaga pracy, która może być wykonana tylko kosztem natężenia prądu. Wskutek tego n a t ę ż e n i e p r ą d u w c z a s i e r u c h u p r z e w o d n i k a j e s t m n i e j s z e o d w a r t o ś c i, g d y p r z e w o d n i k s i ę n i e p o r u s z a).

3. Czy magnetyzm ziemski wywiera jakie działanie na przewody prądu? Kiedy ta siła jest największa? Jaki jest jej kierunek? (Największe działanie elektrodynamiczne magnetyzmu ziemskiego jest wtedy, gdy przewodnik jest prostopadły do płaszczyzny południka magnetycznego, t. zn. gdy przewodnik ma kierunek wschodnio-zachodni. Kierunek tej siły w płaszczyźnie południka magnetycznego jest prostopadły do linij sił magnetyzmu ziemskiego, zatem zawiera z pionem kąt, równy nachyleniu magnetycznemu danego miejsca. Ponieważ biegun magnetyczny północny ziemi ma magnetyzm południowy, przeto dla prądów płynących ze wschodu na zachód, siła ta zwrócona jest w dół, dla prądów przeciwnych w górę).

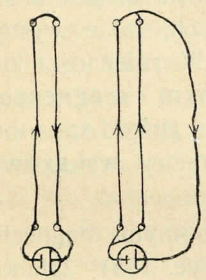
Ćwiczenia.

*1. Okazać działania elektrodynamiczne zapomocą **pływającego ogniwa**.

Dwie blaszki równej wielkości, cynkowa i miedziana, są zapomocą przylutowanych pręcików miedzianych przymocowane do cienkiej deszczułki w położeniu do deszczułki prostopadłem, a do siebie równoległem. Wystające pręciki miedziane są połączone ze zwojem cienkiego drutu miedzianego tak, że zwój ten w położeniu pionowem oparty jest o desz-

czułkę. Grubość deszczułki ma być tak dobrana, aby całość pływała po wodzie. Gdy taki przyrząd wstawimy w rozcieńczony kwas siarkowy (1 : 10), otrzymamy pływające ogniwo. Spostrzeżemy, że ogniwo ustawia się tak, aby płaszczyzna zwoju była prostopadła do płaszczyzny południka magnetycznego i to tak, że górą zwoju płynie prąd z zachodu na wschód. Gdy do zwoju przybliżymy biegun magnesu, zauważymy działania skręcające, odpychające i przyciągające. Z w ó j p r ą d u z a c h o w u j e s i ę, j a k m a g n e s p ł a s k i, t. zw. **warstwa magnetyczna.**

*2. Do tablicy wkręcam dwie pary spinek (zacisków) w pionowem oddaleniu 1 m, w poziomem 5 cm. Między niemi wstawiam pionowo dwa wiotkie druty (t. zw. włosy aniołów, używane do ozdoby choinki) i łączę je z ogniwem, raz tak, aby prądy były przeciwnie skierowane, drugi raz aby były zgodne (ryc. 171). W pierwszym razie ujrzymy odpychanie się prądów, w drugim przyciąganie.



Ryc. 171

*3. Z drutu wiotkiego długości 2 m utwórz długą pętlę. Gdy końce jej połączysz z baterją ogniw, pętla rozszerzy się; zbliża się kształtem do koła.

*4. Zwojnicę, utworzoną z 80 skretów cienkiego drutu miedzianego, o średnicy 5 cm, zawieszam w stojaku, a dolny jej koniec wstawiam do naczyńka z rtęcią. Gdy górny koniec zwojnicy i rtęć w naczyńku połączę z baterją ogniw, nastąpi elektrodynamiczne przyciąganie się skrętów zwojnicy, która skróci się tak, iż dolny jej koniec wychyli się z rtęci. W tej samej jednak chwili opadnie z powrotem i gra rozpoczyna się na nowo.

Zadania.

1. Przekonaj się, czy w równaniu $F = HJl$ iloczyn ten ma wymiar siły

2. Sprawdź, że wymiar strumienia magnetycznego Φ jest taki sam, jak wymiar ilości magnetyzmu.

3. Nakreślić obraz wypadkowego pola, powstającego ze złożenia pola elektromagnetycznego prądu bardzo długiego, prostolinjowego o 5 $A = 50$ *e. m. natężenia* i prostopadłego do tego prądu pola magnetycznego, jednorodnego, o natężeniu $H = 10$ *Gaussów*. (Dokoła prądu, płynącego od patrzącego ku rysunkowi, nakreślić 10 kół spółśrodkowych o promieniach $\frac{10}{10} = 1$, $\frac{10}{9} = 1{,}1$, $\frac{10}{8} = 1{,}25$, cm, na których natężenie pola magnetycznego, malejąc według równania $H = \frac{2J}{d}$ (II § 54 Pyt. 1), ma wartości 100, 90, 80, *Gaussów*. Każdy wektor, styczny do koła, o odpowiedniej długości musimy złożyć w wypadkowy z wektorem n. p. poziomym natężenia pola magnetycznego, jednorodnego, 10 *Gaussów*. Kreślić w podziałce 10 *Gaussów* = 1 cm. Odmierzać wypadkowe i zapisywać natężenia wypadkowe w *Gaussach*. Z wielkiej liczby wypadkowych w różnych punktach pola da się odtworzyć przebieg linij sił tego pola)

4. Nakreślić obraz pola wypadkowego dwóch pól elektromagnetycznych prądów prostolinjowych, zgodnych co do kierunku, oddalonych od siebie na 3 *cm*.

5 Uczynić to samo, co w Zad. 4, dla prądów w przeciwne strony skierowanych. (Zadania 3, 4 i 5 są zbiorowe, jak II § 38 Zad.)

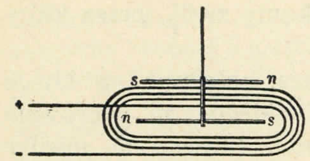
§ 56. Galwanometry.

1 **Galwanometrami** nazywamy przyrządy, służące do porównywania lub mierzenia natężenia prądu elektrycznego (dawniej zwanego galwanicznym). Polegają one na działaniu sił elektromagnetycznych albo elektrodynamicznych, jakie występują pomiędzy magnesami i zwojami prądu. W zależności od tego rozróżniamy galwanometry **z ruchomym magnesem i** galwanometry **z ruchomym zwojem**, zależnie zaś od sposobu odczytywania podziałki rozróżniamy galwanometry **wskazówkowe i zwierciadełkowe.**

2. Najprostszym z galwanometrów o ruchomym magnesie jest opisana w II § 53, 2 **busola stycznych** (ryc. 155). Igiełka magnetyczna w busoli stycznych ma być w stosunku do promienia koła prądu tak krótka, aby można uważać, że jej oba bieguny znajdują się w środku tego koła, pod tym tylko warunkiem prąd mierzony jest proporcjonalny do stycznej kąta odchylenia igiełki. Busola stycznych zatem jest tem dokładniejsza, im większy ma promień, to jednak pociąga za sobą małą czułość busoli, która według II § 53, równ. III wyraża się

$$\frac{\mathrm{tg}\alpha}{J} = \frac{2\pi}{rH}.$$

Czułość tę można powiększyć a) przez użycie zwoju, z n skrętów uczynionego, zamiast jednego skrętu, wtedy bowiem $\frac{\mathrm{tg}\alpha}{J} = \frac{2\pi n}{rH}$, b) przez użycie środków astatyzujących igiełkę, wtedy bowiem zmniejsza się natężenie magnetyzmu ziemskiego H i c) przez powiększenie dokładności odczytywania podziałki kątowej, t. j. przedłużenie wskazówki lub przez zastosowanie odczytywania zwierciadełkowego. Lecz zrzekając się proporcjonalności prądu J do tg α można także zmniejszyć promień r i będzie to najwydatniejszy środek powiększenia czułości, bo w tym razie można powiększyć długość igiełki, a tem samem i moment jej obrotu, co pozwoli na jeszcze dokładniejsze jej astatyzowanie.

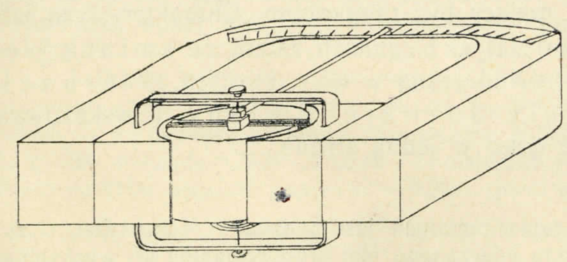


Ryc. 172.

W ten sposób dochodzimy do galwanometru, zwanego **multyplikatorem** (ryc. 172). Na ramce, n. p. drewnianej, nawinięty jest zwój drutu cienkiego, wewnątrz zaś ramki zawieszony jest magnes trwały *ns*, jego odchylenie od południka magnetycznego, w którym jest zwój ustawiony, odczytujemy z położenia wskazówki, stale z magnesem połączonej, na podziałce kątowej. Astatyzować igiełkę możemy według II § 40, 4 albo przez zbliżenie odpowiednie magnesu, znoszącego działanie magnetyzmu ziemskiego, albo też przez połączenie igiełki *ns* z drugą taką samą *sn*, umieszczoną równolegle do *ns* zewnątrz ramki i zwróconą biegunami przeciwnie.

Gdy igiełka jest doskonale astatyczna, wtedy każdy, najmniejszy nawet prąd, wychyla wskazówkę o 90° Multyplikator taki nie nadawałby się do pomiarów, lecz wtedy jako siły, zwracającej igiełkę w położenie równoległe do zwojów, można użyć siły skręcenia włókna, drucika lub nitki kwarcowej, na której igiełka astatyczna jest zawieszona. Gdy nadto do pręcika, łączącego igiełki, przytwierdzone jest zwierciadełko, a promień lampy, odbity od zwierciadełka, daje jasną plamę na oddalonej podziałce, to zapomocą takiego **galwanometru astatycznego** (Thomsona) można wykrywać i mierzyć prądy o natężeniu nawet 10^{-10} *A*.

3. Użycie jednak tak czułych galwanometrów o ruchomym magnesie jest bardzo ograniczone; im bowiem są czulsze, tem bardziej ulegają działaniom zewnętrznych pól magnetycznych, a wskutek tego w miastach, gdzie we wszystkich kierunkach ustawicznie przepływają prądy telegraficzne, telefoniczne, prądy kolei miejskiej, urządzeń sygnałowych i t. p. wskazówka galwanometru nigdy nie może się uspokoić.


Ryc. 173.

Wady tej nie posiadają **galwanometry o ruchomym zwoju (Deprez i D'Arsonval),** polegające na elektrodynamicznem oddziaływaniu silnego magnesu na ruchomy zwój, przez który przepływa prąd mierzony (ryc. 173.)

Okowy magnesu czyli części żelaza, nałożone na końce magnesu podkowiastego, są kształtu takiego, że walcowata zwora z miękkiego żelaza, ze zwojami, zawieszona między niemi, tyle tylko ma miejsca, iż może się bez ocierania obracać około swej osi. Wskutek tego cały strumień magnetyczny między okowami i zworą przechodzi przez cienką warstwę powietrza. Gdy w zwojach na zworze niema prądu, ustawia się ją tak, aby zwój zajmował położenie osiowe, to zn. aby znajdował się przed środkami biegunów magnesu. Prąd płynący obraca zworę w położenie równikowe (porównaj II § 36, 4), w kierunku, dającym się wyznaczyć regułką prawej ręki i ustawia ją w takiem położeniu, gdzie siła elektromagnetyczna, obracająca zworę, zrówna się z siłą sprężystości, powstającej przy skręceniu nici, na której zwora wisi. Natężenie mierzonego prądu odczytać można na podziałce z położenia wskazówki, połączonej ze zworą.

Galwanometry te mogą być zastosowane nawet tam, gdzie istnieją silne pola zewnętrzne, n. p. w fabrykach, bo z powodu silnego pola własnego inne nie mają na nie wpływu

Galwanometr, z którego podziałki odczytać można natężenie prądu wprost w *Amperach*, nazywamy **ampermetrem**, gdy odczytuje się *Miliampery*, **miliampermetrem**.

4. Odrębny typ galwanometrów stanowią **elektrodynamometry**, polegające na zasadzie działań elektrodynamicznych dwóch zwojów, z których jeden jest ruchomy i przez które przepływa po kolei ten sam prąd, mający być mierzonym. Charakterystyką ich jest brak magnesów o stałych biegunach, zatem ze zmianą kierunku prądu, równoczesną w obu zwojach, kierunek działania sił nie doznaje zmiany i wskazówka wychyla się zawsze tylko w jedną stronę.

Pytania.

1. W których galwanometrach jest podziałka jednostajna, t. zn. taka, że natężenie prądu mierzonego jest proporcjonalne do wychylenia wskazówki?

Podziałka jednostajną może być (nie musi) tylko w tych galwanometrach, gdzie prąd wpływa tylko na jedną część z dwóch, nawzajem się przyciągających lub odpychających. Dzieje się to w galwanometrach o ruchomym zwoju i do pewnego stopnia w t. zw. **galwanometrach sprężynowych,** gdzie magnes trwały wciągany jest w zwojnicę. **W galwanometrach z miękkiem żelazem** siła przyciągania jest proporcjonalna do kwadratu natężenia prądu, bo i pole elektromagnetyczne zwojnicy i natężenie indukcyjnego namagnesowania żelaza są do J proporcjonalne. To samo zachodzi i w elektrodynamometrach.

2 W których galwanometrach wskazówka wychyla się tylko w jedną stronę bez względu na kierunek prądu? (W tych, gdzie wychylenie jest proporcjonalne do J^2. Kwadrat liczby nie zależy od jej znaku).

3. Jaką wadę posiadają galwanometry z miękkiem żelazem? (Z powodu wymienionej w II § 36, 3 **oporności** przeciw magnesowaniu (**pozostałości magnetycznej** po namagnesowaniu), wpływ indukcyjnego magnesowania miękkiego żelaza zawsze się opóźnia, zatem przy zwiększaniu natężenia prądu galwanometr podaje wychylenia za małe, przy zmniejszaniu za duże. Zjawisko opóźniania się w indukcyjnem magnesowaniu określamy nazwą **histerezy**.)

Ćwiczenia.

*1. Zmierz promień busoli stycznych i ze znanej wartości składowej poziomej magnetyzmu ziemskiego oblicz stałą busoli. ($B_m = \frac{rH}{2\pi}$, $J = B_m \operatorname{tg}\alpha$ *e. m. natężenia*; gdybyśmy chcieli mieć J w *Amperach*, trzeba położyć $B_p = \frac{10\,rH}{2\pi}$, $J = B_p \operatorname{tg}\alpha$ *Amperów*.)

*2. Prąd kołowy, używany w II § 54 Ćw. 3, utwierdzić w położeniu poziomem zapomocą drewnianych stojaków Na wadze zawiesić magnes sztabowy, którego bieguny znane są z II § 38 Ćw 3, tak, aby jednym biegunem znajdował się w środku prądu kołowego. Gdy zwój połączę z baterją ogniw, wystąpi siła, działająca między zwojem i biegunem, którą można zważyć i wyrazić w *dynach*. Zapomocą tych danych obliczyć natężenie prądu w zwoju. (Z II § 53 Równ. I $F = \frac{2\pi n J\mu}{r}$, gdzie n jest liczbą skrętów w zwoju, obliczymy J w *j. e. m. natężenia.*)

Zadania.

1. Po kole o promieniu 1 *cm* płynie prąd o *j. e. m. natężenia*. Jaką siłą działa ten prąd na jednostkę magnetyzmu, umieszczoną w środku koła? Jak wielki musi być promień koła, aby ta siła była równa 1 *dynie*?

2. Busolę stycznych o promieniu $r = 12$ *cm* stanowią $n = 32$ skręty cienkiego drutu. Obliczyć stałą tej busoli dla Zakopanego w r 1926, gdy wiadomo, że pozioma składowa magnetyzmu ziemskiego w Zakopanem w r 1898 wynosiła 0,2058 *Gaussów* i że maleje co roku o 0,00029 *Gaussa*. (W ciągu 28 lat wyniesie poprawka — 0,0081, zatem w r. 1926 w Zakopanem $H = 0{,}1977$ *Gaussa*. Stała $B = \frac{rH}{2\pi n} = 0{,}0118$ *e. m. natężenia*.)

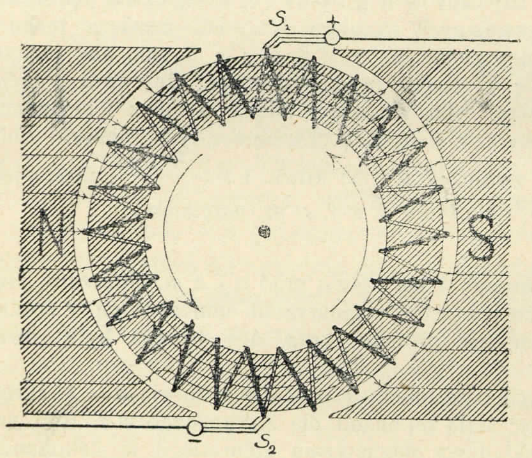
§ 57 Silniki elektryczne.

1 Działania elektrodynamiczne pola magnetycznego na ruchome przewodniki prądu mogą być zastosowane do wytworzenia ciągłego ruchu obrotowego jakiejś masy, ruch ten może być użyty do wykonywania pewnej pracy, zatem przy pomocy

odpowiednich urządzeń możemy energji elektrycznej prądu, wytwarzanego n. p. w ogniwie, używać do wykonywania pracy mechanicznej. Maszyny, do tego celu służące, nazywamy **silnikami elektrycznemi** albo **motorami (elektromotorami)**.

Budowa silników oparta jest na zasadzie, opisanej w II § 56, 3 i zastosowanej w galwanometrze o ruchomym zwoju (ryc. 173). W tym celu musi być na zworze, obracającej się między okowami magnesu, nawinięty przewodnik tak, aby tworzył jedno zamknięte pasmo i aby w każdem jego położeniu zawsze w poszczególnych zwojach prąd płynął względem nieruchomego pola magnetycznego w tym samym kierunku. Zworę z miękkiego żelaza wraz z nawiniętemi na niej przewodami nazywamy **twornikiem**.

2. Opiszemy naprzód silniki z **twornikiem pierścieniowym** (ryc. 174). Pierścień z miękkiego żelaza owinięty jest jednostajnie drutem miedzianym, od żelaza izolowanym tak, że tworzy zamkniętą zwojnicę. Prąd doprowadzony jest ze źródła (ogniwa) zapomocą sprężystych styków **(szczotek)** S_1 i S_2 i w punkcie zetknięcia się z przewodami twornika S_1 rozgałęzia się na dwie strony: jedna jego część płynie przed biegunem północnym **N**, druga przed południowym **S** magnesu pola. Oba te rozgałęzienia prądu schodzą się znów w punkcie styku szczotki S_2. Regułka prawej ręki daje, jako kierunek obrotu twornika, kierunek wskazany strzałką.



Ryc. 174.

3. Obliczmy pracę sił elektrodynamicznych, obracających twornik. Weźmy narazie pod uwagę tylko dwa skręty, po przeciwnych stronach twornika leżące. Prąd ze źródła płynący J_0 rozdziela się w styku S_1 na dwie połowy, więc przez każdy

skręt płynie prąd $\frac{J_0}{2}$. Dalej załóżmy, że cały strumień magnetyczny przecinany jest podczas półobrotu twornika przez oba skręty; to praca wykonana przez siły elektrodynamiczne przy półobrocie twornika wynosi w myśl II § 55, 2 dla każdego skrętu $\Phi \frac{J_0}{2}$, a dla obu skrętów ΦJ_0, zatem praca ta dla dwu skrętów podczas jednego całego obrotu wynosi $2\Phi J_0$, a dla z skrętów podczas jednego całego obrotu $z\,\Phi J_0$. Jeżeli twornik wiruje z prędkością N obrotów na sekundę, to praca do tego potrzebna wynosi w sekundzie $Nz\Phi J_0$. Taką ilość energji musi dostarczać ogniwo co sekundę, tę ilość nazywamy **mocą prądu** elektrycznego, który porusza silnik, pracujący z **dzielnością** P (I § 31); zatem

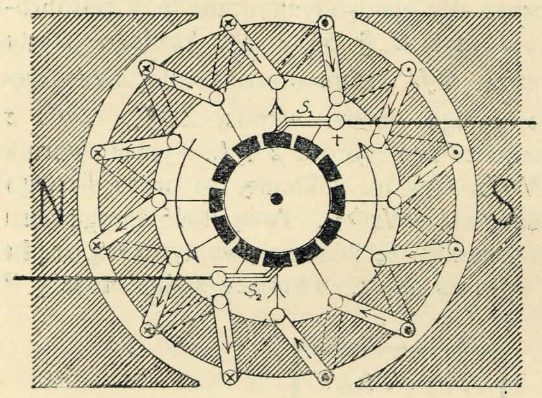
$$\boxed{P = Nz\Phi J_0.}$$

Jakkolwiekbyśmy odmienili budowę silnika, wyrażenie powyższe, służące do obliczenia mocy prądu, zasadniczo nie ulegnie zmianie. Moc prądu, potrzebna do utrzymania w ruchu silnika, jest równa dzielności silnika, a natężenie prądu, jaki wtedy płynie przez zwoje twornika, $J_0 = \frac{P}{Nz\Phi}$, jest wprost proporcjonalne do mocy prądu, a odwrotnie do liczby linij sił, przecinanych przez wszystkie skręty w sekundzie, takie bowiem znaczenie ma $Nz\Phi$.

4. **Bieguny** silnika (zaciski, połączone z szczotkami) łączymy z biegunami baterji ogniw i z ampermetrem w szereg, wprzód jednak zahamujmy twornik tak, aby się nie mógł obracać. Ampermetr wskazuje natężenie J. Teraz zwalniamy nacisk, wywierany na twornik i zauważymy, że w miarę, jak się powiększa szybkość jego obrotu, natężenie prądu obniża się i przyjmuje wreszcie wartość J_0, zależną od pracy, jaką twornik, obracając się, w sekundzie wykonywa i na co potrzeba mocy prądu $P = Nz\Phi J_0$.

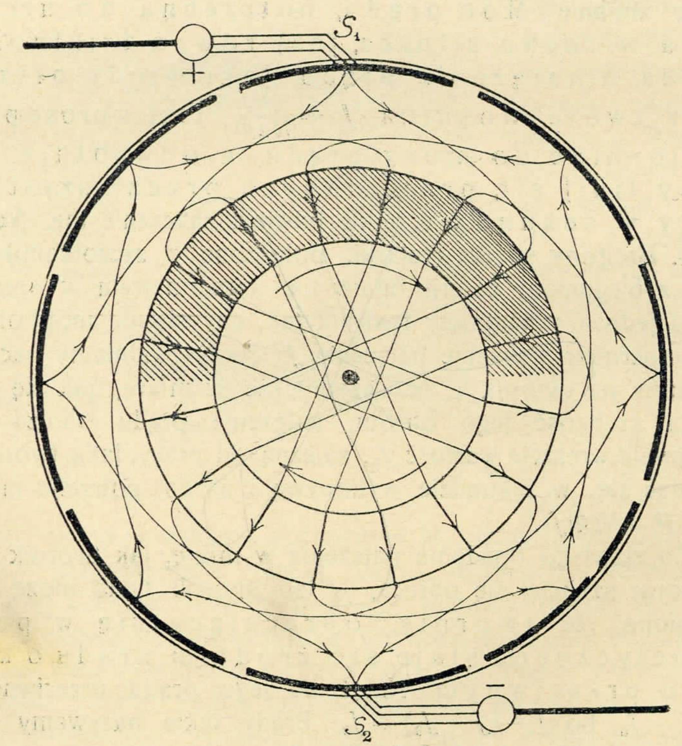
To zjawisko opadania natężenia w miarę, jak twornik silnika coraz szybciej się obraca, w ten sposób tylko może być wyjaśnione, że twornik, obracający się w polu magnetycznem, staje się źródłem prądu o kierunku przeciwnym. Natężenie tego prądu przeciwnego jest $J - J_0$, bo $J - (J - J_0) = J_0$. Prądy takie nazywamy **indukcyjnemi**. (Powtórz II § 55 Pyt. 2).

5. Budowa silnika, przedstawionego na ryc. 174, posiada pewne niedogodności, które trzeba usunąć.



Ryc. 175.

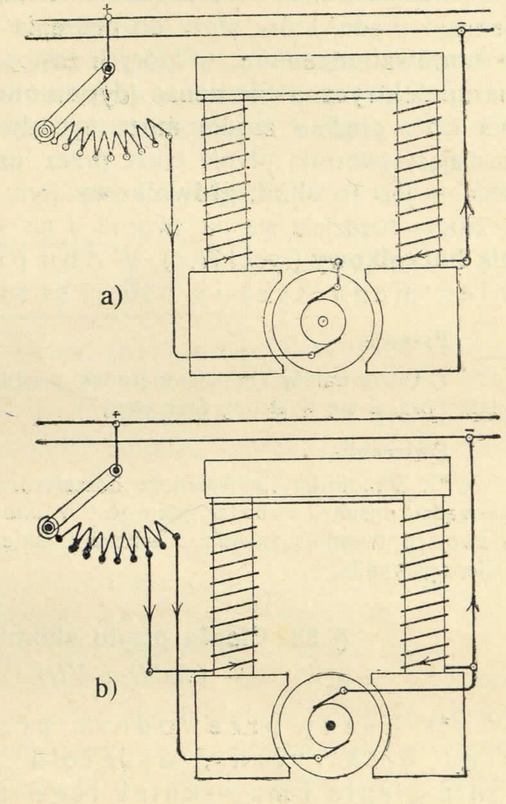
Szczotek S_1 i S_2 nie można umieszczać zewnątrz pierścienia, gdyż przewodniki musiałyby być tam pozbawione izolacji, aby zapewnić metaliczne zetknięcie z szczotkami. Dlatego połączono zwoje na pierścieniu twornika z płytkami metalowemi, osadzonemi na osi twornika, których dotykają się szczotki. Płytki te (**wycinki**), staran-



Ryc 176.

nie od siebie izolowane, mają kształt walca i tworzą **kolektor** silnika (ryc. 175).

Twornik pierścieniowy posiada tę wadę, że z każdego skrętu tylko część zewnętrzna jest użyteczna i ulega działaniom sił elektrodynamicznych, reszta zaś wewnątrz pierścienia położona, nie mówiąc o częściach bocznych skrętów, jest nieczynna, ponieważ wewnątrz pierścienia niema żadnych linij sił. Dlatego obecnie budują silniki z **twornikiem bębnowym**, gdzie wszystkie części przewodników, z wyjątkiem połączeń bocznych, są ułożone na zewnętrznej stronie twornika.



Ryc. 177

Nawinięcie twornika bębnowego musi być takie, aby na jednej połowie powierzchni bębna, zwróconej ku jednemu biegunowi magnesu pola, prądy płynęły w jedną stronę, na drugiej zaś połowie w stronę przeciwną. Ryc. 176 podaje przykład takiego nawinięcia twornika. Wewnętrzne koło przedstawia tylną powierzchnię bębna; pierścień, w połowie cieniowany, powierzchnię boczną bębna, której cieniowana część znajduje się przed biegunem północnym pola, koło zaś zewnętrzne oznacza **czoło** bębna z wycinkami kolektora, do których w dwóch miejscach przylegają szczotki S_1 i S_2 doprowadzające prąd ze źródła. Na bębnie znajduje się 16 przewodów, na kolektorze 8 wycinków

6. Magnesy pola mogą być magnesami trwałemi (stalo-

wemi) albo też elektromagnesami, pobudzanemi osobnym prądem. Takie silniki nazywamy **magnetoelektrycznemi.** Odznaczają się one tem, że w nich strumień magnetyczny jest stały

Można jednak do wzbudzenia elektromagnesów użyć tego samego prądu, który służy do pędzenia silnika. Są to **silniki z samowzbudzeniem,** w których zastosowana jest **zasada dynamoelektryczna Siemensa (dynamomotory).** Sposób łączenia ich z prądem źródła może być dwojaki albo cały prąd, zasilający twornik, płynie także przez uzwojenia elektromagnesów — jest to **silnik głównikowy** (ryc. 177, a) albo też prąd z źródła rozdziela się na twornik i na elektromagnesy — **silnik bocznikowy** (ryc. 177, b). W obu przypadkach strumień magnetyczny nie jest stały.

Pytanie.

1 Gdzie należy zmienić kierunek prądu w dynamomotorze, aby silnik obracał się w stronę przeciwną?

Ćwiczenie.

*1. Z motorka elektrycznego dostarczonego ze zbiorów szkolnych sporządzić rysunek i zbadać, jakie jest w nim działanie sił, kiedy prąd w zwojach twornika zmienia kierunek i jakie położenie szczotek daje najlepszy wynik.

§ 58. Ciepło prądu elektrycznego.
(Tablica VII).

*1 Każdy przewodnik, przez który płynie prąd elektryczny, wydziela z siebie ustawicznie ciepło i ma wskutek tego temperaturę wyższą od temperatury otoczenia. Można się o tem przekonać doświadczeniem. Gdy cienki drucik, zwinięty spiralnie, przez który płynie prąd z ogniwa, wstawimy w naczynie, napełnione czystym alkoholem, wtedy termometr, zanurzony w ciecz, okaże po pewnym czasie podwyższenie temperatury. Z tego doświadczenia można obliczyć, ile kaloryj ciepła wytwarza prąd o natężeniu J, przepływając przez pewien przewodnik w czasie t.

Z tego doświadczenia okaże się także:

Ilość ciepła wydzielonego jest proporcjonalna do czasu trwania prądu, bo słupek rtęci w termometrze wznosi się jednostajnie.

Ilość ciepła wydzielonego jest proporcjonalna do kwadratu natężenia użytego prądu, bo przy użyciu prądu zamiast jednego ogniwa dwóch, trzech i t. d. ogniw, gdy natężenie prądu staje się 2, 3, . razy większe, czas potrzebny do wzniesienia się słupka rtęci o pewną liczbę kresek jest 2^2, 3^2, . razy krótszy

Ilość ciepła wydzielonego zależy od długości, grubości i od materjału przewodnika.

Ilość ciepła wydzielonego nie zależy od kierunku prądu.

Powyższe prawa, wynikające z doświadczeń, objąć można równaniem·

$$\boxed{W = RJ^2t,}$$

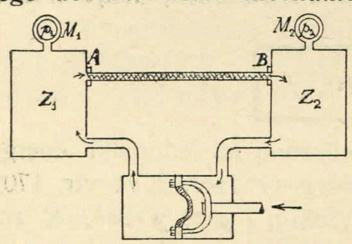
gdzie W oznacza ilość ciepła, przeliczoną na jednostki energji według związku $1\,kal = 4{,}19\ 10^7 erg$ (I Tabl. XVI str. 170), J natężenie prądu w *j. e. m. natężenia*, t czas w *sek*, R zaś przedstawia czynnik proporcjonalności, którym objęta jest nieznana nam jeszcze zależność od wymiarów i natury przewodnika.

Prawo, powyższem równaniem wyrażone, sprawdzone wynikami najdokładniejszych doświadczeń pomiarowych, nosi nazwę **prawa Joula**, dlatego też i ciepło, wytworzone w przewodniku prądem elektrycznym, nazywamy **ciepłem Joula.**

2. Powstawanie ciepła Joula daje się objaśnić przy pomocy teorji elektronowej prądu elektrycznego. W II § 51, 2 zastanawialiśmy się, na czem polega ruch elektryczności w przewodnikach i stwierdziliśmy, że w każdym przewodniku istnieć musi pewna ilość elektronów swobodnych, trwale lub chwilowo niezwiązanych z żadnym rdzeniem materjalnym. Gdy w dwóch punktach przewodnika wytworzy się, przez połączenie się z jakiemś źródłem elektryczności (maszyną influencyjną, ogniwem galwanicznem) różnica potencjałów, elektrony dążyć będą w stronę bieguna dodatniego, podczas gdy z bieguna odjemnego napływać muszą nowe elektrony w ilości, uzupełniającej ciągle ilość elektronów utraconych. Natężenie prądu, płynącego między dwoma przekrojami przewodnika, w którym liczba swobodnych elektronów jest stała, zależne jest od prędkości poruszających się elektronów, a ta od różnicy potencjałów, wytworzonej w tych przekrojach. Elektrony mają masę blisko 2000

razy mniejszą od masy atomu wodoru, a ten masę kilkadziesiąt razy mniejszą od masy atomu metalu. Tych elektronów jest przy natężeniach takich, jakie daje ogniwo galwaniczne, olbrzymia liczba (II § 53 Zad. 1), przeto muszą się poruszać z prędkościami ogromnemi, gdy droga ich wypadnie przez tak cienki drucik jak n. p. w lampce żarowej. Stąd pomimo swej małej masy, elektrony w ruchu muszą wpływać na cząsteczki materjalne przewodnika i wprawiać je w bezładny ruch drgający, który objawia się podwyższeniem jego temperatury (Porównaj I § 83, 1).

3. Całe to zjawisko możnaby przyrównać do następującego doświadczenia mechanicznego.



Ryc. 178.

Pompa powietrzna (ryc. 178) pompuje ustawicznie powietrze ze zbiornika Z_2 i wtłacza je do zbiornika Z_1. Zbiorniki te połączone są rurą AB, która jest wypełniona n. p. jednostajnie ugniecioną watą, stawiającą **opór** swobodnemu ruchowi cząstek powietrza. Wskutek tego prężności powietrza w zbiornikach nie mogą się natychmiast wyrównać, energja potencjalna cząstek (prężność) maleje w miarę posuwania się od A do B, mówimy, że wzdłuż przewodnika istnieje **spadek energji** potencjalnej, wskutek którego wzrasta energja kinetyczna ruchu cząstkowego w przewodniku czyli powstaje ciepło.

Gdy przy tej samej różnicy prężności powietrza w zbiornikach połączymy je dwiema jednakowemi rurami, to ilość powietrza przepływającego podwoi się i ilość ciepła wytworzonego podwoi się. Gdy jednak pozostawimy jedną rurę, ale powiększymy różnicę prężności tak, aby ilość przepływającego powietrza była dwukrotnie większa, to ciepło wytworzone będzie dwa razy większe z powodu większej masy powietrza, a prócz tego jeszcze dwukrotnie się zwiększy z powodu dwa razy większej prędkości cząstek powietrza, wskutek czego ilość wytworzonego ciepła będzie czterokrotnie większa.

Spadkowi energji potencjalnej, mierzonej różnicą prężności powietrza, odpowiada w prądzie elektrycznym **spadek potencjału** czyli **napięcia**, masie powietrza, płynącego przez rurę w jednostce czasu, odpowiada **natężenie prądu**, w obu zaś

1kal = 4,19 . 10⁷ erg
1erg = 1kal / 4,19 . 10⁷

przypadkach powstaje ciepło wskutek uderzeń cząstek powietrza — elektronów, o włókna waty — o cząstki materjalne przewodnika i to w ilości proporcjonalnej do kwadratu ilości powietrza przepływającego przez rurę w jednostce czasu — do kwadratu natężenia prądu.

4. Czynnik proporcjonalności R w równaniu $W = RJ^2t$ nazywamy **oporem** przewodnika, oporowi temu zawdzięczamy grzanie się przewodnika.

Jednostkę *e. m. oporu* przedstawia przewodnik, który wydziela z siebie ciepło w ilości równoważnej 1 *ergowi* na *sek*, gdy przezeń przepływa prąd o *j e. m. natężenia*.

Wymiar oporu obliczymy z powyższego równania:

$$[R] = \frac{erg}{(j.\,e.\,m.\ natężenia)^2 .\ sek} = \frac{gr\ cm^2\ sek^{-2}}{(gr^{\frac{1}{2}}\ cm^{\frac{1}{2}}\ sek^{-1})^2 .\ sek} = \frac{cm}{sek};$$

opór więc ma w układzie e. m. wymiar prędkości

Gdy w powyższem określeniu jednostki *e. m. oporu* podstawimy *Joule* zamiast *erga* i *Amper* zamiast *j e. m. natężenia*, otrzymamy jednostkę praktyczną oporu, którą nazywamy **Ohm** (oznaczenie Ω), zatem

$$1\Omega = \frac{1\ J}{(1\ A)^2\ sek} = \frac{10^7\ erg}{(\frac{1}{10}\ e.\ m.\ natężenia)^2\ sek} = 10^9\ e.\ m.\ oporu.$$

Megohm (oznaczenie $M\Omega$) jest jednostką miljon razy większą, zaś **mikrohm** (oznaczenie: $\mu\Omega$) jednostką miljon razy mniejszą, zatem $1\ M\Omega = 10^6\,\Omega$, $1\ \mu\Omega = 10^{-6}\,\Omega$.

*5. Opór rury napełnionej watą (ryc. 178) jest tem większy, im rura jest dłuższa, im mniejszy jej przekrój i im gęściej jest w niej wata ugnieciona. To samo rozumowanie zastosować można do przewodników prądu elektrycznego i doświadczeniem stwierdzić, że opór przewodnika jest wprost proporcjonalny do jego długości l, a odwrotnie do jego przekroju s, co napiszemy

$$\boxed{R = \rho\ \frac{l}{s}\ .}$$

Spółczynnik ρ nazywamy **oporem właściwym**, jest to opór przewodnika pewnego materjału, kształtu kostki o krawędzi 1 *cm*, dla prądu płynącego między dwiema przeciwległemi ścianami. W elektrotechnice opory podaje się w *Ohmach*, a opór właściwy, na który wypada zazwyczaj liczba bardzo mała, podają

1 joul = 1/4,19 kal = 0,24 kal
1kal = 4,19 joula

10^4 razy powiększony, określając go jako opór przewodnika o długości $l = 1\ m = 100\ cm$ i o przekroju $s = 1\ mm^2 = 0{,}01\ cm^2$ N. p. opór słupka rtęci o powyższych wymiarach w temperaturze 0^0 wynosi $0{,}95\ \Omega$, zatem $\rho = \frac{Rs}{l} = \frac{0{,}95\ \Omega \quad 0{,}01\ cm^2}{100\ cm} = 0{,}95 \,.\, 10^{-4}\ \Omega cm$ albo $95\ \mu\Omega\ cm$.

Najlepszemi przewodnikami są metale, a z nich srebro i miedź ($0{,}016 \quad 10^{-4}\ \Omega\ cm$ w temp. 18^0). Nawet najdrobniejsze zanieczyszczenia powiększają znacznie opór właściwy metali, stopy zaś ich mają opór zwyczajnie duży w stosunku do oporu składników. N p. konstantan, stop miedzi i niklu ma opór właściwy dochodzący do $0{,}49 \quad 10^{-4}\ \Omega\ cm$.

Prawo Joula stosuje się także i do cieczy, przewodzących prąd elektryczny czyli do **elektrolitów**, gdyż są także ciecze prądu nie przewodzące. W elektrolitach jednak przewodzenie prądu połączone jest zawsze z rozkładem chemicznym tych cieczy Jak różny jest sposób przewodzenia prądu w metalach i elektrolitach, tak różnie zachowują się one pod wpływem temperatury: z podwyższeniem temperatury opór metali rośnie, opór elektrolitów maleje. Są jednak i ciała stałe, które zachowują się na podobieństwo elektrolitów; n. p. węgiel, szkło, porcelana. Opór włókna węglowego w lampce żarowej świecącej, jest mniejszy od oporu jej w temperaturze zwyczajnej, gdy lampka światła nie daje. Szkło i porcelana są w zwykłej temperaturze bardzo dobremi izolatorami, w wysokiej temperaturze przewodzą prąd dobrze. Przedewszystkiem jednak należą tu tlenki pewnych rzadkich metali, które w wysokiej temperaturze są tak dobremi przewodnikami, że mogą zastąpić drucik metalowy w lampce żarowej (**lampka Nernsta**).

Oprócz ciepła i inne czynniki mogą mieć wpływ na opór przewodników W polu magnetycznem ciała ferromagnetyczne, użyte jako przewodniki, doznają zmiany oporu. W sposób szczególny zachowuje się **selen**, który w ciemności jest złym przewodnikiem prądu, oświetlony zaś przewodzi prąd 10 do 20 razy lepiej.

6. Opór właściwy metali rośnie z ich temperatura według prawa, analogicznego do rozszerzalności ciał (I § 58, 2):

$$\boxed{\rho_t = \rho_0\,(1 + \alpha t),}$$

gdzie ρ_0 jest oporem właściwym w temperaturze 0^0, ρ_t w temperaturze t^0, a α jest **spółczynnikiem termicznym oporu**. Nawet wartość tego spółczynnika dla metali czystych jest nie o wiele większa od $\gamma = 0{,}00367$, t. j. od spółczynnika rozszerzalności gazów (I § 68, 1), bo waha się od 0,0037 do 0,0042. Tylko węgiel, jak już wspomniano, stanowi wyjątek i ma spółczynnik odjemny. Stopy niektóre mają spółczynnik termiczny tak mały, że można uważać ich opór właściwy za niezależny od temperatury Korzysta się z tej ich własności przy wyrobie **oporów wzorcowych**.

Gdyby równanie powyższe było choć w przybliżeniu prawdziwe dla całego dostępnego nam zakresu temperatur, to w pewnej dostatecznie niskiej temperaturze opór metali powinien zmaleć do 0, mianowicie gdy $t = \frac{1}{\alpha}$ (Porównaj I § 69, 1 o temperaturze bezwzględnej). Badania oporów metali w niskich temperaturach potwierdzają ten wniosek wszystkie metale w niskich temperaturach mają opór bardzo mały, a niektóre z nich, jak rtęć, ołów, cyna, w pewnych temperaturach, bliskich bezwzględnego zera, nagle tracą zupełnie opór elektryczny

Wiemy już, że ruch przewodnika, tworzącego pasmo zamknięte w polu magnetycznem, wywołuje w nim prąd indukcyjny, trwający tak długo, jak długo trwa ruch (II § 57, 4). **Kammerlingh-Onnes** wytworzył prąd indukcyjny zamopocą zmiany pola magnetycznego w malutkiej zwojnicy zamkniętej, utworzonej z bardzo cienkiego drutu ołowianego, w temperaturze płynnego helu -271^0 Prąd ten, raz wytworzony, trwał potem dni całe, o czem się można było przekonać z wychylenia igiełki magnetycznej. Jak ciało materjalne, rzucone w przestrzeń, w której nie działają żadne opory, porusza się na podstawie prawa bezwładności ruchem jednostajnym bez uszczuplenia posiadanej energji ruchu, tak poruszają się elektrony w przewodniku w tej niskiej temperaturze.

Widocznie więc także ruch elektronów, okrążających rdzenie materjalne atomów, odbywa się tak, jak ruchy planet dokoła słońca, bez żadnej straty energji, bez wydzielania ciepła i dlatego ruch ten, jak w opisanem wyżej doświadczeniu, musi być wieczny Tylko wtedy, gdy roje elektronów swobodnych w swym ruchu ogólnym postępowym wpływają na ruch rdzeni materjalnych atomów, powstaje ciepło Joula.

7 Dla prądu o natężeniu J w przewodniku o oporze R, w czasie t, ilość energji, zamieniającej się w ciepło, jest $W = RJ^2t$; zatem **moc (dzielność)** prądu J, płynącego przez przewodnik R, jest

$$\boxed{P = \frac{W}{t} = RJ^2.}$$

Jednostki mocy podane są w I § 31

Jednostka *e. m. mocy = erg/sek.*

Jednostką praktyczną mocy jest **Watt** (oznaczenie. *W*)

$1\ W = 1\ J/sek = 10^7$ *e. m. mocy.*

Pytania.

1. Opisać zastosowanie ciepła Joula do oświetlenia elektrycznego. **Światło elektryczne** polega na tem, że na pewnym krótkim przewodniku moc prądu taką posiada wartość, iż ciepło wytworzone wystarcza do utrzymania przewodnika w rozżarzeniu do białej jasności. W **lampkach żarowych** używano dawniej włókna zwęglonej celulozy Dziś używa się powszechnie lampek, w których przewodnikiem świecącym jest bardzo cienki drucik z trudno topliwego metalu (wolframu, osmu, tantalu). Aby drucik ochronić przed spaleniem, zamyka się go w naczyniu szklanem, kształtu gruszki, z którego wnętrza usunięto powietrze albo którego wnętrze wypełniono jakimś obojętnym gazem. W **lampce Nernsta** przewodnik jest pręcikiem utworzonym z tlenku jakiegoś rzadkiego metalu n. p. cyrkonu. Pręcik ten musi być wprzód podgrzany, ponieważ na zimno prądu nie przewodzi. W **lampie łukowej** przewodnik składa się z dwóch prętów węglowych prawie stykających się Gdy prąd przechodzi, węgle rozsuwają się cokolwiek, ale prąd nie przerywa się, ponieważ wytwarza się między węglami warstwa rozżarzonego powietrza, napełnionego parami węgla, co stanowi dla prądu drogę przewodnią, gdyż powietrze w tej wysokiej temperaturze jest zjonizowane. Ciepło, wytworzone w lampach elektrycznych jest tylko środkiem, wiodącym do celu, do świecenia. Wszystkie ulepszenia dążą do tego, aby otrzymać o ile możności dużo światła przy możliwie małem wytwarzaniu ciepła. Ideałem takiego oświetlenia byłoby światło zimne, jakiego przykłady mieliśmy w świeceniu gazów rozrzedzonych. Praktyczne zastosowanie **jarzenia się** gazów rozrzedzonych osiągnęła lampka jarząca i światło Moora. W **lampce jarzącej**, podobnej kształtem do zwykłej żarówki, są dwie elektrody w niewielkiem od siebie oddaleniu. Przestrzeń wewnątrz lampki wypełniona jest rozrzedzonym neonem, który pod wpływem prądu świeci barwą różową. **Światło Moora** stanowią bardzo długie rurki Geisslerowskie. Używają go do oświetlania wnętrz, wystaw; odznacza się tem, że jest najbardziej zbliżone do światła dziennego, rozprószonego.

2. Opisać zastosowania ciepła Joula do ogrzewania.

Przyrządy, do tego celu służące, nazywamy **grzejnikami**. Są one zbudowane albo na podobieństwo lamp żarowych albo łukowych. W grzejnikach pierwszego typu ciałem grzejącem jest drut z trudno topliwego metalu (niklu), nawinięty w wielu skrętach na powierzchnię, która ma być ogrzaną. Druty muszą być chronione od przystępu powietrza, aby rozżarzone nie spalały się. W grzejnikach drugiego typu, **piecach elektrycznych**, ciałem ogrzewającem jest płomień łuku elektrycznego, zapomocą którego można otrzymywać temperatury do 3000°

3. Opisać zasadę **galwanometru cieplnego**.

Wydłużenie się przewodnika, ogrzewanego prądem, może służyć do pomiaru natężenia prądu. Budowa galwanometru podana jest w I § 58 Ćw. 2, Ryc. 73. Podziałka nie może być jednostajna, ponieważ wydłużenie drutu jest proporcjonalne do J^2 Wskazania galwanometru cieplnego są niezależne od kierunku prądu, żadne też pola magnetyczne nie mają na nie wpływu.

4. Do czego służą **stopki** czyli **bezpieczniki**?

Ponieważ przewodniki prądu zawsze się grzeją, przeto może zachodzić obawa, żeby przy zbyt wielkiem natężeniu prądu jakaś część przewodu nie uległa uszkodzeniu albo żeby przez rozżarzenie się przewodnika nie nastąpił pożar. Aby się przed tem zabezpieczyć, umieszcza się w każdym zamkniętym przewodzie stopkę, t. j. cienki drucik łatwo topliwego materjału (ołowiu, cyny, srebra) tak cienki, żeby przy przekroczeniu dozwolonego natężenia stopił się i przerwał prąd w obwodzie.

5. Co stanie się z żarówką okopconą albo wstawioną w pudełko z ubitą watą, gdy połączymy ją z prądem miejskim?

Ponieważ ciepło wewnątrz powstające nie może promieniować na zewnątrz, żarówka ogrzeje się do tak wysokiej temperatury, że szkło zmięknie, ciśnienie powietrza zgniecie żarówkę i wata zapali się.

Ćwiczenia.

*1. Lampkę żarową, poczernioną lakierem, (aby zabezpieczyć ją przed promieniowaniem na zewnątrz) wstaw w kalorymetr wodny i połącz ją przez ampermetr i wyłącznik z prądem miejskim. Zapisuj natężenie prądu i temperaturę wody co minutę, aż do podwyższenia się temperatury wody o 10°. Z masy wody i przyrostu temperatury oblicz ilość ciepła, wydanego przez żarówkę w zmierzonym czasie, a stąd ilość ciepła, wydawanego na sekundę. Ilość ta przeliczona na *Joule/sek* daje moc prądu w żarówce. Oblicz stąd opór lampki.

*2. Dwa naczyńka z rtęcią połącz rurką włoskowatą o długości 10 *cm*, o wewnętrznej średnicy 1 *mm*, zgiętą w kształcie odwróconej litery U Do naczyń z rtęcią wstaw przewody baterji 2 do 4 ogniw. Ciepło, powstające w wąskiej rurce zamienia rtęć w parę, wskutek czego prąd się przerywa, ale natychmiast para skrapla się, prąd przechodzi i gra zaczyna się na nowo. Zjawisko to połączone jest z charakterystycznym szmerem i świeceniem rtęci.

*3. Przyrząd opisany w I § 58 Ćw. 2, Ryc. 73 połącz w szereg z ogniwem, galwanometrem i opornicą. Zmieniając opory, otrzymasz różne natężenia prądu i różne wychylenia wskazówki. Przekonaj się, że wychylenia wskazówki są proporcjonalne do kwadratu natężenia.

Zadania.

1. Jaka jest moc prądu w przewodniku o oporze 4 Ω, przez który płynie prąd o natężeniu 15 A?

2. Na przewodniku o oporze 32 Ω moc prądu ma wynosić 32 KP. Jakie musi być natężenie tego prądu? (Według I § 31, 1 koń parowy $KP = 735{,}75\ W \sim 736\ W$).

3. Napisać prawo Joula w formie takiej, aby ciepło prądu było podane wprost w *kal*, gdy opór i natężenie prądu podane są w jednostkach praktycznych.

$$\left(W = RJ^2 t\ Joul\acute{o}w = RJ^2 t\ \frac{1}{4{,}19}\ kal = 0{,}24 \cdot RJ^2 t\ kal\right)$$

4. Prąd $J = 0{,}5\ A$, płynący przez żarówkę, wytwarza ciepło $W = 150$ *kal* w czasie $t = 10$ *sek*. Jaki jest opór lampy? ($R = W : J^2 t$).

5. Elektromagnesy silnika elektrycznego zawierają $m = 11340$ *gr* miedzianego drutu o oporze 100 Ω. Jak wzrasta temperatura nawinięcia przy natężeniu prądu 0,5 A, gdy ciepło właściwe miedzi $c = 0{,}094\ kal/gr\ st$?

(Ilość ciepła powstającego w nawinięciu w sekundzie jest $P = RJ^2 = 100\ \Omega\ 0{,}25\ A^2 = 25\ J/sek = \frac{25}{4{,}2}\ kal/sek$. Jeżeli θ oznacza wzrost temperatury w nawinięciu w sekundzie, to według I § 70, 2 ilość ciepła powstającego w sekundzie jest $P = mc\theta$, przeto

$$\theta = \frac{P}{mc} = \frac{25\ kal}{4{,}2\ sek\ \ 11340\ gr\ \ 0{,}094\ kal/gr\ st} = 0{,}056\ st/sek.)$$

6. Jaki jest opór $l = 2\ km$ drutu miedzianego, $2a = 0{,}2\ mm$ grubego, w temperaturze $t = 40^0$, gdy w temperaturze 18^0 opór właściwy $\rho_{18} = 0{,}017\ \ 10^{-4}\ \Omega\ cm$, a spółczynnik termiczny oporu $\alpha = 0{,}0040/st$?

$$\left(R_t = \rho_t\ \frac{l}{s} = \rho_{18}\left[1 + \alpha\ (t - 18)\right]\ \frac{l}{a^2\pi}\right).$$

7 Włókno węglowe lampki żarowej ma opór 274 Ω w temperaturze 0^0, a 220 Ω w temperaturze 1000^0; jaki jest średni spółczynnik termiczny oporu w granicach temperatur od 0^0 do 1000^0?

§ 59. Siła elektromotoryczna.

1 Zastanówmy się teraz nad całem pasmem przewodniem, przez które płynie prąd. Tylko w przypadku, o którym była mowa w II § 58, 6, prąd wzbudzony działaniem jakiejś siły, mógłby płynąć wiecznie, niejako mocą bezwładności poruszających się elektronów; w każdym innym razie prąd płynący wytwarza w przewodnikach ciepło, a według zasady zachowania energji (I § 34) może ono powstać tylko przy równoczesnym ubytku energji w innym punkcie pasma przewodniego i to w ilości ściśle równoważnej wytworzonemu ciepłu.

Zastosujmy to rozumowanie do ogniwa, opisanego w II § 53, 3. Stwierdziliśmy tam, że wewnątrz ogniwa podczas płynięcia

prądu odbywają się różne zmiany, że jednak wszystkie te zmiany możemy odnieść do cynku, którego ubywa przy 1 A prądu 0,00034 *gr/sek*, a natomiast powstaje odpowiednia ilość siarczanu cynkowego. Powstanie siarczanu cynkowego połączone jest z wydzielaniem się ciepła i moglibyśmy powiedzieć, że jak w silniku kalorycznym (I § 84) źródłem energji jest ciepło, powstające przez połączenie się węgla z tlenem, tak w o g n i w i e g a l w a n i c z n e m ź r ó d ł e m e n e r g j i j e s t c i e p ł o łączenia się Zn z SO_4 na $ZnSO_4$ i że jak w silniku kalorycznym nie cała ilość energji, ze spalenia powstałej, może być zamieniona w energję mechaniczną (porównaj I § 84, 2, **Zasada Carnota**), tak i w o g n i w i e g a l w a n i c z n e m n i e c a ł a i l o ś ć c i e p ł a ł ą c z e n i a s i ę c y n k u m u s i s i ę z a m i e n i a ć w e n e r g j ę e l e k t r y c z n ą. N p. w przypadku ogniwa opisanego (cynk i węgiel w kwasie siarkowym) tylko $14\frac{1}{2}\%$ energji chemicznej zmienia się w energję prądu, reszta zaś występuje jako nieużyteczne ciepło w ogniwie.

Zmierzono, że gdy z cynku w ilości 0,00034 *gr* powstaje siarczan cynkowy, równocześnie wydziela się 1,25 *kal*. Gdy więc ogniwo daje prąd 1 A, co sekundę wydziela się 1,25 *kal*, z których $14\frac{1}{2}\%$ t. j. 0,18 *kal/sek* stanowi energję prądu, a reszta t. j. 1,07 *kal/sek* obraca się na ogrzanie ogniwa.

Opisane ogniwo pracuje bardzo nieekonomicznie. W ogniwie chromowem, które składa się także z cynku i węgla, ale zanurzonych w mieszaninie roztworu dwuchromianu potasowego w kwasie siarkowym, 38% energji chemicznej cynku zamienia się w energję elektryczną, zatem z 1,25 *kal/sek* przypada na energję elektryczną 0,475 *kal/sek*, a reszta 0,775 *kal/sek* na ogrzewanie ogniwa. Chociaż więc oba ogniwa tym samym kosztem cynku 0,00034 *gr/sek* dają prąd o tem samem natężeniu 1 A, to przecież ogniwo chromowe ma moc większą; pierwsze ogniwo daje energję elektryczną w ilości 0,18 *kal/sek* = = 0,76 J/sek = 0,76 W, drugie zaś w ilości 0,475 *kal/sek* = = 2 J/sek = 2 W ($Joule/sek = Watt$).

2. Zastanówmy się nad tem, skąd się bierze prąd w ogniwie. Wstawmy w roztwór kwasu siarkowego pręt cynkowy z chemicznie czystego materjału; nie ujrzymy prawie żadnego działania chemicznego. Połączmy jednak wystający koniec cynku z bardzo czułym elektroskopem, a zauważymy, że cynk ma na sobie nabój odjemny. Podobnie możemy stwierdzić, gdy drut jakiś, od elektroskopu prowadzący, wstawimy w kwas siarkowy,

że kwas naelektryzowany jest dodatnio. Widocznie przy zetknięciu się cynku z kwasem siarkowym a) cynk roztwarza się w cieczy, t. zn. atomy cynku dyfundują w ciecz, b) równocześnie elektrony oddzielają się od atomów cynku i wracają na pręt cynkowy czyli dyfundują w masę metaliczną, c) wynikiem tych obu dyfuzyj jest powstanie cząsteczek siarczanu cynkowego i rozdział naboi przeciwnego znaku. Dyfuzja ta jednak musi natychmiast ustać, i to jest powodem, dlaczego nie spotrzegamy żadnego działania chemicznego kwasu siarkowego na cynk, mianowicie musi ustać wtedy, gdy w sąsiedztwie cynku powstanie warstewka tak nasyconego siarczanu cynkowego, iż więcej cynku już w niej roztworzyć się nie może, a na samym cynku gdy powstanie taki potencjał odjemnej elektryczności, iż już więcej elektronów nań wrócić nie może.

Można sobie wyobrazić, że ta cieniutka warstewka nasyconego siarczanu cynkowego stanowi dielektryk kondensatora, którego odjemną okładką jest cynk, dodatnią zaś kwas siarkowy i że kondensator ten jest tem szczególny, że sam się elektryzuje do pewnego potencjału. Aby kondensator rozbroić, trzeba tylko jego okładki metalicznym przewodnikiem połączyć, lecz po połączeniu w tym kondensatorze powstają coraz nowe ilości naboi, które ustawicznie napływają przez kondensator i ustawicznie rozbrajają się przez przewodnik zewnętrzny tak, iż na okładkach kondensatora czyli na biegunach ogniwa utrzymuje się stała różnica potencjałów, a przez pasmo przewodnie zamknięte ogniwa płynie **prąd trwały.**

Różnicę potencjałów, którą mierzymy na biegunach ogniwa, niepołączonych z sobą przewodnikiem, nazywamy **siłą elektromotoryczną** ogniwa E_s; ona według określenia w II § 45, 3 równa jest pracy, jaką musiałyby wykonać siły elektryczne, aby przenieść dodatnią jednostkę elektryczności od bieguna węglowego do bieguna cynkowego, zewnątrz ogniwa, w polu elektrostatycznem, przez powietrze, ona równa się pracy, dostarczonej kosztem spalania się cynku w ogniwie, jakiej potrzeba, aby przenieść tę samą dodatnią jednostkę elektryczności z potencjału niższego na cynku do potencjału wyższego na węglu.

Gdy bieguny ogniwa połączymy przewodnikiem, różnica potencjałów na biegunach staje się mniejszą od wartości, którą

nazwaliśmy siłą elektromotoryczną ogniwa. Różnicę potencjałów E, jaka występuje w dwóch punktach przewodnika, gdy przezeń płynie prąd elektryczny, $J = \frac{Q}{t}$, nazywamy **napięciem.**

Powołując się na II § 45, 3, napiszemy

$$\boxed{W = EQ}$$

i

$$P = \frac{W}{t} = E\,\frac{Q}{t} = EJ$$

3. Można wyprowadzić pewne pouczające analogje między ogniwem galwanicznem, a jakimkolwiek innym generatorem energji. Moc generatora, mierzona ilością pracy wydanej w sekundzie, wyraża się zawsze iloczynem dwóch czynników. jeden z nich przedstawia napięcie (n. p. siły), drugi wydatek (n. p. masy). N. p. siła F, poruszająca masę m na drodze s w czasie t z prędkością stałą $c = \frac{s}{t}$, pracuje z mocą

$$P = Fc = \frac{Fs}{m} . \frac{m}{s:c} = \frac{W}{m}\;\frac{m}{t} \text{ (napięcie} \times \text{wydatek).}$$

Weźmy jeszcze pod uwagę pompę powietrzną, opisaną w II § 58, 3, ryc. 178 i obliczmy jej moc. Wskutek ruchu tłoka pompy wytwarza się w zbiorniku Z_1 prężność powietrza p_1, w drugim zaś zbiorniku Z_2 prężność p_2. Prężności te mogą być odczytane na manometrach M_1 i M_2 w bezwzględnych wielkościach. Stąd występuje w punktach A i B różnica ciśnień $p_1 \; p_2$ czyli siła $(p_1 \; p_2)\, s$, pędząca powietrze przez rurę o przekroju s. Gdy prędkość przeciskania się powietrza przez watę jest c, to moc prądu powietrza równa się według I § 31,1 $(p_1 \; p_2) sc$. Lecz sc oznacza objętość powietrza v, przeciskającego się przez rurę w jednostce czasu, zatem moc ta równa się $P = (p_1 - p_2) . v$. Gdy w jest wydatkiem prądu czyli masą powietrza przepływającego w jednostce czasu, d jego gęstością, to $v = \frac{w}{d}$, zatem

$$P = \frac{p_1 \quad p_2}{d} . w$$

Zastanówmy się nad znaczeniem tego wyrażenia. Czynnik $\frac{p_1 \quad p_2}{d}$ ma wymiar $\frac{dyna}{cm^2} \;\; \frac{gr}{cm^3} = \frac{dyna \;\; cm}{gr} = \frac{erg}{gr}$; jest to więc praca, jaką wykonywa tłok pompy, przeciskając 1 gr masy powietrza od prężności p_1 do p_2. Wskutek tego możemy wyrażenie powyższe nazwać **siłą aeromotoryczną,** siłą poruszającą powietrze w pompie. Czynnik ten odpowiada sile elektromotorycznej E, sile pędzącej elektryczność w ogniwie.

Drugi czynnik $w = vd$ ma wymiar $\frac{cm^3}{sek} \frac{gr}{cm^3} = \frac{gr}{sek}$; jest to więc **wydatek prądu** powietrza, co odpowiada natężeniu prądu elektrycznego J.

Zatem tak dla pompy, jak dla ogniwa galwanicznego można napisać przy odpowiedniem znaczeniu liter

$$\boxed{P = EJ}$$

4. Siłę aeromotoryczną można mierzyć w rozmaite sposoby Można odczytać na manometrach prężności p_1 i p_2 i utworzyć wyrażenie $\frac{p_1}{d}$ $\frac{p_2}{d}$. Każdy z tych składników oznacza ilość energji potencjalnej, zawartej w 1 *gr* powietrza, odpowiednio sprężonego, oznacza też pracę, potrzebną do tego, aby 1 *gr* powietrza od prężności 0 doprowadzić do prężności p_1 albo p_2 (Porównaj II § 46, 2). Siła aeromotoryczna jest więc różnicą energij potencjalnych 1 *gr* powietrza. Podobnie w ogniwie możemy zmierzyć wartości bezwzględne potencjałów na biegunach, a wtedy różnica ich jest siłą elektromotoryczną ogniwa.

Można też tłok pompy wykonać z materjału sprężystego w formie błony, która za każdem poruszeniem wydyma się i z wielkości napięcia błony określać wielkość siły aeromotorycznej. W ogniwie zamiast tej błony mamy warstewkę, tworzącą kondensator, a napięcie elektryczności na jego okładkach jest siłą elektromotoryczną ogniwa. Tę siłę w ust. 1 obliczaliśmy, mierząc energję kalorymetrycznie.

Pytania.

1. Czy nazwa „siła elektromotoryczna" jest poprawna ?

Nie, bo nie jest siłą i nie mierzy się *dynami*, lecz jest różnicą potencjałów i mierzy się *Voltami*.

2. Czy można mówić o mocy ogniwa i o sile elektromotorycznej ogniwa w znaczeniu jakichś stałych ogniwa?

Siła elektromotoryczna jest wielkością stałą dla pewnego ogniwa, niezależną ani od wielkości elektród, ani od ich oddalenia. Zmienia się tylko, gdy zmienia się temperatura i chemiczny charakter elektród. Natomiast moc prądu ogniwa jest zmienna, proporcjonalna do natężenia prądu, jak to wynika z równania $P = EJ$, które odnosić się może albo do całego pasma przewodniego, albo do jakiegokolwiek jego odcinka.

Zadania.

1. Prąd $J = 0{,}5\,A$, płynący przez żarówkę, wytwarza $W = 150$ *kal* w czasie $t = 10$ *sek*. Obliczyć napięcie prądu na biegunach żarówki. $\left(P = \frac{W}{t} = 15\ kal/sek = 15 . 4{,}2\ J/sek = 63\ W;\ E = \frac{P}{J} = \frac{63\ W}{0{,}5\ A} = 126\ V\right)$.

2. **Żarówka półwattowa** jest to żarówka z drucikiem wolframowym, napełniona do $\frac{2}{3}\,at$ azotem, która wymaga tylko $\frac{1}{2}\,W$ mocy na 1 świecę podczas gdy żarówki z włóknem węglowem zużywają 4 do 3 *W* na świecę, a żarówki z drucikiem metalowym w próżni 1,25 do 0,8 *W* na świecę,

Sala balowa oświetlona jest 100 żarówkami półwattowemi o jasności po 600 świec każda. Jakiego natężenia prądu potrzeba, gdy napięcie prądu miejskiego wynosi 220 *V*? Ile kosztuje to oświetlenie przez 8 godzin, jeżeli za *kWh* (kilowattgodzinę) płaci się 0,8 *zł*? (Całkowite oświetlenie 60 000 świec wymaga mocy 30 *kW*; w ciągu 8 godzin zużywa się energji 240 *kWh*, co kosztuje 192 *zł*. Natężenie prądu $J = \frac{P}{E} = \frac{30000\ W}{220\ V} \sim 137\ A$).

3. Silnik elektryczny, otrzymujący prąd 80 *A* o napięciu 110 *V*, wykazuje moc 10 *KP*. Jaka jest sprawność silnika? (**Sprawnością** η silnika nazywamy stosunek pracy użytecznej silnika do włożonej weń energji; $\eta = \frac{10\ KP}{80\ \ 110\ VA} = \frac{10\ \ 736\ W}{8800\ W} \sim 0{,}84 = 84\%$).

4. Ile elektryczności może dać ogniwo, którego elektroda cynkowa, stykająca się z elektrolitem, ma masę 180 *gr*? (Na 1 $C = 1$ *Asek* potrzeba 0,00034 *gr* cynku, więc 180 *gr* cynku wystarczy na wytworzenie $\frac{180}{0{,}00034}\ A\,sek = \frac{180}{0{,}00034\ \ 3600}\ Ah = 147\ Ah$).

5. Jaką ilość i wartość energji przedstawia 180 *gr* cynku w ogniwach, opisanych w ust. 1? (Ponieważ $W = EJt$, przeto dla pierwszego ogniwa $W = 0{,}76\ \ 147\ VAh = 111{,}7\ Wh$, dla drugiego $W = 2\ \ 147\ VAh = 294\ Wh$, a gdy 1 *kWh* kosztuje 0,4 *zł*, to wartość tej energji, obliczona po cenie prądu miejskiego, jest 0,05 i 0,12 *zł*).

§ 60. Prawa Ohma i Kirchhoffa.

1 Pasmo przewodnie składać się może z wielu przewodników o różnych oporach Weźmy pod uwagę tylko jedną część pasma przewodniego o oporze R, na którego końcówkach istnieje napięcie E i przez który płynie prąd o natężeniu J Jeżeli na tej części przewodnika prąd żadnej innej pracy nie wykonywa prócz pracy ciepła, to moc tego prądu możemy w dwojaki sposób wyrazić

$$P = R\,J^2 = EJ,$$

a stąd otrzymujemy

$$\boxed{E = R\,J.}$$

Prawo, powyższem równaniem przedstawione, nosi nazwę **prawa Ohma**. Mówi ono, że natężenie prądu, płynącego przez pewien przewodnik, jest proporcjonalne do napięcia, panującego na końcówkach przewodnika. Ponieważ natężenia i napięcia mierzyć umiemy zapomocą galwanometru i elektrometru, przeto można prawo to stwierdzić doświadczalnie z wszelką ścisłością i okazuje się, że prawo Ohma jest prawdziwe, gdy prąd żadnej innej pracy nie wykonywa prócz pracy ciepła, a więc jest prawdziwe dla prądów trwałych w przewodnikach stałych i ciekłych, nie jest zaś prawdziwe dla gazów, gdzie odbywa się jonizacja cząstek gazowych, ani też dla prądów nietrwałych, które wywołują zmiany pola elektromagnetycznego.

2. Prawo Ohma łączy określone już jednostki *Volt*, *Ohm* i *Amper* równaniem

$$V = \Omega \quad A,$$

możemy więc na jego podstawie ustalić inne praktyczniejsze określenia tych jednostek

Natężenie 1 A ma prąd, który w ogniwie galwanicznem zużywa 0,00034 *gr* cynku w 1 *sek* (II § 53, 3).

Wzorem **oporu** 1 Ω jest słupek rtęci o stałym przekroju 1 mm^2, a o długości 106,4 *cm* w temperaturze 0^0.

Napięcie 1 V istnieje na końcówkach przewodnika o oporze 1 Ω, gdy przezeń przepływa prąd o natężeniu 1 A.

3. Gdy między dwoma punktami pasma przewodniego istnieje kilka dróg prądu, mówimy, że w tych punktach prąd jest **rozgałęziony** Ponieważ elektryczność, stanowiąca prąd trwały, nigdzie nie może się gromadzić i w zachowaniu swem zupełnie odpowiada cieczy w rurach płynącej przeto zachowywać się także musi jak ciecz w rozgałęzieniach suma natężeń prądów, wpływających do punktu rozgałęzienia, równa się sumie natężeń prądów z tego punktu wypływających

Jeżeli prądy wpływające uważać będziemy za dodatnie, wypływające za odjemne, to można także powiedzieć:

W punkcie rozgałęzienia suma algebraiczna natężeń prądów jest zerem, co napiszemy symbolicznie

$$\boxed{\Sigma J = 0}$$

Jest to **pierwsze prawo Kirchhoffa.**

4. Zastanówmy się nad jakiemkolwiek pasmem zamkniętem prądu rozgałęzionego i badajmy bezwzględne wartości potencjałów na całym jego obwodzie: w jednych częściach pasma przewodniego potencjał rośnie, w innych maleje, w sposób ciągły, wedle prawa Ohma $E = RJ$, w niektórych zaś miejscach doznaje nagłego skoku, mianowicie w warstwach, gdzie jest czynna siła elektromotoryczna E_s, po przejściu jednak całego pasma zamkniętego wracamy do punktu wyjścia z tą samą wartością potencjału, z którą wyszliśmy Stąd wynika, że że **w zamkniętym obwodzie prądu** suma algebraiczna wszystkich skoków potencjału — sił elektromotorycznych — musi być równa sumie algebraicznej napięć, co napiszemy

$$\Sigma E_s = \Sigma R J = \Sigma E,$$

albo, gdy litera E oznaczać będzie zarówno siły elektromotoryczne, jak i napięcia, brane ze znakiem przeciwnym temu, jaki wskazuje kierunek prądu, można napisać, jako **drugie prawo Kirchhoffa,**

$$\boxed{\Sigma E = 0}$$

Pytania.

1 Co oznacza pierwsze prawo Kirchhoffa?

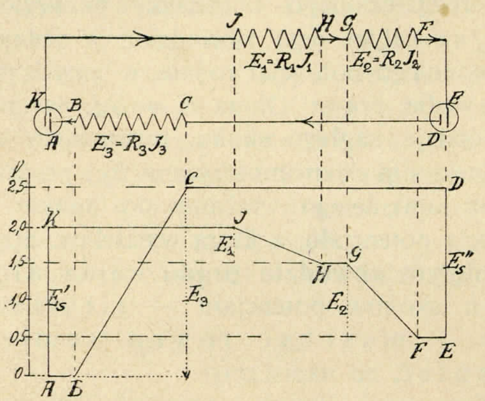
W pierwszem prawie jest tylko mowa o elektryczności płynącej przez punkt rozgałęzienia i że tej elektryczności nie można zebrać, nie można magazynować w przewodnikach Jest ono wyrazem tego, że w przewodniku jest pewna ilość swobodnych elektronów i że ta ilość nie ulega zmianie, bo ile elektronów wpływa z jednej strony przekroju przewodnika, tyle z drugiej strony wypływa.

Pierwsze prawo Kirchhoffa ważne jest tylko dla przewodników z tego samego metalu i w tej samej temperaturze Gdy prężność elektronów w dwóch różnych metalach jest rozmaita, to przy zetknięciu się metali nastąpi dyfuzja elektronów w stronę mniejszej ich prężności.

Prąd przez miejsce zetknięcia dwóch metali przesyłany może tej dyfuzji pomagać lub przeszkadzać; w pierwszym razie przez to miejsce przepływa więcej elektronów niż przez każdy inny przekrój przewodnika i wskutek tego miejsce spojenia metali ogrzewa się, w drugim razie mniej i miejsce to jest chłodniejsze od reszty przewodników. Jest to **zjawisko Peltiera.**

2. Wyjaśnij drugie prawo Kirchhoffa graficznie na przykładzie dwóch ogniw, połączonych w szereg z dowolnemi oporami.

Weźmy przykład następujący (ryc. 179), gdzie



Ryc 179.

$$E_s' = E_s'' = 2\ V,\ R_1 = 1\ \Omega,\ R_2 = 2\ \Omega,\ R_3 = 5\ \Omega.$$

Według drugiego prawa Kirchhoffa

$$E_s' - R_1 J \quad R_2 J + E_s'' \quad R_3 J = 0,$$

stąd

$$J = \frac{E_s' + E_s''}{R_1 + R_2 + R_3} = \frac{4\ V}{8\ \Omega} = \tfrac{1}{2}\ A;$$

$$E_1 = R_1 J = \tfrac{1}{2}\ V,\ E_2 = R_2 J = 1\ V,\ E_3 = R_3 J = 2\tfrac{1}{2}\ V$$

(Opory wewnętrzne ogniw uważaliśmy w tym przypadku za tak małe, że można je było zaniedbać)

3 Co się dzieje, gdy w paśmie zamkniętem, nierozgałęzionem, suma sił elektromotorycznych równa się zeru?

Według drugiego prawa Kirchhoffa, gdy $\Sigma E_S = 0$, to także $\Sigma R\ J = (R_1 + R_2 + \ \ )\ J = 0$, skąd $J = 0$; wtedy prąd nie płynie.

4. Jaka jest różnica w zachowaniu się elektryczności statycznej i prądu elektrycznego na przewodniku?

Elektryczność statyczna gromadzi się tylko na powierzchni przewodników, prąd zaś płynie całym przekrojem drutu, gdyż opór drutu zależy od wielkości przekroju i od materjału przewodnika.

5. Jak należy zbudować ogniwo, aby jego opór wewnętrzny był jak najmniejszy?

Według prawa Ohma należy zbliżyć do siebie elektrody, jak można najbardziej, powiększyć ich powierzchnię i używać elektrolitu w takiem stężeniu, aby jego opór właściwy był najmniejszy.

6. Jak należy rozumieć, że gazy nie stosują się do prawa Ohma?

Opór ciał stałych i elektrolitów jest wielkością, niezależną od napięcia na ich końcówkach. W gazach jest opór tem mniejszy, im większe napięcie.

Ćwiczenia.

*1. Zmierz siłę elektromotoryczną ogniwa przy pomocy galwanometru o wielkim oporze.

W ogniwie rozróżniamy opór zewnętrzny R_z i wewnętrzny R_w (ryc. 180). Nazwijmy potencjały na cynku V_{Zn}, na węglu V_C, w kwasie siarkowym w warstewce przylegającej do cynku V_k, to siła elektromotoryczna ogniwa $E_s = V_k \quad V_{Zn}$, a gdy prąd płynący ma natężenie J, według prawa Ohma jest

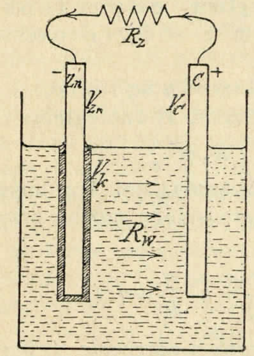
$$V_k - V_C = R_w J \quad \text{i} \quad E = V_C \quad V_{Zn} = R_z J$$

zatem

$$E_s = V_k \quad V_{Zn} = (R_w + R_z)\ J$$

i

$$\frac{E_s}{E} = \frac{R_w + R_z}{R_z} = \frac{R_w}{R_z} + 1$$



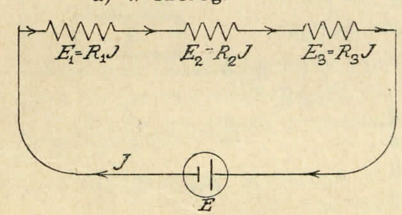
Ryc 180

E nazwaliśmy napięciem ogniwa, jest ono zawsze mniejsze od E_s, ale zbliża się do E_s gdy $R_z = \infty$; zatem siła elektromotoryczna ogniwa równa się napięciu ogniwa dla oporu zewnętrznego bardzo wielkiego.

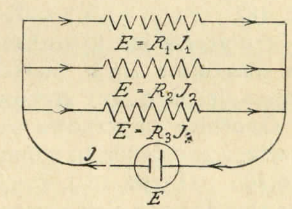
Jeżeli więc włączymy w obwód ogniwa ampermetr o wielkim oporze znanym R_z to odczytawszy natężenie prądu J, obliczymy $E_s \cong E = R_z J$. Zamiast obliczać napięcia można ampermetr opatrzyć już gotową podziałką w *Voltach*. Taki galwanometr nazywamy **woltmetrem**.

*2. Znaleźć **opór całkowity** R_c równoważny kilku oporom R_1 R_2, R_3, , połączonym (ryc 181)

a) w szereg. b) równolegle.



Ryc. 181 a.



Ryc. 181 b.

Zastosujemy prawa Kirchhoffa

$\boxed{E = E_1 + E_2 + E_3,}$	$E = E_1 = E_2 = E_3,$
$J = J_1 = J_2 = J_3,$	$\boxed{J = J_1 + J_2 + J_3,}$
$E = (R_1 + R_2 + R_3)\ J = R_c\ J,$	$J = E\left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3}\right) = \frac{E}{R_c}$
$\boxed{R_c = R_1 + R_2 + R_3}$	$\boxed{\frac{1}{R_c} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3}}$

Widzimy z powyższego, że

przy łączeniu oporów **w szereg** opór całkowity równa się sumie oporów częściowych;

przy łączeniu oporów **równoległem** odwrotność oporu całkowitego równa się sumie odwrotności oporów częściowych.

W szczególności, gdy opory częściowe w liczbie n są równe,

przy łączeniu w szereg — przy łączeniu równoległem

$$R_c = n R, \qquad R_c = \frac{1}{n} R$$

Wykonać doświadczenia z 6 jednakowemi żarówkami łączonemi w szereg i równolegle. Ponieważ napięcie prądu miejskiego można przyjąć za stałe, otrzymuje się natężenie prądu

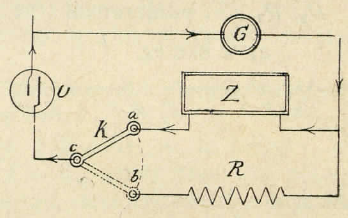
$$J_c = \frac{E}{R_c} = \frac{1}{n}\frac{E}{R} = \frac{1}{n} J, \qquad J_c = \frac{E}{R_c} = n\frac{E}{R} = n J$$

Natężenie prądu J_c, przy włączeniu n lampek i natężenie J, przy włączeniu jednej lampki, odczytujemy na ampermetrze. Odczytane natężenia przy łączeniu w szereg, cokolwiek różnią się od obliczonych, ponieważ opór lampki zimnej jest różny od oporu lampki gorącej. Przekonywamy się jednak z tego, w jakich szerokich granicach można zmieniać natężenie prądu przy użyciu **opornicy lampkowej**

*3. Opisać różne rodzaje opornic, jakie znajdują się w zbiorach szkolnych.

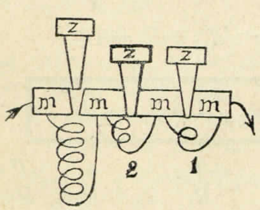
*4. Zmierzyć opór **metodą podstawienia.**

Zestawia się ogniwo O, galwanometr G, opornicę zatyczkową Z, opór badany R i przełącznik K, jak na ryc. 182.



Ryc. 182.

Przełącznik jest to korbka metalowa, obracająca się w punkcie c, dotykająca jednego ze **stykow** a lub b. **Opornica zatyczkowa** składa się z szeregu zwojów drutu o oporach 1, 2, 2, 5, 10, Ω (ryc. 183). Zwoje te są w ten sposób obok siebie zestawione, że koniec jednego drutu i początek sąsiedniego są przytwierdzone do tej samej części sztaby mosiężnej m. Między sąsiednie części można wstawiać metalowe zatyczki z. Gdy wszystkie zatyczki są w swych miejscach osadzone, prąd przechodzi przez sztabę, której opór jest prawie zerem. Po wyjęciu jednej lub kilku zatyczek prąd przechodzi przez jeden lub kilka zwojów

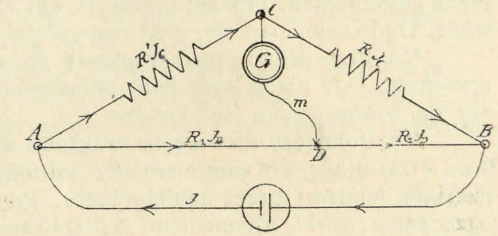


Ryc. 183.

Przekładamy przełącznik na b i notujemy odchylenie galwanometru. Następnie przekładamy przełącznik na a i wyjmujemy tyle zatyczek, aż galwanometr okaże odchylenie takie samo, jak poprzednio.

*5. Zmierzyć opór zapomocą mostka Wheatstona.

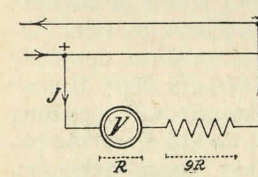
Mostek Wheatstone'a (czytaj: Uitston) jest to drut około 1 m długi, jednakowej wszędzie grubości, rozpięty na desce, opatrzonej podziałką milimetrową (ryc. 184), z którym styka się mostek m, dający się przesuwać wzdłuż drutu. Końce drutu AB połączone są z ogniwem, a prócz tego z punktem C i w połączenia te są wstawione opory znany, wzorcowy R' i mierzony R, którego wartość mamy oznaczyć. Od punktu C prowadzi połączenie do galwanometru G, a od niego ruchomy styk czyli mostek m do punktu D. Mostek przesuwa się tak długo, aż prąd płynący przez galwanometr zmaleje do zera. Wtedy drugie prawo Kirchhoffa, zastosowane do obwodów ACD i BCD, daje równania $R_1 J_D = R' J_C$ $R_2 J_D = R J_C$, skąd po podzieleniu otrzymujemy $R_1 : R_2 = R' : R$ aibo $R R_1 = R' R_2$.



Ryc. 184.

*6. Mamy woltmetr z podziałką do 3 V i chcemy nim mierzyć napięcia do 30 V

Gdy napięcie prądu jest E, a opór woltmetru R, natężenie prądu przezeń wskazane $J = \frac{E}{R}$. Włączmy w szereg z woltmetrem **opór dodatkowy** $9R$ (ryc. 185), wtedy opór całkowity jest $10 R$, a natężenie prądu wskazane na woltmetrze $J' = \frac{E}{10 R} = \frac{J}{10}$

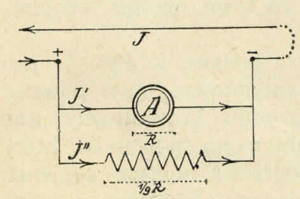


Ryc. 185.

Prąd jest 10 razy mniejszy, zatem i wskazania woltmetru są 10 razy mniejsze od rzeczywistych napięć.

*7. Mamy ampermetr z podziałką do 2 A i chcemy nim mierzyć prądy do 20 A.

Natężenie prądu, płynącego w obwodzie i przez ampermetr o oporze małym R, wynosi J Gdy zaś włączymy opór dodatkowy $\frac{R}{9}$, równolegle z ampermetrem (ryc. 186), ten okaże prąd J Obliczmy natężenie prądu J'' Drugie prawo Kirchhoffa daje $R J' = \frac{R}{9} J''$, skąd $J'' = 9 J'$, pierwsze zaś daje $J = J' + J'' = 10 J'$ Wskazania ampermetru są teraz 10 razy mniejsze. Opór dodatkowy włączony równolegle z galwanometrem w obwód prądu, nazywa się **upustem**.



Ryc. 186.

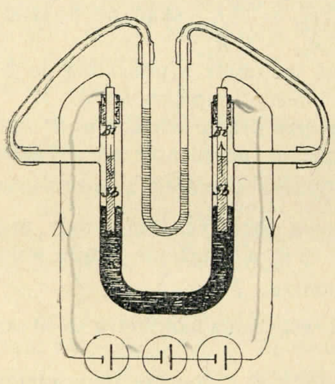
*8. Gdy opór wewnętrzny ogniwa jest bardzo mały wobec oporu zewnętrznego R, okazać doświadczeniem, że $J = \frac{E}{R}$, t. zn. natężenie. pozostaje bez zmiany, gdy zamiast jednego ogniwa weźmiemy dwa lub trzy, jeżeli równocześnie opór zewnętrzny dwa lub trzykrotnie powiększymy. Do pomiaru prądu użyć multyplikatora z upustem.

*9. Na trzech rurkach szklanych nawinąć druty: na jednej niklowy, na drugiej miedziany, a na trzeciej żelazny. Łączyć te druty z ogniwem przez galwanometr, prądem ogrzać je, aby były ciepłe i zanurzać w zimną wodę. Opór zmniejsza się, prąd staje się silniejszy.

*10. Przez długi pręcik **węglowy** przechodzi prąd, mierzony galwanometrem. Gdy pręcik ogrzejemy płomieniem gazowym, opór jego zmiejszy się, a prąd stanie się silniejszy

*11 Pomiędzy dwa węgle retortowe wstaw i zaciśnij rurkę **szklaną** 3 do 4 *cm* długą, a 8 *mm* wewnątrz szeroką. Węgle połącz z prądem miejskim (stałym) przez multyplikator Prąd nie przechodzi, ale przy ogrzewaniu rurki płomieniem multyplikator zaczyna okazywać prąd, a między węglami i brzegami rurki przeskakują iskierki.

*12 W szeroką próbówkę wstaw przez korek dwa druty miedziane, których końce u dna próbówki są także wetknięte w mniejszy korek, aby odległość drutów nie ulegała zmianie. Próbówkę napełnij stężonym roztworem siarczanu miedziowego i badaj zmianę oporu **elektrolitu** podczas ogrzewania próbówki.

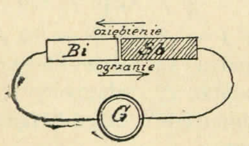


Ryc. 187.

*13. Okaż **zjawisko Peltiera**.

Przygotuj dwa pręciki utworzone przez zlutowanie pręcików bizmutu i antymonu. Wstaw je przez korki, zatopione parafiną, w rurkę kształtu litery U, używaną do suszenia gazów, opatrzoną bocznemi rurkami, do której wprzód nalano tyle rtęci, aby końce antymonu były w niej zanurzone (ryc. 187). Rurki boczne połącz rurkami gumowemi z rurką wąską także kształtu U, z wodą, stanowiącą **manometr różnicowy**. Wystające końce bizmutu połącz z ogniwem. Wtedy w lewem ramieniu prąd płynie od bizmutu do antymonu, w prawem zaś od antymonu do bizmutu. Po krótkim czasie ujrzymy różnicę wysokości słupków wody w manometrze, co wskazuje, że lewe miejsce spojenia metali oziębiło się, prawe zaś ogrzało się.

*14. Jeżeli objaśnienie zjawiska Peltiera, podane w Pyt. 1, jest słuszne, to przy zetknięciu się bizmutu z antymonem musi powstać wskutek dyfuzji elektronów krótkotrwały prąd dodatni, płynący od antymonu do bizmutu, który według prawa Joula ogrzewa miejsce spojenia. Gdy jednak końce wolne metali połączymy przez galwanometr przewodnikiem (ryc. 188), a miejsce spojenia oziębimy, wytworzy się przez przejście prądu znów pierwotny stan ciśnienia elektronów po obu stronach miejsca spojenia i prąd, jak w ogniwie galwanicznem, krążyć będzie od antymonu do bizmutu przez oziębiane miejsce spojenia.



Ryc. 188.

Stwierdzić słuszność rozumowania doświadczeniem.

Końce wystających prętów bizmutu (ryc. 187), połączyć z multyplikatorem. Do przestrzeni nad rtęcią w rurkach, gdzie znajdują się miejsca spojenia metali, nalać z jednej strony wody zimnej, z drugiej gorącej. W multyplikatorze okaże się prąd, który płynie w miejscu ogrzania od *Bi* do *Sb*, w miejscu oziębienia od *Sb* do *Bi*.

Prądy te, powstające z niejednakowego ogrzania dwóch przewodników w miejscach zetknięcia, nazywamy **termoelektrycznemi** Są one odwróceniem zjawiska Peltiera.

Zadania.

1. Na lampce żarowej (wolframowej) czytamy napis „25 W, 110 V". Obliczyć natężenie prądu świecenia i opór lampki.

(Z równań $P = EJ = RJ^2$ obliczamy $J = \frac{P}{E}$ i $R = \frac{E^2}{P}$.)

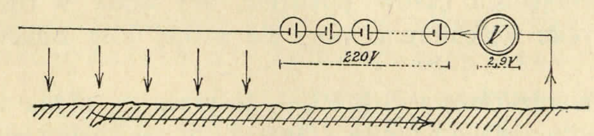
2. Ogniwo, którego siła elektromotoryczna jest $E = 1{,}07\ V$, ma opór wewnętrzny $R_w = 2{,}1\ \Omega$, a połączone jest z oporem zewnętrznym $R_z = 5\ \Omega$. Jakie jest natężenie prądu, jakie napięcie na biegunach ogniwa, ile wynosi strata napięcia w ogniwie?

$$\left(J = \frac{E_s}{R_w + R_z}, \quad E = R_z J, \quad E_s \quad E = R_w J\right)$$

3. Miliwoltmetr ma opór 15,4 Ω Jaki opór musi być włączony w szereg, aby odczytania skali dawały V zamiast mV? (Opór 999 razy większy czyli 15384,6 Ω)

4. Woltmetr o oporze 16000 Ω połączony jest w szereg z nieznanym oporem R w prądzie stałym o napięciu 110 V Na woltmetrze odczytuje się 4,3 V; jaka jest wartość oporu R? (Woltmetr ten jest galwanometrem, na którym 1 kresce podziałki, zaznaczonej, jako 1 *Volt*, odpowiada natężenie prądu, według prawa Ohma, 1 V: 16000 $\Omega = \frac{1}{16000} A$, zatem 4,3 V odpowiada prąd $\frac{4{,}3}{16000} A$ Zastosujmy teraz prawo Ohma do woltmetru o oporze 16000 Ω połączonego w szereg z oporem R; otrzymamy $(16000 + R)\ \frac{4{,}3}{16000} = 110$, skąd obliczymy $R = 393000\ \Omega$.)

5. Linja telegraficzna, 40 *km* długa, jest izolowana od ziemi w całej



Opór ziemi = 0

Ryc. 189.

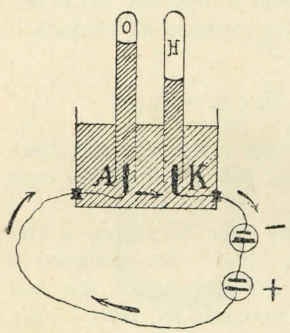
swej długości i na obu końcach. Jeden jej koniec połączony jest z baterją ogniw o napięciu 220 V, która przez woltmetr o oporze 16000 Ω połączona jest z ziemią (ryc. 189). Na woltmetrze odczytuje się 2,9 V jaki jest opór izolacji dla całej linji, jaki dla 1 *km* długości linji?

(Zastosujemy prawo Ohma: napięcie baterji = (opór woltmetru + opór ziemi + opór izolacji) × natężenie prądu czyli $220 = (16000 + 0 + R)\frac{2,9}{16000}$, skąd $R = 1197000\ \Omega$ Opór izolacji na 1 *km* jest 40 razy w i ę k s z y.)

§ 61. Elektroliza.

(*Tablica VIII.*)

*1 **Elektrolizą** nazywamy zjawiska chemiczne, towarzyszące przejściu prądu przez ciecz (z wyjątkiem płynnych metali) czyli przez t. zw **elektrolit**. Na **elektrodach** wydzielają się produkty rozkładu czyli **jony** Gdy n. p. bieguny baterji połączymy z elektrodami, wstawionemi w wodę, zakwaszoną kwasem siarkowym (ryc. 190), wtedy na elektrodzie dodatniej (na **anodzie**), t. j tej, którą prąd wchodzi do przyrządu, wydziela się tlen. jako jon odjemny (**anjon**), a na elektrodzie odjemnej (na **katodzie**) t. j. tej, którą prąd wychodzi z przyrządu wydziela się wodór, jako jon dodatni (**katjon**). Ilości wydzielających się jonów są w tem doświadczeniu w stosunku takim, w jakim wchodzą w skład wody H_2O, t. zn. na 2 objętości wodoru 1 objętość tlenu.



Ryc. 190

Gdy jako elektrolit weźmiemy stężony kwas solny (stężony roztwór chlorowodoru, HCl, w wodzie), otrzymamy znów wodór, jako katjon, chlor, jako anjon, w równych ilościach objętościowych zgodnie ze składem chemicznym HCl. (Trzeba jednak przed pomiarem objętości gazów pozwolić, aby woda w rurce nad anodą nasyciła się chlorem, który się w niej dość obficie roztwarza).

2. Stwierdziliśmy w II § 60, 1, że przepływ prądu w elektrolitach stosuje się do prawa Ohma, t. zn., że najmniejsze już napięcie w dwóch punktach elektrolitu powoduje płynięcie prądu. Stwierdzić można także, że najsłabsze nawet prądy w elektrolitach mogą wywoływać rozkład elektrolityczny, n. p. z siarczanu miedziowego wydziela się na katodzie miedź. Stąd nasuwa się przypuszczenie, że rozkład elektrolitu na jony nie jest dziełem prądu elektrycznego, lecz że w roztworze znajdują się już gotowe jony, t. zn. atomy lub grupy atomów, opatrzone nabojami. Czynnością sił elektrycznych na elektrodach jest tylko przyciągnięcie ku sobie jonów przeciwnie naelektryzowanych i odebranie im naboju, poczem z jonów powstają zwykłe, nieelektryczne atomy chemiczne, które mogą się na elektrodzie wydzielić albo brać udział w dalszych reakcjach chemicznych.

E l e k t r o l i t y są w i ę c r o z t w o r a m i t a k i c h p o ł ą c z e ń c h e m i c z n y c h, k t ó r e u l e g a j ą r o z k ł a d o w i n a j o n y c z y l i **dysocjacji elektrolitycznej.**

3. Przypuszczenie powyższe znajduje wielkie poparcie w zjawisku **osmozy.**

W I § 79, 4 była mowa o **ciśnieniu osmotycznem**, to jest o ciśnieniu cząsteczek ciała, roztworzonego w cieczy Mierzy się je w ten sposób, że naczynia połączone, z których w jednem znajduje się roztwór, a w drugiem czysty roztwarzalnik (n. p. roztwór cukru w wodzie i woda), oddziela się od siebie **błoną wpółprzenikliwą**, która na podobieństwo delikatnej sieci przepuszcza cząsteczki wody do roztworu, ale zatrzymuje cząsteczki cukru, ponieważ ich wielkość jest ogromną w porównaniu z cząsteczkami wody Roztwór przez to rozcieńcza się, ale poziom jego podnosi się ponad poziom wody tak długo, dopóki nie nastąpi stan równowagi, ta to właśnie różnica poziomu roztworu ponad poziom roztwarzalnika jest miarą ciśnienia osmotycznego.

Dokładne pomiary dały następujące wyniki ·

I. C i ś n i e n i e o s m o t y c z n e j e s t p r o p o r c j o n a l n e d o s t ę ż e n i a r o z t w o r u (odwrotnie proporcjonalne do objętości roztwarzalnika).

II. P r z y s t a ł e m s t ę ż e n u r o z t w o r u (przy stałej objętości roztwarzalnika) c i ś n i e n i e o s m o t y c z n e r o ś n i e p r o p o r c j o n a l n i e d o t e m p e r a t u r y b e z w z g l ę d n e j.

III. D w a r ó ż n e r o z t w o r y w j e d n a k o w e j t e m p e r a t u r z e, p o s i a d a j ą c e j e d n a k o w e c i ś n i e n i e o s m o t y c z n e, m a j ą j e d n a k o w e s t ę ż e n i e (w jednakowych objętościach roztwarzalnika tę samą ilość roztworzonych cząsteczek gramowych).

Gdy przyjrzymy się uważnie tym prawom, zauważymy, że są one zupełnie zgodne z prawami, odnoszącemi się do gazów: I z prawem **Boyla** (I § 63, 1), II z prawem **Gay-Lussaca**

i Charlesa (I § 68, 1), III ze znanem z chemji prawem **Avogadry.**

Z tego wynika, że cząsteczki ciała stałego, roztwarzającego się w cieczy, zachowują się w roztworze tak, jak cząsteczki gazu w przestrzeni, zamkniętej ścianami naczynia. (Porównaj **kinetyczną teorję materji** I § 83, 3).

Pokazało się jednak z doświadczeń, że prawa te są prawdziwe tylko dla roztworów, nie przewodzących prądu. Ażeby zaś i elektrolity z temi prawami uzgodnić, należy przyjąć, że w tych roztworach liczba cząsteczek jest kilkakrotnie większa.

Przykłady

		n*)	$\frac{1}{10}n$
Cukier gronowy $C_6H_{12}O_6$, cząsteczka gr		= 180 *gr*	18 : 1 = 18 *gr*
Chlorek sodowy $NaCl$,	„	= 58,5 „	5,8 : 2 = 2,9 „
Siarczan sodowy Na_2SO_4,	„	= 142 „	14,2 : 3 = 4,7 „
Chlorek glinowy $AlCl_3$,	„	= 133,5 „	13,3 : 4 = 3,3 „

Według prawa III powinnibyśmy otrzymać roztwory o tem samem ciśnieniu osmotycznem, gdybyśmy n. p. $\frac{1}{10}$ n (t. zn. $\frac{1}{10}$ każdej z obliczonych cząsteczek gramowych n) rozpuścili w 1 l wody. Tymczasem doświadczenie wykazuje, że aby roztwory te miały jednakowe ciśnienia osmotyczne należy wziąć na 18 *gr* $C_6H_{12}O_6$, 2,9 *gr* $NaCl$, 4,7 *gr* Na_2SO_4, 3,3 *gr* $Al\,Cl_3$. Wyjaśnienie tego zjawiska znajdujemy w dysocjacji elektrolitów.

Roztwór $C_6\,H_{12}\,O_6$ nie jest elektrolitem i nie jest w stanie dysocjacji.

Roztwór $NaCl$ jest zdysocjowany; z każdej cząsteczki $NaCl$ powstają dwa jony: $Na+$ i Cl^-, które w roztworze zachowują się tak, jak gdyby liczba cząsteczek podwoiła się.

Roztwór Na_2SO_4 jest zdysocjowany na jony: $Na+$, $Na+$, $(SO_4)^-$, które w roztworze zachowują się tak, jak gdyby liczba cząsteczek potroiła się.

Rozwór $AlCl_3$ jest zdysocjonowany na jony: $Al+$, Cl^-, Cl , Cl^- które w roztworze zachowują się tak, jak gdyby liczba cząsteczek czterokrotnie się powiększyła.

4. Elektrolitami są następujące ciała chemiczne **kwasy** typu $H^+ R^-$, **sole** typu $M^+ . R^-$ i **zasady typu** $M^+ (OH)^-$, gdzie H oznacza wodór, OH wodorotlen, M metal, R resztę kwasową. Metal i wodór są zawsze **elektrododatnie**, reszta elektrolitu **elektroodjemna**.

*) Cząsteczkę gramową oblicza się, dodając ciężary atomowe składników, n. p. dla cukru gronowego : ponieważ $C = 12$, $H = 1$, $O = 16$, zatem $C_6H_{12}O_6 = 6\ 12 + 12 . 1 + 6\ 16 = 180$.

Gdy ten sam prąd przechodzi przez rozmaite kwasy, n. p. przez $H\,Cl$, H_2SO_4, $H\,NO_3$, wydziela się zawsze na katodzie wodór w ilościach jednakowych, niezależnych ani od wielkości elektród, ani od ich oddalenia, ani ciśnienia, ani temperatury, ani stężenia roztworu. Zawsze prąd 1 A wydziela w 1 *sek* 0,000 01045 $gr = 1{,}045.10^{-5}$ gr wodoru. To samo odnosi się do wszystkich innych pierwiastków, gdy są produktami elektrolizy, i to stanowi treść **pierwszego prawa Faradaya** (czytaj Féredej)

Ilość jonów pewnego pierwiastka, wydzielonych w pewnym określonym czasie podczas elektrolizy, jest zależna tylko od natężenia prądu i jest do niego proporcjonalna.

Ilość pewnego pierwiastka, wydzieloną prądem 1 A w czasie 1 *sek*, nazywamy **równoważnikiem elektrochemicznym.**

Podczas gdy to pierwsze prawo odnosi się do dowolnego, ale tylko jednego rodzaju jonów, to **drugie prawo Faradaya** łączy z sobą jony różnych rodzai

Różne jony, wydzielone z różnych elekrolitów tym samym prądem i w tym samym czasie są do siebie w stosunku ich równoważników chemicznych.

Równoważnikiem chemicznym nazywamy ciężar atomowy pierwiastka, podzielony przez jego wartościowość. (II § 53 Zad. 5).

Do tych dwóch praw należy jeszcze dodać trzecie Suma naboi elektrycznych dodatnich na katjonach, równa jest sumie naboi odjemnych na anjonach. Gdyby bowiem nie było to prawdą, roztwory elektryzowałyby się podczas dysocjacji, tego zaś nigdy nie zauważono. Jakkolwiek na jonach elektrolitu mogą być ogromne ilości elektryczności, na zewnątrz żadnego działania nie wywierają. Z tego jednak prawa wynika, że nie wszystkie jony mają naboje tej samej wielkości. W roztworze Na_2SO_4, musi grupa $(SO_4)^{--}$ mieć na sobie podwójny nabój odjemny, któryby się znosił z 2 Na^+ W roztworze $AlCl_3$ musi Al^{+++} mieć na sobie potrójny nabój dodatni, aby się znosił z 3 Cl^- Dlatego i cząsteczkę Na_2SO_4 nazywamy dwuwartościową, a $AlCl_3$ trójwartościową.

5. Przewodzenie prądu w elektrolitach polega na przepływaniu anjonów ku anodzie, katjonów ku katodzie, czyli na t. zw **wędrówce jonów** Można tu mówić o prędkości jonów, o ich

ruchliwości, ale najbardziej może zaciekawiać pytanie, **j a k w i e l k i j e s t n a b ó j e l e k t r y c z n y, k t ó r y p o w s t a j e n a a t o m i e p i e r w i a s t k a p o d c z a s d y s o c j a c j i i t w o r z y z n i m j o n.**

Weźmy za podstawę obliczenia atom wodoru. Masę jego obliczyliśmy w II § 50 Zad 2 na 1,66 10^{-24} *gr*. Skoro zaś wiemy, że 1 *A* w 1 *sek* wydziela 1,045 10^{-5} *gr* wodoru, a 1 *A sek* = 1 *C* = 3.10⁹ *e. s. naboju*, to możemy napisać proporcję, w której e_H oznacza nabój, mieszczący się na atomie wodoru,

$$e_H \; 3 \; 10^9 = 1{,}66 \; 10^{-24} \; 1{,}045 \; 10^{-5},$$

skąd

$$e_H = 4{,}77 \; 10^{-10} \; e.\, s.\, naboju.$$

Otrzymaliśmy ten sam wynik, który został podany w II § 50 Zad. 1, jako nabój **elektronu**, a który obliczono z odchylenia promienia katodowego w polu elektrycznem i magnetycznem. Zatem na atomie jednowartościowym w elektrolizie unoszony jest **nabój elementarny**, który można nazwać **atomem elektryczności**, ponieważ z mniejszym nabojem dotychczas nigdzie nikt się nie spotkał.

Ponieważ masę atomu wodoru znamy, więc można obliczyć także przy pomocy powyższej proporcji stosunek

$$\frac{e_H}{m_H} = \frac{3 \; 10^9}{1{,}045 \; 10^{-5}} = 2{,}87 \; 10^{14} \; e.\, s.\, naboju/gr$$

Gdy porównamy ten wynik z wartością stosunku *e m* dla promieni kanalikowych wodorowych (II § 50, 4), przekonamy się znów o zgodności obu liczb.

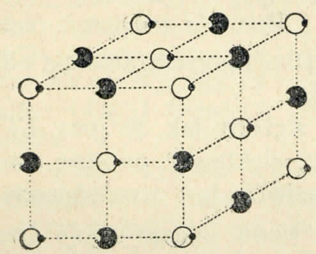
Na podstawie powyższych porównań dochodzimy do następujących wniosków

W e l e k t r o l i z i e b i o r ą u d z i a ł n a b o j e w i e l k o ś c i e l e k t r o n ó w N a b o j e t e p r z e n o s z o n e s ą n a a t o m a c h l u b g r u p a c h a t o m ó w, t w o r z ą c y c h c z ę ś c i c z ą s t e c z e k z d y s o c j o w a n y c h, w i l o ś c i t y l u e l e k t r o n ó w, i l e w y n o s i w a r t o ś c i o w o ś ć p i e r w i a s t k a l u b g r u p y p i e r w i a s t k ó w W e l e k t r o l i z i e n i e m a ż a d n e j r ó ż n i c y w z a c h o w a n i u s i ę n a b o i d o d a t n i c h i o d j e m n y c h.

6. Należałoby jeszcze pogodzić elektrolizę, gdzie występują elektryczności obu znaków, z teorją elektronową, która przyjmuje tylko istnienie naboi odjemnych.

Doświadczenia nad uginaniem promieni Röntgena w siatkach krystalicznych (II § 51, 4) doprowadziły do nieoczekiwanego wyniku, że **k r y s z t a ł j e s t z b u d o w a n y z a t o m ó w**, a nie, jak dawniej przypuszczano, z cząsteczek, z których każda miała być doskonałym kryształem. Zatem dysocjacja elektrolityczna, którą znamy z roztworów, pozostaje i w krysztale, który z roztworu powstał; roztwarzalnik tylko uruchomia jony, które już w krysztale istnieją, lecz tak są do siebie zbliżone, że oderwać się od siebie nie mogą.

Weźmy, jako przykład, kryształ soli kuchennej, *NaCl* (ryc. 191). W stanie stałym jest kryształ izolatorem, chociaż składa się z jonów Na^+ i Cl^- (kółko jasne na rycinie oznacza *Cl*, punkcik czarny na niem, elektron, kółko czarne *Na*, kółko z luką oznacza Na^+, po oddaniu elektronu), lecz jony te są nieruchome



Ryc. 191.

Pozycja elektronu na atomach chloru może być dowolna, w każdym razie każda para jonów będzie tworzyła jak gdyby kondensator, w którym kierunek siły elektrycznej pozycją elektronu jest ustalony W krysztale nieelektrycznym kierunki tych par są rozmaite. Gdy jednak kryształ umieścimy między dwiema okładkami kondensatora, elektrony wszystkie zwrócą się ku okładce dodatniej, krystaliczny dielektryk będzie spolaryzowany (II § 47 Pyt. 2). Polaryzację kryształu można wywołać także ogrzaniem lub ciągnieniem i wtedy kryształ, zamknięty dwiema okładkami metalowemi, zachowuje się jak małe ogniwo (**piezoelektryczność**).

Badając rozkład elektrolityczny różnych ciał, zauważymy, że atomy pewnych pierwiastków (*Cl*, *O*) przyjmują elektrony od drugich (*Na*, *Zn*), ale swoich się nie pozbywają. Te pierwiastki, które posiadają swobodny elektron i z łatwością go innym udzielają, nazywamy **elektrododatniemi** — do nich należy wodór i metale; inne pierwiastki, które swoich elektronów nie oddają, ale przeciwnie przyjmują, nazywamy **elektroodjemnemi** — do nich należą metaloidy i grupy takie, jak OH, SO_4, NO_3. Zatem z j a w i s k o, ż e w e l e k t r o l i t a c h m e t a l e t w o r z ą j o n y e l e k t r o d o d a t n i e, j e s t w z w i ą z k u z t e m, i ż m e t a l e s ą d o b r e m i p r z e w o d n i k a m i e l e k t r y c z n o ś c i (posiadają swobodne elektrony).

7 Woda chemicznie czysta jest bardzo złym przewodnikiem, bo cząsteczki wody tylko w nieznacznym stopniu ulegają

dysocjacji na H^+, H^+, O^{--} albo $H^+, (OH)^-$ W zetknięciu z metalami jon H^+ z łatwością przyjmuje ich swobodny elektron i zmienia się na atom $H\uparrow$ Przykładem działanie sodu na wodę:

$$Na + H^+,(OH)^- = Na^+,(OH)^- + H\uparrow$$

Podobne działanie zachodzi na katodzie podczas elektrolizy soli kuchennej. Mamy wtedy w roztworze

$$Na^+,Cl^- + H^+,(OH)^-$$

Jon H^+ wzetknięciu z katodą, zabiera jej swobodny elektron i powstaje $H\uparrow + Na^+,(OH)^- + Cl^-$ Roztwór ma teraz nadmiar naboi odjemnych, musi więc wystąpić przyciąganie się odjemnych jonów $(OH)^-$ i Cl^- z anodą.

Gdy roztwór soli kuchennej jest stężony tak, że jony Cl^- przeważają, wtedy one oddają swoje elektrony anodzie, na której wydziela się $Cl\uparrow$. Gdy zaś roztwór jest rozcieńczony, wtedy $2(OH)^- = H_2O + O^{--}$, jon tlenu oddaje swoje dwa elektrony anodzie i wydziela się jako $O\uparrow$ Na anodzie otrzymujemy wtedy mieszaninę chloru i tlenu.

Zresztą procesy chemiczne podczas elektrolizy często są bardzo skomplikowane, bo wydzielanie się jonów na elektrodach zależy i od ich elektrochemicznego charakteru i od stężenia roztworu i od użytego napięcia prądu. Jest jednak rzeczą niewątpliwą, że w elektrolizie biorą udział także jony wody, jest ich zbyt mało, aby czysta woda była elektrolitem, gdy jednak przez roztworzenie w wodzie jakiejś soli liczbę jonów powiększymy, wtedy i jony wody biorą udział w elektrolizie (hydroliza).

Pytania.

1 Dlaczego sól kuchenna nie ma zapachu chloru? (Bo jon chloru Cl^- w soli kuchennej niema tego zapachu i nie może mieć żadnego zapachu, gdyż nie jest lotny. Jony w ogólności nie mają własności atomów, z których powstały. Chemicznie są obojętne, zachowują się nie, jak atomy, lecz jak cząsteczki; jak gdyby wartościowość atomu nabojem elektrycznym była nasycona.)

2. Przedstawić przebieg elektrolizy siarczanu sodowego.

(Oznaczenia: e^- nabój elementarny odjemny, $\uparrow$ uchodzi, jako gaz, $\longrightarrow$ wędruje ku anodzie, $\longleftarrow$ ku katodzie.

Przy katodzie: $Na_2^{++},SO_4^{--} + 2\,(H^+,OH^-) + 2e^- =$
$$= H_2\uparrow + 2\,(Na^+,OH^-) + \overrightarrow{SO_4^{--}},$$

Przy anodzie: $Na_2^{++},SO_4^{--} + H_2^{++},O^{--}\quad 2e^- =$
$$= O\uparrow + H_2^{++},SO_4^{--} + 2\,\overleftarrow{Na^+}.$$

3. Dlaczego ani woda, ani stężony kwas siarkowy nie przewodzą zupełnie prądu? (Bo albo nie są w stanie dysocjacji, albo też jony wskutek wielkiego zbliżenia się straciły zupełnie swobodę ruchów. Natomiast mieszanina kwasu siarkowego z wodą jest dobrym przewodnikiem elektryczności, jest elektrolitem o licznych i ruchliwych jonach).

4. Opisać praktyczne **zastosowania elektrolizy. (Elektrometalurgja** czyli otrzymywanie metali o chemicznej czystości, n. p. miedzi, złota, glinu. Galwanoplastyczne złocenie, srebrzenie, niklowanie, miedziowanie. Gdy jako anodę weźmiemy blachę jednego z powyższych metali, jako elektrolit jakąś sól tego metalu, jako anodę zaś jakiś przedmiot, n. p. woskowy odcisk medalu, powleczony cieniutką warstewką grafitu, to przy odpowiedniem natężeniu prądu otrzymamy na katodzie osad metalu, tworzący co raz to bardziej grubiejącą warstewkę, którą można zdjąć z formy w ten sposób sporządzić wierną kopję przedmiotu).

5. Ilość wydzielonych jonów, n. p. miedzi, zależy tylko od ilości elektryczności Q, która przepływa przez elektrolit. Wiemy jednak, że możemy używać większego lub mniejszego napięcia E tak, że dla tej samej ilości miedzi praca prądu $W = EQ$ może być mniejsza lub większa. Jak to pogodzić z zasadą zachowania energji?

(Dysocjacja elektrolityczna nie jest dziełem prądu elektrycznego, dlatego też i wydzielenie miedzi z roztworu soli miedziowej nie jest pracą prądu, prąd jest tylko zjawiskiem tej pracy towarzyszącym. Praca prądu przy wydzieleniu miedzi między elektrodami miedzianemi w całości występuje jako ciepło Joula. Dlatego w galwanotechnice starają się używać prądów o najmniejszem napięciu, a największem natężeniu i powiadają, że „od *Amperów* zależy dochód, a od *Voltów* wydatki przedsiębiorstwa").

Ćwiczenia.

*1 Okazać, że jony Cu^{++} są niebieskie.

Do rurki kształtu U nalać rozcieńczonego kwasu siarkowego; jako elektrody wstawić pręty miedziane i połączyć z baterją ogniw Na katodzie wydziela się wodór, z anody zaś oddzielają się atomy Cu, pozostawiając swój swobodny elektron anodzie i przechodzą w ciecz jako Cu^{++}, od których elektrolit zabarwia się na niebiesko.

*2. Pręt węglowy powlec warstwą miedzi.

Do rurki kształtu U nalać nie całkiem stężonego roztworu siarczanu miedziowego z kilku kroplami kwasu siarkowego. Jako anodę wziąć pręt miedziany, jako katodę wstawić węgiel retortowy i połączyć z baterją ogniw Po krótkim czasie węgiel pokrywa się jasnoczerwonym osadem miedzi. Gdy kierunek prądu odwrócimy, osad miedzi zniknie, a na węglu zaczną wydzielać się banieczki tlenu.

*3. Okazać bielące działanie chloru, wytworzonego przez elektrolizę soli kuchennej.

Do rurki kształtu U nalać stężonego roztworu soli kuchennej, zabarwionego odwarem malwy. Przez dodanie kilku kropel kwasu solnego roztwór przybierze barwę jasnoczerwoną. Jako elektrody wziąć pręciki grafitowe (środki ołówków) i połączyć z silną baterją ogniw Na anodzie wydziela się chlor, który odbarwia roztwór; na katodzie wodór, a sód, który tworzy z wodą wodorotlenek sodowy, zabarwia roztwór na zielono; najniższa część rurki pozostaje czerwona.

*4. Sporządzić **papierki biegunowe.**

Zagotuj roztwór krochmalu (2:100); do tego dodaj 1 część jodku potasowego i trochę alkoholowego roztworu fenolftaleiny. Skrawki papieru, napojone tym roztworem, służą do oznaczania biegunów, gdyż skrawek zwilżony i zetknięty z obu biegunami, na biegunie dodatnim barwi się na niebiesko (czarno), na odjemnym na czerwono.

To samo zabarwienie okaże się; gdy roztwór powyższy rozcieńczony 10-krotnie wodą, poddamy elektrolizie w rurce U.

*5. Nacechować galwanometr przy pomocy woltametru.

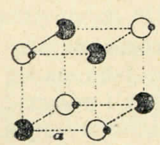
Woltametrem nazywamy przyrząd do elektrolizy siarczanu miedziowego (albo azotanu srebrowego), w którym z przyrostu masy metalu wydzielonego na katodzie, obliczamy natężenie użytego prądu.

Bierzemy obszerne naczynie szklane z roztworem, prawie stężonym, siarczanu miedziowego, zakwaszonym odrobiną kwasu siarkowego. Anodą jest wielka, ale cienka blacha miedziana, katodą również blacha miedziana o mniejszej powierzchni. Przed użyciem należy katodę dobrze wymyć w wodzie i alkoholu i wysuszyć, a następnie zważyć. Dokładnie zanotować czas, kiedy prąd włączono i co minutę notować stan galwanometru. Ponieważ równoważnik elektrochemiczny miedzi jest 0,0003293 *gr/A sek*, przeto *J t*. 0,0003293 = *m* jest masą miedzi, wydzieloną w czasie *t sek*, prądem *J Amperów*. Przed powtórnem zważeniem katody należy ją znów wymyć w wodzie i dokładnie osuszyć. Średniemu odchyleniu galwanometru odpowiada natężenie prądu, z powyższego równania obliczone.

Z kilku takich pomiarów, wykonywanych różnemi prądami, sporządza się wykres, w którym jedna oś podaje liczby *Amperów*, druga zaś liczby kresek podziałki galwanometru. Wykres da pewną linję, prostą lub regularnie zakrzywioną i pozwoli odczytać dla każdego stanu galwanometru odpowiednie natężenie w *Amperach*.

Zadania.

1. Oblicz oddalenie jonów Na^+ i Cl^- w krysztale soli kuchennej, wiedząc, że $Na = 23$, $Cl = 35{,}46$, gęstość soli kuchennej jest 2,161 gr/cm^3 i że w cząsteczce gramowej znajduje się 6,06 10^{23} cząsteczek.



Ryc. 192.

Jeżeli oddalenie tych jonów nazwiemy a (ryc. 192), to sześcian o objętości a^3 ma na wierzchołkach 4 Na^+ i 4 Cl^-. W każdym jednak wierzchołku schodzi się 8 takich sześcianów, przeto do jednego sześcianu musi być zaliczona tylko $\frac{1}{8}(4\,Na^+ + 4\,Cl^-) = \frac{1}{2}(Na^+ + Cl^-)$ t. j. pół cząsteczki $NaCl$, której masa wynosi

$$\frac{1}{2}\ \frac{23 + 35{,}46}{6{,}06\ 10^{23}}\ gr = 4{,}82\ 10^{-23}\ gr$$

Sześcian zajęty przez tę półcząsteczkę, o objętości a^3, ma masę a^3. 2,161 gr/cm^3. Z porównania obliczymy $a = 2{,}8\ 10^{-8}\ cm$.

Takiego rzędu wielkościami są oddalenia między jonami kryształu. Są to najmniejsze oddalenia, na jakie zbliżyć się mogą do siebie jony elektrolitu; gdy one są osiągnięte, elektrolit prądu przewodzić nie może, jest bowiem ciałem stałem.

2. Ile *Coulombów* elektryczności potrzeba do wydzielenia 1 równoważnika chemicznego wodoru?

Jeżeli 1 C wydziela wodoru $1{,}045 . 10^{-5}\ gr$, to na 1,008 gr wodoru potrzeba $\frac{1{,}008 . 10^5}{1{,}045}\ C = 96470\ C$. Ten sam wynik otrzymamy, gdy równoważnik chemiczny jakiegobądź pierwiastka podzielimy przez jego równoważnik elektrochemiczny. Liczbę tę nazywamy **liczbą Faradaya.** Stałość jej jest następstwem drugiego prawa Faradaya, które wobec tego możemy napisać równaniem (Porównaj II § 53 Zad. 5)

$$\boxed{F = \frac{a}{w\epsilon},}\quad \textbf{(II prawo Faradaya)}$$

w równaniu tem F oznacza liczbę Faradaya, a ciężar atomowy, w wartościowość, a ϵ równoważnik elektrochemiczny pierwiastka.

3. Jakiego natężenia prądu potrzeba, aby z soli miedziowej otrzymywać 1 *kgr* miedzi w godzinie?

Dla miedzi $a = 63{,}57$, $w = 2$ zatem $\epsilon = \frac{a}{Fw}$ Tyle wydziela 1 A w 1 *sek*, przeto J A w t *sek* wydzieli

$$\boxed{m = \epsilon\, J\, t = \frac{a J t}{F w}}\quad \textbf{(I prawo Faradaya)}$$

Ponieważ w powyższem zadaniu $m = 1000\ gr$, $t = 3600\ sek$, zatem $J = 840\ A$

4. Prąd, obliczany w Zad. 3, potrzebny jest do galwanicznego odlania posągu z miedzi. W tym celu sporządza się z oryginału rzeźbionego w glinie gipsową formę, wnętrze formy uszczelnia się, grafituje, wkłada się w środek anodę miedzianą, kształtu podobnego do formy, wypełnia się ją roztworem soli miedziowej i łączy z biegunem odjemnym prądnicy. Wskutek elektrolizy na formie od wnętrza osadza się miedź. Gdy warstwa miedzi osiągnie dostateczną grubość, przerywa się elektrolizę, wnętrze wypełnia się cementem, zdejmuje formę i odlew pomnika wymaga jeszcze tylko odczyszczenia i ustawienia.

Pomnik ma powierzchnię 33,6 m^2. Jaka jest gęstość prądu? Jakiego czasu potrzeba, aby warstwa miedzi miała grubość 1 *mm*?

Gęstość prądu $= 840\ A : 33{,}6\ m^2 = 25\ A/m^2 = 0{,}25\ A/dm^2$ Przy tej gęstości prądu osad jest najbardziej zwarty; im większa gęstość, tem jest kruchszy i mniej jednostajny. Gdy warstwa miedzi osiągnie grubość 1 *mm*, objętość jej będzie 336000 cm^2 0,1 $cm = 33600\ cm^3$ Ponieważ miedź elektrolityczna ma gęstość 8,5 gr/cm^3, przeto masa miedzi, o powyższej objętości, jest 33600 cm^3 8,5 $gr/cm^3 = 286000\ gr = 286\ kgr$

Czas potrzebny do wydzielenia tej masy miedzi wynosi 286 *godz*.

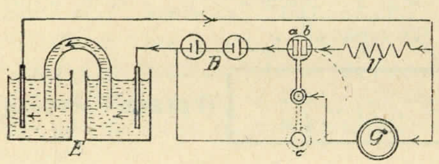
5. Jakiej mocy musi być prądnica, dająca prąd, potrzebny do Zad. 4, jeżeli warstwa roztworu soli miedziowej między anodą i katodą ma grubość średnio 20 *cm*, a opór właściwy elektrolitu jest 24 Ωcm?

($P = EJ$, $E = RJ$, $R = \rho \frac{l}{s} = 24\,\Omega cm\ \frac{20\ cm}{336000\ cm^2} = 0{,}00143\ \Omega$; $E = 0{,}00143\,\Omega\ \ 840\,A = 1{,}2\,V$, $P = 1{,}2\,V \cdot 840\,A = 1008\,W \sim 1\tfrac{1}{2}\ KP$.)

§ 62. Polaryzacją galwaniczna.

(Tablica IX).

*1. Do dwu zlewek, napełnionych jednakowo stężonym roztworem siarczanu miedziowego, wstawiamy dwie jednakowe elektrody miedziane (ryc. 192). Oba naczynia łączymy odwróconą rurką ∩, napełnioną także tym samym elektrolitem, elektrody zaś łączymy z biegunami baterji i przez dłuższy czas prowadzimy elektrolizę. Ponieważ na katodzie wydziela się miedź, elektrolit tam będzie wykazywał brak jonów Cu^{++}, na anodzie zaś miedź przechodzi w roztwór, tam więc będzie nadmiar Cu^{++} Wskutek tego przez rurkę ∩ płynie prąd jonów Cu^{++} od anody ku katodzie, ale równocześnie musi także płynąć prąd przeciwny jonów $(SO_4)^{--}$ od katody ku anodzie tak, że stężenie roztworów ciągle wyrównywa się, jakkolwiek z pewnem opóźnieniem.



Ryc. 192.

O tem, że w obu naczyniach istnieje różnica stężenia roztworów, przekonać się można, gdy przewody przyrządu elektrolitycznego odłączymy od baterji, a połączymy z czułym galwanometrem (przestawimy korbkę przełącznika z położenia *ab* na *c*). Wyrównanie stężeń nastąpi teraz przez **prąd wtórny**, który płynie w kierunku przeciwnym **prądowi głównemu,** pierwotnemu, co stwierdzimy z odchylenia wskazówki galwanometru.

*2. Jako przyrząd elektrolityczny w zestawieniu na ryc. 192, weźmy wanienkę z roztworem kwasu siarkowego (1 10), a jako elektrody dwa węgle retortowe. Na katodzie wydziela się wodór, na anodzie tlen. Gazy te nie tylko zmniejszają powierzchnię zetknięcia się kwasu z elektrodami i w ten sposób zwiększają opór elektrolitu i zmniejszają natężenie prądu, co odczytać można na galwanometrze, gdyż natężenie prądu, zrazu znaczne, natychmiast opada, ale, co ważniejsze, gazy te gromadzą się

na węglowych przewodnikach, a rozdzielone elektrolitem, stanowią ogniwo galwaniczne, którego prąd jest przeciwny prądowi pierwotnemu, a w którym elektroda tlenowa stanowi biegun dodatni, a wodorowa odjemny Przekonać się o tem można, gdy, przestawiwszy przełącznik, wyłączymy baterję, a włączymy sam tylko galwanometr Otrzymamy krótkotrwały, ale dość silny prąd wtórny Prąd ten na elektrodzie tlenowej wydziela wodór, na wodorowej tlen, które łączą się z sobą na wodę i doprowadzają przyrząd elektrolityczny do pierwotnego stanu.

P r z y   k a ż d e j   e l e k t r o l i z i e   p o w s t a j e **prąd wtórny** Źródłem jego jest siła elektromotoryczna, powstająca podczas elektrolizy, o kierunku przeciwnym napięciu prądu głównego, a przyczyną jej powstawania jest zawsze występująca różnica stężeń elektrolitu, jakoteż produkty rozkładu, wydzielające się na elektrodach i zmieniające ich charakter chemiczny. Tworzy się wskutek tego jakby **ogniwo wtórne** w przyrządzie elektrolitycznym, przeciwdziałające prądowi głównemu i zmniejszające jego początkowe napięcie. Mówimy, że elektrody **są spolaryzowane**, i dlatego prąd główny nazywamy **polaryzującym**, a prąd wtórny **prądem polaryzacyjnym**, zjawisko zaś całe nazywamy **polaryzacją galwaniczną.**

3. W każdem ogniwie galwanicznem prąd, płynąc przez elektrolit rozkłada go, przeto każde ogniwo ulega także polaryzacji. Weźmy jako przykład ogniwo, opisane w II § 53, 1, składające się z $\overset{-}{Zn} \mid H_2SO_4 \mid \overset{+}{C}$ Prąd zewnątrz ogniwa płynie od węgla do cynku, wewnątrz od cynku do węgla, zatem cynk jest anodą, węgiel zaś katodą. Na anodzie wydzielają się jony $(SO_4)^{--}$, łączące się z cynkiem na $ZnSO_4$, który przechodzi w roztwór, tu więc niema przyczyny polaryzacji. Inaczej na katodzie. Tam wydzielający się wodór pokrywa węgiel i powstaje tak silna polaryzacja, że ogniwo po krótkiem działaniu staje się niezdolne do wydawania prądu. Ogniwo takie jest **niestałe.**

Istnieją jednak środki zmniejszające lub usuwające polaryzację (**środki depolaryzujące**). Ogniwa, w których polaryzacja jest tak nieznaczna, że siła elektromotoryczna podczas odbierania prądu nie ulega znaczniejszym zmianom, nazywamy **ogniwami stałemi.** Środki depolaryzujące, w nich używane, są rozmaite. **Depolaryzatory mechaniczne** polegają na mechanicznem usuwaniu wodoru z katody przez wstrząsanie elektród albo przez wprawianie elektrolitu w ruch zapomocą prądu powietrza, albo przez znaczne powiększenie powierzchni katody (pokrycie czernią platynową, umieszczenie elektrody cynkowej między dwiema płytami węglowemi).

Depolaryzatory chemiczne polegają na działaniu czynników, utleniających wodór na wodę. N. p.
kwas azotowy
$2\,HNO_3 + 3\,H_2 = 4\,H_2O + 2\,NO$ (NO rozpuszcza się w wodzie);
bezwodnik chromowy

$$2\,CrO_3 + 3\,H_2SO_4 + 3\,H_2 = 6\,H_2O + Cr_2(SO_4)_3\,;$$

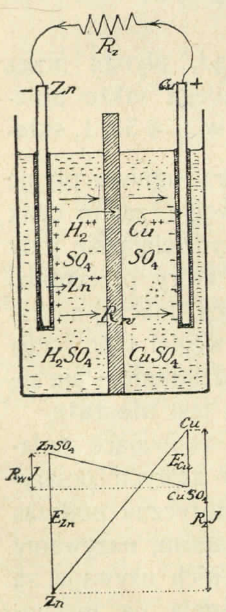
dwutlenek manganu·

$$MnO_2 + H_2 = H_2O + MnO$$

Depolaryzacja elektrolityczna polega na tem, że każdy metal elektrody jest zanurzony w roztwór soli własnej, oba zaś elektrolity są oddzielone od siebie ścianką porowatą lub też utrzymują się jeden nad drugim bez ścianki przegradzającej.

Różne typy ogniw zestawione są w Tabl. IX.

4. Jako przykład objaśniający, w jaki sposób powstaje prąd w ogniwie, niech służy **ogniwo Daniella**, które składa się z cynku, zanurzonego w rozcieńczonym kwasie siarkowym i z miedzi w stężonym roztworze siarczanu miedziowego, a elektrolity oddzielone są od siebie ścianką porowatą. Zachowanie się cynku opisane jest w § II 59, 2. A t o m y c y n k u d y f u n d u j ą w r o z t w ó r $H_2^{++}, (SO_4)^{-}$, p o z o s t a w i a j ą c s w o j e s w o b o d n e e l e k t r o n y (dwa) n a e l e k t r o d z i e; tworzą więc z anionami kwasu siarkowego siarczan cynkowy $Zn^{++}, (SO_4)^{--}$ W i d o c z n i e c i ś n i e n i e o s m o t y c z n e s i a r c z a n u c y n k o w e g o j e s t m n i e j s z e o d p r ę ż n o ś c i d y f u z y j n e j c y n k u Wskutek nadmiaru jonów dodatnich H^{+} i Zn^{++} elektrolit jest naelektryzowany dodatnio, elektroda zaś cynkowa odjemnie (ryc. 193).



Ryc. 193.

Tak, jak opisano powyżej, zachowuje się większość metali, zanurzonych w roztwory swoich soli. Przeciwnie zachowuje się miedź, rtęć i metale szlachetne, złoto, srebro i platyna. Ciśnienie osmotyczne stężonych roztworów ich soli jest silniejsze od prężności dyfuzyjnej tych metali, skutkiem czego jony Cu^{++}, stykające się z elektrodą, przyjmują jej (dwa) elektrony swobodne, zamieniają się na atomy obojętne Cu i osadzają na elektrodzie. To jednak sprawia, że na niej występuje pewien brak elektronów swobodnych i elektroda miedziana elektryzuje się dodatnio, podczas gdy elektrolit z nadmiaru $(SO_4)^{--}$ wykazuje elektryczność odjemną.

Ponieważ elektrolity przez ściankę porowatą stykają się z sobą, przeto musi nastąpić wyrównanie elektryczności. Jony H^{+} dyfundują przez ściankę z roztworu siarczanu cynkowego do roztworu siarczanu miedziowego. Potencjał w elektrolicie opada zatem od cynku do miedzi o wielkość $R_w J$ (II § 60, 4). Na cynku doznaje potencjał skoku w kierunku odjemnym o wartości E_{Zn}, na miedzi w kierunku dodatnim o wartości E_{Cu}, w obwodzie zaś zewnętrznym opada potencjał od miedzi do cynku o wartość $R_z J$ Możemy to wyrazić równaniem (drugie prawo Kirchhoffa)

$$E_{Zn} - R_w J + E_{Cu} - R_z J = 0$$

albo

$$E_s = E_{Zn} + E_{Cu} = (R_w + R_z) J\,.$$

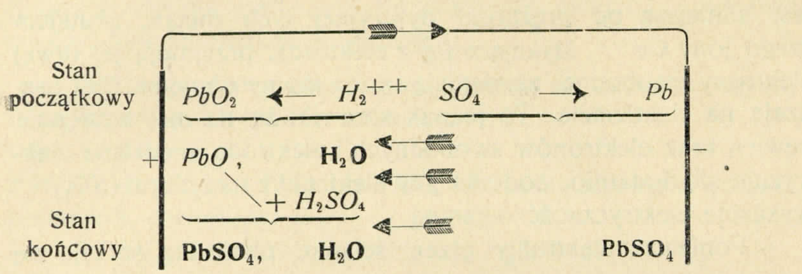
S i ł a e l e k t r o m o t o r y c z n a o g n i w a r ó w n a j e s t s u m i e s k o k ó w p o t e n c j a ł u w w a r s t e w k a c h, p r z y l e g a j ą c y c h d o e l e k t r ó d.

5. Szczególny typ ogniw stanowią **akumulatory**

Akumulatorem nazywamy ogniwo, w którem prąd główny wytwarza tak silną polaryzację elektród, iż w jej następstwie prąd polaryzacyjny swoją energją dorównywa energji prądu, użytego do polaryzacji. Jest to możebne dzięki pewnym procesom chemicznym, które przebiegają w pewnym kierunku podczas nabijania (ładowania) akumulatora, a odwracają się przy wyładowaniu.

Akumulator składa się z dwu płyt ołowianych, zanurzonych w rozcieńczonym kwasie siarkowym. Jedna z płyt jest powleczona warstwą dwutlenku ołowiu, druga jest czystym ołowiem w postaci gąbczastej. Gdy bieguny akumulatora połączymy z sobą, otrzymamy prąd elektryczny, jak z każdego ogniwa, mówimy, że akumulator wyładowuje się, a procesy chemiczne, które w nim zachodzą, są następujące

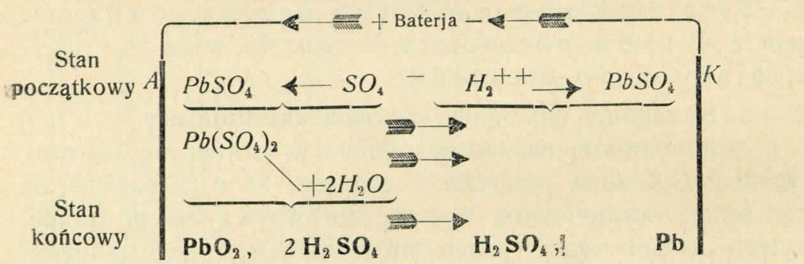
Wyładowanie.



Wynik wyładowania akumulatora jest taki, że obie elektrody stały się jednakowo pokryte siarczanem ołowiawym $PbSO_4$. Zużyły się przytem dwie cząsteczki kwasu siarkowego H_2SO_4, a przybyły dwie cząsteczki wody H_2O, zatem elekrolit rozcieńczył się.

Teraz należy akumulator naładować. W tym celu łączymy biegun dodatni akumulatora z biegunem dodatnim baterji ogniw (albo prądnicy). Procesy chemiczne, które tu zachodzą, są następujące

Ładowanie.



Wynik ładowania akumulatora jest taki, że elektrody wracają do pierwotnego stanu PbO_2 i Pb. Przytem zużyły się dwie cząsteczki wody, a przybyły dwie cząsteczki kwasu siarkowego, roztwór więc stał się bardziej stężony.

Siła elektromotoryczna akumulatora wynosi po zupełnem naładowaniu 2,6 V, spada podczas wyładowania szybko do 2 V i w tej wartości utrzymuje się prawie aż do wyczerpania. Gdy spadnie do 1,85 V, należy akumulator ładować na nowo.

Stosunek ilości prądu, którą możemy otrzymać z akumu-

latora przy normalnem wyładowaniu, do ilości prądu, użytego do ładowania, nazywamy **sprawnością akumulatora**.

Ilość prądu mierzymy w Ampergodzinach (Ah), t. j. iloczynem średniego natężenia w A przez czas w *godz.* W dobrych akumulatorach sprawność ta dochodzi do 95%.

Pytania.

1. Dlaczego w akumulatorze płyta dodatnia znajduje się zawsze między dwiema odjemnemi? (Dodatnia płyta jest siatką ołowianą, której otwory zapełnione są pastą, składającą się z tlenków ołowiu. Przy reakcjach chemicznych, jakie w niej zachodzą, ta **masa czynna** doznaje wielkich zmian objętości, a ciśnienia, stąd pochodzące, wyginałyby płytę, gdyby były jednostronne).

2. Wyładowanie i ładowanie akumulatora można przedstawić następującem równaniem:

$$\overset{+}{PbO_2} + 2\,H_2SO_4 + \overset{-}{Pb} \underset{\text{łado} \longleftarrow \text{wanie}}{\overset{\text{wyła} \longrightarrow \text{dowanie}}{=}} \overset{A}{PbSO_4} + 2\,H_2O + \overset{K}{PbSO_4},$$

Sprawdź, że jest ono rzeczywiście skróconem przedstawieniem procesów, zachodzących w akumulatorze.

3. W jakim celu amalgamuje się cynk ogniwa? (Cynk handlowy zawiera zazwyczaj rozmaite metaliczne zanieczyszczenia, które są przyczyną powstawania prądów miejscowych, gdy cynk zanurzony jest w elektrolicie; prądy te objawiają się tem, że na cynku wydziela się wodór nawet wtedy, gdy ogniwo jest otwarte. Ponieważ cynk roztwarza się w rtęci łatwiej od innych metali, zanieczyszczających go, przeto amalgamowanie doprowadza atomy cynku do zetknięcia się z elektrolitem, a przeszkadza zetknięciu się z nim zanieczyszczeń cynku).

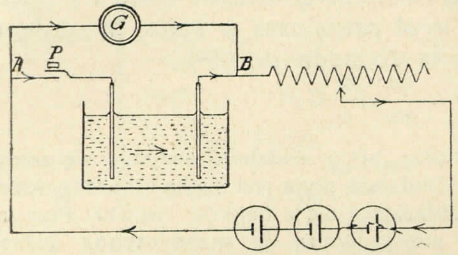
4. Na ryc. 192 przedstawione jest połączenie przyrządu elektrolitycznego E z baterją B, galwanometrem G i upustem U. Położenie przełącznika jest takie, że równocześnie dotyka styków a i b. Wskaż kierunki prądów w położeniu przełącznika ab i c. Jaki cel ma to łączenie? (Chodzi o to, aby silny prąd baterji tylko częściowo przechodził przez galwanometr, słaby zaś prąd polaryzacyjny aby cały przezeń płynął).

5. Co należy uczynić, aby zwiększyć pojemność akumulatora? (Należy powiększyć powierzchnię płyt i grubość masy czynnej).

Ćwiczenia.

*1. Opisać akumulator; jak wyglądają płyty naładowane, jaka ich liczba, jak połączone; jaka gęstość elektrolitu, jakie napięcie akumulatora wyładowanego. Obserwować akumulator podczas ładowania i opisać, jakie zmiany w nim zachodzą. (Płyta dodatnia po naładowaniu ciemnobronzowa, odjemna jest szara; płyt odjemnych jest o jedną więcej, niż dodatnich; gęstość elektrolitu przed ładowaniem 1,14, po naładowaniu 1,20.)

*2. Między elektrodami platynowemi (w braku platynowych węglowemi) przeprowadzić elektrolizę rozcieńczonego kwasu siarkowego, (siarczanu cynkowego, wodorotlenku sodowego), z załączeniem aparatów, jak na ryc. 194, w ten sposób, żeby zacząć od prądu o napięciu osłabionem w opornicy, i napięcie to stopniowo zwiększać.



Ryc. 194.

Przy tem odczytywać i zapisywać daty następujące: a) opór, b) napięcie obwodu w punktach AB, (nie przyciskając P) c) napięcie obwodu, pomniejszone o napięcie polaryzacji (z przyśnięciem P. Napięcie odczytywać na woltmetrze G o wielkim oporze; zawsze przeczekać, aż się woltmetr ustali. Zrazu odczytanie c) jest zerem; dopiero od pewnego napięcia b) zaczyna i c) wzrastać. Różnica między odczytaniami b) i c) jest **napięciem polaryzacji.** Okaże się, że dla każdego zestawienia elektród i elektrolitu potrzeba innego napięcia, przy którem elektrolit zaczyna się rozkładać.

*3. Sporządzić akumulator z ogniwa Daniella i zmierzyć jego sprawność. (Zestawić ogniwo Daniella z cynku w siarczanie cynkowym z kwasem siarkowym i miedzi w rozcieńczonym kwasie siarkowym. Połączyć bieguny z galwanometrem i wyładować. Następnie włączyć silną baterję, biorąc biegun miedzi jako anodę i ładować ogniwo, aż na cynku zaczną się okazywać banieczki wodoru. Mamy znów ogniwo Daniella, które wyładowujemy, aż prąd zupełnie zaniknie. Mierzyć natężenie prądu co 5 minut. Stąd obliczyć ilość prądu przy wyładowaniu i przy ładowaniu i sprawność akumulatora.

Reakcje:

$$\overset{+}{Cu} + CuSO_4 \; || \; H_2SO_4 + 2\overset{-}{Zn} \underset{\text{ładowanie}}{\overset{\text{wyładowanie}}{\rightleftharpoons}} 2\overset{A}{Cu} + H_2SO_4 \; || \; ZnSO_4 + \overset{K}{Zn}$$

Podwójna kreska oznacza ściankę porowatą.)

Zadania.

1. Baterja galwaniczna składająca się z $n = 12$ ogniw, połączonych w szereg, dostarcza prądu $J = 8\,A$ w ciągu $t = 5$ *min.* Ile cynku zużyło się ($\epsilon = 0{,}00034\ gr/Asek$), jeżeli skutkiem zanieczyszczeń cynku doliczyć trzeba 10% zużycia na prądy miejscowe? (Zużycie cynku w jednem ogniwie ϵJt, w n ogniwach ϵnJt; do tego dodać 10%. Wynik $1{,}1 \cdot \epsilon nJt$)

2. Obliczyć zużycie cynku, gdy 12 ogniw połączonych jest równolegle i dają ten sam prąd $J = 8\,A$, w $t = 5$ *min.* (Prąd w jednem ogniwie, gdy wszystkie są jednakowe, wynosi $\frac{J}{n}$, przeto zużycie w jednem ogniwie $\epsilon \frac{J}{n} t$, w n ogniwach $\epsilon J t$. Wynik $1{,}1\,\epsilon Jt$, niezależny od liczby ogniw połączonych równolegle; zużycie jest n razy mniejsze, niż przy łączeniu w szereg).

3. Mamy dwa ogniwa Daniella o oporze wewnętrznym $r = 0{,}85\,\Omega$, i sile elektromotorycznej $E = 1{,}06\ V$. Jakie jest natężenie prądu przy oporze zewnętrznym $R = 5\,\Omega$, gdy używamy jednego ogniwa, J, dwóch w szereg, J_{sz} dwóch równolegle, J_r?

$$\left(J = \frac{E}{r+R},\quad J_{sz} = \frac{2E}{2r+R},\quad J_r = \frac{E}{\frac{r}{2}+R} = \frac{2E}{r+2R}\right)$$

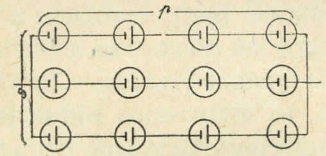
4. Mamy n jednakowych ogniw o sile elektromotorycznej E, o oporze wewnętrznym r, które połączone w szereg dają przy oporze zewnętrznym R prąd J_{sz}, przy połączeniu równoległem prąd J_r. Jaki jest stosunek natężeń prądów?

$$\left(J_{sz} = \frac{nE}{nr+R},\quad J_r = \frac{E}{\frac{r}{n}+R} = \frac{nE}{r+nR},\quad \frac{J_{sz}}{J_r} = \frac{r+nR}{nr+R}\right)$$

5. Kiedy natężenie prądu nie zależy od sposobu łączenia, w szereg, czy równoległego? (Gdy $J_{sz} = J_r$; wtedy $r = R$, opór zewnętrzny równy jest wewnętrznemu. Ponieważ jednak przy łączeniu równoległem wedle wyniku Zad. 2, zużycie cynku jest n razy mniejsze, niż przy łączeniu w szereg, przeto przy galwanoplastyce i elektrolizie używać będziemy łączenia równoległego, byle tylko napięcie prądu do tej elektrolizy było wystarczające).

6. Kiedy otrzymujemy większe natężenie prądu, łącząc ogniwa w szereg, czy też równolegle, gdy opór zewnętrzny jest większy od wewnętrznego? ($J_{sz} : J_r = [(r+R) + (n-1)R] : [(r+R) + (n-1)r]$; gdy więc $R > r$, to także $J_{sz} > J_r$).

7. Z n jednakowych ogniw można utworzyć s szeregów po p ogniw. Jakie jest natężenie prądu, gdy E, r i R mają to samo znaczenie, co w zadaniach poprzednich (ryc. 195)? Przy jakiej kombinacji natężenie prądu jest maximum?



Ryc. 195.

$$\left(J = \frac{pE}{\frac{pr}{s}+R} = \frac{psE}{pr+sR}\right.$$

Aby J było maximum, musi wartość mianownika $pr + sR$ być minimum. Wyrażenie to można napisać

$$pr + sR = (\sqrt{pr} - \sqrt{sR})^2 + 2\sqrt{psrR}$$

Ponieważ iloczyn $psrR = nrR$ ma przy danych n, r, R stałą wartość, przeto minimum wyrażenia $pr + sR$ zachodzi wtedy, gdy $\sqrt{pr} - \sqrt{sR} = 0$, czyli gdy $\frac{pr}{s} = R$. Zatem natężenie prądu baterji n ogniw, łączonych w s szeregów po p ogniw, jest wtedy największe, gdy opór wewnętrzny baterji równa się oporowi zewnętrznemu.)

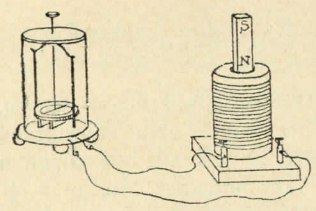
8. Ile najmniej potrzeba akumulatorów ($E = 2\,V$, $r = 0{,}2\,\Omega$), aby przy oporze zewnętrznym $1{,}5\,\Omega$ mieć 10 A prądu? (Mamy równania

$pr = sR$ i $J = \frac{psE}{pr + sR}$; z nich obliczamy $p = \frac{2JR}{E}$ i $s = \frac{2Jr}{E}$, zatem liczba akumulatorów $n = p.s = \frac{4J^2Rr}{E^2}$ Potrzeba 30 ogniw, połączonych w 2 równoległe szeregi po 15).

C. PRĄDY ZMIENNE.

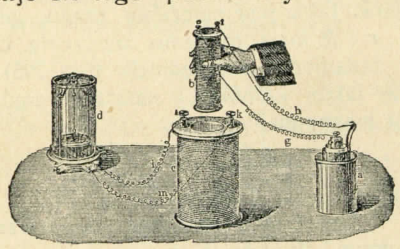
§ 63. Indukcja magnetoelektryczna.

*1 Do zwojnicy o bardzo wielu zwojach cienkiego drutu, połączonej z odległym galwanometrem, wsuwamy nagłym ruchem biegun magnesu sztabowego; następnie go wysuwamy (ryc. 196). Galwanometr odchyleniem swej wskazówki stwierdza, że w zwojnicy płynęły dwa krótkotrwałe prądy o przeciwnych kierunkach. To samo zjawisko spostrzeżemy, gdy poruszymy zwojnicę ku magnesowi, a następnie ją oddalimy. To samo, gdy zamiast magnesu zbliżamy do zwojnicy lub od niego oddalamy płytę z miękkiego żelaza.



Ryc. 196.

Wszystkie wyżej opisane przypadki mają tę wspólną cechę, że pasmo przewodnika (zwojnica) zmienia swoje położenie wobec pola magnetycznego tak, że skręty pasma przecinają linje sił tego pola. Gdy to zachodzi, w paśmie zamkniętem powstaje prąd, trwający tak długo, jak długo trwa zmiana pola magnetycznego. Zjawisko to nazywamy **indukcją magnetoelektryczną**, a prąd, wzbudzony w przewodniku przez zmianę pola magnetycznego, nazywamy **prądem indukcyjnym.**

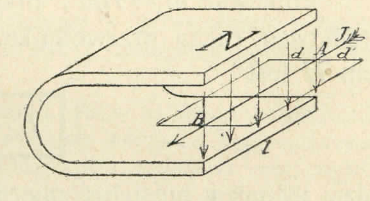


Ryc. 197.

*2. Zastąpmy magnes w doświadczeniach ust. 1 drugą zwojnicą połączoną z ogniwem (ryc. 197). Czy to przez zbliżanie do siebie obu zwojnic i następne oddalanie, czy przez przerywanie prądu, czy też przez zmianę natężenia prądu powstają w zwojnicy, połączonej z galwanometrem, prądy indukcyjne. Zjawisko to nazywamy **indukcją elektroelektryczną**; prąd wzbudzający nazywamy **prądem głównym**, indukcyjny zaś prądem **wtórnym**.

Działanie indukcyjne wzmacnia się znakomicie, gdy prąd główny opływa rdzeń miękkiego żelaza albo pęk drutów żelaznych (II § 54, 3).

3. Powstawanie prądów indukcyjnych tłumaczy się przy pomocy teorji elektronowej w następujący sposób. Przewodnik metaliczny zawiera pewną ilość swobodnych elektronów, które, unoszone podczas ruchu przewodnika w polu magnetycznem, doznają odchylenia. Gdy więc przewodnik AB poruszy się w polu magnetycznem NS na drodze d (ryc. 198), to należy ułożyć prawą rękę tak, aby dłoń była zwrócona do linij magnetycznych, z N wychodzących, a palce wskazywały kierunek ruchu, a wtedy brzeg ręki wskaże kierunek prądu indukcyjnego (II § 48 Pyt. 4), wskutek tego prąd indukcyjny płynie od A do B



Ryc. 198.

4. Prąd indukcyjny o natężeniu J, płynąc przez przewodnik o długości l od A do B, w polu magnetycznem o natężeniu H, wywołuje według II § 55, 1 działanie elektrodynamiczne, którego wielkość $F = HJl$ i skutkiem którego przewodnik ten w jakimś krótkim czasie τ przesunie się na drodze d, ale w kierunku wprost przeciwnym temu, w którymby go należało poruszyć, aby taki prąd indukcyjny otrzymać. Wyrażone jest to w **prawie Lenza** R u c h p r z e w o d n i k a w p o l u m a g n e t y c z n e m d o z n a j e p r z e c i w d z i a ł a n i a, k t ó r e g o w i e l k o ś ć o d p o w i a d a n a t ę ż e n i u p r ą d u i n d u k c y j n e g o, t y m r u c h e m w y w o ł a n e g o.

Według tego prawa przy przesunięciu przewodnika AB na drodze d musimy wykonać taką pracę, jaką wykonałyby siły elektrodynamiczne, aby przewodnik z prądem J przesunąć na drodze $d' = d$ Praca ta jest jak wiemy z II § 55, 2, równa $W = Fd = HJld = \Phi J$, gdzie $\Phi = Hld$ jest strumieniem magnetycznym, przeciętym przez przewodnik na drodze d

5. Jeżeli w przewodniku AB powstaje prąd indukcyjny J, to musi istnieć na jego końcach różnica potencjałów (napięcie, **siła elektromotoryczna indukcji**) E, której wielkość obliczymy. Wtedy praca prądu, płynącego przez czas τ, na podstawie II § 59, 2 równa się $W = EQ = EJ\tau$ i praca ta zmienia się w ca-

łości na pracę elektrodynamiczną $W = \Phi J$, z porównania zaś tych wyrażeń wynika

$$\boxed{E = \frac{\Phi}{\tau}}$$

$\frac{\Phi}{\tau}$ oznacza wielkość strumienia magnetycznego czyli liczbę linij magnetycznych, przecinanych przewodnikiem w jednostce czasu, nazywamy ją **prędkością zmiany strumienia magnetycznego**. Zatem siła elektromotoryczna indukcji równa jest prędkości zmiany strumienia magnetycznego.

Ponieważ $\Phi = Hld$, przeto $\frac{\Phi}{\tau} = Hl\frac{d}{\tau}$, a gdy $\frac{d}{\tau} = v$ jest prędkością ruchu przewodnika, to w polu jednorodnem, o stałem H jest

$$\boxed{E = Hlv,}$$

gdzie jednak v musi być mierzone prostopadle do linij sił pola.

Wszystkie te równania wyprowadzone są dla jednostek elektromagnetycznych. Chcąc przejść do jednostek praktycznych, trzeba użyć odpowiednich zamienników (II § 49).

6. Do prądów indukcyjnych stosuje się też prawo Ohma, wyjąwszy te przypadki, w których występuje indukcja własna (samoindukcja, Pyt. 6). Można więc obliczyć natężenie prądu i ilość elektryczności Q przepędzonej w pewnym czasie τ przez przewodnik AB o oporze R, a mianowicie $J = \frac{E}{R} = \frac{\Phi}{R\tau} = \frac{Q}{\tau}$, skąd

$$\boxed{Q = \frac{\Phi}{R}.}$$

Z równania tego odczytujemy, że ilość elektryczności, przepędzonej przez przewodnik podczas indukcji, jest proporcjonalna do strumienia magnetycznego, przeciętego przewodnikiem, a nie zależy od czasu płynięcia prądu, ani od prędkości ruchu przewodnika.

Pytania.

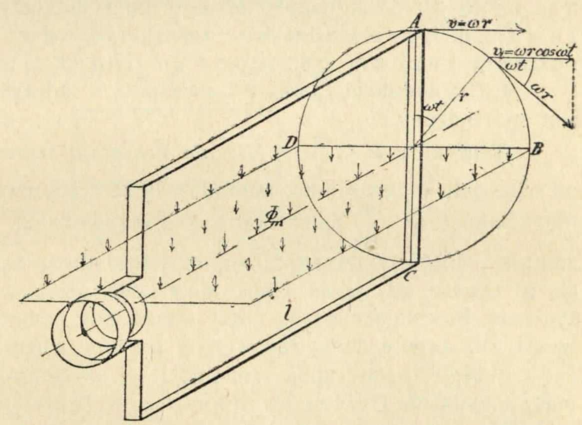
1. Magnes sztabowy przesuwa się ruchem jednostajnym przez środek zwoju kołowego. Jakie prądy indukcyjne powstają w zwoju? Objaśnić rysunkiem.

(Gdy biegun północny zbliża się do zwoju i magnes przesuwa się aż do pasa obojętnego, a patrzymy na zwój w kierunku ruchu magnesu, wówczas prąd indukcyjny płynie w kierunku wskazówki zegarowej (dodatnim), w dalszej zaś części ruchu magnesu w kierunku przeciwnym (odjemnym). Natężenie prądu wzrasta do zera do największej wartości dodatniej w chwili, gdy biegun północny przez zwój przechodzi, maleje do zera w pasie obojętnym, wzrasta w kierunku odjemnym do takiego samego maximum dla bieguna południowego i maleje znów do zera. Prąd w tym przykładzie zmienia się na podobieństwo funkcji sinus, jak odchylenie w ruchu wahadłowym (I § 28, 1) albo w ruchu harmonicznym (II § 1, 2). Prądy takie, których wielkość w sposób ciągły się zmienia, nazywamy w przeciwieństwie do prądów stałych **prądami zmiennemi**; prądy zmienne, w których i kierunek ulega zmianie, nazywamy **prądami przemiennemi**.)

2. Jak zachowuje się prąd indukcyjny w przewodniku kołowym, gdy magnes, o którym była mowa w Pyt. 1, zastąpimy zwojnicą albo elektromagnesem?

(Zachowuje się zupełnie tak samo. Przy zbliżaniu przewodnika kołowego do zwojnicy płynie w przewodniku kołowym prąd indukcyjny przeciwnego kierunku do prądu głównego, przy oddalaniu prąd zgodny z prądem głównym. Ten sam wynik otrzymamy na podstawie prawa Lenza. Przy zbliżaniu przewodnika do prądu głównego występuje odpychanie, zatem według II § 55, 3 prądy płyną w kierunkach przeciwnych przy oddalaniu występuje przyciąganie prądów zgodnych.)

3. Przewodnik zamknięty, n. p. prostokątny, porusza się w jakikolwiek sposób w polu magnetycznem jednorodnem. Jak zmienia się siła elektromotoryczna indukcji podczas obracania tego przewodnika? Objaśnić rysunkiem.



Ryc. 199.

(Pomyślmy, że linje pola przechodzą pionowo z góry na dół, a przewodnik prostokątny obracamy około osi poziomej (ryc. 199). Ponieważ siła elektromotoryczna indukcji wyraża się $E = Hlv$, a v ma być mierzone prostopadle do linii pola, przeto E zmieniać się będzie podczas obrotu tak, jak zmienia się prędkość w ruchu harmonicznym (II § 1, 2) $v_t = \omega r \cos \omega t$ więc $E_t = 2Hlr\omega \cos \omega t$ gdzie H oznacza natężenie pola magnetycznego, l długość przewodnika przecinającego pole, r promień koła, zakreślanego przez przewodnik, $\omega = \frac{2\pi}{T}$ prędkość kątową albo **częstość kołową** prądu, t czas, liczony od punktu A a E siłę elektromotoryczną w chwili t na końcach pasma zamkniętego, składającego się z dwóch przewodników, z których każdy ma długość l, gdyż dwa inne boki prostokąta żadnej indukcji nie dają.

Wyrażenie $Hl\ 2r = \Phi_m$ jest strumieniem magnetycznym, który objęty jest prostokątem przewodników w położeniu prostopadłem do pola magnetycznego, przeto $E_t = \omega\Phi_m \cos\omega t$. Tu $\omega\Phi_m$ oznacza prędkość zmiany strumienia magnetycznego, przecinanego przez przewodnik prostokątny, w położeniu, gdzie ta prędkość ma wartość największą; jej odpowiada siła elektromotoryczna indukcji (w położeniu A amplituda)

$$\boxed{E_m = \omega\,\Phi_m,}$$

zatem

$$\boxed{E_t = E_m \cos\omega t.}$$

Koniecznym warunkiem, aby w paśmie zamkniętem powstała indukcja, jest, aby strumień magnetyczny, tem pasmem obejmowany, doznawał zmiany. Dzieje się to podczas obracania przewodnika zamkniętego około osi prostopadłej do linij pola magnetycznego. P r z y p o s u w a n i u p r z e w o d n i k a z a m k n i ę t e g o w p o l u j e d n o r o d n e m r u c h e m p o s t ę p o w y m i n d u k c j i n i e m a.

4. Czy indukcja zależy od materjału, z którego pasmo przewodnie jest sporządzone?

(Równania $E = \frac{\Phi}{\tau} = Hlv$ nie zawierają żadnej wielkości, zależnej od materjału przewodnika, natomiast ilość przepływającej elektryczności indukowanej $Q = \frac{\Phi}{R}$ zależy od oporu przewodnika. Gdy opór jego jest znikomy, ilość elektryczności indukowanej może być olbrzymia. Dzieje się to zawsze, gdy jakaś masa metaliczna porusza się w polu magnetycznem. Powstające wtedy prądy indukcyjne nazywamy **prądami wirowemi**. Dla zapobieżenia zbyt silnym prądom wirowym, które zużywają część energji dostarczanej, zamieniając ją na ciepło, składa się większe masy metaliczne (rdzenie elektromagnesów tworników) z cienkich blach, od siebie izolowanych lakierem albo cienkim papierem.

5. Wskazać kierunki prądów indukcyjnych podczas przerywania prądu głównego.

(**Prąd przerywany** otrzymujemy przez kolejne otwieranie i zamykanie prądu trwałego. **Otworzenie prądu**, t. j. rozłączenie przewodników, jest nagłem osłabieniem prądu, musi więc mieć taki sam skutek, jak nagłe oddalenie prądu głównego od pasma wtórnego; zatem p o d c z a s o t w i e r a n i a p r ą d u g ł ó w n e g o p r ą d w t ó r n y m a k i e r u n e k j e m u p r z e c i w n y. Przy **zamykaniu prądu** tak, jak przy jego powiększaniu albo zbliżaniu, p r ą d w t ó r n y m a k i e r u n e k z g o d n y z g ł ó w n y m.)

6. W II § 55, 3 była mowa o **indukcji własnej**. Objaśnić ją powstawaniem prądów indukcyjnych.

(Zmiana natężenia prądu głównego wytwarza wokoło niego zmianę natężenia pola magnetycznego, a ta wywołuje prąd indukcyjny w każdym przewodniku, który się w polu znajduje, a więc także w przewodniku prądu głównego. P r ą d i n d u k c y j n y w z b u d z o n y p r z e z i n d u k c y j n e d z i a ł a n e p r ą d u g ł ó w n e g o n a w ł a s n y p r z e w o d n i k, n a z y w a m y **prądem indukcji własnej** albo **samoindukcyjnym**.

P r ą d s a m o i n d u k c y j n y m a k i e r u n e k p r z e c i w n y w s z e l k i e j z m i a n i e p r ą d u g ł ó w n e g o. Gdy prąd główny osłabiamy, samoindukcja powiększa go, gdy go otwieramy samoindukcja przedłuża jego trwanie, gdy go powiększamy, samoindukcja wstrzymuje jego wzrost, gdy go zamykamy, nie pozwala mu osiągnąć od razu pełnej wartości. W II § 55, 3 zauważyliśmy, że stosunek zm Φ : zm J stosunek zmiany strumienia magnetycznego do zmiany prądu głównego czyli do natężenia prądu samoindukcyjnego jest dla pewnego przewodnika stały, zależny tylko od jego geometrycznych własności. Stosunek ten nazwaliśmy **spółczynnikiem indukcji własnej**, nazywają go też krótko **samoindukcją**,

$$\boxed{L = \frac{\text{zm}\,.\,\Phi}{\text{zm}\ J}}$$

Ponieważ siła elektromotoryczna indukcji jest równa $E = \frac{\text{zm}\ \Phi}{\tau}$ przeto rugując z tych równań zm Φ otrzymujemy

$$\boxed{L = E : \frac{\text{zm}\ J}{\tau},}$$

co oznacza, że w s z e l k a z m i a n a n a t ę ż e n i a p r ą d u w p r z e w o d n i k u w y w o ł u j e w n i m p r o p o r c j o n a l n ą d o t e j z m i a n y s i ł ę e l e k t r o m o t o r y c z n ą s a m o i n d u k c j i.

Ćwiczenia.

*1. Zwój drutu, używany w II § 54 Ćw. 1, wstawić jednym bokiem między bieguny silnego elektromagnesu. Końce drutu połączyć z galwanometrem. Przez nagłe ruchy zwoju, prostopadłe do linij sił magnetycznych, otrzymuje się wychylenia wskazówki galwanometru.

*2. Ustaw deskę (tablicę) pionowo w południku magnetycznym, nakreśl na niej prostą w kierunku linji magnetyzmu ziemskiego, a w punktach tej prostej, oddalonych od siebie na 1 m, wbij w tablicę silne haki, do których przytwierdź druty miedziane, o długości jednakowej, jak największej, choćby 10 m. Końce tych drutów połącz z końcami pręta metalowego długości 1 m, zapomocą śrub, zapewniających metaliczne połączenie, haki zaś wbite w tablicę połącz z oddalonym, czułym galwanometrem. Gdy pręt chwycisz w rękę i naciągnąwszy druty, szybkim ruchem obrócisz go w prawo, potem w lewo, otrzymasz wychylenia wskazówki galwanometru.

*3. Z cienkiego papieru sporządź lekki rulon (walec długi) o takiej średnicy, aby magnes sztabowy swobodnie weń wchodził. Rulon ten owiń cienkim drutem (włosy aniołów), jak zwojnicę i skrawkami papieru umocuj drut, aby zwoje nie dotykały siebie i nie zsuwały się; następnie zawieś go w położeniu poziomem na dwóch cienkich drutach i wsuń do wnętrza jedną połowę magnesu sztabowego, umocowanego poziomo w stojaku. Końce drutów połącz z zwojnicą o wielu skrętach tak, aby zwojnica, rulon i druty łączące je tworzyły jedno pasmo przewodnie zamknięte. Wsuwanie i wysuwanie drugiego magnesu sztabowego w zwojnicy powoduje wahadłowy ruch rulonu.

*4. Gruba igła magnetyczna, podparta na osi pionowej, pobudzona do ruchu obrotowego, wiruje dość długo. Gdy do wirującej igły zbliżymy z góry poziomo grubą płytę miedzianą, ruch zostanie widocznie zahamowany

*5. Do struny monokordu w środku jej długości przylutować monetę miedzianą w położeniu pionowem. Naciągnąć strunę tak, aby pobudzona do drgania wydawała pewien ton. Gdy jednak moneta znajduje się między biegunami silnego elektromagnesu, nie można jej do drgania pobudzić i tonu nie słychać.

*6. Krótką, lecz grubą rurę miedzianą, o wąskiem świetle, zatkajmy u dołu trzpieniem, nadającym się do wirownicy. Do wnętrza nalejmy eteru, u góry zaś zatkajmy szczelną zatyczką gumową i obracajmy rurkę szybko między biegunami silnego elektromagnesu. Prądy wirowe, powstające w masie miedzi, podniosą jej temperaturę do wrzenia eteru, skutkiem czego zatyczka gumowa będzie wyrzucona pod powałę.

*7 Jeden koniec drutu, prowadzącego z ogniwa, połącz z nowym pilnikiem, końcem zaś drugiego drutu przesuwaj po powierzchni naciętej pilnika. Powstają iskry. Iskry są niewidoczne, gdy oba druty od ogniwa prowadzone są równolegle, wtedy bowiem samoindukcji niema. Iskrzenie staje się znaczne, gdy jeden z drutów zwiniemy w zwojnicę, największe, gdy w zwojnicę wstawimy miękkie żelazo.

Zadania.

1 Drut miedziany o długości 10 *m*, grubości 2,5 *mm*, rozciągnięty z zachodu na wschód, jak w Ćw 2, poruszamy w płaszczyźnie prostopadłej do linij magnetyzmu ziemskiego w miejscu, gdzie całkowite natężenie pola wynosi 0,47 *Gaussa*, z prędkością 5 *m/sek*. Obliczyć siłę elektromotoryczną indukcji na końcach przewodnika. ($E = Hlv$ 0,47 *Gaussa* 1000 *cm* 500 *cm/sek* = 235 000 *e. m. potencjału* = 0,00235 *V*.)

2. Obliczyć natężenie prądu indukcyjnego w Zad. 1 gdy opór właściwy miedzi $\rho = 0{,}017\ 10^{-4}\Omega\ cm$. (Opór przewodnika $R = \rho \cdot \frac{l}{s} =$

$$= 0{,}017\ 10^{-4}\ \Omega\ cm\ \frac{1000\ cm}{\frac{\pi}{4}\ 0{,}25^2\ cm^2} = 0{,}0346\ \Omega$$ Natężenie prądu

$$J = \frac{E}{R} = \frac{0{,}00235\ V}{0{,}0346\ \Omega} = 0{,}0678\ A = 67{,}8\ mA = 0{,}00678\ e.\ m.\ natężenia.)$$

3. Obliczyć siłę elektrodynamiczną (II § 55, 1), wywieraną przez pole magnetyczne ziemskie na prąd Zad. 2.

($F = HJl = 0{,}47$ *Gaussa* 0,00678 *e. m. natężenia* 1000 *cm* = 3,19 *dyny*.)

4. Jak wielki strumień magnetyzmu ziemskiego przecina ten przewodnik, poruszając się na drodze $d = 1\ m$?

($\Phi = Hld = 0{,}47$ *Gaussa*. 1000 *cm* 100 *cm* = 47 000 *j. m.*)

5. Sprawdzić obliczenie siły elektromotorycznej indukcji zapomocą równania $E = \Phi \cdot \tau$.

($\tau = \frac{100\ cm}{500\ cm/sek} = \frac{1}{5}\ sek$; $E = \frac{47000\ j.\ m.}{1/5\ sek} = 235\,000$ *e. m. potencjału.*)

6. Jaką pracę trzeba wykonać przeciwko siłom elektrodynamicznym, poruszając ten przewodnik w polu magnetyzmu ziemskiego?

($W = Fd = 3{,}19$ *dyny* 100 *cm* = 319 *ergów*. Albo $W = EJ\tau =$ 235 000 *e. m. potencjału*. 0,00678 *e. m. natężenia* $1/5$ *sek* = 319 *ergów*.)

§ 64. Prądnice.

1 Maszyny, w których podczas ruchu zwojnic w polu magnetycznem wytwarza się przez indukcję magnetoelektryczną prąd, nazywamy **prądnicami (generatorami)**. Są to więc urządzenia, które energję mechaniczną — pracę obracania części ruchomych maszyny — przekształcają na energję elektryczną prądu.

Każda prądnica składa się z dwóch głównych części. z **magnesów pola** i z **twornika**. Te same części składowe poznaliśmy już w silniku elektrycznym (II § 57), bo każdy silnik elektryczny może być odwrócony prąd, obiegający twornik silnika, wywołuje obrót twornika i na odwrót ruch obrotowy twornika prądnicy indukuje w nim prąd. Powyższa **zasada odwracalności** opiera się na prawie Lenza, które jest tylko szczegółowym przypadkiem zasady zachowania energji.

Silniki, opisane w II § 57, pracują przy użyciu prądu stałego; użyte, jako prądnice, są źródłem prądu stałego, do którego stosują się wszystkie prawa prądów trwałych. Wspólną ich cechą jest, że prąd w nich wytworzony odbieramy ze szczotek, które dotykają przeciwległych wycinków kolektora, nazywamy je **prądnicami prądu stałego.**

2. Gdyby na tworniku znajdował się tylko jeden zwój, siła elektromotoryczna indukcji podczas jego obrotu zmieniałaby się tak, jak podano w II § 63 Pyt. 3. Gdy jednak zwojów na tworniku jest wielka liczba, siły elektromotoryczne, aczkolwiek różne w poszczególnych zwojach, sumując się, gdyż zwoje połączone są w szereg, dają na sumę stałą wartość, stałą siłę elektromotoryczną prądnicy

W II § 57, 3 obliczyliśmy, że moc prądu, o natężeniu J_0, który płynie przez twornik silnika o z zwojach, przecinających strumień magnetyczny Φ i obraca twornik N razy na *sek*, wyraża się $P = Nz\Phi J_0$ Prawo odwracalności wymaga, żeby silnik ten, użyty jako prądnica, dawał prąd o takiej samej mocy $P = E_s J_0 = Nz\Phi J_0$, gdzie E_s jest **siłą elektromotoryczną indukcji w tworniku.** Stąd

$$\boxed{E_s = Nz\Phi}$$

Gdy twornik prądnicy obracamy a szczotki jej kolektora nie są połączone, wtedy różnica potencjałów na szczotkach jest równa tej właśnie obliczonej sile elektromotorycznej. (Porównaj II § 59, 2 i § 60 Ćw 1). Gdy zaś szczotki prądnicy połączone są z oporem zewnętrznym, wtedy siła elektromotoryczna musi przepędzić elektryczność, indukowaną w zwojach twornika, nie tylko przez opór zewnętrzny, ale i przez opór własnego uzwojenia R_w, zatem część jej będzie zużyta w samym tworniku tak, że, gdy prąd płynący ma natężenie J, na biegunach prądnicy pozostaje napięcie

$$\boxed{E = E_s - R_w J = Nz\Phi - R_w J}$$

*3. Prądnicę prądu stałego można przerobić na prądnicę prądu przemiennego w następujący sposób. Magnesy pola wzbudzajmy zapomocą osobnej baterji akumulatorów Którekolwiek dwa przeciwległe wycinki kolektora połączmy z dwoma izolowanemi od siebie pierścieniami na osi twornika. Szczotki z kolektora przenieśmy do tych pierścieni. Wtedy podczas obrotu twornika w obwodzie zewnętrznym, łączącym szczotki, płynąć będzie prąd przemienny, ponieważ siła elektromotoryczna na biegunach prądnicy zmieniać się będzie według równania

$$\boxed{E_t = E_m \sin \omega t,}$$

gdzie E_m oznacza największą wartość siły elektromotorycznej indukcji, funkcja zaś cos zastąpiona jest funkcją sin, ponieważ

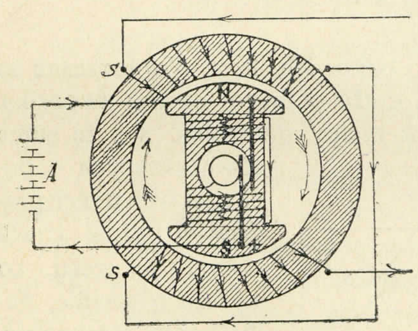
w prądach przemiennych zwykle zaczynamy liczyć czas t nie od położenia twornika, gdzie E ma wartość największą, ale od położenia (od położenia D na ryc. 199), gdzie ma wartość zero. Wartość największa E_m obliczona była w II § 63 Pyt. 3 dla jednego skrętu na tworniku (dla prostokąta przewodników) jako $\omega\Phi_m$, dla z skrętów na tworniku wartość ta będzie

$$\boxed{E_m = \omega z \Phi_m = \frac{2\pi}{T} z\Phi_m = 2\pi N z\Phi_m}$$

Przypomnieć sobie należy, że ω jest **prędkością kątową** twornika w ruchu obrotowym albo **częstością kołową** prądu, T jest **czasem jednego obrotu** albo **okresem prądu przemiennego**, a liczba $N = \frac{1}{T}$ jest **częstością prądu przemiennego**. Porównaj II § 1, 4).

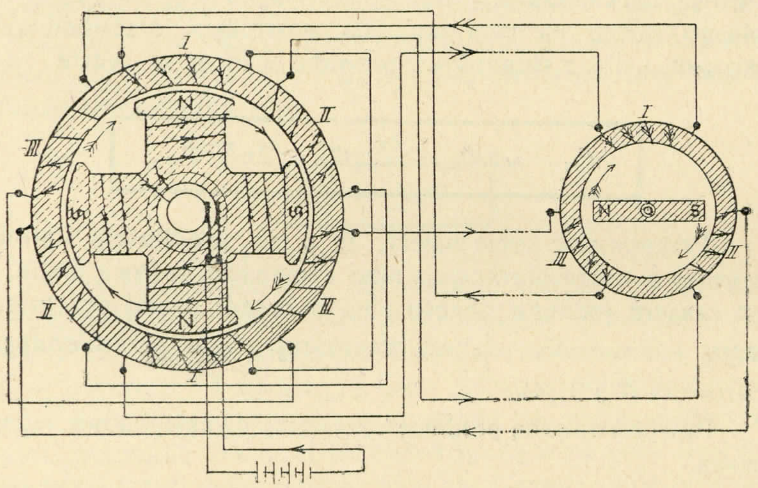
Powyżej opisaną prądnicę nazywamy dwubiegunową, jednofazową.

4. Zwykle prądnice prądu przemiennego, t. zw **alternatory,** zbudowane są inaczej. Magnesy pola stanowią część wewnętrzną maszyny, wirującą, zwaną **wirnikiem (rotorem)**, twornik zaś, z którego odbiera się prąd przemienny, tworzy część zewnętrzną, nieruchomą, zwaną **jarzmem** lub **kadłubem (statorem)**. Ryc. 200 przedstawia schematycznie prądnicę **dwubiegunową**, bo wirnik tworzą dwa bieguny, **jednofazową**, bo na jarzmie jest tylko jedno pasmo nawinięte. Bieguny wirnika wzbudzane są zapomocą baterji akumulatorów A lub też prądnicy prądu stałego, której bieguny (+,—) połączone są z szczotkami, ślizgającemi się na pierścieniach wirnika Prąd przemienny odbiera się z dwóch spinek (S, S), umieszczonych na zewnątrznej stronie kadłuba.



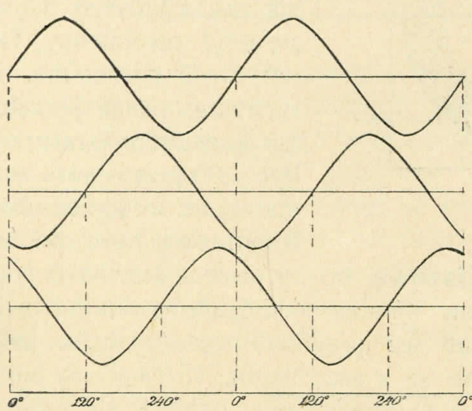
Ryc. 200.

Z prądnic **wielofazowych** najważniejsze są **trójfazowe**, posiadające na jarzmie trzy pary zwojnic, tworzących trzy pasma z sześciu końcówkami. Ryc. 201 przedstawia taką prądnicę trójfazową, **czterobiegunową.** We wszystkich pasmach powstają



Ryc. 201.

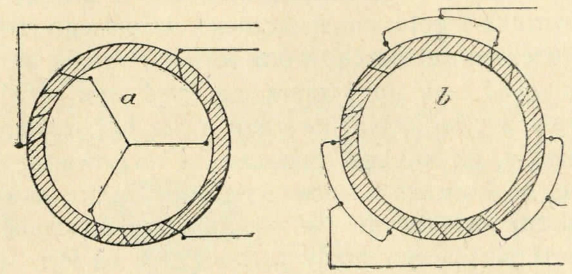
prądy przemienne jednakowe, tylko ich fazy równoczesne są wobec siebie przesunięte o $^1/_3$ część pełnego obrotu twornika, t. j. o 120^0 (ryc. 202). Można z ryciny przekonać się, że suma równoczesnych odchyleń tych trzech prądów w każdej chwili równa się zeru, co wyraża równanie, dające się sprawdzić, $\sin a + \sin(a + 120^0) + \sin(a + 240^0) = 0$, a odnosi się to zarówno do sił elektromotorycznych, jak i do natężeń prądów w tych pasmach przewodnich, gdyż i jedno i drugie zmieniają się wedle tych samych praw



Ryc. 202.

$$E = E_m \sin \omega t \quad \text{i} \quad J = J_m \sin \omega t$$

Na tem opiera się możność zastąpienia trzech par przewodów zewnętrznych tylko trzema przewodami, bo zwojnice na



Ryc. 203.

jarzmie można połączyć albo w **gwiazdę**, gdzie według I prawa Kirchhoffa (ryc. 203 a)

$$J + J + J'' = 0,$$

albo w **trójkąt**, gdzie według II prawa Kirchhoffa (ryc. 203 b)

$$E + E' + E = 0$$

W obu przypadkach otrzymujemy trzy przewody zewnętrzne, któremi doprowadzamy trzy prądy przemienne aż do miejsca zużycia, do świecenia lamp żarowych lub łukowych, do ogrzewania w grzejnikach, do poruszania silników prądu przemiennego lub też do **przetwornic**, przetwarzających dane prądy przemienne na jakiekolwiek inne.

5. Każda prądnica prądu przemiennego może być użyta, jako **silnik prądu przemiennego**, z tym tylko warunkiem, aby wirnik jej wprzód został wprawiony w ruch obrotowy o takiej częstości obrotu, jaką ma prąd przemienny, który ma ją w ruchu utrzymać. Silniki tego typu nazywamy **synchronicznemi.**

Z wielu innych typów silników prądu przemiennego najbardziej jest rozpowszechniony **silnik z polem wirującem** czyli **silnik indukcyjny** Prądnicę wielofazową przerobić można na silnik indukcyjny, gdy końcówki zwojów wirnika, które w silniku synchronicznym połączone są ze źródłem prądu stałego, połączymy z sobą czyli **zewrzemy** Prądy fazowe wytwarzają w jarzmie silnika **wirujące pole magnetyczne.** W wirniku, którego zwoje są zwarte, powstają pod wpływem tego pola prądy indukcyjne i występuje działanie elektrodynamiczne między zwojami wirnika i wirującem polem magnetycznem, skutkiem czego wirnik przechodzi w ruch obrotowy, który jednak nie osiąga częstości kołowej pola wirującego; dlatego silnik taki nazywamy także **asynchronicznym**. Różnica między częstością kołową wirnika i pola magnetycznego wirującego jest tem większa, im większa jest praca, którą wirnik podczas obracania się ma wykonywać czyli im większą ma mieć moc (dzielność).

Wirnik z uzwojeniem zwartem może być zastąpiony walcem żelaznym, na którego płaszczu są przytwierdzone sztaby miedziane, na końcach z sobą połączone, albo nawet samym tylko walcem metalowym · w takim walcu powstają przez indukcję pola wirującego prądy wirowe (II § 63 Pyt. 4), a działanie elektrodynamiczne między temi prądami polem wirującem wprawia także wirnik w ruch obrotowy

Na ryc. 201 przedstawiono schematycznie połączenie prądnicy prądu przemiennego z silnikiem synchronicznym, wirnikiem jest tu magnes sztabowy obracający się na osi pionowej.

6. Przyrządy, służące do mierzenia prądów przemiennych, woltmetry i ampermetry, muszą być galwanometrami, odchylającemi się tylko w jedną stronę, zatem według II § 56 Pyt. 2, wychylenia ich są proporcjonalne do J^2, a gdy mierzą napięcia, do E^2 Ponieważ wskazówka galwanometru nie może drgać zgodnie z częstością prądu przemiennego, przeto ustawia się w pewnem położeniu, odpowiadającem średniej wartości kwadratu napięcia. Ponieważ zaś $E_t = E_m \sin \omega t$, zatem, oznaczając tę średnią wartość symbolicznie przez ujęcie kwadratu wyrażenia w nawias, napiszemy

$$(E_t^2) = (E_m^2 \sin^2 \omega t) = E_m^2 \; (\sin^2 \omega t)$$

Chodzi teraz o obliczenie średniej wartości $(\sin^2 \omega t)$ przy zmianie kąta od 0^0 do 180^0 Ponieważ $\sin^2 \omega t + \cos^2 \omega t = 1$, zatem także $(\sin^2 \omega t) + (\cos^2 \omega t) = 1$, lecz $(\sin^2 \omega t) = (\cos^2 \omega t)$, ponieważ kwadraty obu tych funkcyj przybierają te same wartości przy zmianie kąta od 0^0 do 180^0, tylko w innym porządku, przeto $(\sin^2 \omega t) = \frac{1}{2}$, a $(E_t^2) = \frac{E_m^2}{2}$ Stąd średnie napięcie, które nazywamy **napięciem skutecznem**,

$$\boxed{(E) = \frac{E_m}{\sqrt{2}}}$$

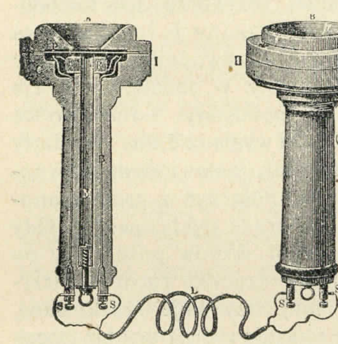
Tak samo oblicza się **natężenie skuteczne**,

$$\boxed{(J) = \frac{J_m}{\sqrt{2}}}$$

Pytanie.

1. Opisać zasadę telefonu i uwydatnić podobieństwo tego przyrządu do maszyn elektrycznych.

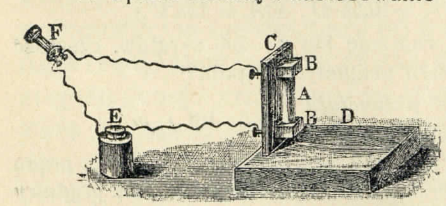
Telefon (ryc. 204) służy do przesyłania głosu na odległość. Składa się z dwóch jednakowych przyrządów, połączonych parą przewodników każdy zaś przyrząd składa się z magnesu sztabowego i zwojnicy cienkiego drutu miedzianego, nasuniętej na jeden biegun magnesu. Przed biegunem znajduje się blaszka żelazna, ujęta w drewnianą oprawę, mającą na dnie lejkowaty otwór, przez który środek blaszki przegląda. Gdy się do tego otworu mówi, fale powietrza uderzają o blaszkę i wprawiają ją w ruch drgający Wskutek zmiany w natężeniu magnetyzmu magnesu powstają w zwojnicy indukcyjne prądy przemienne, które przeprowadzone drutami do zwojnicy drugiego takiego samego przyrządu, zmieniają natężenie magnetyzmu jego magnesu, przez co blaszka, przed nim umieszczona, zostaje pobudzona do takich samych drgań, jakie wykonywa blaszka w pierwszym przyrządzie. Drganie blaszki wytwarza fale głosowe, a te sprawiają te same wrażenia w uchu, jak głosy do pierwszego przyrządu wypowiadane.


Ryc. 204.

Przyrząd pierwszy przyjmujący drgania głosowe (energię mechaniczną) i przetwarzający je na prąd (energię elektryczną), jest prądnicą prądu przemiennego, przyrząd drugi, oddający drgania głosowe, czyli **słuchawka** telefonu, jest silnikiem prądu przemiennego. Blaszki w obu przyrządach są wirnikami tych maszyn, a magnesy są ich jarzmami. Różnica tylko ta zachodzi, że w maszynach elektrycznych wirniki wirują, w telefonie zaś odbywają ruch drgający.

2. Opisać zasadę i zastosowanie mikrofonu.

Mikrofon w połączeniu z telefonem służy do przesyłania głosu na bardzo wielkie odległości. Zasadę jego podaje ryc. 205, gdzie mikrofonem jest sztabka węgla retortowego A tkwiącego luźnie w zagłębieniach dwóch innych kawałków węgla B, przytwierdzonych do deszczułki C Działanie mikrofonu polega na tem, że gdy prąd przechodzi przez przewodniki luźnie do

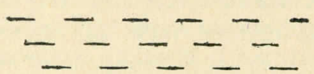


Ryc. 205.

siebie przylegające, wtedy przy najmniejszem wstrząśnieniu nacisk w miejscach zetknięcia zmienia się, a z nim opór przewodników, co powoduje zmianę w natężeniu prądu. Gdy ten prąd przechodzi zarazem przez telefon, wówczas blaszka zostaje pobudzona do drgań, które stają się źródłem głosu. Chcąc głos przeprowadzić na znaczną odległość, umieszcza się w obwodzie zewnętrznym baterji galwanicznej mikrofon i zwojnicę główną induktora, zwojnicę zaś wtórną tego przyrządu łączy się z telefonem. Przy takiem urządzeniu można przesyłać głos na setki kilometrów. (O induktorze będzie mowa w II § 66, 7).

Ćwiczenia.

*1. Arkusz bibuły zmoczyć w stężonym roztworze soli kuchennej z dodatkiem kilku kropel roztworu fenolftaleiny i rozścielić na czystej, polerowanej płycie metalowej. Trzy przewodniki izolowane prądu trójfazowego wstawić równolegle do siebie w oddaleniu $1/2$ *cm* między dwie deseczki tak, aby z drutów pozostały wolne końce równej długości, oczyścić je z izolacji, opiłować i wygładzić, aby nie darły bibuły, każdy drut połączyć z dwiema lampkami, wstawionemi równolegle i całość połączyć z trójbiegunowym stykiem prądu trójfazowego. Gdy trzema końcami drutów posuniemy po arkuszu bibuły szybkim ruchem, otrzymamy na niej trzy linje kreskowane, na których okazuje się różnica faz trzech prądów (ryc. 206). Czerwone zabarwienie w elektrolizie chlorku sodowego powstaje na katodzie, albowiem tworzący się tam wodorotlenek sodowy barwi się z fenolftaleiną na czerwono. Zatem środek każdej czerwonej kreski oznacza maximum prądu, płynącego od płyty metalowej przez bibułę ku drutowi, środek zaś odstępu niezabarwionego oznacza maximum prądu o kierunku przeciwnym.



Ryc. 206.

*2. Na płycie gramofonowej połóż płytę metalową, polerowaną, na niej arkusz bibuły, jak w Ćw. 1. Do bibuły wirującej przyłóż dwie końcówki prądu przemiennego i wykonaj pomiar częstości drgań prądu, jak w II § 7 Ćw 1. Liczba kresek czerwonych na każdej z dwóch linij w sekundzie, a więc częstość drgania prądu przemiennego wypadnie 50/*sek*.

Zadania.

1. Prądnica daje prąd stały $J = 40\ A$ przy napięciu $110\ V$ Opór twornika $R_w = 0{,}65\ \Omega$; obliczyć jej siłę elektromotoryczną.
$(E_s = E + R_w J = 110\ V + 0{,}65\ \Omega\ \ 40 A = 136\ V.)$

2. Na tworniku tej prądnicy znajduje się $z = 200$ skrętów, częstość obrotu $N = 10/sek$; jaki jest strumień magnetyczny pola?
$$(\Phi = \frac{E_s}{Nz} = \frac{136.10^8\ e.\ m\ potencjału}{10/sek.\ 200} = 6{,}8\ 10^6\ j.\ m.)$$

3. Jaka jest moc tej prądnicy, jaka jej sprawność? (Moc prądu **użyteczna** jest $P = EJ = 110\ V\ \ 40 A = 4440\ W$. Całkowita moc prądnicy jest $P_c = E_s J = 136\ V\ \ 40 A = 5440\ W$ Sprawność
$$\eta = \frac{P}{P_c} = \frac{E}{E_s} = \frac{110}{136} = 0{,}81 = 81\%.)$$

4. Prądnica ta została według przepisu, podanego w ust. 3, przerobiona na prądnicę prądu przemiennego. Jaka jest amplituda napięcia indukcyjnego? $(E_m = 2\pi N z \Phi_m = 2\pi E_s = 855\ V.)$

5. Jakie jest **napięcie skuteczne** prądu przemiennego, gdy amplituda napięcia wynosi $855\ V$? $(605\ V.)$

§ 65. Własności prądów przemiennych.

1. U prądów trwałych zachodzi prosty związek między wielkościami charakterystycznemi prądu: napięciem, natężeniem i oporem, związek ten jest określony prawem Ohma $E = R J$, które w ten sposób rozumieć należy, że opór danego przewodnika jest w pewnej temperaturze wielkością stałą, że zatem natężenie prądu jest do napięcia, istniejącego na końcówkach przewodnika, proporcjonalne.

U prądów przemiennych sprawa jest cokolwiek skomplikowana, z tej mianowicie przyczyny, że zmiana natężenia prądu J wywołuje zmianę pola magnetycznego w przestrzeni, otaczającej przewodniki (strumień magnetyczny Φ), a ta zmiana pola wzbudza w przewodnikach siłę elektromotoryczną samoindukcji E'', która, jako zawsze przeciwna prądowi głównemu, odejmuje się od napięcia E', jakieby wynikało z prawa Ohma, zmieniając przytem nie tylko jego wartość, ale i fazę. Zatem w prądach przemiennych prócz oporu **Ohmowego** R' występuje jeszcze opór dodatkowy R'', zwany **oporem samoindukcyjnym**, a one oba składają się na **opór całkowity** prądu przemiennego, R.

2. Rozpatrzmy te stosunki dokładniej.

Gdy natężenie prądu zmienia się według prawa funkcji sinusowej
$$J_t = J_m \sin \omega t \qquad \text{I}$$
od 0 do J_m (amplituda natężenia), to strumień magnetyczny wywołany zmianą prądu, zmienia się od 0 do Φ_m, a siła elektromotoryczna samoindukcji od 0 do E_m. Według II § 63 Pyt. 6 spółczynnik samoindukcji równa się ilorazowi zmiany strumienia magnetycznego przez zmianę natężenia prądu, równa się więc także ilorazowi ich maksymalnych zmian,
$$L = \frac{\text{zm. } \Phi}{\text{zm. } J} = \frac{\Phi_m}{J_m}.$$
Ponieważ zaś według II § 63 Pyt. 3 prędkość zmiany strumienia magnetycznego równa jest sile elektromotorycznej indukcji

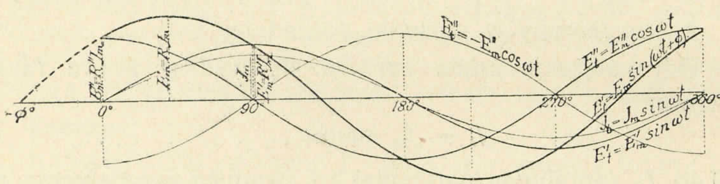
$\omega\Phi_m = E''_m$, przeto rugując z dwóch ostatnich równań Φ_m, otrzymamy

$$\boxed{R'' = \frac{E''_m}{J_m} = \omega L}$$

Opór samoindukcyjny równa się iloczynowi z samoindukcji przez częstość kołową prądu przemiennego.

*3. Powtórzmy doświadczenie II § 2 Ćw 1 z dwoma jednakowemi wahadłami sprzężonemi. Przekonamy się, że gdy jedno wahadło przechodzi przez położenie równowagi, drugie z niem sprzężone znajduje się w położeniu krańcowem. Innemi słowy wahadło sprzężone, odbierające pobudzenia do drgań, waha się wobec wahadła pierwszego ruchem o $\frac{1}{4}$ okresu drgnienia spóźnionym.

To samo zachodzi przy wszelkiej indukcji, a więc i przy indukcji własnej. Siła elektromotoryczna indukcji E'', osiąga maximum w tej chwili, gdy napięcie prądu głównego J jest zerem, bo prąd indukcyjny jest wobec prądu głównego spóźniony o $\frac{1}{4}$ okresu (ryc. 207). Jeżeli więc dla prądu stałego o natężeniu J potrzebaby napięcia $E' = R'J$, to dla prądu przemiennego z samym tylko oporem Ohmowym napięcie chwilowe ma wartość



Ryc. 207.

$$E'_t = E'_m \sin \omega t = R J_m \sin \omega t$$

Zmienność napięcia samoindukcyjnego, o $\frac{1}{4}$ okresu w fazie spóźnionego, przedstawiona jest na ryc. 207 wykresem

$$E''_t = E''_m \cos \omega t$$

Dla pokonania więc samoindukcji musi prądnica dostarczyć jeszcze napięcia

$$E''_t = E''_m \cos \omega t = R'' J_m \cos \omega t,$$

zatem całkowite napięcie, potrzebne do utrzymania prądu prze-

miennego o amplitudzie J_m, ma wartość chwilową równą sumie tych napięć

$$E_t = J_m (R \sin \omega t + R'' \cos \omega t)$$

Wyrażenie powyższe uprościmy, podstawiając

$$R' = R \cos \phi, \quad R'' = R \sin \phi,$$

przyczem $R = \sqrt{R'^2 + R''^2}$, a $\operatorname{tg}\phi = \frac{R''}{R'}$, otrzymujemy

$$\boxed{E_t = RJ_m \sin(\omega t + \phi) = E_m \sin(\omega t + \phi),} \qquad \text{II}$$

jako chwilową wartość **napięcia całkowitego,** które musi być dostarczone przez źródło prądu przemiennego, przyczem **opór całkowity**

$$\boxed{R = \sqrt{R'^2 + (\omega L)^2},}$$

a **przesunięcie fazy** określone jest równaniem

$$\boxed{\operatorname{tg}\phi = \frac{\omega L}{R'}}$$

Gdy w paśmie przewodniem istnieje tylko opór Ohmowy (n. p. lampka żarowa), a niema samoindukcji, (to zn. $L = 0$), wtedy $R = R'$, $\operatorname{tg}\phi = 0$ i $\phi = 0$, wtedy prąd stosuje się do prawa Ohma, a napięcie prądu ma fazę zgodną z natężeniem. Gdy przeciwnie opór Ohmowy $R' = 0$, jest znikomy wobec wielkiej samoindukcji L i wielkiej częstości kołowej prądu $\omega = 2\pi N$, wtedy $\operatorname{tg}\phi = \infty$, a $\phi = 90^0$, wtedy napięcie prądu wyprzedza natężenie o $\frac{1}{4}$ okresu. W każdym innym przypadku

$$R > R', \; E_m = RJ_m > E'_m = R'J_m, \quad \text{a} \quad 0 < \phi < 90^0,$$

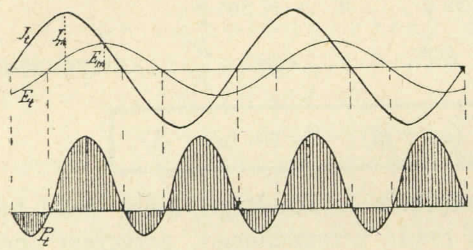
t. zn. **opór całkowity prądu przemiennego jest zależny od częstości prądu i jest większy od oporu Ohmowego, napięcie prądu przemiennego musi być większe od napięcia prądu stałego przy tem samem natężeniu, a opóźnienie fazy natężenia wobec napięcia nie przekracza 90⁰**

4. U prądów stałych moc prądu wyraża się iloczynem $P = EJ$ To samo obowiązuje także w prądach przemiennych, gdzie jednak z powodu zmienności napięcia i natężenia także

i moc prądu jest wielkością zmienną, $P_t = E_t J_t$ Obliczymy ją, uwzględniając równania I i II

$$P_t = E_m J_m \sin \omega t \sin (\omega t + \phi) =$$

$$E_m J_m \sin \omega t \, (\sin \omega t \cos \phi + \cos \omega t \sin \phi).$$



Rys. 208.

Wykres jej przedstawiony jest na ryc. 208, z której jest widoczne, że moc prądu już w jednej połowie okresu zmienności E_t lub J_t przebiega cały swój okres. Przytem część większa mocy jest dodatnia, część mniejsza jest odjemna, co znaczy, że w jednej części okresu zródło prądu musi dostarczyć energji, w drugiej zaś części okresu prąd sam zwraca część poprzednio pobranej energji, zatem d z i e l n o ś ć ź r ó d ł a p r ą d u p r z e m i e n n e g o r ó w n a s i ę ś r e d n i e j w a r t o ś c i m o c y p r ą d u, o b l i c z o n e j z j e d n e j p o ł o w y o k r e s u, n. p. dla kątów, zmieniających się od 0 do 180° W tym celu obliczmy średnie wartości wszystkich wyrazów zmiennych, wchodzących w ostatnie równanie.

$(\sin \omega t) = \frac{1}{\sqrt{2}}$, jak obliczono w II § 64, 6,

$(\cos \omega t) = 0$, albowiem funkcja cos dla kąta, zmieniającego się od 0 do 180°, przybiera te same wartości dodatnie i odjemne. Podstawiwszy to w ostatnie równanie, otrzymujemy

$$(P) = (P_t) = E_m J_m \frac{1}{\sqrt{2}} \frac{1}{\sqrt{2}} \cos \phi,$$

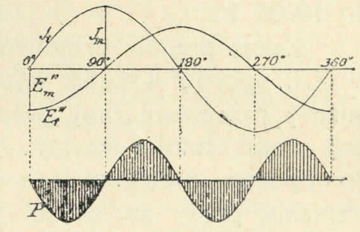
co można także napisać, ponieważ $\frac{E_m}{\sqrt{2}} = (E)$, a $\frac{J_m}{\sqrt{2}} = (J)$,

$$\boxed{(P) = (E)\ (J) \cos \phi} \qquad . \text{ III}$$

M o c p r ą d u p r z e m i e n n e g o r ó w n a s i ę i l o c z y n o w i s k u t e c z n y c h w a r t o ś c i n a p i ę c i a i n a t ę ż e n i a, p o m n o ż o n e m u p r z e z **czynnik mocy,** tak bowiem nazywają cos przesunięcia fazy napięcia wobec fazy natężenia.

Gdy występuje tylko opór Ohmowy, a opór samoindukcyjny jest zerem, wtedy $\phi = 0$, wtedy podobnie, jak dla prądów stałych, $(P) = (E)\ (J)$.

Gdy opór Ohmowy jest zerem, a istnieje tylko opór samoindukcyjny, wtedy $\phi = 90^0$, zatem $(P) = 0$, wtedy źródło prądu żadnej pracy nie wykonywa, część dodatnia mocy równa jest części odjemnej (ryc. 209), praca dostarczona przez źródło w jednej części, zwrócona jest źródłu w zupełności w części drugiej. Prąd taki raz wzbudzony, powinien płynąć w przewodnikach pozbawionych oporu w nieskończoność, tam i z powrotem, jak wahadło wahać się powinno w nieskończoność, gdy usuniemy opory, ruch jego hamujące; taki prąd nazywają **prądem bezwattowym.**



Rys 209.

5. Prąd przemienny posiada wobec prądu stałego pewne bardzo ważne zalety. Wymienimy je w krótkości.

Prądnice prądu przemiennego obywają się bez kolektora, który stanowi najsłabszą stronę prądnic prądu stałego. Albowiem wskutek samoindukcji w tworniku powstaje iskrzenie się na kolektorze, które nie tylko zużywa pewną ilość energji i niszczy kolektor, ale co najważniejsze iskrzenie to stawia pewną granicę napięciu prądu stałego (do 1000 V), której przekroczyć nie można. Tymczasem cały nowoczesny rozwój elektrotechniki polega na stosowaniu prądów o wysokiem napięciu. Przyczyna tego jest następująca

Prądnice ustawia się w tych miejscach, gdzie energja, potrzebna do wytwarzania prądu jest tania (siły wodne, bliskość kopalni węgla, gazy ziemne). Prąd wytworzony przeprowadza się przewodami do miejsc, nieraz bardzo odległych, gdzie ma być użyty do świecenia, do ogrzewania lub gdzie zapomocą silników elektrycznych ma być wykonywana praca. Sprawność nowoczesnych maszyn elektrycznych (II § 59 Zad. 3) jest bardzo wielka, bo dochodzi do 95%, ale ogromnie obniża się sprawność całej instalacji elektrycznej wskutek strat w przewodach (ciepło Joula). Aby te straty były nieznaczne, potrzeba, aby spadek napięcia na przewodach, a więc iloczyn RJ według prawa Ohma, był jak najmniejszy Iloczyn zmniejszyć można przez zmniejszenie jednego z czynników Aby zmniejszyć opór R, trzebaby używać grubych przewodów, co byłoby zbyt kosztowne; należy więc zmniejszyć natężenie prądu J. Lecz chodzi także o to, aby z prądnicy przesłać jak największą ilość energji, zatem tak prądnica, jak i silnik muszą być maszynami o wielkiej mocy $P = EJ$. Wobec tego, że J ma wartość niewielką, musi napięcie tak prądnicy, jak i silnika, E być tak wysokie, aby iloczyn EJ posiadał żądaną wielkość. Do tego celu nadają się prądnice prądów przemiennych, z których odbierać można prądy do 10000 V

Zaletą prądów przemiennych jest także łatwość stwarzania w nich oporów wskutek samoindukcji. Gdy więc prąd przemienny przeprowadzimy przez zwojnicę z grubego drutu, występuje opór samoindukcyjny, $R'' = \omega L$, który w przeciwieństwie do oporów prądu stałego nie podlega prawu Ohma i nie zamienia prądu na ciepło Joula, a więc nie zużywa energji elektrycznej.

Dalszą wreszcie zaletą prądów przemiennych jest to, że prądy te dają się przetwarzać w sposób bardzo wygodny i niekosztowny na prądy o dowolnem napięciu wyższem lub niższem, a tam, gdzie prąd stały jest koniecznie potrzebny (do ładowania akumulatorów, do galwanoplastyki) dają się także przetwarzać na żądany prąd stały. Odbywa się to w przyrządach lub maszynach, które nazywamy **przetwornicami** i o których będzie mowa w II § 66.

Pytanie.

1. Uzasadnić, że prąd samoindukcyjny musi spóźniać się w fazie wobec prądu głównego o ćwierć okresu.

Prąd samoindukcyjny powstaje kosztem prądu głównego, jak każdy prąd indukcyjny. Część pasma przewodniego A indukuje w innej części B prąd z przesunięciem fazy ϕ; ten prąd na odwrót w części A indukuje znów prąd z tem samem przesunięciem fazy ϕ, a oba przesunięcia razem muszą wynosić 180^0, jeżeli ten prąd, drugorzędnie indukowany w części A, ma być co do kierunku przeciwny prądowi głównemu. Stąd $\phi = 90^0$. Powtórzyć to rozumowanie na wahadłach sprzężonych.

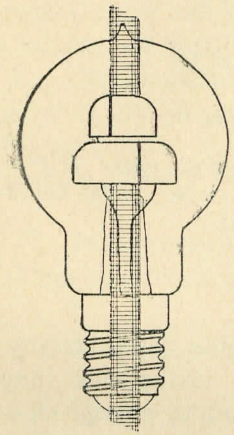
Ćwiczenia.

*1. Powtórz doświadczenie II § 55 Ćw. 2 (ryc. 171) z tą odmianą, że zamiast ogniwa użyj prądu przemiennego miejskiego, osłabionego opornicą lampkową. Ujrzymy również odpychanie się prądów przeciwnie skierowanych, a przyciąganie się prądów zgodnych.

*2. Na wąskiej desce, pionowej, długości ponad 2 m, napiąć drut mosiężny, 0,5 mm gruby, ciężarem 6 kg. Podstawkę umieśćmy tak, aby ton struny miał wysokość 50/sek (ton G_1). Połączmy strunę przez opornicę lampkową z prądem przemiennym (częstość 50/sek) i ustawmy elektromagnes, pobudzany prądem stałym baterji akumulatorów albo silny magnes podkowiasty tak, aby struna znajdowała się między jego biegunami. Usłyszymy ton G_1, a amplituda drgań będzie tem większa, im bardziej

drgania własne struny, które regulujemy przez przesuwanie podstawki albo powiększanie ciężaru napinającego, zgadzają się z częstością drgań prądu przemiennego.

*3. Równolegle do struny z Ćw. 2 włączmy lampkę jarzącą dwubiegunową (neonową, II § 58 Pyt. 1), której elektrody w formie czapek rozbłyskują naprzemian po 50 razy na sek. Ustawmy lampkę za struną, w otworze, wyciętym w desce, tak, aby linja struny była widoczna na tle obu elektród. Wtedy strunę drgającą ujrzymy na jednej elektrodzie w lewem skrajnem położeniu, na drugiej zaś w położeniu prawem (ryc. 210). Ponieważ strunę widzimy na tle elektrody jako ciemną linję wtedy, gdy ta elektroda jest najjaśniejsza, doświadczenie to dowodzi, że częstość drgania prądu jest taka sama, jak częstość drgania struny i że w chwilach największej jasności elektród (amplitudy natężenia prądu) struna znajduje się w położeniach największych odchyleń, gdzie jej prędkość jest zerem. Zatem faza drgania struny pozostaje o $\frac{1}{4}$ okresu poza fazą natężenia prądu.



Rys. 210.

Zadania.

1. Prądnica prądu przemiennego, której napięcie skuteczne na biegunach wynosi 5000 V, wydaje prąd o natężeniu skutecznem 100 A na sieć, obciążoną przeważnie motorami. Elektrodynamometr (II § 56, 4), zwany **wattmetrem**, gdy służy do mierzenia mocy prądu, wskazuje moc 400 kW. Obliczyć przesunięcie fazy czyli czynnik mocy.

(Według ust. 4 $\cos\phi = \frac{(P)}{(E)\,(J)} = \frac{400\,000\ W}{5000\ V \cdot 100\ A} = 0{,}8$.
Iloczyn EJ podaje się w VA, jako **moc pozorną**, podczas gdy **moc rzeczywistą** P podaje się w W. U prądów stałych tej różnicy niema).

2. Prądnica z Zad. 1 poruszana jest silnikiem roboczym o sprawności mechanicznej $\eta_m = 92\%$; sprawność prądnicy $\eta_p = 95\%$. Jaką dzielność musi mieć ów silnik, aby dawał prąd w Zad. 1 wymieniony?

$$(P) = \frac{(E)\,(J)\cos\phi}{\eta_m\ \eta_p} = \frac{5000\ V \cdot 100\ A \cdot 0{,}8}{0{,}92 \cdot 0{,}95} = 457500\ W \backsim 620\ KP.)$$

3. Lampa łukowa dla prądu przemiennego potrzebuje do świecenia 10 A przy napięciu 30 V. Mamy ją załączyć do prądu przemiennego miejskiego o napięciu skutecznem 110 V, należy więc albo oporami zniszczyć 80 V napięcia, co jednak powoduje stratę, której moc jest 80 V · 10 A = 800 W, albo też można użyć samoindukcji, która tak ma przesunąć fazę napięcia wobec natężenia, aby moc rzeczywista równała się mocy potrzebnej do świecenia lampy. Obliczyć czynnik mocy.

$$(\cos\phi = \frac{(P)}{(E)\,(J)} = \frac{30 \cdot 10\ VA}{110\ V \cdot 10\ A} = \frac{3}{11}.)$$

4. Jeżeli opór Ohmowy zwojnicy samoindukcyjnej, użytej w Zad. 3, wynosi 0,18 Ω, obliczyć jej opór samoindukcyjny, opór całkowity i spółczynnik samoindukcji. Częstość prądu 50/*sek*.

$$(R = \frac{R'}{\cos\phi} = \frac{0{,}18}{\frac{3}{11}}\,\Omega = 0{,}66\ \Omega\,;$$

$$R'' = R'\ \mathrm{tg}\,\phi = R'\ \frac{\sqrt{1\quad \cos^2\phi}}{\cos\phi} = 0{,}63\ \Omega\cdot$$

$$L = \frac{R''}{\omega} = \frac{R''}{2\pi N} = \frac{0{,}63\ \Omega}{100\,\pi/sek} = 0{,}002\,H$$

Przy użyciu samoindukcji strata energji wynosi tylko $R' J^2 =$ $0{,}18\,\Omega \quad 100\ A^2 = 18\ W$ wobec 800 W straty na ciepło Joula, koniecznej, gdybyśmy mieli do rozporządzenia prąd stały).

§ 66. Przetwornice.

1 **Przetwornicami** nazywamy urządzenia lub maszyny, które dowolny prąd dany przekształcają na jakikolwiek inny żądany Z jednej strony dostarczamy przetwornicy energji elektrycznej, z drugiej zaś energję elektryczną, przetworzoną, odbieramy, zatem przetwornice są szczególnemi typami machin (I § 46), w których obowiązuje zasada zachowania energji (I § 50). Jeżeli więc prąd, dostarczony przetwornicy, ma moc P, a odbieramy moc P', to zasada ta wymagałaby, aby $P = P'$. W praktyce jednak nigdy się to nie da osiągnąć z powodu nieuchronnych strat, które staramy się uczynić najmniejszemi, ale których uniknąć w zupełności nie można. Wskutek tego **sprawność** przetwornicy $\eta = P' : P$ jest zawsze mniejsza od 1.

Rozróżniamy przetwornice maszynowe, przetwornice indukcyjne i prostowniki prądu.

2. **Przetwornicę maszynową** stanowi silnik i prądnica, osadzone na wspólnym wale. Rodzaj silnika i prądnicy zależy od tego, jakiego prądu dostarczamy przetwornicy i jaki z niej chcemy otrzymać, można więc w ten sposób przetwarzać

prąd stały na prąd stały o innem napięciu,
„ „ „ „ przemienny, jedno lub wielofazowy,
„ przemienny „ „ stały,
„ „ „ „ przemienny o innem napięciu.

3. Do ostatniego rodzaju przetwarzania prądu przemiennego na przemienny o tej samej częstości, ale innem napięciu nie używa się w praktyce przetwornic maszynowych, ponieważ czynność tę spełniają nierównie dogodniej i taniej **przetwornice indukcyjne**, t. zw **transformatory**.

Gdy na rdzeń z miękkiego żelaza nawiniemy zwojnicę, przez którą płynie prąd przemienny **(główny)**, każda zmiana prądu wywołuje zmianę pola elektromagnetycznego, wtedy w drugiej zwojnicy, umieszczonej na tym samym rdzeniu, powstają prądy indukcyjne **(wtórne)**. Mówimy, że te prądy, główny i wtórny, są z sobą **indukcyjnie sprzężone**.

Gdy napięcie prądu głównego na końcówkach zwojnicy głównej jest (E), częstość kołowa prądu ω, liczba skrętów z, to amplitudę strumienia magnetycznego, wytworzonego tym prądem, oblicza się z równania (II § 64, 3)

$$E_m = \omega z \Phi_m \qquad . \quad . \quad . \quad \mathrm{I}$$

Ten strumień magnetyczny wytwarza w zwojnicy wtórnej, składającej się z z' zwojów, prąd indukcyjny o napięciu (E'),

$$E'_m = \omega z' \Phi_m \qquad \mathrm{II}$$

Z podzielenia obu równań stronami i z uwagi, że według II § 64, 6 $(E) = \frac{E_m}{\sqrt{2}}$ i $(E') = \frac{E'_m}{\sqrt{2}}$, otrzymujemy

$$\boxed{(E')\ \ (E) = z'\ \ z = n.} \quad . \quad . \quad . \qquad \mathrm{III}$$

Stosunek ten nazywamy **przenośnią transformatora**, równa się ona stosunkowi liczby skrętów zwojnicy wtórnej do liczby skrętów zwojnicy głównej.

4. Natężenie prądu wtórnego obliczymy zapomocą następującego rozumowania

Ponieważ tak zwojnica główna, jak i wtórna, składają się zwyczajnie z wielkiej liczby skrętów, przeto opór ich Ohmowy ma wobec oporu samoindukcyjnego tak mały wpływ na natężenie prądu, że możemy opór Ohmowy zaniedbać, a brać pod uwagę tylko opór samoindukcyjny Wielkość jego ωL obliczyliśmy w II § 65, 2 zatem $E_m = J_m \omega L$. To samo odnosi się do zwojnicy wtórnej, w której $E'_m = J'_m \omega L'$, a gdy przeniesienie transformatora jest n, otrzymujemy

$$\frac{E'_m}{E_m} = n = \frac{J'_m}{J_m}\ \frac{L'}{L} \qquad \mathrm{IV}$$

Chodzi teraz o wartość stosunku $L' : L$. Jeżeli samoindukcję jednego skrętu na siebie albo na jakikolwiek inny skręt nazwiemy L_o, to samoindukcja jednego skrętu na z skrętów zwojnicy jest zL_o, a samoindukcja z skrętów na z skrętów tej samej zwojnicy jest jeszcze z razy większa, zatem $L = z^2 L_0$ To samo w zwojnicy wtórnej $L' = z'^2 L_0$, a stąd

$$\frac{L'}{L} = \frac{z'^2}{z^2} = n^2 \quad . \quad \mathrm{V}$$

Z obu równań IV i V wynika

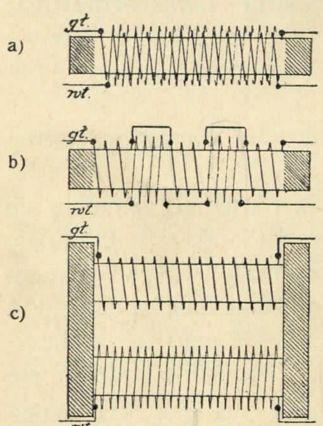
$$\frac{J'_m}{J_m} = \frac{1}{n} = \frac{E_m}{E'_m} \quad . \quad . \quad . \quad \mathrm{VI}$$

a ponieważ stosunek amplitud równy jest według II § 64, 6 stosunkowi wartości skutecznych, przeto

$$\boxed{(E)\,(J) = (E')\,(J').}$$

Gdy opór Ohmowy jest tak mały, że można go wobec samoindukcji zaniedbać, iloczyn napięcia i natężenia prądu głównego równy jest iloczynowi napięcia i natężenia prądu wtórnego.

5. Związki powyższe wyprowadzone są przy założeniu, że cały strumień magnetyczny, wytworzony przez prąd główny, przecina wszystkie skręty zwojnicy wtórnej Warunek ten nie spełnia się nigdy całkowicie część linij magnetycznych zawsze rozsiewa się nieużytecznie w powietrzu. Aby jednak najlepiej odpowiedzieć temu żądaniu, można na **otwartym rdzeniu** magnetycznym skręty zwojnicy wtórnej nawinąć na skręty zwojnicy głównej (ryc. 211 a) albo umieścić obok siebie zwoje wtórne między zwojami głównemi (ryc. 211 b), albo wreszcie rdzenie żelazne ze zwojnicami, główną i wtórną, połączyć jarzmami żelaznemi w **rdzeń zamknięty** (ryc. 211 c). Ten ostatni sposób najlepiej zapobiega rozsiewowi linij magnetycznych i dlatego używany jest zawsze w transformatorach prądu przemiennego.

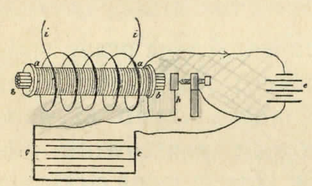


Ryc. 211.

6. Jak z powyższego widzimy, transformatory umożliwiają przetwarzanie prądu przemiennego o niskiem napięciu i wielkiem natężeniu na prąd o wysokiem napięciu i małem natężeniu i na odwrót. Dopiero w połączeniu z transformatorami występują w całej pełni zalety prądów przemiennych, o których

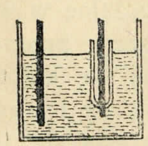
była mowa w II § 65, 5. Prąd o napięciu 10.000 *V*, otrzymywany z prądnicy, może być przetworzony na prąd o 100, 200, nawet o 500 tysiącach *Voltów*, a równocześnie natężenie jego tak może być zmniejszone, iż przeprowadzenie go na ogromne odległości na cienkich przewodnikach odbywa się bez wielkich strat z powodu ciepła Joula. Na miejscu zużycia prąd transformuje się z powrotem do napięcia niższego. To podwójne przetwarzanie prądu przemiennego, z niskiego napięcia na wysokie, celem przeprowadzenia na odległość i napowrót z wysokiego na niski, aby go uczynić możliwym do użycia, określamy nazwą **przeniesienia energji elektrycznej.**

7 Do przetwarzania prądu stałego na zmienny o wysokiem napięciu używamy **induktora (cewki indukcyjnej, cewki Ruhmkorffa),** to jest transformatora o otwartym rdzeniu magnetycznym. Aby jednak prąd stały miał własności indukujące, musi być przerywany W tym celu prócz samego transformatora, składającego się z rdzenia żelaznego i dwóch zwojnic, do induktora należy jeszcze **przerywacz** prądu, którym może być przy małych napięciach kółko zębate, mechanicznie przez obrót przerywające prąd, albo przerywacz samoczynny elektromagnetyczny (II § 54 Ćw 8), przedstawiony na ryc. 212, albo wreszcie, gdy chodzi o użycie prądu miejskiego (110 *V*), **przerywacz elektrolityczny** n. p. Wehnelta.



Ryc. 212.

Przerywacz Wehnelta (ryc. 213) jest to naczynie elektrolityczne, w którem katodą jest płyta ołowiana, anodą drut platynowy, wystający z rurki porcelanowej, a elektrolitem kwas siarkowy rozcieńczony (1 5) Z powodu wielkiej gęstości prądu przy anodzie i wysokiej wskutek tego temperatury, anoda otacza się parą wodną, która rozkłada się na wodór i tlen i powiększa tak bardzo swoją objętość, że prąd przerywa się. Lecz w chwili przerwania prądu powstaje iskra, która spala mieszaninę wybuchającą na powrót na wodę; wskutek tego elektrolit może zetknąć się z anodą i ten sam proces zaczyna się na nowo.



Ryc. 213.

Ważną częścią składową induktora jest **kondensator**, włączony równolegle z przerywaczem (ryc. 212) w obwód prądu głównego. Zadaniem jego jest przez swoją pojemność obniżyć napięcie samoindukcyjne, powstające podczas przerywania prądu, a tem samem skrócić czas trwania iskry w chwili przerywania. Ponieważ w przerywaczu elektrolitycznym właśnie ta iskra jest potrzebna do wybuchowego usunięcia par z anody, przeto przy użyciu takiego przerywacza kondensator działałby szkodliwie.

Napięcie prądu wtórnego zależy od szybkości przerywania prądu głównego, przeto chcąc osiągnąć wysokie napięcie, staramy się częstość przerywania uczynić jak największą. Przerywacz elektromagnetyczny może dać przerw najwyżej $20/sek$, przerywacz zaś Wehnelta do $2000/sek$, przyczem napięcie prądu wtórnego może wzróść do 100 000 V Między rozsuniętemi końcówkami prądu wtórnego przebiegają wtedy z głośnem trzeszczeniem jasne iskry, tworzące świetne pęki światła. Długość tych iskier dochodzi w wielkich induktorach do 1 m

Wszystkie zjawiska rozbrojeń elektrycznych, opisane w II § 48, 4, 5, § 50, 1, 2, 4, § 51, 3, przebiegają przy użyciu induktora o wiele piękniej, niż przy użyciu maszyny influencyjnej. Podobieństwo tych zjawisk wskazuje, że w obu razach czynne są prądy o wysokiem napięciu.

8. Do przetwarzania prądów przemiennych na prądy stałe używa się **prostowników.** O prostownikach maszynowych już była wzmianka w ust. 2. Wśród wielu innych często używane są **prostowniki elektrolityczne**, mianowicie **prostownik glinowy** Jest to naczynie elektrolityczne, w którem jedną elektrodą jest blacha glinowa, drugą blacha żelazna lub ołowiana, a elektrolitem jest roztwór kwaśnego węglanu sodowego, $NaHCO_3$ Gdy płyta glinowa jest anodą, wydziela się na niej tlen, który łączy się z glinem na tlenek Al_2O_3, ciało to nierozpuszczalne w wodzie, pokrywa anodę i stanowi przeszkodę w dalszem przepływaniu prądu. Gdy jednak elektroda glinowa stanie się katodą, wydzielający się na niej wodór i wodorotlenek sodowy usuwają warstewkę tlenku glinowego i prąd płynie bez przeszkody. Widzimy z tego, że zestawienie glinu z roztworem węglanu sodowego przepuszcza prąd, płynący z roztworu do glinu, zatrzymuje zaś prąd o kierunku przeciwnym. Działanie prostownika elektrolitycznego jest więc podobne do działania wentyla w pompie wodnej, który pozwala cieczy przepływać w jedną stronę, ale wstrzymuje jej ruch w kierunku przeciwnym. Dlatego i tu mówimy o działaniu **wentyla elektrycznego.**

Prostownika glinowego używa się do ładowania akumulatorów i do galwanoplastyki. Sprawność jego niewielka.

Pytania.

1 Jakich strat w transformatorze nieda się w zupełności uniknąć?

Są to straty z powodu ciepła Joula w obu przewodach, głównym i wtórnym, straty z powodu prądów wirowych w masie żelaza (II § 63, Pyt. 4) i straty z powodu histerezy magnetycznej (II § 56, Pyt. 3).

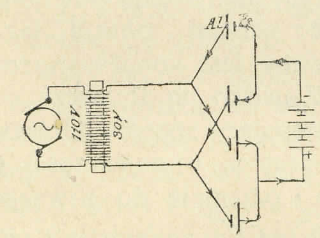
2. Czy prąd wtórny induktora jest prądem przemiennym, sinusowym?

Tak byłoby, gdyby i prąd główny był przemiennym, nie przerywanym. Jeżeli jednak prąd główny jest stały, przerywany, to występują według II § 63, 6 znaczne różnice w indukcji podczas zamykania i otwierania prądu głównego. W chwili zamykania prąd główny narasta powoli, zatem i indukcja w zwojnicy wtórnej jest niewielka; przeciwnie w chwili otwierania prądu głównego, szczególnie, gdy zapomocą kondensatora czas trwania iskry skrócimy, indukcja jest wielokrotnie większa. Skutkiem tego prąd wtórny induktora jest w jednym kierunku słaby, w przeciwnym zaś wiele razy silniejszy tak, że można go w przybliżeniu uważać za prąd także jednokierunkowy, przerywany, podobny do prądu głównego, ale o wyższem napięciu.

Ćwiczenia.

*1. Włączyć jedno ogniwo prostownika glinowego w obwód dzwonka elektrycznego i baterji. Okazać, że dzwonek dzwoni tylko wtedy, gdy elektroda glinowa jest katodą.

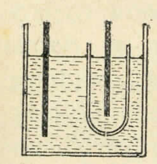
*2. Załączyć 4 ogniwa prostownika glinowego w celu użycia prądu przemiennego do ładowania akumulatorów.



Ryc. 214

Użyć transformatora, aby napięcie prądu miejskiego obniżyć, w przeciwnym bowiem razie ogniwa prostownika zbyt się rozgrzewają; następnie połączyć 4 ogniwa prostownika i baterję akumulatorów, jak podano na ryc. 214.

*3. Sporządzić przerywacz elektrolityczny **Simona** (ryc. 215). Dno próbówki rozgrzać do zmięknienia szkła i igłą stalową, rozgrzaną do czerwoności, wywiercić otwór w dnie. Dwa pręty ołowiane wstawić, jeden w próbówkę, drugi obok niej w naczynie obszerniejsze z rozcieńczonym kwasem siarkowym (30%). Działanie przerywacza polega na tem, że w wąskim otworze rurki, gdzie gęstość prądu jest bardzo wielka, powstaje tyle ciepła, iż woda zamienia się w parę, która przerywa prąd; natychmiast jednak para usuwa się i prąd w dalszym ciągu przechodzi. Napięcie prądu stałego albo przemiennego musi wynosić co najmniej 70 V



Ryc. 215.

*4. Okazać zapomocą lampki jarzącej (neonowej), włączonej w obwód wtórny induktora, że, gdy prąd główny jest przemienny, i prąd wtórny ma ten charakter, gdy jednak prąd

galwano-stegja — robienie medal,
Galwanostegja - robienie

główny jest stały, przerywany, prąd wtórny ma także charakter prądu jednokierunkowego.

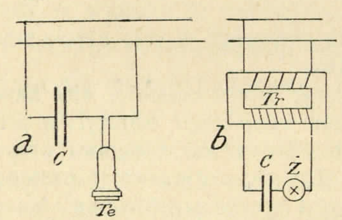
Lampka jarząca, z elektrodami w formie czapek, ma tę własność, że przy zastosowaniu prądu przemiennego obie elektrody są jasne, przy prądzie zaś jednokierunkowym rozświeca się tylko katoda.

D. FALE ELEKTROMAGNETYCZNE.

67. Kondensator w obwodzie prądu przemiennego.

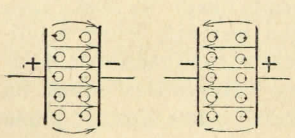
*1. Połączmy bieguny prądu przemiennego, miejskiego, w szereg z kondensatorem K (butelką lejdejską) i słuchawką telefoniczną T (ryc. 216 a). W słuchawce słychać wyraźnie ton o wysokości $50/sek$. Ton będzie tem głośniejszy, im większa pojemność kondensatora i im wyższe napięcie prądu. Przy użyciu kondensatora o pojemności $2\mu F$ i transformatora (induktora) dla podwyższenia napięcia prądu zwykła lampka żarowa L, wstawiona na miejsce słuchawki telefonicznej, rozświeca się jasnem światłem (ryc. 216 b).

2. Dla prądu stałego dielektryk kondensatora stanowiłby opór niedopokonania. Odzywanie się słuchawki i rozświecanie się lampki sprawiają wrażenie, jak gdyby prąd przemienny mógł krążyć, chociaż obwód jego przerwany jest kondensatorem.



Ryc 216.

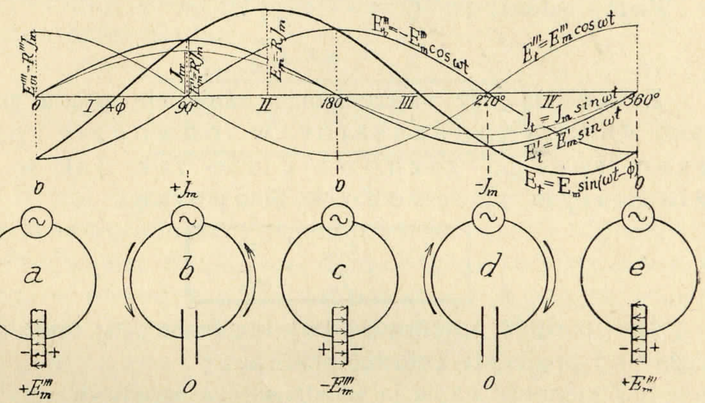
Zjawisko to tłumaczy się w następujący sposób. Okładki kondensatora o pojemności C elektryzują się naprzemian dodatnio i odjemnie do pewnego napięcia E''' (ryc. 218). Naboje $\pm Q''' = CE'''$, powstające na jego okładkach (a) odpływają przewodami przez prądnicę tak, że w (b) kondensator jest rozbrojony, w (c) naelektryzowany przeciwnie, w (d) znów rozbrojony i t. d. i dzieje się to w rytmie zmian, wytwarzanych przez prądnicę.



Ryc. 217

Równocześnie zmienia się też pole elektrostatyczne kondensatora (ryc. 217) linje sił elektrycznych, powstających na dodatniej okładce, a kończących się na odjemnej, przebiegając naprzemian w jedną i drugą stronę, wytwarzają zmienną w rytmie prądu polaryzację dielektryczną (II § 47, Pyt. 2).

Z przedstawienia tego wynika, że koło prądu nie jest wcale przez włączenie kondensatora przerwane w jego obwodzie zewnętrznym płyną elektrony, od jednej okładki do drugiej, pędzone prądnicą, w dielektryku przesuwają się tylko w obrębie



Ryc. 218

swoich cząsteczek, lecz przesunięcia te stanowią również prąd (**prąd przesunięcia**), zdolny do wytwarzania pola elektromagnetycznego w przestrzeni, otaczającej dielektryk.

3. Równocześnie ze zmianą napięcia E''' na okładkach, zmieniają się naboje Q''', które się na nich gromadzą, lecz prąd J, który zaczyna płynąć w obwodzie zewnętrznym kondensatora, gdy napięcie ma wartość największą (ryc. 218 a), osiąga swoją amplitudę J_m właśnie wtedy, gdy kondensator jest rozbrojony (b), maleje do zera w (c), płynie w kierunku odjemnym (przeciwnym) w (d) i wraca do stanu początkowego (e) = (a). Między nabojami na okładkach kondensatora Q''' a natężeniem prądu J zachodzi taki sam związek, jak między odchyleniem i prędkością w ruchu harmonicznym (II § 1, 2). Jak w ruchu harmonicznym (II ryc. 1) zmieniają się

w	D,	A,	B,	C,
odchylenia	r,	0,	$+r$,	0,
i prędkości	0,	$+v$,	0,	v,

podobnie i tu (ryc. 218) zmieniają się

w	(a),	(b),	(c),	(d),
naboje	$+Q'''_m$,	0,	Q'''_m,	0,
i natężenia prądu	0,	$+J_m$,	0,	$-J_m$

Z tego porównania wynika, że jak w ruchu harmonicznym $v = \omega r$, tak i tu musi być, w zgodzie z podobnem wyprowadzeniem w II § 63 Pyt. 3,

$$J_m = \omega\, Q_m'''$$

Wiemy jednak, że $Q_m''' = C E_m'''$, zatem

$$J_m = \omega\, C E_m'''$$

Związek między natężeniem i napięciem prądu stanowi prawo Ohma. Kondensator w obwodzie prądu przemiennego zachowuje się tak, jak w prądzie stałym przewodnik o oporze

$$\boxed{R''' = \frac{E_m'''}{J_m} = \frac{1}{\omega C}.}$$

Jest to **opór pojemnościowy** kondensatora, opór ten jest zależny od prędkości kołowej prądu ω

4. Zmienność napięcia kondensatora przedstawiona jest na ryc. 218 wykresem $E_t''' = E_m''' \cos \omega t$. Jeżeli obwód prądu przemiennego posiada opór Ohmowy R', można zapytać się, jakiego napięcia ma dostarczać prądnica, gdy w ten obwód wstawiony jest kondensator o oporze pojemnościowym R''', a natężenie prądu ma mieć wartość przepisaną równaniem $J_t = J_m \sin \omega t$

Napięcie chwilowe prądnicy musi być równe napięciu potrzebnemu do pokonania oporu Ohmowego,

$$E_t' = E_m' \sin \omega t = R' J_m \sin \omega t,$$

pomniejszonemu o napięcie na okładkach kondensatora,

$$E_t''' = E_m''' \cos \omega t = R''' J_m \cos \omega t$$

(Jest to widoczne z ryc. 218. W I ćwierci okresu kondensator rozbraja się i pomaga pracować prądnicy, w II ćwierci kondensator elektryzuje się kosztem prądnicy, w III rozbraja się, w IV elektryzuje się). Zatem napięcie chwilowe prądnicy

$$E_t = E_t' \quad E_t''' = J_m (R' \sin \omega t \quad R''' \cos \omega t).$$

(Konstrukcję na ryc. 218 przeprowadzono w ten sposób, że nakreślono krzywą $E_t''' = E_m''' \cos \omega t$ i dodawano jej rzędne z rzędnemi krzywej $E_t' = E_m' \sin \omega t$).

Wyrażenia powyższe uprościmy, podstawiając (jak w II § 65, 3),

$$R' = R \cos\phi \qquad \text{i} \qquad R''' = R \sin\phi,$$

przyczem

$$\operatorname{tg}\phi = \frac{R'''}{R'} = \frac{1}{\omega C R'} \qquad \text{i} \qquad R^2 = R'^2 + R'''^2 = R'^2 + \left(\frac{1}{\omega C}\right)^2$$

i otrzymujemy, jako **napięcie całkowite,** które musi być dostarczone przez prądnicę

$$\boxed{E_t = R J_m \sin(\omega t \quad \phi),}$$

gdzie R jest **oporem całkowitym** prądu przemiennego, a ϕ jest **przesunięciem fazy** napięcia wobec natężenia prądu.

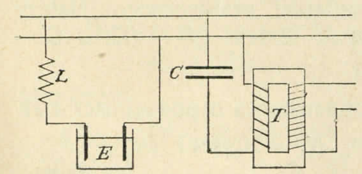
Porównując wynik otrzymany z wynikiem, jaki daje samoindukcja w obwodzie prądu przemiennego (II § 65, 3), widzimy, że przy użyciu samoindukcji faza napięcia prądu wyprzedza fazę natężenia, przy użyciu zaś kondensatora faza napięcia prądu opóźnia się wobec fazy natężenia.

Pytania

1. Jakie jest przesunięcie fazy prądu przemiennego z kondensatorem, gdy opór Ohmowy jest znikomy? ($R' = 0$, $\operatorname{tg}\phi = \infty$, $\phi = 90°$. Prąd bezwattowy. W I ćwierci okresu kondensator, rozbrajając się, obraca prądnicę, w II ćwierci prądnica elektryzuje kondensator Ruch prądnicy powinien być wieczny, jak ruch wahadła. Porównaj II § 65, 4.)

2. Pomyślmy, że dielektryk kondensatora płaskiego otoczony jest w koło zamkniętym pierścieniem żelaznym. Jaki jest kształt pola elektromagnetycznego, gdy kondensator znajduje się w obwodzie prądu przemiennego? (W zamkniętym pierścieniu żelaznym powstaje pole elektromagnetyczne przemienne, bezbiegunowe, którego linje wewnątrz żelaza są zamknięte).

3. Te same przewody użyte są do przeprowadzenia prądu przemiennego i stałego. W jaki sposób można z nich odbierać prąd jeden albo drugi? (Przez zwojnicę samoindukcyjną L o wielkiej samoindukcji przepływa tylko prąd stały do przyrządu elektrycznego E Dla prądu przemiennego jest samoindukcja **zawadą elektryczną.** Kondensator C zaś zatrzymuje prąd stały, a przepuszcza przemienny do transformatora T Ryc. 219).



Ryc. 219.

Ćwiczenia.

*1. W doświadczeniu, opisanem w ust. 1, zastąpić telefon lampką jarzącą (neonową).

*2. Płytkę marmurową wypolerowaną (lepiej płytkę kamienia litograficznego) połóż na blasze, połączonej z jednym biegunem prądu miejskiego przemiennego. Drugi biegun prądu chwyć w jedną rękę, a końcem palca drugiej ręki przesuwaj po wygładzonej powierzchni płytki. Uczujesz charakterystyczne drgania. Do udania się doświadczenia koniecznem jest, aby palec był zupełnie suchy, a płytka wypolerowana. Gdy płytki dotkniesz brzegiem małżowiny usznej, usłyszysz ton o wysokości 100/*sek*, t. j. ton, zawarty między *G* i *Gis* Drgania te można zauważyć i wtedy, gdy prąd przechodzi przez znaczne opory, n. p. przez szereg osób, trzymających się za ręce, albo gdy blachę położymy zdala od płytki marmurowej na stole, albo usuniemy ją zupełnie, bylebyśmy jeden biegun prądu (nieuziemiony) trzymali w ręce.

Zjawisko tłumaczy się tem, że powierzchnia palca i płytki stanowią kondensator, w którym dielektrykiem jest cieniutka warstwa powietrza i suchy naskórek. Płyta marmurowa jest przewodnikiem, którego opór Ohmowy jest o wiele mniejszy od oporu pojemnościowego wymienionego kondensatora; stąd całe prawie napięcie znajduje się między palcem i płytą. Podczas posuwania palca po płycie występuje elektrostatyczne przyciąganie 100 razy na *sek* z powodu elektryzowania się okładek i tyleż razy jest ten kondensator rozbrojony. Stąd uczucie, jakby palec sunął się po pilniku.

*3. Gwint lampki żarowej owińmy cienkim drutem i połączmy go z płytką metalową, doskonale wypolerowaną n. p. (łyżką srebrną), ułożoną na izolującej podstawie (n. p. na suchym talerzu). Gdy końcem suchego palca posuniemy po powierzchni płytki, uczujemy drgania, jak w Ćw. 2. Drgania ustają, gdy drugą ręką dotkniemy płytki, albo gdy staniemy na stoliku, izolującym nasze ciało od podłogi.

Wyjaśnienie zjawiska, jak w Ćw. 2. Rolę półprzewodnika (płytki marmurowej) spełnia podłoga i mury budynku, znajdujące się między naszem ciałem i ziemią.

Zadania.

1. Kondensator o pojemności 1000 *cm* połączony jest z biegunami prądu przemiennego o napięciu skutecznem $(E) = 200\ V$ i częstości 50/*sek*. Obliczyć skuteczne natężenie prądu. (Wszystkie wielkości wyrażać w jednostkach jednego układu, najlepiej praktycznego. Należy przypomnieć sobie, że $1\ F = 9.10^{11}\ cm$ Zatem $(J) = (E)\ \omega\ C = 200\ V\ \ 2\pi\ \ 50/sek\ \ \frac{1000}{9.10^{11}}\ F = 0{,}00007\ A$.)

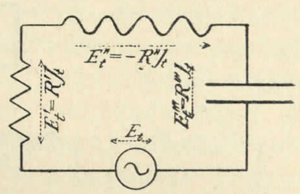
2. Jaki jest opór pojemnościowy kondensatora o pojemności $1\,\mu F$ dla częstości prądu $N_1 = 10^2$, $N_2 = 10^4$, $N_3 = 10^6/sek$? $\left(R_1''' = \frac{1}{\omega_1 C} = \frac{1}{2\pi\ \ 10^2/sek\ \ 10^{-6} F} = 1590\,\Omega\right.$, $R_2''' = 15{,}9\,\Omega$, $\left.R_3''' = 0{,}159\,\Omega.\right)$

3. Lampka o oporze $R' = 320\,\Omega$ i kondensator o pojemności $C = 2\,\mu F$ włączone są w obwód prądu przemiennego o częstości $N = 50/sek$ i o napięciu skutecznem $(E) = 110\ V$, przetworzonem w transformatorze o przeniośni $n = 5$ Obliczyć opór całkowity R, natężenie skuteczne

prądu (J) i przesunięcie fazy θ $\left(R''' = \frac{1}{\omega C} = \frac{10^6}{2\pi\ \ 50/sek.\ 2\ F} = 1590\ \Omega;\right.$ $R^2 = R'^2 + R'''^2 = 2636\,000\,\Omega^2$, $R = 1620\,\Omega$; $(J) = \frac{(E)}{R} = \frac{110\ V\ \ 5}{1620\ \Omega} = 0{,}34\ A$; $\left.\operatorname{tg}\phi = \frac{R'''}{R'} = \frac{1590\ \Omega}{320\ \Omega} \sim 5,\ \phi = 78^\circ 42'\right)$.

§ 68. Drgania elektromagnetyczne.

1 Gdy w obwód prądu przemiennego włączona jest zwojnica samoindukcyjna i kondensator (ryc. 220), to wpływ ich na fazę prądu znosi się, gdyż samoindukcja przyśpiesza tę fazę, a pojemność ją opóźnia.



Ryc. 220.

Powtórzmy jeszcze raz obliczenie, wykonywane w II § 65, 3 i § 67, 4, w zastosowaniu do tego przypadku najogólniejszego.

Żądamy prądu o natężeniu, zmieniającem się według równania

$$J_t = J_m \sin \omega t.$$

Aby je otrzymać, musi być napięcie dla oporu Ohmowego (ryc. 220)

$$E_t' = R'\ J_m \sin \omega t$$

pomniejszone o napięcie samoindukcyjne

$$E_t'' = -R''\ J_m \cos \omega t,$$

i o napięcie na okładkach kondensatora

$$E_t''' = R'''\ J_m \cos \omega t.$$

Zatem na biegunach prądnicy ma być napięcie

$$E_t = E_t'\ \ E_t''\ \ E_t''' = J_m\ [R' \sin \omega t + (R''\ \ R''') \cos \omega t].$$

Wyrażenie to uprościmy, kładąc

$$R' = R \cos \phi \qquad \text{i} \quad R'' - R''' = R \sin \phi,$$

przyczem

$$R^2 = R'^2 + (R'' - R''')^2 \quad \text{i} \quad \operatorname{tg}\phi = \frac{R'' - R'''}{R'},$$

otrzymamy na wartość chwilową **napięcia całkowitego**

$$\boxed{E_t = R J_m \sin(\omega t + \phi),}$$

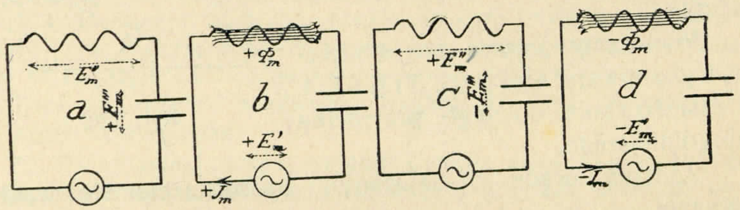
gdzie R jest **oporem całkowitym**, a ϕ **przesunięciem fazy** napięcia wobec natężenia.

2. Gdy opór samoindukcyjny równy jest oporowi pojemnościowemu, $R'' = R'''$, wtedy tg $\phi = 0$. Możemy to uzyskać przez odpowiednią zmianę samoindukcji, bo $R'' = \omega L$, albo przez zmianę pojemności, bo $R''' = \frac{1}{\omega C}$, albo wreszcie przez zmianę częstości kołowej ω taką, aby było

$$\omega L = \frac{1}{\omega C} \text{ czyli } \omega = \frac{1}{\sqrt{LC}},$$

skąd oblicza się okres prądu przemiennego, dla $R'' = R'''$,

$$\boxed{T = 2\pi\sqrt{LC}}$$



Ryc. 221.

3. Przyjrzyjmy się stosunkom, jakie zachodzą podczas jednego okresu prądu przemiennego. Zacznijmy od tego stanu (rys. 221 *a*), gdzie kondensator jest naelektryzowany do napięcia $+E'''_m$, w tej chwili w obwodzie nie ma prądu. Ponieważ jednak pasmo, łączące okładki kondensatora, jest zamknięte, kondensator rozbraja się i zaczyna płynąć prąd dodatni. Prąd ten wzrasta do maksymalnej wartości $+J_m$ w (*b*), wytwarzając w zwojnicy samoindukcyjnej pole magnetyczne $+\Phi_m$, ale pole, nie podtrzymywane prądem rozpada się, skutkiem czego powstaje siła elektromotoryczna samoindukcji $+E''$, która pędzi elektryczność dalej w tym samym, co poprzednio, kierunku i elektryzuje okładki kondensatora do napięcia E'''_m w (*c*). Dalej kondensator wyładowywa się prądem odjemnym, wskutek czego powstaje odjemne pole magnetyczne Φ_m w (*d*), które rozpadając się, pędzi dalej prąd odjemny i t. d.

Energja w obwodzie, która pojawia się w (*a*) i (*c*) jako energja **elektryczna** pojemności, zmienia się w (*b*) i (*d*) na energję **magnetyczną** samoindukcji podobnie, jak w ruchu wahadłowym lub harmonicznym (drgającym) energja występuje naprzemian jako kinetyczna i potencjalna, zatem tak, jak wa-

hadło, raz potrącone, wahać się powinno bez ustanku, tak też i prąd przemienny w obwodzie opisanym powinien trwać bez osłabienia, nawet wtedy, gdy prądnicę z obwodu wyłączymy W tym przypadku mówimy **o drganiach elektromagnetycznych, swobodnych, tłumionych**, gdyż z powodu oporu Ohmowego część energji podczas każdego drgnienia przemienia się na ciepło Joula, co objawia się zmniejszaniem się amplitudy drgań. Drgania takie nazywamy także **zanikającemi**.

Gdy prądnica dostarcza tyle tylko energji, ile równocześnie przemienia się w ciepło, drgania **nietłumione** nie zanikają, gdy zaś ilość energji, dostarczanej przez prądnicę, jest większa od ilości energji równocześnie ginącej, amplituda drgań powiększa się ustawicznie i prąd wzrasta do takich wartości, które są dla pasma niebezpieczne (przebicie kondensatora, stopienie przewodnika).

Charakterystycznem jest przytem to, że okres drgań swobodnych nie jest zależny od okresu prądnicy Gdy prądnica pracuje, może wymuszać drgania w obwodzie **(drgania wymuszone)**. Dopiero, gdy okres prądnicy równy jest wartości $T = 2\pi\sqrt{LC}$, występuje zjawisko opisane zgodnego działania prądnicy z drganiami w obwodzie. Mówimy wtedy, że obwód drgań jest w **resonancji** z prądnicą.

*4. Dwa obwody, posiadające ten sam okres drgań, są z sobą w resonancji; objawia się to tem, że drgania w jednym obwodzie mogą wzbudzić takie same drgania w drugim obwodzie, oddalonym, który z pierwszym nie ma żadnych części wspólnych. Poznaliśmy w II § 63 zjawisko podobne, w ten bowiem sposób powstają także prądy indukcyjne, w nich jednak każdej zmianie prądu głównego odpowiada jedna zmiana prądu wtórnego, jak każdemu trzaśnięciu z bata odpowiada odbite od jednej ściany jedno echo. W resonancji zaś charakterystyczną cechą jest, że perjodycznym zmianom w obwodzie głównym odpowiadają perjodyczne zmiany i o tym samym okresie w obwodzie wtórnym i że zmiany te trwają nawet wtedy, gdy już ich w obwodzie głównym niema, podobnie, jak to się dzieje podczas współbrzmienia widełek stroikowych (II § 9).

Aby wystąpiła resonancja, muszą być obwody drgające nastrojone na tę samą częstość drgań, co będzie osiągnięte wtedy, gdy

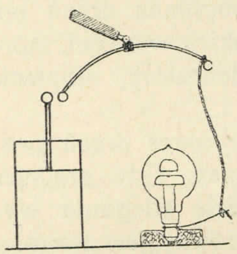
$$L_1 C_1 = L_2 C_2$$

(Znaczki 1 i 2 odnoszą się do samoindukcji i pojemności obwodu głównego i wtórnego). Zwykle osiąga się resonancję zapomocą zmiany pojemności jednego kondensatora, ale można też zmieniać i samoindukcję, jak w Ćw 4.

Ćwiczenia.

*1. Butelkę lejdejską o wielkiej pojemności rozbroić zapomocą rozbrajacza *a)* przez krótkotrwałe dotknięcie obu okładek, *b)* przez iskrę bez dotknięcia obu okładek. Przekonaj się, że w obu przypadkach butelka nie jest jeszcze rozbrojona, gdyż można z niej otrzymać po chwili jeszcze kilka iskier, rozumie się, coraz słabszych.

(Widoczne z tego, że *a)* dielektryk spolaryzowany potrzebuje pewnego czasu, aby się zdepolaryzował, że więc zjawisko, które nazywamy r o z b r o j e n i e m k o n d e n s a t o r a, t r w a p e w i e n c z a s; *b)* iskra rozbrajająca zachowuje się tak, jak gdyby przewodnik nie był w przerwie iskrowej przerwany Porównaj z t. zw łukiem świecącym między węglami w lampie łukowej także (II § 48 Pyt. 2).

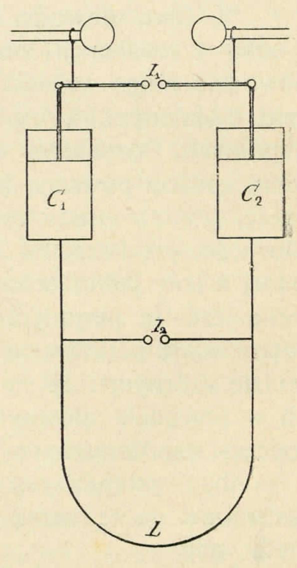


Ryc. 222.

*2. Butelkę lejdejską o wielkiej pojemności rozbroić przez wielki opór z lampką jarzącą. W tym celu nasadę lampki jarzącej wkręca się w płaski korek i stawia się ją obok butelki na blasze albo na pasku staniolu (ryc. 222). Na gwinty lampki nawija się drut, a do niego przywiązuje krótki sznurek, wilgotny, uwiązany na jednym końcu rozbrajacza, którego drugi koniec zbliża się do okładki wewnętrznej butelki. Otrzymujemy dwie lub trzy iskry, przyczem r o z ś w i e c a s i ę t y l k o j e d n a e l e k t r o d a. Gdy butelkę naelektryzujemy elektrycznością przeciwnego znaku, zmieni się także elektroda rozświecająca się, która jest jak wiemy, katodą (II § 66, Ćw 4).

*3. Dwie butelki lejdejskie, izolowane od ziemi, połączyć w sposób, wskazany, na ryc. 223, aby powstał obwód l_1 C_1 l_2 C_2 (bez rozgałęzienia L). Maszyna influencyjna rozbraja się iskrą w przerwie l_1 ale równocześnie pojawiają się iskry w l_2, które zbadamy, gdy w przerwę l_2 wstawimy lampkę jarzącą. Wtedy o b i e e l e k t r a d y ś w i e c i ć b ę d ą, co jest wskazówką, że w obwodzie l_1 C_1 l_2 C_2 drga prąd przemienny

Wyładowania drgające (oscylacyjne) powstają także, gdy jedną butelkę rozbra-

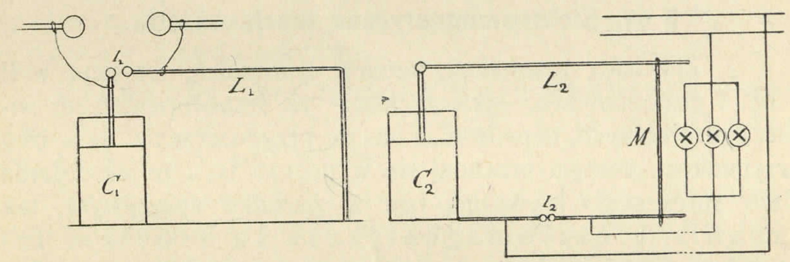


Ryc. 223.

jamy przez przewodnik o małym oporze (bez sznura wilgotnego na ryc. 222), drgań tych jednak lampką jarzącą sprawdzić nie możemy z powodu zbyt wysokiego napięcia prądu.

*4. Połączmy okładki zewnętrzne butelek lejdejskich z Ćw. 3 (Ryc. 223) jeszcze przewodnikiem L Według I prawa Kirchhoffa (II § 60, 4) prąd trwały płynąłby w całości przez ten przewodnik, a lampka, posiadająca zbyt wielki opór, nie świeciłaby. Prąd przemienny zachowuje się inaczej: prąd ten o częstości kołowej ω bardzo wielkiej doznaje w przewodniku L oporu samoindukcyjnego $R'' = \omega L$, który pomimo małej wartości samoindukcji L może przybrać wartość większą od oporu w przerwie iskrowej l_2 tak, że w l_2 pojawiają się iskry, a lampka jarząca świeci. Gdy jednak przewodnik L utworzymy z szerokiej wstęgi metalowej, lampka gaśnie. Stąd wniosek, że p r ą d y p r z e m i e n n e o b a r d z o w i e l k i e j c z ę s t o ś c i p ł y n ą p o p o w i e r z c h n i p r z e w o d n i k ó w, p r ą d y z a ś t r w a ł e c a ł y m p r z e k r o j e m p r z e w o d n i k a. (II § 60 Pyt. 4).

*5. Dwie butelki lejdejskie C_1, C_2 jednakowej wielkości, łączymy w obwody w sposób, wskazany na ryc. 224. Przerwę iskrową l_1 pierwszej butelki o stałej samoindukcji L_1 łączymy z biegunami maszyny influencyjnej przerwę l_2 drugiej butelki, której obwód zawiera mostek M, tworzący zmienną samoindukcję L_2 łączymy przez 3 żarówki, równolegle w obwód wstawione, z prądem miejskim. Przerwę l_2 robimy jak najmniejszą, byle tylko nie było zetknięcia kuleczek. Oba obwody stawiamy równolegle do siebie w oddaleniu około $\frac{1}{2}$ m i wzbudzamy w l_1 iskry. Gdy zachodzi resonancja, pojawiają się i w l_2 iskry, które stanowią drogę przewodnią dla prądu miejskiego; wskutek tego żarówki zapalają się i świecą tak długo, aż w l_2 iskry nie zdmuchniemy (II § 51 Ćw. 1).



Ryc. 224.

Zadania.

1 Obwód prądu przemiennego składa się z oporu Ohmowego $R' = 5\,\Omega$, z samoindukcji $L = 1\,H$, pojemności zmiennej C i prądnicy, której napięcie na biegunach wynosi $E_m = 800\,V$ przy częstości $N = 500/sek.$ Obliczyć pojemność, przy której występuje zjawisko resonancji i opór samoindukcyjny, równy pojemnościowemu.

(Z równania $\omega L = \frac{1}{\omega C}$ oblicza się $C = \frac{1}{\omega^2 L} = \frac{1}{(2\pi \cdot 500/sek)^2 \cdot 1 H} \sim 10^{-7} F$; $R'' = R''' = \omega L = 2\pi \cdot 500/sek \cdot 1 H = 3141{,}6\ \Omega$).

2. Jaka jest amplituda prądu Zad. 1 podczas resonancji?

($J_m = \frac{E_m}{R'} = \frac{800\ V}{5\ \Omega} = 160\ A$)

3. Jaka jest amplituda napięcia, występującego na okładkach kondensatora w Zad. 1, a zarazem amplituda siły elektromotorycznej indukcji? ($E'''_m = E''_m = \omega L\, J_m = 2\pi \cdot 500/sek \cdot 1 H \cdot 160\ A \sim 500000\ V$, chociaż napięcie prądnicy pozostaje wciąż 800 V).

4. Obliczyć częstość drgania obwodu drgającego, złożonego z $L = 325000\ cm$ i $C = 54000\ cm$. (Najpierw należy te jednostki przerachować na praktyczne według związków: $F = 9 \cdot 10^{11}\ cm$, $H = 10^9\ cm$. Zatem $L = \frac{325000}{10^9} H$ $C = \frac{54000}{9 \cdot 10^{11}} F = \frac{6000}{10^{11}} F$, $N = \frac{1}{2\pi \sqrt{LC}} \sim 11300\ sek.$ Okazuje się, że obwód drgający może zastąpić prądnicę, gdy chodzi o prąd przemienny wysokiej częstości).

§ 69. Elektromagnetyczna teorja światła.

1 Zjawisko resonancji butelek lejdejskich, opisane w II § 68, i podobieństwo, jakie zachodzi ze współbrzmieniem widełek stroikowych, naprowadza nas na przypuszczenie, że w obu przypadkach energja przenosi się w postaci fal i że jak drgania ciała sprężystego wywołują fale w ośrodku sprężystym, tak drgania elektromagnetyczne są źródłem fal w ośrodku, który posiada odpowiednie własności elekromagnetyczne **(fale elektromagnetyczne)**.

Powstawanie fal sprężystych, przedstawione w II § 2, polega na tem, że wychylenie jednej cząstki z jej właściwego położenia (odkształcenie) jest połączone z zaburzeniem równowagi sił, działających między tą cząstką i sąsiedniemi, czego następstwem jest, że gdy cząstka wychylona powraca do swego właściwego położenia, równocześnie cząstki sąsiednie ze swego położenia się wychylają. W ten sposób zaburzenie równowagi przenosi się na coraz dalsze cząstki z pewną prędkością $c = \lambda \cdot N = \frac{\lambda}{T}$, przyczem λ jest **długością fali**, N jej **częstością**, a T **okresem** (II § 2, 2).

Rozchodzenie się fal elektomagnetycznych jest w swej istocie nieco odmienne. Przewodnikiem ich może być nie tylko dielektryk, ale nawet niematerjalnia próżnia. W dielektryku można wyobrazić sobie drganie cząsteczek i elektronów, ale trudno

mówić o przenoszeniu się fali od cząstki do cząstki w próżni, skoro w niej brak i cząstek materjalnych i elektronów Nie będziemy się jednak wdawali w roztrząsanie, czem jest ów hipotetyczny **eter**, którym fizycy wypełniają próżnię, lecz opierając się na fakcie, że działania elektromagnetyczne rozchodzą się w próżni tak samo, jak w powietrzu, zaliczymy i próżnię do dielektryków i będziemy mówili tak o polaryzacji (II § 47 Pyt. 2), jak i o prądach przesunięć dielektrycznych i o magnesowaniu się próżni (eteru, II § 67 2).

2. **Maxwell** (czytaj Mekswel), oparłszy się na ideach **Faradaya** o rozchodzeniu się działań elektrycznych w dielektrykach, doszedł drogą genjalnego rozumowania przy pomocy analizy matematycznej do następujących wyników

Każde przesunięcie dielektryczne (polaryzacja) jest zaburzeniem równowagi w dielektryku, które na podobieństwo zaburzeń (odkształceń) sprężystych, poprzecznych, rozchodzi się w ośrodku z pewną prędkością.

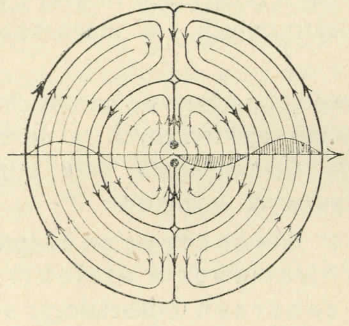
Prędkość rozchodzenia się zaburzeń elektrycznych w próżni równa jest prędkości światła, $c = 3 \cdot 10^{10}\ cm/sek$.

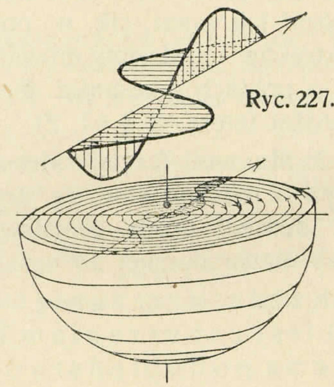
Przesunięcia dielektryczne (linje sił elektrycznych), jak i linje sił magnetycznych są do siebie wzajemnie prostopadłe i powstają w płaszczyźnie prostopadłej do kierunku rozchodzenia się fali elekromagnetycznej (do **promienia elektromagnetycznego**).

3. Na podstawie ostatniego ustępu można przedstawić sobie kształt fali elektromagnetycznej postępującej, której źródłem są drgania elektromagnetyczne w przerwie iskrowej prostego przewodnika. Będzie to fala kulista; drgania elektryczne odbywają się wzdłuż południków tej kuli, drgania pola magnetycznego po linjach, opasujących kulę nakształt równoleżników, oś zaś tej kuli ma kierunek drgań w przerwie iskrowej (Ryc. 225 przedstawia przekrój pionowy fali kulistej dla okazania drgań elektrycznych, ryc. 226 przekrój poziomy tej samej fali dla okazania drgań magnetycznych. W obu falach przedstawione są równoczesne przesunięcia, t. zn. napięcia, podczas gdy natężenia zaznaczone są strzałkami, których wielkość i grubość odpowiada wielkości natężenia. Na ryc. 227 widzimy falę elek-

tryczną w płaszczyźnie pionowej, magnetyczną w płaszczyźnie poziomej i kierunek promienia elektromagnetycznego).

4. Wyniki teoretycznych rozważań Maxwella zostały później świetnie potwierdzone doświadczeniami Hertza i Rowlanda.

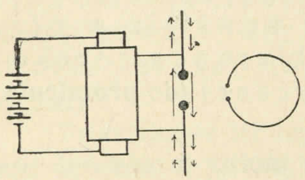




Ryc. 227.

Ryc. 225. Ryc. 226.

Hertz używał jako **iskiernika (oscylatora)** dwóch prostych przewodników, tworzących jeden prosty przewodnik z przerwą iskrową, w której wzbudzał iskry zapomocą induktora (ryc. 228). W ten sposób otrzymał t. zw **otwarty obwód drgań (antenę)**, w którym wskutek odbicia się fali od końców przewodników powstaje fala miejscowa o drganiach najsilniejszych w przerwie iskrowej (strzałka przesunięcia dielektrycznego), a słabnących do zera na końcach przewodników (punkty węzłowe natężenia, II § 4, 3 i § 3, 3). Gdy w pobliżu takiego obwodu znajdzie się obwód wtórny, utworzony z drutu, zwiniętego w koło lub prostokąt o odpowiednich rozmiarach z małą przerwą iskrową, w przerwie powstają w przypadku resonancji iskry Ten **resonator** jest zatem **ujawniaczem (detektorem)** fal elektromagnetycznych.



Ryc. 228.

Zapomocą resenatora stwierdził Hertz, że fale elektromagnetyczne zachowują się zupełnie na podobieństwo fal świetlnych, że odbijają się od zwierciadła metalowego płaskiego, że mogą być zebrane w ognisku zwierciadła wklęsłego, że okazują zjawiska uginania i interferencji, że załamują się, przechodząc

przez pryzmat, odlany ze smoły i że polaryzują się przy przejściu przez druty równoległe, napięte na drewnianej ramie.

5. Najważniejsze założenie, na którem opiera się teorja Maxwella jest to, że przesunięcia dielektryczne, podobnie jak prądy zwykłe, wytwarzają w otoczeniu pole magnetyczne (II § 54, 1), że są równoważne pewnej ilości magnetyzmu. Gdy zatem nabój q bierze udział w przesunięciu dielektrycznem w próżni tak, iż zaburzenie równowagi rozchodzi się w przestrzeni z prędkością światła c, to wytwarza się pole magnetyczne, równoważne ilości magnetyzmu m, a wielkości te połączone są z sobą równaniem

$$m = q \cdot c, \qquad \text{I}$$

co sprawdził **Rowland** doświadczeniem, opisanem w II § 48, 3.

Każdy inny dielektryk posiada jakąś stałą dielektryczną i jakąś zdolność magnetyczną, różną od próżni. W dielektryku o **stałej dielektrycznej** ϵ prawo Coulomba brzmi $F = \frac{q_1 \, q_2}{\epsilon \, d^2}$ (II § 47 Zad. 3). W przypadku naboi jednakowych $q_1 = q_2 = q$ musi być każdy z nich $\sqrt{\epsilon}$ razy powiększonym, aby te naboje w tym dielektryku odpychały się taką samą siłą, jak w próżni naboje q

W ośrodku o **zdolności magnetycznej** μ powstaje między biegunami μ razy tyle linij sił magnetycznych, co w próżni; stąd siła działająca między biegunami jest według prawa Coulomba μ razy większa $F = \mu \frac{m_1 \, m_2}{d^2}$. W przypadku biegunów jednakowych $m_1 = m_2 = m$, każdy z nich musi być $\sqrt{\mu}$ razy mniejszy, aby w tym ośrodku te bieguny odpychały się taką samą siłą, jak w próżni bieguny m.

Skutkiem tego jest, że w dielektryku zaburzenia równowagi rozchodzić się muszą z prędkością v, dającą się obliczyć z równania, kształtu równania I, w którem jednak zastąpić należy m wielkością $\frac{m}{\sqrt{\mu}}$, a q wielkością $\sqrt{\epsilon}\, q$

$$\frac{m}{\sqrt{\mu}} = \sqrt{\epsilon}\, q \; v \qquad \text{II}$$

Z podzielenia równań I i II stronami wynika

$$\boxed{v = \frac{c}{\sqrt{\epsilon \mu}}} \quad . \quad . \quad . \qquad \text{III}$$

Na tem równaniu oparł Maxwell swoje twierdzenie, że ośrodek światłonośny ma te same własności, co ośrodek elektromagnetyczny, że światło jest zjawiskiem elektromagnetycznem, a fale świetlne różnią się od fal elektromagnetycznych, używanych w radjotechnice, tylko długością.

6. Sprawdzenie równania III jest ułatwione tem, że stosunek $c : v$ jest według II § 24, 2 równy spółczynnikowi załamania n promienia, przechodzącego z próżni w dielektryk o stałych ϵ i μ, zatem $n^2 = \epsilon\mu$. Pozatem ciała przezroczyste, u których można mierzyć spółczynnik załamania, posiadają zdolność magnetyczną $\mu = 1$, t. zn. pod względem zachowania magnetycznego nie różnią się prawie od próżni, dlatego powinnibyśmy u nich znaleść, że

$$\boxed{n^2 = \epsilon,}$$

stała dielektryczna równa się kwadratowi spółczynnika załamania.

Trudność jednak w doświadczalnem stwierdzeniu tego związku leży w tem, że stałą dielektryczną ϵ wyznacza się zapomocą elektryzowania konsendatora elektrycznością statyczną (II § 47, 4), podczas gdy częstość drgań elektromagnetycznych światła widzialnego wynosi setki biljonów na sekundę (II § 19, 1), a nie jest wykluczone, że dla drgań tak częstych stała dielektryczna ma wartość inną, z drugiej strony wartość spółczynnika załamania n jest zależna od barwy światła. Mimo to dla wielu ciał zgodność stałej dielektrycznej z kwadratem spółczynnika załamania, n. p. dla promieni żółtych światła sodowego o długości fali $\lambda = 0{,}00059$ *mm*, jest wystarczająca

	n	n^2	ϵ
parafina	1,42	2,02	2,29
nafta	1,44	2,07	2,07
dwusiarczek węgla	1,62	2,61	2,63
benzol	1,49	2,23	2,26

podczas gdy u innych ciał występują różnice ogromne

woda	1,33	1,77	81,
szkło (flint)	1,62	2,62	9,9

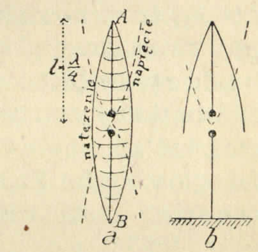
7 Jako potwierdzenie słuszności zapatrywania, że fale światła widzialnego stanowią cząstkę zakresu fal elektromagnetycznych, niech służy zestawienie, pomieszczone w Tablicy X, które można uważać za **widmo promieniowania elektromagnetycznego**. (Porównaj II § 31, 1).

E. ZARYS RADJOTECHNIKI.

§ 70. Wysyłacze fal (maszynowe i iskrowe).

1. W **radjotechnice** używa się fal elektromagnetycznych do przenoszenia energji elektrycznej bez pośrednictwa przewodników metalowych z miejsca nadawczego do miejsca odbiorczego, celem przesyłania znaków telegraficznych **(radjotelegrafja)** lub odtwarzania głosów i znaków akustycznych **(radjotelefonja)**. Przyrząd, wytwarzający fale w miejscu nadawczem, nazywamy **wysyłaczem fal**. Fale te rozchodzą się w przestrzeni, a w miejscu odbiorczem pochwytuje je i ujawnia **odbiornik fal**.

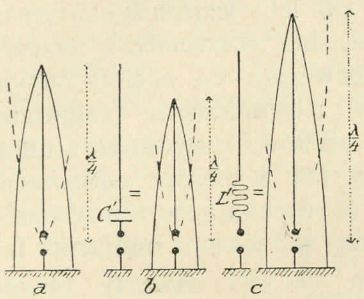
2. Najprostszym wysyłaczem fal jest **otwarty obwód drgań** (Hertza), opisany w II § 69, 4 (ryc. 228). Obie połowy anteny są izolowane od ziemi, a od siebie oddzielone przerwą iskrową (ryc. 229 *a*). Okazuje się jednak, że można dolną połowę anteny połączyć z ziemią (ryc. 229 *b*), co zupełnie niema wpływu na długość wysyłanych fal. **(Wysyłacz Marconiego)**. Stąd wniosek, że w przerwie iskrowej potencjał jest stały, że tam wypada węzeł napięcia, podczas gdy na wolnych końcach drutów odbywają się największe zmiany napięć. Zatem w antenie powstają fale elektromagnetyczne miejscowe (II § 3, 3), przyczem napięcie (potencjały) w rozmaitych punktach anteny zmienia się tak, jak punkty pręta sprężystego, drgającego, w jednym punkcie utwierdzonego (II § 11, 1), natężenie zaś prądu drgającego zachowuje się tak, jak drgania sprężyste struny (II § 10, 1). Drgania te, podłużne w antenie, przenoszą się w przestrzeń w postaci fal elektromagnetycznych, postępujących, o długości $\lambda = 4\ l$, jeżeli l jest długością połówki anteny (ryc. 229). Punkty końcowe anteny A i B zachowują się, jak okładki kondensatora.



Ryc. 229.

Gdy w pobliżu węzła napięcia, t. zn. przerwy iskrowej, wstawimy jeszcze kondensator o pojemności C' (rys. 230 *b*), to pojemność całkowita anteny C zmniejszy się, gdyż obie pojemności, anteny i kondensatora, połączone są w szereg (II § 47 Zad. 2), wskutek tego długość fali skraca się według równań $\lambda = cT$, $T = 2\pi\sqrt{LC}$. Tak użyty kondensator nazywamy **kondensatorem skracającym**.

Gdy zaś w strzałkę natężenia prądu, t. zn. w pobliżu przerwy iskrowej wstawimy zwojnicę samoindukcyjną o samoindukcji L' (ryc. 230 *c*), wówczas samoindukcja całkowita obwodu L powiększy się, a wskutek tego długość fali się przedłuża. Tak użytą zwojnicę nazywamy **cewką przedłużającą**.



Ryc. 230.

Kondensator skracający i cewka przedłużająca, wstawione w obwód anteny pozwalają w pewnych granicach zmieniać długość **fali własnej** anteny, t. j. fali, odpowiadającej długości anteny

3. Obwód otwarty ma wielką zdolność promieniowania (wysyłania fal), ale wskutek małej pojemności może przyjmować tylko niewielkie ilości energji, drugą jego wadą jest to, że z powodu wielkiego oporu iskiernika tak szybko traci swoją energję, iż drgania w obwodzie otwartym bardzo rychło zanikają. Porównać je można z hukiem strzału, który rozchodzi się w przestrzeń w postaci fal, ale trwa zbyt krótko, aby wywołał resonancję w oddalonym ujawniaczu fal głosowych. Zapomocą swego wysyłacza mógł Marconi przesyłać znaki telegraficzne na odległość najwyżej 18 *km* (w r 1897).

Zamknięty obwód drgań, opisywany w II § 67 i § 68, może przyjmować ogromne ilości energji i drgania jego nie zanikają tak rychło, lecz dzieje się to dlatego właśnie, że obwód zamknięty ma bardzo małą zdolność promieniowania.

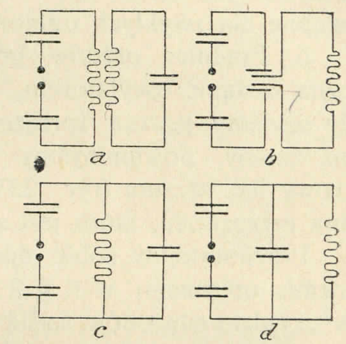
Można jednak sprząc oba obwody drgające, zamknięty i otwarty, w układ, który posiada zalety obydwu, nie posiadając ich wad, tak, że drgania elektryczne o wielkiej energji są wytwarzane w obwodzie zamkniętym, lecz wypromieniowywane są przez obwód otwarty

4. Zestawienie dwóch obwodów w jeden układ nazywamy **sprzężeniem**, układ zaś elementów, do tego użytych, nazywamy **sprzęgłem**. Sprzężenie może być ·

a) **magnetyczne** czyli **indukcyjne**, gdy zwojnice samoindukcyjne obu obwodów tworzą wspólne pole magnetyczne (ryc. 231 *a*),

b) **elektryczne** czyli **pojemnościowe**, gdy kondensatory obu obwodów tworzą wspólne pole elektryczne (ryc. 231 *b*),

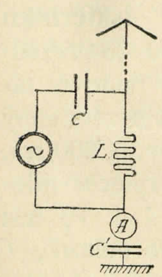
c) **galwaniczne** czyli **kondukcyjne**, gdy zwojnica lub kondensator są wspólne obu obwodom (ryc. 231 *c* i *d*).



Ryc. 231

Sprzężenie może być **ścisłe** lub **luźne**. Przy sprzężeniu ścisłem wszystkie linje pola magnetycznego, jak n. p. w zwojnicach transformatora, lub też wszystkie linje pola elektrycznego należą do obu obwodów Wtedy obwód wtórny oddziaływa z powrotem na obwód główny, a wynikiem tego wzajemnego oddziaływania jest zmiana częstości drgań własnych i w jednym i drugim obwodzie. Stąd wynika, że przy ścisłem sprzężeniu obwodów niemożebne jest ich **nastrojenie** do resonancji, co jednak da się uskutecznić przy sprzężeniu luźnem. Po osiągnięciu resonancji należy wrócić do sprzężenia ścisłego, ponieważ tylko przy sprzężeniu ścisłem cała energja przenosi się z jednego obwodu na drugi.

5. Idealnym wysyłaczem fal mogłaby być także prądnica prądu przemiennego, ponieważ mogłaby dostarczać antenie wprost energji do promieniowania w przestrzeń (ryc. 232). Fale, wysyłane przez taki **wysyłacz maszynowy**, mogłyby mieć stałą amplitudę, byłyby więc **falami nietłumionemi** (II § 68, 3), nadającemi się nie tylko do radjotelegrafji, ale i do radjotelefonji. Trudność jednak leży w tem, że prądnice wytwarzają fale bardzo długie, $\left(\lambda = \frac{c}{N}\right.$, zatem przy częstości $N = 15000/sek$, $\lambda = 20\ km$, a przy $N = 100000/sek$, $\lambda = 3\ km$), a fale bardzo długie trudniejsze są do odbioru*).



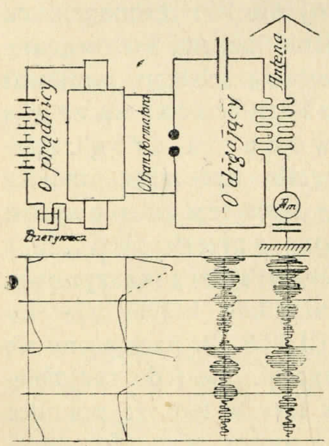
Ryc. 232.

*) Najdłuższe fale, używane w radjotechnice, mają długość do 20 *km*; w **radjofonji (broadcasting**, czytaj: brodkasting; tak nazywają amatorskje zajmowanie się odbieraniem wiadomości i muzyki zapomocą radjotelefonji) używa się fal od 100 *m* do najwyżej 3 *km*.

Zadanie budowy prądnic dla prądów przemiennych o częstości do 100000/*sek* rozwiązano i większe radjostacje wysyłają prawie wyłącznie fale nietłumione, wytwarzane w **wysyłaczach maszynowych** *), fale te jednak z powodu swej długości nie są dostępne dla zwykłych odbiorców radjofonicznych.

6. Prądnicę prądów przemiennych o wielkiej częstości można zastąpić oscylatorem, jakiego używali Hertz i Marconi. Gdy użyjemy jeszcze sprzężenia obwodu drgającego z obwodem anteny, powinnibyśmy wedle ust. 3 otrzymać wysyłacz iskrowy bez zarzutu (ryc. 233). W rzeczywistości zachodzi tu jedna przeszkoda, która jest związana ze ścisłem sprzężeniem.

Przypomnijmy sobie doświadczenie w wahadłami sprzężonemi, opisanemi w II § 2 Ćw 1 i 2. To samo dzieje się i w układzie obwodów ściśle sprzężonych, że energja obwodu zamkniętego, po spłynięciu w zupełności na obwód otwarty, zaraz powraca do pierwszego obwodu, nie promieniując w przestrzeń. Stąd pochodzi, że w każdym z dwu obwodów istnieją drgania, przesunięte o pół okresu drgnienia, które przez interferencję osłabiają się i uniemożebniają pełne wykorzystanie promieniowanej energji (ryc. 233). Chcąc przeszkodzić powrotowi energji, należałoby w stosownej chwili przerwać obwód zamknięty; wtedy energja w obwodzie anteny mogłaby w całości wypromieniować w przestrzeń.



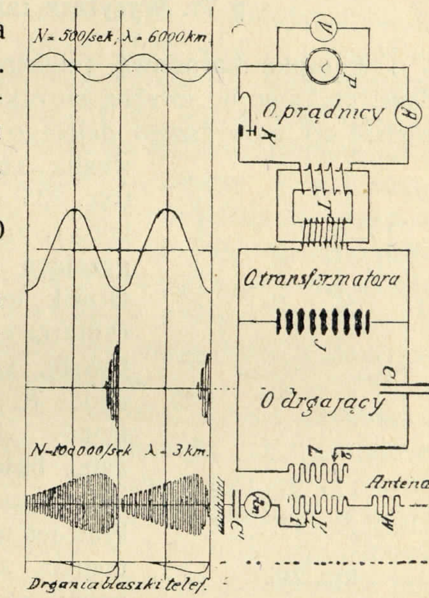
Ryc. 233.

To przerwanie sprzężenia obu obwodów osiągnął **Wien** zapomocą **iskier gaszonych w iskierniku wielokrotnym** Na ryc. 234 przedstawiony jest schemat budowy takiego wysyłacza. Prąd przemienny prądnicy P o częstości n. p. 500/*sek*, którego natężenie i napięcie mierzy się przyrządami A i V, jest przetwarzany w transformatorze T na prąd o wysokiem napięciu, służący do wzbudzenia drgań w obwodzie zamkniętym. W obwodzie tym znajduje się zmienna pojemność C, zmienna samoindukcja L i iskiernik wielokrotny J, składający się z pewnej

*) Państwowa stacja radjotelefoniczna pod Warszawą pracuje falami o długości 18,5 i 10,5 *km*.

liczby talerzowatych krążków miedzianych, ułożonych bardzo blisko siebie, między któremi odbywają się wyładowania w postaci szybko chłodzonych iskier. Są to właśnie iskry gaszone, ponieważ gasną, skoro energja dgrań przejdzie na obwód otwarty anteny, przez co obwód iskiernika przerywa się i energja już nań wrócić nie może.

7. Jak długo przyciskacz K (Klucz aparatu Morsego) jest przyciśnięty, w obwodzie zamkniętym biją iskry w liczbie 500 na sekundę, a każda z nich wywołuje w obwodzie otwartym drgania zanikające o częstości setek tysięcy na sekundę. Drgania te, promieniując w przestrzeń, rychło zanikają, ich średnie natężenie odczytujemy na ampermetrze *Am.* Im lepiej zestrojone są obwody, tem większe jest to natężenie prądu. Nastawianie anteny na resonans odbywa się zapomocą kondensatora skracającego C', cewki przedłużającej L' i **warjometru** W, t. j. dwóch zwojnic. połączonych w szereg, przesuwających się jedna w drugiej i dozwalających na dowolne zmienianie samoindukcji. Przesuwanie styku *1* zmienia samoindukcję w obwodzie anteny, styk *2* zmienia stopień sprzężenia indukcyjnego obu obwodów.



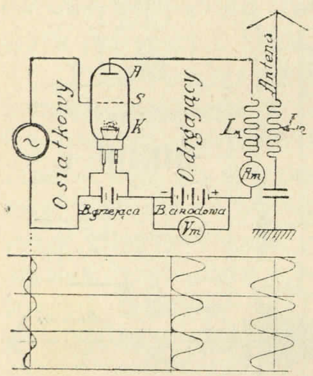
Ryc. 234.

Fale, wytwarzane przez opisany wysyłacz z iskiernikiem wielokrotnym, dają w słuchawce odbiornika ton o wysokości 500/*sek*. Tonu tego jednak nie wytwarzają fale elektromagnetyczne, których częstość jest zbyt wielka, aby mogły blaszkę słuchawki wprawić w drgania; każdej z 500 iskier w sekundzie odpowiada jeden ciąg fal elektromagnetycznych, który wytwarza jedno drgnienie blaszki. (Porównaj fale, nakreślone na ryc. 234). Naciśnięcie klucza, dłużej trwające, wytwarza więcej iskier w iskierniku, więcej ciągów fal wysyłanych i dłużej trwający ton w słuchawce odbiornika, odpowiada to kresce alfabetu

Morsego, krótkie zaś naciśnięcie klucza punktowi. Dlatego fale, otrzymywane zapomocą iskier gaszonych, nazywają także **falami dźwięczącemi**.

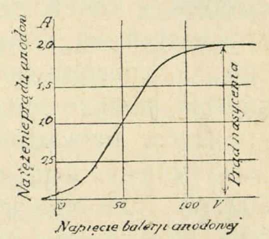
§ 71. Wysyłacz lampkowy.

1. **Lampkę katodową (elektronową)** stanowi naczynie szklane, podobne do zwykłej żarówki, z którego wypompowano powietrze do najwyższego dającego się osiągnąć stopnia. Wewnątrz znajdują się trzy elektrody (ryc. 235). Katodą *K* jest drucik metalowy, ogrzewany osobną **baterją grzejącą** do wysokiej temperatury. Drucik ten rozżarzony otacza się chmurką elektronów (porównaj II § 51 Ćw 6), które są przyciągane przez anodę *A* tak, iż powstaje prąd elektronów od *K* do *A*, gdy biegun dodatni **baterji anodowej** połączony jest z anodą, odjemny zaś z katodą. Prąd ten może być zmierzony ampermetrem *Am*, podczas gdy napięcie baterji anodowej, a zarazem różnicę potencjałów na *K* i *A* odczytuje się na woltmetrze *Vm*.



Ryc. 235.

Z pomiarów natężenia prądu anodowego i napięcia baterji anodowej okazuje się, że stosunek tych wielkości nie jest stały Zależność ich od siebie przedstawiona jest na ryc. 236 wykresem, z którego odczytujemy, że n. p. przy napięciu baterji anodowej (130 *V*) prąd anodowy uzyskuje maximum natężenia (2 *mA*, **prąd nasycenia**). Gdybyśmy bieguny baterji anodowej odwrócili, prąd żaden płynąć by nie mógł. Zatem lampa katodowa stanowi dla prądu przemiennego wentyl elektryczny (II § 66, 8), przepuszczający prąd tylko w jednym kierunku. Lampa katodowa może być używana jako **prostownik** prądu (II § 66, 8).



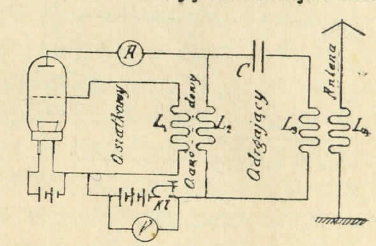
Ryc. 236.

2. Trzecią elektrodą lampki katodowej jest **siatka** metalowa *S* (ryc. 235). Siatka ta wywiera wpływ hamujący na prąd elektronów, płynący z katody do anody bo przypuszcza do

anody tylko te elektrony, które trafią na otwór w blaszce, inne zaś zatrzymują się na niej i elektryzują ją odjemnie, wskutek czego blaszka odpycha nowe elektrony, nadbiegające od katody Gdy siatkę naelektryzujemy odjemnie przez wprowadzenie na nią elektronów z zewnątrz, to może prąd anodowy dojść do zupełnego zaniku. Przeciwny wpływ ma doprowadzenie do siatki elektryczności dodatniej, natężenie prądu anodowego powiększa się wtedy, o ile jeszcze prąd nasycenia nie był osiągnięty Doprowadzając do siatki naprzemian naboje dodatnie i odjemne, wzmacniamy i osłabiamy w tym samym rytmie prąd anodowy, zatem zmiany potencjału na siatce wywołują zmiany natężenia prądu anodowego, najważniejsze jednak jest to, że m a ł y m z m i a n o m p o t e n c j a ł ó w n a s i a t c e o d p o w i a d a j ą w i e l k i e z m i a n y p r ą d u a n o d o w e g o. Lampka katodowa więc może być użyta jako **wzmacniacz** fal elektromagnetycznych **(amplifikator).**

3. Z tej własności lampki korzystać można, używając jej jako **wysyłacza lampkowego**, najprostsze takie zestawienie przedstawione jest na ryc. 235. Źródłem energji jest tu prądnica o wielkiej częstości, połączona z siatką *S* i katodą *K* w **obwód siatkowy** Małym zmianom prądu w tym obwodzie odpowiadają w obwodzie drgającym wielkie zmiany, a drgania te przenoszą się przez sprzęgło jakiekolwiek (tutaj indukcyjne L_1, L_2) na antenę, z której w postaci fal elektromagnetycznych promieniują w przestrzeń.

4. Wysyłacz lampkowy, powyżej opisany, jest w praktyce nieużywany, ponieważ użycie lampki w t. zw **sprzężeniu zwrotnem** przedstawia o wiele więcej korzyści. Łączenie to polega na tem, że o b w ó d s i a t k o w y i a n o d o w y l a m p k i s ą z s o b ą s p r z ę ż o n e indukcyjnie zwojnicami L_1 i L_2 (ryc. 237), a z obwodem anodowym sprzężony jest galwanicznie obwód drgający, w dalszym ciągu sprzężony indukcyjnie z anteną. W obwodzie anodowym leży przyciskacz *Kl* (klucz), za jego przyciśnięciem powstaje w tym obwodzie prąd, który podczas wzrastania wzbudza w obodzie siatkowym prąd indukcyjny Gdy zwojnica L_1 tak jest nawinięta, że na siatce powstaje skutkiem prądu in-

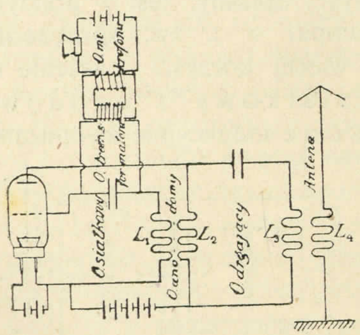


Ryc. 237.

dukcyjnego potencjał dodatni względem katody, to działanie siatki powiększa prąd anodowy; ten znów wzbudza prąd indukcyjny w obwodzie siatkowym, przez co wzmaga się prąd anodowy i to wzmacnianie się wzajemne tych dwóch prądów doprowadza prąd anodowy do stanu nasycenia. Równocześnie kondensator C w obwodzie drgającym naelektryzował się do pewnego napięcia, z którego rozbraja się przez zwojnice L_2 i L_3. Wskutek tego prąd w obwodzie anodowym, a stąd i w obwodzie siatkowym osłabia się, i to działanie wzajemnie się osłabiające doprowadza prąd anodowy do zera. Kondensator C jest teraz, skutkiem prądu płynącego w przeciwnym kierunku, naelektryzowany przeciwnie, niż poprzednio, a rozbrajając się, wywoła w obwodzie anodowym prąd o kierunku dodatnim.

Z powyższego przedstawienia zrozumiemy, że przy odpowiednim doborze samoindukcyj i pojemności możemy otrzymać w obwodzie drgającym silne drgania elektromagnetyczne **niezanikające**, które przez sprzęgło (L_3, L_4) pojawiają się w obwodzie otwartym anteny, dobrze nastrojonej i z niej promieniują w postaci fal elektromagnetycznych w przestrzeń. Energji do starcza baterja anodowa, lampka katodowa występuje tu, jako przetwornica, przetwarzająca prąd stały na przemienny. Nazywamy ją także **prądnicą lampkową** (generatorem lampkowym). Jest to jedno z najważniejszych jej zastosowań.

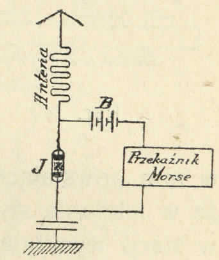
5. **Wysyłacz lampkowy telefoniczny** otrzymamy, gdy zamiast klucza w obwodzie anodowym (ryc. 237) rozszerzymy obwód siatkowy przez dołączenie do niego obwodu transformatora, sprzężonego z obwodem mikrofonu (ryc. 238). Wahania prądu wskutek drgania blaszki mikrofonu (o okresie 40—4000/*sek*) przenoszą się, przetworzone na wyższe napięcie w transformatorze, na obwód siatkowy i modulują drgania elektromagnetyczne, odbywające się w dalszych obwodach (o okresie od setek tysięcy do miljona drgań na *sek*). Tylko bowiem drgania modulowane mogą być słyszane w aparacie telefonicznym odbiornika.



Ryc. 238.

§ 72. Odbiorniki fal.

1. Pierwsze ujawniacze fal elektromagnetycznych były budowane na tej zasadzie, że przerwa iskrowa, w której powstała gorąca iskra i w której powietrze jest przez rozbrojenie elektryczności zjonizowane, zachowuje się wobec prądu stałego, jak przewodnik metaliczny (Porównaj II 68 Ćw 4). Gdy więc w przerwę iskrową J w obwodzie anteny wstawimy grube opiłki metalowe (ryc. 239) i gdy fala odpowiedniej długości wzbudzi prąd w antenie, przerwa iskrowa staje się przewodnikiem prądu dla baterji miejscowej B i prąd płynie tak długo, aż przez wstrząśnienie rury z opiłkami metaliczne ich zetknięcie nie zostanie przerwane. Prąd ten powiększony zapomocą przekaźnika, (relais, II § 54 Ćw 9), sam może wstrząsać rurkę i poruszać przyrząd piszący Morsego. Taki ujawniacz fal, zwany **kohirer** (z angielskiego *cohearer*), był stosowany przez Marconiego w pierwszych próbach telegrafji bezdrutowej.



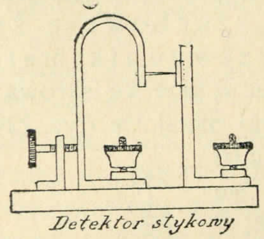
Ryc. 239.

2. O wiele czulszym przyrządem jest **słuchawka telefoniczna**, zapomocą której można odbierać znaki telegraficzne albo głosowe słuchem, albo też w połączeniu z fonografem utrwalić je na płycie woskowej lub jakimkolwiek sposobem optycznym utrwalić fotograficznie. Najczęściej używany jest odbiór telefoniczny zapomocą słuchu.

Blaszka telefoniczna odpowiada tylko na drgania akustyczne 40 do 4000/*sek*. Drgania elektryczne o częstości setek tysięcy na *sek* ani nie mogą blaszki wprawić w drganie, ani ucho drgań o tak wielkiej częstości usłyszećby nie mogło. Koniecznem więc jest, drgania elektromagnetyczne, już na stacji wysyłającej zmodulowane w wysyłaczu lampkowym, na stacji odbiorczej zmienić na jednokierunkowe zapomocą odpowiedniego prostownika. Chodzi bowiem o to, że fale elektromagnetyczne, nawet zmodulowane, nie pobudzą blaszki telefonicznej do drgania, jeżeli średnia wartość drgań elekromagnetycznych jest zerem (Linje SW na ryc. 242). Prostownikiem drgań może być detektor stykowy albo lampka katodowa.

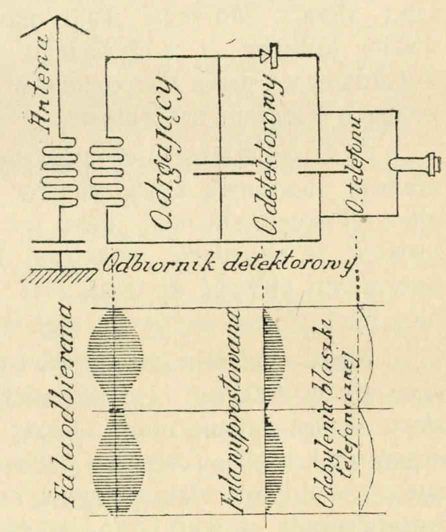
3. **W detektorze stykowym (kryształkowym)** stosuje się właściwość niektórych półprzewodników,

które, zetknięte z ostrzem metalowem, przez miejsce zetknięcia w jednym kierunku przepuszczają prąd łatwiej, niż w kierunku przeciwnym (ryc. 240). Jest to w związku z prądami termoelektrycznemi, które powstają przy zetknięciu się dwóch przewodników (II § 60 Ćw 14). Nadają się tu, jako kolce, metale lub przewodniki. złoto, glin, grafit, miedź, jako półprzewodniki piryt, karborund, krzem i t. p.



Ryc. 240.

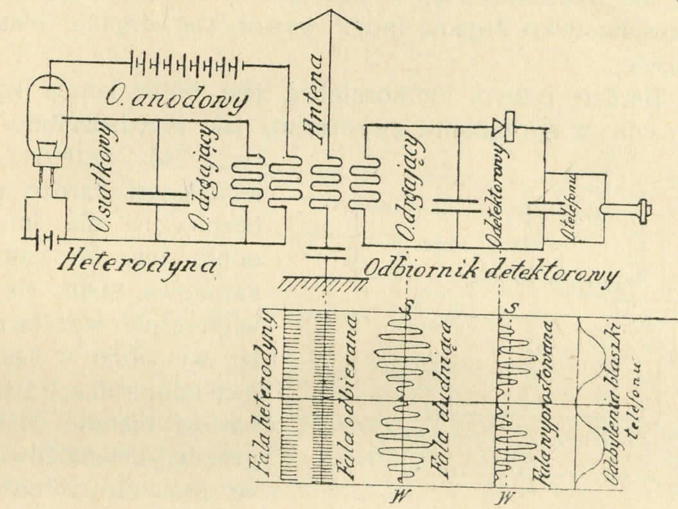
Użycie **odbiornika stykowego** przedstawione jest na ryc. 241 Antena jest w zwykły sposób sprzężona z obwodem drgającym. Drgania elektromagnetyczne, w nim powstające, prostuje detektor w swoim obwodzie tak, że w telefonie słyszy się dźwięki, wypowiadane do mikrofonu w stacji wysyłającej. Charakterystycznem znamieniem tego odbiornika jest brak zupełny jakichkolwiek ogniw galwanicznych, jest to więc najprostszy i najtańszy odbiornik.



Ryc. 241

4. Detektorem stykowym można odbierać fale elektromagnetyczne modulowane, można nim odbierać także fale tłumione (dźwięczące), ale nie można odbierać fal nietłumionych niemodulowanych, bo po wyprostowaniu takich fal powstaje w obwodzie detektorowym prąd trwały, który blaszki telefonu do drgania nie pobudzi. Aby i w tym przypadku otrzymać znaki, musi się na stacji odbiorczej wytworzyć **sztuczną modulację** fal nietłumionych. Osiąga się to przez superpozycję tych fal z inną falą nietłumioną, której częstość różni się cokolwiek od częstości fali odbieranej (II § 3, 1). W ten sposób powstają **dudnienia** (II Ryc. 242), które brzmią w telefonie, jako ton

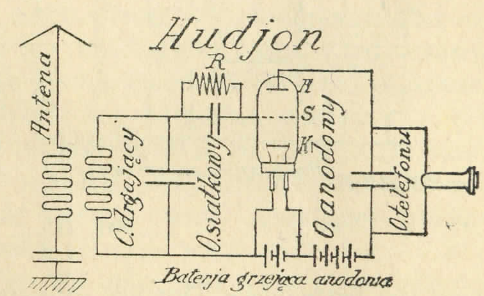
(odbiór interferencyjny). Dodatkową falę wytwarza się zapomocą lampki katodowej, użytej z sprzężeniem zwrotnem; ten dodatkowy przyrząd nazywają **heterodyną** (ryc. 242).



Ryc. 242.

5. Wskutek swych właściwości wzmacniania i prostowania prądu lampka katodowa w szczególny sposób nadaje się do ujawniania fal elektromagnetycznych, mianowicie wtedy, gdy z powodu oddalenia stacji wysyłającej fale są zbyt osłabione, iżby bez wzmocnienia mogły być ujawnione. Najprostszy odbiornik lampkowy, t. zw **audjon**, przedstawiony jest na ryc. 243.

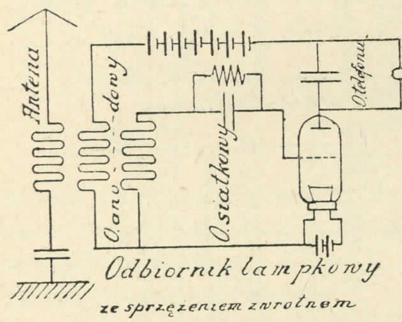
Podczas gdy w detektorze stykowym energja fal, pochwytywanych przez antenę, zamienia się w energję głosu w słuchawce telefonicznej, to w odbiorniku lampkowym energja ta służy tylko do wzbudzenia prądu siatkowego, telefon zaś ma osobne źródło energji w baterji anodowej. Obwód siatkowy zawiera opór R jednego lub kilku miljonów Ohmów, włączony równolegle z kondensatorem. Opór



Ryc. 243.

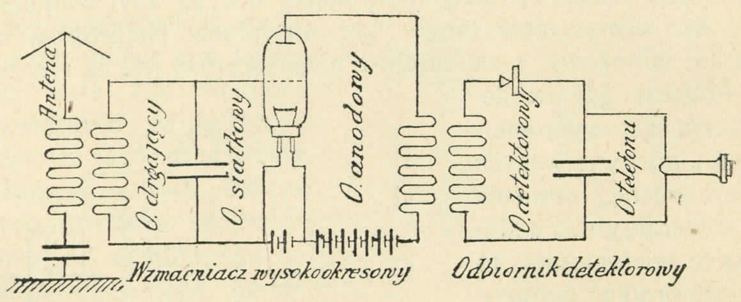
ten służy do tego, aby między siatką i rozżarzoną katodą otrzymywać stałe napięcie, potrzebne do tego, iżby drgania w obwodzie siatkowym wywoływały drgania w obwodzie anodowym, ale wyprostowane, posiadające tylko części dodatnie, takie bowiem tylko drgania mogą wywoływać drganie blaszki telefonicznej.

6. Bardzo czułym odbiornikiem jest także lamka katodowa, użyta w **sprzężeniu zwrotnem**, jak przedstawiono na ryc. 244. Odbiór ten jednak jest bardzo niebezpieczny dla innych odbiorców, bo lampka katodowa, stając się równocześnie wysyłaczem fal, wywołuje w sąsiednich odbiornikach znane, bardzo niemiłe piski i gwizdy, uniemożliwiające prawidłowy odbiór.



Ryc. 244.

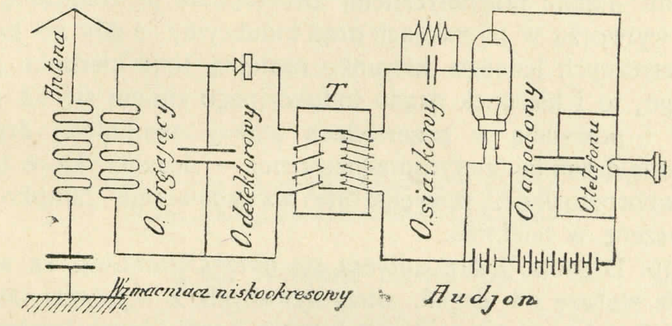
7 Przez odpowiednie połączenie lampek katodowych otrzymuje się **wzmacniacz wysokookresowy**, t. j. wzmacniacz fal o częstości drgań elektromagnetycznych. Ryc. 245 przedstawia wzmacniacz **jednolampkowy**. Działanie



Ryc. 245.

jego jest następujące. Drgania, powstające w obwodzie siatkowym, wytwarzają obszerniejsze zmiany napięcia w obwodzie anodowym, które przenoszą się indukcyjnie na obwód detektorowy, połączony z telefonem

8. Wzmacniacza wysokookresowego używa się, gdy energja odbierana z anteny jest tak mała, że nie zdołałaby bez pośrednictwa wzmacniacza wzbudzić drgań, dających się słyszeć w telefonie. Gdy jednak energja ta jest wystarczająca, a chodzi



Ryc. 246.

jeszcze o wzmocnienie fal głosowych, używa się **wzmacniacza niskookresewego**, którego działanie polega na wzmocnieniu drgań, już wyprostowanych zapomocą detektora. Układ taki **jednolampowy** jest przedstawiony na ryc. 246.

Drgania w obwodzie detektorowym przetwarzają się na wyższe napięcie w transformatorze *T*, wskutek tego prąd siatkowy jest znów dwukierunkowy, lecz wzmacnia się i wyprostowywa w dołączonym audjonie. Miejsce telefonu może zająć drugi transformator z lampką katodową, do tego przyłączony może być trzeci i czwarty i wtedy otrzymuje się olbrzymie zwiększenie energji drgań w słuchawce telefonicznej. W ten sposób powstaje wzmacniacz niskookresowy **wielolampowy.**

9. Przez połączenie wzmacniacza wysokookresowego z niskookresowym otrzymuje się odbiornik o czułości największej, jaka według dziesiejszego stanu radjotechniki jest możebna. Wielka zaś czułość odbiornika jest korzystna, ponieważ z nią wzrasta **sfera działania odbiornika**, t. zn odległość stacji, której fale można jeszcze odbierać. Przy większej czułości odbiorników może być także energja stacji wysyłającej zmniejszona, a tem samem i koszty jej urządzenia.

Wielka czułość odbiornika umożliwia także stosowanie do odbioru fal małej przenośnej **anteny ramowej,** którą można ustawić wewnątrz mieszkania. W antenach odbiorczych otwartych drgania prądu pochodzą od **fal elektrycznych.** W antenie zamkniętej, n. p. o kształcie kwadratu, drgania elektryczne, powstające pod wpływem fal elektrycznych w dwóch bokach równoległych kwadratu znoszą się. Jeżeli jednak taką antenę zamkniętą, pionową ustawimy w płaszczyźnie promieniowania elektromagnetycznego, wtedy **fale magnetyczne**, przecinając swojemi linjami magnetycznemi prostopadle powierzchnię anteny, wytworzą w jej zwojach prąd indukcyjny, a gdy po linjach magnetycznych jednego kierunku nastąpią linje kierunku przeciwnego, to i kierunek prądu indukcyjnego zmieni się na przeciwny i powstaną w przewodach anteny zamkniętej drgania w rytmie drgań fali elektromagnetycznej, — drgania, które mogą być wyprostowane, powiększone wzmacniaczem lampkowym i usłyszane w telefonie.

10. Drgania, które odbiera się anteną ramową, są wielokrotnie słabsze od drgań, otrzymywanych z wysokiej anteny otwartej, mimoto przy użyciu dobrych wzmacniaczy jest antena ramowa przyrządem bardzo użytecznym i wygodnym. Znaczenie jej jednak polega w tem, że posiada wybitną **właściwość kierunkową** tylko fale, pochodzące od stacyj, które leżą w kierunku płaszczyzny anteny, mogą być odbierane, wszystkie zaś inne są od odbioru wykluczone; stąd także odbiór zapomocą anteny ramowej jest czystszy, niż zapomocą anteny otwartej.

Właściwość kierunkowa anteny ramowej umożliwia także wyznaczenie kierunku, a nawet położenia stacji nadawczej **(radjogonjometrja)**, szczególnie jest to ważne w oznaczeniu pozycji okrętu, który z powodu jakiejś katastrofy woła o pomoc.

11 Tak wysyłanie fal elektromagnetycznych, jak i ich odbieranie osiągnęło w ostatnich latach ogromnie wysoki stopień rozwoju technicznego. Mimoto i radjotelegrafja i radjotelefonja wykazują jeszcze liczne braki, których usunięcie będzie zadaniem najbliższej przyszłości. Radjotelefonja musi kiedyś stać się środkiem porozumiewania się dwóch osób z oddalenia tak łatwym, jak tę rolę spełnia dziś telefon.

Do dalszych dziedzin radjotechniki należy także **radjotelemechanika,** t. j. wprawianie w ruch mechanizmów i kierowanie tym ruchem z odległości zapomocą fal elektrycznych, szczególnie chodzi tu o kierowanie z odległości samolotów Tu należy także zastosowanie fal elektromagnetycznych do **przesyłania obrazów i widzenia z odległości,** lecz wszystkie te dziedziny radjotechniki znajdują się dziś zaledwie w początkowem stadjum rozwoju.

VI. KOSMOGRAFJA.

§ 73. Wstępne określenia.

1. **Kosmografja** jest to nauka o ziemi (ze względu na jej kształt, wielkość i ruchy), o ciałach niebieskich i ich związku z ziemią.

Oko nasze nie poucza nas o wielkości i odległości ciał niebieskich, nie może także objąć złożonych ich ruchów Zjawiska, które spostrzegamy, są złudzeniem, które od rzeczywistości oddzielić może dopiero rozumowanie, oparte na spostrzeżeniach. Zanim więc wyrozumujemy prawdziwy układ świata, poznajmy najpierw zjawiska pozorne, które bezpośrednio spostrzegać możemy

2. **Ogólny widok nieba.** Gdy znajdujemy się gdziekolwiek na ziemi w miejscu otwartem, wydaje się nam, że jesteśmy w środku koła, podpierającego półkuliste sklepienie nieba. Na tem sklepieniu widzimy w dzień słońce, w nocy księżyc i gwiazdy w nieustannym ruchu.

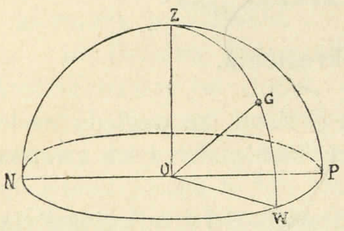
Płaszczyzna pozioma, przechodząca przez oko nasze, oddzielająca półkulę nieba widzialną nad nami od niewidzialnej pod nami, nazywa się **poziomem fizycznym (horyzontem).**

Koliste przecięcie poziomu z powierzchnią kuli niebieskiej nazywą się **kołem poziomu (kołem horyzontalnem, widnokręgiem)**, a prostopadła do poziomu w miejscu, gdzie jesteśmy, **linją wierzchłkową.** Punkty, w których linja wierzchołkowa przebija kulę niebieską, zowią się: widzialny **zenitem** (punktem nadgłównym), niewidzialny **nadirem** (podnożnym).

Ślady przecięcia płaszczyzn, przesuniętych przez linję wierzchołkową, z kulą niebieską nazywamy **kołami wierzchołkowemi.**

Słońce, księżyc i większość gwiazd wychodzą z jednej strony z pod poziomu, wznoszą się po łukach kołowych do najwyższego położenia (**górowanie** gwiazdy, **kulminacja**), zniżają slę następnie ku poziomowi, a wreszcie znikają pod płaszczyzną poziomu. Wszystkie te ciała niebieskie górują dla tego samego miejsca ziemi na tem samem kole wierzchołkowem, którego płaszczyzna przepołowia widzialną część torów przez nie opisywanych. To koło wierzchołkowe zowie się **południkiem**.

Płaszczyzna południka przecina poziom według **linji południowej**. Punkty przecięcia tej prostej z kołem poziomu nazywają się: punkt *P*, leżący w stronie, w której widzimy słońce (ryc. 247), **punktem południowym**, a punkt przeciwległy *N*, **północnym**. Prostopadła do linji południowej przecina koło poziomu w **punkcie wschodnim i zachodnim**.



Ryc. 247.

Południk dzieli kulę niebieską na półkulę wschodnią i zachodnią.

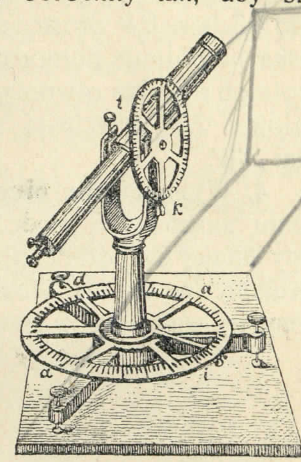
§ 74. Wyznaczenie położenia gwiazd.

1. Podobnie jak odnosimy na płaszczyźnie położenie punktów do układu dwóch stałych, przecinających się prostych i wyrażamy je zapomocą **spółrzędnych**, tak też położenie gwiazd odnosimy do układu dwóch stałych kół wielkich na kuli niebieskiej. Używa się mianowicie trzech różnych układów spółrzędnych: poziomu, równika i ekliptyki.

2. **Spółrzędne poziomu**. Położenie gwiazdy określa jej **wysokość** t. j. łuk *GW* (ryc. 247) koła wierzchołkowego gwiazdy *G*, mierzony od poziomu do gwiazdy i **azymut** (poziomołuk), t. j. łuk *PW* koła poziomu, mierzony od punktu południowego ku zachodowi do koła wierzchołkowego gwiazdy Dopełnienie wysokości zowie się **odległością wierzchołkową gwiazdy.**

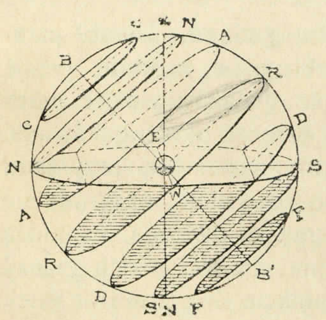
Do wyznaczenia płaszczyzny południka i mierzenia wysokości i azymutu służy **teodolit** (ryc. 248). Ustawiwszy koło azymutalne *aa* zapomocą libeli poziomo, wyznacza się płaszczyznę południka w następujący sposób Kieruje się lunetę na dowolną gwiazdę bliską górowania tak, iżby stanęła w punkcie krzyżowania się nitek lunety i odczytuje się położenie skazówki *S*. Następnie obraca się lunetę, nie zmieniając jej nachylenia, na-

około osi pionowej za gwiazdą, dopóki gwiazda znowu nie stanie na krzyżowaniu się nitek, t. j. na tej samej wysokości, co przed górowaniem i odczytuje się znowu położenie skazówki *S*. Gdy wreszcie oś pionową obrócimy tak, aby skazówka przepołowiła łuk, zawarty pomiędzy oboma jej płożeniami, luneta znajdować się będzie w płaszczyźnie południka. Jeżeli przyrząd jest zabezpieczony od przypadkowych wstrząśnień, można wyznaczyć każdej chwili spółrzędne gwiazdy W tym celu obraca się oś pionową, nachylając równocześnie lunetę tak, by gwiazda stanęła na punkcie skrzyżowania nitek i odczytuje się stopnie azymutalne od punktu południowego, a stopnie wysokości na kole *k*.


Ryc. 248.

Płaszczyznę południka można w przybliżeniu wyznaczyć także sposobem prostszym. Na kartce papieru, przytwierdzonej do stołu, zakreśla się dowolnym promieniem koło, wbija się w jego środku pionowo drut i zaznacza przed południem i po południu punkty na kole, na które pada cień końca pręta. Prostopadła, wykreślona ze środka koła na cięciwę, łączącą oba te punkty, jest linją południową (Gnomon).

3. Pozorny ruch dzienny gwiazd. Gwiazdy opisują na niebie koła równoległe, nachylone do poziomu (ryc. 249). Wschodzące blisko punktu południowego opisują koła mniejsze. W miarę posuwania się punktu wschodu gwiazd ku północy, koła stają się coraz większe, następnie coraz mniejsze. Z kołowych torów wielu gwiazd widzimy u nas tylko część, t. j. **łuk dzienny**, druga ich część, t. j. **łuk nocny** leży pod poziomem *NS*.

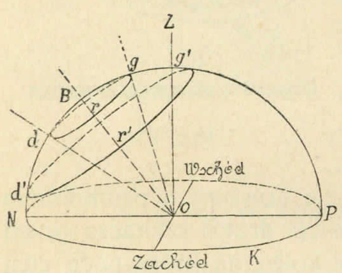

Ryc. 249.

Na północnej stronie są gwiazdy, które zostają ciągle nad poziomem i zakreślają nad nim koła tem mniejsze, im dalej na północy gwiazda się znajduje. Ścieśniając obwód tych kół coraz więcej, znajdziemy na niebie punkt nieruchomy

Punkt ten B nazywamy **biegunem północnym**. Drugi taki punkt, **biegun południowy** B', leży na półkuli południowej

Prosta, łącząca oba bieguny, na której leżą środki wszystkich kół, opisywanych przez gwiazdy, nazywa się **osią świata**. Koło wielkie RR prostopadłe do osi świata, dzielące kulę niebieską na półkulę północną i południową, nazywamy **równikiem**, a koła do równika równoległe **równoleżnikami**. Równik RR i koło poziomu NS przecinają się w punkcie wschodnim i zachodnim EW.

4. Wyznaczenie bieguna i kierunku osi świata. Po ustawieniu skazówki S teodolitu na punkcie południowym, zwracamy lunetę na północ, obracając oś pionową o 180° Następnie kierujemy lunetę na jedną z gwiazd nie zachodzących i mierzymy jej wysokość w chwili **górowania i dołowania** (najniższego położenia nad poziomem). Dwusieczna kąta, zamkniętego przez oba położenia lunety (ryc. 250), jest osią świata, punkt nieba, przypadający w tem położeniu lunety na skrzyżowanie nitek, jest biegunem północnym, a kąt, który luneta zawiera z poziomem, **wysokością biegunową** dla danego miejsca ziemi. Jeżeli lunetę ustawimy prostopadle do osi świata, to wskaże ona punkt leżący na równiku. Część południka, zawarta między równikiem a poziomem, **wysokość równikowa** RN (ryc. 249), dopełnia wysokość biegunową NB do 90°



Ryc. 250.

5. Dokładniejsze zbadanie ruchu gwiazd. Lunety paralaktyczne (równikowe). Gwiazda przebiega w krótkim czasie przez pole widzenia lunety Aby więc gwiazdę widzieć przez dłuższy czas w lunecie, musimy lunetę obracać około osi świata. Lunety, dające się obracać (zwyczajnie zapomocą przyrządu zegarowego) około osi równoległej do osi świata, nazywają się **paralaktyczne**. Gdy lunetę taką obracamy za gwiazdą, na którą jest skierowana, z prędkością jednostajną, dla wszystkich gwiazd jednakową, gwiazda zostaje ciągle w punkcie skrzyżowania nitek lunety A ponieważ promień widzenia opisuje przy obrocie lunety około osi świata stożek, przecinający niebo według koła, więc **gwiazdy poruszają się po kołach z prędkością jednostajną, dla wszystkich gwiazd jednakową.**

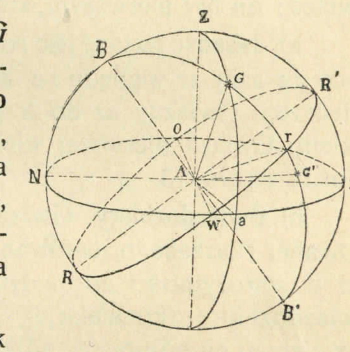
Odległość względna gwiazd nie zmienia się podczas ich ruchu, przeto i ugrupowanie gwiazd nie ulega zmianie.

Ruch dzienny gwiazd odbywa się tak, jak gdyby cała kula niebieska wraz z rozsianemi na niej gwiazdami obracała się od wschodu na zachód z prędkością jednostajną.

Czas, upływający od jednego górowania gwiazdy do następnego, to jest czas pozornego obrotu kuli niebieskiej, nazywamy **dobą gwiazdową**. Doba gwiazdowa = **24 godzinom gwiazdowym.**

6. Spółrzędne równikowe. Położenie gwiazdy odnośnie do równika określa **zboczenie (deklinacja)** i **wznoszenie proste (rektascenzja).**

Zboczenie δ jest to odległość rG gwiazdy od równika (ryc. 251), mierzona na obwodzie **koła godzinnego** (koła zboczenia), t. j. koła BGB', przechodzącego przez oś świata i gwiazdę. Zboczenie jest dodatnie, gdy gwiazda znajduje się na półkuli północnej, ujemne, gdy na półkuli południowej.



Ryc. 251.

Wznoszenie proste α jest to łuk równika od **punktu równonocnego wiosennego** (punkt równika, w którym słońce znajduje się na wiosnę) do koła godzinnego gwiazdy, mierzony od południa ku zachodowi.

Wznoszenie proste można także wyrazić w jednostkach czasu. Każdy bowiem punkt równika obiega w 24 godzinach gwiazdowych 360°, więc. 360° = 24 godzin, 15° = 1 godzina = 60 minut, 1° = 4 minuty, zatem 15' (minut łukowych) = 1 minuta czasu, a 15'' (sekund łukowych) = 1 sekunda czasu.

Wznoszenie proste α, wyrażone w jednostkach czasu, orzeka, że gwiazda góruje o α godzin później od punktu wiosennego.

Podczas gdy wysokość i azymut są inne w każdym miejscu i czasie, zboczenie i wznoszenie proste określają położenie gwiazdy niezależnie ani od czasu, ani od miejsca obserwacji, bo gwiazda ani względem równika, ani względem punktu wiosennego, położenia swego nie zmienia.

§ 75. Podział ciał niebieskich.

1 **Ciała niebieskie,** które wykonując ruch wspólny całemu sklepieniu niebieskiemu, zmieniają położenie względem siebie tak nieznacznie, iż zmiany dopiero po wieloletnim przeciągu czasu spostrzec się dają, nazywamy **gwiazdami stałemi.** Inne ciała niebieskie zmieniają nieustannie położenie względem siebie i gwiazd stałych. Takiemi są słońce, księżyc, planety, komety i meteoryty

2. **Gwiazdy stałe.** Ilość gwiazd stałych, widzialnych przez silnie powiększające lunety, jest niezliczona.

Hipparch naliczył okiem nieuzbrojonem 1000 gwiazd, Heiss w nowszych czasach 5000. Galilei uznał niemożebność policzenia gwiazd, on był pierwszym, który zwrócił lunetę na drogę mleczną.

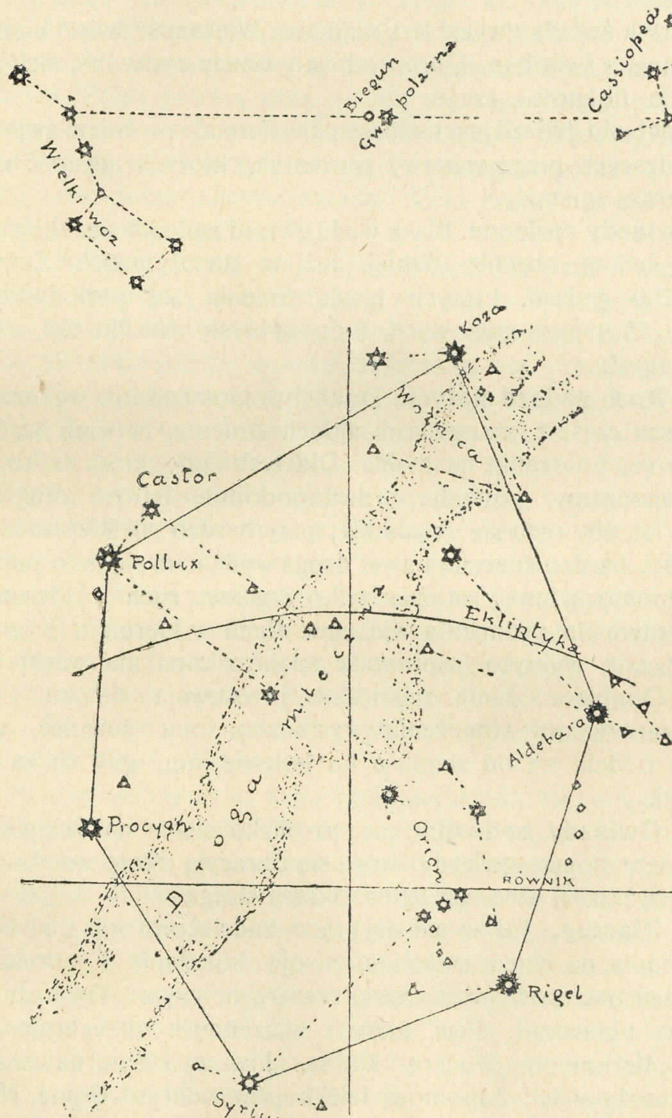
a) **Jasność** gwiazd jest rozmaita. Jeszcze w starożytności dzielono gwiazdy ze względu na ich jasność. na gwiazdy 1, 2, 3-ciej .. wielkości. Gwiazdy aż do 6-tej wielkości widzieć można gołem okiem Gwiazd pierwszej wielkości w naszych stronach naliczyć można około 13.

b) **Gwiazdozbiory** Gwiazdy są na niebie najrozmaiciej ugrupowane. Potrzeba orjentowania się między niemi dała powód już w starożytności do podziału ich na gromady, tak zwane gwiazdozbiory (konstelacje), których liczymy sto kilkanaście, a z nich 50 na północnej półkuli nieba. Gwiazdozbiorom i świetniejszym ich gwiazdom nadano rozmaite nazwy (zwierząt, bohaterów). Inne gwiazdy oznaczamy nazwą gwiazdozbioru i literami greckiemi w porządku jasności, n. p. α Leonis.

Często nazywa się gwiazdę liczbą, jaką jest oznaczona w sławnych katalogach gwiazd (Bradley, Laland, Argelander).

Ważniejsze gwiazdozbiory widzialne u nas są. **Wielka Niedźwiedzica** (wóz Dawida), grupa złożona z siedmiu gwiazd, według której najłatwiej na niebie orjentować się można. Podobnie ugrupowane są gwiazdy **Małej Niedźwiedzicy** (małego wozu). Ostatnia gwiazda dyszla, α Ursae minoris, jest gwiazdą biegunową (polarną), bo blisko niej znajduje się biegun północny Gwiazdę tę znajdziemy, gdy prostą, łączącą tylne koła wozu Dawida, przedłużymy o czterokrotną jej długość. **Woźnica** z świetną gwiazdą Kozą (Capella). Te gwiazdozbiory nie zachodzą. Z leżących więcej na południe odszczególnia się **Orjon**, przecięty przez równik. Jest to czworobok świetnych gwiazd,

w środku którego 3 gwiazdy tworzą przepaskę **Oriona.** Najświetniejszą gwiazdą na naszym niebie jest **Syrjusz** w gwiazdozbiorze **Psa Wielkiego** (ryc. 252).



Ryc. 252.

3. **Budowa i własności gwiazd.** Widma gwiazd są bardzo podobne do widma słońca. Większa lub mniejsza część linij

Fraunhofera zgadza się z linjami w widmie słońca. Z tego wynika, że gwiazdy, są to, podobnie jak słońce, rozżarzone płynne kule, otoczone gazową osłoną, są więc słońcami do naszego podobnemi.

Barwa światła gwiazd jest rozmaita. Większość świeci białem lub żółtawem światłem. Obok tych są gwiazdy czerwone, zielone, niebieskie, fioletowe, szare.

Migotanie gwiazd jest skutkiem interferencji promieni światła, przechodzących przez warstwy powietrza, których gęstość nieustannie się zmienia.

Gwiazdy zmienne. Blask wielu gwiazd zmienia się. Niektóre gwiazdy świecą obecnie słabiej, niż w starożytności. Znamy około 200 gwiazd, których blask zmienia się perjodycznie, a około 15 gwiazd czasowych, które zabłysły na kilka dni, a następnie zgasły

4. **Ruch gwiazd stałych.** Dokładne spostrzeżenia wykazały, że większa część t. zw gwiazd stałych zmienia, chociaż bardzo nieznacznie, położenie na niebie. Dla tych zaś, których ruchu nie spostrzegamy, potrzeba prawdopodobnie bardzo długiego szeregu lat, aby ruch się uwydatnił, przy bardzo wielkiej bowiem odległości, bardzo znaczna nawet droga wyda nam się jako punkt.

Zapomocą lunety można tylko dostrzec ruch w kierunku poprzecznym do promienia widzenia. Ruch w kierunku promienia widzenia wykryto zapomocą spektroskopu na podstawie prawa Dopplera. Linie spektralne przesuwają się ku końcowi czerwonemu (obniżenie wysokości tonu światła), gdy gwiazda oddala się od ziemi, a ku fioletowemu, gdy zbliża się do ziemi.

5. **Gwiazdy podwójne** są to blisko siebie na sklepieniu niebieskiem stojące gwiazdy, które się obracają około wspólnego środka ciężkości, albo też jedna okrąża drugą.

6. **Planety.** Już w starożytności zauważono kilka gwiazd, które z dnia na dzień zmieniają swoje położenie i poruszają się ruchem okresowym w pasie zwierzyńcowym. Gwiazdy te nazwano planetami Pięć planet, widzialnych nieuzbrojonem okiem Merkurego, Wenerę, Marsa, Jowisza i Saturna znano już w starożytności. Zapomocą teleskopów odkryto Urana, Neptuna i planetoidy. Dla oka nieuzbrojonego różnią się planety niewiele od gwiazd stałych, nie iskrzą się jednakże tak, jak one, lecz świecą spokojnem światłem. Przez lunety widzimy planety jako tarcze, a gwiazdy stałe nawet przy najznaczniejszych po-

większeniach w postaci świecących punktów Tarcze planet zmieniają swoje pozorne średnice, a niektóre okazują nawet wyraźne fazy, co dowodzi, że świecą tylko światłem odbitem. Pozorny ruch planet jest niejednostajny, drogi ich zawiłe. W jednej części drogi bowiem poruszają się, od zachodu ku wschodowi (**ruch prosty**), z początku ruchem przyśpieszonym, później opóźnionym. Przez pewien czas wydają się nieruchome, potem poruszają się od wschodu ku zachodowi (**ruch wsteczny**), znowu ruchem z początku przyśpieszonym, następnie prędkość maleje aż do zera, potem znowu wzrasta. Cała droga ma postać linji falistej, lub tworzy pętlice.

7 **Komety** mają najczęściej postać gwiazd, otoczonych świecącą atmosferą, przedłużającą się często w świetlną smugę, zwaną **ogonem** lub **warkoczem**. Czasem pojawiają się one na niebie niespodziewanie w całej świetności, innych blask i warkocz wzrastają dopiero stopniowo. Komety obiegają część nieba, zbliżają się w stronę słońca, następnie światło ich słabnie, a po kilku dniach, tygodniach lub miesiącach znikają. Tory komet są bardzo wydłużonemi elipsami, parabolami lub hiperbolami, dlatego widzimy tylko małą część drogi komety Okres obiegu niektórych komet około słońca trwa tysiące lat, inne okrążają słońce w krótkim czasie, więc zjawiają się perjodycznie (takich mamy 17). Masa komet jest bardzo mała, objętość olbrzymia.

Widmo jądra komet jest często ciągłe, coby wskazawało na świecące stałe części. Widmo osłon i warkocza jest najczęściej albo zupełnie zgodne z widmem węglowodorów, albo bardzo do niego podobne.

8. **Meteoryty** są to małe ciała niebieskie, okrążające słońce po eliptycznych torach, pojedynczo lub gromadami. Ciała te widzimy wtenczas, gdy, przecinając atmosferę ziemską, rozżarzają się wskutek zamiany energji ruchu na ciepło. Większe meteoryty, tak zwane **aerolity**, okazują się jako jasno świecące ciała, pękają z hukiem i w większych lub mniejszych kawałkach spadają na ziemię (deszcz kamienny). **Gwiazdy spadające** są to bardzo drobne meteoryty, które w postaci białych iskier zjawiają się nagle, przebiegają w ciągu kilku sekund w różnych kierunkach po niebie i gasną bez śladu. Okazują się one albo pojedynczo, albo też perjodycznie w rojach, które z pewnego punktu wylatują (punkt promieniowania). Okresy rojów gwiazd spadających są od 9 14 sierpnia (łzy św. Wawrzyńca — nazwa ludowa) i od 13—15 listopada. Punktem promieniowania pierwszych

jest konstelacja Perseusza (Perseidy), drugich konstelacja Lwa (Leonidy). Okresowość rojów tłómaczą tem, że ziemia w pewnych okresach zbliża się do pierścieni tych meteorytów

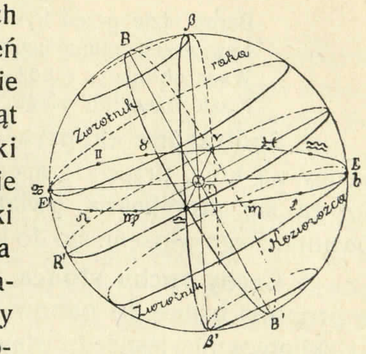
9. **Mgławice.** Osłony gazowe niektórych gwiazd są tak rozległe, że otaczają w postaci słabo świecącej kuli jasną gwiazdę.

Są także mgławice, składające się z rozżarzonych gazów W widmie ich są barwne prążki wodoru, azotu i jakiegoś nieznanego gazu. Niektóre mgławice mają kształt kulistych lub eliptycznych pierścieni, inne są spiralnie zwinięte, lub mają nieregularną postać. Są także mgławice pozorne, które przez silne teleskopy widzimy jako roje gwiazd. Taką mgławicą pozorną jest **droga mleczna.** W niektórych mgławicach przez najsilniejsze nawet teleskopy gwiazd nie odróżniamy Jedne z nich dają widmo ciągłe, są więc rojami płynnych kul, inne dają widmo prążkowe, są więc rozżarzonym gazem.

§ 76. Słońce.

1 **Pozorny ruch słońca.** Słońce zmienia pozornie codziennie położenie odnośnie do gwiazd stałych. Gwiazdy stałe poruszają się niezmiennie po tych samych równoleżnikach, słońce zaś opisuje codziennie inny równoleżnik, a w ciągu roku wszystkie równoleżniki między $+23^1/_2{}^0$ a $23^1/_2{}^0$ Dnia 21 marca słońce opisuje równik, wschodzi w punkcie **prawdziwego wschodu**, zachodzi w punkcie **prawdziwego zachodu** i zboczenie jego $= 0$. Odtąd zboczenie jego zwiększa się codziennie, punkty wschodu i zachodu posuwają się na północ, a dnia 21 czerwca zboczenie słońca jest największe $+23^1/_2{}^0$ Potem zboczenie znowu się zmniejsza, 23. września opisuje słońce znowu równik, następnie ma zboczenie południowe, punkty wschodu i zachodu posuwają się ku południowi, a 21 grudnia ma słońce zboczenie południowe $-23^1/_2{}^0$ Gwiazdę, która pewnego dnia wschodzi tuż przed wschodem słońca, widzimy w następnych dniach w chwili wschodu słońca coraz wyżej na niebie. Więc słońce wschodzi coraz później, jak gdyby, obracając się wraz z kulą niebieską, posuwało się równocześnie po niebie od zachodu na wschód. Kształt toru słońca po kuli niebieskiej można wyznaczyć w przybliżeniu, znacząc na globusie niebieskim zboczenia i wznoszenia proste słońca, mierzone lunetą n. p. co dni dziesięć w czasie górowania. Otrzymany w ten sposób tor roczny słońca *EE'* (ryc. 253), **ekliptyką** zwany, jest kołem wielkiem, przecinającem równik w dwu punktach, nazwanych **równonocnym wiosennym**

i jesiennym, bo gdy słońce jest w tych punktach, na całej ziemi dzień równy nocy. Największe zboczenie słońca wynosi $23^1/_2{}^0$ Jest to kąt nachylenia płaszczyzny ekliptyki do płaszczyzny równika. Nachylenie osi świata do płaszczyzny ekliptyki wynosi zatem $66^1/_2{}^0$ Prostopadła w środku płaszczyzny ekliptyki nazywa się **osią ekliptyki.** Punkty największego zboczenia *E*, *E'*, w pobliżu których zboczenie zmienia się w ciągu kilku dni bardzo nieznacznie, nazywają się **punktami przesilenia letniego i zimowego dnia z nocą** (solstitia). Słońce jest pół roku nad, a pół roku pod równikiem niebieskim Równoleżniki niebieskie, przechodzące przez solstitia, a więc od równika oddalone o $23^1/_2{}^0$, nazywają się **zwrotnikami** (raka i koziorożca), bo słońce, doszedłszy do tych punktów, znowu ku równikowi zawraca.



Ryc. 253.

Koła **biegunowe** są to równoleżniki, przechodzące przez bieguny ekliptyki (końce jej osi) *β*, *β'* Koła wielkie, przechodzące przez oś ekliptyki, nazywają się **kołami szerokości.** Pas nieba po obu stronach ekliptyki nosi od najdawniejszych czasów nazwę **zodjaku** lub **pasa zwierzyńcowego** od gwiazdozbiorów tu znajdujących się

Baran, Byk, Bliźnięta	wiosenne.		północne.
Rak, Lew, Panna	letnie		
Waga, Niedźwiadek, Strzelec	jesienne		południowe.
Koziorożec, Wodnik, Ryby	zimowe		

Pas ten dzieli się na 12 części czyli **znaków**, obejmujących po 30^0, które liczą się od punktu równonocnego wiosennego. Dnia 21 marca słońce jest w znaku Barana, 23. września w znaku Wagi, 21 czerwca w znaku Raka, 21 grudnia w znaku Koziorożca.

Dla spamiętania tych znaków umieścił ksiądz Bystrzonowski T J w swojej „Informacji matematycznej“, wydanej w 1738 r., następujący czterowiersz

Baran idzie przed bykiem, po bliźniętach raki,
Lew przed panną uchodzi, to są letnie znaki.
Waga chłodzi z niedźwiadkiem, strzelec zimnem grozi,
Koziorożec lód wiąże, wodnik ryby mrozi.

2. **Spółrzędne ekliptyki.** Łuk od ekliptyki do gwiazdy, liczony na kole, przechodzącem przez gwiazdę i oś ekliptyki, nazywa się **szerokością gwiazdy**, a łuk ekliptyki od punktu równonocnego wiosennego do koła szerokości **długością gwiazdy**

3. **Cechy ruchu słońca.** a) Przyrosty **długości** słońca nie są proporcjonalne do odpowiednich czasów, więc ruch słońca po ekliptyce nie jest jednostajny Od stycznia do końca czerwca prędkość maleje, potem znowu wzrasta.

b) Pozorna średnica słońca (kąt widzenia) zmienia się w ciągu roku największa (32'3") jest w styczniu, najmniejsza (31'3") w lipcu. Ponieważ pozorna średnica jest do odległości słońca od ziemi odwrotnie proporcjonalna, więc odległość słońca od ziemi jest zmienna, a zatem ekliptyka nie jest kołem, lecz elipsą, różniącą się nieznacznie od koła.

4. **Budowa słońca.** Słońce jest rozżarzoną kulą, otoczoną atmosferą, złożoną z par różnych pierwiastków (§ II 33, 4), tak zwaną f o t o s f e r ą. Podczas całkowitego zaćmienia słońca brzeg zaciemnionej tarczy otoczony jest świecącym różowym kręgiem, c h r o m o s f e r ą, z pod której wyskakują w różnych punktach różowe płomienie najrozmaitszych kształtów, tak zwane p r o t u b e r a n c j e. Spektroskop wykazał, że chromosfera i protuberancje składają się przeważnie z rozżarzonego wodoru. Protuberancje są to olbrzymie wybuchy wodoru, sięgające do wysokości 20, a nawet 50 tysięcy mil. Prócz tego pojawia się podczas całkowitego zaćmienia naokoło czarnej tarczy pierścień łagodnego, srebrzystego blasku, o nieregularnych zarysach na podbieństwo aureoli, zwany **koroną**. Istoty korony dotychczas dostatecznie nie wyjaśniono.

Na tarczy słonecznej widzimy przez lunetę ciemniejsze miejsca, tak zwane plamy Istota plam nie jest dostatecznie wytłómaczona. Kirchhoff uważa je za chmury, t. j. zgęszczenia, powstające w fotosferze z powodu miejscowego oziębienia.

5. **Obrót słońca około osi.** Przypatrując się tej samej plamie, znajdującej się na brzegu tarczy, przez dłuższy czas, dostrzegamy, że ona przebiega tarczę słoneczną od wschodu na zachód w ciągu około 13 dni. Stąd wnioskujemy, że słońce obraca się około osi i że czas obrotu wynosi około 26 dni.

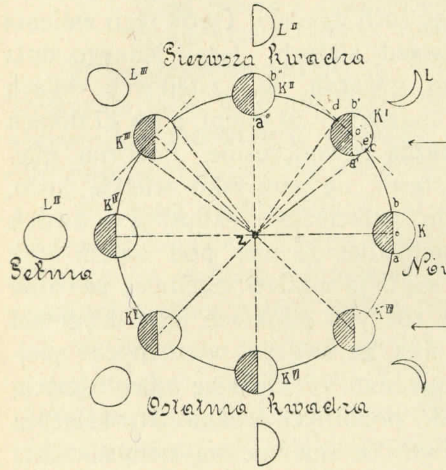
§ 77 Księżyc.

1 **Ruch księżyca.** Księżyc wschodzi i zachodzi podobnie jak gwiazdy i słońce, ma więc ruch dzienny Obok tego zmienia szybko położenie wobec gwiazd stałych. Jeżeli jednego dnia góruje równocześnie z pewną gwiazdą, w następnych dniach górowanie jego opóźnia się codzień o 50 minut, a po 27 dniach góruje znowu z tą samą gwiazdą równocześnie. Pozorna miesięczna droga księżyca przedstawia się nam jako wielkie koło, leżące w pasie zwierzyńcowym, przecinające ekliptykę w dwóch punktach t. zw **węzłach** i nachylone do niej pod kątem 5°8'. Linja, łącząca węzły, nazywa się **linją węzłów**. Średnica pozorna tarczy księżyca zmienia się w różnych punktach jego drogi od 29'22" do 33'31" Z tego wynika, że księżyc w różnych miejscach swej orbity, w różnych od ziemi znajduje się odległościach, odwrotnie proporcjonalnych do pozornych średnic. Tor księżyca jest elipsą, w której jednem ognisku znajduje się ziemia.

2 **Fazy księżyca.** Księżyc widzimy w różnych postaciach. Po nocach ciemnych, w których księżyca nie widać, pokazuje się on na niebie w postaci wąskiego sierpa, zwróconego wypukłością ku słońcu właśnie zachodzącemu. W miarę tego, jak opóźnia się jego górowanie, sierp wzrasta, a gdy góruje około godziny 6-tej po południu, widzimy księżyc w kształcie półkola oświetlonego (**pierwsza kwadra**). Gdy księżyc góruje o północy, ma postać pełnej tarczy (**pełnia**). Później staje się niewidoczną część zachodnia. Na końcu trzeciego tygodnia księżyc wschodzi późno w nocy i tylko wschodnia połowa jest oświetlona (**ostatnia kwadra**). Następnie przybiera księżyc znowu postać sierpa rogami ku zachodowi zwróconego i wschodzi dopiero nad ranem, a wreszcie kiedy góruje wraz ze słońcem, znika z oczu zupełnie (**nów**). Odległość kątowa księżyca i słońca wynosi podczas pełni 180°, (**przeciwległość, oppozycja**), podczas nowiu 0°, (**złączenie, konjunkcja**), podczas pierwszej i ostatniej kwadry 90°, (**kwadratura**).

Położenia te są podobne do położeń końców skazówek zegara o 6-tej, 12-tej, 3-ciej i 9-tej godzinie.

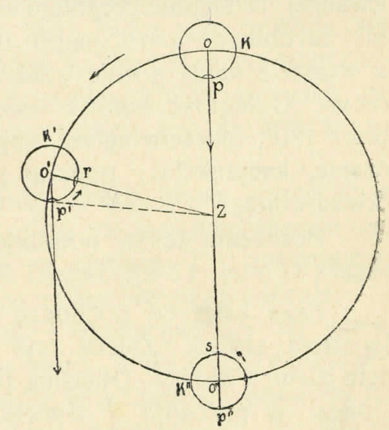
Fazy księżyca pochodzą stąd, że księżyc świeci odbitem światłem słońca. Zależą one zatem od jego położenia względem ziemi i słońca. Objaśnia je ryc. 254, S, S' są promieniami słońca. W położniu K oświetlona jest promieniami słońca połowa księżyca, odwrócona od ziemi, w K^I zwrócona jest do ziemi połowa, zawarta między promieniami widzenia Zc, Zd, więc widzimy z oświetlonej połowy tylko część $a'c$, w K^{IV} widzimy całą oświetloną połowę; w K^{V} tylko część i t. d.


Ryc. 254.

3. **Budowa księżyca.** Z powodu względnej bliskości księżyca dostrzegamy na nim szczegóły, jakich na innych ciałach dostrzec nie można. Nieuzbrojonem nawet okiem dostrzegamy, że tarcza księżyca zasiana jest ciemniejszemi plamami. Przez lunetę astronomiczną można widzieć, że księżyc jest pokryty mnóstwem gór, przeważnie pierścieniowych, których wysokość w porównaniu z promieniem księżyca jest znaczniejsza od gór ziemskich.

Ponieważ bezpośrednio przed schowaniem się jakiejś gwiazdy poza tarczę księżyca, blask jej nie słabnie, ani gwiazda nie zmienia położenia wskutek refrakcji, wnosimy, że księżyc nie ma atmosfery, a zatem nie ma i wody, z którejby mogła powstać atmosfera.

4. **Obrót księżyca około osi.** Góry na księżycu pozostają w ciągu drogi księżyca prawie niezmiennie w tych samych punktach tarczy (Ryc. 255). Mogłoby się więc wydawać, że księżyc nie ma ruchu wirowego. Gdyby jednakże tak było, widzielibyśmy plamę p, po obiegu księżyca z położenia K w położenie K', w punkcie p', a tym czasem widzimy ją w punkcie r. Plama obróciła się więc o kąt $p'o'z = o'zo$, zatem księżyc wiruje raz około osi w czasie, w którym obiega całą swą drogę. Z tego powodu widzimy zawsze tylko jedną połowę księżyca.


Ryc. 255.

Dzień i noc na księżycu trwają naprzemian przez blisko 15 naszych dni. Noc księżycową oświetla światło odbite od ziemi. Dlatego po nowiu widzimy prócz sierpa resztę tarczy, oświetloną łagodnem, t. zw. popielatem światłem. Różnice temperatury obu półkul, oświetlonej i nieoświetlonej, muszą być bardzo znaczne.

5. **Miesiąc gwiazdowy i synodyczny.** Okres ruchu księżyca po jego orbicie, **miesiąc gwiazdowy** $= 27^d\ 7^h\ 43^m\ 11^s$. Ponieważ słońce porusza się w pasie zwierzyńcowym, księżyc wraca do słońca dopiero po $29^d\ 12^h\ 44^m\ 2{,}9^s$. Okres ten od nowiu do nowiu nazywa się **miesiącem synodycznym.**

Podobnie skazówki zegarka, nakrywające się o godz. 12-ej, nakrywają się powtórnie o $1^h\ 5^1/_{11}{}^m$, więc dopiero po upływie $65^1/_{11}{}^m$.

§ 78. Ziemia.

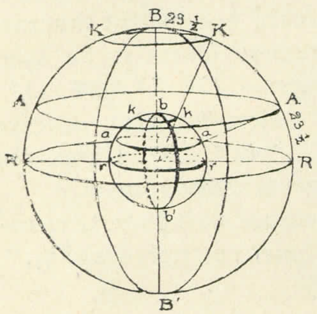
1. **Prawdziwy kształt ziemi.** a) Na ziemi nie widzimy nigdzie krańca, ani łączności z innemi ciałami niebieskiemi. Stąd wnosimy, że ziemia jest bryłą w przestworzu odosobnioną.

b) Widnokrąg jest zawsze ograniczony, bo nawet przez najsilniejsze lunety nie widzimy na morzu zbyt odległych wysp. Przy zbliżaniu się do wysokich przedmiotów widzimy najpierw najwyższe ich części, a gdy się oddalamy, znikają najpierw najniższe, **powierzchnia ziemi jest więc wypukła.** Gdy posuwamy się na południe, znikają dla oka gwiazdy, leżące nad północną częścią poziomu, a nad południową częścią poziomu nowe się pokazują. W miejscach dalej na wschód położonych gwiazdy wcześniej wschodzą. Ziemia jest więc zakrzywiona w kierunku **ku południowi i północy, oraz ku wschodowi i zachodowi.**

c) Wysokość bieguna wzrasta lub maleje jednostajnie w miarę, jak posuwamy się na północ lub na południe. Wschód gwiazd opóźnia się jednostajnie, gdy posuwamy się od wschodu na zachód. Ziemia jest zatem od północy ku południowi i od zachodu ku wschodowi **jednostajnie** zakrzywiona. Własność tę ma tylko kula.

d) Widnokrąg rozszerza się w miarę wznoszenia się oka nad poziom w takim stopniu, a szczyty wysokich gór ukazują się płynącym okrętom z takiej odległości, jak tego żąda rachunek dla kuli. **Ziemia ma więc kształt kuli.** Poziom **fizyczny (pozorny)**, jest zatem płaszczyzną styczną w danym punkcie ziemi. Płaszczyznę, przesuniętą równolegle do poziomu fizycznego przez środek ziemi, nazywamy **poziomem prawdziwym (astronomicznym).** Wobec niezmiernej odległości gwiazd stałych, promień ziemi jest znikająco mały. Pomiary na kuli niebieskiej, odniesione do poziomu pozornego, dają przeto takie same wyniki, jakgdyby były odniesione do poziomu prawdziwego.

2. Wyznaczenie położenia na powierzchni ziemi. Położenie na ziemi wyznacza się podobnie, jak na niebie, zapomocą spółrzędnych równikowych. Punkty przebicia kuli ziemskiej przez prostą, idącą przez środek ziemi równolegle do osi świata, nazywają się **biegunami** *B*, *B'* (ryc. 256), przecięcie ziemi płaszczyzną równika niebieskiego *RR*, **równikiem ziemskim** *rr*, koła, według których przecinają ziemię koła godzinowe, **południkami**, koła na ziemi równoległe do równika, **równoleżnikami geograficznemi.**

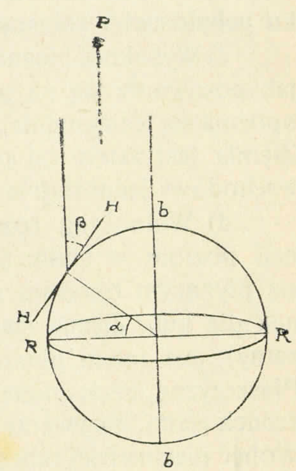

Ryc. 256.

Kołom biegunowym i zwrotnikom niebieskim odpowiadają koła podbiegunowe i zwrotniki ziemskie. Pierwsze są od biegunów ziemi, drugie od równika oddalone o $23^1/_2{}^0$ Łuk południka od pewnego punktu do równika zowiemy **szerokością geograficzną (północną, południową)**, a łuk równika mierzony od południka, przez dany punkt przechodzącego, do południka, uważanego za zerowy (Ferro, Greenwich [czytaj: Grynicz], Paryż), zowiemy **długością wschodnią lub zachodnią.**

3. Wyznaczenie szerokości i długości geograficznej. Szerokość geograficzna α danej miejscowości, równa się wysokości biegunowej β (ryc. 257).

Ponieważ biegun świata jest w nieskończonej od ziemi odległości, przeto prostą, prowadzoną od oka do bieguna (ryc. 257), można uważać za równoległą do osi świata.

Stąd łatwy sposób do wyznaczenia szerokości geograficznej. W przybliżeniu równa się ona wzniesieniu gwiazdy polarnej nad poziom. Dokładnie wyznacza się β, a więc i α, sposobem podanym w II § 73, 2.


Ryc. 257.

Długość geograficzną wskazuje różnica czasów miejscowych. Od chwili górowania pewnej gwiazdy w miejscu *A*, do chwili górowania w miejscu *B* upływa

taka część 24 godzin, jaką częścią 360^0 jest łuk zawarty między południkami tych miejsc. Porównanie czasów miejscowych można wykonać:

a) przez przeniesienie bardzo dokładnego chronometru, wskazującego czas miejsca *A*, do miejsca *B* i porównanie z zegarem w miejscu *B*;

b) notując według czasu miejscowego chwilę zjawiska, widzialnego równocześnie w obu miejscowościach, n. p. początek zaćmienia księżyca, zakrycie (okultację) gwiazdy,

c) telegraficznie.

Na morzu wyznacza się długość geograficzną przez porównanie czasu miejscowego, wyznaczonego sposobem astronomicznym, z zegarem idącym według pewnego południka.

4. Pomiar ziemi. Z pomierzonej odległości *D* dwu miejsc, leżących na tym samym południku i z różnicy ich szerokości geograficznych $\alpha - \alpha'$ można obliczyć wielkość jednego stopnia południka promień ziemi. (Jak?). Stopnie południka większe są w bliskości biegunów, więc południki ziemskie są krzywemi, zbliżonemi do elipsy Ziemia zatem jest na biegunach spłaszczona. Południki jej są elipsami, równoleżniki jednak kołami. Zatem ziemia nie jest dokładną kulą, lecz ma kształt zbliżony do elipsoidy obrotowej, zwany geoidą.

Promień równika $a = 6378\ km = 859{,}4$ mil geograficznych,
Połowa osi ziemskiej $b = 6356{,}8\ km = 856{,}7$ mil geograficznych.
Spłaszczenie, t. j. iloraz różnicy osi wielkiej i małej przez wielką $\frac{a-b}{a} = {}^1/_{300}$, 1^0 równika $= 111{,}3\ km = 15$ mil geograficznych.

§ 79. Układ świata.

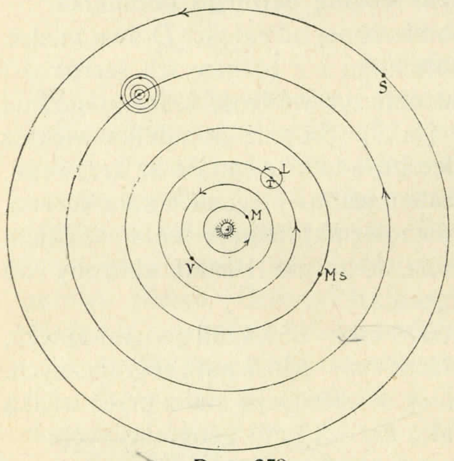
Almagest

A) Układ Ptolemeusza (geocentryczny). Ziemia jest środkiem, około którego krążą słońce, księżyc i gwiazdy poruszające się po kołach w równej od ziemi odległości, a niebo jest kulą kryształową, która wraz z rozsianemi na niej gwiazdami stałemi w ciągu doby raz naokoło ziemi się obraca. Porządek ciał niebieskich co do odległości jest następujący Księżyc, Merkury, Wenus, Słońce, Mars, Jowisz, Saturn, Sfera gwiazd. Ruch niejednostajny pochodzi stąd, że ziemia nie znajduje się w środku kół przez gwiazdy ruchome obieganych, a zawiłe ich drogi tem się tłómaczą, że planeta obiega koło (epicykl), którego środek krąży po drugiem kole (koło deferencyjne). Układ ten, opisany przez Ptolemeusza w dziele Almagest, streszczający wyobrażenia starożytności, przetrwał do połowy XVI w

B) **Układ Kopernika** (heljocentryczny). W dziele **De revolutionibus orbium caelestium, 1543, Mikołaj Kopernik** (ur 1473, † 1543) wyłożył układ świata, zmieniający z gruntu dotychczasowe zapatrywania. Najgłówniejsze zasady tego układu są następujące

1) Obrót ziemi około osi od zachodu na wschód wywołuje złudzenie obrotu kuli niebieskiej od wschodu na zachód.

2) Słońce jest środkiem układu, naokoło którego krążą planety po kołach od zachodu na wschód. Ziemia jest jedną z planet. Pozorne nieprawidłowości ruchu planet pochodzą stąd, że widzimy je z obracającej się ziemi.



Ryc. 258.

Porządek planet co do odległości jest w tym układzie następujący Merkury, Wenus, Ziemia z okrążającym ją księżycem, Mars, Jowisz, Saturn i później odkryte Uranus i Neptun. Merkury i Wenus, które krążą między ziemią a słońcem, są to dolne (wewnętrzne), inne górne (zewnętrzne) planety (ryc. 258).

C) **Dowody obrotu ziemi naokoło osi.**

1) Przeciw krążeniu ciał niebieskich naokoło ziemi przemawiają a) Wielkość słońca i niektórych planet w porównaniu z ziemią. b) Odległość gwiazd stałych od ziemi jest niezmierna, a bardzo rozmaita. Musiałyby więc gwiazdy poruszać się w ciągu doby z prędkością olbrzymią i dokładnie proporcjonalną do odległości. Słońce musiałoby w ciągu doby opisywać koło o promieniu równającym się 150 miljonom, a najbliższe gwiazdy 30 biljonom *km*.

2) Wirowania ziemi dowodzą a) Skręcanie się wiatrów, t. j. passaty i cyklony b) Spłaszczenie ziemi na biegunach wskutek siły odśrodkowej. c) Zbaczanie na wschód ciał, spadających ze znacznej wysokości.

(Przeciwnicy Kopernika sądzili, że gdyby ziemia od zachodu na wschód wirowała, musiałyby ciała, spadające ze znacznej wysokości, zbaczać na zachód).

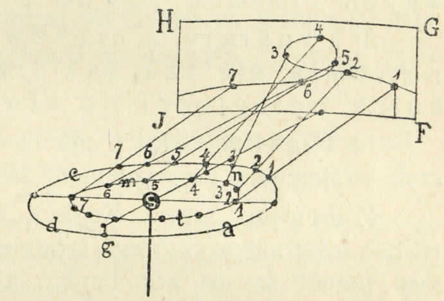
d) Doświadczenie z wahadłem Foucaulta. e) Przyrost siły ciężkości i długości wahadła sekundowego, gdy postępujemy od równika ku biegunom. f) Wszystkie inne planety wirują naokoło osi.

Oś świata jest więc przedłużoną osią ziemską, dzień gwiazdowy czasem obrotu ziemi naokoło osi.

D) **Dowodami ruchu ziemi naokoło słońca są**

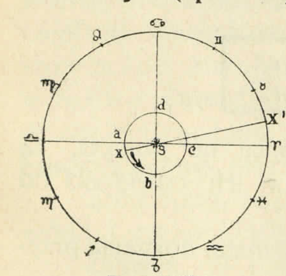
a) Roczna paralaksa gwiazd stałych (II § 80, 2). b) Aberacja światła (II § 80, 3). c) Nadto przemawia na korzyść tego zapatrywania łatwość wytłumaczenia zawiłego ruchu planet.

Następującym modelem (ryc. 259) można rzecz uzmysłowić. Dwa koła z drutu nie leżące na jednej płaszczyźnie, wyobrażają wewnętrzne, tor ziemi, zewnętrzne, tor planety Gdy jednakowemi cyframi oznaczone położenia po łączymy drutami, linja, łącząca punkty, w których druty przebijają płaszcz walca *HG*, przedstawiającego tło nieba, utworzy pętlicę podobną, jak pozorne tory planet.



Ryc. 259.

Ekliptyka jest więc drogą ziemi naokoło słońca. Prawa ruchu ziemi są te same, co i prawa pozornego ruchu słońca. Punkt ekliptyki najbliższy słońca (w styczniu jest punktem **przysłonecznym (perihelium)**, punkt najodleglejszy (w lipcu) **odsłonecznym (aphelium)**.



Ryc. 260.

Na ryc. 260 *s* wyobraża słońce, *abcd* drogę ziemi, a koło zewnętrzne wielkie koło na niebie. Gdy ziemia jest 21 marca w *a*, widzimy słońce na tle nieba w znaku Barana. Gdy ziemia jest w *x*, *b*, *c*, *d*, widzimy słońce na tle nieba w *x'*, w znaku Raka, Wagi, Koziorożca, mamy więc wrażenie, jak gdyby się w tym kierunku po niebie poruszało.

Niezupełną zgodność teorji Kopernika z wynikami spostrzeżeń usunął Jan Kepler ogłoszeniem trzech sławnych, imię jego noszących praw, w dziele „Astronomia nova, sive de motibus Stellae Martis 1609"

Uwieńczeniem dzieła Kopernika i Keplera jest prawo powszechnej grawitacji Newtona (1687), podające fizyczną przyczynę tych ruchów

Jak planety około słońca, krążą około planet, jako ciał centralnych, księżyce po eliptycznych orbitach od zachodu na wschód. Tylko księżyce Uranusa i Neptuna mają ruch wsteczny

E) **Prawa Keplera**[1]. Kepler wykrył (w r 1609) następujące prawa, opierając się na spostrzeżeniach astronomicznych:

1) Planety krążą po elipsach około słońca, które się w jednem z ich ognisk znajduje,

2) promienie wodzące planet opisują w równych czasach równe pola,

3) kwadraty z czasów obiegu dwóch planet mają się tak, jak trzecie potęgi ich średnich odległości od słońca.

F) **Grawitacja.** Ruch planet uzasadnił Newton grawitacją, czyli wzajemnem przyciąganiem się ciał.

Z drugiego prawa Keplera wynika, że ruch planet jest ruchem centralnym, którego środkiem jest słońce. A że eliptyczne tory planet są do kół bardzo zbliżone, więc przyśpieszenie dośrodkowe $a = \frac{4\pi^2 r}{T^2}$ (I § 27,5). Wzdłuż prostej, łączącej planetę ze słońcem, musi działać siła przyciągająca, która zmusza planetę do krążenia około słońca. Siły odśrodkowe, sprawiające przyśpieszenie a_1, a_2 dwóch planet, o masach m_1, m_2 są

$$P_1 = \frac{4m_1 r_1 \pi^2}{T_1{}^2},\ P_2 = \frac{4m_2 r_2 \pi^2}{T_2{}^2};\ \text{z czego wynika: } \frac{P_1}{P_2} = \frac{m_1 r_1 T_2{}^2}{m_2 r_2 T_1{}^2}.$$

A że według trzeciego prawa Keplera

$$\boxed{\frac{T_2{}^2}{T_1{}^2} = \frac{r_2^3}{r_1{}^3},\ \text{zatem}\ \frac{P_1}{P_2} = \frac{m_1 r_2{}^2}{m_2 r_1{}^2}}$$

to znaczy, że siły, wywierane przez słońce na planety, są do mas planet wprost, a do kwadratów ich odległości od słońca odwrotnie proporcjonalne.

Według trzeciej zasady dynamicznej planeta, doznając przy-

[1]) Jan Kepler ur 1571, profesor matematyki w Gracu, później pomocnik Tychona Brahe, astronoma, następnie astronom nadworny w Pradze, zasłużony badacz na polu fizyki i astronomji.

ciągania od słońca, musi nawzajem przyciągać słońce. Przyciąganie to będzie proporcjonale do masy M słońca. Stąd wypływa, że siła grawitacji $P = k\frac{Mm}{r^2}$.

Przyciąganie się dwóch ciał jest w prostym stosunku do iloczynu ich mas, a w odwrotnym stosunku do kwadratu odległości tych ciał. **(Prawo Newtona).**

Z obiegu księżyca wywnioskował Newton, że siła ciężkości jest tylko szczególnym przypadkiem powszechnej grawitacji. Księżyc odbywa ruch pod wpływem przyciągania ziemi z przyśpieszeniem dośrodkowem $\frac{4\pi^2 d}{T^2}$, gdzie d oznacza odległość księżyca od środka ziemi. Gdyby księżyc był tuż przy powierzchni ziemi, miałby przyśpieszenie g.

W odległości d, wynoszącej 60 ziemskich promieni, przyśpieszenie według prawa grawitacji ma wartość $\frac{g}{60^2}$, więc $\frac{g}{60^2} = \frac{4\pi^2\ 60\ r}{T^2}$.

A że $T = 27^d\ 7^g\ 43^m = 39343 \times 60$ *sek*, a obwód ziemi $= 4.10^9$ *cm*, więc $g = \frac{4\pi^2\ 4\ 10^9\ 60^3}{(39343\ 60)^2} = 984\ cm\ sek^{-2}$

Zgodność tej wartości z wartością przyśpieszenia ziemskiego wskazuje, że ta sama siła, która sprawia spadanie ciał na ziemi, rządzi także ruchami ciał niebieskich.

Ruch ten powstał w ten sposób, że planety, odrzucone od centralnej masy słońca w kierunku stycznej, krążą naokoło niego wskutek grawitacji.

Prawo grawitacji jest podwaliną mechaniki nieba.

Że także przedmioty ziemskie przyciągają się nawzajem według prawa powszechnej grawitacji, stwierdzono to doświadczeniami. **Maskylene** (1772) wyznaczył zboczenie obciążonego sznurka od kierunku pionowego pod wpływem pasma gór w Szkocji. **Cavendish** wykazał, że wahadło poziome zbacza pod działaniem zgodnem dwóch kul metalowych, a **Jolly** stwierdził zapomocą wagi przyciąganie małej kuli przez wielką.

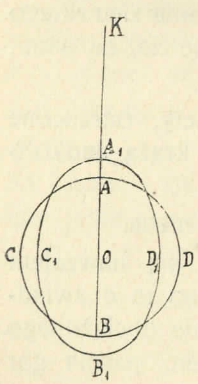
Zmierzono, że dwie masy po 1 *gr*, umieszczone w odległości 1 *cm*, przyciągają się siłą 6,68 10^{-8} *dyny*. (I § 34 Zad. 7).

Zadanie. W doświadczeniu Jollyego wywiera kula ołowiana o ciężarze właśc. 11·2, promieniu 50 *cm*, na kulę o masie 5010 *gr*, przy odległości środków 57 *cm*, przyciąganie 0,0006 *g*. Obliczyć stałą grawitacji *k*.

G) **Odkrycie Neptuna.** Ponieważ planety także nawzajem się przyciągają, objawiają się w ich ruchu pewne nieprawidłowości, t. zw **zwichnięcia** (perturbacje). Są one nieznaczne, bo masa słońca jest prawie 700 razy większa od sumy mas wszystkich planet; działanie słońca zatem przewyższa znacznie wzajemne oddziaływanie planet.

Ostatnia przed odkryciem Neptuna znana planeta, Uranus, zbaczała z drogi, rachunkiem wskazanej, mimo uwzględnienia znanego wpływu innych planet. Nasuwała się myśl, że ta niezgodność jest wynikiem wpływu nieznanego ciała. Leverrier i Adams wyznaczyli prawie równocześnie w r 1846 rachunkiem położenie tego ciała, a Leverrier ogłosił, gdzie nieznanej planety w pewnej chwili szukać należy Galle w Berlinie pierwszy zobaczył Neptuna w r 1847 Odkrycie to jest jednym z największych tryumfów mechaniki niebieskiej.

H) **Przypływ i odpływ morza** jest skutkiem nierównego przyciągania różnych punktów ziemi przez słońce i księżyc, a głównie przez księżyc. Punkt A (ryc. 261) doznaje najsilniejszego, punkt B najsłabszego przyciągania, więc punkt A musi się więcej, a B mniej zbliżyć do księżyca, niż punkt O. W A i B powstanie wzniesienie morza A_1, B_1 czyli p r z y p ł y w, przy C, D morze opada i powstaje o d p ł y w C_1, D_1



Ryc. 261.

Przypływ następuje w pewnym czasie po górowaniu lub dołowaniu księżyca. Czas, upływający między górowaniem a przypływem, tak zwany c z a s p o r t o w y, jest inny dla każdej miejscowości.

Wskutek wirowania ziemi fale przypływu A_1, B_1 postępują od wschodu na zachód za księżycem, więc w odstępach sześciu godzin następują po sobie przypływ i odpływ

W ten sam sposób działa także słońce, lecz z powodu wielkiej jego odległości od ziemi prawie dwa razy słabiej. Działania słońca i księżyca sumują się w czasie nowiu i pełni, dlatego przypływ jest w tym czasie największy W czasie kwadr w miejsce przypływu, wywołanego przez księżyc, słońce powoduje odpływ, więc przypływ jest w tej porze najmniejszy

§ 80. System słoneczny

1 Słońce i okrążające je ciała niebieskie stanowią całość, zwaną systemem słonecznym. Należy do niego 8 planet, 24 księżyce, ponad 600 planetoid, liczne komety trwałe lub czasowe i kilka rojów meteorytów

Księżyce planet widzialne są tylko przez lunety Planetoidy są to małe ciała niebieskie, okrążające słońce między Marsem a Jowiszem. Powierzchnia niektórych planetoid wynosi ledwie 2800 km^2

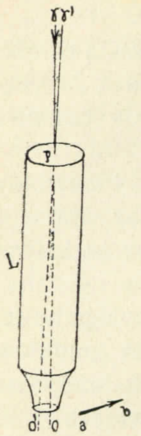
2. Wyznaczenie odległości ciał niebieskich polega na tej samej zasadzie, jak pomiar odległości niedostępnych punktów na ziemi. Ciało niebieskie, widziane z dwu różnych miejsc na ziemi, pojawia się na tle nieba w dwu różnych położeniach. Kąt, zawarty między promieniami widzenia, nazywa się p a r a l a k s ą c i a ł a n i e b i e s k i e g o.

Paralaksa dzienna jest to kąt, pod którym widzielibyśmy z gwiazdy promień ziemi. Ze znanej podstawy pomiaru (wymierzonej odległości dwu punktów, leżących na tym samym południku) i paralaksy oblicza się odległość ciała niebieskiego od ziemi, a z odległości i średnicy pozornej, średnicę prawdziwą. Przy niezmiennej podstawie pomiaru paralaksa maleje, gdy odległość ciała rośnie, a przy niezmiennej odległości rośnie z podstawą. Dla ciał bardzo odległych nie mamy na ziemi dostatecznie wielkiej podstawy. Już do wyznaczenia odległości słońca metoda ta jest bardzo niedokładna, a gwiazdy stałe nie mają wcale paralaksy dziennej, bo promienie widzenia gwiazdy z dwu punktów ziemi nie ukazują różnicy w kierunkach. Dlatego usiłowano wyznaczyć **paralaksę roczną** gwiazd stałych, biorąc za podstawę odległość dwu przeciwległych punktów toru ziemi. Lecz i paralaksę roczną udało się wyznaczyć tylko dla około stu najbliższych gwiazd. Paralaksa dzienna słońca wynosi 8,80" Największą paralaksę roczną z gwiazd stałych mianowicie 0,8" ma gwiazda α Centauri.

Paralaksa roczna 1" oznacza odległość większą niż 30 biljonów *km.* Ponieważ paralaksy 1" nie znaleziono dotychczas w żadnej gwieździe, więc najbliższe gwiazdy stałe są od nas dalej, niż 30 biljonów *km.*

Do mierzenia tak wielkich odległości przyjęto za jednostkę **rok świetlny**, t. j. odległość, którą światło przebywa w roku.

Odległość α Centauri wynosi $4^1/_2$, Syrjusza 17 lat świetlnych.



Ryc. 262.

3. Aberacja światła. Bradley, usiłując (1727) wyznaczyć paralaksę roczną gwiazd stałych, odkrył aberację światła. Promień światła, padający z gwiazdy γ na objektyw lunety, nie dochodzi do oka w kierunku γ *po*, lecz w kierunku *po*' Widzimy więc gwiazdę w punkcie γ' (ryc. 262). Z powodu tego zboczenia światła (aberacji) opisują gwiazdy w ciągu roku pozornie elipsy o jednakowej osi wielkiej = 20,2", tem więcej spłaszczone, im bliżej płaszczyzny ekliptyki gwiazda leży

Paralaksa roczna gwiazd i aberacja światła są przekonywującemi dowodami teorji Kopernika. Zarzucono Kopernikowi, że gdyby ziemia naokoło słońca krążyła, gwiazdy byłyby w coraz innych miejscach.

4. Najważniejsze liczby, odnoszące się do systemu słonecznego, podaje następująca tablica:

	Średnia odległość od słońca w miljonach *km*.	Czas obiegu około słońca	Objętość w porównaniu z ziemią	Liczba księżyców
Słońce	—	—	1301200	—
Merkury	57	88 dni	0,05	—
Wenus	108	225 dni	0,84	—
Ziemia	150	365,3 dni	1	1
Mars . .	328	687 dni	0,15	2
Planetoidy .		—		—
Jowisz	780	12 lat	1357	7
Saturn .	1420	29 lat	738	10
Uranus	2860	84 lat	102	4
Neptun .	4500	165 lat	82	1

Ponieważ odległość od ziemi ciał niebieskich słońca, planet i gwiazd stałych — jest bardzo rozmaita, więc kulistość sklepienia niebieskiego jest tylko złudzeniem.

Odległość księżyca ziemi od niej wynosi 384000 *km* czyli 60,3 ziemskich promieni, jego średnica 3482 *km*, objętość w porównaniu z ziemią $^1/_{50}$, a masa $^1/_{80}$.

Około Saturna krąży, oprócz 10 księżyców, układ kilku spółśrodkowych pierścieni.

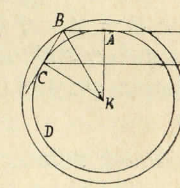
5. Ruch systemu słonecznego. Gwiazdy gwiazdozbioru Herkulesa oddalają się pozornie od siebie, a gwiazdy na przeciwnej stronie nieba zbliżają się. Stąd wnioskujemy, że cały system słoneczny porusza się ku konstelacji Herkulesa.

§ 81. Zjawiska z powodu obrotu ziemi około osi.

1. Dzień i noc. Promienie słońca, oświetlające ziemię, uważamy za równoległe. Oświetlają one jedną połowę ziemi, a druga znajduje się w cieniu. Gdy pewien punkt ziemi wskutek jej obrotu wynurza się z cienia i wsuwa się wschodnią stroną swego horyzontu pod promienie słońca, wtedy słońce wschodzi.

Promienie słońca są najpierw do horyzontu równoległe, potem kąt nachylenia promieni do horyzontu rośnie stopniowo, wskutek czego wydaje się nam, że słońce się wznosi. Chwilą górowania słońca jest południe. Odtąd nachylenie promieni słońca do horyzontu maleje, a przy zachodzie słońca staje się zerem. Gdy punkt ziemski porusza się w świetle słonecznem, wtedy ma dzień, gdy jest w cieniu, wtedy ma noc.

2. Zmrok i świt. Po zachodzie słońca nie gaśnie światło odrazu, lecz stopniowo, bo warstwy górne atmosfery odbijają promienie, idące z pod poziomu (ryc. 263) (zmrok). W ten sam sposób powstaje także brzask ranny (świt).



Ryc. 263.

Zmrok panuje na łuku *AC*, którego długość zależy od wysokości atmosfery, a kończy się, gdy słońce zniży się pod poziom o 18°, t. j. gdy kąt *BCS'* = 18° Najkrótszy jest zmrok na równiku (prawie godzina), w naszych stronach w czasie porównania 2 godziny, na biegunie około 50 dni. Stąd wypada, że u nas w czerwcu i lipcu właściwie nocy niema, bo zmrok schodzi się ze świtem.

3. Wpływ obrotu ziemi na siłę ciężkości.

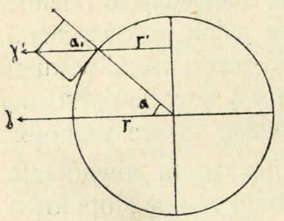
a) Z powodu obrotu ziemi naokoło osi powstaje siła odśrodkowa, która przeciwdziała przyciąganiu ziemi. Na równiku doznaje siła ciężkości pomniejszenia o $\frac{1}{289}$ swej wartości.

Ziemia wykonywa pełny obrót w 24 godzinach czasu gwiazdowego = 86164 *sek*, a obwód równika wynosi 40 076·000 *m*. Podstawiwszy te wartości w równaniu $\gamma = \frac{4\pi^2 r}{T^2}$ (I § 27, 5), otrzymamy γ = 3,39 cm/sek^{-2}, co jest $\frac{1}{289}$ częścią przyśpieszenia

($g = 978{,}1$) na równiku. Przy obrocie ziemi 17 razy szybszym siła odśrodkowa równałaby się sile ciężkości, bo $17^2 = 289$.

b) Przyśpieszenie wskutek ciężkości zwiększa się z szerokością geograficzną. Przyrost ten jest w prostym stosunku do kwadratu wstawy szerokości geograficznej.

Zależność tę przyśpieszenia ciężkości od szerokości geograficznej znajdziemy, gdy uwzględnimy 1) że przyśpieszenia odśrodkowe na równiku i w szerokości geograficznej α są w stosunku $\gamma \;\; \gamma' = r \;\; r\cos\alpha$, czyli $\gamma' = \gamma\cos\alpha$ (ryc. 264), 2) że na równiku przyśpieszenie ciężkości jest pomniejszone całem przyśpieszeniem odśrodkowem, a w szerokości geograficznej α tylko składową



Ryc. 264.

$$\gamma'\cos\alpha = \gamma\cos^2\alpha.$$

Jeżeli G oznacza przyśpieszenie ciężkości, gdyby ziemia była w spoczynku, to rzeczywiste przyśpieszenia na równiku i w szerokości geograficznej α są.

$$g = G \quad \gamma$$
$$g' = G \quad \gamma\cos^2\alpha$$

Odejmując je, otrzymamy

$$g' \quad g = \gamma \quad \gamma\cos^2\alpha = \gamma(1 \quad \cos^2\alpha) = \gamma\sin^2\alpha,$$

zatem $g' = g + \gamma\sin^2\alpha$, t. j. przyrost przyśpieszenia ziemskiego jest w prostym stosunku do kwadratu wstawy szerokości geograficznej.

c) Również spłaszczenie ziemi na biegunach wpływa na przyrost przyśpieszenia.

Spłaszczenie to powstało dlatego, że plastyczna kula ziemska przyjęła wskutek szybkiego obrotu postać zbliżoną do elipsoidy obrotowej.

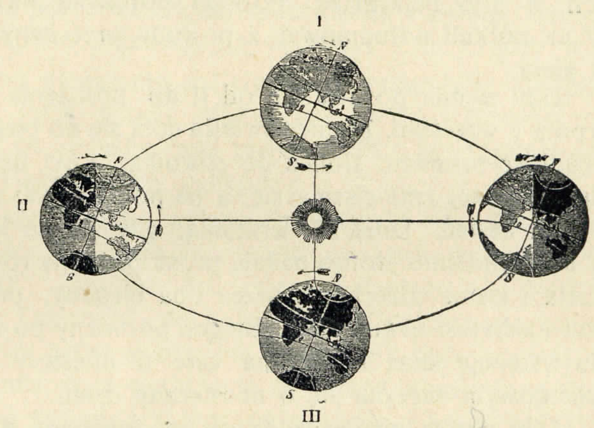
§ 82. Zjawiska polegające na ruchu ziemi około słońca.

1. Pory roku. Zmiany długości dnia i nocy. Z prawd poznanych · 1) że ziemia, obracając się około swej osi, obiega słońce, 2) że oś ziemska nachylona do płaszczyzny ekliptyki pod kątem $66^1/_2{}^0$, 3) że kierunek osi ziemskiej podczas jej obiegu jest niezmienny, wynika, że ziemia w ciągu roku jest coraz inaczej ku słońcu pochylona. Dlatego to samo miejsce ziemi jest w ciągu roku pod różnemi kątami do promieni słonecznych

nachylone, a z tem nachyleniem zmienia się stopień ogrzania ziemi.

Gdyby oś ziemi była prostopadła do płaszczyzny ekliptyki, położenie ziemi względem promieni słońca (pomimo jej obiegu) byłoby zawsze jednakowe; wtedy nie byłoby ani pór roku, ani zmian długości dnia i nocy.

Dla zrozumienia powstawania pór roku należy zważyć (ryc. 265) 1) że słońce ciągle oświetla jedną połowę ziemi, a druga jej połowa pozostaje w cieniu, 2) że granica światła i cienia jest kołem wielkiem kuli ziemskiej i że położenie tego koła jest zmienne, 3) że na miejsca leżące na prostej, łączącej



Ryc. 265.

środek ziemi i słońca, padają promienie prostopadle, a na inne miejsca ziemi z powodu jej wypukłości padają tem ukośniej, im bliżej granicy światła i cienia są te miejsca, 4) że granica światła i cienia jest zawsze o 90^0 oddalona od miejsca, na które promienie słońca prostopadle padają.

I. Wiosna. Dnia 21 marca, gdy ziemia jest w położeniu I, promienie słońca padają prostopadle na równik. Granica światła i cienia przechodzi przez bieguny, połowiąc wszystkie równoleżniki, przeto na całej ziemi dzień jest równy nocy Biegun północny wysuwa się tego dnia z cienia i odtąd słońce nie zachodzi dla niego przez pół roku, a dla bieguna południowego zaczyna się półroczna noc. Na półkuli północnej zaczyna się wiosna, na południowej jesień.

W czasie posuwania się ziemi od położenia I do II w kwietniu, w maju i czerwcu, nachyla się ona biegunem północnym ku słońcu. Granica światła i cienia oddala się od biegunów tak, że coraz większy obszar ziemi dokoła bieguna północnego ma ciągły dzień. Promienie słońca padają na półkulę północną mniej ukośnie, łuki dzienne rosną, a dnia przybywa; na półkuli zaś południowej dzieje się wprost przeciwnie.

II. Lato. Dnia 21. czerwca, gdy ziemia znajduje się w położeniu II, promienie słońca prostopadle padają na zwrotnik Raka, a granica światła i cienia dotyka kół biegunowych. Mieszkańcy zwrotnika Raka widzą słońce w zenicie. Na kole biegunowem północnem słońce tego dnia nie zachodzi, a na południowem nie wschodzi. Na półkuli północnej, n. p. u nas, jest najdłuższy dzień, a noc najkrótsza. Półkula północna ma lato, podczas gdy na półkuli południowej, z powodu przeciwnych warunków, jest zima.

Gdy ziemia posuwa się od II do położenia III, w lipcu, sierpniu i wrześniu, granica światła cofa się do biegunów, a prostopadłość promieni słońca do równika. Łuki dzienne na półkuli północnej zmniejszają się, a na południowej się zwiększają.

III. Jesień. Dnia 23. września, gdy ziemia jest w położeniu III, promienie słońca padają prostopadle na równik. Granica światła i cienia przechodzi przez oba bieguny, przeto na całej ziemi dzień jest równy nocy Biegun północny po 6 miesięcznym dniu wstępuje teraz w cień na całe 6 miesięcy Na biegunie południowym zaczyna się 6 miesięczny dzień.

Gdy ziemia przebiega drogę od położenia III do IV, w październiku, listopadzie i grudniu, granica światła oddala się od biegunów, a prostopadłość promieni słońca zbliża się do zwrotnika Koziorożca. Wtedy na półkuli północnej jest jesień, a na południowej wiosna.

IV. Zima. Dnia 21. grudnia, gdy ziemia jest w położeniu IV, granica światła dotyka znowu kół biegunowych, promienie słońca padają prostopadle na zwrotnik Koziorożca. Pochyłość promieni słońca, padających na półkulę północną, jest najmniejsza z całego roku. Dnie są wtedy najkrótsze, a noce najdłuższe. Na północnem kole biegunowem słońce nie wschodzi, a na południowem nie zachodzi.

W czasie obiegu ziemi od IV do I półkula północna ma zimę, bo ogrzanie ziemi jest nieznaczne z powodu krótkości dnia i ukośnego kierunku promieni słonecznych, na półkuli południowej z powodów wręcz przeciwnych jest lato.

2. Podział ziemi na strefy wynika także z nachylenia osi ziemi do ekliptyki.

I. Strefa gorąca obejmuje pas ziemi, w którym słońce dochodzi do zenitu, jest więc położona pomiędzy oboma zwrotnikami. W tej strefie są właściwie tylko dwie pory roku: pora posuchy i pora deszczowa.

II. Strefa zimna obejmuje dwa odcinki powierzchni kuli ziemskiej, odgraniczone kołami biegunowemi, w których słońce nie wschodzi codziennie. Są tu tylko dwie pory roku krótkie lato i długa, ostra zima.

III. Strefa umiarkowana, w której słońce codziennie wschodzi i zachodzi, lecz nigdy nie dochodzi do zenitu, obejmuje dwa pasy ziemi, położone między zwrotnikami i kołami biegunowemi. W tej strefie pojawiają się wszystkie cztery pory roku.

Ze zmianą nachylenia osi ziemskiej zmieniłyby się także granice stref. Jakie byłyby strefy, pory roku i długości dnia i nocy, gdyby oś ziemska była prostopadłą, a jakie, gdyby była równoległą do płaszczyzny ekliptyki?

3. Precesja. Punkty, w których ekliptyka przecina równik, nie są stałe, lecz posuwają się rocznie od wschodu na zachód przeszło o 50" Zjawisko to, zwane cofaniem się punktów równonocnych (precesja), pochodzi stąd, że oś ziemska, a więc i równik do niej prostopadły, nie zatrzymują ściśle stałego położenia. Nie zmieniając nachylenia do ekliptyki opisuje oś ziemska pobocznicę stożka, a biegun świata koło o promieniu $23^1/_2{}^0$ w okresie 26000 lat. W tym czasie obiegają punkty równonocne całą ekliptykę. Biegun północny świata, oddalony obecnie od gwiazdy α Ursae minoris (gwiazdy polarnej) o $1^1/_2{}^0$, był za czasów Hipparcha (130 lat przed Chrystusem) oddalony od niej o 12^0

Ruch ten osi ziemskiej pochodzi ze spłaszczenia ziemi. Słońce usiłuje zgrubienie równikowe sprowadzić na płaszczyznę ekliptyki i oś pochyloną prostopadle do niej ustawić.

Ponieważ przyciąganie zgrubienia równikowego przez słońce zmienia się w ciągu roku, oś ziemska, opisując koło, równocześnie kołysze się, **(nutacja)**, wskutek czego okręg koła, opisywanego przez biegun, ma kształt linji falowej.

§ 83. Pomiar czasu i kalendarz.

1 Mierzenie czasu. Jednostkami naturalnemi czasu są. okres obrotowego ruchu ziemi naokoło osi i obiegu jej około słońca: **dzień gwiazdowy i rok gwiazdowy** = 365,25636 dni.

Okres między dwoma porównaniami wiosennemi, **rok zwrotnikowy** = 365,2422 dni.

Zajęciami życia codziennego kieruje zmiana dnia i nocy; południe jest środkiem dnia, przeto doba gwiazdowa nie jest dogodną jednostką czasu. W życiu codziennem przyjmujemy przeto za jednostkę **dzień słoneczny**, t. j. okres między dwoma po sobie następującemi górowaniami słońca. Ponieważ górowanie słońca spóźnia się z dnia na dzień blisko o 4 minuty, przeto dzień słoneczny jest o 4 minuty dłuższy od gwiazdowego. Ale że ruch pozorny słońca nie jest jednostajny (II § 76, 3) więc i okresy między dwoma górowaniami słońca nie są jednakowe, a dni słoneczne nie są równe. W regularnie poruszającym się mechanizmie zegarowym niejednostajność ta nie może być uwzględnioną, wyobrażamy sobie przeto drugie słońce fikcyjne (średnie), obiegające ruchem jednostajnym równik w tym samym czasie, jak prawdziwe ekliptykę i nazywamy czas mierzony tym ruchem, **czasem średnim słonecznym.** Dzień średni dzieli się na 24 godziny, które astronomowie liczą od jednego południa do następnego bez przerwy. W codziennem życiu liczymy godziny od północy do północy, od 1 do 24, n. p. 4 rano w rachubie zwykłej jest godziną 16 w rachubie astronomicznej.

1 godzina gwiazdowa $= 0^h\ 59^m\ 50{,}17^s$ czasu średniego

1 dzień (doba) „ $= 23^h\ 56^m\ 4^s$ „ „

Różnica między górowaniem słońca prawdziwego a średniego nazywa się **równaniem czasu.** Największa różnica między czasem średnim a prawdziwym jest w listopadzie -16^m i w lutym $+14^m$

Czas średni wprowadzono w Europie z początkiem ubiegłego wieku. Dawniej posługiwano się czasem prawdziwym słonecznym.

Czas środkowo-europejski. Czasy słoneczne, prawdziwe i średnie są zmienne od miejsca do miejsca, a jednakowe tylko dla miejscowości, leżących na tym samym południku. Miejscowość B, leżąca o x stopni na wschód (zachód) od miejscowości A, ma czas wcześniejszy (późniejszy) o $4x$ minut. Ponieważ według zmiennych czasów miejscowych niepodobna kierować ruchem pociągów kolejowych, zaprowadzono na kolejach każdego kraju czas miejscowy głównego miasta pod nazwą c z a s u k o l e j o w e g o, do którego stosowano się na całej linji kolejowej. W miarę jednakże rozszerzania się sieci kolejowych, mnożyła się także liczba czasów kolejowych. Dlatego dla uzyskania jednostajności w wymiarze czasu zaprowadzono w Ameryce i w Europie **czas strefowy.** W Polsce przyjęto

czas miejscowy południka, leżącego o 15^0 na wschód od Greenwich, za czas zasadniczy, pod nazwą czasu **środkowo-europejskiego,** obowiązującego wszystkie koleje.

2. Kalendarz. Rok w praktyce (cywilny) może mieć tylko całkowitą liczbę dni Egipcjanie liczyli na rok 365 dni, wskutek czego w 4-ch latach błąd wynosił prawie 1 dzień. Juljusz Cezar polecił w 46 r. przed Chr dodawać dla wyrównania błędu co 4 lata w lutym 1 dzień tak, że w okresie 4-letnim luty przez lat 3 liczył po 28 dni, a w czwartym, **przestępnym** dni 29. **(Reforma Juljańska).** Sobór Nicejski w r 325 przyjął ten kalendarz, a ponieważ rok 328 uznał za pierwszy w okresie czteroletnim, lata podzielne przez 4 były przestępne. Kalendarz Juljański utrzymał się do r 1582 (przez lat 1257), a w tym czasie z ułamka 0,0078 dni, o który rok tej rachuby dłuższy jest od prawdziwego (zwrotnikowego) urósł błąd do 10 dni tak, że wiosenne porównanie wypadło na dzień 11 marca. Papierz Grzegorz XIII rozporządził przeto, aby datę 5 go października 1582 zmienić na 15-go października, a że 0,0078 400 dni = prawie 3 dni, aby końcowe lata stuleci uważać tylko wtedy za przestępne, jeżeli setki ich są podzielne przez 4. **(Kalendarz Gregorjański).**

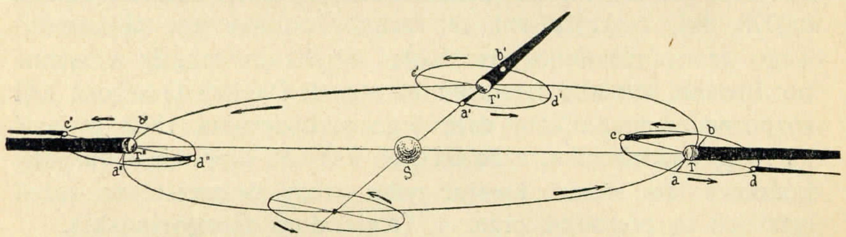
W kalendarzu Juljańskim lata 1600, 1700, 1800 były przestępnemi, jako podzielne przez 4, w Gregorjańskim tylko 1600. Rok Gregorjański dłuższy jest od prawdziwego o 0,0003 dni, co sprawia błąd jednego dnia w 3000 lat. W Polsce kalendarz Gregorjański przyjęto w 1586 r.

Gdyby ktoś o 12 godzinie (czasu średniego) w południe n. p. 5. maja, mógł przenieść się z miejsca swego pobytu o 180^0 na zachód, znalazłby tam 12 godzinę północy z 5 na 6 maja, zyskałby więc niejako 12 godzin. Tak samo zyskuje się pozornie 1 dzień, gdy się objedzie ziemię naokoło, w kierunku na zachód, a traci, gdy się żegluje na wschód. Z tego powodu potrzebna jest linja zmiany daty, za którą obrano wschodnią połowę południka Ferro, bo przechodzi przez niezamieszkałe okolice Oceanu Spokojnego. Żeglarze, mijając tę linję, dodają do daty lub odejmują od niej jeden dzień, stosownie do tego, czy z zachodu, czy ze wschodu przybywają.

§ 84. Zaćmienia.

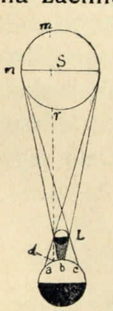
Ziemia i księżyc, oświetlone promieniami słońca, rzucają cienie w postaci stożków. Długość cienia ziemi wynosi przy średniej odległości ziemi od słońca około 216 promieni ziemskich, a średnica przekroju jego w odległości księżyca około $2^2/_3$ średnic księżyca. Długość cienia księżyca w aphelium równa się 59,7, a w perihelium 54,4 promieni ziemskich (II § 14 Zad. 2 i 3), podczas gdy odległość jego od ziemi wynosi od 57—64 ziemskich promieni. Gdyby więc droga księżyca około ziemi znajdowała się na płaszczyźnie ekliptyki, księżyc musiałby podczas każdej pełni wejść w cień ziemi, i tarcza jego zostałaby w całości zaćmiona.

Podobnie podczas każdego nowiu księżyc musiałby całkowicie lub w części zakryć słońce. Co miesiąca musiałoby więc nastąpić jedno zaćmienie słońca i księżyca. Ponieważ jednak droga księżyca jest do ekliptyki nachylona pod kątem $5^\circ 8'$,



Ryc. 266.

więc zaćmienia mogą nastąpić tylko w węzłach lub w pobliżu nich, t. j. wtedy, gdy środek księżyca w czasie nowiu lub pełni (ryc. 266) znajduje się na prostej, łączącej środek słońca i ziemi lub przynajmniej blisko tej linji. W innych razach księżyc przechodzi nad lub pod cieniem ziemi, a w czasie nowiu powyżej lub poniżej prostej, łączącej ziemię i słońce. Od odległości księżyca od ekliptyki (od szerokości) zależy wielkość zaćmienia księżyca, które może być częściowe lub całkowite, a czas trwania zaćmienia księżyca zależy od przekroju cienia ziemi, przypadającego na drogę księżyca, a więc od odległości ziemi od słońca i księżyca i od prędkości kątowej ziemi i księżyca w chwili zaćmienia. Wielkość i czas trwania zaćmienia słońca zależy nadto od stosunku pozornych średnic słońca i księżyca. Ponieważ księżyc jest ciałem ciemnem, więc zaćmienie księżyca widzialne jest równocześnie w tej samej wielkości wszędzie tam, gdzie widzialny jest księżyc.



Ryc. 267.

Widzialność zaćmień słońca, ich jakość i czas trwania zależą od miejscowości na ziemi. Zaćmienie

całkowite mają te miejsca ziemi (ryc. 267), na które pada cień zupełny *b*, a częściowe *ac*, na które pada półcień. Z miejsca n. p. *d* widać część tarczy *mnr*

Gdy w chwili zaćmienia miejscowość leży na prostej, łączącej środek księżyca i słońca, a pozorna średnica księżyca mniejsza jest od średnicy słońca, zaćmienie jest pierścieniowe. Z miejsc, na które cień nie pada, widać słońce w pełnym blasku. Ponieważ cień wraz z księżycem postępuje od zachodu na wschód, a równocześnie ziemia w tym samym kierunku wiruje, więc cień księżyca posuwa się po ziemi. Wszystkie miejsca ziemi, przez które cień przebiega, mają zaćmienie, lecz nie w tym samym czasie i w niejednakowej wielkości.

Tak zaćmienia księżyca, jak i słońca powtarzają się okresowo w 18 latach i 10 dniach. Na ten okres czasu przypada 29 zaćmień księżyca, a 41 zaćmień słońca. Zaćmienia słońca są więc częstsze od księżycowych, lecz rzadziej w tej samej miejscowości widzialne, a całkowite przytrafiają się dla tej samej miejscowości zaledwie raz na 200 lat.

VII. TABLICE.

Względne wysokości tonów (§ 8) I

w skali jednostajnie temperowanej, gdy $a^1 = 435/sek.$

Nazwa tonu	Oktawa: subkontra	kontra	wielka	mała	jedno-kreślna	dwu-kreślna	trój-kreślna	cztero-kreślna
c	16,17	32,33	64,66	129,3	358,7	517,3	1035	2069
cis, des	17,13	34,25	68,51	137,0	274,0	548,1	1096	2192
d	18,15	36,29	72,58	145,2	290,3	580,7	1161	2323
dis, es	19,22	38,45	76,90	153,8	307,6	615,2	1230	2461
e	20,37	40,74	81,47	162,9	325,9	651,8	1304	2607
f	51,58	43,16	86,31	172,6	345,3	690,5	1381	2762
fis, ges	22,86	45,72	91,45	182,9	365,8	731,6	1463	2926
g	24,22	48,44	96,89	193,8	387,5	775,1	1550	3100
gis, as	25,66	51,32	102,65	205,3	410,6	821,2	1642	3285
a	27,19	54,37	108,75	217,5	**435,0**	870,0	1740	3480
ais, b	28,80	57,61	115,22	230,4	460,9	921,7	1843	3687
h	30,52	61,03	122,07	244,1	488,3	976,5	1953	3906

Prędkość głosu. (§ 13) II

Ciała stałe (18^0 C)

Glin	51	10^4 *cm/sek*
Miedź	39,7	„
Srebro	27	„
Stal	50	„
Szkło (flint)	40	„
Złoto	21	„
Żelazo kute	50	„
„ lane	43	„

Ciecze

Woda ($8,1^0$ C)	14,35	10^4 *cm/sek*
„ (25^0 C)	14,57	„

Gazy

Powietrze (0^0 C)	3,313	„
„ (10^0—24 C)	3,309	„
Dwutlenek węgla (10—24^0 C)	2,57	„
Gaz świetlny ($13,6^0$ C)	4,53	„
Wodór (0^0 C)	12,86	„

Spółczynniki załamania (§ 24) III

w ciałach stałych i cieczach dla linji *D* światła żółtego.

Alkohol etylowy	1,36	Kwas siarkowy	1,43
Benzol	1,50	Lód	1,31
Chloroform	1,45	Oliwa	1,46
Diament	2,42	Szkło, crown	1,51
Dwusiarczek węgla	1,63	„ flint	1,75
Eter	1,35	Terpentyna	1,47
Gliceryna	1,47	Woda	1,33
Powietrze	1,000293		

Linje Fraunhofera w widmie słonecznem. (§ 33) IV

Linja	należy do pierwiastka	długość fali λ	Linja	należy do pierwiastka	długość fali λ
A	powietrze	759.10^{-6} *mm*	*b*	*Mg*	$518\ 10^{-6}$*mm*
B	„	687 „	*F*	*H*	486 „
C	*H*	656 „	*G*	*Ca, Fe*	431 „
D	*Na*	589 „	*h*	*H*	410 „
E	*Fe*	527 „	*H*	*Ca*	397 „

Elementy magnetyzmu ziemskiego (§ 40) V

na ziemiach polskich.

Miejscowość	Szerokość geograf.	Długość geograf. od Greenwich	Rok	Zboczenie	Nachylenie	Składowa pozioma
Biegun magn. półn.	70^0 5′ *N*	96^0 45′ *W*	—		90^0 0′ *N*	0
„ „ połud.	72^0 25′ *S*	154^0 *E*	1908		90^0 0′ *S*	0
Ciechocinek	52^0 53′	18^0 47′	1912	—5^0 12′	66^0 13′	0,190
Cieszyn	49^0 44′	18^0 39′	1890	—8^0 5′	64^0 17′	0,202
Kraków	50^0 4′	19^0 58′	1890	—7^0 21′	64^0 27′	0.201
Lwów	49^0 50′	24^0 1′	1890	—5^0 10′	64^0 0′	0,206
Płock	52^0 32′	19^0 43′	1912	—3^0 59′	66^0 5′	0,192
Poznań	52^0 24′	16^0 55′	1909	—7^0 10′	66^0 0′	0,191
Przemyśl	49^0 47′	22^0 46′	1890	—5^0 34′	63^0 57′	0,205
Rzeszów	50^0 2′	22^0 1′	1890	—6^0 9′	64^0 12′	0,203
Stanisławów	48^0 56′	24^0 43′	1890	—5^0 2′	63^0 9′	0,210
Tarnopol	49^0 33′	25^0 34′	1890	—5^0 10′	63^0 37′	0,208
Tarnów	50^0 1′	20^0 59′	1890	—6^0 50′	64^0 18′	0,202
Warszawa	52^0 13′	21^0 1′	1922	3^0 20′	66^0 30′	0,187
Zakopane	49^0 18′	19^0 57′	1898	—6^0 37′	63^0 45′	0,206

Zboczenie zmniejsza się o 9,5′, nachylenie wzrasta o 2,5′, a składowa pozioma zmniejsza się o 0,00029 Gausa na rok.

Stała dielektryczna. (§ 47) VI

Ciało	ϵ	Ciało	ϵ
Bursztyn	2,8	Szelak	3,1
Ebonit	2,6	Szkło	5—10
Mika (łyszczyk)	5,8—7,7	Waselina	2,2
Parafina	2,1	Alkohol	26
Porcelana	4,3—6,6	Gliceryna	56
Siarka (topiona)	4	Nafta	2,1
Smoła	1,8	Woda	81

Opór właściwy. (§ 58) VII

Ciało (18° C)	Opór właściwy ρ	Spółczynnik termiczny α	Ciało (18° C)	Opór właściwy ρ	Spółczynnik termiczny α
Pierwiastki					
Antymon	0,45 $10^{-4}\Omega cm$	+0,0039	Osm	0,10 $10^{-4}\Omega cm$	+0,0040
Bizmut	1,2 „	42	Platyna	0,14 „	25
Cyna	0,11 „	45	Rtęć	0,958 „	09
Cynk	0,061 „	37	Srebro	0,016 „	40
Glin	0,032 „	38	Wolfram	0,05*) „	—
Miedź	0,017 „	40	Złoto	0,023 „	40
Nikiel	0,1 „	60	Żelazo	0,09—0,15 „	60
Ołów	0,21 „	42	Węgiel retort.	55—88 „	odjemny
Stopy					
Stal glinowa (10% Al)				1,0 $10^{-4}\Omega cm$	+0,0035
Bronz (88% Cu, 11% Sn, 1% Pb)				0,18 „	05
Konstantan (60% Cu, 40% Ni)				0,48 „	00
Mosiądz (66% Cu, 34% Zn)				0,06 „	16
Nowe srebro (60% Cu, 25% Zn, 15% Ni)				0,30 „	04

*) W temp. żarzenia się w lampce żarowej ρ wynosi 0,8.

Równoważniki elektrochemiczne. (§ 61) VIII

Jony	Równoważniki chemiczne	elektrochemiczne w $gr/A\,sek$	elektrochemiczne w $gr/A\,h$
Ag	107,88	0,0011175	4,023
$^1/_3$ Al	9,03	00935	0,337
$^1/_3$ Au	56,73	06808	2,451
$^1/_2$ Cu	31,78	03293	1,186
$^1/_2$ Fe	27,92	02892	1,041
H	1,008	01044	0,0376
Hg	200,6	2079	7,482
$^1/_2$ Ni	29,34	03039	1,094
$^1/_2$ Pb	103,55	1073	3,861
$^1/_2$ Zn	32,69	03386	0,2197
Br	79,92	08278	2,980
Cl	35,46	03673	1,322
$^1/_2$ O	8,00	00829	0,2983

Ryc. 268.

Widmo promieniowania elektromagnetycznego. (§ 69) X

Widmo nadfiołkowe (II § 31)

1. **Promienie Röntgena** i promienie γ ciał promieniotwórczych.
2. Część widma, badana zapomocą mierzenia prędkości elektronów, wywołujących fale.
3. Część widma, badana w próżni zapomocą siatki Rowlanda.
4. Część widma, badana w próżni zapomocą siatki wklęsłej.
5. Część widma, badana w próżni zapomocą spektrografu fluorytowego.
6. Część widma, badana w próżni zapomocą spektrografu kwarcowego.
7. Część widma, przepuszczana przez kalcyt.
8. Część widma, przepuszczana przez szkło jenajskie.
9. **Widmo widzialne** (II § 19 Zad. 1).

Widmo podczerwone

10. Najdłuższe fale, wysyłane przez pary rtęci.
11. Najkrótsze fale Hertza.
12. Fale Hertza, średniej długości.
13. **Fale Hertza**, stosowane w radjotechnice.

Ogniwa galwaniczne. (§ 62) IX

Nazwa	Biegun dodatni	Elektrolit		Biegun odjemny	Siła elektrom. w Voltach
Volta	Cu	H_2SO_4 (1 : 12)		Zn	1,0
Leclanché	C i MnO_2	NH_4Cl (stężony)		Zn	1,46
Chromowe	C	$H_2Cr_2O_7 + H_2SO_4$		Zn	2,0
Smee	Ag powleczone czernią platynową	H_2SO_4 (rozcieńczony)		Zn	1,25
Cupron	Cu_2O	$NaOH$		Zn	0,8
Daniell	Cu	$CuSO_4$ (nasycony)	H_2SO_4(1 : 4)	Zn	1,068
Grove	Pt	HNO_3 dymiący	H_2SO_4 (1 : 4)	Zn	1,934
Bunsen	C	HNO_3 dymiący	H_2SO_4(1 : 12)	Zn	1,866
Poggendorff	C	$12K_2Cr_2O_7 + 25H_2SO_4 + 100H_2O$	H_2SO_4(1 : 12)	Zn	2,006

Jednostki fizyczne.

A. Mechanika. Ciepło.

Wielkość fizyczna (oznaczenie)	Równanie określające	Układ *C-G-S*: Nazwa i oznaczenie	Układ *C-G-S*: Wymiar	Układ techniczny: Nazwa i oznaczenie	Układ techniczny: Wymiar	Związki między poszczególnemi jednostkami
Długość, droga (s, l, d, r)	—	(I § 1)	cm		m	$m = 10^2 cm$
Powierzchnia, pole (q, Q, S)		(I § 3)	cm^2	—	m^2	$m^2 = 10^4 cm^2$
Przestrzeń, objętość (v)		(I § 3)	cm^3		m^3	$m^3 = 10^6 cm^3$
Masa (m)	—	(I § 2)	gr			
Czas, okres (t, T)	—	(I § 4, § 28, II § 1)	sek	—	—	
Częstość, wysokość tonu (N)	$N = \frac{1}{T}$	(II § 2, § 64)	sek^{-1}	—		—
Prędkość (v, c)	$v = \frac{s}{t}$	(I § 9)	$cm\ sek^{-1}$			—
Prędkość kątowa, prędkość kołowa (ω)	$\omega = \frac{2\pi}{T}$	(I § 43, II § 1, § 64)	sek^{-1}			
Przyśpieszenie (a, g, γ)	$a = \frac{v}{t}$	(I § 14)	$cm\ sek^{-2}$		—	
Przyśpieszenie kątowe α	$\alpha = \frac{\omega}{t}$	(I § 43)	sek^{-2}		—	—
Siła, ciężar, nacisk (P, Q, R, F)	$P = ma$	*dyna* (I § 19)	$gr\ cm\ sek^{-2}$	kilogram	kg	$kg = 9{,}81 \, . \, 10^5\ dyn$
Moment siły (A)	Pp	*dyna cm* (I § 38)	$gr\ cm^2\ sek^{-2}$	—		—
Moment bezwładności (B, b)	$A = B\alpha$ $b = mr^2$	(I § 43)	$gr\ cm^2$			—
Praca, energja, ilość ciepła (L, E, W, C, i)	$W = Fs$	*erg*, *Joule* (J) (I § 30) kalorja (kal) (I § 82)	$gr\ cm^2\ sek^{-2}$	kilogrammetr (I § 30)	kgm	$erg = dyna\ cm$, $J = 10^7\ erg$, $kgm = 9{,}81\ J$, $kal = 0{,}427\ kgm = 4{,}19\ J$.
	$W = Pt$	kilowattgodz. ($k\ Wh$) (I § 31)		koń parowy-godz. ($KPgodz$)	—	$k\ Wh = 3{,}6 \, . \, 10^6 J$ $KPgodz \backsim 2{,}65\ \ 10^6 J$.
Moc, dzielność (P, D)	$P = \frac{W}{t}$	*erg / sek*, *Watt* (W) (I § 31)	$gr\ cm^2\ sek^{-3}$	kilogrammetr sekundowy, koń parowy (KP)	kgm / sek	$kgm/sek = 9{,}81\ W$ $W = J / sek$, $KP = 75\ kgm / sek \backsim 736\ W$
Ciśnienie, prężność (p)	$p = \frac{F}{S}$	$dyna/cm^2$ atmosfera (at) (I § 61)	$gr\ cm^{-2}\ sek^{-2}$	atmosfera techniczna ($at\ t$)	kg / cm^2	$at = 1\,013250\ dyn/cm^2$ $= 1{,}0333\ at\ t$.
Masa właściwa, gęstość (s)	$s = \frac{m}{v}$	(I § 53)	$gr\ cm^{-3}$	—		—
Ciężar właściwy (s)	$s = \frac{Q}{v}$	—		(I § 3)	kg / dm^3	—

B. Magnetyzm i elektryczność.

Wielkość fizyczna (oznaczenia)	Układ e. s. Równanie określające	Układ e. s. Wymiar	Układ e. m. Równanie określające	Układ e. m. Wymiar	Jednostki praktyczne (oznaczenie)	Związki między poszczególnemi jednostkami
Ilość magnetyzmu, strumień magnetyczny (μ, Φ)			$F=\frac{\mu_1\mu_2}{d^2}$ (II § 38)	$gr^{\frac{1}{2}}\,cm^{\frac{3}{2}}\,sek^{-1}$ $=j\ m.$	—	
Natężenie pola magnetycznego (H)			$H=\frac{\mu}{d^2}$, $F=H\mu$ (II § 39)	$gr^{\frac{1}{2}}\,cm^{-\frac{1}{2}}\,sek^{-1}$ $=Gauss$		$Gauss=j.\,m/cm^2$ $=dyna.\,j.\,m.$
Nabój (Q)	$F=\frac{Q_1Q_2}{d^2}$ (II § 44)	$gr^{\frac{1}{2}}\,cm\ sek^{-1}$	$Q=Jt$ (II § 49)	$gr^{\frac{1}{2}}\,cm^{\frac{1}{2}}$	Coulomb (C) (II § 49)	$j.\,e.\,m.=3.10^{10}\,\frac{e.\,s.}{cm/sek}$, $C=A\ sek=\frac{1}{10}\ e.\,m.$ $Ah=3600\ C.$
Potencjał, siła elektromotoryczna (V, E)	$V=\frac{W}{Q}$ (II § 45, § 59)	$gr^{\frac{1}{2}}\,cm^{\frac{1}{2}}\,sek^{-1}$	$E=\frac{\Phi}{t}$ (II § 63)	$gr^{\frac{1}{2}}\,cm^{\frac{3}{2}}\,sek^{-2}$	Volt (V) (II § 49)	$j.\,e.\,m.=\frac{1}{3.10^{10}}\,e.\,s.\,cm/sek$, $V=\frac{J}{C}\ \ 10^8\ e.\,m.$
Pojemność (C)	$C=\frac{Q}{V}$ (II § 47)	cm	$C=\frac{Q}{V}$ (II § 47)	$cm^{-1}\,sek^{2}$	Farad (F) (II § 49)	$j.\,e.\,m.=9.10^{20}\,\frac{e.\,s.}{(cm/sek)^2}$, $F=\frac{C}{V}=10^{-9}\ e.\,m.$
Natężenie prądu (J)	$J=\frac{Q}{t}=\frac{P}{E}$ (II § 49, § 69)	$gr^{\frac{1}{2}}\,cm^{\frac{3}{2}}\,sek^{-2}$	$H=\frac{2\pi J}{r}$ (II § 49) $W=\Phi J$ (II § 55) $F=HJl$ II § 55)	$gr^{\frac{1}{2}}\,cm^{\frac{1}{2}}\,sek^{-1}$	Amper (A) (II § 49)	$j\ e.\,m.=3.10^{10}\,\frac{e.\,s.}{cm/sek}$, $A=\frac{C}{sek}=\frac{1}{10}\ e.\,m.$ $VA=W,\ VAh=Wh$
Opór (R)	$E=RJ$ (II § 60) $P=RJ^2$ (II § 58)	$cm^{-1}\,sek$	$Q=\frac{\Phi}{R}$ (II § 63)	$cm\ sek^{-1}$	Ohm (Ω) (II § 58)	$j.\,e.\,m.=\frac{1}{9.10^{20}}\,e.\,s.(cm/sek)^2$, $\Omega=\frac{V}{A}=10^9\ e.\,m.$
Samoindukcja (L)	$W=LJ^2$ (II § 55)	$cm^{-1}\,sek^{2}$	$L=\frac{\Phi}{J}$ (II § 63)	cm	Henr (H) (II § 55)	$j.\,e.\,m.=\frac{1}{9.10^{20}}\,e.\,s.(cm/sek)^2$, $H=\frac{J}{A^2}=10^9\ e.\,m.$

Stałe atomowe. (II § 50, § 52) XII

Nabój elementarny, elektron .	$e=4{,}77$	10^{-10} *e. s. naboju.*
Stosunek $\frac{e}{m}$ dla atomów wodoru	2,87	10^{14} *e. s. naboju/gr*
Stosunek $\frac{e}{m}$ dla promieni α ciał promieniotwórczych .	1,446	10^{14} *e. s. naboju/gr*
Stosunek $\frac{e}{m}$ dla promieni katodowych (elektronów) . . .	5,3	10^{17} *e. s. naboju/gr.*
Masa elektronu	0,9	$.\,10^{-27}$ *gr.*
Masa atomu wodorowego	1,66	10^{-24} *gr.*
Objętość cząsteczki gramowej .	22,4	dm^3.
Liczba Avogadry	6,06	10^{23} atomów w atomie [gramowym
Liczba Loschmidta	2,7	10^{19} cząsteczek na cm^3.

SPIS TREŚCI.

Ważniejsze omyłki drukarskie,

które należy poprawić przed używaniem książki.

Str 4, w. 4:

przyśpieszenie (stałe) $a = \frac{v^2}{r} = \omega^2 r$

Str 11, w 21 i 22

ruchu wahanie obu wahadeł zniknie zupełnie.

Mówimy, że takie dwa wahadła są z sobą **sprzężone**. G d y c z a s y

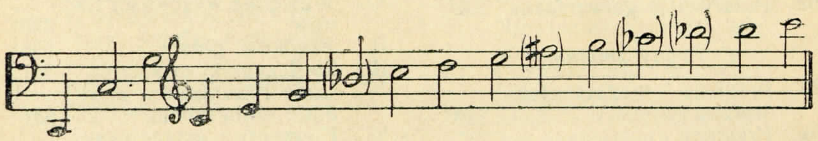
Str 22, dwa ostatnie wiersze

	c	d	e	f	g	a	h	c^1	
c-dur	1	$\frac{9}{8}$	$\frac{5}{4}$	$\frac{4}{3}$	$\frac{3}{2}$	$\frac{5}{3}$	$\frac{15}{8}$	2	
		d	e	fis	g	a	h	cis^1	d^1
d-dur:		$\frac{9}{8}$	$\frac{81}{64}$	$\frac{45}{32}$	$\frac{3}{2}$	$\frac{27}{16}$	$\frac{15}{8}$	$\frac{135}{64}$	$\frac{9}{4}$

Str 25, w. 30:

brzmieniem (resonancją).

Str 27, pod ryc. 18:



1,	2,	3,	4,	5,	6,	7,	8,	9,	10,	11,	12,	13,	14,	15,	16,
C,	c,	g,	c^1,	e^1,	g^1,	i^1,	c^2,	d^2,	e^2,	k^2,	g^2,	l^2,	i^2,	h^2,	c^3.

Ryc. 18.

Str 36, w 21:

pozornym punktu świecącego S.

Str 39, w. 25 i 26:

tlenie powierzchni Q jest

$$\mathfrak{J} \cdot \frac{q}{Q} = \mathfrak{J} \cos \varepsilon.$$

Str 48, w 21:

Nazwijmy a oddalenie szczelin C_1 i C_2, oświetlonych świa-

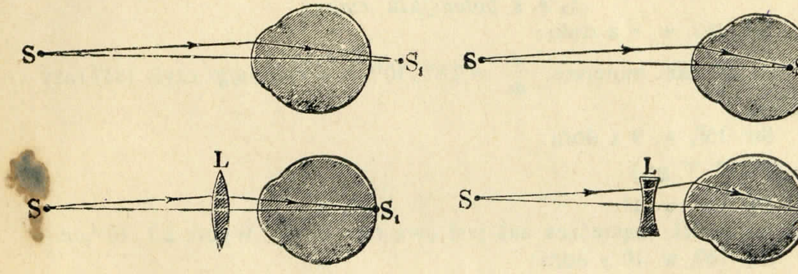
Str 71, w. 13:

$$w : w' = (s-f) : f = f' : (s' - f') = (s+r) : (s' - r) = \frac{s}{s'} \cdot n. \qquad \text{I.}$$

Str 81, w. 9:

porównanie zaś równań II z równaniami I, gdzie $s_1 = s$, a $s_2 = s'$,

Str 86, ryc. 87:



Str. 92, w. 5 i 6:

Powiększenie więc $\nu = \frac{\varepsilon}{\delta}$, a ponieważ δ, ε są małe kąty, przeto

$$\nu = \frac{\operatorname{tg}\varepsilon}{\operatorname{tg}\delta} = \frac{A_1 B_1}{A_1 O_2} \cdot \frac{A_1 O_1}{A_1 B_1} = \frac{A_1 O_1}{A_1 O_2}.$$

Str 104, w 21

(Widocznie pochłanianie, nie dające się zauważyć w cienkich warstwach,

Str. 108, w. 25:

tęczę w po-

Str. 110, w. 29:

dania i ma stały

Str 111, w. 28 i 29:

a ciemne, gdy są prostopadłe. Jeżeli, patrząc przez nikol na miejsce oświetlone, dostrzegamy przy jego obracaniu zmianę

Str 140, w. 14:

$$S_1 : S_2 = d_1^2 : d_2^2 \text{ czyli } \frac{S_1}{d_1^2} = \frac{S_2}{d_2^2}.$$

Str 147, w 21:

dzie sumą dwóch prac $W_{AB} = Kql$ i $W_{BC} = 0$, zatem zawsze $W = W_{AB} = Kql$.

Str 149, w. 12:

Nazwijmy literą C pojemność kondensatora, to $C = \frac{Q}{V} = \frac{ab}{d}$,

Str 155, w 7:

się w p r z e c i w n y m k i e r u n k u.

Str 156, w. 1 i 2:

szereg iskier przeskakujących albo w jednym kierunku, albo naprzemian to z jednego, to z drugiego bieguna.

Str 159, w. 4 z dołu:

aby tylko qv było stałe i równe $3 \cdot 10^{10}$ *e. s. naboju. cm/sek* zatem

Str. 160, w. 12:

Obliczmy wymiar **ilości magnetyzmu** $[\mu]$. Użyjmy rów-

Str. 161, w. 17:

trostatyczną natężenia:

Str. 161, w. 20:

$$j.\ e.\ m.\ \text{natężenia} = 3 \cdot 10^{10} \frac{e.\ s.\ \text{natężenia}}{cm/sek}.$$

Str 162, w. 11

$\frac{1}{300}$ *e. s. potencjału. cm/sek.*

Str. 167, w. 8 z dołu:

v około 100 razy mniejsze, $\frac{e}{m}$ = 2,87 10^{14} *e. s. naboju/gr* czyli 1847 razy mniejsze.

Str 168, w 9 z dołu:

$m = 0{,}9 \,.\, 10^{-27}$ *gr.*)

Str. 169, w. 11:

1 cm^3 objętości, cząsteczek zaś jest dwa razy mniej. Wynik 2,7 $10^{19}/cm^3$.

Str. 169, w. 10 z dołu:

tronów przekroczą pewną granicę, zależną od prężności gazu

Str 172, w. 6:

i zmierzenie długości ich fal (od 2 10^{-7} do 1 10^{-9} *cm*), ale umo-

Str. 183, w. 16—18.

sposób, że do linij pola elektromagnetycznego zwojnicy (*m*) przybywają nowe, o wiele liczniejsze, linje **indukcyjnego namagnesowania** (*e*) (ryc. 156 b).

Str. 215, w. 14:

$$\Sigma E_s = \Sigma RJ,$$

Str 244, w. 5—3 z dołu:

kierunek zgodny z prądem głównym. Przy **zamykaniu** prądu tak, jak przy jego powiększaniu albo zbliżaniu, prąd wtórny ma kierunek przeciwny prądowi głównemu.