

BIBLIOTEKA WIEDZY

MARCEL BOLL

ZAGADKI
ZJAWISK FIZYCZNYCH



TRZASKA. EVERT I MICHAŁSKI

W dniu Imienin Pana Dyrektora
Stanisława Dąbrowskiego
ofiaruję tę Wsiągę
Liceum dla Dorosłych
w Białej Podlaskiej
na rzecz biblioteki
Zimnazar in. J. J. Strakoskiego

Biała-Podl, 8. V. 1945 r.

ZAGADKI
ZJAWISK FIZYCZNYCH

BIBLIOTEKA WIEDZY TOM 36

MARCEL BOLL

ZAGADKI ZJAWISK FIZYCZNYCH

z 60 ilustracjami

PRZEŁOŻYL
RYSZARD ŚWIĘTOCHOWSKI

~~Białe~~
~~Złote~~
~~Niebieskie~~



NAKŁADEM WYDAWNICTWA „BIBLIOTEKI WIEDZY”
TRZASKA, EVERT i MICHAŁSKI S. A. WARSZAWA



4989

ceyf.

WSZELKIE PRAWA ZASTRZEŻONE

DRUKARNIA NARODOWA W KRAKOWIE

SPIS RZECZY.

	Str.
I. PODOBIENSTWA ZJAWISK NIEPODOBNYCH. Wielkości zmieniające się w sposób jednakowy. — Wielkości zmieniające się odwrotnie. — Zmiany okresowe. — Wielkie teorie naukowe.	1
II. BEZWŁADNOŚĆ I CIĄŻENIE. Życie codzienne a teorie naukowe. — Co to jest bez- władność? — Bezwładność w życiu praktycznym. — Siła odśrodkowa. — Ciężar i ciężenie. — Ile waży zie- mia? — Doświadczenie Eötvösa. — Jak usunąć ciąż- enie? — Identyczność bezwładności i ciężenia.	19
III. CO TO JEST MASA? Masa maupertuisiańska. — Masa poprzeczna. — Masa podłużna. — Masa kinetyczna. — Masa grawitacyjna. Masa chemiczna. — Połączenie sześciu rodzajów ma- sy. — Idea powszechnej względności. — Pełny obraz mas wszechświata. — Elektromagnetyczne pocho- dzenie masy. — Różnice między masami. — Pierwszy wypadek, w którym masy się różnią. — Drugi wypa- dek, w którym masy się różnią. — unicestwienie energii w postaci promieniowania.	36
IV. CO TO JEST UDERZENIE? Określenie uderzenia; perkusja. — Wahadło bali- styczne. — Ogólne właściwości uderzenia. — Zderzenie sprężyste. — Zderzenie miękkie. — Młot, fortepian, bilard. — Zderzenia w świecie drobin. — Zderzenia w świecie elektronów. — Rzut oka na całość.	53
V. SPRĘŻYSTOŚĆ I PLASTYCZNOŚĆ. Jakie mogą być mechaniczne działania na ciała stałe? — Ucisk. — Działanie tnące i skrecanie. — Rozciąganie i zgniatanie. — Zgięcie. — Rozciągli- wość i ciągliwość. — Twardość. — Łamliwość. — Nie- które poboczne właściwości. — Siły spoiowości są po- chodzenia elektrycznego. — Kryształy metaliczne. — Skład stopów. — Zgniot zmienia budowę metalu. — Metal zahartowany przez kucie odzyskuje pierwotne swe właściwości po ogrzaniu. — Kute metale mają ciekawe właściwości mechaniczne. — Co to jest harto- wanie przez szybkie oziębianie? — Dużo metali można używać bez domieszek. — Pewne ciała nieorganiczne są używane tylko w postaci stopów. — Najważniejsze stopy spotykane w przemyśle. — Wiek stali i stopów.	72

VI. PROMIENIOWANIE CIAŁ ROZŻARZONYCH.	Str. 103
Od prehistorycznej pochodni do lampki elektrycznej. — Wielkie znaczenie pomiaru. — Promieniowanie ciał o wysokiej temperaturze. — Podział promieniowania. — Widzialność promieniowania. — Świeca i luks. — Lampy próżniowe i lampy z atmosferą gazową. — Porównanie spożycia energii przez lampy. — Jasność i oślepienie. — Urządzenie rozpraszające, odbijające i załamujące światło. — Na czym polega oświetlenie pośrednie? — Co pozostaje do zrobienia?	
VII. RÓŻNE RODZAJE LUMINESCENCJI.	124
Promieniowanie termiczne i luminescencja. — Wyładowania w rozrzedzonych gazach. — Rurki świetlne. — Świecenie w łuku. — Fotoluminescencja. — Fosforescencja. — Fluorescencja. — Zjawisko Wooda i zjawisko Ramana. — Postępy wiedzy. .	
VIII. WIDMA ŚWIETLNE I TAJEMNICA GWIAZD.	139
Jak mierzy się odległość gwiazd od ziemi. — Szybkość po stycznej. — Podstawą astrofizyki jest rozszczepianie się światła na barwy. — Temperatura gwiazd. — Szybkości radialne gwiazd. — Ciśnienie na powierzchni gwiazd. — Pole magnetyczne, pole elektryczne, ciążenie.	
IX. CO TO JEST CZĘSTOŚĆ DRGAŃ?	155
Obroty. — Wahania i drgania. — Rozchodzenie się fal sprężystych. — Dudnienia. — Wysokie częstotliwości sprężyste. — Co to jest prąd przemienny. — Pomiar niskich częstotliwości elektromagnetycznych. — Promieniowanie drgań elektrycznych. — Od podczzerwieni do promieni gamma. — Częstość drgań światła. — Fale i drobinki.	

PODOBIENSTWA ZJAWISK NIEPODOBNYCH

Nie ma przesady w twierdzeniu, że podobieństwo tkwi u samej podstawy zarówno wiedzy, która się tworzy, jak i wiedzy już istniejącej. I rzeczywiście, analogia jest jedną z najpłodniejszych metod odkrywczych; weźmy choćby bliski przykład: wiemy dzisiaj, że lampę da się porównać z fisharmonią i z kulomiotem. Podobieństwo jest również znakomitym środkiem wykładu. Ponieważ jednak każdy medal ma swoją odwrotną stronę, fałszywe analogie mnożą się w popularnych książkach naukowych. Ale na szczęście istnieje niezawodny sprawdzian ich wartości: każda dobra analogia odpowiada pewnej formule; i to jest nowa postać olbrzymiego znaczenia matematyki.

Porównania i przenośnie są monetą zdawkową zarówno życia codziennego jak i dzieł literackich. Bardzo często wspomina się o sile idei, o pracy gleby, o mocy syndykatu, o energii boksera, o akcji polityka, o zderzeniu dwu przeciwnych poglądów: te różne określenia zapożyczone zostały z fizyki, albo raczej nauka przyjęła je z języka potocznego wyposażając w znaczenie ścisłe. Przez porównanie powie się o sławnym wodzu, że jest „piorunem wojny“, albo nazwie się starość „zachodem życia“; a jednak jak mało odwaga przypomina wyładowanie elektryczności między chmurą i ziemią; brak również związku pomiędzy końcem życia a szczególnym momentem obrotu Ziemi, kiedy Słońce znika za linią horyzontu... Nie ma więc po co brać przykładów z frazesów Prudhomme'a: „Ta szpada jest najpiękniejszą chwilą mojego życia...“ albo „Rydwany państwa żeglują na wulkanie...“, aby zdać sobie sprawę, jak powierzchowne i bezpodstawne porównania znajduje w swojej głębi wyobraźnia ludzka, pozostawiona sama sobie.

Przeciwnie, poznanie naukowe, dzięki zakreślonym gra-

nicom, doszło do ustalenia podobieństw, analogii, które zdumiewają od pierwszego rzutu oka. I tak na przykład holenderski uczony Huygens porównał ilościowo światło i dźwięk, co jego współcześni uważali za bardzo śmiałe. Powiązanie ze sobą zjawisk tak rozbieżnych nie mogło być płodne bez doświadczenia naukowego. Myślę o tym nauczycielu, który chcąc, aby ślepiec zrozumiał, co to jest kolor czerwony, powiedział: „Czerwień przypomina trochę dźwięk puzona” — porównanie samo w sobie nie tak śmieszne, jakby się zdawało, chociaż uwypukla jedynie jaskrawość tak dźwięku jak i barwy. Nikt się nie dowiedział, czy ślepy intuicyjnie zdaje sobie sprawę z rozpoznawania kolorów — a byłoby zuchwalstwem oprzeć się na samym przypuszczeniu. Takie więc porównania są zupełnie jałowe dla pojęć świata zewnętrznego, jakkolwiek mogą dostarczać czysto osobistych przyjemności.

Należy dobrze zastanowić się nad słowem analogia. Zawsze będzie tu chodziło nie o jakieś nieokreślone podobieństwo, lecz o tożsamość częściową, identyczność z pewnego punktu widzenia. Najchętniej mówimy, że jedno zjawisko, określone przez wielkości A i B, jest analogiczne do drugiego, w którym grają rolę dwie inne wielkości A' i B', skoro oba te zjawiska można przedstawić przy pomocy dwu wykresów, które stają się podobne do siebie przy odpowiednio dobranej skali.

Ten wstęp może wydać się zbyt abstrakcyjny, ale przegląd szeregu popularnych przykładów rozjaśni go szybko.

Wielkości zmieniające się w sposób jednakowy.

Jest to najprostszy typ zależności; można tu zaliczyć np. płacę robotnika akordowego, zależną od ilości wykonanej pracy, lub wagę noworodka, zmieniającą się wraz z wiekiem. W przykładach tych spotykamy się z owymi tajemniczymi wielkościami, o których była mowa: A i B czy też A' i B'. Wielkością A będzie ilość pracy, wielkością B — płaca: zapłata podwaja się, gdy ilość pracy jest dwa razy większa. A' — to wiek noworodka, B' — jego ciężar;

jeżeli po urodzeniu waży trzy kilogramy, to nazajutrz nie będzie ważył sześciu.¹ Oba te przykłady przedstawiają podobieństwo bardzo ograniczone. Trzeba więc będzie bliżej określić i lepiej wyszukać liczne działy wielkiej grupy zjawisk, które dadzą się scharakteryzować mianem „wielkości zmieniających się w sposób jednakowy”.

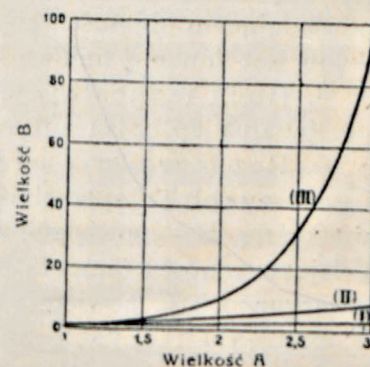
I. Zależność liniowa.

Płaca robotnika akordowego odpowiada najprostszej i najoczywistszej zależności między dwiema wielkościami, których zmiany wzajemnie sobie towarzyszą. Chodzi tu o wielkości (całkowite lub ułamkowe) wprost proporcjonalne. Będziemy więc mieli następującą tabelę:

I.	Wielkość A	Wielkość B
	1	1
	1,5	1,5
	2	2
	2,5	2,5
	3	3

Należy pamiętać, że tabela ta będzie się nadawała dla każdego wypadku, wystarczy bowiem odpowiednio zmienić skalę wykresu, aby dostosować go do tabeli.

Przenosimy A i B na osie współrzędnych (rys. 1) i otrzymujemy wykres (I): jest to linia prosta — dlatego więc mówimy o zależności liniowej. Linia prosta jest najelementarniejszą ze wszystkich linii. Tak samo zależność liniowa jest najprostsza wśród zależności. Na



Rys. 1. Wielkości zmieniające się w sposób jednakowy. (Wykresy I, II i III przedstawiają odpowiednie zależności: liniową, kwadratową i wykładniczą, których przykłady spotykamy na rys. 2, 3, 4).

¹ Wagę 6 kg osiągnie po czterech miesiącach.

niej opiera się słynna „reguła trzech“, wykładana już w szkołach początkowych; ale błędem byłoby mniemać, że ta reguła da się zastosować wszędzie i zawsze.¹

Teraz możemy rozpatrzyć długi szereg zjawisk bardzo podobnych, ponieważ wszystkie odpowiadają zależności liniowej.

1. Wydłużenie sprężyny (rys. 2). Jeżeli na haku zawiesza się kolejno coraz większe ciężary, wydłużenie sprężyny wzrasta wprost proporcjonalnie. Wielkość A jest zawieszonym ciężarem, wielkość B — wydłużeniem. Jeżeli A odpowiada 1, 2, 3... kilogramom, B osiągnie, przypuścimy, 1, 2, 3... centymetry.

2. Długość obwodu. Porównajmy kilka obwodów, których średnica równa się 1, 2, 3... cm; ich długość wyniesie 3,14 cm; 6,28 cm; 9,42 cm...; zatem długość obwodu koła jest funkcją liniową jego średnicy.

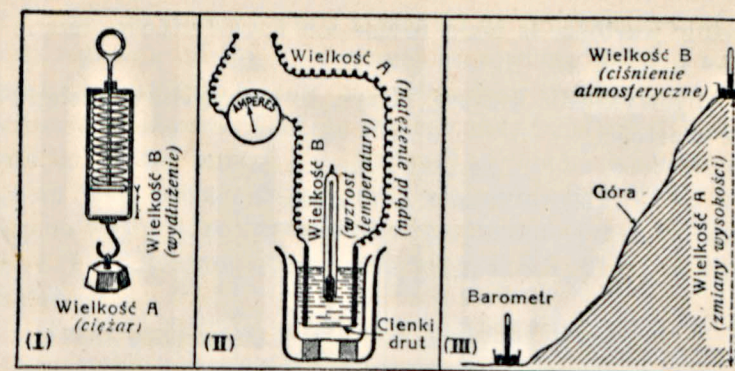
3. Ciężary różnych objętości tej samej materii. Weźmy 1, 2, 3... centymetry sześciennę miedzi. Jeżeli je zważymy, otrzymamy 8,9; 17,8; 26,7 grama. Wielkość A jest objętością miedzi, wielkość B — ciężarem ściśle odpowiadającym objętości: ciężar i objętość zmieniają się — jedno jest funkcją liniową drugiego.

4. Ruch jednostajny. Przebyta przestrzeń jest proporcjonalna do czasu zużytego na przejście.

5. Rozszerzanie się ciał (stałych, płynnych i gazowych). Tutaj wielkością A jest wzrost temperatury; wielkością B — powiększenie objętości. Na 100 stopni Celsjusza wzrostu temperatury ołów rozszerza się o 0,88%, gliceryna o 5%, powietrze o 37%.

6. Charakterystyczna barwa emisji ciał stałych. Rozżarzone ciała stałe wysyłają promieniowanie złożone, które zmienia się wraz z temperaturą. Barwa najobfitsza w promieniowaniu (określana za pomocą częstości

¹ Jednak każda zależność może być rozważana jako liniowa w obrębie dostatecznie małych rozmiarów: widać wyraźnie (rys. I), że dwie krzywe (II i III) przytulają się do linii prostej (I), gdy A zmienia się od 1 do 1,3.



Rys. 2, 3, 4. Deformacja sprężyny odpowiada zależności liniowej; ciepło wywołane prądem elektrycznym przedstawia funkcję kwadratową; ciśnienie atmosferyczne daje obraz zależności wykładniczej, przy schodzeniu z góry w nizinę.

drgań światła) podlega prawu: charakterystyczna częstość drgań jest tym większa, im wyższa temperatura.¹

7. Procent zwykły. Kapitał przynosi tym więcej dochodu, im dłużej procentuje. Wielkość A jest czasem procentowania, wielkość B — dochodem.

Chyba wystarczy tych siedmiu przykładów; można by ich przytoczyć więcej, aby pojąć łączące je podobieństwo; poniższa tabela wskazuje wielkości porównywane ze sobą, które wszystkie odpowiadają wykresowi I z rys. 1:

(I)	Wielkość A	Wielkość B
1	Zawieszony ciężar	Wydłużenie sprężyny
2	Średnica	Obwód
3	Objętość ciała	Ciężar
4	Czas	Przebyta przestrzeń
5	Temperatura	Objętość
6	Temperatura	Charakterystyczna częstość drgań
7	Czas	Procent zwykły

II. Zależność kwadratowa.

Wielkość B nazywamy funkcją „kwadratową“ wielkości A; gdy A przybiera wartości 1, 2, 3, 4, 5..., odpo-

¹ Prawo Wiena. Powrócimy do niego w rozdziale IV.

wiednie wartości B będą równe ich kwadratam, mianowicie 1, 4, 9, 16, 25...

Aby wykreślić krzywą II rys. 1, przyjęliśmy następujące wartości:

(II)	Wielkość A	Wielkość B
	1	1
	1,5	2,25
	2	4
	2,5	6,25
	3	9

Widać, że krzywa jest parabolą wygiętą ku dołowi, podobną zupełnie do biegu piłki tenisowej, pod warunkiem, że ten „bieg“ wykręcimy dołem do góry.¹

1. Ciepło wywołane prądem elektrycznym (rys. 3). Cienki drucik, przez który przechodzi prąd, jest zanurzony w wodzie. Wielkością A jest natężenie prądu w obwodzie, odczytywane na amperomierzu (można je zmieniać przy pomocy opornika suwakowego, nie uwidocznionego na rysunku), wielkością B zaś jest ciepło drucika oddane wodzie,² wskazywane przez termometr a mierzone temperaturą samej wody. $Q = 0,24 \cdot I^2 \cdot R$

2. Powierzchnia kwadratu jest funkcją kwadratową jego boku.

3. Powierzchnia koła jest funkcją kwadratową średnicy; koła, których średnice wynoszą 1, 2, 3... cm, mają powierzchnię 0,79 cm², 3,14 cm², 7,07 cm².

4. Spadanie. Jeżeli ciało swobodnie spada, drogi przebyte są proporcjonalne do kwadratów czasu potrzebnego na przebieg ciała.

5. Regulator odśrodkowy (rys. 20). Rozsuniecie kul regulatora jest funkcją kwadratową szybkości obrotów.³

6. Energia ciała w ruchu. Ciało w ruchu — przez

¹ Parabola jest najelementarniejszą z krzywych, nie licząc prostej.

² Prawo Joule'a.

³ O ile rozsuniecie nie jest zbyt duże.

to samo, że porusza się w stosunku do obserwatora — posiada pewną energię — „energię kinetyczną“, która może służyć do wbijania pali, wywoływania ciepła itp. Otóż energia kinetyczna dla tego samego ciała (wielkość B) zmienia się według funkcji kwadratowej szybkości (wielkość A): jeżeli ciało ważące 20 kg pędzi z szybkością 1, 2, 3... metry na sekundę, to odpowiednie energie kinetyczne wynoszą 1, 4, 9 kilogramometrów albo też 2,4; 9,6; 21,6... małych kalorii.

Teraz grupujemy wszystkie podobne wielkości:

(II)

	Wielkość A	Wielkość B
1	Prąd	Wywiązane ciepło
2	Bok kwadratu	Powierzchnia
3	Średnica	Powierzchnia koła
4	Czas	Przebyta droga
5	Szybkość obrotów	Siła odśrodkowa
6	Szybkość	Energia kinetyczna

Te przykłady są analogiczne w tym znaczeniu, że wszystkie są przedstawione przez wykres II rys. 1.

III. Zależność wykładnicza.

Przechodzimy do trzeciego typu zależności, trochę trudniejszego od poprzednich. Tu już mamy do czynienia z logarytmami. Ale nie trzeba mówić o matematyce tam, gdzie wystarczy trochę uwagi, aby zrozumieć, o co chodzi. Wykres III rys. 1 tłumaczy stosunek wykładniczy: wielkość B nazywamy funkcją wykładniczą wielkości A; gdy A ma wartości ¹:

to B równa się:	1	2	3	4	5	...
	1	10	100	1.000	10.000...	

¹ Inaczej mówiąc, A rośnie według postępu arytmetycznego, B — geometrycznego.

Krzywa III została wykreślona na podstawie następującej tabeli:

(III)	Wielkość A	Wielkość B
	1	1
	1,5	3,16
	2	10
	2,5	31,6
	3	100

Funkcja wykładnicza odznacza się niezwykle szybkim wzrostem. Nieznana jeszcze wielu naszym współczesnym, znajduje się już w starej bajce arabskiej o wymyśleniu szlachetnej gry w szachy. Wiadomo bowiem, że w nagrodę za to odkrycie poddany wielkiego króla prosił o ziarno zboża na pierwszym polu szachownicy, o dwa na drugim, cztery na trzecim, wciąż podwajając ilość ziarn aż do 64 pola.

Suma ziarenek miała mu być ofiarowana. Nagroda, pozornie skromna, odpowiada światowej produkcji zboża przez 76 lat, pod warunkiem, że wszystkie kontynenty będą nim obsiane.¹ Otóż liczba ziarna jest funkcją wykładniczą poszczególnych numerów pól szachowych.

W naszych przykładach włączymy jednocześnie zjawiska malejące,² aby już ogólnie rozważyć tę bardzo ważną funkcję wykładniczą.

1. Zmiana ciśnienia atmosferycznego wraz z wysokością (rys. 4). Barometr znajduje się na szczycie góry; wielkość B — to wysokość słupka rtęci wewnątrz barometru, ilość zaś metrów, na jaką się opuścimy schodząc z wierzchołka, przedstawi wielkość A.³ Jeżelibyśmy zamiast schodzić wspinali się, prawo pozostanie niezmiennione i to tłumaczy powyższą wzmiankę o zjawiskach malejących.

2. Działanie pompy pneumatycznej. Stopień

¹ Wynosi to 18.446.744.073.709.551.615 ziarn.

² Zjawiska malejące przedstawi krzywa idąca ku dołowi, symetrycznie do krzywej III rys. 1.

³ „Równanie barometryczne”, odkryte przez Laplace’a.

próżni (pozostałe ciśnienie) jest funkcją wykładniczą liczby ruchów tłoka.

3. Oziębienie się ciał. W spokojnym powietrzu spadek ciepłoty nagrzanego ciała jest funkcją wykładniczą czasu.¹

4. Temperatura wzdłuż pręta. Jeżeli metalowy pręt jest nagrzany w jednym ze swoich końców, to temperatura w każdym punkcie jest funkcją wykładniczą odległości tego punktu od źródła ciepła.

5. Pochłanianie światła. Skoro światło przechodzi przez ciało absorbujące (niebieskie szkło, płatek złota itp.), to natężenie światła przechodzącego jest funkcją wykładniczą grubości ciała. Na przykład płatek złota grubości jednej dziesięciotysięcznej milimetra osłabia światło o połowę.

Powstaje więc tabela:

Grubość ciała przepuszczającego światło w tysięcznych milimetra	Natężenie światła przepuszczonego, wyrażone w świecach
0,1	0,5
0,2	0,25
0,3	0,125
...	...
1	0,002
...	...
1,4	0,0001

Te liczby łatwo zrozumieć: jeżeli jedna dziesięciotysięczna milimetra pochłania połowę światła padającego na dane ciało, to następna jedna dziesięciotysięczna milimetra pochłonie połowę tego, co do niej dojdzie, a więc ćwierć światła padającego na pierwszą jednodziesięciotysięczną milimetra. Widać również, że czternaście dziesięciotysięcznych milimetra przepuści tylko jedną dziesięciotysięczną część światła. Jakkolwiek oglądanie świata przez pryzmat złotego może dać niezmiernie ciekawe, choć ściśle subiektywne, wyniki, to jeśli przyłożymy oko do tegoż złotego, chcąc przyjrzeć się temuż światu, nie zobaczymy nic, bo

¹ Prawo Newtona.

ilość przechodzącego światła przedstawi się w formie ułamka mającego w liczniku jedność a w mianowniku kilka tysięcy zer. Za mało, ażeby coś widzieć...

6. Prądy wtórne (samoindukcyjne). Jeżeli przerwać obwód, prąd płynie nadal, ale i zmniejsza się według funkcji wykładniczej czasu.

7. Zjawiska termoelektryczne. Emisja elektronów żarzącego się włókna (lampa katodowa) jest funkcją wykładniczą temperatury.

8. Rozpad atomów. Rad i pierwiastki pokrewne stopniowo rozpadają się, wyrzucając naładowane elektrycznie cząstki (na tym właśnie polega radioaktywność); otóż ciężar pierwotny radu, który pozostał po upływie pewnego czasu, jest funkcją wykładniczą tegoż czasu.¹

9. Procent składany. O ile poprzednio była mowa o procencie zwykłym, jako funkcji liniowej, o tyle teraz jest to już funkcja potęgowa. 50 groszy umieszczone na procencie składanym na początku ery chrześcijańskiej przewyższyłyby dzisiaj wartość złota całego świata.

10. Prawdopodobieństwo. Funkcje wykładnicze występują bardzo często w rachunku prawdopodobieństwa. Choćby w grze w orla i reszkę: A niech będzie ilością rzutów, B — liczbą wypadków możliwych (III rys. 1). W jednym rzucie są dwa możliwe wypadki; w dwu jest ich cztery; w trzech rzutach — osiem możliwości itd. W „n” rzutach — wypadków możliwych jest 2 podniesione do potęgi n-tej (2ⁿ).

11. Związek między podniętą i odczuciem. Jeżeli zapalić lampę (podnieta), spostrzega się światło (odczucie); skoro podnosi się ciężar (podnieta), odczuwa się wysiłek mięśni (odczucie) itp. W tych rozmaitych przykładach B wyobraża podniętą, A — odczucie.²

¹ Temu prawu podlegają również pewne reakcje chemiczne. Np. działanie siarki na wodór.

² Innymi słowy: jeżeli podniety powiększają się w postępie geometrycznym, odczucia rosną w postępie arytmetycznym (prawo Webera-Fechnera).

12. Maltuzjanizm. W tej doktrynie obchodzi nas tylko zależność wykładnicza, która ją charakteryzuje, a nie jej ścisłość, czy trafność wniosków. Według autora,¹ pożywienie, którym ludzkość może dysponować, jest wielkością A (III rys. 1), ogólne zaludnienie B. Inaczej mówiąc: zaludnienie z biegiem czasu będzie rosło nieskończenie prędzej od pożywienia, które człowiek zdoła wyprodukować na ziemi.

Zależności wykładnicze mają olbrzymie znaczenie we wszystkich gałęziach wiedzy. Żeby to jeszcze uwypuklić, zschematyzujmy rezultaty przytoczonych tu przykładów:

(III)

	Wielkość A	Wielkość B
1	Wysokość	Ciśnienie atmosferyczne
2	Trwanie działania pompy	Stopień próżni
3	Czas	Oziębienie
4	Odległość	Temperatura
5	Grubość	Światło przechodzące
6	Czas	Prąd po przerwaniu
7	Temperatura	Prąd w próżni
8	Czas	Rad nie rozłożony
9	Czas	Procent składany
10	Rzuty	Liczba możliwości
11	Odczucie	Podnieta
12	Pożywienie	Zaludnienie

Zależność wykładnicza najlepiej tłumaczy to, co nauka rozumie przez „porównywanie zjawisk niezgodnych”, nie ma bowiem nic bardziej niezgodnego nad wysokość i zapas pożywienia, albo ciśnienie atmosferyczne i liczba naszych żywych bliźnich.

Wielkości zmieniające się odwrotnie.

Spotkaliśmy już taką parę wielkości omawiając zależność wykładniczą; wystarczy więc pobieżnie poznać kilka nowych podobieństw. Rysunek 5 spełni tutaj to samo zadanie, jakie poprzednio spełniał rysunek 1 — zilustruje nasze przykłady.

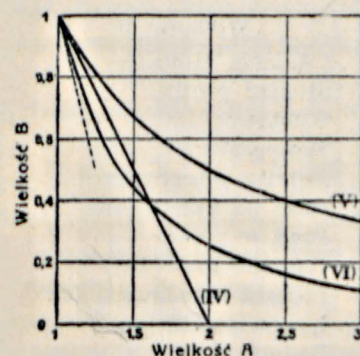
¹ Tomasz Robert Malthus, ekonomista angielski (1766—1834).

IV. Zależność liniowa.

Należy jeszcze raz powtórzyć, że każda zależność może być uważana za liniową pod warunkiem, iż dostatecznie zmniejszy się obręb, w którym on występuje.

Przytoczoną poniżej tabelę można dostosować do każdego wypadku przez odpowiednią zmianę skali:

(IV)	Wielkość A	Wielkość B
	1	1
	1,5	0,5
	2	0



Rys. 5. Wielkości zmieniające się odwrotnie. Wykresy IV, V i VI przedstawiają kolejno zależność liniową, odwrotną proporcjonalność i odwrotność kwadratową. Rys 6, 7 i 8 dają przykład tych trzech zależności.

Tu należy wymienić „regulę trzech odwrotności“, którą „umilano“ nasze dzieciństwo: wykonanie pracy wymaga pewnego czasu (wielkość B), który jest odwrotnie proporcjonalny do liczby zatrudnionych robotników (wielkość A).¹

¹ Nie można jednak przypuszczać, że jeśli 5 robotników może odnowić mieszkanie przez 10 dni, 50 robotników wykona tę pracę w jeden dzień. Po prostu nie zmieszczą się w pokojach.

To jest wykres IV rys. 5. Natomiast rys. 6 ilustruje jeden z przykładów: pociąg pociąg pociąg wyjeżdża z Warszawy o godzinie 17-tej, nie zatrzymuje się i jadąc z szybkością jednostajną przyjeżdża do Białegostoku o 19-tej. Czas jest wielkością A; wielkością B (zmienia się od 173 km do 0) jest droga pozostała do przejechania.

V. Odwrotna proporcjonalność (zależność homograficzna).

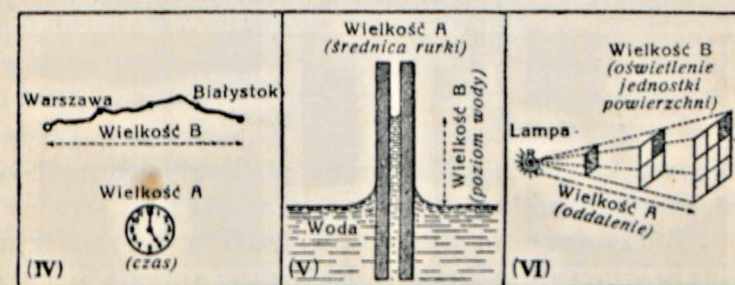
(Tabela V jest przedstawiona przez wykres V rys. 5).

(V)	Wielkość A	Wielkość B
	1	1
	1,5	0,67
	2	0,50
	2,5	0,40
	3	0,33

1. Wznoszenie się cieczy w rurkach włoskowatych. Rys. 7 przedstawia cienką rurkę prostopadle zanurzoną w wodzie: rurka o 2 mm średnicy wewnętrznej (wielkość A) daje wzniesienie się cieczy o 15 mm (wielkość B); jeżeliby średnica wyniosła tylko 1 mm, wzniesienie osiągnęłoby 30 mm. Wznoszenie się cieczy jest odwrotnie proporcjonalne do średnicy (prawo Jurina).

2. Kompresja gazów. Przy ściskaniu gazu, np. w pompce rowerowej, trzeba coraz większej siły, aby utrzymać nieruchomo rączkę tłoka: objętość masy gazowej jest odwrotnie proporcjonalna do ciśnienia panującego w gazie.¹

3. Skupianie promieni przez soczewkę. Dla ułatwienia weźmy przykład lupy o jednej stronie płaskiej,



Rys. 6, 7, 8. Droga pozostała do przejechania jest funkcją liniową czasu; wznoszenie się wody w cienkiej rurce jest odwrotnie proporcjonalne do jej średnicy; oświetlenie zmienia się odwrotnie proporcjonalnie do kwadratu odległości.

¹ Prawo Mariotte'a, ściśle tylko w pewnych granicach i przy niezmienniej temperaturze.

drugiej wypukłej. Im mniejszy będzie promień wypukłości, tym większa będzie zdolność zbierająca soczewki, tym silniejsza będzie lupa.

Streszczamy te rozmaite podobieństwa:

(V)

	Wielkość A	Wielkość B
1	Średnica rurki	Wznoszenie się cieczy
2	Ciśnienie gazu	Objętość
3	Promień soczewki	Zdolność zbierająca soczewki

Reguła „trzech odwrotności“ znajduje więc czasem zastosowanie w przejawach zewnętrznego świata.*

VI. Odwrotność kwadratu.

Jeszcze wypada uczynić krótką wzmiankę o odwrotności kwadratu, jako o ostatnim przykładzie związku pomiędzy dwu wielkościami zmieniającymi się w kierunkach odwrotnych. Zależność tą przedstawia wykres VI rys. 5 oraz następująca tabelka:

Wielkość A	Wielkość B
1	1
1,5	0,44
2	0,25
2,5	0,16
3	0,11

Prawu odwrotności kwadratu podlegają szczególnie następujące zjawiska:

1. Zmniejszanie się oświetlenia ze wzrostem odległości (rys. 8). Żarówka elektryczna oświetla kolejno 1 m^2 w odległości 1 m , 4 m^2 w odległości 2 m , 9 m^2 oddalone o 3 m .¹ Łatwo przypuścić, że światło „nie gubi się po drodze“, że każda z powierzchni w całości otrzyma tę samą ilość światła i w rezultacie każdy metr kwadratowy będzie miał

¹ To jeszcze będzie omawiane w rozdziale VI.

oświetlenie (wielkość B), które się zmienia odwrotnie do kwadratu odległości (wielkość A).

2. Powszechne ciążenie. Newton wykazał, że dwie jakiegokolwiek masy przyciągają się z siłą odwrotną do kwadratu odległości pomiędzy nimi.

3. Przebieg pewnych reakcji chemicznych. W niektórych reakcjach (szczególnie przy działaniu jednego gazu na drugi) masa ciała reagującego zmienia się odwrotnie do kwadratu czasu trwania doświadczenia.

Ostatnia tabelka zestawia te ciekawe podobieństwa:

(VI)

	Wielkość A	Wielkość B
1	Oddalenie	Oświetlenie
2	Odległość	Siła przyciągania
3	Czas	Ciało nie rozłożone

Zmiany okresowe.

Po poznaniu wielkości, które zmieniają się w sposób jednakowy, i wielkości zmieniających się w sposób odwrotny, jeszcze pozostaje do powiedzenia kilka słów o wielkościach zmieniających się bądź w jednym, bądź też w drugim kierunku. Ta kategoria odpowiada zjawiskom okresowym. Najprostszego przykładu dostarcza ruch pionu, wahadła lub spiralnej sprężyny zegarka. Wielkością A jest czas (mierzony chronometrem albo w inny równie dokładny sposób); wielkością B — odchylenie wahadła od prostopadłej (rys. 9). Mówi się, że odchylenie jest funkcją harmoniczną czasu. Jej wykres przedstawia się jako krzywa wężykowata, zwana „sinusoidą“ (rys. 10). Szybkie ruchy okresowe są odczuwane uchem jako dźwięk.

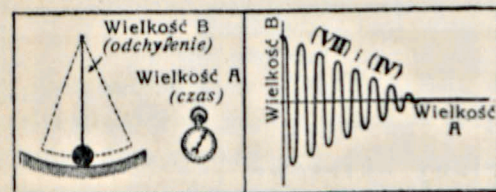
Prądy zmienne nie są niczym innym jak ruchem drgającym elektronów: wielkością A jest zawsze czas, wielkością B — wychylenie elektronu z jego pozycji równowagi. Wiadomo, że cała radiofonia polega na wywo-

ływaniu drgań możliwie stałych (i ciągłych) i o możliwie najmniejszym okresie (wysoka częstość).

Co się zaś dotyczy promieniowania (światło, promienie Hertza, ciepło promieniste, ultrafiolet, promienie X), to polega ono z pewnego punktu widzenia¹ na



Rys. 9, 10. Wahania swobodne.



Rys. 11, 12. Wahania hamowane (tarcie ciał stałych).



Rys. 13, 14. Wahania hamowane (tarcie w płynach).

bione przez tarcie w cieczy; krzywa (rys. 14) jest połączeniem sinusoidy (VII, rys. 10) i wykresu funkcji wykładniczej (III, rys. 1), ponieważ maksima odchyłeń gru-

¹ Dokładniej omówimy to w rozdz. IX. Zaraz bowiem zobaczymy, że dla dokładnego opisu promieniowania nie wystarczy powołanie się na analogię do dźwięku (zjawiska okresowego).

pują się na krzywej wykładniczej, którą tak dokładnie zajmowaliśmy się poprzednio.

Oscylację gasnącą można odtworzyć drganiami kamertonu, które powoli słabną (o ile nie podtrzymuje się ich elektrycznie); ta oscylacja odgrywała wielką rolę w początkach telegrafu bez drutu; radiofonia byłaby jednak z nią niemożliwa, a obecnie nawet w technice radiotelegrafii zaczyna się ją usuwać.

Wielkie teorie naukowe.

Zjawiska periodyczne zmuszają do przypomnienia jednej z najpiękniejszych teorii, które olśniły drugą połowę dziewiętnastego wieku: około roku 1870 uczony angielski James Clerk Maxwell postawił hipotezę, że światło jest zjawiskiem elektromagnetycznym. Jest to bodaj najbardziej nieoczekiwana i najpłodniejsza analogia, jaką ludzie kiedykolwiek stworzyli. Fizyk niemiecki H. Hertz, opierając się na matematycznych przewidywaniach Maxwella, odkrył w 1888 roku promieniowanie, które odtąd nosi jego imię i służy za podstawę radiokomunikacji.

Precyzując pomysły Holendra Huygensa i wielkiego uczonego francuskiego Fresnela, Maxwell utożsamiał światło ze zjawiskiem periodycznym. Ale chwila obecna obaliła ten jednolity i trochę ekskluzywny pogląd; światło jest zjawiskiem nie tylko periodycznym; mówiąc, że lampa jest podobna do fisharmonii, wyjaśnia się jedynie część kwestii. Pewne zjawiska nie dawno odkryte (zjawisko Comptona r. 1923), o których jeszcze będzie mowa (rozdz. IV), oraz inne, dawniej znane (zjawisko fotoelektryczne, H. Hertz r. 1887), lecz wciąż jeszcze komentowane, rodzą domniemanie, że światło jest czymś więcej: ponieważ lampa wyrzuca korpuskuły, zwane „fotonami“, według pewnego urywanego rytmu, więc może być porównana do karabina maszynowego.

Świat jest zarazem „falujący“ i „korpuskularny“; raz taki, raz inny; to zależy od wpływu, jaki nań wywieramy —

mówi Duńczyk Niels Bohr. Światło jest falujące, jeśli emisję dwóch źródeł poddamy wzajemnemu przenikaniu, bowiem tylko zjawiska periodyczne tłumaczą, w jaki sposób „światło dodane do światła może dać ciemność”. Ale jest ono również korpuskularne, bo inaczej nie moglibyśmy pojąć, co się dzieje w zjawisku fotoelektrycznym, kiedy promień świetlny wyrzuca elektrony obecne w jakimś metalu. Istnienie takich licznych i na pierwszy rzut oka wzajemnie sprzecznych analogii nie jest najmniejszym paradoksem wiedzy współczesnej.

Nie zapominajmy, że głębokie i płodne analogie powstają z rozwinięć matematycznych, trudnych i zawiłych; muszą one zawsze wynikać z doświadczeń przeszłych lub przyszłych, a szczególnie z tych, które pobudzają do dalszych prób. Strzeżmy się fałszywych podobieństw, od których roi się w pracach i artykułach popularyzatorskich: pokrewieństwo prądu elektrycznego z wodnym jest przedstawiane na ogół nieściśle; nie ma nic wspólnego między myślą a telegrafem bez drutu, chociażby to porównanie, często poddawane przez wyobraźnię, było po stokroć odkrywane; nie można by zliczyć wszystkich fałszów, zrodzonych ze zwodniczego podobieństwa między związkiem społecznym a istotą żywą.

Jeżeli dorzucić, że poza zbliżeniem optyki i elektryczności (Maxwell) obecna wiedza sprowadziła ciężenie do geometrii (Einstein), chemię do działań elektrycznych (Kossel i Born), to wnioskiem będzie, iż analogia tkwi w samym jądrze postępu naukowego pod podwójnym warunkiem: ścisłego sformułowania matematycznego i drobiazgowego sprawdzenia doświadczalnego.



BEZWŁADNOŚĆ I CIĄŻENIE

Masa, ciężar, bezwładność, ciężenie — to słowa dla czytelników bliskie, powtarzające się często w potocznej rozmowie. Jednak niewielu umiałoby zdefiniować lub nawet wytłumaczyć faktami pojęcia oznaczone tymi wyrazami. Pochodzi to stąd, że wiadomości mozolnie zdobywane zostawiają w umyśle piętno bardzo powierzchowne jedynie. Jeszcze raz trzeba przeorać bruzdę, wywołując wspomnienia, dorzucając nowe obrazy do tych, które nam zostały w pamięci. W tym rozdziale zebrane są pojęcia masy, ciężaru, bezwładności, ciężenia; w nim przejdziemy powoli od Newtona do Einsteina, który tak przeraża małuczkich. Zwabieni tematem, zajmiemy się dziedziną, która dla wielu jest nieskończonością a która według Einsteina i jego wyznawców przybiera postać świata bez wątpienia olbrzymiego, ale ograniczonego, zmierzonego, zważonego... Zobaczymy, ile waży Ziemia, jakie są wymiary Wszechświata!

Życie codzienne a teorie naukowe.

Ciągle się zdarza, że ludzie wyrabiają sobie najdziwniejsze i najsprzeczniejsze z rzeczywistością pojęcia o wiedzy i badaniach naukowych. Któż nie słyszał, że uczeni są oryginałami odgradzonymi od świata wielkim murem, zajętymi manipulowaniem dziwaczными przyrządami albo brudzeniem papieru niezrozumiałymi hieroglifami? I przypominają się czarujące słowa francuskiego profesora Jana Macégo, zmarłego trzydzieści lat temu: „Istnieje, widzicie, taka grupka ludzi, którzy wcale nie sprawiają wrażenia czegoś nadzwyczajnego. Używają takiego języka, że trzeba dzieci wyprowadzać z pokoju. Wąż czarne proszki na aptekarskich wagach, zanurzają płytki miedzi w żrącej wodzie oraz przypatrują się banieczkom powietrza, które przechodzą przez pokrzywione szklane rurki i są czasem

równie niebezpieczne jak pociski armatnie. Skrobiać bezużyteczne kości i rozcinają żdźbła wielkości łebka od szpilki. Całymi godzinami wlepiają oczy w lunety o trzydziestu sześciu szklach i gdy już, już mają coś zobaczyć, nic się nie pokazuje. Patrząc na nich, jak pracują w tak nazywanych przez siebie laboratoriach, ma się wrażenie, że to wariaci... A gdy wszystko jest skończone, okazuje się pewnego pięknego poranku, że zmienili oni oblicze Ziemi, wywołali rewolucje, przed którymi cesarze i królowie chyliły głowy, wzbogacili narody od razu o setki milionów i odkryli ludzkości prawa dotąd nie znane“.

Czytelnicy są na ogół zbyt wykształceni, aby podlegać zdumieniu; ale czasem różnica między doświadczeniem naukowym a najprostszą obserwacją jest głębsza w wyobrażeniu najtępszych nawet umysłów niż w rzeczywistości. Różnica między eksperymentem naukowym a pospiesznym rzutem oka na zegar polega jedynie na dokładności a nie na istocie obserwacji. Wiedza bierze za podstawę te same zjawiska, których świadkami jesteśmy w codziennym życiu; ona je tylko bada uważniej, staranniej, sumiennie; opisuje z dokładnością, której nie podobałby nawet najprzejrzystszy język świata, i dlatego ucieka się do mowy matematycznej, od dawna uznanej za powszechną; stara się wyjaśnić zjawiska już opisane, to znaczy sprowadzić je do małej liczby faktów prostych, zrozumiałych, lecz niekoniecznie najczęściej spotykanych w praktyce codziennej. „Sprowadzić jedno zjawisko do drugiego“ — przekonujemy się, że pojęcie wytłumaczyć nie może czego innego oznaczać.

Pamiętny to dzień w historii wiedzy, w którym pojęcie wytłumaczenia — w ścisłym słowa znaczeniu — zostało odkryte i ostatecznie przyjęte. Pamiętna chwila nie tylko przez natchnienie dostarczone rozumowi, ale również przez mnóstwo praktycznych i często najbardziej nieoczekiwanych zastosowań. Wiemy, że Maxwell, sprowadzwszy „światło“ do prostszego zjawiska „pola elektromagnetycznego“, był prawdziwym zwiastunem radiotele-

grafii i radiofonii, że uczony austriacki Boltzmann, przystosowując zasadę Carnota do teorii prawdopodobieństwa, odkrył ogólne prawo ewolucji, o nieobliczalnym znaczeniu dla naszego pojmowania zjawisk, które są siedliskiem materii i życia.

Cóż jest wspólnego między biciem głowy o mur a podnoszeniem walizy? To nie żart w rodzaju zagadki: znając rozmiary okrętu określić wiek kapitana. Przecież od kilkunastu lat jest zupełnie pewne, iż dwa zjawiska tak różbieżne jak bezwładność i ciężenie są w zasadzie identyczne; zobaczymy to opierając się na najprostszych obserwacjach; wyjaśnimy po drodze kilka wiadomości na ogół nie powiązanych — z winy wykładających — ale pożytecznych, ponieważ spotkać je można w przeróżnych warunkach; zobaczymy także, w jaki sposób można było zważyć Ziemię, znaleźć przybliżony ciężar całego Wszechświata i jego wymiary.

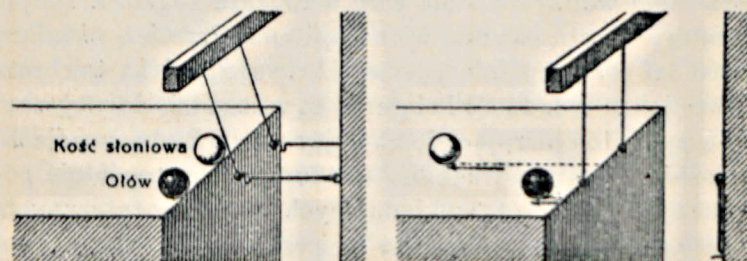
Co to jest bezwładność?

Wiedza opiera się na faktach branych z życia codziennego; ale nie wszystkie są jednakowo dla niej pożyteczne. Niedobrze byłoby na przykład uciec się tu do przykładu cyklisty jadącego po pochyłości, ponieważ czynniki tu działające są i zbyt liczne, i zbyt złożone: niezależnie od samego cyklisty, od wymiany jego energii i pędu z otoczeniem, rower jest zastosowaniem praw bezwładności i ciężenia, oporu powietrza i tarcia, sztywności stali i elastyczności gazu itd. Wydzielenie poszczególnych zjawisk, których wynikiem jest całość faktu, byłoby bardzo kłopotliwe.

Lepiej pouczy nas doświadczenie schematyczne. Co to jest bezwładność?

Wyobraźmy sobie, że mamy gładki stół poziomy (rys. 15) i dwie kule równej wielkości (np. o 7 cm średnicy), jedną z kości słoniowej, drugą z twardego ołowiu. Jak je puścić w ruch za pomocą jednakowej siły? Moglibyśmy je popchnąć, jak to czynią dzieci, dwoma kolejnymi prztycz-

kami; jednakże dla większej ścisłości użyjemy stalowych kulek (łożyskowe o 11 mm średnicy), zawieszonych na nitkach równej długości, jednakowo odchylnych (od prostopadłej) i podtrzymywanych przez dwa haczyki. Z tak pierwotnym materiałem przedsięwzięmy prawdziwą próbę naukową: urządziliśmy się tak, aby działać



Rys. 15. Przygotowanie do świadectwa przeznaczonego do porównania masy dwu dużych kul jednakowej objętości (z ołowiu i kości słoniowej). Małe kulki są jednakowe i spadają z tej samej wysokości.

Rys. 16. Dwie małe kulki poprzedniego rysunku spadają jednocześnie i uderzają dwie duże kule, ustawione na brzegu poziomego stołu: kula z kości słoniowej toczy się sześć razy szybciej od ołowianej.

w okolicznościach zupełnie jednakowych, gdzie tylko jeden czynnik jest różny — materiał kul, które mają być puszczane w ruch.

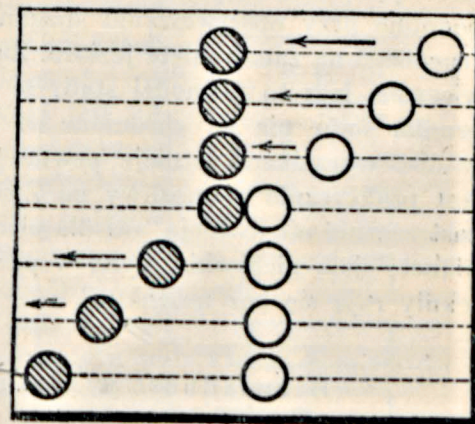
Nagłym uderzeniem przedramienia — albo lepiej jeszcze przez poziomo spadającą drewnianą linijkę — zwalnia się równocześnie obie stalowe kulki, które uderzają duże kule, te zaś zaczynają się toczyć jednocześnie.

Po chwili widok jest taki, jak na rys. 16; jak można było przypuszczać, kula z kości potoczy się szybciej od ołowianej; przypuśćmy sześć razy szybciej — gdy pierwsza przebiegnie 3 cm na sekundę, druga tylko 0,5 cm; albo też kula ołowiana zużyje sześć razy więcej czasu, aby dobiec do przeciwległego końca stołu.

Określa się w ten sposób główną właściwość materii — jej masę¹: jeżeli dwa ciała poddawane są temu samemu

¹ W następnym rozdziale wyjaśnimy, że trzeba odróżnić kilka rodzajów masy.

uderzeniu czy pchnięciu, to ciało uzyskujące większą szybkość posiada mniejszą masę; sześciokrotnie większej szybkości odpowiada sześć razy mniejsza masa. Masę oznaczoną przez jedność (1) przechowuje się w parku Saint-Cloud w pawilonie Breteuil w postaci bloku platynowego; nazywa się ona międzynarodowym kilogramem i jest niezmiernie bliska masie jednego litra wody destylowanej. Masa, wielkość fizyczna wymierzalna, precyzuje to, co się mętnie rozumie przez słowo bezwładność. Pojęcie masy w obecnym znaczeniu pochodzi od Niemca Keplera i Anglika Newtona, żyjących w XVII w.



Rys. 17. Próba uderzenia przeprowadzona na dwóch złotych. (Dwie monety leżą na stole gładkim i poziomym; rzucamy monetę prawą na lewą, która jest początkowo nieruchoma. Rysunek przedstawia kolejne położenia obu monet, tak jak gdyby każda linia była wycinkiem filmu kinematograficznego.)

Opisane doświadczenie (rys. 15 i 16) może być prościej powtórzone przez popchnięcie monety — 50 groszowej i dwuzłotowej — które odegrają rolę kul z kości i z ołowiu. Również bardzo obrazowe jest położenie na stole monety 1 złotego (odwróconej orłem) i uderzenie w nią drugą taką samą monetą (odwróconą reszką): przez uderzenie moneta ruchoma raptownie się zatrzymuje, moneta zaś przedtem nieruchoma zaczyna sunąć z tą samą szybkością (rys. 17).

Łatwo zrozumieć, że ciało pozostanie wiecznie w spoczynku, o ile żadna siła zewnętrzna czy wewnętrzna nie będzie nań działała; ale, choć to jest mniej oczywiste, ciało znajdujące się w ruchu z pewną szybkością i chro-

nione od wszelkich oddziaływań zachowa wiecznie tę szybkość. Żeby zrozumieć ścisłość tego twierdzenia, które się nazywa zasadą bezwładności, wystarczy przewrócić do góry rower i puścić w ruch przednie koło: zdumiewająco długo będzie się obracało. Zdziwienie będzie podobne przy obserwowaniu ślizgania się kawałka lodu rzuconego na zamrożone jezioro. Zapewne, ruch nie trwa wiecznie, lecz to pochodzi stąd, że ani koło roweru, ani grudka lodu nie są chronione od innych oddziaływań; w obu wypadkach istnieje pewne tarcie. Ruch wieczny jest praktycznie niemożliwy na Ziemi; zresztą powyższe zastrzeżenia nie istnieją ani dla atomów materii, ani dla planet; ciała niebieskie płyną w próżni bez tarcia, a molekuly roją się bez ustanku.

Bezwładność w życiu praktycznym.

Ruch jest bez wątpienia najczęstszym ze zjawisk świata zmysłowego: kurczenie się mięśni, przestawianie mebli, użycie środków przewozowych — to są zjawiska, których jesteśmy świadkami lub aktorami kilka tysięcy razy dziennie, a zawsze stosuje się do nich zasada bezwładności.

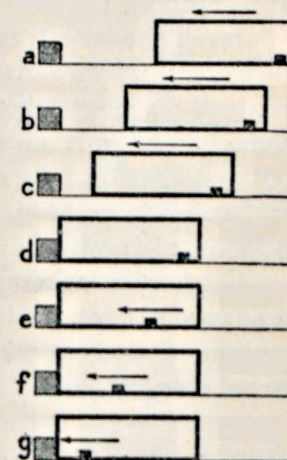
Rys. 18 schematyzuje możliwie najprościej działanie tej zasady w wypadku przeniesienia ruchu: pudełko porusza się z szybkością stałą z prawa na lewo; na dnie leży moneta nieruchoma względem niego, o ile pudełko nie zmieni szybkości (rys. 18 — a, b, c). W „d“ pudełko spotyka przeszkodę i nagle się zatrzymuje; łatwo zauważyć, że moneta otrzymuje nagle szybkość, jaką przedtem miało pudełko, i przedłuża ruch niejako na własną rękę (rys. 18 — e, f, g). Opierając się na tym przykładzie powiemy, że w momencie „d“ na monetę działała przez bardzo małą chwilę siła, zwana siłą bezwładności.

Gdyby pudełko było ze szkła absolutnie przezroczystego (nie byłoby go wtedy widać), to przyglądający się powyższemu doświadczeniu nie zobaczyłby niczego nadzwyczajnego w ruchu przeniesionym na monetę w mo-

mentcie „d“; można stwierdzić na rys. 18, że poszczególne, kolejne pozycje pieniądza leżą na linii prostej. Innymi słowami: siły, którym podlegają ciała, są względne wobec pewnego wskaźnika (tutaj stół albo pudełko); zasługą Einsteina jest i to, że zrozumialej wyjaśnił pożytek tych elementarnych uwag.

Rys. 18 może również przedstawiać wagon, w którym stoi podróżny. Dopóki szybkość jest stała, pasażer nie ma żadnej trudności w utrzymaniu równowagi; co więcej — gdyby nie słyszał hałasów, nie widział przebiegających słupów, to nie mógłby wiedzieć, czy wagon jest w ruchu czy też nie. Z tego samego powodu, gdy jeden z dwu pociągów stojących na stacji poruszy się, to nie wiadomo, czy rusza ten, w którym siedzimy, czy też inny w przeciwnym kierunku (nowy przykład względności). Gdy położyć się w nocy na ławce wagonu, trudno jest określić, w jakim kierunku idzie pociąg. Wreszcie ruch Ziemi, choć fantastycznie szybki (30 km/sek względem Słońca), nie ma żadnego zmysłami spostrzegalnego wpływu na nas.

Wróćmy jednak do naszych przykładów: pudełka (rys. 18) i wagonu. Wypadkiem „d“ będzie chwila, w której motorniczy zbyt gwałtownie zahamuje: pasażer zachowa szybkość, którą miał względem drogi, a ponieważ jego stopy nie mogą ślizgać się po podłodze, górna część ciała będzie rzucona w kierunku jazdy. Tak samo zbyt szybkie ruszenie (na drugim biegu) przewróci go w kierunku przeciwnym do jazdy. Szczerze doradzam czytelnikowi zrobić rysunek schematyczny z pudełkiem i monetą, który by wyjaśniał wypadek gwałtownego startu.



Rys. 18. Skutki bezwładności przekazanej. Pudełko, na dnie którego leży moneta, porusza się ruchem jednostajnym (a, b, c); w punkcie d nagle się zatrzymuje; moneta podejmuje przerwany ruch (e, f, g).

To samo zachodzi, gdy wyskakuje się z jadącego autobusu („zabrania się wysiadać w biegu”): pasażer zostaje pchnięty przed siebie i żeby uniknąć upadku na twarz, musi odchylić się w tył, tym więcej, im większa jest szybkość autobusu.

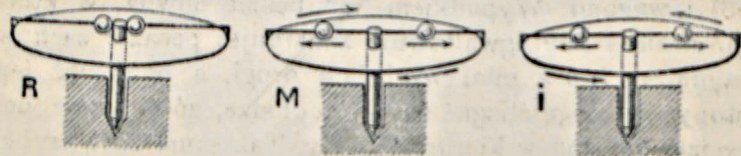
Jeżeli chodzi o tramwaj, w którym wysiadanie odbywa się z boku, trzeba zawsze odwrócić się przodem do kierunku jazdy, lewą nogę trzymać na stopniu, prawą postawić na ziemi. Jeżeli wóz nie zatrzymał się zupełnie, trzeba biec po wyskoczeniu, żeby nie przejść zbyt raptownie od pewnej szybkości do zerowej i w ten sposób zachować swoją naruszoną równowagę.

Kucharka osuszająca sałatę w serwecie, robotnik osadzający młot na trzonie, pies, który otrzepuje się po wyjściu z wody — nieświadomie stosują tę samą zasadę bezwładności.

Siła odśrodkowa.

Żeby już skończyć z rolą bezwładności w życiu codziennym, pożyteczne będzie uzupełnić uwagi dotyczące ruchu postępowego kilkoma innymi o ruchu obrotowym.

Teoria wskazuje a doświadczenie potwierdza, że siła bezwładności — o ile ruch obrotowy jest jednostajny — działa po linii prostej, skierowanej od osi do rozważanego punktu: to właśnie nazywamy siłą odśrodkową. Weźmy pod uwagę poziomą tarczę, mogącą się obracać naokoło pionowej osi; tarcza zaopatrzona jest w poziomy drut żelazny,

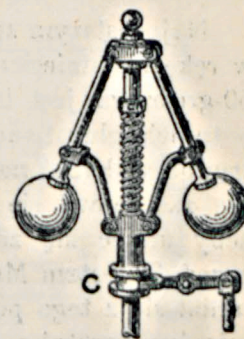


Rys. 19. Działanie bezwładności podczas obrotu. Dwie kulki nawleczone są na poziomy pręt, równoległy do koła. Jeżeli obracać kołem w kierunku wskazówek zegara (M) lub w odwrotnym (i), obie kulki posuną się w kierunku obrotu pod wpływem siły odśrodkowej.

na który są luźno nawleczone dwie drewniane kulki (rys. 19). Póki tarcza jest w spoczynku (rys. 19, R), kulki są również nieruchome. Ale z chwilą gdy obracamy tarczą w którymkolwiek kierunku (rys. 19, M, i), stwierdzamy, że obie kulki zaczynają się poruszać w kierunku obrotu i że zatrzymują się możliwie najdalej od środka; pobudza je siła odśrodkowa, która wcale nie jest fikcją, jak często mylnie twierdzą, ale czymś równie rzeczywistym jak każda inna siła (przyciągania, elektryczna, magnetyczna itd.).

Siła odśrodkowa działa w wielu przyrządach stosowanych w przemyśle, jak pompy odśrodkowe, wentylatory, suszarnie obrotowe, centryfugi do mleka (wirówki), regulator Watta (rys. 20). Właśnie ta siła naciąga sznurki procy, pozwala obracać pełnym kubłem bez wylania jednej kropli wody albo jeździć wewnątrz beczki (looping the loop, koło śmierci), na rowerze lub samochodzie; każe nachylać szyny na wirażach, budować skośne welodromy i autodromy, zmusza biegaczy i cyklistów do mimowolnego pochylania się na zakrętach. Powierzchnia wody w obracającym się naczyniu jest w środku wgłębiona; do budowy śmigieł, kół młyńskich, rozprędkowych dynamomaszyn i motorów musimy użyć takich materiałów, które by się nie przesunęły i nie popękały, pamiętając, że skoro liczba obrotów podwoi się, siła odśrodkowa urośnie nie dwa, lecz cztery razy.

Powyższe przykłady wystarczą do wykazania pierwszorzędного znaczenia bezwładności w życiu praktycznym; zobaczymy niebawem, że jej udział w teorii nie jest mniejszy, ponieważ odgrywa ona wielką rolę w ogólnej teorii



Rys. 20. Regulator odśrodkowy. Skoro szybkość maszyny zwiększa się, kule odchylają się od osi obrotu pociągając pierścień C, którego ruch jest wykorzystany do zmniejszenia dopływu pary. Na odwrót gdy szybkość się zmniejsza, kule opadają, co przywraca poprzedni dopływ pary.

względności. Ale najpierw trzeba przypomnieć, na czym polega ciążenie, którego szczególnym tylko wypadkiem jest ciężar.

Ciężar i ciążenie.

Najprostszym sposobem ocenienia ciężaru jest wzięcie w rękę i podniesienie przedmiotu. Czuje się, że moneta 50-groszowa jest lżejsza od 2-złotowej. I po cóż mówić o takich głupstwach? — może zapytacie. Nie będzie mi trudno wykazać na swoją obronę, że nieuprzejmy krytyk nie zastanowił się nad pytaniem. O to właśnie chodzi, żeby umieć się zdziwić, bo jest godne pożałowania, iż przed Ernestem Machem i Albertem Einsteinem nikt nie umiał się z tego powodu dziwić. A z tego płodnego zdumienia powstała cudna teoria, przeczuła przez Macha, sprecyzowana przez Einsteina, teoria ogólnej względności, której zaraz poświęcimy kilka słów.

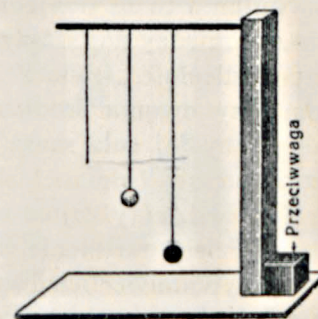
Oczywiście, ważenie w rękę daje pojęcie bardzo mętne i jedynie jakościowe. W poprzednim doświadczeniu (rys. 16) na kuli kościanej i ołowianej wykonaliśmy doświadczenie, które było „jakościowym pchnięciem”; teraz na tychże kulach spróbujemy doświadczenia, które będzie „jakościowym” zważeniem, zużytkowując zjawisko zniekształcenia (deformacji). Przetnijmy gruby sznurek gumowy na trzy równe kawałki, przypuśćmy 3-cmetrowe. Do dwóch przyklejamy kule i wszystkie trzy zawieszamy (rys. 21). Pod ciężarem kul sznurek gumowy (który działa jak mały „dynamometr”) wydłuża się (zniekształca) do 3,3 cm dla kuli kościanej i 4,8 cm dla ołowianej. Innymi słowy, wydłużenie jest sześć razy większe dla ołowiu niż dla kości; kula ołowiana jest sześciokrotnie cięższa, więcej wająca od kuli z kości słoniowej tych samych rozmiarów.

Wynik, do którego doszliśmy, jest zupełnie prawidłowy; potwierdzają go przyrządy niezwykle czułe, wynalezione przez węgierskiego uczonego Rolanda Eötvösa, do których jeszcze wrócimy. A więc ciała najcięższe (rys. 21) są za-

razem najbardziej bezwładne (rys. 16). Oto znów dwie właściwości materii, zmieniające się jednakowo a jak najodmienniejsze. Na razie bez komentarzy zanotujmy to podobieństwo; wytłumaczenie nastąpi później.

W życiu codziennym spotyka się ciężar równie często jak bezwładność: dzięki niemu stopy opierają się na ziemi, ciała spadają, działają wahadła zegarów. Uczony włoski Galileusz przedsięwziął w XVII wieku eksperymentalne i bardzo wszechstronne studium tego zjawiska, posługując się równią pochyłą; ale dopiero Newton związał ciężar ziemski z daleko ogólniejszą dziedziną faktów, przez wypowiedzenie sławnego prawa powszechnego ciążenia (1666 r.).

Podanie mówi, że Newtona uderzyło podobieństwo między spadaniem jabłka z drzewa a ruchem Księżyca naokoło Ziemi: oczywiście, obrót tego satelity może być porównany z obrotem kamienia na końcu procy. Skoro kamień nie wyslizguje się „po stycznej”, to znaczy, że powstrzymuje go elastyczna siła sznurka; tak samo Księżyc poddany jest ze strony Ziemi sile, zwanej siłą ciążenia; która mu nie pozwala oddalić się i która właśnie sprawia, że jabłko spada. Newton stwierdził, że wszystkie ciała przyciągają się proporcjonalnie do swojej masy i w stosunku odwrotnie proporcjonalnym do kwadratu wzajemnej odległości. Obieg planet i ruch ziemskich przedmiotów zostały sprowadzone do jednego prawa, co znacznie uprościło nasze pojęcie o wszechświecie.



Rys. 21. Co to jest ciążenie? Przecinamy sznurek gumowy na trzy kawałki: pierwszy wisi luźno, na drugim i trzecim są zawieszone kule, jedna z kości, druga z ołowiu. Widać, że przyrost wydłużenia jest sześciokrotnie większy dla ołowiu niż dla kości.

Ile waży ziemia?

Newtonowi udało się ponadto dowieść drogą matematyczną, opierając się na prawie grawitacji — potwierdziły to doświadczenia — że jeżeli mamy do czynienia z dwiema kulami, to za wzajemną ich odległość nie należy brać odstępu między najbliższymi ich powierzchniami, ale trzeba wziąć odległość „średnią“, która jest dokładnie odległością pomiędzy dwoma środkami kul: każda z kul przyciąga, jak gdyby jej cała masa była zebrana w środku, niezależnie od objętości.

Nie będziemy zajmowali się tu pracami, które pozwoliły na ściśle określenie wymiarów naszego globu; wystarczy przypomnieć ich wynik, którego każdy uczył się w szkołach początkowych: „metr jest dziesięciomilionową częścią ćwierci południka ziemskiego (paryskiego)“; promień więc planety zawarty jest między 5.500 i 6.000 kilometrów; określono go zresztą z dużo większą dokładnością. Dla poznania masy Ziemi konieczne jest ilościowo zbadać grawitację ciał o znanych masach, to znaczy zmierzyć wzajemne przyciąganie dwóch ciał na powierzchni ziemi.

To przyciąganie jest, zresztą, nadzwyczaj słabe; jeśliby tak nie było, zobaczylibyśmy np., że na stole butelka z karafką rzucają się na siebie wzajemnie. Jednak tak nie jest, bowiem siła, którą wywierają na siebie dwa ciała, jest znikoma w porównaniu z siłami tarcia, które im przeszkadzają w przesuwaniu się. Doświadczenie z siłą przyciągania było zrobione po raz pierwszy przez Anglika Cavendisha, żyjącego za czasów rewolucji francuskiej, i odtąd było wielokrotnie powtarzane, ale pod zmienioną cokolwiek postacią, o której zaraz będzie mowa.

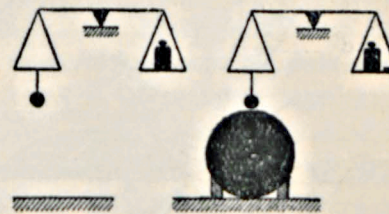
Zawiesza się pod miseczką wagi gałkę ołowianą o 10 cm średnicy (rys. 22) i równoważy się przyrząd przez położenie ciężaru na drugiej miseczce. Poniżej podsuwa się pod tę gałkę dużą kulę (również ołowianą) o 60 cm średnicy, której masa jest równoważna jednej tonie.

Waga przechyla się lekko na stronę kuli i aby ją znowu doprowadzić do równowagi, trzeba dorzucić ciężaru (około jednej dziesiątej miligrama) na drugą miseczkę. To doświadczenie, które zresztą można zrobić pięćdziesiąt razy dokładniej, określa siłę wywieraną przez dużą kulę na małą.

Posiadamy więc wszystkie dane potrzebne do obliczenia, skoro dokładnie wyrównaliśmy wpływ przyciągania kuli przez 0,1 miligrama. Na tej podstawie określamy przeciętną gęstość Ziemi; jest ona pięć razy większa od gęstości wody: liczba zupełnie dopuszczalna. Skoro się zna objętość i gęstość Ziemi, iloczyn tych dwóch wielkości będzie jej masą: wartość przybliżona w tonach wynosi 6 i dwadzieścia jeden zer¹ czyli 6 kwintylionów.

Jeszcze ostatnia uwaga, aby uniknąć jakichś dwuznaczności. Jeżeli używa się wyrażenia: „Ile waży Ziemia?“ — nie chodzi o ocenę ciężaru; wiemy bowiem, że ciężarem ciała jest siła, którą Ziemia nań wywiera, nie miałoby więc żadnego sensu mówić o ciężarze globu. Ten dwuznaczny zwrot — nie wiadomo jak go uniknąć w braku lepszego wyrażenia — pochodzi stąd, że gdy waży się przedmiot na szalach, mierzy się jego masę a nie wagę. Zamiast słowa „ważyć“ powinno się stworzyć pochodne od „masy“; otóż jedyne możliwe słowa „masować“ używa się w zupełnie innym znaczeniu. To jest powód, dla którego na pytanie: „Ile waży Ziemia?“ odpowiadamy: jej masa wynosi sześć kwintylionów ton. Masa, to znaczy jej opór wobec zmiany ruchu, jej bezwładność, albo, co praktycznie wychodzi na jedno, jakość materii, z której składa się nasz glob.

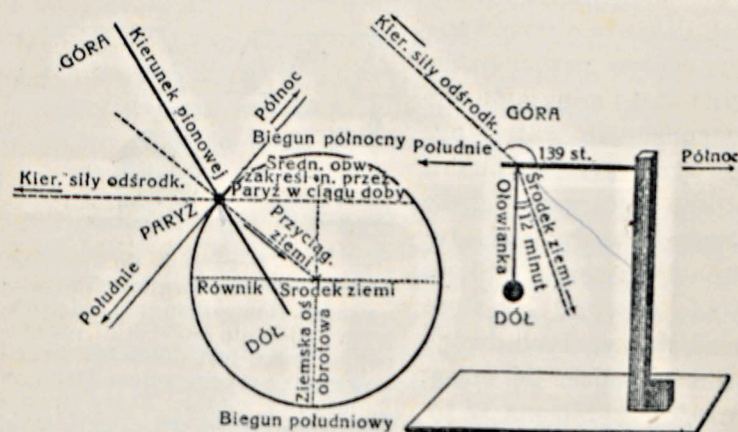
¹ 6.000.000.000.000.000.000.000 ton.



Rys. 22. Przyrząd do ważenia Ziemi. Szale są początkowo w równowadze (lewy rysunek). Na prawym działanie dużej kuli ołowianej na gałkę jest dokładnie zrównoważone przyciąganiem Ziemi na dodatkowy ciężar, który trzeba było dorzucić na drugą miseczkę.

Doświadczenie Eötvösa.

Najczęściej bezwładność i ciężenie występują w tym samym zjawisku jednocześnie: cyklista, który wjeżdża na pochyłość, musi naciskać pedały, aby osiągnąć pewną szybkość (bezwładność) i zarazem walczyć z przyciąganiem



Rys. 23 i 24. Co to jest pion? Rysunek lewy przedstawia przekrój Ziemi, która obraca się naokoło linii łączącej bieguny. Pionowa jest kierunkiem wypadkowym dwu sił: jedna (znacznie większa) jest siłą ciężenia, pochodzącą od Ziemi; druga jest siłą bezwładności (odśrodkową), wypływającą z tego, że każdy punkt na Ziemi zakreśla w dwadzieścia cztery godziny koło. Rysunek prawy jest powtórzeniem lewego tylko w skali 2,000.000 razy większej: z powodu siły odśrodkowej globu przedłużona ołowianka nie przeszłaby przez środek Ziemi.

ziemskim (ciężenie). To samo dzieje się w dużo prostszym przykładzie kierunku pionu, choćby się z początku wydawało inaczej.

Rysunki 23 i 24 jasno wskazują, dlaczego ołowianka, czyli według definicji — „pion“, nie przechodzi akurat przez środek Ziemi: ponieważ w rzeczywistości każde ciało jest poddane nie tylko sile przyciągania, ale również sile odśrodkowej, skoro np. Paryż opisuje w ciągu dwudziestu czterech godzin koło, którego promień jest mniej więcej równy trzem czwartym promienia ziemskiego. Pod wpływem tych dwu sił — ciężenia i bezwładności — kula za-

wieszona na nitce ma kierunek pośredni, jak widać na rysunku 24. Zresztą ponieważ siła bezwładności (odśrodkowa) wynosi w Paryżu tylko trzy setne siły ciężenia, pionowa jest odchylona jedynie o kąt dwunastu minut od kierunku, który by posiadała, jeśliby się Ziemia nie obracała.

Jeśli zamiast ołowiu wieszać na nitce kulki stalowe czy szklane, otrzymane piony będą miały jednakowe odchylenie, o ile bezwładność i ciężenie zmieniają się dokładnie w tym samym stosunku. Eötvös wyzyskując skręcanie bardzo cienkich nitek dowiódł, dzięki niezmiernie czułym przyrządom (1891 r.), że ten dwunastominutowy kąt jest zawsze niezmienny, nie licząc nieuniknionych błędów, ograniczonych zresztą do pięciu milionowych części minuty kąta. Tak więc najdrobiazowsze doświadczenia potwierdzają wynik, który da się przewidzieć na podstawie prób jakościowych: najbezwładniejsze są zawsze ciała najcięższe, niezależnie od swojego składu.

Jak usunąć ciężenie?

Angielski pisarz Wells opisał w jednej z najciekawszych swych fantazji wynalezienie nieprzenikliwych zasłon, usuwających działanie grawitacji, co pozwoliło na podróż po gwiazdnych przestrzeniach; taki jest temat powieści „Pierwsi ludzie na księżycu“, napisanej jakieś trzydzieści lat temu. Dzisiaj wiemy już, że jest to czysta utopia, ale możemy sobie wyobrazić okoliczności, w których ciężenie byłoby zupełnie usunięte.

Siła odśrodkowa na równiku jest ściśle pionowa i skierowana w górę, jak łatwo przekonać się z rysunku 23. Obliczono, że gdyby obrót Ziemi naokoło osi był siedemnaście razy szybszy, to znaczy gdyby doba zamiast 24 godzin trwała godzinę i 24 minuty (42 minuty dnia i tyleż nocy), to ciężar na równiku już nie istniałby. Na biegunie, oczywiście, nic by się nie zmieniło.

Juliusz Verne w powieści „Od Ziemi do Księżyca“

(1865 r.) opisał tego rodzaju wypadek, który zaszedł dokładnie w chwili, gdy przyciągania naszego globu i jego satelity zrównoważyły się, a któremu ulegli dwiętnastego dnia podróży na Księżyc podróżnicy zamknięci w pocisku.

Gdyby więc w ten sposób usunąć ciężar, kula puszczone w powietrzu pozostałaby dokładnie tam, gdzieśmy ją „położyli“, rzucona zaś w pewnym kierunku leciałaby dalej w nieskończoność po linii prostej. Bieg promienia świetlnego byłby ściśle prostoliniowy, co nie jest słuszne, jak wiemy dzisiaj, na powierzchni Ziemi, a tym mniej na powierzchni Słońca. Słowem, mówiąc językiem Einsteina, stworzonoby przestrzeń bez krzywizny.¹

Oczywiście, niemożliwością jest przyspieszyć obrotowy ruch Ziemi, ale istnieje inny sposób — również teoretyczny — lokalnego przynajmniej zniesienia grawitacji: wsiąść do windy swobodnie spadającej w próżni po linii pionowej. Takie straszne wypadki zdarzają się czasem w szybach kopalń, wskutek przerwania liny utrzymującej kosz. Gdyby jadący taką windą w pewnej chwili puścił przedmiot trzymany w ręku, to obserwatorzy zewnętrzni zauważyliby, że przedmiot spada z szybkością windy; w oczach pasażera, przeciwnie, przedmiot zostałby tam, gdzie go puszczone, unosząc się w przestrzeni, jak gdyby nie było ciężenia. Ażeby w oczach pewnych osób zniszczyć działanie ziemskiego pola grawitacyjnego na przedmioty, wystarczy pozwolić im spadać razem w oderwanej windzie... Dla nich samych wszystkie objawy ciężkości znikną: częściowo odczuwamy to już w zwykłych warunkach w chwili, gdy zaczynamy windą zjeżdżać na dół.

Identyczność bezwładności i ciężenia.

Istnieje więc zupełna równoważność między bezwładnością i ciężeniem. Podobnie jak niemożliwością jest dostrzec ruch Ziemi a jeszcze ogólniej — każdy wspólny

¹ Przynajmniej ta krzywizna byłaby mniejsza od krzywizny przestrzeni międzygwiazdnej.

z nami ruch jednostajny, tak samo jeśli znajdujemy się wewnątrz jakiegoś zamkniętego systemu, który zmienia szybkość, nie wiadomo, czy ta zmiana pochodzi z działania ciężenia — jak w wypadku spadania ciał — czy jest wynikiem bezwładności — jak w wypadku nagłego ruchu monety wewnątrz pudełka (rys. 18).

Newton pierwszy sprowadził ciężar do przyciągania ziemskiego. Einstein dowiódł, że siła ciężenia powstaje z zaburzeń w budowie przestrzeni.

Starożytni Grecy ograniczali swój horyzont do kilku kilometrów, chociaż Eratostenesowi udało się znaleźć wartość promienia ziemskiego dosyć dokładnie. Odrodzenie ćwiczyło się w mierzeniu astronomicznych odległości. W następnym rozdziale pokażemy, że nasi współcześni nauczyli się od Einsteina oceniania rozmiarów całego Wszechświata, równocześnie utożsamiając naukę o bezwładności i ciężeniu z nauką o przestrzeni, tj. geometrią.

Mimo kilku odosobnionych sprzeciwów teoria Einsteina przeszła liczne próby sprawdzania doświadczalnego i już dzisiaj nikt jej poważnie nie przeczy.

CO TO JEST MASA?

Pojęcie masy jest jedną z podstaw współczesnej wiedzy; ono pozwala określać materię w jej wielu właściwościach, ono odgrywa rolę zarazem i w doktrynie względności i w teoriach drobinowych. Konieczne jest podjęcie tematu już poruszonego w poprzednim rozdziale i nabycie dokładnych wiadomości, dzięki nietrudnym rozważaniom, które dadzą klucz do wielu zjawisk.

Pomiędzy pojęciami, które spełniły podstawowe zadanie w większości praw naukowych, trzeba osobne miejsce poświęcić masie, którą od Odrodzenia aż do naszej epoki zajmowała się większa część uczonych: Włoch Galileusz (1564—1642), Anglik Newton (1642—1727), Niemiec Leibnitz (1646—1716), Francuz Maupertuis (1698—1759), już bliżej nas Austriak Mach (1838—1916), Holender Lorentz (1853—1928), Francuz Langevin (urodzony w 1872 r.), Niemiec Einstein (urodzony w 1879 r.).

Zaczynając od faktów codziennego doświadczenia, dojdziemy do określenia kilku pojęć masy, które w pewnych wypadkach zgadzają się ze sobą, w innych różnią.

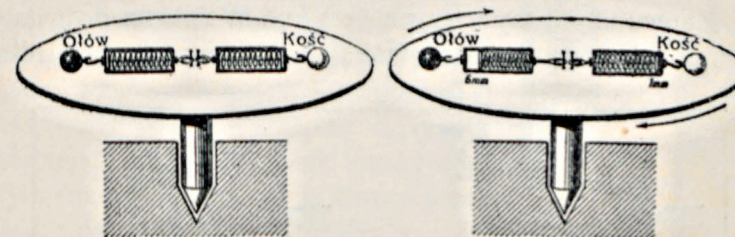
1. Masa maupertuisiańska.

Pojęcie masy przedstawia się niewątpliwie najprościej i najjaśniej w związku z zagadnieniem uderzenia. Wystarczy ostatni raz rzucić okiem na rysunki 15 i 16, które służyły do określenia tego, co do tej pory nazywaliśmy po prostu masą ciała. Odtąd żeby uniknąć gmatwaniny, powiemy, iż schematyczne doświadczenie, którym poprzedni rozdział się zaczynał, określało „masę uderzeniową” albo „masę maupertuisiańską”, od imienia francuskiego uczonego Moreau de Maupertuis, który ją po raz pierwszy badał. A więc jeżeli dwa ciała są poddane jednakowemu uderzeniu — albo, jak mówią, bodźcowi — wówczas to,

które nabiera największej szybkości, posiada najmniejszą masę (maupertuisiańską), przy czym sześciokrotnej szybkości odpowiada sześć razy mniejsza masa.

2. Masa poprzeczna.

Wróćmy do naszych kul z kości słoniowej i z ołowiu; przymocujmy je do dwu jednakowych wag sprężynowych



Rys. 25 i 26. Masa poprzeczna. W tym doświadczeniu sprężyny działają poprzecznie względem kierunku ruchu.

Rys. 25. Obie kule z poprzedniego doświadczenia są przymocowane do dwu wag (albo dynamometrów), które z kolei przymocowane są do poziomego koła, mogącego się obracać dookoła pionowej osi.

Rys. 26. Koło obraca się, obie sprężyny zniekształcają się, ale niejednakowo: wydłużenie od strony kuli ołowianej jest sześć razy dłuższe niż wydłużenie przy kuli z kości.

i to wszystko umieścimy na poziomej tarczy (rys. 25), obracając ją z wielką szybkością (rys. 26).

Stwierdza się wówczas, że obie wagi wydłużają się, lecz niejednakowo: o ile sprężyna z prawej strony, do której jest przymocowana kula z kości, wydłuża się o 1 milimetr, lewa waga — odpowiadająca kuli ołowianej — zniekształca się dużo bardziej: dokładnie sześć razy więcej.

To doświadczenie określa nowy rodzaj masy, masę poprzeczną. Nazywa się ona tak dlatego, ponieważ siły wywierane na sprężyny działają prostopadle do kierunku ruchu, a więc „poprzecznie” względem niego.

3. Masa podłużna.

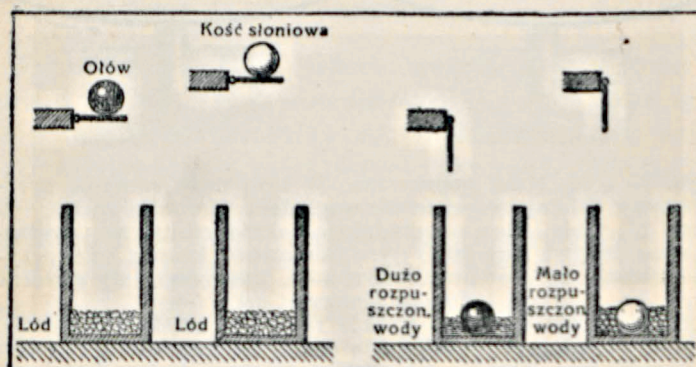
O trzecim rodzaju masy powiemy bardzo mało: spotykamy go, gdy siła działa nie prostopadle (jak w poprzednim

doświadczeniu — rys. 25 i 26) do kierunku ruchu, ale właśnie zgodnie z nim (rys. 18). Można by było poznać za pomocą pośrednich doświadczeń, że masa podłużna kuli kościanej jest sześć razy słabsza od masy kuli ołowianej.

4. Masa kinetyczna.

Przechodzimy do czwartej odmiany masy.

Znowu używamy naszych dwu kul. W nowym doświadczeniu schematycznym będziemy się nimi posługiwali dla



Rys. 27 i 28. Masa kinetyczna.
Zrzuca się kule z odpowiednio dobranej wysokości w ten sposób, aby dotknęły lodu z jednakową szybkością. Daje się zauważyć, że ilość stopionego lodu jest różna w obu kloszach: sześć razy większa w tym, w który wpadła kula z twardego ołowiu; jej masa kinetyczna jest sześć razy większa od masy drugiej kuli.

stopienia lodu; kładziemy więc kule nad kloszami z tłuczonym lodem i umieszczamy je na takiej wysokości (rys. 27), aby spadając uderzyły w lód z jednakową szybkością,¹ na przykład 5 m/sek.²

¹ Gdyby nie było oporu powietrza, obie kule powinnyby spadać z tej samej wysokości; ponieważ jednak tak nie jest, kula lżejsza musi znajdować się wyżej.

² Wysokość spadku jest rzędu 1 metra, a czas spadania około pół sekundy.

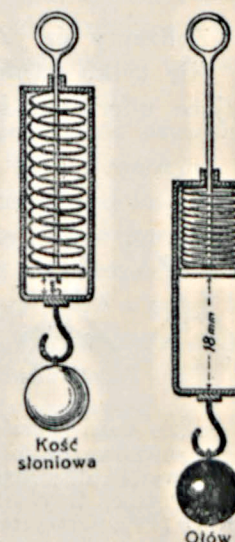
Na rysunku 28 przedstawione są dwie kule wpadające w odpowiednie klosze z lodem. Widać, że kula ołowiana rozpuszcza więcej lodu. W opisanych tu warunkach rozpuściłaby 66 miligramów, kula zaś z kości tylko 11 miligramów.

Innymi słowy, energia kinetyczna (energia ruchu) ołowiu jest sześć razy większa od energii kości słoniowej. A ponieważ obie kule są tak zawieszane, by ich szybkość była jednakowa, więc masa kinetyczna pierwszej jest sześciokrotnie większa od masy drugiej. Zagadnienie masy kinetycznej było rozważane po raz pierwszy przez Godfryda Wilhelma Leibniza.

5. Masa grawitacyjna

Grawitacja (albo siła wzajemnego przyciągania się materii), a przede wszystkim ten jej szczególny wypadek, jakim jest ciężar (albo przyciąganie przedmiotów przez Ziemię), nie odgrywały żadnej roli w poprzednich doświadczeniach (rys. 27 i 28), chodziło bowiem jedynie o ustalenie tej samej szybkości dla obu kul. A doświadczenie dałoby takie same wyniki, gdyby puścić kule wzdłuż równi poziomej i gdyby one uderzyły z jednakową szybkością (np. 5 m/sek.) o dwie bryły lodu.

Przeciwnie, jeżeli zawiesimy nasze kule na dwóch identycznych wagach sprężynowych, to Ziemia będzie je przyciągała, ale niejednakowo (rys. 29). Doświadczenie wykaże 18 mm wydłużenia dla kuli z twardego ołowiu, a tylko 3 mm dla kuli z kości słoniowej. A my opiszemy ten fakt doświadczalny mówiąc, że masa gra-



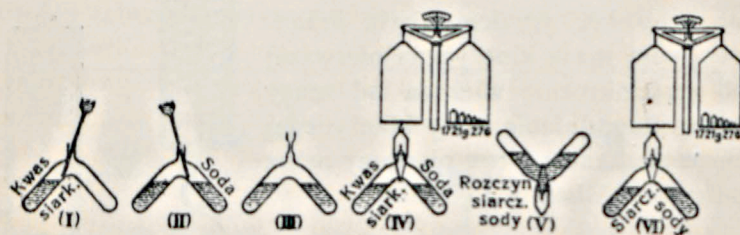
Rys. 29. Masa wagowa. Jeżeli kolejno zawiesić kule na tej samej wadze, to widzimy, że wydłużenie jest różne (w stosunku jednego do sześciu). Mówi się, że masa grawitacyjna kuli ołowianej jest sześciokrotnie większa niż przy kuli z kości.

witacyjna kuli ołowianej jest sześć razy większa od takiejże masy kuli kościanej.

6. Masa chemiczna.

Zbliżamy się już do końca tych wyliczeń.

Nie tylko istnieją masy „mechaniczne“, charakteryzujące uderzenia i bezwładność materii, lub masy „cięż-



Rys. 30. Masa chemiczna. Do dwuramienniej rurki wlewa się kolejno równoważne ilości dwu składników; do jednego ramienia kwas siarkowy (I), do drugiego sodę (II), uważając, aby ich nie pomieszać. Później, trzymając rurkę wciąż pionowo, lutuje się ją (III) i waży (IV); następnie odwraca tak, aby zmieszać ciała: otrzymuje się roztwór siarczanu sody — reakcję połączoną z wywołaniem ciepła (V). Po ochłodzeniu waży się na nowo (VI) i sprawdza się, że masa chemiczna ciał reagujących jest nie zmieniona.

zeniowe“, współdziałające w zjawiskach grawitacji (a zwłaszcza ciężaru), ale również jest masa „chemiczna“, w najrozszerzonym znaczeniu tego wyrazu, to jest obejmująca poza reakcjami (spalanie siarki, neutralizacja kwasu siarkowego przez sodę) wszelkie przechodzenia ciał do roztworu (rozpuszczanie cukru w wodzie, kauczuku w benzynie), a nawet zmiany ich stanu (topnienie lodu, parowanie wody).

Chcąc otrzymać prawidłowe wyniki, trzeba przeprowadzać chemiczne reakcje (rozkłady, zmiany stanu) w naczyniu zamkniętym. Rysunek 30 wskazuje, jak należy postępować przy reakcji sody z kwasem siarkowym w roztworach rozcieńczonych. Używa się dwuramienniej rurki; jedno ramie napelnia się kwasem siarkowym (I), drugie — odpowiednią

ilością sody (II). Następnie stapia się nad palnikiem koniec rurki, trzymając ją wciąż prostopadle (III), później waży się i znajduje, przypuśćmy, 1.721,276 g. Wreszcie wstrząsa się tak, aby zawartości ramion rurki zmieszały się ze sobą. Jedno ciało działa na drugie i wytwarza się siarczan sody¹, rozpuszczony w nadmiarze wody. Po ochłodzeniu waży się na nowo i okazuje się, że ilość gramów jest ta sama — 1.721,276.

Doświadczenie opisane na rysunku 30 było przedmiotem drobiazgowych poszukiwań przy końcu zeszłego stulecia ze strony uczonego niemieckiego Landolta, który poświęcił wiele lat na przestudiowanie z tego punktu widzenia piętnastu rozmaitych przemian. Przeprowadzał doświadczenia na ciężarach około stu gramów² i mógł być pewien dokładności do $\frac{1}{30}$ miligramu, co przedstawia niesłychaną ścisłość do trzech milionowych! I nawet w granicach takiej precyzji nigdy nie zauważył zmiany na wskaźniku wagi.

Wszyscy rozumieją, że w tym doświadczeniu z zamkniętą rurką „ilość materii“ nie zmieniła się, skoro żadne ciało materialne nie jest zdolne do przejścia szklanych ścianek; i właśnie ta niezmiennosc upoważnia do wprowadzenia pojęcia masy chemicznej i mierzenia jej za pomocą wagi.

Połączenie sześciu rodzajów masy.

Istnieje więc sześć rodzajów masy, odpowiadających sześciu różnym zjawiskom dokładnie określonym: czterem mechanicznym (pierwsze cztery), mającym związek z bezwładnością materii; jednemu (piątemu) grawitacyjnemu, dotyczącemu przyciągania materii przez materię, i wreszcie zjawisku chemicznemu, w którym chodzi o prze-

¹ Zwany popularnie solą glauberską, używaną jako środek przeczyszczający.

² Reszta, wynosząca tysiąc sześćset i kilka gramów, pochodzi z ciężaru wody, rurki itp.

miany materialne (zmiana stanu, rozkłady, reakcje w ścisłym znaczeniu).

Powierzchnowe choćby sprawdzenie wskazuje, że wszystkie sześć mas zmieniają się w ten sam sposób. Ponadto najściślejsze badania dowiodły, że nawet są identyczne, chyba że działamy w warunkach bardzo odmiennych od tych doświadczeń laboratoryjnych i naukowych, jakie przed chwilą opisaliśmy.

Dlatego można wprowadzić dla owych sześciu mas taką samą jednostkę, miarę, po prostu aby ułatwić zwykłe badania. Jednostka masy wykonana jest w formie bloku platyny przechowywanego w Saint-Cloud i nazywanego się międzynarodowym kilogramem; jego masa jest bardzo zbliżona do masy 1 litra wody destylowanej przy czterech stopniach Celsjusza.

Idea powszechnej względności.

Newton pierwszy ustalił związek między masą grawitacyjną (piąty z naszych przykładów) a przyciąganiem ziemskim na ciała. Około 1915 roku Albert Einstein dowiódł, że ciężenie jest tylko subiektywnym pozorem, a jego głębszej racji należy szukać w strukturalnych zmianach przestrzeni sąsiadujących z naszą planetą.

Einstein poszedł dalej jeszcze w swej teorii, ale trzeba poprzestać jedynie na ogólnym opisie otrzymanych przezeń rezultatów, w przeciwnym bowiem razie należałoby się uciec do najtrudniejszych dowodzeń matematycznych. Aby tego uniknąć, porównamy Ziemię do całego Wszechświata, pamiętając jednak o tej wielkiej różnicy, że Ziemia jest dla nas powierzchnią (dwuwymiarową), gdy natomiast Wszechświat jest objętością (o trzech wymiarach). Sąsiedztwo Ziemi czy Słońca jest dla Wszechświata analogiczne ze wzgórzem: powierzchnia ziemska jest więcej skrzywiona w okolicach górzystych niż na równinach; tak samo przestrzeń Wszechświata jest bardziej krzywa w sąsiedztwie wielkich mas materialnych niż w próżniach

międzygwiezdnych (wewnątrz naszej „Drogi Mlecznej“), a tym bardziej w bezmiernych próżniach dzielących różne „drogi mleczne“, różne spiralne mgławice.

Rozwińmy jeszcze dalej porównanie. Kiedy po raz pierwszy mówiono o kulistości Ziemi, było bardzo trudno oswoić się z myślą, że ludzie na antypodach są w położeniu much chodzących po suficie; jednak dziś już wszyscy wiedzą, że tam nikt nie chodzi „do góry nogami“. Słowem, powierzchnia ziemska nie jest płaska: posiada pewną ogólną krzywiznę, krzywiznę przeciętną, której przeciwstawiamy krzywizny miejscowe, w postaci Tatr, Alp, Gór Skalistych. Otóż ze znanych prac teoretycznych Einsteina wynika, że Wszechświat ma również pewną przeciętną krzywiznę, ale bardzo nieznaczną, czyli że Wszechświat jest ogromnie wielki. Domyślano się tego z pewnością i przed Einsteinem, ale nikt nie przypuszczał, że nadejdzie dzień, w którym będzie można obliczyć wymiary Wszechświata; ten dzień nadszedł dwadzieścia lat temu. Podróż naokoło Ziemi wymaga — nawet w samolocie — kilkuset godzin. Gdyby zaś podróżnik mógł się poruszać z szybkością nieco tylko mniejszą od szybkości światła (300.000 km/sek) — a to jest teoretycznie możliwe (rys. 31), i wyjechał na wycieczkę dokoła Wszechświata, to wróciłby do nas dopiero po przeżyciu 10 milionów wieków! A chociaż na Słońce przybyłby w osiem minut po swoim odjeździe z Ziemi, musiałby zużyć setkę wieków, aby wyjść z tego „tłumu“ gwiazd, jakim jest nasza „Droga Mleczna“. Po raz pierwszy więc odważono się ocenić ogromy, których tylko znikomą część widzimy przez najpotężniejsze teleskopy.

Proszę się nie skarżyć na odbieganie od przedmiotu — wracamy doń zaraz, a ta dygresja była konieczna. O ile ciężar jest po prostu wynikiem krzywizny przestrzeni w sąsiedztwie Ziemi,¹ o tyle też i masy mechaniczne są tylko

¹ Wskazane będzie przytoczyć tu przykład Metza, jednego z najlepszych popularyzatorów Einsteina: jeżeli naciągnąć na poziome kółko płatek gumy i położyć na nim pomarańczę, to spo-

dostrzegalnym pozorem, pod którym kryje się przeciętna krzywizna przestrzeni. Fizyk austriacki Ernest Mach przeczuł przed Einsteinem tę genialną ideę (1880 r.), stawiając sobie pytanie, skąd może pochodzić powszechna właściwość materii, jaką jest bezwładność? Zwrócił on uwagę na to, że bezwładność jest we wszystkich kierunkach jednakowa, i stąd powziął myśl, iż ta własność może być związana z działaniem wszystkich mas Wszechświata na dane ciało.

Dzięki Einsteinowi pomysł Macha przyoblekł się w realne kształty. Oto w jaki sposób. Skoro łódź podwodna pływa w głębinach, to znaczy że poddaje się działaniu wszystkich dotyczących ją drobinek wody. Tak samo dlatego jakiś przedmiot ma pewien opór względem ruchu, bo otoczony ze wszystkich stron innymi masami, które w całości tworzą Wszechświat, podlega z ich strony działaniu jednakowemu we wszystkich kierunkach. Z tego wynika, że masa jakiegokolwiek ciała pozwala ocenić ogólną masę zawartą we Wszechświecie; znaleziono ją: wyraża się ona w tonach przez jedność z pięćdziesięcioma zerami (patrz tabelka na str. 45).

Pełny obraz mas wszechświata.

Bardzo pouczający jest rzut oka na str. 45: na samej górze drabinki znajduje się całkowita masa Wszechświata, którą pozwolili nam obliczyć Einstein i jego współzawodnicy.

Drugą z kolei masę pod względem wielkości posiada ta wyspa gwiazd, ta mgławica, która tworzy naszą drogę mleczną. Można tu zauważyć, że we Wszechświecie jest około stu milionów miliardów „dróg mlecznych“ (jeśli przypuścimy dla uproszczenia — co jest zresztą bardzo praw-

strzeża się, że pomarańcza zniekształca gumę wokół siebie, że wywołuje pewną krzywiznę; i jeżeli teraz położyć blisko pomarańczy korkową kulkę, to spadnie ona na owoc tak, jak przedmioty spadają na Ziemię. Można więc sobie wyobrazić, że Ziemia wywołuje pewną krzywiznę przestrzeni.

		WSZECHŚWIAT
Miliardy	}	DROGA MLECZNA
miliardów		
miliardów		
miliardów		
ton		
		- MASA SŁOŃCA
		- MASA ZIEMI
Miliardy	}	- MASA KSIEŻYCA
miliardów		- MASA OCEANÓW
ton		- MASA ATMOSFERY
Miliardy	}	
ton		
		- WIEŻA EIFFLA
		- PAROWÓZ
		- PRZECIĘTNY CZŁOWIEK
Tona	-	
kilogram	-	- SREBRNY FRANK
gram	-	
miligram	-	- MASA PCHŁY
		- GRANICA CZUŁOŚCI WAGI
Miliardowa	}	
miligrama		
		- CZĄSTKI MIKROSKOPOWE
		CZĄSTKI ULTRAMIKROSKOPOWE
Miliardowa	}	- ATOM ZŁOTA
miliardowej		- ATOM WODORU
miligrama		
		ELEKTRON

Tablica mas wszechświata.

dopodobne — że wszystkie mgławice spiralne mają w przybliżeniu taką samą masę.)

Następnie idzie Słońce: masa jego jest małym ułamkiem masy drogi mlecznej, może jedną pięciomiliardową. Masa Ziemi zaś równa się $\frac{1}{333.000}$ części masy Słońca.

Wyszliśmy wreszcie z astronomicznych ogromów i wróciliśmy na Ziemię: ogólna masa wód wynosi sześć tysięcznych planety, masa atmosfery — niecałą jedną milionową.

Dalej tabela ma dużą przerwę, bo nie ma żadnego dobrego przykładu. Następnie zjawiają się już przedmioty ogólnie znane: wieża Eiffla (10 milionów ton), parowóz (80 ton), przeciętny człowiek (70 kg), moneta (5 g), pchła (pół miligrama).

Na koniec zjawiają się wielkości mikroskopijne i ultramikroskopijne, łączące się w świat atomów i pyłków atomowych. Waga szalkowa wykrywa sto milionowych miligramów. Najmniejsza cząstka mikroskopowa waży sto tysięcy razy mniej, a granica widzialności w ultramikroskopie odpowiada masie może jeszcze milion razy mniejszej.

Cząstki ultramikroskopowe zawierają atomy setkami; wskazaliśmy miejsce atomu złota (jednego z najcięższych) i najlżejszego — wodoru (dwieście razy lżejszego od złota). Na samym dole drabinki widać elektron, którego masa wynosi tysięcosiemsetną część masy atomu wodoru i którą trzeba by pomnożyć przez

1.100.000.000.000.000.000.000.000,

aby ważyła 1 gram. Elektron przedstawia na razie najmniejszą masę, jaką kiedykolwiek badali uczeni.

Istnieje związek między dwoma końcami skali z tabeli na str. 45. Skoro bowiem jedność materii jest faktem dowiedzionym, to można przypuścić, że wszechświat składa się jedynie z atomów wodoru; liczbę ich otrzymamy przez zwykłe dzielenie. Ponadto atom wodoru posiada jeden elektron (o ujemnym ładunku elektrycznym) i jeden proton (naładowany dodatnio), a więc we wszechświecie byłoby tyleż protonów, ile elektronów. Jednak nie należy

sobie wyobrażać, że choćby powierzchownie wyczerpalibyśmy kwestię rzeczywistości zewnętrznej, bowiem zajmowaliśmy się jedynie materią, pomijając promieniotwórczość, o którym zaraz powiemy kilka słów.

Elektromagnetyczne pochodzenie masy.

Bardzo ważne jest to, cośmy przed chwilą mówili o budowie — elektronowej i protonowej — wszechświata; bo jeśli materia sprowadza się do układu dwu naelektryzowanych cząstek (elektronu i protonu), to musi istnieć ścisły związek między bezwładnością a nabojem elektrycznym. Myśl tę sformułował po raz pierwszy w 1881 r. wielki Anglik J. J. Thomson (ur. w 1856 r., nagroda Nobla w 1906 r.). Thomson zauważył, że przedmiot staje się po naelektryzowaniu bardziej bezwładny. Samoidukcja jest tylko pewnego rodzaju bezwładnością elektryczności. Nie możemy zająć się tu bardziej szczegółowo tym zagadnieniem — zaprowadziłoby to nas zbyt daleko — ale i z tego widać, że krzywizna przestrzeni jest zależna od masy w jej rozmaitych postaciach, które znów z kolei zależą od elektryczności. Taka unifikacja myśli zasługuje na wzmiankę.

Różnice między masami.

Pierwszy wypadek, w którym masy się różnią.

Pokazawszy cechy wspólne mas, przechodzimy do cech, które je różnią.

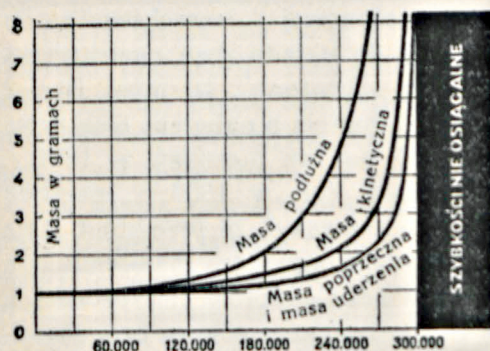
Weźmy na przykład masę podłużną. Parowóz przyczepiony do stojącego pociągu rusza a po upływie pierwszej minuty uzyskuje szybkość 20 km na godzinę. Przypuśćmy, że w drugiej minucie parowóz wykona taki sam wysiłek;¹ doświadczenie wskazuje, że w końcu drugiej minuty szybkość wzrośnie do 40 km. Innymi słowy,

¹ Przy założeniu, że nie uwzględniamy rosnącego oporu powietrza.

masa (podłużna) pociągu będzie stała: stale ten sam wysiłek daje wynik proporcjonalny do czasu trwania.

Wierzano aż do początku naszego wieku, że tak będzie zawsze, ale H. A. Lorentz i Einstein dowiedli, iż to jest błędne.

Teoria względności wskazuje, że masa nie zmienia się tylko wówczas, gdy szybkość badanego ciała jest względnie mała. W tym wypadku wszystkie masy zachowują się jednakowo.



Rys. 31. W jaki sposób masy zmieniają się zależnie od szybkości. Masa podłużna rośnie bardzo szybko; kinetyczna wolniej; inne masy jeszcze wolniej. Z tego wykresu widać, że materia nie może osiągnąć szybkości światła ani jej, tym bardziej, przekroczyć.

Przeciwie, z chwilą gdy tylko szybkość osiąga poważny ułamek prędkości światła, masy stopniowo wzrastają, ale nie jednakowo (rys. 31); jednak wszystkie rosną ponad wszelkie granice, gdy szybkość ciała zbliża się do szybkości światła: materia nigdy jej całkowicie nie osiągnie,¹ w miarę bowiem coraz szybszego ruchu staje się coraz bardziej bezwładną.

A czy teoretyczne wyniki zostały sprawdzone doświadczalnie? Tak i to z niezwykłą dokładnością, zwłaszcza w 1915 roku przez szwajcarskich fizyków Ch. Eug. Guye'a i Ch. Lavanchy'ego. Wykres (rys. 31) wskazuje, że wzrastanie mas jest nieznaczne aż do szybkości graniczącej z 200.000 kilometrów na sekundę. Do najszybszych cząstek należą:

1. cząstki helu wyrzucane przez rad C' (20.000 km/sek);

¹ Tym bardziej niemożliwa jest większa szybkość.

2. elektrony w rurach próżniowych (czasem ponad 100.000 km/sek);

3. elektrony wyrzucane przez ciała radioaktywne (297.000 km/sek).

Pierwsza grupa nie mogła wykazać zmian masy, natomiast trzecia dostarczyła lepszych wyników: przy 297.000 km/sek elektron powiększa swoją masę w stosunku 1:7 (rys. 31). Dzięki uczonym szwajcarskim te niezaprzeczalne wyniki stały się jednym z najoczywistszych potwierdzeń względności.

Jeszcze jeden rzut oka na rysunek 31, aby zobaczyć, jak układa się sześć rodzajów masy:

A) Najniższa krzywa odpowiada masom I, II i V (maupertuisiańskiej, poprzecznej, grawitacyjnej).

B) Krzywa środkowa przedstawia tylko masę IV (kinetyczną).

C) Najwyższa krzywa stosuje się do masy III (podłużnej).

D) Ale co się stało z masą chemiczną (VI)?

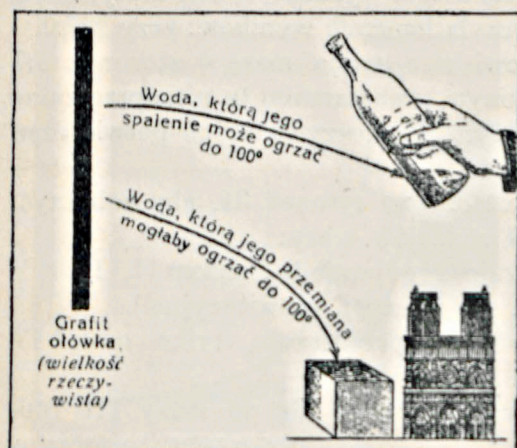
Schematyczne doświadczenie (rys. 30) mówi, że ilość elementarnych cząstek materialnych nie zmienia się nawet podczas najgwałtowniejszych przemian (radioaktywność). Ilość nie zmienia się również pod wpływem szybkości.

Drugi wypadek, w którym masy się różnią.

Albert Einstein i Paweł Langevin prawie równocześnie (około 1912 r.) zwrócili uwagę na ścisły związek między masą i energią. Masa ciała — jak wykazali ci dwaj sławni uczeni — jest tylko ogólną, zawartą w nim energią. Stąd ciekawy wniosek: ilekroć zmienia się energia ciała, zmienia się jego masa.

Wróćmy do chemicznego doświadczenia z rysunku 30; używaliśmy 100 gramów kwasu siarkowego. Podczas reakcji wywiązywanie ciepła powodowało utratę energii; otóż ciepło wywiązane wynosi 13.600 (małych) kalorii,

a ponieważ, według Einsteina i Langevina, 1 gram = 21.500.000.000.000 (małych) kalorii, więc łatwo obliczyć, że rurka (po ochłodzeniu) musiała stracić dokładnie jedną półmiliardową miligramy masy.



Rys. 32. Oszacowanie energii wewnątrzatomowej. — Gram węgla, przedstawiony w rzeczywistej wielkości na lewo, może spalając się ogrzać do 100° decylitr wody. Jeżeli zaś można go było całkowicie zamienić na wodór, to wyzwoliłoby się energię zdolną do zagotowania masy wody zawartej w sześcianie, którego bok równałby się dwóm piątym długości kościoła Notre-Dame w Paryżu. Gdyby zamienić gram węgla na promieniowanie (połączone z zupełnym zniknięciem materii), to bok sześcianu byłby wyższy od wieży Eiffla!

sób zadowalający wiele zgodnych z nią badań pośrednich. Pozwala ona np. określić wewnętrzną energię atomu albo lepiej energię wewnątrzprotonową, to znaczy tą, którą możemy wyzwolić zmuszając protony do zniknięcia.

Weźmy 1 gram węgla; będzie to na przykład grafit ołówka o 2 mm średnicy i 35 mm długości (rys. 32). Otóż taki grafit zawiera w sobie ogółem energię wynoszącą 200 milionów kilowat-godzin. Spalając węgiel na powietrzu

Doświadczenia Landolta nie mogły dać pozytywnych wyników, mimo zadziwiającej dokładności pozwalającej wykryć kilka setnych miligramy: musiałyby być pięćdziesiąt milionów razy bardziej ścisłe, a na razie nie mamy na to żadnego środka.

Teorię Einsteina — Langevina (o bezwładności energii) potwierdza również w spo-

uzyskuje się 10 wat-godzin, to znaczy dużo mniej niż jedną miliardową.

Unicestwianie energii w postaci promieniowania.

Wielu współczesnych uczonych szukało warunków, przy których protony mogą zniknąć dając w zamian promieniowanie; hipotezy postawione w 1904 r. przez sławnego astronoma angielskiego Jamesa Jeansa zostały w ostatnich czasach bardziej sprecyzowane. „Dematerializacja“ protonów, niemożliwa na Ziemi, odbywa się, być może, wewnątrz olbrzymich gwiazd, gdzie temperatura dochodzi do setek milionów stopni Celsjusza.

W 1926 r. uczonej niemieckiej W. Lenz zastanawiał się, w jakim stosunku we wszechświecie znajduje się materia i promieniowanie. Znamy masę wszechświata; poza tym, dzięki równaniu Einsteina — Langevina: 1 gram = 21.500.000.000.000 (małych) kalorii, możemy obliczyć energię, którą posiada masa całego wszechświata. Z obliczeń Lenza wynika, że całkowita energia promieniowania we wszechświecie jest dokładnie równa energii materii. Można to wyrazić krócej: wszechświat zawiera tyle promieniowania, ile materii, jak również tyle elektryczności dodatniej, co ujemnej. Ale gdy materia jest na ogół zebrana w wielkich skupieniach w postaci ciał niebieskich, promieniowanie jest wszędzie. Materia — a ściślej masa — jest energią w formie nadzwyczaj zgęszczonej.

Jeżeli na zakończenie chcemy zebrać w kilku wierszach główne punkty poruszone w tym rozdziale, to powiemy:

1. poznaliśmy sześć różnych zjawisk: uderzenie, przyspieszenie (podłużne i poprzeczne), szybkość, ciężenie i reakcje chemiczne, które nas zmuszają do porównywania sześciu rodzajów mas;
2. masy są jednakowe, o ile szybkość ciał jest mała w stosunku do obserwatora;
3. zaczynają się różnić, skoro szybkość badanych ciał zbliża się do szybkości światła;

4. masa jakiegokolwiek ciała poucza o masie całego wszechświata;

5. ta masa jest skądinąd ściśle związana z elektrycznością;

6. wreszcie obecność masy w jakimś punkcie wskazuje na to, iż jest tam olbrzymia energia; na razie podziwiamy ją nic nie robiąc oprócz „wielkich oczu“. Ale może być, że jednym z przewrotów przemysłowych jutra będzie zużytkowanie choćby najmniejszej części energii kryjącej się wewnątrz materii...



R O Z D Z I A Ł C Z W A R T Y

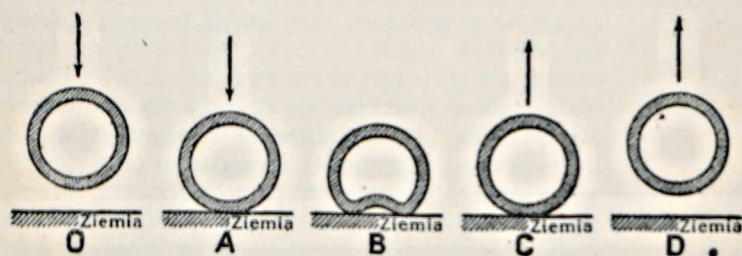
CO TO JEST UDERZENIE?

Uderzenie jest jednym z najczęstszych zjawisk, których świadkami jesteśmy co dzień. Jednak nawet powierzchowna obserwacja zmusza nas do stwierdzenia, że uderzenie może przyjmować dwie zupełnie różne postacie, zależnie od tego, czy chodzi na przykład o gałkę stalową, spadającą na taką blachę, czy też o kulę ze śniegu rozbijającą się o mur. Naturalnie w praktyce nie spotyka się ani uderzeń elastycznych, ani też zupełnie niesprężystych, ale badanie tych skrajnych wypadków pozwoliło na wyprowadzenie ogólnych praw uderzenia. Studia, przede wszystkim w dziedzinie molekuł, doprowadziły do zwiększenia wydajności w pewnych gałęziach przemysłu (np. fabrykacja amoniaku). Zbadanie uderzeń w dziedzinie atomów i elektronów ułatwiło zgłębienie samej budowy materii. Dzisiaj każdy wie, że promienie Roentgena są wynikiem uderzania elektronów o przeszkodę.

Mechanika jest badaniem ruchu i jego odmian, z pominięciem innych łączących się z nim zjawisk. A bodaj że najbliższym i najciekawszym z problemów, którymi się zajmuje, jest właśnie uderzenie; często bywa szkodliwe, nawet straszne: przychodzą na myśl wypadki samochodowe, wykolejenia, wybuchy granatów. Ale uderzenie spotyka się ciągle w praktyce, czy to chodzi o wbicie gwoźdźcia młotkiem, czy słupa kafarem, czy też o grę na fortepianie lub na... bębnie; występuje ono również w wielu grach, jak w bilardzie, tenisie, nawet w boksie. Poza tym ma duże znaczenie w większości nowoczesnych teorii o budowie materii, o reakcjach chemicznych, o elektronach i o promieniowaniu. Trzeba mu więc poświęcić osobny rozdział popularny i zarazem syntetyczny, w którym będzie zwrócona uwaga na to, co łączy i co różni rozmaite rodzaje uderzeń.

Określenie uderzenia; perkusja.

Pojęcie uderzenia łączy w sobie ściśle dwa potoczne pojęcia: siły i czasu; innymi słowy, konieczne jest dla powstania uderzenia, aby badany przedmiot został poddany sile zmiennej i to szybko zmiennej; oczywista, że im siła będzie większa i dłużej będzie działać, tym bardziej wzrośnie gwałtowność uderzenia.



Rys. 33. Pierwszy przykład uderzenia: odbicie piłki tenisowej na twardej ziemi. — Kolejne pozycje piłki oddziela czas 0,01 sekundy; widać rozplaszczanie w chwili zatrzymania (B), to znaczy w momencie gdy ruch przybiera przeciwny kierunek.

Ujęcie takie, samo przez się nie abstrakcyjne, możemy jeszcze lepiej uzmysłować przy pomocy bardzo prostego przykładu pionowego odbicia piłki tenisowej od twardej ziemi lub drzewa (rys. 33). Piłka ważąca 100 gramów, o 7 cm średnicy, spada z wysokości 60 cm, osiągając w chwili dotknięcia ziemi szybkość 3 m/sek. W O jej niższa część jest w odległości 3 cm od ziemi, więc w 0,01 sekundy znajdzie się w A; w D mamy takie samo położenie, jak w O, tylko że szybkość jest skierowana z dołu do góry.

Przy tych założeniach możemy przedstawić przebieg zdarzenia za pomocą wykresu (rys. 34): czas (w setnych sekundy) przenosimy na oś poziomą, a na oś pionową — siły wywarte na ziemię przez piłkę.¹ W O i w D siły nie działają; w A i w C siła pochodzi jedynie z ciężaru piłki;

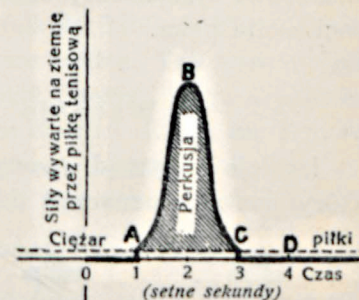
¹ Są to również siły wywierane przez ziemię na piłkę (akcja równa się reakcji); reakcja zniekształca piłkę.

ale w B osiąga swoje maksimum. Otrzymujemy więc krzywą (zakreśloną grubą linią) O, A, B, C, D. Od razu widać, że dokładnie w chwili odskoku (B) siła pochodząca z uderzenia jest dużo większa (60 razy, jeżeli przyjąć poprzednie dane) od ciężaru piłki; jest to naturalne, bowiem rozplaszczanie piłki jest olbrzymie w porównaniu do tego, jakie otrzymalibyśmy kładąc lekko piłkę na ziemi. Wszystkie fazy ruchu mogą być zanotowane kinematograficznie.

Teraz można określić „gwałtowność” uderzenia liczbą, a mianowicie wielkością powierzchni zakreskowanego obszaru na rysunku 34, zwaną popędem. Jeżeli różne uderzenia będą przedstawione na różnych wykresach,¹ to tym gwałtowniejsze będzie zderzenie, im większe siły będą wywarte (wyższa powierzchnia zakreskowana) i im dłuższe będzie ich trwanie (powierzchnia szersza). Wróciliśmy więc do tego, co powiedzieliśmy na samym początku.

W wypadku rysunku 34 maksimum siły (B) jest równe ciężarowi 6 kg; siła przeciętna (między A i C) wynosi dokładnie 3 kg. Wystarczy więc tę siłę pomnożyć przez trwanie (0,02 sek), aby otrzymać popęd, wyrażony w kilogram-sekundach: 0,06 kg/sek.²

Porównajmy wartość tą z popędem wywieranym przez



Rys. 34. Graficzne przedstawienie sił wywieranych kolejno na ziemię (rys. 33). Uderzenie jest scharakteryzowane wartością powierzchni zakreskowanego obszaru, zwaną popędem.

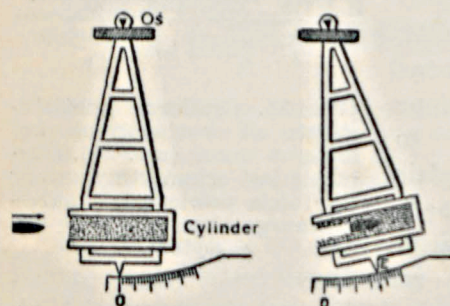
¹ Wszystkie wykreślone na jednej skali.

² Liczby tekstu mają jedynie wartość przykładową. Oto ścisłejsze dane: dwie stalowe kule (7 cm średnicy) spotykają się z szybkością 80 cm/sek i są zetknięte przez 2 dziesiętysięczne (0,0002) sekundy, a średnica koła zetknięcia wynosi 2 mm. Maksimum siły (punkt B rys. 34) wynosi ciężar 1 tony.

pocisk z karabinu Lebel (15 g), wystrzelony z bliska (szybkość wylotu z lufy = 700 m/sek); popęd ten równa się 0,35 kg/sek: jest więc zaledwie sześć razy silniejszy od popędu wywieranego przez piłkę tenisową.¹ Ale już pocisk armaty 75 mm wywiera na niewielkiej odległości popęd trzysta razy większy niż pocisk karabinu, czyli blisko dwa tysiące razy większy niż piłka, o ile naturalnie pocisk nie pęka.²

Wahadło balistyczne.

Istnieje przyrząd oparty na bardzo prostej zasadzie, który pozwala oznaczyć doświadczalnie wartość popędu;



Rys. 35 i 36. Drugi przykład uderzenia: wahadło balistyczne. Żelazny walec, napełniony ziemią, zawieszony jest na ramieniu zakończonym osią. W ziemię wpadnie pocisk karabinowy. Pocisk wpada w ziemię walca i odchyła wahadło. Można obliczyć zderzenie pocisku na podstawie pomiaru maksymalnego odchylenia OE.

pionowej; z lewej strony walec jest zamknięty cienkim płatkim ołowiu, aby się ziemia nie wysypywała.

¹ To wcale nie jest dziwne: kula karabinowa zawdzięcza swoje działanie temu, że jest spiczasta, tak że siła wywierana przez nią działa na bardzo małej powierzchni.

² W wypadku pęknięcia mielibyśmy do czynienia z dodatkowymi popędami.

ten aparat otrzymał nazwę wahadła balistycznego, ponieważ jest rzeczywiście wahadłem daleko odrzucanym przez uderzenie od normalnej pozycji równowagi. Składa się (rys. 35) z walca z lanego żelaza, napełnionego ziemią; za pomocą odpowiedniego ramienia zawieszony jest on na osi, dokoła której może się obracać w płaszczyźnie

Pocisk wychodzący z lufy wpada w ziemię i zatrzymuje się w niej (rys. 36). Równocześnie wahadło zostaje odchyłone od prostopadłej i osiąga w tym odchyleniu pewne wychylenie skrajne, mierzone możliwie dokładnie za pomocą odczytania na skali lub automatycznego zapisu.

Dosyć prosta teoria matematyczna — nie będziemy jednak wchodzić w jej szczegóły — wskazuje, że wartość popędu określona jest przez wielkość OE (rys. 36) odchylenia, wymiary przyrządu i ciężar walca. Tak więc — jeśli chodzi o pocisk karabinu Lebel (ciężar: 15 g, szybkość: 700 m/sek) — wahadło ważące 35 kg i długie na 1 m da maksymalne odchylenie OE równe 10 cm.

Ogólne właściwości uderzenia.

Wszystkie uderzenia podlegają prawu zachowania pędu¹, które w połowie XVII w. odkrył René Descartes.

Aby zrozumieć, o co chodzi, trzeba najpierw zapytać, w jakich okolicznościach można wywołać duże zderzenia. Odpowiedź jest prawie oczywista: należy puścić z dużą szybkością ciało gęste i mające wielką objętość. Tak więc:

1. Pięść będzie tym skuteczniejsza (albo szkodliwsza dla otoczenia), im jej gwałtowniej użyjemy (wpływ szybkości).

2. Skoro dwa ciała jednakowej objętości (korek i stugramowy ciężarek mosiężny) spadną z jednakową szybkością na ziemię, to mocniejsze jest uderzenie mosiądzu niż korka (wpływ gęstości).

3. Młot wyrze tym silniejsze uderzenie, im większa będzie „masa metalu“ (wpływ objętości).

Iloczyn z szybkości przez gęstość i przez objętość² pozwala z góry przewidzieć wartość wywartego popędu:

¹ Albo zachowania „ilości ruchu“.

² Ponieważ iloczyn z gęstości przez objętość jest masą badanego ciała, więc ilość ruchu jest iloczynem z szybkości

temu właśnie iloczynowi dano nazwę pędu lub ilości ruchu. Dla utrwalenia pojęć przytoczymy znany już przykład (rys. 35): pocisk karabinowy (15 g), biegnący z szybkością 700 m/sek, ma pęd równy 10.500 gramometrów na sekundę, tj. 15×700 .

Wracamy do prawa Kartezjusza, ogłoszonego trzy wieki temu: jeżeli jakieś dwa ciała mają się zderzyć, to przed spotkaniem posiadają one pewne pędy, które należy zsumować; po zderzeniu każde z tych ciał ma nowy pęd; pędy te również należy dodać. Otóż suma pędów nowych jest równa sumie pędów dawnych: na tym właśnie polega „zachowanie ilości ruchu“.

Zderzenie sprężyste.

Zderzenie sprężyste zachodzi wówczas, gdy — używając zwykłego języka — ruch pozostaje ruchem, czyli gdy nie zachodzą inne zjawiska.¹ Chcąc to lepiej wyjaśnić należy spojrzeć szerzej niż Kartezjusz, który w tak odległej epoce mógł się łatwo pomylić w rozumowaniu, jak to już pierwszy Leibniz podejrzewał.

Trzeba tu zrozumieć pewne konieczne, jakkolwiek subtelne rozróżnienie. Mówiliśmy, że pęd (iloczyn masy przez szybkość) przedstawia niejako wartość mającego nastąpić uderzenia. Jest to zgodne z prawdą, ale wcale nie znaczy, że pęd może być miarą wartości ruchu — na tym polega błąd Kartezjusza. Przyczyna jest prosta: pęd pozostaje nawet wtedy, gdy ruch zanika na korzyść innych zjawisk.²

ciała przez jego masę. Przy sposobności przypominamy, że ciężar (przyciąganie Ziemi) i masa (bezwładność albo opór na ruch) są dwiema różnymi wielkościami: kiedy ważymy w ręce przedmiot, to na nią działa jego ciężar; ale skoro popychamy palcem kulę po gładkim stole, to zjawia się jej masa. Ciała bardzo bezwładne są również bardzo ciężkie: dlatego gram, jednostka masy, jest używany zarazem jako jednostka ciężaru.

¹ Na przykład wydzielanie ciepła, elektryzacja itp.

² Wydzielanie ciepła, elektryzacji itp.

Wartość ruchu zależy od masy pocisku i od jego szybkości; tak samo jak pęd, wartość ta zależy tylko od tej masy i tylko od tej szybkości. Ale należy pomnożyć połowę masy przez kwadrat szybkości. Ten wynik, na oko dziwny, jest niemniej potwierdzany przez szereg znanych faktów.

Zamiast mówić o „wartości zderzenia“ używamy wraza pęd; tak samo zamiast „wartości ruchu“ wprowadzimy pojęcie energii kinetycznej.¹ W poprzednim przykładzie kuli karabinowej (masa: 15 g, szybkość: 700 m/sek) obliczymy energię kinetyczną, mnożąc połowę masy (7,5 g) przez kwadrat szybkości ($700 \cdot 700 = 490.000$), co daje około 3.700.000 jednostek energii kinetycznej.²

Widać więc, że ze wszystkich możliwych uderzeń (w których zachowuje się pęd) uderzenia sprężyste cechuje — poza innymi czynnikami — zachowanie energii kinetycznej: to podwójne zachowanie wystarczy do określenia obu szybkości po uderzeniu.

Szczególnie jasno okazuje się, że wzrost szybkości jednego z ciał równoważy się zmniejszeniem szybkości drugiego. Można to łatwo zilustrować za pomocą doświadczenia z dwiema monetami (rys. 17): na gładkim stole kładzie się monetę odwróconą orłem i uderza się ją inną (odwróconą reszką); w chwili uderzenia prawa moneta nagle się zatrzymuje, zaś lewa zaczyna sunąć z tą samą szybkością: strata szybkości jednej monety jest równa wzrostowi szybkości drugiej.

Rozważmy jeszcze dwa przykłady zapożyczone z działania broni palnej. Przed strzałem³ broń i pocisk są w spoczynku, więc całkowita ilość ruchu równa się 0. Po wybuchu pocisk karabinowy nabiera pędu wynoszącego według naszych obliczeń 10.500 gramometrów na sekundę. Równo-

¹ Używa się również zwrotu „żywa siła“.

² Nie wchodząc w szczegóły obliczenia wyrazimy tę energię kinetyczną w wat-godzinach: wypada trochę więcej niż 1 wat-godzina.

³ Uderzenie działa również przy wywołaniu strzału: uderzenie iglicy zapalającej spłonkę z rtęcią piorunującą.

cześnie tego samego pędu nabiera cały karabin, jednak w przeciwnym kierunku, a ponieważ waży on 4.200 gramów, więc szybkość odrzutu otrzymamy dzieląc 10.500 przez 4.200, co wynosi 2,5 metra na sekundę; wszyscy wie-



Rys. 37. Działo wyrzuca pocisk, dochodzący do punktu A.

Rys. 38. Pocisk nie wybucha i pada w punkcie B.

Rys. 39. Jeżeli pocisk wybucha w A', to tory odłamków są równoległe do siebie, a środek ciężkości całej wiązki przechodzi przez B' identyczne z punktem B.

dzą, że strzelec musi przybrać odpowiednią pozycję dla przyjęcia i złagodzenia energii kinetycznej swojej strzelby. Siła odrzutu armaty jest łagodzona przez specjalny przyrząd, zwany „oporo-powrotnikiem”; odrzut działa 75 mm przekracza 1 metr.

Zbadajmy teraz wybuchający pocisk A (szrapnel), wystrzelony z działa (rys. 37); gdyby nie wybuchnął w powietrzu, uderzyłby w ziemię w punkcie B (rys. 38); jeśli jednak wybuchnie w A', to odłamki utworzą wiązkę; ich drogi będą równoległe (rys. 39), a środek ciężkości całości przejdzie przez punkt B', identyczny z punktem B z rysunku 38. Stąd widać, że uderzenie pochodzące z wybuchu w A' nie zmienia ruchu środka ciężkości pocisku.¹

Gazy i ciecze mogą również wywierać uderzenia, których wyniki mechaniczne mają wielkie znaczenie. Wszyscy znają — przynajmniej ze słyszenia — szkody wyrządzane przez wybuchy gazu świetlnego; uderzenie gazów pędzi pocisk w lufie palnej broni.

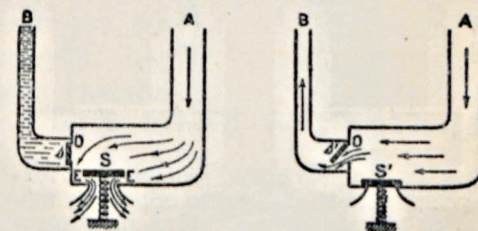
Tak samo jeśli odbywa się ruch cieczy w rurze i jeśli

¹ Ten wniosek jest ścisły, jeśli nie uwzględniamy oporu powietrza.

zamknąć umieszczony w niej przepust, to ciecz zostaje powstrzymana przez krótką chwilę: uderzenie jest tak gwałtowne, że wywołuje wstrząs całej rury — mamy tzw. uderzenie taranowe.

Na tej zasadzie oparty jest taran hydrauliczny, wynaleziony w 1796 roku przez Montgolfiera i służący do podnoszenia części pływającej masy ponad jej poziom wyjściowy.

Przedstawiają go schematycznie rysunki 40 i 41. Woda napływa przez A i wylewa się przez ciasny otwór EE, zamknięty klapą S, która jest podtrzymywana za pomocą sprężyny i może poruszać się wzdłuż prostopadłej; klapka zaś s obraca się naokoło osi O; z początku zamyka ją ciśnienie wody w B (rys. 40). Szybkość wypływania w E powoli wzrasta, więc zmniejsza się ciśnienie w otworze i klapa S' przywiera (rys. 41); druga klapa s' nagle się otwiera (uderzenie taranem) i woda zostaje wrzucona do B. Taran hydrauliczny udoskonalano w najrozmaitszy sposób od przeszło stu lat. Używano go do kopania; służył również jako kompresor przy wierceniu tunelu w górze Genis.

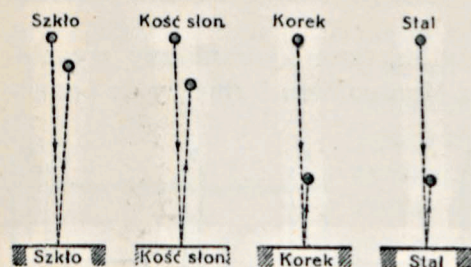


Rys. 40 i 41. Taran hydrauliczny jest zastosowaniem uderzenia. Woda wypływa przez otwór EE i klapa s jest zamknięta. Ze wzrostem szybkości prądu klapa S zostaje przyciśnięta do ścianki. Klapa S' przywiera do ścianki i następuje uderzenie taranem, otwierające nagle s'. Część wody wchodzi do B na poziom wyższy od tego, z którego spadała z A.

Zderzenie miękkie.

„Zderzenie miękkie” przeciwstawia się, jeśli tak można powiedzieć, zderzeniu sprężystemu: gdy sprężyste cechowało się przez zachowanie energii kinetycznej, tutaj mamy do czynienia ze zjawiskiem, że dwa pociski łączą się po

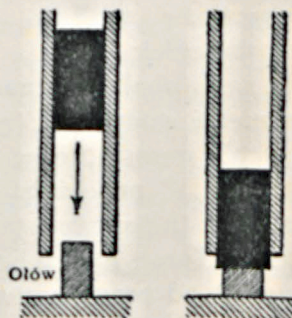
zderzeniu. Suma energii kinetycznych jest mniejsza po uderzeniu niż przed nim. Można by rzec, że zderzenie jest



Rys. 42. Odbicie kulek zrobionych z różnych materiałów. — Szkło odbija się wyżej od kości słoniowej, która znów przewyższa w odskoku korek i stal; w ostatnim wypadku słaby odskok jest spowodowany działaniem magnetycznym. (Nie uwzględniono oporu powietrza.)

kinetycznej. Ten fakt łatwo stwierdzić na odbiciach kulek zrobionych z różnych materiałów (rys. 42): we wszystkich wypadkach wysokość odbicia jest mniejsza od wysokości padania.

Ponieważ energia nie ginie, więc musi się ona zjawić pod innymi postaciami: w doświadczeniu z odbiciem (rys. 42) następuje wywiązanie się ciepła w chwili czasowego zniekształcenia kuli i stołu, w który ona uderza. Wywiązanie się ciepła jest zjawiskiem stałym; często jest ono wynikiem trwałych zniekształceń, pęknięć itp. Przytaczamy kilka przykładów:



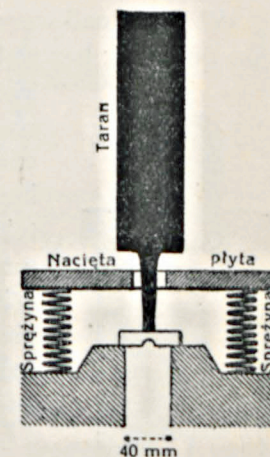
Rys. 43 i 44. Przykład uderzenia miękkiego: spłaszczenie ołowiu.

¹ Nie tylko zderzenia doskonale miękkie. Ściśle biorąc, nie ma zderzeń doskonale miękkich i doskonale sprężystych: pierwsze zachowują nieznaczną pozostałość energii kinetycznej, drugie tracą nieznaczną część.

Francuski uczony G. A. Hirn (1815—1890) zbadał trwałe zniekształcenie ołowiu, wywołane uderzeniem ciężkiej masy metalu (rys. 43), spadającej między dwiema szynami: widać, że ołów rozplaszcza się zachowując poprzednią objętość (rys. 44); łatwo sprawdzić również jego ogrzanie.¹ To samo zjawisko występuje w młotach kowalskich i w młotach mechanicznych wielotonowych, używanych w warsztatach metalurgicznych.

Doświadczenia nad zderzeniami mogą być przeprowadzane w ten sposób, że wywołujemy pęknięcia, zamiast wywoływać trwałe zniekształcenia. To właśnie odbywa się w aparatach służących do mierzenia łamliwości materiałów, to znaczy ich wytrzymałości na uderzenie (rys. 45): przyrząd składa się z tarana ważącego, przypuśćmy, 12 kg, zakończonego płaską powierzchnią z iglicą. Spadając z wysokości 4 m osiąga 1.300 wat-godzin energii kinetycznej, która najpierw łamie badaną przeszkodę, a bezpośrednio potem skraca sprężyny o pewną długość, odmierzaną na podziałce; za pomocą zwykłego odejmowania można obliczyć ilość wat-godzin zużytych na złamanie.

W podobny sposób wbija się pale w budowlach drewnianych: podnosi się ręcznie lub za pomocą pary kafar, następnie puszcza się go (rys. 46): energia kinetyczna,



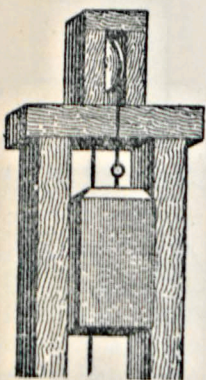
Rys. 45. Uderzenie jako miara łamliwości. — Spadający młot najpierw łamie naciętą płytę, później ściska sprężyny; energię zużytą na złamanie oblicza się jako różnicę energii kinetycznej spadania i energii oddanej sprężynom.

¹ Na podstawie doświadczenia tego można obliczyć, że zanik jednej wat-godziny energii kinetycznej wywiązuje energię cieplną równą 860 (małym) kaloriom.

którą ma on przy końcu spadania, zostaje użyta do wbijania pali w ziemię.

Młot, fortepian, bilard.

Wbijanie pali w życiu codziennym odbywa się pod nieco inną postacią: bez wątpienia wszyscy posługiwali się młotkiem, ale czy znajdzie się jedna osoba na tysiąc, która by choć mniej więcej wiedziała, na czym polega jego działanie? Co się odbywa? Dlaczego młotek ma rączkę? Dlaczego uderza się nim silnie w gwoździ? Dlaczego nie osiągnie się żadnego wyniku, kładąc powoli „masę” młota na główce gwoździa? Oto są pytania, na które pokrótce odpowiemy.



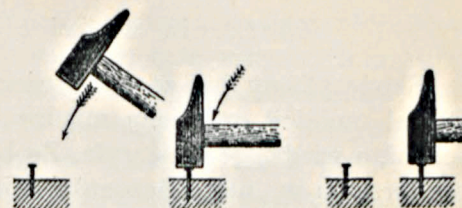
Rys. 46. Taran do wbijania pali.

Gdyby napiętek trzymać sztywno, to rozumie się, że rączka młota nie służyłaby do niczego: lepiej byłoby wziąć tłuczek młotka w garść... Ale dłoń obraca się na przegubie i jej szybkość jest przynajmniej pięć razy mniejsza od szybkości tłuczka (przyjmując, że ramię jest nieruchome). Trzon służy więc do nadania masie dużej szybkości. Jest to łatwe do zrozumienia, ale dalsze wywody będą nieco trudniejsze. Spójrzmy na rysunki 47 i 48; wskazują one na różnicę zachodzącą między uderzeniem a wywieraniem ciśnienia statycznego. Przypuśćmy, że masa młotka waży 500 g i że spada na gwoździ z szybkością 10 m/sec; według tego, cośmy już poprzednio pisali, energia kinetyczna młotka wynosi 0,007 wat-godziny. Jeżeli pod wpływem takiego uderzenia gwoździ zagłębi się na 5 mm (rys. 47), wynika stąd, że opór drzewa jest równoważny ciężarowi 500 kg,¹

¹ Przyjawszy, że ostrze gwoździa ma 0,5 mm średnicy, znajdujemy, iż ciśnienie wywierane przezeń na drzewo w chwili uderzenia przekracza sto tysięcy atmosfer.

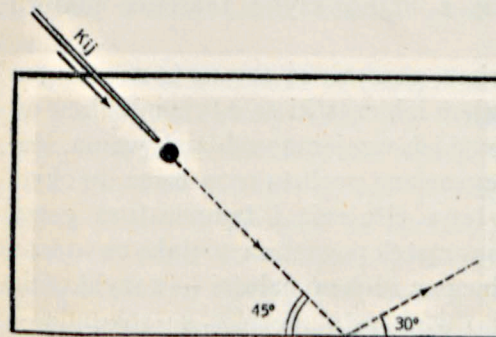
czyli tysiącrotnemu ciężarowi młotka. Nic więc dziwnego, że nie osiągniemy żadnego skutku kładąc powoli młotek na gwoździu.

Mimochodem należy wspomnieć, że „młotek” — drewniany, obłożony filcem — jest najważniejszą częścią fortepianu: uderzenie w strunę pobudza ją do drgań, a skoro dźwięk zupełnie ucichnie, cała energia kinetyczna, nadana strunie przez młotek, zamienia się na ciepło.



Rys. 47 i 48. Różnica między uderzeniem a równomiernym naciskaniem. Przy zwykłym sposobie posługiwania się młotkiem, ważącym 500 g i mającym przy uderzeniu szybkość 10 m/sec., gwoździ zagłębia się na 5 mm. Obliczenie wykazuje, że gwoździ pokonuje siłę oporu równą 500 kg.

Jeżeli na główce gwoździa położyć młotek (ważący 500 g), to gwoździ może się zagłębić najwyżej na 0,005 milimetra.



Rys. 49. Uderzenie na bilardzie. — Kula uderzywszy w bandę nie odbija się symetrycznie (naturalnie oprócz wypadku, gdy w nią uderza pionowo): kątowi padania 45 stopni odpowiada kąt odbicia o mniej więcej 30 stopniach. Taki wynik otrzymuje się skutkiem tego, że uderzenie nie jest doskonale sprężyste.

Zajmiemy się wreszcie bilardem, którego teoria wcale nie jest prosta i właściwie wymagałaby osobnego rozdziału. Kij owinięty na końcu nakredowaną skórą nadaje kuli z kości słoniowej szybkość na ogół równą 5 m/sec. Nawet jeśli

wźmiemy wypadek najprostszy, gdy kula nie ma ruchów obrotowych bocznych („falszów”), jej odbicie od bandy nie jest sy-

metryczne:¹ jeżeli, na przykład (rys. 49), kąt padania wynosi 45° , to kąt odbicia będzie miał około 30° .

Zderzenia w świecie drobin.

Skończyliśmy już ze zderzeniem w skali ludzkiej. Pascal umieścił człowieka między dwiema nieskończonościami, a wiedza je zmierzyła. Zrobimy wzmiankę jedynie o uderzeniu w „nieskończoności wielkiej” albo lepiej, powiedzmy, w skali astronomicznej. Na każde dziesięć lat pojawia się na niebie średnio trzy do czterech nowych gwiazd; dla wytłumaczenia powstania „nowej” gwiazdy trzeba przypuścić możliwość zderzenia dwu gwiazd albo gwiazdy z mgławicą. Zresztą pięćdziesiąt milionów wieków temu dzisiejsze planety oderwały się od słońca prawdopodobnie dzięki otarciu się o nie jakiejś błędnej gwiazdy.

Dłużej zatrzymamy się nad zderzeniami w „nieskończoności małej”, to znaczy w skali atomistycznej, tu bowiem zetkniemy się z najnowszymi teoriami materii i promieniowania.

Zajmiemy się najpierw gazami; są one najprostszym rodzajem materii, bowiem ich cząstki są o tyle oddalone od siebie, że można pominąć ich wzajemne oddziaływania. Pojęcia poprzednio sprecyzowane posłużą nam teraz do określenia, na czym polega ciśnienie i temperatura gazu.

Rojenie się bezładne cząstek powietrza, niejako na własną rękę, nie ma nic wspólnego z ruchem całości — z szybkością pięciu, dziesięciu czy dwudziestu metrów na sekundę — który określamy jako podmuch, wiatr lub huragan. Cząstki przenoszą się z miejsca na miejsce nawet w najspokojniejszym powietrzu z szybkością kuli karabinowej (rys. 35) i przelatują w przeciągu każdej sekundy 500 metrów po linii prostej, o ile nie napotkają po drodze cząstek sąsiednich, których jest jednak tyle, że w czasie 1 sek.

¹ Nie byłoby tego, gdyby uderzenie było doskonale sprężyste.

cząstka powietrza zmienia kierunek biegu 5 miliardów razy, robiąc 5 miliardów zwrotów. Zresztą można obliczyć, że w normalnych warunkach objętość cząstek jest drobnym ułamkiem całej objętości gazu: w centymetrze sześciennym powietrza całkowita objętość wszystkich cząstek nawet nie dochodzi do połowy milimetra sześciennego; tak więc jest dwa tysiące razy bardziej „pusto” niż „pełno”.

Niektóre spośród cząstek zderzają się z powierzchniami ciał stałych: z murami, z drzewami, najrozmaitszymi przedmiotami, z istotami żywymi; wskutek tych uderzeń wytwarza się ciśnienie „atmosferyczne”. Łatwo można określić pęd jednej drobinki, skoro jej szybkość wynosi 500 m/sek, a masa jest taka, że mieści się ich 2 miliardy w jednej miliardowej miligrama: obliczenie oparte na tych dwu danych daje nam pęd jednej jedynej drobinki. Możemy również określić liczbę drobin, które w ciągu sekundy spotykają powierzchnię jednego centymetra kwadratowego. Ciśnienie gazu jest sumą popędów udzielanych tej powierzchni przez cząstki gazu w ciągu jednej sekundy.

Ponadto te zderzenia są elastyczne: innymi słowy, skoro gaz jest pozostawiony samemu sobie, całkowita energia kinetyczna jego cząstek (patrz wyżej: iloczyn połowy masy przez kwadrat szybkości) nie podlega zmianom. Można zresztą sztucznie podnieść tę energię przez ogrzanie gazu. A więc w skali atomistycznej energia kinetyczna odpowiada temu, co znamy pod nazwą temperatury.

Te uwagi teoretyczne znalazły mnóstwo zastosowań praktycznych; ograniczymy się do podania dwu przykładów z chemii azotu, wiążących się z wytwarzaniem nawozów sztucznych, których fabrykacja ostatnio bardzo się rozwinęła.

1. W łuku elektrycznym można połączyć tlen z azotem: jest to sposób Birkelanda.¹ Jeżeli podwoić ciśnienie gazów,

¹ Przewyższa go wynalazek prof. I. Mościckiego — Prezydenta Rzeczypospolitej Polskiej (tłum).

wprowadzanych do przyrządu, to zderzenia cząstek będą dwa razy częstsze i masa otrzymanego kwasu azotowego ulegnie podwojeniu.¹ Jednak zważywszy niewielką skuteczność zwiększenia ciśnienia, oraz wielkie trudności realizacji tego zwiększenia, lepiej jest po prostu podwoić ilość produkujących aparatów.

2. Inaczej przedstawia się sprawa z syntezą amoniaku, czyli z wiązaniem wodoru z azotem (system Habera, ulepszone przez G. Claude'a, Casala i Fausera). Badanie reakcji chemicznej wskazuje, że przy podwojeniu ciśnienia (wszystkie inne warunki pozostają bez zmiany) otrzymuje się osiem razy więcej amoniaku; wydajność zwiększa się więc czterokrotnie. To wystarczy, aby pojąć znaczenie „nadciśnienia“, to znaczy uzyskania wielkiej częstości zderzeń pomiędzy cząstkami gazu.

Jednak nie wszystkie zderzenia molekularne są sprężyste; angielscy fizycy Klein i Rosseland wykazali istnienie zderzeń miękkich, w których, jak wiemy, zachodzi strata energii kinetycznej; energia ta przybiera wówczas postać promieniowania. Te właśnie badania mają pierwszorzędne znaczenie dla naszych pojęć o związku między materią a promieniowaniem.

Zderzenia w świecie elektronów.

Na zakończenie musimy zstąpić o jeszcze jeden stopień w dół — w głąb świata podatomowego, zaludnionego elektronami; elektron — atom elektryczności — jest dla atomu — najmniejszej cząstki materii — tym, czym jest Ziemia w systemie słonecznym.

Czytelnicy są zbyt wykształceni, aby się dziwić okropnej gmatwaninie współczesnej wiedzy: oświetlenie elektryczne jest sprawą zderzeń. Przypomnę tylko, że włókna metalowe żarzą się dlatego, ponieważ sieć rozdzielcza dostarcza dodatkowej energii elektronom znaj-

¹ „Wydajność“ nie zmienia się.

dującym się w drutach metalowych; uderzają one gwałtowniej w atomy włókien, te zaś z kolei wykonują wahania o większym rozmachu. Otóż właśnie ten wzrost amplitudy, czyli rozmachu drgań, ujawnia się podniesieniem temperatury włókna.

Wytwarzanie promieni Roentgena jest również kwestią uderzeń. Wysłanie ich następuje wówczas, gdy bardzo szybkie elektrony (np. 60.000 km/sek.) zatrzymują się gwałtownie na przeszkodzie z platyny lub wolframu.

Angielski fizyk Ernest Rutherford dokonał przemiany atomów azotu i glinu na wodór, dzięki bombardowaniu ich cząstkami alfa.

Dwa, jakby symetryczne, doświadczenia przewracają do góry

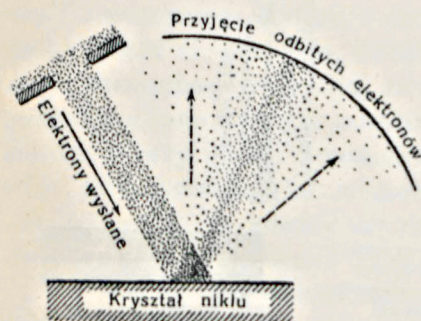
nogami nasze pojęcia o materii i promieniowaniu:

1. Amerykański fizyk A. H. Compton przeprowadził w 1923 r. doświadczenia nad bombardowaniem elektronów za pomocą promieni Roentgena (rys. 50) i stwierdził, że wówczas nie tylko elektrony zostają odrzucone, ale i same promienie Roentgena również podlegają zmianom przez zmianę kierunku oraz zmniejszenie częstości (jak gdyby światło niebieskie stawało się zielonym).



Rys. 50. Promieniowanie składa się z cząstek zwanych fotonami. Doświadczenie, wykonane przez A. H. Comptona, polega na rzuceniu promieni Roentgena na płytkę grafitu (zawierającą, naturalnie, elektrony). Z chwilą odrzucenia elektronu promienie Roentgena zmieniają swoją częstość drgań oraz kierunek. „Zjawisko Comptona“ jest zupełnie niezrozumiałe z punktu widzenia teorii falowania; przeciwnie, wyjaśnia się, gdy tylko przyjmie się istnienie cząstek promieniowania.

„Zjawisko Comptona” jest zupełnie niewytłumaczalne przez teorie klasyczne; jednak wszystko się wyjaśnia z chwilą założenia, iż zderzenie promienia Roentgena jest doskonale sprężyste, to znaczy skoro się przyjmie, że tak pęd jak i energia kinetyczna zostają zachowane. Należy więc przypisać promieniowaniu cechy masy: musi składać się ono, jak i materia, z pewnych korpuskuł, którym dano nazwę „fotonów”.



Rys. 51. Badanie uderzeń dowiodło, że materia ma budowę falistą. W roku 1927 Davisson i Germer wykazali, że elektrony odbijając się od kryształu niklu zachowują się dokładnie tak, jak gdyby zamiast nich padała na kryształ wiązka promieni Roentgena.

nieważ dokładne badania wykazały, iż promienie Roentgena składają się z fal, więc wynika z tego, że i materia ma budowę falistą.

Tak więc badanie uderzeń dowiodło, że wszystko, co nas otacza: i materia, i promieniowanie, te obie części wszechświata, mają cechy zarówno cząstek jak i fal.

Rzut oka na całość.

Dla wygody sklasyfikujemy zjawiska według trzech stopni, trzech „skali”:

1. Skala astronomiczna, gdzie odległości wyrażają się miliardami miliardów kilometrów.
2. Skala ludzka, to znaczy skala istot i przedmio-

tów, których stopień wielkości mierzy się metrem (między milimetrem a kilometrem).

3. Skala atomistyczna; jej wymiary obracają się w miliardowych częściach milimetra.

Jeżeli przejrzymy charakterystyczne zjawiska, którym ten rozdział jest poświęcony, to zauważymy, że w skali astronomicznej zderzenie jest zjawiskiem wyjątkowym: ciała niebieskie są znacznie oddalone od siebie, ich szybkość jest niewielka... Jednak zderzenia, choć rzadkie, zachodzą i tu, tłumacząc nam narodziny nowych planet i błyszczących gwiazd, które czasem pojawiają się nagle przed oczami.

W skali ludzkiej zderzenie ma „złą opinię”, bo wywołuje raczej wspomnienie wypadków samochodowych i katastrof kolejowych, a nie tych codziennych zdarzeń, któreśmy obszernie omawiali.

Wreszcie w skali atomów zderzenia dają nam obraz ciśnienia gazów; z dokładnej znajomości wielkich ciśnień wynikły już liczne praktyczne zastosowania w przemyśle chemicznym. Przeciwnie zaś studia nad gazami najbardziej rozrzedzonymi doprowadzają do poznania bezużytecznych dla nas molekuł, które nie będąc nigdy uderzane przez sąsiadów osiągają taką trwałość, jaka nie zdarza się nigdy w warunkach normalnych. Dorzućmy, że bez zderzeń nie moglibyśmy wytworzyć promieni Roentgena; nie umielibyśmy również zamienić azotu lub glinu na wodór, jak to uczynił Rutherford w 1919 roku, bombardując ciała te cząstkami helu o szybkości 20.000 km/sek.

Czyż to nie jest cudowne, że zjawisko tak stare, tak powszechne, jakim jest zderzenie, ma dziś tak nadzwyczajne konsekwencje teoretyczne, z których mogą powstać nieoczekiwane zastosowania? A ile osób domyśla się tego wszystkiego wbijając gwóźdź lub oklaskując aktora?



SPRĘŻYSTOŚĆ I PLASTYCZNOŚĆ

W metalurgii i w nowoczesnych konstrukcjach mechanicznych często używa się następujących określeń: „ściśliwość, sztywność, plastyczność, rozciągliwość, ciągliwość, wytrzymałość, twardość, łamliwość“, które odpowiadają wyraźnie określonym cechom metali i stopów. Wszystkie bowiem zagadnienia konstrukcji metalowych — jeśli chodzi o budynki, okręty, maszyny, samoloty — opierają się na dokładnym poznaniu mechanicznych właściwości materiałów, co razem łączy się w jedną z najważniejszych gałęzi badań naukowych: naukę o „wytrzymałości tworzyw“. Poza tym zaś sprawy te wiążą się ze zrozumieniem drobnokrystalicznej budowy używanych stopów. Należy również napomknąć o niedawno odkrytych dużych kryształach metalu, przypominających „miętkością“ wosk.

Pośród wszystkich ciał stałych największą uwagę zwracają metale, bowiem przez swoje właściwości nadają się one do szerokiego zastosowania w przemyśle. Przez nazwę „metali“ należy rozumieć zarówno metale czyste (miedź, miękkie żelazo) jak i stopy (mosiądz, stal). Jesteśmy tak obznajmieni z właściwościami „metali“ — boć są one częścią codziennego naszego doświadczenia — że nie będziemy się nimi zajmowali; jednak badanie ich odkrywa nieskończoną liczbę zagadnień, często dla laika niedostrzegalnych, ale mających olbrzymie znaczenie dla techników i tych wszystkich, którzy chcą zrozumieć, co się wokół nich dzieje.

Jednak najlepiej będzie, jeśli na razie zostawimy te interesujące zagadnienia, a zajmiemy się określeniem i sprecyzowaniem mechanicznych właściwości metalów, którymi zajmuje się nauka o „wytrzymałości tworzyw“ — czyli ich ściśliwości, sztywności, plastyczności, rozciągli-

wości, ciągliwości, wytrzymałości, twardości i łamliwości; dość wyliczyć tych osiem cech, aby stwierdzić kłopot, w jaki popadłby nie przygotowany umysł, chcąc je odróżnić od siebie. Zajmiemy się następnie budową tych ciał, co pozwoli na zrozumienie dwu ważnych sposobów traktowania metali: hartowania i kucia.

Jakie mogą być mechaniczne działania na ciała stałe?

Ciało stałe charakteryzuje się z punktu widzenia geometrii dwiema właściwościami: objętością i kształtem; stąd też mamy trzy możliwe sposoby działania, zależnie od tego, czy ciało zmienia objętość czy formę, czy też oba składniki razem.

1. Zmiana objętości: zachodzi ona np. w wypadku zanurzania się łodzi podwodnej; dane ciało jest wówczas poddane jednakowemu ze wszystkich stron uciskowi, albo krócej kompresji; ciało podlega ściśnięciu bez zmiany kształtu.

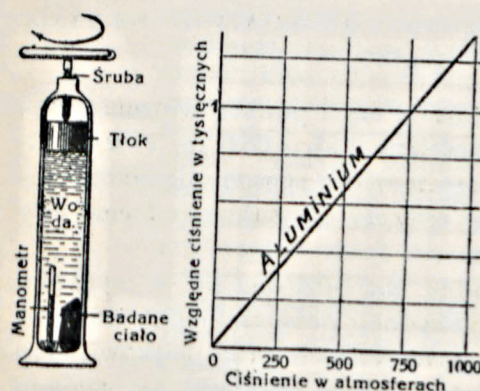
2. Zmiana kształtu: ten sposób działania spotyka się przy naporze bocznym, tnącym, któremu podlegają np. nity na spojeniach oraz w skręcaniu; ciało podlega zniekształceniu bez ściśnięcia ani straty objętości.

3. Zmiana objętości i kształtu; za przykład może służyć: wyginanie, któremu poddaje się podczas prób metalowe pręty, spłaszczenie podstaw ciężkich przedmiotów lub fundamentów budynków; uginanie się belek obciążonych w środku a osadzonych na końcach.

Ucisk (kompresja).

O ile gazy są bardzo ściśliwe, o tyle ciecze i ciała stałe są bez porównania mniej podatne na ucisk; jednak niedawne postępy w dokładności pomiarów objętości i w technice wytwarzania wysokich ciśnień pozwoliły na określenie wszystkich ściśliwości z dużą dokładnością.

Dla badania cieczy i ciał stałych używa się pras hydraulicznych albo piezometru (rys. 52). Naczynie walcowe z bardzo wytrzymałego szkła zawiera manometr i badane ciało; napełnia się je wodą i za pomocą śruby pcha się tłok, najzupełniej szczelny. Odpowiednie przyrządy pozwalają mierzyć zmniejszanie się objętości przy każdym ciśnieniu; uwzględnia się naturalnie błędy pochodzące ze ściśliwości wody



Rys. 52 i 53. Pomiar ściśliwości ciał stałych. Badane ciało zamyka się (rys. 52) wraz z manometrem w piezometrze wypełnionym wodą i dla każdego ciśnienia (osiągniętego przykręcaniem śruby) określa się zmniejszenie objętości (lub ściśnięcie). Wykres (rys. 53) wykazuje, że ściśnięcia są proporcjonalne do wzrostu ciśnienia.

są dwa razy mniej ściśliwe od glinu; ołów dwa razy bardziej; powietrze ma 750.000 razy większą ściśliwość, albo, jeśli kto woli, glin jest 750.000 razy mniej ściśliwy od powietrza, żelazo — 1.500.000 razy mniej.

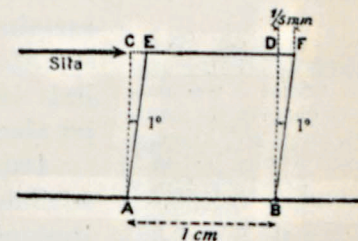
Wykres 53 daje bardzo ważną wskazówkę: ściśnięcia są proporcjonalne do wielkości ciśnienia (do kompresji); wykres jest linią prostą tak przy wzrastaniu jak i przy zmniejszaniu się ciśnienia. W rzeczywistości, jeżeli usunąć wszelkie ciśnienie, objętość wraca do swojej pierwotnej wielkości: takie odkształcenia nazywają się chwilowymi lub sprężystymi; określenie „chwilowy” rozumie się

i zniekształcenia naczynia. Otrzymane wyniki, jeśli chodzi o glin, przedstawione są na wykresie rys. 53: ciśnienie 1.000 atmosfer (prawie 1.000 kg na 1 cm²) powoduje ściśnięcie o 1,3 na 1.000; centymetr sześcienny glinu ma więc pod tym ciśnieniem tylko 998,7 mm³. W ogóle ciało ma tym większą ściśliwość, im mniejsze ciśnienie powoduje dane zmniejszenie objętości. Miedź i żelazo

samo przez się (jego przeciwieństwem jest „trwały”); „sprężysty” zaś, którego przeciwieństwem będzie „plastyczny, miękki”, wskazuje tylko na powrót do poprzedniej objętości z chwilą przywrócenia pierwotnych warunków (ciśnienia atmosferycznego). Poza tym widać, że odkształcenia takie nie zmieniają stanu metalu — jego wewnętrznej budowy;¹ mamy tu do czynienia ze szczególnym wypadkiem ogólnego prawa: dopóki ma się do czynienia ze zmianami sprężystymi, dopóty nie ma przeistoczeń wewnętrznej budowy, a więc i właściwości metalu.

Działanie tnące i skręcenie.

Przeciwnie niż kompresja, powodująca ściśnięcie bez zniekształcenia, działanie tnące i skręcenie sprowadzają zniekształcenie bez zmian w objętości, przynajmniej jeśli chodzi o odkształcenia sprężyste. Działanie tnące jest łatwiejsze do określenia; skręcenie, które jest wynikiem takich działań — łatwiejsze do osiągnięcia.



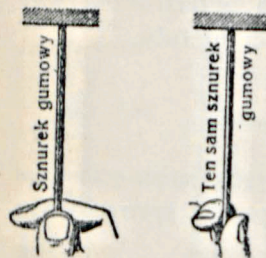
Zbadajmy, na przykład, 1 cm³ glinu, którego podstawa jest mocno przytwierdzona; przedstawia go w przekroju rysunek 54 ABCD;

strzałka oznacza kierunek siły, która, jak gdyby cięcie siekierą, działa na górną podstawę sześcianu; jest to siła „styczna” i wywołuje ona działanie tnące. Skoro nacisk jest dostatecznie silny, to wszystkie poziome warstwy ześlizgują się po sobie i z przecięcia

Rys. 54. Nożycowe działanie na sześcian glinu. — Podstawa AB jest przytwierdzona; trzeba użyć siły stycznej, aby odchylić górną krawędź o piątą część milimetra (od CD do EF).

¹ Według terminu, który określimy później, metal nie jest odkuty, nawet gdyby ciśnienie osiągnęło dziesiątki tysięcy atmosfer.

sześcianu, które jest kwadratem ABCD, wytworzy się romboid ABEF. Mówimy, że metal ma tym większą sztywność, im większej trzeba użyć siły na wytworzenie kąta ześlizgu CAE. Nikogo nie zdziwi wiadomość, że metale są bardzo sztywne: w powyższym przykładzie trzeba by użyć siły 5.000 kg na 1 cm², aby górna warstwa przesunęła się o 0,2 mm, czyli innymi słowy, aby kąt ześlizgu wyniósł 1°. Miedź jest dwa razy



Rys. 55 i 56. Skreślenie. — Miedzy palcem wielki i wskazującym chwytamy się sznurka gumowy, którego drugi koniec jest mocno przytwierdzony (rys. 55); następnie skręca się dłoń o 90° (rys. 56).

sztywniejsza od glinu, żelazo trzy razy; ołów — trzykrotnie mniej sztywny. Ogólnie mówiąc, sztywność najprościej można określić jako wytrzymałość na działanie tnące; i można sprawdzić, że działanie to nie zmienia objętości pod warunkiem niewykraczania poza dziedzinę zniekształceń chwilowych (albo sprężystych), to znaczy, gdy nacisk nie jest dostateczny dla zniekształcenia trwałego.

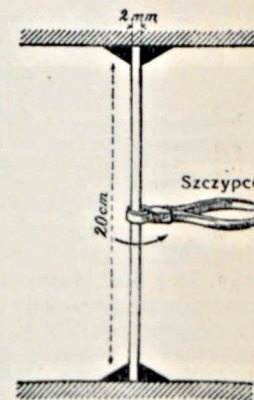
Działanie tnące, wygodne dla zdefiniowania, nastrocza olbrzymie trudności przy realizacji; natomiast skręcenie łatwo jest wyrazić jako sumę działań tnących: skoro bowiem skręcać w palcach gumowy sznurek, którego drugi koniec jest mocno przytwierdzony, to palce wykonują właśnie pracę po stycznej; na rysunku 56 widać wypadek, gdy kąt skręcenia wynosi 90°, to znaczy, że o tyle skręcił się dół sznurka; jego środek skręca się o połowę (45°) i gdybyśmy atramentem wzdłuż sznurka przeciągnęli linię prostą, to po skręceniu stałaby się ona śrubą. Guma doskonale nadaje się do zilustrowania skręcenia, nie jest bowiem sztywna; jednak powyższe doświadczenie można również dobrze wykonać na drutach metalowych, pod warunkiem że użyjemy dostatecznie dużej siły. Biorąc za przykład glin (rys. 57) widzimy, że można skręcić o 90° (za

pomocą cęgów) środek pręta o 20 cm długości i 2 mm średnicy. Jeśli rozporządzamy siłą 1 kg, to ramię dźwigni powinno mieć 3 cm; przy wydłużeniu dźwigni 2 razy, tj. do 6 cm, wystarczy już siła pół kilograma itd. Dajmy, że skręcenie o kąt 90° pręta o średnicy 4 mm wymagałoby wysiłku 16 razy większego, a więc bądź 16 kg na 3 cm, bądź 8 kg na 6 cm.

Należy jeszcze zaznaczyć, że odkształcenia przedstawione przez rys. 54 i 57 są tego samego rodzaju: znając nacisk, który działa tnąco na sześcian (rys. 54), można obliczyć iloczyn siły przez ramię dźwigni mającej skrócić pręt (rys. 57) i to nie tylko dla glinu, ale i dla innych metali (ołowiu, miedzi, żelaza).

Sztywnością jest więc wytrzymałość zarówno na skręcenie jak i na działanie tnące. Tylko ciała stałe są sztywne; ciecze nie posiadają tej cechy, co im nie pozwala przybierać stałego (lub trudno-zmiennego) kształtu. Ta znana właściwość cieczy przejawia się w przyjmowaniu kształtu naczyń, w które je wlewo. Ponieważ jednak tak ciała stałe jak i ciecze są mało ściśliwe, przeto w normalnych warunkach mają one objętość praktycznie stałą, w przeciwieństwie do gazów, które nie posiadają ani stałego kształtu, ani stałej objętości. Zarazem widać, jak ważne dla zrozumienia stanów materii było to, cośmy powiedzieli o ściśliwości i sztywności.

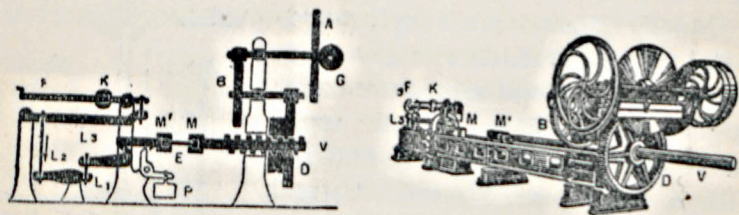
W badaniach skręcenia można odróżnić odkształcenia sprężyste i plastyczne; jednak lepszy i zrozumialszy przykład tego rozróżnienia da nam rozciąganie.



Rys. 57. Skreślenie pręta aluminiowego. — Oba końce pręta są przytwierdzone, a środek chwytamy się szczypcami; w tych warunkach wystarczy siły 5 hektogramów, działającej na ramię dźwigni 6 cm długości.

Rozciąganie i zgniatanie.

Rozciąganie (lub wydłużanie) polega na wydłużaniu metalowego walca za pomocą sił działających na jego obu końcach; dokonać tego można, jeśli chodzi o rysunek 55, opuszczając pionowo rękę.



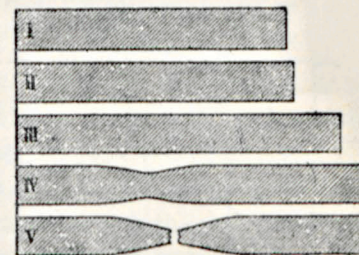
Rys. 58 i 59. Maszyna do rozciągania (siła 100 ton). — Walec E znajduje się między dwoma uchwytami M i M'; M jest przymocowany do ciągnącej śruby V, M' przenosi wysiłek na wagę, złożoną z ramienia F i suwaka K (P jest ciężarem kontrolującym). Motor (połączony taśmą transmisyjną) obraca tryb G, połączony z tarczą A. Obroty tarczy, zwolnione przez przekładnię B, są przekazywane zębatemu kołu D, zaklinowanemu na murze, która, przy ruchu całej maszyny, wciąga śrubę V, skąd pochodzi ciągnięcie. Ramiona 1, 2 i 3 redukują wysiłek w stosunku 1000:1, aby go można było wymierzyć na wadze suwakowej.

Chociaż rozciąganie jest często stosowane w praktyce, jako próba mechanicznych właściwości stopów, to jednak jest to zjawisko bardzo złożone, w którym przejawiają się jednocześnie i ściśliwość, i sztywność: ze względu na tą drugą, rozciąganie może być sprężyste tylko wówczas, gdy wysiłek jest dostatecznie mały; w przeciwnym razie zachodziłyby zniekształcenia trwałe i walec nie wracałby do swych poprzednich kształtów po przywróceniu pierwotnych warunków.

Wyobraźmy sobie, że przeprowadzamy doświadczenie z walcem aluminiowym o 10 cm długości i 7 mm promienia (czyli o 154 mm² w przekroju), posługując się maszyną z rys. 58 i 59. Rysunek 60 przedstawia walec w skali 1:2. Zresztą jakiegokolwiek byłyby wymiary czy właściwości walca, zawsze możemy zaobserwować cztery fazy:

1. Okres rozciągania sprężystego.

Jeżeli „naprężenie” nie przekracza 4 kg na 1 mm² — a więc dla podanych wyżej wymiarów przy sile poniżej 616 kg — zachodzi proporcjonalność między wywołanym wydłużeniem a „naprężeniem”. Dla 4 kg na 1 mm² względne wydłużenie osiąga 2%; długość walca wynosi wtedy 10,2 cm (rys. 60, II).¹ Te dwie liczby: 4 kg na 1 mm² i 2% wydłużenia względnego określają plastyczność glinu, to znaczy, że trzeba je przekroczyć, aby uzyskać stałe zniekształcenie. Pierwszy okres zniekształcenia jest wyobrażony przez rys. 61 i 62: prosta część linii z rys. 61 (0—p) wyraża względne wydłużenie, jako funkcję naprężenia (w kilogramach na milimetr kwadratowy).



Rys. 60. Co się dzieje z walcem (I) pod wpływem wzrastającego rozciągania.

Widać, że podczas całego odkształcania sprężystego zachodzi proporcjonalność między względnymi wydłużeniami z jednej a siłą rozciągającą z drugiej strony. Plastyczność innych metalów przedstawia się następująco:

Żelazo . . .	6	kg na 1 mm ² . .	1%
Miedź . . .	3	kg na 1 mm ² . .	3%
Ołów . . .	0,5	kg na 1 mm ² . .	10%

Ołów jest dużo bardziej plastyczny od glinu czy miedzi, a zwłaszcza od żelaza.

2. Okres rozciągania plastycznego.

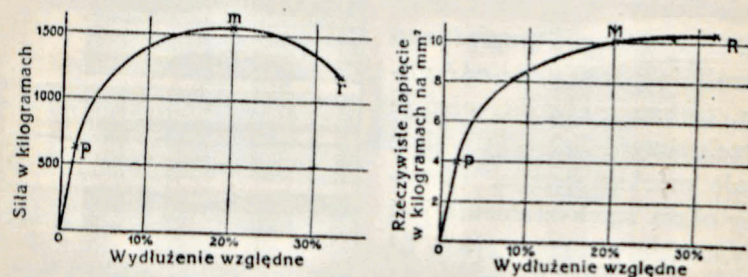
Po przekroczeniu punktu p (rys. 61) lub P (rys. 62), to znaczy po zwiększeniu siły rozciągania, wydłużenia względne wzrastają bardzo szybko, — szybciej, niż gdyby przedłużono proste Op lub OP. Walec przyjmuje postać wyobrażoną na rys. 60 (III), co na wykre-

¹ Promień równa się 6,95 mm.

sach 61 i 62 odpowiada krzywymi pm i PM. Cały walec robi się cieńszy; z chwilą przerwy w rozciąganiu pozostaje on częściowo wydłużony i cieńszy: nastąpiło odkształcenie plastyczne (stałe).

3. Okres przewężenia.

Rozciągamy dalej. Począwszy od punktów m lub M walec staje się cieńszy w jakimś miejscu, następuje prze-



Rys. 61 i 62. Wykres rozciągania. Wykres 61 wskazuje kolejne wydłużania, zależne od sił, które maszyna do rozciągania (rys. 58 i 59) wywiera na walec. Wykres 62 więcej mówi od poprzedniego, ponieważ wyraża wydłużenie w zależności funkcyjnej do rzeczywistego naprężenia, któremu podlega walec.

wężenie (rys. 60 IV), które wypada niekoniecznie w środku walca; pochodzi ono z niejednorodności metalu,¹ z istnienia pewnego pasa mniejszej wytrzymałości mechanicznej. Od tej chwili oba wykresy zaczynają się wyraźnie różnić: na skali przyrządu mechanicznego (rys. 58 i 59) widzimy, że użyta siła² zmniejsza się (część m—r na wykresie 61). Jednakże z obliczenia działań siły na całym odcinku najslabszym, a więc najwięcej wydłużonym, znajdziemy, że rzeczywiste naprężenie jest stałe, co obrazuje wykres na rys. 62 część M—R.

4. Okres przerwania.

Walec wreszcie pęka, jak wskazuje rys. 60 (V), co od-

¹ Walce bardzo jednolite pękają równocześnie w wielu miejscach.

² Mierzona wagą (rys. 58 i 59) lub dynamometrem.

powiada na wykresach punktom r i R. Znaczenie punktu R jest ważniejsze i określa wytrzymałość glinu. Naprężenie w chwili rozerwania wynosi tu 10 kg na 1 mm², a wydłużenie względne około 30%. Dla innych metali odpowiednie cyfry przedstawiają się następująco:

Żelazo . . .	25 kg na 1 mm ² . . .	40%
Miedź . . .	22 kg na 1 mm ² . . .	50%
Ołów . . .	2 kg na 1 mm ² . . .	500%

Nie potrzeba nawet zwracać uwagi na olbrzymią doniosłość praktycznego określenia momentu przerwania: zawsze przyjmuje się w konstrukcjach współczynniki bezpieczeństwa, zawarte między 5 a 10, to znaczy, że nigdy nie stosuje się naprężeń przekraczających 0,2 lub nawet 0,1 tego naprężenia, które mogłoby wywołać katastrofę.

Jeszcze słowo o ściskaniu lub zgniataniu, działaniu odwrotnym do rozciągania: wystarczy zastąpić wydłużanie skracaniem, ścienianie — zgrubianiem, zwarcie — nabrzmieniem. Ciśnienie pęknięcia przy zgniocie jest mniej więcej 2 razy większe od naprężenia przerwania przy rozciąganiu, czyli na 1 mm² 20 kg dla glinu, 50 dla żelaza, 40 dla miedzi, 4 dla ołowiu.

Zgięcie.

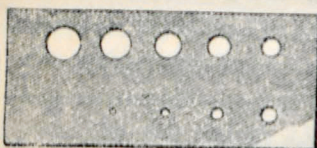
Zgięcie nie wiąże się z żadną nową właściwością metalu; jest zbliżone do rozciągania, albowiem jak i ono zależy od dwu zasadniczych cech — ściśliwości i sztywności.

Druty telegraficzne dają nam najprostszy przykład zgięcia: skutkiem własnego ciężaru nie zachowują one kształtu linii prostej. Zgięcie spotyka się nie tylko w mostach (szczególniej wiszących), ale i w sufitach budynków i w ogóle wówczas, gdy ma się do czynienia z równowagą belek w jednym z trzech przypadków: belka o jednym końcu umocowanym a drugim swobodnym; belka o obu końcach umocowanych; belka spoczywająca po prostu na dwóch

podstawach u obu końców. W każdym z tych wypadków pojawia się wygięcie belki, scharakteryzowane przez „strzałkę” (pionowe maksymalne przesunięcie), której wartość można obliczyć, poznawszy właściwości metalu podczas prób rozciągania.

Rozciągliwość i ciągliwość.

Plastyczność i wytrzymałość łączą się z innymi cechami, które mają duże znaczenie praktyczne przy obróbce metalu, to znaczy gdy chodzi o nadanie mu określonego kształtu bez pomocy odlewania: wystarczy porównać zachowanie się metalu, szkła i gumy pod działaniem młota. Na cechach tych opierają się takie podstawowe czynności, jak kucie, walcowanie, wybijanie, polerowanie, wytłaczanie, ciągnięcie...



Rys. 63. Rozciągliwość. — Metal jest wówczas rozciągliwy, gdy pręt daje się przewleć przez coraz mniejsze otwory, wycięte w grubej blasze.

Metal jest rozciągliwy wówczas, gdy pręt nie pękając staje się cieńszy pod wpływem walcowania, prasowania lub po prostu kucia (rys. 63). Rozciągliwość jest więc połączeniem lekkiego rozciągania w pewnym (poziomym) kierunku z silnym zginiataniem w kierunku prostopadłym (pionowym). A ponieważ rozciąganie i zginiatanie wiążą się ze sobą, przeto rozciągliwość zależy przede wszystkim od wytrzymałości metalu.

Metal jest ciągliwy wówczas, jeśli pręt z niego zrobiony daje się przewlekać kolejno przez coraz mniejsze otwory, wycięte w bardzo twardej stalowej płycie (rys. 64). Tak więc ciągliwość jest połączeniem rozciągania w kie-

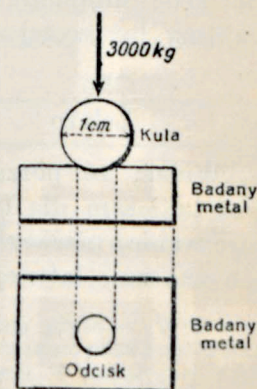
Metal jest rozciągliwy wówczas, gdy pręt nie pękając staje się cieńszy pod wpływem walcowania, prasowania lub po prostu kucia (rys. 63). Rozciągliwość jest więc połączeniem lekkiego rozciągania w pewnym (poziomym) kierunku z silnym zginiataniem w kierunku prosto-

runku osi pręta i działań tnących na cały obwód w chwili przewleknięcia. Pojęcie o ciągliwości metalu ma się wówczas, gdy znane jest wydłużenie względne w chwili przerwania.

Rozciągliwość i ciągliwość są właściwościami raczej praktycznymi niż teoretycznymi: obie odpowiadają zdolności metalu do zmiany kształtu bez pęknięcia, pod wpływem pewnych działań szczególnie ważnych w praktyce.

Twardość.

Twardość jest wytrzymałością danego ciała na przenikanie innego. Jednak błędne byłoby mniemanie, że termin ten oznacza tylko jedną, ściśle określoną właściwość fizyczną: każde ciało posiada tyle rozmaitych twardości, ile istnieje sposobów zużywania go mechanicznego. I rzeczywiście, możemy klasyfikować ciała według rozmaitych twardości, których nie można ani dokładnie zmierzyć, ani obliczyć. Owe twardości grają rolę głównie przy zużyciu przedmiotów: przy pracy pił i wiertarek; jedna z nich jest podstawą metody często używanej ze względu na prostotę a pochodzącej od angielskiego metalurga Brinella. Metoda polega na tym, że badany metal mocno przygniata się bardzo twardą kulą¹ z siłą, którą można zmierzyć, i bada się pozostawiony w ten sposób odcisk. Próbkę danego metalu będzie miała tym większą twardość (powierzchni), im siła będzie większa a znak mniejszy; tak więc twardość można wyrazić w kilogramach na milimetr kwadratowy.



Rys. 65. Twardość. — Za pomocą kuli wywiera się nacisk (np. 3.000 kg) na badany metal; jest on tym twardszy, im mniejszy znak pozostawi na nim kula.

¹ Z hartowanej stali, o średnicy np. 1 cm.

„Liczba Brinella“ odpowiada twardości metalu względem pewnego szczególnego gatunku stali, co stanowi pewną dowolność; tę dowolność usuwa się zastępując kulę stalową kulą z tego samego metalu i w ten sposób otrzymuje się twardość metalu względem siebie samego albo absolutną. Twardości absolutne, wyrażone w kilogramach na milimetr kwadratowy dla metali, których używaliśmy już wyżej do przykładów, są następujące:

Glin	60	Miedź	90
Żelazo	225	Ołów	10

Widać, że porządek, w którym układają się metale, jest taki sam dla twardości jak i dla wytrzymałości na rozerwanie; pierwsza właściwość daje się zmierzyć w sposób znacznie łatwiejszy.

Łamliwość.

Wszystkie poprzednie cechy: ściśliwość, sztywność, plastyczność, wytrzymałość, twardość występują w związku ze zmianami powolnymi, nie gwałtownymi; są to właściwości „statyczne“. Najważniejszą właściwością „dynamiczną“ jest wytrzymałość na uderzenie albo też — odwrotnie — łamliwość (czyli niewytrzymałość na uderzenie). Badanie tej drugiej pozwala stwierdzić — co na pierwszy rzut oka wydaje się paradoksalne — że ta sama materia¹ może być równocześnie bardzo wytrzymała, bardzo twarda i nadzwyczaj łamliwa: wytrzymała na rozerwanie przy rozciąganiu i na przenikanie innych ciał, a niewytrzymała na uderzenie. Dzieje się to dlatego, że podczas uderzenia ciało nie ma czasu na zmianę kształtu, przy omawianych zaś poprzednio próbach zachodzi głęboka przemiana, którą nazywamy zgniotem i którą zajmujemy się w drugiej części tego rozdziału. Tu należy szukać wytłumaczenia owego paradoksu.

Istnieje dużo sposobów określania łamliwości; zajmie-

¹ Na przykład hartowana stal i szkło.

my się jednym tylko z nich, a mianowicie tym, którego zasada i zastosowanie są najłatwiejsze. Dzisiaj używa się zawsze płytek wyżłobionych dla stworzenia pasa łamliwości; taką płytkę przedstawia w rzeczywistej wielkości rys. 66: przekrój części podlegającej złamaniu wynosi dokładnie 1 cm².

Przyrząd składa się z tarana ważącego np. 12 kg, zakończonego płaską powierzchnią, z której wystaje długa iglica (rys. 45). Ten ciężar spada z wysokości 4 metrów, dostarcza więc 48 kilogramometrów energii, która najpierw łamie płytę, następnie uderza w sprężynę; przez pomiar ściśnięcia sprężyn można obliczyć ilość kilogramometrów zużytych na złamanie. Jeżeli ta ilość wynosi na przykład 10, mówi się, że łamliwość równa się 0,1. W ten sposób znajduje się dla:

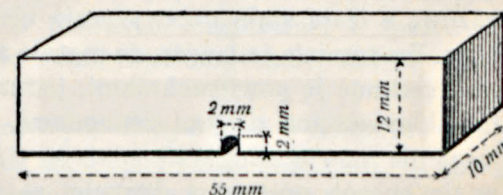
Glinu	0,090,
Żelaza	0,047,
Miedzi	0,056;

glin jest dwa razy bardziej łamliwy od żelaza i miedzi.

Niektóre poboczne właściwości.

Jest jeszcze kilka innych mechanicznych właściwości, które mają duże znaczenie dla wykazania, że ciała stałe z natury nie różnią się od cieczy a nawet gazów, ale jedynie dzielą je różnice ilościowe w przejawianiu pewnych cech.

1. Odkształcenie. Można stwierdzić, że skoro metal został poddany odkształceniu sprężystemu, to potrzeba



Rys. 66. Wyżłobiona płyta. — Wyżłobienie ma na celu stworzenie pasa łamliwości. Płyta, przedstawiona w naturalnej wielkości, służy do prób uderzenia.

długiego czasu, aby powrócił do poprzedniego stanu; jednak powrót następuje, o ile nie przekracza się granicy odkształceń chwilowych. Powiadamy, że metal posiada zapóźnienie sprężyste. Zjawisko jest bardzo dokuczliwe, jeżeli chodzi o metalowe barometry i inne przyrządy miernicze.

2. Lepkość. Wszyscy rozumieją, co oznaczają zdania: „Miód jest bardziej lepki niż woda, eter jest płynniejszy od gliceryny“. Ciecze są niemal sto razy bardziej „lepkie“ od gazów; a ciała stałe przewyższają ciecze sto miliardów razy. Zrozumiałe jest więc, że metale nie zlepią się ze sobą, jeśli zetknąć je powierzchniami; jednakże można wywołać ich sklejenie pod silnymi ciśnieniami, a nawet i bez użycia ciśnienia powierzchnie się spajają, o ile są bardzo czyste: w ten sposób postępują dentyści ze „zlepianym złotem“.

Siły spoistości są pochodzenia elektrycznego.

Skończyliśmy już z mechanicznymi właściwościami metalów i stopów; o ile ciało nie podlega zbyt głębokim przemianom, to wszystkie jego cechy sprowadzają się do dwu najprostszych: do ściśliwości i sztywności, do oporów przeciw kurczeniu i na działanie tnące. Wszystkie rodzaje wytrzymałości, które dotąd spotkaliśmy, zależą od sił — przyciągających, bądź odpychających — które działają między najdrobniejszymi cząsteczkami metalu, a które nazywamy (mianem ogólnym, lecz niejasnym) „siłami spoistości“.

Jaki charakter mają te siły?

Odpowiedzi dostarczyło nam dwóch współczesnych fizyków niemieckich: W. Kossel i M. Born: są one pochodzenia elektrycznego.

Nie możemy przedstawić w tym miejscu matematycznych teorii, rozwiniętych w pracy Maxa Borna (po niemiecku) pod tytułem „Dynamika siatek krystalicznych“. Jednak trzeba pamiętać, że:

1. dwa ładunki elektryczne o różnych znakach przyciągają się, o jednakowych — odpychają;

2. wszystkie ciała składają się z naelektryzowanych cząstek, z których jedne mają ładunek dodatni, drugie ujemny.

Rozumiemy wobec tego, że siły przyciągające i odpychające mogą równoważyć się w metalu, np. miedzi. Jeżeli byśmy metal włożyli do piezometru (rys. 52), to wzajemne odpychanie się cząstek zostanie wzmożone, lecz zrównoważą je siły, które wywieramy z zewnątrz. Na tej drodze można obliczyć ściśliwość a nawet określić w przybliżeniu wchodzącą w grę energię, będącą właściwie jeno energią chemiczną: tak więc i własności chemiczne, i spoistość otrzymują jedno i to samo wytłumaczenie, dzięki elektryczności.

Na podstawie zdobytych dotychczas wiadomości możemy teraz przystąpić do drugiej części rozdziału, to znaczy do poznania budowy metalów i stopów oraz do zrozumienia, na czym polega zgniot i hartowanie.

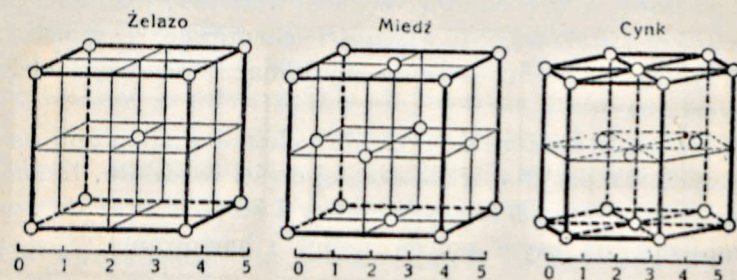
Kryształy metaliczne.

Kryształem jest ciało stałe o regularnym kształcie, ograniczone płaskimi powierzchniami. Jako przykład można przytoczyć kryształ skalny albo ametyst, sól i cukier lodowy. Ale jeżeli zapytacie niespodzianie nie-specjalisty: „Czy metale posiadają budowę krystaliczną?“ — to na pewno, myśląc o szynach tramwajowych, aluminiowych pudełkach, monetach, odpowie: „Nie!“ I pomyli się. Metale — i stopy — składają się z kryształów, co ustalił Floris Osmond w 1885 roku za pomocą metod, o których zaraz wspomnimy. Jednak te kryształy są bardzo małe, są to mikrokryształy (na ogół mniejsze od 0,1 mm); mówi się więc, że metale i stopy posiadają budowę mikrokryystaliczną (albo drobnokrystaliczną). Każdy z mikrokryształów stanowi odrębną całość, tak jak kryształy w worku szarej soli; jednak są one połączone ze sobą rodzajem „cementu“, o którego roli pomówimy potem obszerniej.

Dziełem ostatnich lat są dwa zasadnicze odkrycia:

1. Amerykanin Hull (pod wpływem badań Niemca von

Lauego) zajmował się od dziesięciu lat oznaczaniem położenia atomów metalu wewnątrz mikrokryształów, używając promieni X. Sposoby ułożenia atomów sprowadzają się do dziewięciu zasadniczych typów, z których trzy najprostsze przedstawiają rysunki 67, 68 i 69. Żelazo w normalnej temperaturze, wolfram (druty w żarówkach elektrycznych) odpowiadają sześciąnom zawierającym w środku dodatkowy atom (sześciąn centryczny, rys. 67). Miedź



Rys. 67, 68 i 69. Typowa budowa kryształów metalu. — Rysunki przedstawiają rozmieszczenie atomów w trzech ważnych wypadkach; sześciąn centryczny (zimne żelazo); sześciąn o ścianach centrycznych (miedź); graniastosłup sześcioboczny (cynk). Podziałki na dole rysunków oznaczają dziesięciomilionowe milimetra (powiększenie liniowe wynosi więc prawie 100 milionów).

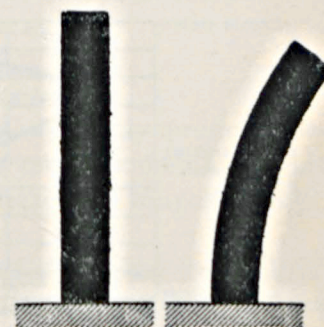
glin, ołów, metale szlachetne są utworzone z sześciąnom, w których środek każdej ściany zajęty jest przez dodatkowy atom (sześciąn o ścianach centrycznych, rys. 68). Cynk, magnez składają się z graniastosłupów sześciobocznych (ośmiościennych) — rys. 69. Nasze rysunki dają również wyobrażenie o wymiarach tej sieci kryształów: jeżelibyśmy badali kryształ miedzi, którego rozmiary w dziesiątych milimetra wynoszą 8, 3 i 2 (0,8 mm, 0,3 mm i 0,2 mm), to wzdłuż kolejnych jego krawędzi leżeć będzie 2.200.000, 850.000 i 550.000 sześciąnom, tak że ten małeńki kryształ zawiera w sobie liczbę elementarnych sześciąnom, wyrażającą się przez 1.334 i piętnaście zer, czyli ponad miliard miliardów.

2. W ostatnich latach otrzymano metale w postaci zupełnie nowej, w postaci pojedynczego kryształu (albo

dużego kryształu), która wyraźnie różni się od znanej postaci drobnokryształicznej. W Ameryce i w Niemczech wytworzono kryształy miedzi, których rozmiary w centymetrach wynoszą 15, $2\frac{1}{2}$ i $2\frac{1}{2}$: taki kryształ zawiera liczbę elementarnych sześciąnom (rys. 70) równą

1.400.000.000.000.000.000.000.000,

to znaczy milion razy więcej niż mikrokryształ. Wielkie kryształy wytwarza się różnymi sposobami: przez odpowiednie oziębianie pary metalu, przez walcowanie roztopionego metalu z szybkością dokładnie określoną, przez walcowanie zwykłego metalu w odpowiednich warunkach. Właściwości takich kryształów są wręcz niespodziewane: w szczególności są one nadzwyczaj plastyczne; najmniejszy ucisk wywołuje trwałe zniekształcenie. Jeżeli na przykład ustawić duży kryształ miedzi na mniejszej podstawie



Rys. 70 i 71. Samozniekształcenie się kryształu miedzi (wielkość naturalna).

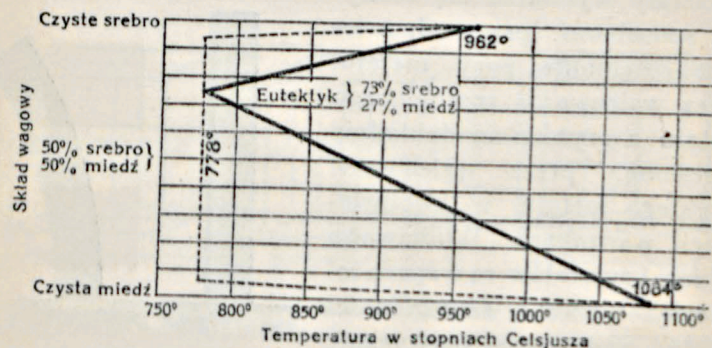
(rys. 70), to w ciągu kilku godzin zegnę się on pod własnym ciężarem (rys. 71). Takie metale przypominają raczej miękisz chleba a nie ostrze noża. Przyczyna tego jest prosta: o ile metale i stopy są przygotowane w sposób zwykły, to składają się z maleńkich kryształów, rozłożonych bezładnie we wszystkich możliwych kierunkach; metale takie przejawiają zatem równocześnie właściwości zbioru kryształów i właściwości cementu, który kryształy te łączy.

Duże kryształy metali i stopów nie mają na razie żadnego zastosowania w praktyce; to jednak nie zmniejsza ich wielkiego znaczenia teoretycznego, bowiem badanie ich rzuca wiele światła na te wielkie skupiska mikrokryształów, jakimi są metale.

W jaki sposób bada się metale i stopy?

W tym rozdziale, poświęconym przede wszystkim praktycznym wynikom badań kruszców i stopów, poświęcimy niewiele tylko miejsca dwom głównym metodom badań, które się wzajemnie wspomagają a których pionierem był francuski inżynier Floris Osmond:

1. Badanie mikrograficzne (albo metalografia mi-



Rys. 72. Wykres topności. — Wykres podaje temperatury zaczynającego się topnienia (linia kropkowana) i krzepnięcia (linia ciągła) dla wszystkich możliwych stopów srebra i miedzi. Największa topność odpowiada mieszaninie eutektycznej, to znaczy zbiorowi nie uporządkowanych mikrokryształów o zawartości 73% Ag i 27% Cu.

kroskopowa) polega na przygotowaniu płaskiej i gładkiej powierzchni stopu; następnie na nadaniu wyraźnych konturów różnym składnikom przez operowanie różnicami szybkości działania odczynników chemicznych, których reakcji poddaje się płytkę; wreszcie na zbadaniu pod mikroskopem tak przyrządzonej powierzchni albo na zrobieniu z niej fotografii (o rozmaitych powiększeniach, najczęściej między 50-krotnym i 200-krotnym). Niedługo spotkamy się z otrzymanymi w ten sposób „mikrografiami“.

2. Analiza cieplna albo badanie topnienia i krzepnięcia stopów. Zbadajmy na przykład stop srebra i miedzi; przygotowuje się aliaże, zawierające (na wagę) 95% srebra i 5% miedzi, 90% srebra i 10% miedzi..., 5% srebra i 95%

miedzi. Następnie mierzy się temperaturę „początku topnienia“ stopów stałych (linia kropkowana z rys. 72) i „początku krzepnięcia“ stopów płynnych (linia ciągła z rys. 72). Otrzymany diagram jest bardzo prosty; temperatura topnienia przy pewnej proporcji składników (73% srebra i 27% miedzi) jest najniższa; mówi się, że powstaje stop eutektyczny. W innych, bardziej złożonych wypadkach wykresy topności wykazują występowanie roztworów ciał stałych, bądź też związków chemicznych.

Skład stopów.

W praktyce stopem nazywa się każdy produkt pochodzący od metalu i zawierający metal, z dodaniem jednego lub wielu pierwiastków, najczęściej innych metali. Stopy mogą być utworzone:

1. Z mikrokryształów pierwiastków. Nasz rysunek 77 pokazuje kryształy czystej miedzi; należy zaznaczyć, że jedno i to samo ciało proste (np. żelazo) przybierać może różne postaci kryształów, zależnie od temperatury.

2. Z mikrokryształów związków chemicznych. Rys. 73 przedstawia mikrostrukturę takiego związku, zawierającego 85% bizmutu i 15% magnezu.

3. Czasem się zdarza, że składniki łączą się ze sobą w dowolnym stosunku nie tylko w stanie ciekłym, ale i wówczas gdy przechodzą w stan stały: mamy wtedy do czynienia z prawdziwymi roztworami ciał stałych, bardzo jednorodnymi, jak wskazuje mikrostruktura brązu (95% miedzi i 5% cyny, rys. 74); takie roztwory są szczególnie odporne na przeżarcie (stal nie rdzewiejąca).

4. O ile składniki nie mieszają się ze sobą w stanie stałym, to można z nich utworzyć eutektyk o dokładnie określonym składzie. Eutektyk taki, jak wykazuje zresztą sama jego nazwa, stanowi bardzo jednorodną mieszaninę kryształów obu składników (eutektyk znaczy „dobry skład“). Na rys. 75 pokazany jest eutektyczny stop ołowiu 87%) z antymonem (13%); rys. 76 pokazuje nad-

miar jednego ze składników — jest to stop bizmutu (70%) z antymonem (30%); jaśniejsze kryształy bizmutu odcinają się na tle eutektyku (55% bizmutu i 45% antymonu).

Należy pamiętać, że stopy mają bardzo złożoną budowę, zależną od charakteru mikrokryształów, od ich rozmiarów, od ich układu a także od łączącego je cementu. Widać z tego, jak błędne jest określenie: „stop jest mieszaniną kilku metali“, które się jeszcze czasem spotyka w książkach chemicznych a które każe przypuszczać, że w stopie mogą znajdować się jedynie związki; jest to tylko wypadek szczególny, jaki omawialiśmy powyżej w punkcie drugim.

Zgniot zmienia budowę metalu.

Teraz możemy zrozumieć, co się dzieje, gdy kujemy metal, i jakich nowych właściwości nabiera on wtedy.

Dopóki metal jest poddawany słabym jedynie działaniom, dopóty mikrokryształy podlegają tylko odkształceniom sprężystym, czyli chwilowym; ale z chwilą wejścia w dziedzinę odkształceń plastycznych (trwałych) stwierdzamy, że zmieniają się i mikrobudowa, i właściwości metalu; mówimy, że metal został odkuty. To zachowanie się zawdzięczają metale swojej wielokryształicznej budowie; możliwość zgniotu, a ogólniej mówiąc, właściwości plastyczne nadają metalom charakter tak specjalnie ważny z punktu widzenia naukowego i technicznego.

Skoro odkształcenie jest dostatecznie duże, to warstwy rozdzielające okazują się oporniejsze od samych kryształów, które się rozpadają. Łatwo to sprawdzić za pomocą mikrografii: na rysunkach 77 i 78 widać miedź przed i po zgniotcie. Im większe jest odkształcenie, tym większemu rozdrobnieniu ulegają kryształy i tym więcej zmieniają się właściwości metalu; bez trudu można się domyślić, że przewlekanie pręta przez coraz mniejsze otwory (rys. 64) wywołuje większy zgniot niż walcowanie (rys. 63) albo zwykle rozciąganie (rys. 58 i 59). Jeżeli metal nie daje się już



73



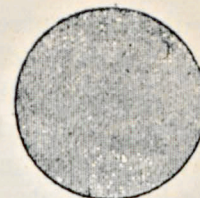
75



77



79



74



76



78



80

Rys. 73, 74, 75, 76, 77, 78, 79, 80. Tak samo jak badając pod mikroskopem tkanki istot żywych (roślin i zwierząt) przygotowujemy je w specjalny sposób — tak też i metale trzeba w tym celu preparować. Metoda mikroskopowa dostarczyła już dużo wiadomości o wewnętrznej budowie tak tkanek żywych jak i stopów metalowych. Metalografia mikroskopowa polega na nadaniu stopowi płaskiej i gładkiej powierzchni i uzyskaniu wyraźnych zarysów jego składników przez wyzyskanie różnicy szybkości działania odpowiednio dobranych odczynników chemicznych; wreszcie na zbadaniu tak przyrządzonej powierzchni pod mikroskopem albo lepiej na zrobieniu z niej fotografii. Bynajmniej nie chcemy tu przytaczać całego atlasu mikrograficznego, jaki możemy znaleźć w dziełach specjalnych; ograniczymy się jedynie do pokazania, jakie są najważniejsze składniki stopów i w jaki sposób zmienia się wygląd stopów, zależnie od pewnych ważnych działań (zgniot, hartowanie). Na rys. 73 widać budowę ciała złożonego, którego skład chemiczny jest niezmienny. Rys. 74 pokazuje „roztwór stały“ (5% cyny i 95% miedzi — brąz), to znaczy taki wypadek, kiedy składniki mieszają się ze sobą nawet w stanie stałym. Rys. 75 przedstawia (powiększenie 200-krotne) eutektyk, czyli ściśłą mieszaninę dwu różnych gatunków kryształów (tutaj ołów i antymon). Na rys. 76 widać czyste kryształy bizmutu, bardzo jasne, odcinające się na tle mniej jednorodnego eutektyku ołów—bizmut (powiększenie 50-krotne). Rys. 77 i 78 pokazują w tej samej skali (50-krotne powiększenie) duże kryształy zwykłej miedzi (wyżarzanej) i małe kryształy miedzi kutej. Stal nie zahartowana (3% węgla) jest złożona z dwu gatunków kryształów (rys. 79); stal hartowana na gorąco jest jednorodniejsza i twardsza (rys. 80).

odkształcić przez nowe przewlekanie, to mówi się, że jest on zupełnie odkuty.

Anglik Beilby stworzył przeszło dwadzieścia lat temu teorię, która dość dobrze tłumaczy charakter zgniotu. Według niej mikrokryształy są porozdzielane odstępami, w których atomy nagromadzone są bezładnie i nie przypominają pięknych struktur z rys. 67, 68 i 69. Atomy te stanowią tzw. cement, podobny do płynu ze względu na nieuporządkowanie swych atomów; poza tym jednak jest on wybitnie sztywny, prawie nie ulegający odkształceniu. Ścieranie się kryształów wywołuje powiększenie proporcji owego międzykryształowego cementu, a im ona będzie większa, tym lepiej metal zostanie odkuty. Prawidłowe określenie stopnia zgniotu polegałoby na wykryciu proporcji między cementem a mikrokryształami; jednak w obecnej chwili nie ma na to dostatecznych środków. Trzeba więc zadowolić się wielkościami mniej dokładnymi: tak np. jeżeli 1 mm^2 zmniejszy się po pewnym procesie do $0,2 \text{ mm}^2$, mówimy, że zgniot jest 80 procentowy.

Metal zahartowany przez kucie odzyskuje pierwotne swe właściwości po ogrzaniu.

W większości metali (w normalnej temperaturze) cement i mikrokryształy są połączone trwale ze sobą. Ale wzrost temperatury powoduje przyspieszenie krystalizacji: sproszkowane kryształy zwiększają swoje wymiary kosztem cementu; metal odzyskuje właściwości, które miał przed zgniotem: jest glijowany albo odpuszczony.

Usztywnienie przez kucie może po dłuższym czasie zniknąć nawet w zwykłej temperaturze: nazywa się to samorzutnym osłabieniem struktury albo „zużyciem się” czy też „zestarzeniem się” metalu. A jeżeli pewne metale, jak na przykład ołów, nie dają się odkuć, znaczy to, że samorzutne rozhartowanie zachodzi niezwykle szybko: ołów zachowuje się w niskiej temperaturze tak jak miedź przy 800°C .

Kute metale mają ciekawe właściwości mechaniczne.

Teoria streszczona powyżej tłumaczy dziwny fakt, że zwykle metale mają większą gęstość niż kute; czyli że podczas przeciągania metalu przez coraz mniejsze otwory jego objętość się zwiększa, a nie zmniejsza. Byłoby to niezrozumiałe, gdyby zgniot polegał tylko na zbliżeniu atomów; jednak jest proste, gdy sobie przypomniemy, że powstaje nowe ciało — cement.

Oto kilka interesujących liczb dotyczących gęstości:

Metal	Zwykły	Kuty
Glin	2,7030	2,6995
Żelazo	7,7970	7,7772
Miedź	8,8317	8,8313
Bismut	9,8354	9,8522

Mówiliśmy już, że cement międzykryształowy podobny jest do cieczy dzięki bezwładnemu układowi swoich atomów. Trzy pierwsze metale (glin, żelazo, miedź) zmniejszają swą gęstość zarówno przy topieniu jak i przy zgniotcie. A bismut, który przy topieniu zyskuje na gęstości, doznaje jej zwiększenia również i przy kuciu. Istnieje szereg tego rodzaju zgodności, które z pewnością nie są przypadkowe i które czynią tak prawdopodobną teorię Beilby'ego.

Właściwości mechaniczne metali kutech są najciekawsze z punktu widzenia praktyki. Dla lepszego zrozumienia wystarczy szerzej omówić uwagi podane już wyżej. Rys. 81 przypomina znane już wyniki: krzywa OPAMR dotyczy zwykłego glinu; punkty P i R określają plastyczność i wytrzymałość metalu.

Przypuśćmy, że chcemy zahartować glin przez rozciąganie: bierzemy glin wyżarzony (punkt O) i rozciągamy go bacząc, aby przejść punkt P dla wywołania trwałego odkształcenia. Doszedłszy do punktu A (napiecie 8 kg

wszystkich metali¹ i stopów (z małą zmianą liczb). Można powrócić do pierwotnych własności metalu przez wyżarzanie go w odpowiedniej temperaturze przez dostatecznie długi czas.

Jeszcze jedna ważna uwaga. Mówiliśmy dotąd tylko o hartowaniu przez zgniot, to znaczy przez wzajemne ścieranie się kryształów metalu w normalnej temperaturze. W wypadku rozciągania następuje zahartowanie przez zgniot, które trzeba odróżnić od hartowania przez szybkie oziębianie, o jakim zaraz będzie mowa. Jeżeli używaliśmy wyrażenia „hartowanie“, to dlatego, że „zgniot“, chociaż właściwszy, nie byłby może dokładnie rozumiany. Poza tym zgniot, mimo wielu różnic, daje wyniki bardzo podobne do hartowania na gorąco i dlatego można go również uważać za rodzaj hartowania.

Co to jest hartowanie przez szybkie oziębianie?

Hartowanie polega na nagłym oziębieniu stopu, ogrzanego najpierw do bardzo wysokiej temperatury, niższej wszakże od temperatury topliwości. Takie hartowanie jest wskazane przede wszystkim dla stopów o dużej zawartości żelaza: hartowanie stali powiększa jej wytrzymałość i twardość, zmniejsza zaś rozciągliwość i ciągliwość. Narzędzia przeznaczone do obróbki metali są hartowane; metal rozciągliwy zostaje zazwyczaj obrobiony przez kucie, potem wyżarzony dla zwiększenia jednorodności, wreszcie ogrzany do około 750° i zanurzony do kąpieli.

Odpuszczanie odbywa się przez ogrzanie stopu zahartowanego (i przez to zbyt łamliwego) do temperatury względnie niskiej wobec temperatury hartowania (200°—300°). Odpuszczanie zmniejsza przemiany wywołane zbyt mocnym zahartowaniem.

Wyżarzanie ma na celu zupełne usunięcie wyników hartowania, tak zresztą jak i przy zgniciu; w obu wy-

¹ Poza bizmutem.

padkach ciało ogrzane do wysokiej temperatury zostaje powoli ostudzone.

Niemniej istnieje zasadnicza różnica między opisanym tu hartowaniem a zgniotem: pierwsze jest zjawiskiem wyjątkowym, gdy natomiast zgniotowi mogą podlegać wszystkie metale i stopy; hartowanie na gorąco może się udać tylko dla tych stopów, które mają dwie odrębne budowy: jedną na gorąco, drugą na zimno. Stop rozgrzany i bezpośrednio potem pogrążony w kąpieli nie ma czasu przystosować się i zachowuje w mniejszym lub większym stopniu te właściwości, które miał w chwili kładzenia go do kąpieli; stop rozhartowany, czyli powoli oziębiany, osiąga zwykłą budowę w normalnej temperaturze. Rys. 79 i 80 odpowiadają: pierwszy — stali wyżarzonej, złożonej z nie uporządkowanych mikrokryształów, drugi — stali hartowanej o budowie jednorodniejszej.

Hartowanie, aby było skuteczne, musi być „twarde“, to znaczy szybkie: istnieje długi szereg pośrednich możliwości między gwałtownym oziębianiem, pozwalającym na zachowanie budowy osiąganą przy wysokich temperaturach, a powolnym ochładzaniem, które tę budowę niszczy. Z możliwości tych korzystamy dla najlepszego wyzyskania materii. Wynik hartowania zależy więc głównie od okoliczności, w których jest ono przeprowadzane, a przede wszystkim od:

1. Czasu nagrzewania.
2. Wysokości osiągniętej temperatury.
3. Całego czasu oziębiania.
4. Przebiegu oziębiania, którego początek odgrywa główną rolę.

Zdolność chłodzenia kąpieli, do której wkłada się hartowany metal, zależy przede wszystkim od jej ciepła właściwego (tzn. ciepła, którego trzeba dostarczyć, aby ją ogrzać o 1°), od płynności, od ciepła parowania (czyli ciepła potrzebnego na zamianę 1 g na parę). Te trzy czynniki powinny być jak największe; dlatego woda, odpowiadając tym warunkom, jest świetną kąpielą.

Przewodnictwo cieplne cieczy (zdolność przepuszczania ciepła) odgrywa rolę podrzędną.

Teoria hartowania pozwoliła na znakomite ulepszenie praktycznej umiejętności, dając rozumową podstawę tym zaczerpniętym z doświadczenia sposobom, które niegdyś składały się na sztukę mistrzów kowalskich.

Na zakończenie omówimy jeszcze te metale, których czasem używa się bez domieszek i te, których używa się tylko w postaci stopów, oraz najważniejsze z punktu widzenia praktyki stopy.

Dużo metali można używać bez domieszek.

Następujące metale — ułożone według malejącego znaczenia praktycznego — są używane same, bez żadnych domieszek:

Żelazo jest metalem najważniejszym (roczna produkcja światowa: 140 milionów ton) i najtańszym; mało topliwe, bardzo wytrzymałe, rdzewiejące (utleniające się).

Miedź (1,400.000 ton) jest bardzo rozciągliwa, dość wytrzymała, niezbyt twarda; w praktyce wyzyskuje się doskonale przewodnictwo elektryczne i cieplne czystej miedzi.

Ołów (1,300.000 ton) — oporny na reakcje chemiczne, bardzo topliwy, mało wytrzymały, bardzo miękki, rozciągliwy.

Glin (1,200.000 ton) jest lekki, wytrzymały, rozciągliwy; jest też dobrym przewodnikiem, nie bardzo zmieniającym się na powietrzu (części samochodów i samolotów, naczynia domowe, kable elektryczne, papier aluminiowy itd.).

Cynk (1,000.000 ton) mało wytrzymały, rozciągliwy dopiero przy 150° C; chociaż palny na powietrzu, nie zmienia się jednak w normalnych warunkach (galwanizacja).

Cyna (130.000 ton) jest bardzo topliwa (pobielanie), niewytrzymała, nietłota; daje się łatwo odlewać, czelować, krajać, walcować (papier cynowy).

Nikiel (30.000 ton) jest wytrzymały, rozciągliwy

i ciągliwy, nietopliwy, mniej utleniający się od żelaza (monety, niklowanie).

Rtęć (5.000 ton) — płynna w temperaturze zwykłej (barometry, termometry, manometry, metalurgia i kruszce szlachetne).

Srebro (7.000 ton) i złoto (600 ton) są bardzo miękkie, rozciągliwe i ciągliwe, bardzo odporne na reakcje chemiczne.

Platyna (3 tony) — trudno topliwa, prawie tak wytrzymała jak żelazo, ciągliwa, rozciągliwa, niezwykle odporna na reakcje chemiczne.

Tantal, bardzo twardy (stalówki wiecznych piór, drobne narzędzia chirurgiczne); kobalt, który doskonale zastępuje nikiel; kadm, używany w złotnictwie.

Pewne ciała nieorganiczne są używane tylko w postaci stopów.

Antymon (25.000 ton), łamliwy, łatwy do sproszkowania, palący się na powietrzu.

Magnez, bardzo lekki, łatwy do obróbki; utlenia się w zimnie, pali się bardzo jasnym płomieniem.¹

Bismut — twardy i łamliwy.

Mangan, wanad, chrom, wolfram,² molibden,³ twarde i nietopliwe, spotyka się w składnikach specjalnych stali.

Cer połączony z żelazem tworzy stopy piroforyczne (używane do kamieni w zapalniczkach).

Pomiędzy nieorganicznymi pierwiastkami niemetalicznymi, które spotyka się w stopach, należy wymienić węgiel, obecny w stali (do 1% węgla) i lanym żelazie (kilka procent węgla).⁴

¹ Wapń i bar są czasem używane na stopy, wytrzymałe na tarcie.

² Wolfram czysty jest używany na druciki w żarówkach elektrycznych.

³ Używa się go do żarówek elektrycznych.

⁴ Krzem i boru używa się tylko w specjalnych wypadkach

Najważniejsze stopy spotykane w przemyśle.

Spośród wszystkich stopów przemysłowych najważniejsze są żelazo-węglowe (żelazo lane, a zwłaszcza stal); ich budowa jest bardzo złożona: zawierają one pierwiastki (żelazo i węgiel), związki węgla z żelazem, roztwory stałe i eutektyki. Stal ma wielką wytrzymałość i twardość; hartowanie zwiększa twardość kosztem wzrostu łamliwości. Dodanie niklu, krzemu i magnezu zmniejsza łamliwość bez widocznego wpływu na twardość. Pomiedzy stalami specjalnymi o ważnych właściwościach mechanicznych wyróżniają się przede wszystkim:

1. Stale niklowe (2% niklu); mają dwa razy większą wytrzymałość niż stale zwykłe.

2. Wanad (1% lub 2%) zmniejsza łamliwość a zwiększa wytrzymałość na powtarzające się obciążenia, nie zmieniając ciągliwości.

3. Stale chromowe (kilka procent chromu) są bardzo twarde i mało poddające się reakcjom chemicznym (ostrza, przeróżne narzędzia, płyty pancerne); one są właśnie tymi sławnymi i tak dziś rozpowszechnionymi stalami nierdzewującymi.

4. Stale chromowo-wolframowe mają tę cenną właściwość, że mogą być ogrzewane do 500° C i nie rozhartowują się, bowiem ich hartowanie dokonuje się przy 1.200°; nazywają się „stalami szybkobieżnymi“, ponieważ wprowadzenie ich pozwoliło na dziesięciokrotne zwiększenie szybkości obrotów obrabiarek i znacznie zwiększyło ich wydajność.

Inne stopy żelaza mają również duże znaczenie praktyczne:

1. Nichrom (60% niklu, 28% żelaza, 12% chromu) służy do fabrykacji oporników elektrycznych.

2. Permalloy (78% żelaza, 22% niklu) ma ciekawe właściwości magnetyczne i dlatego stosuje się go w telegrafii podmorskiej.

3. Platynit (54% żelaza, 46% niklu, ślad węgla) ma

rozszerzalność zbliżoną do szkła, stąd używa się go na spojenia w lampach żarowych; niegdyś używano platyny, i gdyby nie udało się znaleźć surogatu, to oświetlenie elektryczne nie uzyskaloby swego dzisiejszego rozpowszechnienia.

4. Inwar (64% żelaza, 36% niklu, 0,2% węgla) ma znów małą rozszerzalność, dziesięć razy mniejszą od szkła; robi się zeń przyrządy pomiarowe i sprężyny chronometrów; zmiany temperatury nie mają wówczas znaczenia, co wywołało przewrót w konstrukcji zegarów.

Mosiądze (stopy miedzi-cynkowe) i brązy (stopy miedzi-cynowe) są twardsze od miedzi i dają się łatwo odlewać; służą, zwłaszcza mosiądz, do wyrobu mnóstwa przedmiotów. Miedzi dodaje się do złota i srebra dla zwiększenia twardości, co wcale nie wpływa na ich odporność chemiczną.

Stopy wytrzymałe na tarcie są utworzone z twardych ziarek (np. antymonu), otoczonych plastyczną masą (ołów, cyna).

Czcionki drukarskie składają się ze stopu ołowiu z antymonem (85% plus 15%): bardzo twardy w stanie stałym a kleisty w płynnym, stop ten daje się odlewać w subtelne postaci. Topliwy stop elektrotechników i lut mają podobny skład (67% ołowiu i 33% cyny) i topią się przy 240°.¹ Topliwość jest ważnym czynnikiem przy fabrykacji odlewów: „metal angielski“ zawiera prawie 90% cyny i 10% antymonu; żeliwo szare (3% węgla) topi się przy 1.200°, czyli o 300° niżej od miękkiego żelaza. Stopy rtęciowo-cynowe szybko krzepną i mają dość dużą twardość: używa się ich do plombowania zębów.

Mała gęstość stopów jest najczęściej właściwością drugorzędną, chyba że chodzi o konstrukcje samolotowe i samochodowe: brązy aluminiowe (95% glinu i 5% miedzi), o gęstości około 3, mają znacznie lepsze właściwości mechaniczne niż glin; alpaks (87% glinu i 13% krzemu)

¹ Eutektyk z ołowiu (33%) i cyny (67%) jest jeszcze bardziej topliwy (180°).

o podobnej gęstości ma dosyć dużą wytrzymałość: wyrabia się z niego wiele przedmiotów lanych; duraluminium jest stopem jednolitym (gęstość 2,8) o 95% glinu, 5% miedzi i o śladach magnezu i manganu; wreszcie magnalium (90% glinu i 10% magnezu) jest najlżejszym z tych stopów: gęstość jego nie przekracza 2,5.

Wiek stali i stopów.

Wzrastające wciąż znaczenie metali w nowoczesnym życiu charakteryzuje ubiegłe i obecne stulecie. Skończyła się epoka brązu a nawet i żelaza; żyjemy w wieku stali i specjalnych stopów. Metale tryumfują głównie w środkach przewozowych: wszystko ze stali — parowozy i wagony, samoloty i auta. Stal zdobyła sobie również narzędzia przemysłowe, a tylko w elektrotechnice odstępuje miedzi część swego znaczenia. Nawet budowle nie zostały się zwycięskiemu pochodowi metali: żelazo-beton pozwolił osiągnąć niesłychaną szybkość konstrukcji i niezwykłą trwałość.

Poznaliśmy najważniejsze właściwości metali i stopów. Praktyczne ich zastosowania stanowią jeno ukoronowanie prac, długich i żmudnych, dokonywanych najczęściej z tą tylko troską, aby lepiej poznać otaczający świat; rzadko się zdarza, żeby jakieś epokowe odkrycie zrodziło się z żądzy udoskonalenia czegoś. Można powiedzieć, bez żadnego paradoksu, że lotnictwo, wymagające lekkich stopów, byłoby niemal niemożliwe, gdyby Amerykanin Willard Gibbs nie zadał sobie trudu zbadania stanów równowagi stykających się ze sobą różnorodnych substancji; nie wyszlibyśmy do dziś z dziedziny tradycyjnych stopów — zwyczajnej stali, mosiądzu, brązu — gdyby uczeni wszystkich krajów, idąc za przykładem Florisa Osmonda, nie byli się wysilili na wypracowanie płodnych i dokładnych metod analizy cieplnej i metalografii mikroskopowej.

PROMIENIOWANIE CIAŁ ROŻŻARZONYCH

Angielski uczony Kelvin rzekł pewnego dnia: „Jeżeli chcecie mieć pojęcie o przedmiocie, o którym mówicie, to zmierzcie go i przedstawcie jego własności liczbowo; w przeciwnym razie wasze wiadomości będą wątpliwe i mało zadowalające.“ Głęboka uwaga wielkiego fizyka stosuje się z zadziwiającą ścisłością do obecnych naszych wiadomości o świetle i oświetleniu. W rzeczywistości rozwój oświetlenia datuje się od dnia, w którym zajęto się naukowym pomiarem energii promienistej. Nie wystarczy bowiem możność stwarzania potężnych źródeł światła; trzeba jeszcze umieć je zużytkować w najwydajniejszy sposób, uniknąć szkodenia siatkówce oka, otrzymać najlepsze wyniki z punktu widzenia ekonomicznego i artystycznego.

Od prehistorycznej pochodni do lampki elektrycznej.

Sztuczne światło... Nie ma bardziej namacalnego przykładu wpływu postępu wiedzy na życie socjalne, poczynając od epoki, w której nasi dalecy przodkowie zaradzali codziennemu znikaniu słońca zapalaniem końca smolistej gałęzi.

Historię oświetlenia można by podzielić na cztery okresy, zachodzące zresztą na siebie:

1. Spalanie ciał stałych. Dymiąca pochodnia pierwszych wieków została zastąpiona na początku nowej ery przez świecę, zrobioną najpierw z wosku, później z kwasu stearynowego lub parafiny i dającą jeszcze do dziś często oświetlenie pomocnicze.

2. Spalanie cieczy, olejów roślinnych w starożytności, nafty w XIX wieku.

3. Spalanie gazów: najpierw gazu świetlnego (Filip

Lebon, 1799), później najrozmaitszych węglowodorów, jak np. acetylen; koszulki Auera przedłużyły o kilka lat ten przeżyty sposób oświetlenia.

4. Niespalanie niczego: to jest obecny etap; lampa żarowa tryumfuje. Została ona poprzedzona przez łuk elektryczny (Davy, 1813), w którym jeszcze się coś spalało — paleczki węgla — i góruje do dziś nad świetlnymi rurkami z gazem, rtęcią lub neonem.

Trzy pierwsze okresy były niemal wyłącznie empiryczne: wynalazcy kierowali się wyobraźnią, intuicją, „węchem“, co jest wprawdzie dobre dla wystawiania zwierzyny, ale nigdy nie prowadzi daleko w technice.

Ostatni okres zawdzięczamy zastosowaniu w praktyce wyników badań naukowych, opartych w dużej mierze na rozważaniach matematycznych. Wyniki te zawarte są w prawach promieniowania (Kirchhoff, Stefan, Wien, Planck).

Wielkie znaczenia pomiaru.

Jeszcze niedawno uczeni poprzestawali na obserwacji jakościowej: badano wiele zjawisk, ale nie zatrzymywano się nad dokładnym pomiarem w celu ścisłego ich zbadania. Otóż gdyby chcieć jednym zdaniem scharakteryzować postęp naukowy i przemysłowy, dokonany w wieku XIX, można by powiedzieć, że ludzkość nauczyła się ściśle mierzyć to, o czym dotychczas tylko niejasno mówiono.

Pomiar wielkości ma tę olbrzymią zaletę, że prawie zupełnie usuwa wpływ badającego. Oceny są zazwyczaj subiektywne, odczytania na przyrządzie — obiektywne; wszyscy się z nimi zgadzają. Bezpośrednie zastosowanie tych uwag znajdziemy w pomiarze światła. Obiektywnie biorąc, światło jest energią promienistą o określonej częstotliwości drgań; subiektywnie zaś chodzi o działanie tego promieniowania na oko i aby je zbadać, trzeba by powołać mnóstwo obserwatorów i znaleźć średnią z ich ocen; osiągnęłoby się wynik określający przeciętne ludzkie oko.

Dzięki określeniom i pomiarom wielkości fizycznych można było zastosować do nauk przyrodniczych ścisłe metody matematyczne: arytmetykę, algebrę, geometrię analityczną, rachunek różniczkowy i całkowy. Ci z czytelników, którzy zachowali przykre wspomnienia ze swoich stosunków z matematyką, mogliby być zdania, że się zaniedbuje, zaprzepaszcza wprost fizykę i chemię, gubiąc je w powodzi obliczeń. Wielki to błąd, ale z ich strony! Nauki przyrodnicze byłyby bez matematyki jakimiś mętnymi „lekcjami o rzeczach“; przecież dlatego właśnie biologia została w tyle za fizyką i chemią, że jeszcze niezbyt poddaje się rachunkowi.

Fizjolog francuski Le Dantec miał rację pisząc: „Wszystko, co się w człowieku dzieje a jest nam znane, nadaje się do zmierzenia“. I trzeba się zastanowić nad głęboką uwagą wielkiego uczonego angielskiego Kelvina: „Jeżeli chcecie mieć pojęcie o przedmiocie, o którym mówicie, to zmierzcie go i ujmijcie liczbowo; w przeciwnym razie wasze wiadomości będą bardzo wątpliwe i mało zadowalające; jest to może początek jedynie, lecz trudno jest zdobyć wiedzę na podstawie samych rozmyślań, niezależnie od tego, co jest wiedzy tej przedmiotem“.

Energia promienista — promieniowanie — której szczególną postacią jest światło, ma charakter elektromagnetyczny. Podajemy tu w skróceniu to, co trzeba zapamiętać, aby nasze późniejsze wywody były zrozumiałe.

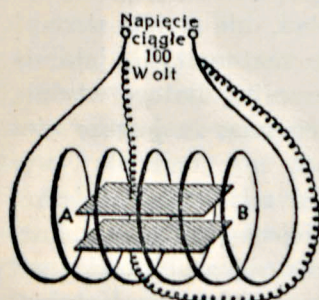
Polem elektrycznym nazywamy część przestrzeni obdarzoną szczególnymi właściwościami, znajdującą się między okładkami naelektryzowanego kondensatora.

Polem magnetycznym nazywamy część przestrzeni wyposażoną w szczególne właściwości, zawartą wewnątrz uzwojenia, po którym przebiega prąd elektryczny.

Wprowadźmy do uzwojenia kondensator (rys. 83). Przestrzeń AB, wspólna dla obu przyrządów, będzie siedli-

skiem stałego pola elektromagnetycznego, utworzonego z pionowego pola elektrycznego (pochodzącego od kondensatora), na które nakłada się poziome pola magnetyczne (wytworzone w uzwojeniu).

Dopóki przepuszczany prąd jest stały, dopóty pole elektromagnetyczne obejmuje bardzo małą część przestrzeni. Ale z chwilą gdy użyjemy prądu przemiennego o „50 okresach“ — albo o 0,05 kilocyklach, jak mówią „bezdrutowcy“ — pole elektromagnetyczne będzie się rozchodziło w przestrzeni z szybkością 300.000 km/sek. Przestrzeń AB stanie się stacją nadawczą fal elektromagnetycznych niezwykle długich, bo mających około 7 milionów metrów.¹



Rys. 83. Co to jest pole elektromagnetyczne? — Źródło światła wytwarza szybkozmienne pole elektromagnetyczne, rozchodzące się w przestrzeni z szybkością 300.000 km/sek.

Przypuśćmy teraz, że moglibyśmy powiększyć dziesięć tysięcy miliardów razy częstotliwość drgań prądu przemiennego; wówczas o tyle zmniejszyłaby się długość fali i w AB wytworzyłby się ośrodek emisji światła czerwonego, dostrzegalnego dla oka.

Przechodząc od pewnej częstotliwości drgań do częstotliwości dwa razy większej, posuwamy się o jedną oktavę; podobnie jak i w muzyce, mówi się, że jedno drganie jest oktavą drugiego wówczas, gdy ich częstotliwości są do siebie w stosunku 2:1; długości fali znajdują się także w stosunku 1:2, ponieważ szybkość rozchodzenia się wynosi stale 300.000 kilometrów na sekundę.

Zasadnicza uwaga: spośród fal elektromagnetycznych,

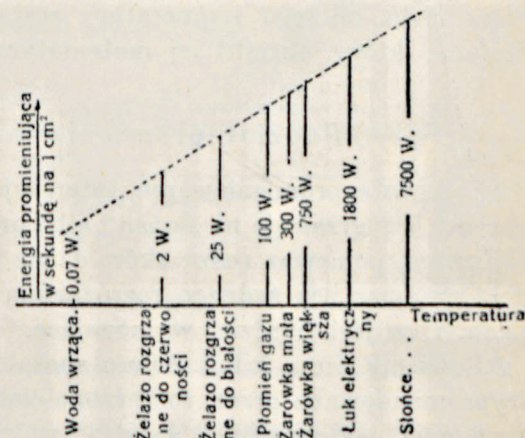
¹ To jest odległość z Paryża do Nowego Jorku. Mnożąc liczbę kilocykliów przez długość fali w metrach, zawsze otrzyma się stałą liczbę 300.000 (metrów, przebywanych przez falę w ciągu jednej tysięcznej sekundy).

tworzących 65 oktav o długości od tysięcy kilometrów do miliardowych milimetra, oko ludzkie spostrzega tylko jedną jedyną oktavę, która jest „światłem“ w dosłownym znaczeniu. Fale, które oko odczuwa, możemy używać posługując się rozżarzonymi ciałami stałymi.

Promieniowanie ciał o wysokiej temperaturze.

Dla uproszczenia będziemy rozważali zachowanie się metalowej kuli pokrytej sadzą i ogrzewanej do coraz to wyższych temperatur.

Zbadajmy energię promieniowaną przez tą kulę w otoczeniu o temperaturze 15°C. Znajdziemy wówczas, że co sekundę wypromieniuje ona pewną ilość kalorii albo lepiej watów — należy pamiętać, że jedna kaloria na sekundę wynosi 4,2 wata, czyli



Rys. 84. Całkowite promieniowanie ciał stałych w różnych temperaturach.

1 wat równa się 0,24 (małej) kalorii na sekundę.

Nasza kula ma, przypuśćmy, 1 centymetr kwadratowy powierzchni, więc jej średnica jest równa 5,6 mm. Poddamy ją kolejno ogrzaniu do:

- 100° (temperatura wrzącej wody);
- 520° (rozgrzane żelazo poczyną się czerwienić);
- 1.100° (biała czerwien);
- 1.600° (płomień gazowy);
- 2.000° (żarówka mała);
- 2.600° (żarówka większa);
- 3.600° (łuk elektryczny);

wreszcie, jeśli to było możliwe, do temperatury powierzchni słońca (5.700°).

Rys. 84 przedstawia energie wypromieniowane przez naszą kulę we wszystkich kierunkach w ciągu 1 sekundy: wyraźnie widać, że słońce wypromieniowuje z takiej samej powierzchni prawie sto tysięcy razy więcej niż miseczka z wrzącą wodą; i to również, że promieniowanie staje się dwukrotnie silniejsze, gdy przechodzimy od 2.000° do 2.600° .

Zależność całkowitej energii, wysyłanej przez rozżarzone ciało, od jego temperatury została ustalona przez Stefana, który określił jej matematyczną postać.

Podział promieniowania.

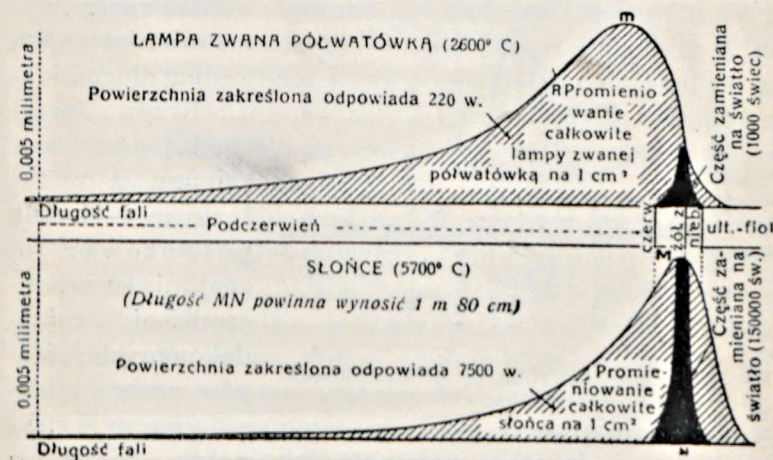
Całkowite promieniowanie interesuje nas wtedy, gdy chcemy „wyrząć się na słońcu” albo przy grzejniku elektrycznym, ponieważ nasza skóra działa wówczas jak ciało pochłaniające bez żadnego rozróżnienia wszystko, co nań pada. Oko jest bardziej wymagające.

Powiemy teraz kilka słów o sposobie, w jaki energia wypromieniowana przez rozżarzone ciało rozkłada się na promienie podczerwone, światło widzialne i nadfiolet, albo, mówiąc ściślej, na różne częstotliwości. Zagadnienie to zostało zbadane przez dwóch fizyków: Wiena a później Plancka.

Może niektórzy z czytelników zadawali sobie pytanie, dlaczego miseczka z gorącą wodą nie świeci sama przez się tak jak dusza od żelazka do prasowania, która przybiera ciemnoczerwony kolor, gdy się ją długo trzyma w piecu? Powodem tego jest to, że gdy podnosimy temperaturę jakiegokolwiek ciała stałego, promieniowanie jego nie tylko się zwiększa ilościowo, ale i zmienia jakość: podwyższeniu temperatury odpowiada przejście od fal podczerwonych do fal świetlnych, później do nadfioletu; długość fali promieniowania zmniejsza się albo, co na jedno wychodzi, wzrasta jego liczba kilocykli; energia promie-

nista powoli, stopniowo przesuwa się do coraz wyższych oktaf.

Tak więc dopóki ciało stałe nie osiągnie 500° C, jego emisja ograniczona jest wyłącznie do podczerwieni: grzeje ono, lecz nie oświetla. Czerwień zjawia się około 520° C (400 miliardów kilocykli; długość fali: osiem dziesięciotysięcznych milimetra — $0,0008$ mm); mówi się wówczas o ciemnej czerwieni. Następnie widmo przesuwa się ku bar-



Rys. 85 i 86. Wykresy energii promieniowanych przez lampę tzw. półwatówkę i przez słońce.

wie żółtej, zielonej i niebieskiej, co wywołuje czerwień (550°), jasną czerwień (600°), czerwień czereśniową (700°). W końcu, przy 1.100° , reprezentowane są wszystkie promieniowania świetlne do fioletu włącznie: mamy do czynienia z białą czerwienią.

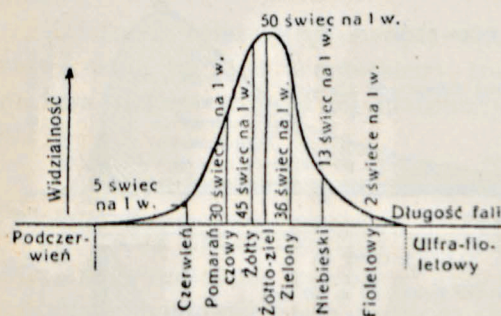
Ale jaką korzyść osiągnie się z przekroczenia tych 1.100° ? — mógłby się ktoś spytać. Pouczy was o tym jeden rzut oka na wykresy 85 i 86. Zwróćmy uwagę na powierzchnie zakreskowane (znaczenie plam czarnych zostanie wytłumaczone później): porównujemy lampę półwatówką (2.600° C) ze słońcem (5.700° C), centymetr kwadratowy z centymetrem kwadratowym. Zaznaczymy, że jeśli chodzi o słońce, wymiary poprzeczne rysunku (np.

MN) powinny być trzydzieści pięć razy większe, na co nie pozwalają rozmiary stronicy.

Jeden centymetr kwadratowy powierzchni drucików lampy elektrycznej, zwanej półwatówką, wysyła 220 watów.

Jeden centymetr kwadratowy powierzchni słońca wypromieniowuje ogółem 7.500 watów; ileż wypromienianej i roztrwonionej na próżno energii!

Ale to jeszcze nie wszystko: nasze wykresy 85 i 86 podają



Rys. 87. Działanie różnych promieniowań na oko.

rozkład energii wypromieniowanych według długości fali. Krzywe przechodzą przez maksimum w punktach m i M. Dla półwatówki m znajduje się w podczerwieni; mimo

dokonanych postępów nasze najlepsze lampy elek-

tryczne mają kiepską wydajność jako źródła światła, są za to świetnymi grzejnikami.

Słońce daje o wiele korzystniejszy rozkład energii: maksimum promieniowania słonecznego zbliża się do promieni zielono-żółtych, na które oko ludzkie jest najczulsze.

Widzialność promieniowania.

Przez to miano rozumie się dostrzegalność każdego promieniowania przez naszą siatkówkę. Według tego, cośmy już powiedzieli, barwie żółtozielonej odpowiada maksimum widzialności; przyjmujemy, że widzialność światła tej barwy jest równa jedności. Rozumie się samo przez się, że części widma, których nie widzimy — podczerwień i po-zafiolet — posiadają widzialność równą zeru.

Promieniowania różnie działają na oko, mają różną

„widzialność”: działanie to osiąga maksimum przy barwie żółtozielonej; w miarę oddalania się od tej barwy obserwujemy spadek widzialności tak w kierunku podczerwieni jak i nadfioletu.

Krzywą widzialności dla przeciętnego oka otrzymamy przez uwzględnienie dużej liczby obserwatorów; wyniki pomiarów podaje wykres na rys. 87.

Wrażliwość oka na promienie żółtozielone jest zadziwiająca. Bardzo staranne doświadczenia dowiodły, że paląca się świeca może być dostrzeżona w odległości 27 km; obliczono, że energia, którą odbiera wówczas oko, nie mogłaby podnieść temperatury 1 grama wody o 1 stopień nawet wtedy, gdyby jej emisja trwała bez przerwy dziesięć milionów wieków.

Jest to szczęśliwy traf dla praktycznych zagadnień oświetleniowych, bo gdyby oko było dziesięć milionów razy mniej wrażliwe (gdyby najsłabsze dostrzegalne promieniowanie potrzebowało tylko jednego wieku na wydanie jednej kalorii), to „ostre słońce” południowe, w środku lata, sprawiałoby na nas wrażenie zaledwie pełni księżyca.

Krzywa widzialności (rys. 87) pozwala powrócić do wykresów na rys. 85 i 86 i wytłumaczyć znaczenie tajemniczych czarnych plam, które przedtem pominęliśmy. W obu przypadkach (słońce i półwatówka) oznaczają one promienistą energię, zawartą między czerwienią a fioletem, z uwzględnieniem rys. 87. Tak więc stosunek czarnej plamy do powierzchni zakreskowanej będzie przedstawiał wydajność świetlną źródła światła. Widać, że światło słoneczne jest nieporównanie wydajniejsze od światła lampy, nie tylko dlatego, że widzialna energia promieniowania słońca jest dużo większa, ale również dlatego, że czarna plama jest położona korzystniej. Duża wydajność świetlna słońca pochodzi głównie z bardzo wysokiej temperatury, wyższej od tych, jakie możemy osiągnąć na ziemi.

Patrząc z ogólniejszego punktu widzenia zrozumiemy bez trudu, że krzywa widzialności pozwala na znalezienie związków liczbowych między promieniowaniem

całkowitym — wysłanymi watami — a właściwościami świetlnymi tegoż promieniowania, mierzonymi w świecach i luksach.¹

Świeca i luks.

Natężenie świetlne lampy elektrycznej wymierza się w świecach: jeżeli ma ona 50 świec, to mówimy, że wytwarza takie światło, jakie wytworzyłoby efektywnie 50 świec skupionych w miejscu lampy. Jeżeli o tym wątpicie, to przypomnijcie sobie, jak ponurego wyglądu nabiera wasze mieszkanie, skoro zapalicie świecę, gdy się zepsuje elektryczność.

Wzorzec świetlny nie przedstawia się oczywiście w postaci zwykłej świecy, lecz stanowią go lampy żarowe, drobniogłowo zbadane i przechowywane w wielkich laboratoriach fotometrycznych (Berlin, Londyn, Paryż, Waszyngton).

W zagadnieniu oświetlenia światło odbierane ważniejsze jest od nadawanego: nadawane charakteryzujemy podając natężenie świetlne źródła, odbierane — podając oświetlenie mierzone w luksach: lampa o natężeniu 1 świecy daje w odległości 1 metra oświetlenie 1 luksa.

Nawet powierzchowna obserwacja przekona nas, że oświetlenie na przykład kartki papieru zmniejsza się w miarę oddalania od oświetlającej ją lampy. Bardzo łatwo to określić:

L (rys. 88) jest lampą elektryczną, która oświetla kartkę papieru ABCD w odległości 1 metra. Jeżeli kartkę oddalimy znowu o jeden metr, to ta sama ilość światła będzie rozłożona na czterokrotnie większą powierzchnię $A^1 B^1 C^1 D^1$, tak że kartka w odległości 2 m będzie oświetlona cztery razy słabiej. Dziewięć razy słabiej w odległości 3 metrów i tak dalej.

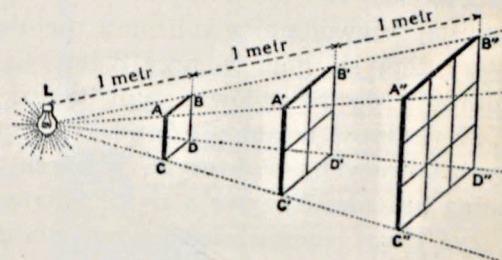
¹ Używa się również miary lumen: jeżeli lampa działa równomiernie we wszystkich kierunkach z natężeniem 1 świecy, to w ogóle promieniuje ona w ciągu 1 sekundy ilość „światła” — mówi się czasem strumień świetlny — równą 12,6 lumena. Wobec tego naświetlenie wyraża się w lumen-godzinach.

Można to sformułować, jak następuje: oświetlenie zmienia się odwrotnie proporcjonalnie do kwadratu odległości.

Jeżeli lampa L ma 100 świec, to oświetlenie w A wynosi 100 luksów, w A^1 25 luksów, w A'' 11 luksów itd. Widać więc, z jaką szybkością zmniejsza się oświetlenie, skoro oddalenie wzrasta.

Dla mieszkań najlepsze jest oświetlenie zawarte między 20 a 50 luksami, zależnie od wielkości pokoju; dla sklepów, biur — od 50 do 150 luksów; dla wystaw — od 100 do 1.000 luksów; w studio kinematograficznym wymagane jest oświetlenie rzędu 500 do 2.000 luksów. Oświetlenie wytwarzane przez słońce w południe

ładnego letniego dnia osiąga prawie 100.000 luksów.



Rys. 88. Oświetlenie zmniejsza się ze wzrostem odległości. — To samo światło (wysłane przez lampę L) pokrywa powierzchnię 1, 4, 9 w odległościach 1, 2, 3 metrów. Każdy więc centymetr kwadratowy dostaje w odległości 2 m cztery razy mniej światła niż w odległości 1 m, 9 razy mniej w odległości 3 m itd.

Lampy próżniowe i lampy z atmosferą gazową.

Lampa elektryczna jest źródłem światła prostym, praktycznym i nadzwyczaj oszczędnym. Jej główny składnik stanowią bardzo cienkie druciki przewodzące, które rozżarzają się wskutek przepływu prądu elektrycznego.

Lampę charakteryzują w zupełności trzy liczby¹:

1° jej strumień świetlny w lumenach: np. 2.500 lumenów odpowiada promieniowaniu o natężeniu przeciętnie 200 świec we wszystkich kierunkach;

¹ A zatem nie wystarcza podanie samej liczby świec lub watów.

2° zużywana przez nią moc elektryczna w watach: np. 150 watów;

3° czas trwania jej użytecznego życia w godzinach, to znaczy czas, w ciągu którego wysłane światło nie spada poniżej 80% swego początkowego natężenia: np. 1.000 godzin.

Lampy o przewodach węglowych są niemal zupełnie zarzucone; zastąpiono je „przewodami metalowymi“, a ściślej przewodami z wolframu, metalu bardzo odpornego, który topi się dopiero przy 3.100° C. Obecnie w handlu znajdują się dwa główne typy lamp:

1. Lampy zwane jednowatowymi, o przewodach zygzakowatych, w których wnętrzu panuje prawie zupełna próżnia. Nazywają się tak dlatego, ponieważ trzeba zużyć 1 wat energii elektrycznej dla otrzymania 1 świecy w kierunku poziomym. W rzeczywistości — jeśli wziąć średnią natężeń świetlnych we wszystkich kierunkach — lampka taka zużywa dużo więcej energii: trzeba liczyć półtora wata na świecę. Przypuśćmy, że chcemy wysłać 50 luksów na biurko za pomocą jednowatówki zawieszanej na wysokości 2 metrów. Według tego, cośmy już mówili, trzeba wziąć lampę 200-świecową (wyśle 200 luksów z odległości 1 metra, więc 50 z odległości 2 m); zużyta energia elektryczna wyniesie $200 \times 1,5 = 300$ watów — 3 hektowaty. Po godzinie będziemy mieli zużyte 3 hektowat-godziny.

2. Lampy zwane półwatówkami, o przewodach w kształcie korony, wewnątrz których panuje (podczas ich działania) ciśnienie azotu prawie równe atmosferycznemu. Wprowadzenie tego obojętnego gazu, które zawdzięczamy amerykańskiemu uczonemu Langmuirowi, zmniejsza szybkość parowania przewodów i pozwala na osiągnięcie wyższej temperatury (2.600° C zamiast 2.000° w jednowatówkach). Te nowe żarówki wymagają zużycia około pół wata dla otrzymania 1 świecy w kierunku poziomym, co odpowiada mniej więcej trzem czwartym wata na przeciętną świecę we wszystkich kierunkach (rys. 89). Dla

otrzymania naszych 50 luksów przy pomocy takiej lampy 200-świecowej zużyjemy $200 \times 0,75 = 150$ watów, a więc dwukrotnie mniej.

Oszczędności nie należy zaniedbywać — zwłaszcza przy dużych natężeniach — wobec ceny energii elektrycznej. Jeżeli z dnia na dzień odkładacie zastąpienie starych żarówek lampami o atmosferze gazowej (półwatówkami), to przynajmniej róbcie to wtedy, gdy któraś ze starych lamp zepsuje się: wynik zobaczycie, skoro licznik wskaże, ile trzeba płacić...

Z U Ż Y C I E											
2	4	6	8	10	12	14	16	18	20	22	24
Słońce 0,02 wata na świecę											
Lampa rtęciowa: 0,25 wata na świecę											
Łuk płomienny: 0,3 wata na świecę											
Łuk zwykły: 0,5 wata na świecę											
Lampa neonowa: 0,6 wata na świecę											
Lampa półwatówka: 0,75 wata na świecę											
Lampa jednowatówka: 1,5 wata na świecę											
Żarówka węglowa: 3,5 wata na świecę											
Acetylen: 4 waty na świecę											
Palnik Ruera 8 wat na świecę											
Nafta: 22 waty na świecę											
Świeca: 24 waty na świecę											

Rys. 89. Zużycie energii w różnych źródłach światła przy obciążeniach zwykłych.

Porównanie spożycia energii przez lampy.

Dwa szczególnie ważne przykłady ułatwią zrozumienie pojęcia spożycia energii przez źródło światła: jest to ilaraz całkowitej energii wypromieniowanej (wyrażonej w watach) przez natężenie źródła światła (w świecach). Im mniejsza będzie liczba watów, dzielonych przez świecę, tym lepsza będzie wydajność.

Aby sobie dobrze zdać sprawę z ulepszeń uzyskanych w technice oświetlenia, przejrzyjmy (rys. 89) lampy do dziś dnia używane i porównajmy je ze słońcem.

Rurki z parą rtęciową wydają światło blade, zielonkawe, niemiłe, ale są bardzo oszczędne, jak i łuki płomienne, zabarwione na jasnożółty kolor.

Następnie przychodzi kolej na zwykły łuk elektryczny

i rurki z neonem, czerwonomarańcowe, używane do reklam świetlnych.

Następne miejsce zajmują lampy o przewodach metalowych, później węglówki, płomień acetylenowy, palnik Auera,¹ lampa naftowa i zwyczajna świeca, których wydajność jest trzydzieści razy słabsza od wydajności półwatówki.

Takiego postępu dokonano do obecnej chwili: porównanie naszych lamp ze słońcem wskazuje, co jeszcze pozostało do zrobienia w tym wyścigu ku zmniejszeniu spożycia.

Jasność i oślepianie.

Lampy nie można dokładnie scharakteryzować przez podanie jej natężenia świetlnego: elektryczna latarka kieszonkowa może mieć na przykład natężenie 1 świecy (zupełnie jak zwykła świeca!), jednak latarka będzie miała dużo większą jasność. Pochodzi to z tego, że żarzący się drucik ma powierzchnię dużo mniejszą od płomienia świecy: jeżeli dwa źródła światła mają takie samo natężenie, to z nich, które ma mniejszą powierzchnię, ma większą jasność.

Jasność wyraża się w świecach na centymetr kwadratowy.

(Kartka papieru, oglądana przy świetle księżyca, ma jasność kilku tysięcznych świecy na centymetr kwadratowy.)

Oto kilka przykładów źródeł światła, ułożonych według jasności:

Świeca	0,5 świecy na 1 cm ²
Palnik Auera	6 „ „ „
Żarówka węglowa	50 „ „ „
Lampa jednowatowa	150 „ „ „
Lampa półwatowa	1.000 „ „ „
Łuk elektryczny	3.500 „ „ „
Słońce	150.000 „ „ „

¹ Trzeba zaznaczyć, że obecny koszt oświetlenia 200-świecowego gazem (w palniku Auera) jest trochę niższy od kosztu równoważnego oświetlenia elektrycznego (półwatówka); ale za to jaka różnica w wygodzie!

Półwatówka jest dwa tysiące razy jaśniejsza od świecy; jednak to nadzwyczaj żywe światło kryje niebezpieczeństwo dla oczu, a mianowicie oślepianie, męka czasem nie do zniesienia, którą dla oka wywołuje zbyt jasne i zbyt bliskie światło lampy.

Porażenie oka związane jest, jak się wydaje z punktu widzenia fizjologicznego, z fotochemicznym rozkładem barwików siatkówki; nie wiadomo jednak, jakie elementy siatkówki — pręciki czy też czopki — najbardziej podlegają owemu rozkładowi. Porażenie wywołuje od razu dwie obronne czynności: najpierw najzupełniej bezwiedną reakcję, która w wyniku zmniejsza średnicę źrenicy; następnie zaś szereg odruchów, już bardziej pod kontrolą woli (przymknięcie powiek, odwrócenie głowy...), które zapobiegają dochodzeniu zbyt jaskrawego światła do siatkówki.

Można odróżnić trzy postaci porażenia, ze względu na jego pochodzenie:

1. Porażenie bezpośrednie, wywołane np. patrzeniem na słońce lub rozżarzone metale: robotnicy zajęci przy tych metalach chronią oczy silnie przyciemnionymi okularami.

2. Porażenie przez odbicie, jak na przykład odbłask światła słonecznego na morzu, gdy słońce znajduje się nisko nad horyzontem; i w tym wypadku powinno się używać ciemnych szkieł. Na tego rodzaju porażenia narażeni są ci, którzy pracują nad powierzchniami odbijającymi promienie, jak polerowany metal lub błyszczący papier.

3. Porażenie przez kontrast, któremu się podlega przechodząc z pokoju ciemnego do jaskrawo oświetlonego (w odwrotnym wypadku występują też przykre zakłócenia czynności wzrokowych).

Przy sztucznym oświetleniu do usuwania tych niebezpieczeństw używa się rozpraszaczy i reflektorów.

Urządzenia rozpraszające, odbijające i załamujące światło.

Zwykła lampa dostarcza w rzeczywistości światła w postaci surowego produktu, który dopiero trzeba zmienić według potrzeb przez zastosowanie odpowiednich instalacji. Najczęściej światło podlega „rozrzuceniu”, rozproszeniu, bądź za pomocą odpowiednich materiałów przepuszczających (klosze załamujące lub rozpraszające w dosłownym znaczeniu), bądź też za pomocą materiałów nieprzezroczystych, mniej lub więcej matowych (klosze odbijające albo reflektory). Często zastępuje się urządzenia rozpraszające przez oszklenie pryzmatyczne (refraktory).

Wypada określić bliżej działanie tych urządzeń, aby zrozumieć zasady oświetlenia pośredniego i bezpośredniego.

Najpierw zastanówmy się, jaka jasność nie wywołuje oślepienia. Można przypuścić, że świeca, zwyczajna świeca, z odległości 1 metra nie będzie raziła; otóż świeca ma widzialną powierzchnię około 2 centymetrów kwadratowych; można więc bez przykrości patrzeć na lampę mającą jasność 0,5 (świecy na 1 cm²) w odległości 1 metra. Można obliczyć, że oświetlenie siatkówki wynosi wówczas około 2.500 luksów, a ponieważ najlepsze warunki do pracy odpowiadają mniej więcej 5 luksom, czyli pięćset razy słabszemu oświetleniu, przeto widać, że nasz narząd wzrokowy potrafi się przystosować w granicach bardzo szerokich.

Zastosujmy te rozważania do lampy elektrycznej półwatówki, której jasność wynosi 1.100, czyli jest 2.000 razy większa od jasności świecy:

1. Jeżeli lampa jest nie zakryta, to ponieważ oświetlenie zmienia się odwrotnie proporcjonalnie do kwadratu odległości, a $45 \times 45 = 2.000$, przeto na półwatówkę trzeba by było patrzeć z odległości przynajmniej 45 metrów; wynika stąd, że w mieszkaniu wszystkie lampy powinny być zakryte.

2. Najprostszym sposobem jest użycie mlecznych żarówek: wtedy rozżarzone druciki zastępuje świetlista kula

o dobrze znanym mlecznym wyglądzie. 200 świec lampy zmniejszy się do 160 (wskutek pochłaniania światła przez szkło) i będzie rozłożone na powierzchni koła o 6,5 cm średnicy, czyli na 32 cm². Jasność jest 200 razy słabsza: 5 świec na 1 cm², a rachunek wykazuje, że taką „mleczną lampę” można ustawić w odległości 3 m.¹

Podobne obliczenie pozwoli ocenić światło przechodzące przez otaczający żarówkę klosz przepuszczający światło lub też zrobiony ze szkła pryzmatycznych: ponieważ rozpraszacze i refraktory mają dosyć dużą powierzchnię, więc rozumie się, że światło będzie jeszcze łagodniejsze.

Na czym polega oświetlenie pośrednie?

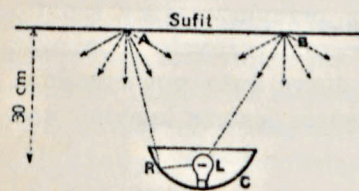
3. Łatwo sobie zdać sprawę z istoty oświetlenia pośredniego: lampa L (rys. 90) jest umieszczona wewnątrz klosza C o ścianach emaliowanych. Promienie bezpośrednie LB lub odbite LRA padają na sufit AB, gdzie rozpraszają się we wszystkich kierunkach; efekt byłby taki sam, gdyby poza sufitem na tej samej wysokości (np. 30 cm) umieszczono tę samą lampę L' wraz z kloszem C', pod warunkiem, że sufit byłby z opalizującego szkła. Oświetlenie pośrednie udaje się tylko wówczas, gdy sufit jest barwy jasnej, odsyłającej 60%—80% światła: lampa o 300 świecach da przy oświetleniu pośrednim 200 świec,² ale wzrok nie będzie narażony na spotkanie z oślepiającymi drucikami.

Rozpraszacze, refraktory i reflektory marnują wprawdzie poważny ułamek światła wysłanego — tak skąpo — przez lampę; ale ich wydajność nie jest znów tak zła, jakby można było sądzić, bowiem spożycie energii przez lampy bardzo się zmniejsza, skoro wzrasta ich natężenie.

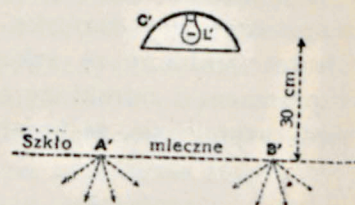
¹ Trzeba jeszcze dodać, że przy jednakowej jasności źródła światła o powierzchni większej jest bardziej rażące od źródła o powierzchni mniejszej.

² Reszta rozprasza się w postaci ciepła. Na to, aby rozpraszacz idealny (100%) miał jasność 1 świecy na 1 cm², potrzeba byłoby oświetlenia 31.000 luksów.

Na zakończenie dorzucmy jeszcze, że trzeba brać pod uwagę przystosowywanie się oka, czyli odruch regulujący wielkość otworu źrenicy, którego powierzchnia może się zmieniać w stosunku 1:20¹: jeśli patrzeć na nie osłoniętą lampę o 200 świecach, źrenica kurczy się i do siatkówki dochodzi dużo mniej światła niż wtedy, gdyby za-



Rys. 90. Co to jest oświetlenie pośrednie? — Lampa L, umieszczona wewnątrz nieprzezroczystego klosza C, wysłała światło na sufit, który je odbija.



Rys. 91. Na czym polega oświetlenie pośrednie? — Wszystko tak się odbywa, jak gdyby lampa z poprzedniego rysunku została wraz z kloszem umieszczona w L' za sufitem, o ile ten byłby z mlecznego szkła.

rówka była z mlecznego szkła i zatrzymywała choćby nawet ćwierć lub jedną trzecią światła, wysłanego przez druciki.

Co pozostaje do zrobienia?

Na poprzednich stronicach daliśmy starań, aby określić pojęcia konieczne do zrozumienia, na czym polega zagadnienie oświetlenia.

Ludzie zajmujący się oświetleniem w Europie, a przede wszystkim we Francji, zaczęli od najszybszego sposobu: zaznajomienia się z tym, co zrobiono za granicą, i z tego powodu zostali prawdziwymi uczniami — trochę niewolniczo — Amerykanów.

To, co nazwali oni mianem „zasad naukowych“, jest

¹ Wskutek przystosowania się oka, lampy zapalone na ulicy w biały dzień wywołują ledwie dostrzegalny efekt.

w gruncie rzeczy empiryzmem, nieraz niezbyt związanym z zagadnieniem. Nie wątpimy jednak, że w niedalekiej przyszłości badania ich doprowadzą do rzeczywistych ulepszeń.

Postępy w technice oświetlenia wiążą się z dwoma zagadnieniami niezależnymi od siebie:

1. Ulepszenie źródeł światła z punktu widzenia oszczędności; widzieliśmy bowiem (rys. 89), że jeśli chodzi o lampy będące dziś w użyciu, głównym ich produktem jest ciepło, a światło jest raczej produktem pobocznym.

2. Ulepszenie instalacji: dobre rozłożenie światła bez niepotrzebnego pochłaniania i usunięcie oślepiania.

W obu tych zagadnieniach wiedza i przemysł wzajemnie sobie pomagają. W ciągu ćwierci wieku przeszliśmy od lampy naftowej do żarówki o atmosferze gazowej; można więc sobie wyobrazić niespodzianki, jakie kryć może bliska nawet przyszłość.



RÓŻNE RODZAJE LUMINESCENCJI

Dziś wszyscy wiedzą, co to jest luminescencja i promieniowanie termiczne — dziś, gdy szklane światła zużytkowują różnobarwne efekty pochodzące z rurek o atmosferze gazowej (luminescencja) lub lamp elektrycznych z drucikami (żarzenie). Istnieje również inne zjawisko, różne od tamtych dwóch, stanowiące jednak również rodzaj luminescencji; spostrzega się je patrząc na przykład na świecący po ciemku siarczek cynku: jest to fosforescencja. Gdy promieniowanie termiczne jest zawsze wynikiem tylko wzrostu temperatury ciała stałego, luminescencję wywołują inne czynniki. Będą to siły mechaniczne, to znów zjawiska chemiczne i elektryczne, wreszcie samo światło, pochłonięte i zwrócone. Mamy tutaj mnóstwo nowych zjawisk o wielkim znaczeniu naukowym, które powinien poznać każdy, kto chce coś wiedzieć o ewolucji współczesnych teorii.

Promieniowanie termiczne i luminescencja.

Wszystko, co nie jest prozą, jest wierszem — mówił profesor filozofii do Jourdaina — a to wszystko, co nie jest wierszem, jest prozą. Tak samo musimy powiedzieć o emisji świetlnej: Wszystko, co nie jest promieniowaniem termicznym jest luminescencją, a to wszystko, co nie jest luminescencją, jest promieniowaniem termicznym. Promieniowaniem termicznym zajmował się poprzedni rozdział; spotykamy je w lampach elektrycznych, w płomieniu świecy, w koszulce Auera, a nawet w żółtym blasku wywołanym przez spryskanie płomienia gazowego źródłaną wodą (zabarwienie pochodzi z soli morskiej, której ślady zawiera woda). Luminescencję zaś spotykamy w wielobarwnych rurkach (zwanych świetlnymi), tak dziś rozpoznanych jako świetlne reklamy, a także „świetlnych tarczach zegarków“, które pozwalają widzieć w ciemności

„godzinę“. W różnych łukach elektrycznych mamy do czynienia zarazem i z promieniowaniem termicznym, i z luminescencją, z przewagą jednego lub drugiego, zależnie od rodzaju.

Profesor filozofii powiedziałby, że to coś takiego, jak rytmiczna proza lub biały wiersz.

Promieniowanie termiczne charakteryzowane jest przez to, że energia wysyłanych promieniowań pochodzi z energii cieplnej, z energii spontanicznych ruchów cząstek materialnych, które, w miarę wzrostu temperatury, stają się coraz gwałtowniejsze. W rozdziale VI szczegółowo zbadaliśmy promieniowanie termiczne, więc już doń nie powrócimy. W luminescencji, przeciwnie, energia promieniująca pochodzi z innych postaci energii, wśród których należy przytoczyć:

1. Energia mechaniczna. — Wszyscy znają niebieskawe błyski, rzucane w ciemności przez tłuczony cukier; łamanie cukru wywołuje słabe wyładowania elektryczne, które powodują świecenie zawartego w powietrzu azotu: mówi się, że następuje triboluminiscencja (od greckiego słowa *tribein* — trzeć). Analogiczne błyski powstają, gdy łupać płatki miki, gdy mały strumyk rtęci cieknie w próżni oraz wtedy gdy następuje krystalizacja niektórych ciał (bezwodnik arsenowy); w takim wypadku mówi się o krystaloluminiscencji.

2. Energia chemiczna. Każdy wie, że na powietrzu, w ciemności, świeci się biały fosfor. Inny przykład, mniej znany, ale łatwy do zaobserwowania: otrzymuje się słabe błyski, gdy do ługu bielącego wlewa się mocny roztwór wody utlenionej. Te dosyć liczne zjawiska dostały miano chemiluminescencji. Do nich zalicza się i bioluminescencja albo świecenia biochemiczne, wywoływane przez liczne żyjątka morskie, jak również przez samiczki naszych robaczek świętojańskich.

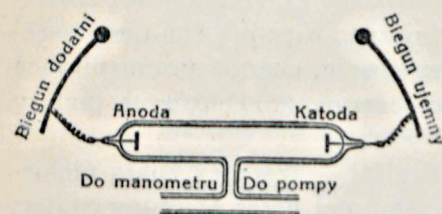
3. Energia elektryczna. — To jest elektroluminescencja; ma ona mnóstwo zastosowań. Do tego punktu powrócimy jeszcze i szczegółowiej go rozpatrzymy.

4. Energia świetlna. — Mianem fotoluminescencji

cji oznacza się świecenie wywołane przez inne promieniowania; zobaczymy, że dzieli ją się na fosforescencję i fluorescencję; będziemy mówili o zupełnie niedawnych odkryciach, którym poświęca się dzisiaj dużo uwagi.

Wyladowania w rozrzedzonych gazach.

Rurka widoczna na rys. 92 służy do pokazania kilku rodzajów elektroluminescencji. Dwa aluminiowe pręty



Rys. 92. Sposób badania świecenia w rurach próżniowych. — Dwie elektrody, przylutowane do końców rurki, są połączone z biegunami maszyny elektrostatycznej (albo cewki Ruhmkorffa). Wytwarza się wewnątrz rurki stopniowo próżnię i w zależności od jej stopnia otrzymuje się kolejno różne zjawiska świetlne — rys. 93, 94, 95, 96: różne postacie wyladowania elektrycznego.

wo próżnię; stopień próżni mierzy się manometrem, a oto jak przedstawiają się najważniejsze zjawiska, zależnie od wysokości ciśnienia:

a) Pod ciśnieniem atmosferycznym zjawiają się iskry mniej lub więcej rozgałęzione, będące miniaturą piorunów; ich trzask jest zarodkiem grzmotów (rys. 93).

b) W miarę spadku ciśnienia iskry powoli stają się coraz grubsze i skoro ciśnienie spadnie do jednej czwartej atmosfery (to znaczy skoro cząstki gazu są czterokrotnie mniej liczne niż w powietrzu), zjawia się fiołkowe pasmo (rys. 94), które wciąż zmienia kształt.

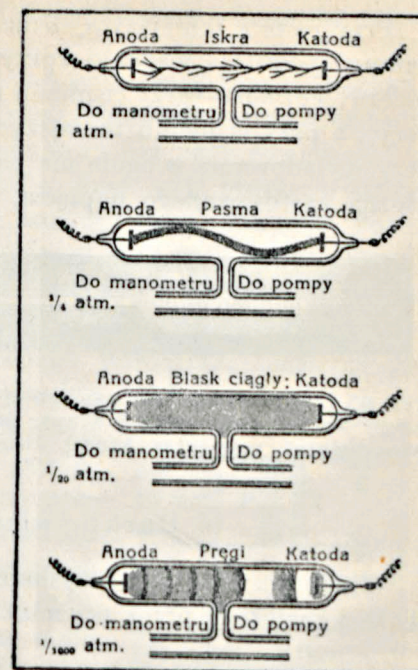
c) Później pasmo rozszerza swoją średnicę i w końcu

(anoda i katoda) mają metalowe połączenia, idące poprzez szkło, z dwoma biegunami maszyny elektrostatycznej (albo małego transformatora, znanego pod nazwą cewki Ruhmkorffa); anoda jest połączona z dodatnim biegunem generatora, katoda — z ujemnym. Za pomocą pompki pneumatycznej w rurce wytwarza się stopniowo

wypełnia całą rurkę światłem jednostajnym, również fiołkowym (rys. 95), z chwilą gdy ciśnienie obniży się do jednej dwudziestej atmosfery. To świecenie jest symetryczne, nie zmieni się więc, gdy zastąpić kierunkowe wyladowanie zmiennym; jest to wypadek, z jakim mamy do czynienia w rurkach świetlnych, do których jeszcze powrócimy.

d) Wreszcie światło jednostajne rozszczepia się w poprzek i zjawiają się prążki, jak gdyby zgęszczenia i rozrzedzenia fiołkowego światła, a następnie przestrzenie ciemne, a równocześnie katoda jest otoczona świetlnym wiankiem. Na rysunku 96 widać postać, jaką przybiera wyladowanie przy ciśnieniu 0,001 atmosfery. Widać ją jeszcze lepiej na rys. 97.

Te nieoczekiwane zjawiska pochodzą ze skomplikowanego mechanizmu świecenia, w którym grają rolę nie tylko elektrony wyrzucane przez katodę, ale i jony, to znaczy atomy gazu pozbawione elektronów lub posiadające elektrony dodatkowe.



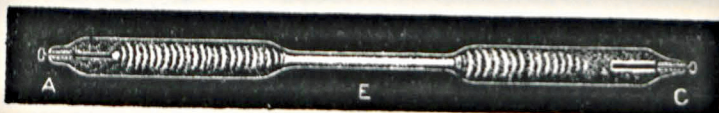
Rys. 93. Iskry, mniej lub więcej rozgałęzione, występują pod ciśnieniem zwykłym.

Rys. 94. Pod ciśnieniem 0,25 atmosfery wyladowanie odbywa się bez trzasków, a iskra grubieje i przyjmuje postać fiołkowego włókna, falującego wewnątrz rurki.

Rys. 95. Pod ciśnieniem 0,05 atmosfery włókno grubieje i staje się światłem jednostajnym; rurki świetlne, używane w praktyce, mają mniej więcej takie ciśnienie.

Rys. 96. Pod ciśnieniem 0,001 atmosfery w świeceniu pojawiają się prążki i dzieli się w wielu miejscach; to zjawisko jest przedstawione również na rys. 97.

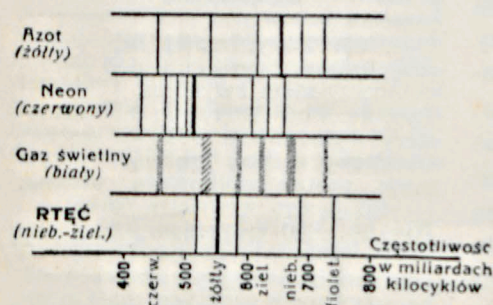
Przy jeszcze mniejszym ciśnieniu gaz staje się zupełnie ciemny (powstają warunki sprzyjające wytwarzaniu promieni Roentgena — przy ciśnieniu niższym od 0,00001 atmosfery), a przy ciśnieniu mniejszym od 1 milionowej atmosfery wyładowanie w ogóle nie nastąpi, niezależnie od wysokości zastosowanego napięcia.



Rys. 97. Inny widok tego samego zjawiska. — Ta fotografia wyraźnie wskazuje na prążki z rys. 96. W E mamy ciekłą rurkę (włoskowatą), wewnątrz której świecenie jest intensywniejsze.

Rurki świetlne.

Wiadomo, że światło wysłane przez rozżarzone ciało stałe i rozłożone przez pryzmat rozpada się na mnóstwo



Rys. 98. Światło wysyłane przez różne gazy w rurce świetlnej. Grube linie odpowiadają silnemu promieniowaniu; kreskowania — szerokim smugom lub „pasmom”.

skamy przepuszczając przez pryzmat światło pochodzące z elektroluminescencji gazu, na przykład promienie pochodzące z przewężenia E na rys. 97: wówczas widzimy jasne linie poprzedzielane ciemnymi pasami. Innymi słowy, gaz, w przeciwieństwie do ciał stałych, wysyła ograniczoną

barwnych odcieni, które niespostrzeżalnie przechodzą od czerwieni do barwy żółtej i zielonej, potem do niebieskiej i fioletowej; to samo zjawisko widzieć zresztą w tęczy, skoro promienie słoneczne napotykać zasłonę z kropelek wody.

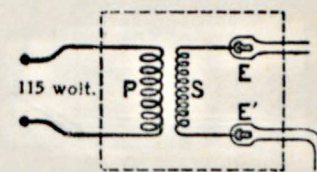
Inny wynik uży-

liczbę promieniowań o wyraźnych barwach, reszty zaś mu brakuje.

Jeżeli by zamiast powietrza użyć innych gazów, to barwa byłaby już nie fioletowa, ale żółta dla azotu, czerwona dla neonu, niebiesko-zielonkawa dla pary rtęciowej, biała dla gazu świetlnego itd., a linie, czy prążki, o których była mowa, byłyby dla każdego gazu inne (rys. 98).

Neon jest najdogodniejszym z tych gazów, bowiem wyładowanie elektryczne przechodzi przezeń najłatwiej; jego ślady znajdują się w powietrzu, skąd go otrzymujemy przez destylację skroplonego powietrza. Ciśnienie gazu w rurce może być bardzo niskie

(kilka tysięcznych atmosfery); średnica rurki — kilka centymetrów. Rury pracują na prądzie zmiennym, temperatura ich nie przekracza 150° C; konieczne napięcie — 200 woltów na metr rurki dawane jest przez małe transformatory (rys. 99), których pierwotne uzwojenie P jest połączone ze źródłem prądu przemiennego a wtórne S — wprost z końcami rurki E i E'.



Rys. 99. Odgałęzienia rurki świetlnej. — Końce rurki E i E' połączone są z końcami wtórnego uzwojenia S transformatora, którego zwój pierwszy P złączony jest ze zmiennym prądem o 115 woltach.

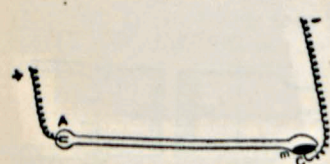
Wysyłane światło ma barwę pomarańczową dość przyjemną, ale wywołuje przykre migotania, bowiem natężenie światła jest bardzo zależne od zmian natężenia prądu elektrycznego, przechodzącego przez rurę.¹

Łuk w parze rtęciowej jest formą przejściową między rurkami świetlnymi a łukami w ścisłym znaczeniu: wymaga użycia szklanych osłon, jak pierwsze, a działa jak łuk pod niskim napięciem. Szklana rura (rys. 100) długości 1 m, o średnicy 3 cm, opróżniona z powietrza, pochylona, zawiera dwie żelazne elektrody A i C i kroplę rtęci m;

¹ Ta właściwość świetlnych rurek gra dużą rolę w telewizji oraz w kinematografii dźwiękowej.

anoda A jest połączona z biegunem dodatnim, katoda C z ujemnym. Przechylamy się tak, żeby strumyczek rtęci wywołał krótkie spięcie elektrod i by wytworzyła się para rtęci. Zaczyna wówczas płynąć prąd o natężeniu kilku amperów, temperatura dochodzi do 150°C i rura zaczyna wytwarzać przykre światło niebieskozielone; barwę tę nadaje charakterystyczna emisja pary rtęciowej (rys. 98).

Ponieważ światło to nie zawiera wcale czerwieni, więc skóra wydaje się biała a wargi czarne. Używa się również do lamp rtęciowych rur kwarcowych, ale trzeba je otaczać szklaną osłoną, ponieważ wytwarzane wówczas obficie pro-



Rys. 100. Łuk rtęciowy. — Rury rzucające dobrze znane zielonkawę, trupie światło zawierają dwie żelazne elektrody A i C oraz kroplę rtęci m; zapalają się przez pochylanie.

mieniowanie pozafioletowe jest nadzwyczaj niebezpieczne dla wzroku. Szklane lub kwarcowe rury świetlne, wypełnione parą rtęciową, mają duże zastosowanie w oświetleniu studiów kinematograficznych.¹

Świecenie w łuku.

Nazwa „łuku“ pochodzi stąd, że pierwotnie węgle były ułożone poziomo i świecenie przybierało pod wpływem prądu gorącego powietrza formę łuku (wypukłego ku górze). Przypominamy, że łuk elektryczny działa pod zwykłym ciśnieniem i mamy w nim do czynienia zarówno z promieniowaniem termicznym jak i luminescencją.

Dla zapalenia łuku trzeba zetknąć oba węgle ze sobą, a później je rozłączyć; mimo zużycia pozostają one na tej samej od siebie odległości, dzięki stosowaniu regulatorów

¹ Poza tym łuk rtęciowy stosuje się jeszcze w dwu wypadkach: a) Promieniowanie, które wysyła łuk kwarcowy, używane jest do sterylizacji wody. b) Zasada jego znajduje zastosowanie w prostownikach prądu zmiennego, ponieważ prąd w łuku nie może płynąć w kierunku rtęć—żelazo; mamy setki takich przyrządów w podstacjach tramwajowych, które dostają prąd zmienny (wygodny do przestawiania), a wysyłają stały (lepszy do trakeji).

działających na zasadzie elektromagnesu. Do jednego obwodu można włączyć dwa do czterech (w szereg) łuków elektrycznych, ale nigdy więcej.

a) Łuk między węglami (rys. 101) posiada na anodzie A krater bardzo silnie świecący, który osiąga temperaturę ulatniania się węgla (3.600°C) i daje 85% wysłanego światła: istnieje więc przewaga promieniowania termicznego nad luminescencją. Taki łuk może palić się i na prądzie zmiennym, ale wówczas wydajność światła jest gorsza.

b) Łuk płomienisty ma formę taką samą jak zwykły, tylko że węgle są wydrążone wzdłuż; otwory napełnia się kredą lub ciałami analogicznymi. Teraz aureola świetlna AC dostarcza 85% światła: mamy więc przewagę luminescencji nad promieniowaniem termicznym.

c) Szczególnie w Stanach Zjednoczonych zachwalany jest łuk magnetytowy, w którym anoda jest z miedzi a katoda z tlenków metali. Daje on wprowadzić światło zupełnie białe, ale mocno dymi.

Mimo największych postępów w tej dziedzinie użycie łuków jest w upadku; można nawet powiedzieć, że jako źródło światła¹ łuk wyszedł z użycia w swoim najważniejszym zastosowaniu: do silnego oświetlania dużych przestrzeni.



Rys. 101. Zwykły łuk.

Fotoluminescencja.

Dosyć już powiedzieliśmy o elektroluminescencji, czyli świeceniu wywoływanym przez prąd elektryczny. Mianem fotoluminescencji albo fotoświecenia określa się świecenie wywoływane przez różne rodzaje promieniowania, a głównie przez światło widzialne albo promieniowanie pozafioletowe; pokrewne typy świecenia stanowią katodoluminescencję (wytworzoną przez „promienie“ katodowe)

¹ W przemyśle chemicznym, przeciwnie, łuk elektryczny ma duże zastosowanie w piecach do wypalania.

i radioluminescencję (świecenie wywoływane przez pierwiastki promieniotwórcze).

Zazwyczaj¹ mówi się, że ciało świecące fosforyzuje,² gdy świecenie trwa jeszcze po przerwaniu podniety, albo fluoryzuje,³ gdy świecenie znika z chwilą ustania podniety.

Fosforyzować mogą tylko ciała stałe, lepkie ciecze, szkło. Fluorescencję, przeciwnie, można obserwować na wszystkich możliwych postaciach ciał, to znaczy nie tylko na ciałach stałych, ale i na cieczach oraz gazach.

Fosforescencja.

Jeżeli powlec gładki papier siarczkiem cynku i wysuszyć a następnie potrzymać przez chwilę na mocnym świetle, to kartka będzie w ciemnościach świeciła przez kilka godzin.

Georges Urbain ustalił, że substancja fosforyzująca nie może być chemicznie czysta, tak więc siarczek cynku musiał mieć bardzo słabe ślady zanieczyszczenia (do 10^{-6}); od natury tego zanieczyszczenia zależy barwa fosforescencji (niebieska, zielona, żółta, pomarańczowa).

Fosforescencja jest bardzo wrażliwa na podniesienie temperatury: ekran izolowany przez parę dni i prawie zupełnie już ciemny jasno błyszczy przez chwilę, jeśli go ogrzać, po chwili jednak znów staje się ciemny; to zjawisko jest nazywane czasem „termoluminescencją“.

Mieszaniny fosforyzujące mogą zostać pobudzone do świecenia nie tylko przez promieniowanie (np. światło), ale również przez uderzenia niosących naboje elektryczne cząstek, np. elektronów biegnących od C do A (rys. 92) w rurce próżniowej. Tak więc jeśli pokryjemy płytkę A

¹ Trzeba by raczej oprzeć ten podział na sposobie, w jaki zmienia się przebieg zjawiska pod wpływem temperatury, jak proponuje Perrin.

² Termin jest źle wybrany, bowiem świecenie fosforu, o którym była mowa na początku rozdziału, jest zjawiskiem chemiluminescencji.

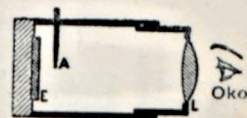
³ Nazwa pochodzi stąd, że fluorescencja była po raz pierwszy zaobserwowana na kryształach fluorytu.

siarczkiem cynku i jeśli ciśnienie jest tak niskie, że wyładowanie jest zupełnie ciemne (czarne przestrzenie z rys. 96 zapełniają całą rurkę), to siarczek cynku zaczyna silnie świecić: chodzi tu o „katodoluminescencję“, bowiem elektrony wyrzucane z katody w próżnię nazywamy promieniami katodowymi.

Zanieczyszczony siarczek cynku świeci również i pod wpływem promieni ciał radioaktywnych: jest to „radioluminescencja“. Na niej oparta jest zasada spintaryskopu,¹ przyrządu służącego do oglądania działań pojedynczych atomów. Wiedząc, że jedna miliona miligrama radu wyrzuca sto materialnych cząstek na sekundę, umieszcza się igłę A (rys. 102), której koniec zawiera drobny ślad radu, blisko fosforyzującego ekranu E i bada się go przez lupę L; widać kolejne pojawianie się w różnych miejscach świetlistych punktów, które w tej chwili gasną. Każda cząstka wywołuje świetlną plamkę, „iskierkę“, tak jak wybuchający pocisk tworzy lej. Komu przyszłoby na myśl zaprzeczać istnieniu pocisku po zobaczeniu leja? Również nielogiczne byłoby wątpić o realności atomu pod pretekstem, że widać tylko wyniki jego działania. A chociaż gram radu kosztuje prawie milion złotych, to wystarczy radu za złotówkę na wyposażenie tysiąca spintaryskopów, tysiąca przyrządów, które będą bez przerwy działały przez wieki...

Myślano o tym, aby bezpośrednio wcielić ślady radu do siarczku cynku: w ten sposób otrzyma się świetlne farby, świecące stale, bez potrzeby naświetlania promieniami słonecznymi. Takie farby, używane pierwotnie do wskazówek i tarcz zegarów, oddały duże usługi podczas wojny (celowniki do nocnych strzelań, rozpoznawcze znaki

¹ Od dwu greckich słów, oznaczających „iskrę“ i „patrzenie“.

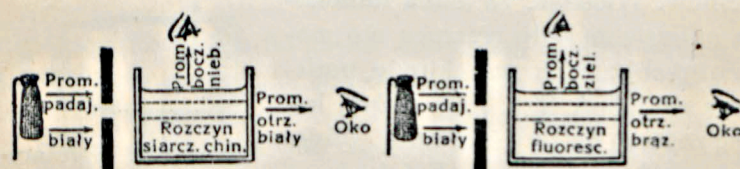


Rys. 102. Spintaryskop, oparty na świeceniu, pozwala widzieć działanie pojedynczych atomów. — Koniec igły A, zanurzony w próbówce zawierającej rad, przybliża się lub oddala od ekranu E (pociągniętego siarczkiem cynku), tak aby świecenie było wyraźne, i patrzy się przez lupę L.

pojazdów na małych odległościach); były dosyć drogie — kilka franków za centymetr kwadratowy. Jako źródła światła nie nadają się one zupełnie do rozpowszechnienia: ekran świetlny o powierzchni 15 cm² umożliwiłby czytanie, ale kosztowałby wiele tysięcy złotych.

Fluorescencja.

Każdy może zauważyć mlecznobłękitnawe refleksy, jakie rzuca w dziennym świetle warstwa¹ nafty. Również roztwór siarczanu chininy — zażywamy go w celu zwalczania



Rys. 103 i 104. Na czym polega fluorescencja? — Fluorescencja jest świecenie wywołane działaniem innego światła: ten rodzaj świecenia ustaje równocześnie ze światłem pobudzającym. Rozczyn siarczanu chininy jest bezbarwny w świetle przepuszczanym, a błękitnawy, gdy patrzymy z boku; fluoresceina — brązowa w świetle przepuszczanym, zielonkawa z boku..

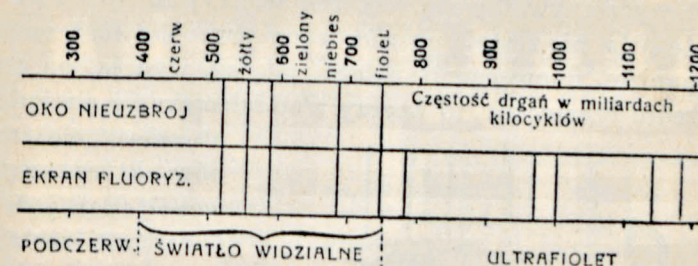
febry — jest zupełnie bezbarwny, jeśli patrzeć przezeń na źródło światła (rys. 103), ale jeśli patrzeć z góry, to widać, że światło zostawia ślad błękitny. Tak samo roztwór fluoresceiny jest brązowy w świetle przechodzącym (rys. 104), z góry zaś zielonkawy. Mamy tu do czynienia z fluorescencją, bowiem odmiennie zabarwione świecenie znika z chwilą, gdy się usuwa boczne światło. Niektóre ciała stałe, jak platynocyjanek baru albo szkło uranowe (szkło, które zawiera pewne związki metalu, zwanego uranem), również fluoryzują.

Najczęściej — ale nie to jest reguła ogólna² — światło

¹ To zjawisko nie ma nic wspólnego z barwami „cienkich warstw“ (pot koński, oliwa rozlana na mokrym piasku).

² Można jedynie twierdzić, że maksimum natężenia światła fluorescencji przypada na mniejszą częstość drgań niż maksimum natężenia światła pobudzającego.

fluorescencji ma częstość drgań (rozdz. IX) mniejszą niż światło pobudzające: tak więc promienie niebieskie i fioletowe wywołują często fluorescencję zieloną. Tak samo

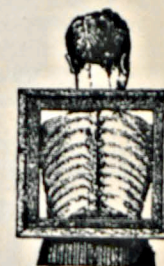


Rys. 105. Promieniowanie wysłane przez parę rtęciową. — Pierwszy wiersz jest powtórzeniem ostatniego z rys. 98. Ale gdy zamiast rzucać światło wychodzące z pryzmatu na kartkę papieru, rzucamy je na ekran fluoryzujący, wówczas pojawiają się prążki w dziedzinie pozafioletu (zabarwione na zielono).

jest i z niewidzialnymi promieniami pozafioletowymi: jeżeli rozszczepić pryzmatem światło wysłane z kwarcowej osłony łuku w parze rtęci i zebrać te promienie na ekran fluoryzujący, to ujrzymy nie tylko promieniowania widzialne, ale również i całą gamę promieniowań położonych w ultrafioletcie, które stają się widzialne dzięki zmniejszeniu częstości drgań i są jednako zabarwione na zielono (rys. 105 dół). Tak więc fluorescencja pozwala jak i fotografia — na śledzenie niewidzialnego, ale ma tę zaletę, że urzeczywistnia bezpośrednie spostrzeganie promieni, na które oko jest zupełnie ślepe.

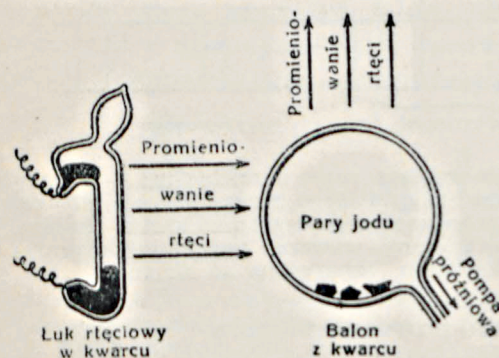
Również dzięki fluorescencji bezpośrednio widać promienie Roentgena: ekran radioskopowy (rys. 106) uzupełnia zdjęcia radiograficzne, bowiem jak gdyby rozwijał przed nami niewidzialny film kinematograficzny.

W ostatnich czasach znajomość fotoluminescencji uczy-



Rys. 106. Ekran radioskopowy. — Ten ekran uwidocznia (w postaci zielonego promienia Roentgena, na które oko nasze jest ślepe).

niła duże postępy. Jean Perrin sądził przez pewien czas (1924), że fluorescencja jest zawsze związana z jakąś reakcją chemiczną: w takim razie składnik powodujący świecenie wyczerpywałby się wskutek własnej emisji. Jednak hipoteza ta nie została potwierdzona przez doświadczenie. Mechanizm fluorescencji polega, jak się wydaje, na pobudzeniu cząsteczek, to znaczy z oddaleniem się od jąder



Rys. 107. Na czym polega zjawisko Wooda? — Promienie wysyłane przez łuk rtęciowy rzuca się na parę jodu, która w tych warunkach nie wysyła na boki swojego zwykłego promieniowania, ale „nakazuje sobie”, jak gdyby przez „sympatię”, odtworzyć to promieniowanie, które otrzymuje.

sekundy, cząsteczki wracają do stanu pierwotnego, ale ponieważ ich rozporządzalna energia jest mniejsza od energii złapanego fotonu, więc foton wyrzucony musi być mniejszy i stąd pochodzi to zmniejszenie częstości drgań.

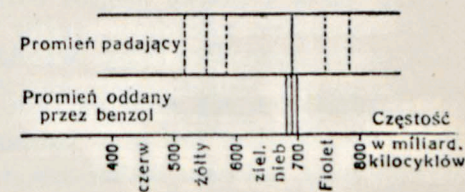
Zjawisko Wooda i zjawisko Ramana.

Dotąd mówiliśmy tylko o fotoluminescencji ciał rozpuszczonych: zanieczyszczony siarczek wapnia, rozcieńczone roztwory chininy czy fluoresceiny. Musimy więc jeszcze powiedzieć kilka słów o fluorescencji ciał chemicznie czystych oraz o dwu bardzo interesujących zjawiskach, które rzucają dużo światła na zagadnienie budowy materii.

atomów elektronów, które krążą wokół tych jąder. Cząsteczki zostają pobudzone wskutek pochłonięcia korpuskuły świetlnej (fotonu), ale zaraz tracą przez zderzenia (a więc w postaci ciepła) część tak zdobytej energii.

Pod koniec okresu, który trwa około jednej dziesięciomilionowej

Fizyk amerykański R. W. Wood zajmuje się od r. 1912 fluorescencją pary i gazów. Pomiędzy wynikami, które uzyskał, na szczególną uwagę zasługuje słusznie tak nazwane zjawisko Wooda. Łuk rtęciowy w rurce kwarcowej (rys. 107) wysyła swoje promieniowanie w kierunku kuli również kwarcowej, w której znajduje się parę kryształków jodu; z kuli wypompowuje się powietrze, wypełnia się ją parą jodu (pod bardzo słabym ciśnieniem). Można byłoby przypuszczać, że cząsteczki jodu wysyłać będą swoim zwyczajem własne jodowe promieniowanie. Otóż nie podobnego; bowiem cząsteczki te zaczynają wysyłać — przez sympatię, można powiedzieć — promieniowanie, charakterystyczne dla atomów rtęci; trzeba przyznać, że ten „rezonans” światła, wysyłanego na boki przez parę jodu, jest dziwnie niespodziany...



Rys. 108. Na czym polega zjawisko Ramana? — Wyjaśnia to z grubsza zestawienie rysunków 103 i 104. Jednakże zastępuje się tu palnik Auera łukiem rtęciowym, a badanym ciałem jest benzol. Światło rozproszone zawiera składniki o zmienionej częstości drgań.

Drugie zjawisko, będące rozpraszaniem połączonym ze zmianą częstotliwości, zostało odkryte w 1928 r. przez hinduskiego uczonego C. V. Ramana (nagroda Nobla 1930 r.). Żeby zrozumieć, o co chodzi, wystarczy podjąć z pewnymi zmianami doświadczenie przedstawione schematycznie na rysunkach 103 i 104. Zamiast stosować światło białe (pochodzące z koszulki Auera), stosujemy promieniowanie jednobarwne, wysyłane na przykład przez łuk rtęciowy i oddzielone od innych (rys. 98) przez rozszczepienie w pryzmacie i odpowiednio umieszczone ekrany. Ponadto zamiast roztworów (siarczan chininy, fluoresceina) używa się cieczy czystych, jak benzol. Światło padające zaznaczone jest linią ciągłą na wyższej części rys. 108 (inne promieniowania rtęci zostały usu-

nięte¹ i znaczone są liniami przerywanymi); światło rozproszone zawiera prócz linii rtęci również i linie przesunięte, choć znacznie słabsze. Takie linie przesunięte widzimy w dolnej części rysunku; przesunięcia te są stosunkowo nieznaczne.

Zjawisko Ramana charakteryzuje się więc zmianą częstości drgań (wielkość ujemnej bądź dodatniej zmiany częstości drgań zależy od rodzaju przeświecanej substancji).

Postępy wiedzy.

Rozdział ten nie miał na celu podanie ogólnej teorii świecenia, bowiem jest ona bardzo złożona i jeszcze nie wykonczona. Cel nasz będzie osiągnięty, jeżeli rozdział ten ułatwi zrozumienie mnogości i wielkiego zawikłania czynników występujących w tej dziedzinie. Równocześnie będzie sobie można zdać sprawę po jego przeczytaniu ze sposobu prowadzenia naukowej pracy we współczesnych laboratoriach.

Nigdy nie dokonali wielkich odkryć ludzie przejęci troską o możliwe praktyczne zastosowanie. Płodne są tylko poszukiwania powzięte w celu dowiedzenia się czegoś, szczegółowego poznania zjawisk. Bada się niestychanie małe pociski, wyrzucane przez rad, a dodatkowo znajduje się przemianę materii, której na próżno szukały całe pokolenia alchemików. Studiuje się elektrony wydzielane przez nagrzane ciała, a dodatkowo okazuje się, że natrafiamy na cuda radiofonii. Bada się, jak to robią Perrin, Wood i Raman, światło wysyłane przez oświetlone ciała i stąd wyprowadza się coraz dokładniejsze wnioski o budowie atomów, lecz nikt nie potrafi już nie tylko przewidzieć, ale nawet przeczuć praktycznych zastosowań, które pojawią się może wkrótce na tle tych poszukiwań.

¹ Wystarczy wiązkę światła rozszczepić pryzmatem, a „widmo” rzucić na ekran, w którym robi się odpowiednie otwory.

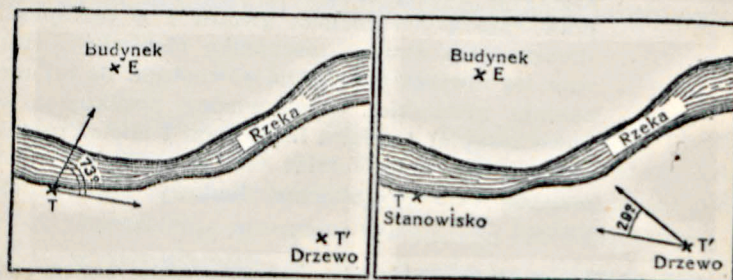
WIDMA ŚWIETLNE I TAJEMNICA GWIAZD

To co poeci nazywali tajemnicami gwiazdnego nieba, przestało już być tajemnicą dla ludzi nauki, którzy w każdej epoce historii ludzkości szukali praw rządzących ruchem gwiazd i w ten sposób stworzyli tak zwaną „mechanikę niebieską”. Rozwija się również późniejsza, równoległa do tej mechaniki niebieskiej, gałąź wiedzy, posiłkująca się nowoczesnymi teoriami fizycznymi i chemicznymi; dzisiaj nazywamy gałąź tę „astrofizyką”. Ma ona na celu wyjaśnienie budowy oraz składu gwiazd.

Wielki filozof, August Comte, kategorycznie zaprzeczył w połowie ubiegłego stulecia możliwości powstania astrofizyki; w innych dziedzinach był lepszym prorokiem. W astronomii — pisał — „ograniczano się zawsze do zjawisk geometrycznych lub mechanicznych, sprowadzonych już dawno, dzięki matematykom, do pewnych praw ogólnych. Wszelkie usiłowania przekroczenia tych naturalnych granic są z konieczności daremne i bezużyteczne, nawet jeśli chodzi o temperatury. Ciała, które tylko z daleka możemy przeszukiwać wzrokiem, będą zawsze polem do badań jedynie ich powierzchni i ruchu jej elementów, stanowiących z naszego punktu widzenia jedyne przejawy ich rzeczywistej egzystencji”. Nie można się zbyt dziwić Comte’owi, który zakończył swoje wykształcenie naukowe w 1820—25 roku, że w 1851 r. sformułował weto, obalone dziesięć lat później wskutek odkrycia analizy widmowej przez dwu uczonych niemieckich Bunsena i Kirchhoffa.

Trzeba przyznać, że i dzisiaj jeszcze znamy gwiazdy tylko z widzenia; „umiemy je tylko z daleka przeszukiwać wzrokiem”, jakby powiedział Comte, ale już poznaliśmy je pomimo to nader dokładnie.

Zapoznajmy się więc pokrótce z obecnymi zdobyczami nauki w tej dziedzinie, tak z punktu widzenia metody jak i rezultatów. Najpierw przedstawimy prawa fizyczne, które się tu stosuje; jeżeli to studium wyda się trochę abstrakcyjne, to proszę nie zapominać, że metody są dużo ważniejsze od wyników, bowiem z udoskonaleń dzisiejszych metod powstają jutrzejsze wyniki.



Rys. 109 i 110. Sposób pomiaru odległości od niedostępnego miejsca. — Najpierw jesteśmy w T i chcemy zmierzyć odległość TE oddzielającą nas od budynku E. Patrzymy na E, później na drzewo T' (kąt pomiędzy dwu kierunkami wynosi 73°). Później przechodzimy do T' (mierząc odległość TT'). Z punktu T' widzimy E i T (kąt 29°). Znając bok (TT') i dwa kąty, łatwo skonstruować na kartce papieru trójkąt TET' i zmierzyć odległość TE.

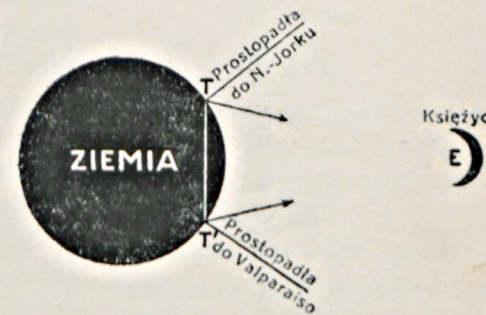
Jak mierzy się odległość gwiazd od ziemi.

Chociaż w rozdziale tym chodzi właściwie o astrofizykę, jednak wydaje mi się konieczne wyjaśnienie, jak mierzy się odległość, która nas oddziela od innych ciał niebieskich. Mierząc odległość możemy równocześnie określić jedną ze składowych szybkości gwiazdy, ale znajomość zupełna tej szybkości może być osiągnięta tylko przez zastosowanie pewnych praw fizycznych, o których będzie niżej mowa.

Zostańmy jeszcze przez chwilę na Ziemi i przypomnijmy sobie, w jaki sposób można określić odległość TE, która nas, będących w T (rys. 109), oddziela od jakiegoś niedostępnego miejsca, na przykład budynku E. Żeby tego dokonać, trzeba znaleźć jeszcze jeden dostępny punkt, przypuścimy drzewo T'. Wizuje się wówczas z punktu T (rys. 109) budynek E

i drzewo T'; te kierunki tworzą kąt np. 73° . Po zrobieniu pomiaru wbija się tyczkę w T i przechodzi się od T do T', mierząc odległość, przypuścimy, 228 metrów. Przybywszy do drzewa T', wizuje się (rys. 110) budynek E i tyczkę T, co nam daje kąt, powiedzmy 29° . Wystarczy już tylko wykreślić na kartce papieru w odpowiedniej skali trójkąt i zmierzyć żadaną odległość TE: znajdujemy 113 metrów.¹

Analogiczną metodą posługujemy się chcąc określić odległość, która oddziela Ziemię od innych niedostępnych przedmiotów, jak Księżyc, planety a nawet Słońce. Rysunek 111 pokazuje sposób postępowania: wybiera się dwa różne miejsca na Ziemi, na przykład Nowy Jork i Valparaiso, później, równocześnie, dwaj obserwatorzy wizują bardzo dokładnie ten sam punkt na powierzchni Księżyca. Strzałki na rys. 111 określają kierunki wizowania. Ponieważ odległość w linii prostej Nowy Jork—Valparaiso jest znana (7.300 km), a wizjery pozwalają zmierzyć kąty trójkąta, więc już łatwo można obliczyć, że odległość od Ziemi do Księżyca wynosi 60 promieni ziemskich; światło biegnące z szybkością 300.000 km/sek. zużywa



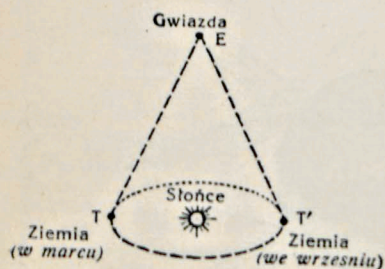
Rys. 111. Sposób mierzenia odległości od Ziemi do Księżyca. Wizuje się jednocześnie Księżyc z Nowego Jorku T i z Valparaiso T'. Znając odległość TT' w linii prostej, można, tak jak poprzednio (rys. 109 i 110), wykreślić trójkąt TET' i znaleźć odległość do Księżyca. (Trzeba pamiętać, że ta odległość jest na rysunku osiemnaście razy za mała; bez tego zmniejszenia rysunek nie zmieściłby się na stronicy.)

¹ Oczywiście, mając wspomniane wyżej dane można obejść się bez konstruowania trójkąta TET': prosty rachunek da odległość TE.

trochę więcej niż sekundę, aby przebyć drogę Księżyc—Ziemia.

Odległość Ziemi od Słońca wynosi 23.000 promieni ziemskich, czyli 150 milionów kilometrów; światło potrzebuje ponad osiem minut, żeby dostać się do nas ze Słońca.

Najbliższe gwiazdy są jednak tak bardzo oddalone, że metoda wyżej opisana nie da się zastosować, bowiem niemożliwością jest wykryć niesłychanie drobną różnicę



Rys. 112. Sposób mierzenia odległości między Ziemią a gwiazdą. Znowu wykreśla się trójkąt TET', ale teraz jego podstawą TT' jest odległość dzieląca dwa punkty, w których znajduje się Ziemia w odstępie sześciu miesięcy.

znajdzie się w marcu; a więc T (rys. 112) oznacza teraz położenie Ziemi w marcu, T' — we wrześniu tego samego roku. Można przeto zbudować trójkąt TET',¹ co pozwala na określenie odległości TE. Jeżeli zastosować tę metodę do Syriusza, jasnej gwiazdy niebieskawej, stosunkowo bliskiej systemu słonecznego, znajdziemy, że odległość TE wynosi 80.000 miliardów kilometrów: światło zużywa dzie więć lat na jej przebycie. Innymi słowy, boki trójkąta TET' wynoszą: $TE = T'E = 9$ lat świetlnych; $TT' = 16$ minut świetlnych.

¹ Mówiąc ściśle, można wyliczyć elementy tego trójkąta. Choć odległość TT' jest dla nas olbrzymia, to jednak kąt TET' jest maleńki, mniejszy od 2 sekund. Pod kątem 2 sekund widzielibyśmy jeden milimetr znajdujący się w odległości 100 metrów.

Pomiar odległości oddzielających nas od gwiazd odbywa się więc niejako na dwa tempa:

1. Znajduje się odległość Ziemia—Słońce, wybierając bardzo oddalone od siebie punkty na Ziemi (rys. 111);

2. Znając już tę odległość bierzemy ją za podstawę pomiaru odległości gwiazd. Jeżeli chodzi o odległe gwiazdy, to należy pomiar przeprowadzić z możliwie największą dokładnością. Tak więc znajomość wszechświata jest przede wszystkim związana z siłą naszych teleskopów.

Szybkość po stycznej.

Podstawowym zagadnieniem dawnej astronomii, zwanej astronomią pozycyjną, jest właśnie określanie odległości i kierunku gwiazd. Ponadto ta gałąź astronomii dostarcza nam jednak czegoś więcej jeszcze.

Śledzimy, w ciągu jednego lub wielu lat gwiazdę (rys. 113), wyznaczając jej położenia bądź wizualnie, bądź też używając fotografii (100, 1.000 klisz). Są dwa możliwe wypadki:

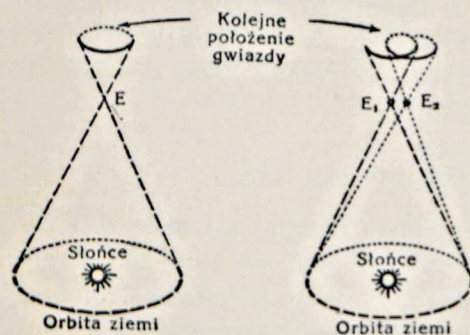
1. Różne położenia gwiazdy E (na ciemnym tle nieba) tworzą mały obwód (rys. 113); pomiary robimy przez wiele lat i jeżeli zawsze otrzymujemy krzywą zamkniętą, to znaczy, że gwiazda E jest nieruchoma w stosunku do Słońca.¹

2. Różne położenia gwiazdy tworzą krzywą, która się nie zamyka (rys. 114): z tego wypływa wniosek, że gwiazda, początkowo znajdująca się w E_1 , przechodzi (po upływie roku, dwudziestu lat, stu lat...) do E_2 , a stąd można obliczyć jej szybkość po stycznej, to znaczy szybkość w kierunku prostopadłym do promienia świetlnego, który biegnie od badanej gwiazdy do przeciętnego położenia Ziemi (czy też do Słońca).

Naturalnie trzeba brać pod uwagę również i własny

¹ Przynajmniej z błędem nie przekraczającym tylu a tylu procentów można obliczyć ten błąd maksymalny. (Chodzi naturalnie tylko o nieruchomość „po stycznej“.)

ruch systemu słonecznego, który biegnie z szybkością 20 kilometrów na sekundę do pewnego dokładnie znanego punktu. Ten ruch własny przejawia się w pozornym ruchu wszystkich gwiazd; albo, ściślej, wspólny ruch gwiazd pozwala nam określić kierunek i szybkość biegu naszego



Rys. 113 i 114. Kolejne położenia gwiazdy z biegiem lat. — Na rysunku lewym gwiazda jest względem systemu słonecznego nieruchoma; na prawym — ruchoma. Linie kreskowane i kropkowane pouczają nas o ruchach gwiazd, a ściślej o ich szybkości po stycznej, to znaczy szybkości w kierunku prostopadłym do linii łączącej daną gwiazdę z Ziemią.

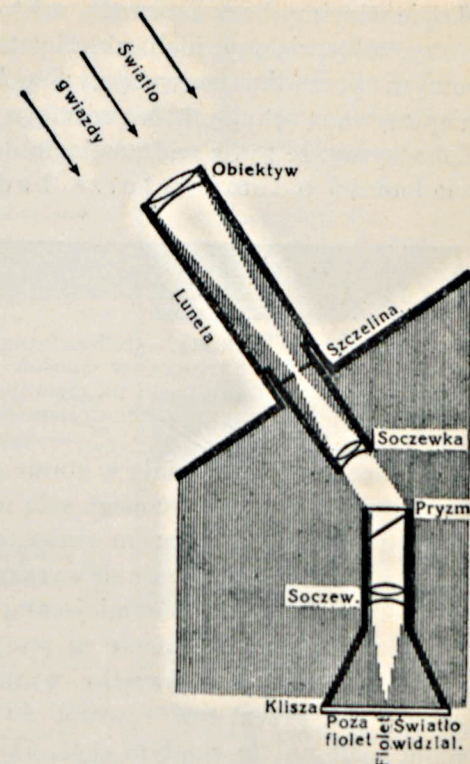
Dawna astronomia (astronomia pozycyjna) nie może w rzeczywistości dać nic ponad szybkość po stycznej. Naszą znajomość szybkości gwiazd uzupełnia, jak to zaraz zobaczymy, astrofizyka.

Podstawą astrofizyki jest rozszczepianie się światła na barwy.

W XVII wieku Anglik Izaak Newton urzeczywistnił rozszczepienie światła za pomocą pryzmatu; ale ludzkość potrzebowała niemal dwu wieków, aby zastosować to odkrycie do astronomii po pracach Niemców Roberta Wilhelma Bunsena (1811—1899) i Gustawa Roberta Kirchhoffa (1824—1887), którzy ugruntowali analizę widmową.

Pryzmat z odpowiednio dobranymi i umieszczonymi soczewkami tworzy spektroskop (rys. 117), jeśli obserwacji dokonuje się gołym okiem, spektrograf (rys. 115), jeżeli utrwała się rozszczepione światło na kliszy fotograficznej. Na rysunku 115 przedstawiona jest luneta astronomiczna, zaopatrzona w spektrograf.

Gdyby światło wysyłane przez gwiazdę nie było złożone (było na przykład tylko fioletowe), to na kliszy powstałaby wąska rysa w postaci cienkiego, fioletowego prążka, który po wywołaniu pozostawiłby na kliszy szary pasek. Jeżeli jednak światło jest bardziej złożone, to klisza przybiera wygląd taki jak na rysunku 116 (światło Syriusza).¹ Tu należy przypomnieć nasze wiadomości o różnych widmach:



Rys. 115. Podstawowy przyrząd astrofizyczny: luneta wyposażona w spektrograf. Obraz gwiazdy powstaje w szczelinie. Jeżeli gwiazda byłaby fioletowa, to (po wywołaniu kliszy) zobaczyłoby się prążek w miejscu oznaczonym „fiolet”. W rzeczywistości otrzymuje się całą serię prążków (całe widmo). Rys. 116 przedstawia otrzymane w ten sposób widmo Syriusza.

¹ Otrzymanie niektórych widm gwiazdnych wymaga naświetlania klisz przez 10 godzin bez przerwy; trzeba, oczywiście, żeby cały aparat z nadzwyczajną precyzją poruszał się zgodnie z ruchem gwiazdy.

1. Jeżeli ciało wysyłające światło jest stałe lub płynne,¹ to widmo tego światła jest ciągłe i w spektroskopie widzimy barwną smugę, w której różne kolory (czerwony, żółty, zielony, niebieski, fioletowy) są ułożone w tym samym porządku co w tęczy; spektrograf daje czarną, nieprzerwaną smugę, która rozciąga się aż do ultrafioletu. Zobaczymy, że takie widmo ciągle dostarcza nam cennych wiadomości o temperaturze badanej gwiazdy.



Rys. 116. Światło Syriusza. — Klisza fotograficzna (rys. 115) utrwała rozłożone światło Syriusza w sposób przedstawiony powyżej. Jest to negatyw: jasne paski na ciemnym tle są w rzeczywistości ciemnymi prążkami na tle jasnym.

2. Jeżeli chodzi o ciała w stanie gazowym (np. płomień gazu świetlnego, przesyconego solą metaliczną, albo wypełniona rozrzedzonym gazem rurka, poddana wyładowaniu elektrycznemu), otrzymuje się wyraźne prążki, mniej lub więcej szerokie,² przedzielone miejscami ciemnymi, co dowodzi, że tylko niektóre promienie są wysyłane, a innych brak.³

3. Wreszcie jeśli światło wysłane przez ciało stałe przechodzi przez gaz również świecący (rys. 119), to widać, jak na tle ciągłym (rys. 117) odcinają się ciemne prążki, zajmujące dokładnie to samo miejsce co prążki jasne, o których przed chwilą mówiliśmy (rys. 118).

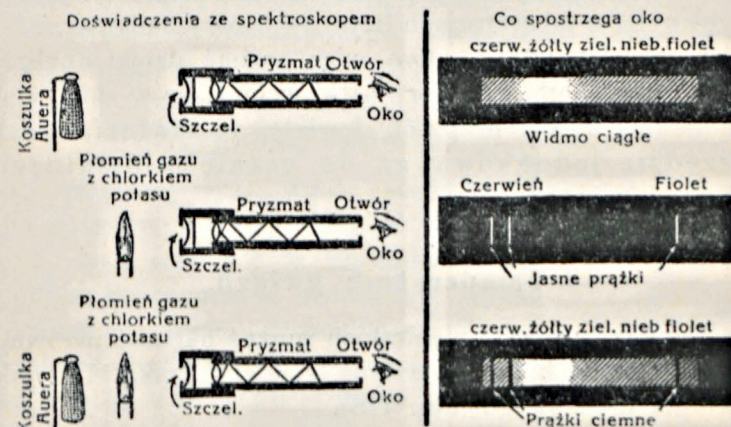
Jest to doświadczenie z odwróceniem prążków, a otrzymane w ten sposób widmo nazywa się widmem odwróconym. Zjawisko łatwo zrozumieć, jeżeli się weźmie pod uwagę, że, jak ustalił Kirchhoff, każde ciało pochłania na ogół to promieniowanie, które może wysłać; przez gaz w przykładzie podanym na rys. 119 zostają pochło-

¹ Lub wreszcie, jeśli chodzi o gaz pod bardzo dużym ciśnieniem.

² Są to „obrazy” szczeliny.

³ Szerokie prążki otrzymały nazwę pasm.

nięte dwa prążki czerwone i jeden fioletowy; prążki te są wprawdzie również wysyłane przez gaz, ale z nieporównanie słabszym natężeniem. Krótko mówiąc, prążki jasne (rys. 118) i prążki ciemne (rys. 119) mają jednakowe natężenie, a wygląd ich wynika z kontrastu do tła; podobnie plama błota wydaje się czarna na tle jasnej tkaniny a biała — na ciemnym suknie, jak to zauważył Montesquieu.



Rys. 117, 118, 119. Różne rodzaje widm. — Jeżeli patrzeć przez spektroskop na koszulkę Auera (rys. 117, strona lewa), widać ciągłą wstęgę cieniowaną (rys. 117, strona prawa), mającą barwy tęczy. Przeciwnie, jeśli badać płomień (118, na lewo) gazu przesyconego jakąś solą metaliczną, to spostrzega się cienkie, jasne prążki, poprzedzielane ciemnymi pasami (rys. 118, strona prawa). Gdy zaś (rys. 119, strona lewa) światło wywołane przez koszulkę Auera przechodzi przez światło gazu, powstaje widmo ciągłe, poprzedzielane prążkami ciemnymi (rys. 119, prawa), które znajdują się dokładnie w tych samych miejscach co prążki jasne, o których dopiero co mówiliśmy. To dowodzi, że płomień pochłania wysyłane przez siebie promieniowania; jest to tzw. odwrócenie prążków.

Przypominamy również, że pewne ciemne prążki w widmie światła gwiazd pochodzą z pochłaniania światła przez atmosferę ziemską;¹ te prążki, zwane „tellurycznymi” (od łacińskiego wyrazu tellus — ziemia), łatwo poznać, ponieważ w obserwatoriach położonych

¹ Głównie przez znajdującą się w niej parę wodną.

na wielkich wysokościach występują one słabiej niż na poziomie morza.

Wreszcie, i to jest najważniejsze, każdy pierwiastek chemiczny (potas, sód, wapń, żelazo, wodór...) daje specjalne widmo, czy to emisyjne (rys. 118), czy też absorpcyjne (rys. 119). Można stwierdzić, że prążki, które otrzymujemy z rozkładu światła gwiazd, są identyczne (pomijając pewne bardzo nieznaczne odchylenia)¹ z prążkami otrzymywanymi w laboratoriach fizycznych przy badaniu ziemskich źródeł światła. Łatwo więc poznać dzięki analizie spektralnej chemiczne pierwiastki wchodzące w skład ciał niebieskich i w ten sposób dowieść, że materia jest wszędzie jednakowa aż do granic widzialnego Wszechświata.

Temperatura gwiazd.

Temperaturę ciał niebieskich można określić zarówno na podstawie badania widma ciągłego (rys. 117) jak i widma prążkowego (rys. 118).

W rozdziale VI omawiając promieniowanie termiczne zajmowaliśmy się widmami ciągłymi i opisaliśmy, w jaki sposób uczonym udało się wyjaśnić budowę tych widm. Wilhelm Wien wytłumaczył, dlaczego ciała stałe się tym bardziej niebieskie, im ma wyższą temperaturę. Na podstawie znajomości budowy widm ciągłych łatwo jest sklasyfikować gwiazdy według ich temperatur, wystarczy zmierzyć natężenia dwu jakichś barw z wysyłanego przez gwiazdę światła; najczęściej wybiera się barwy czerwoną i niebieską.

Można również mierzyć całkowitą energię promieniowania wysłaną do nas przez gwiazdę; znając odległość dzielącą nas od niej, prócz tego zaś znając jej wymiary, nie trudno obliczyć promieniowanie, które wysyła na jed-

¹ Te odchylenia są skądinąd bardzo interesujące i wkrótce do nich wrócimy.

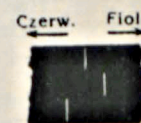
nostkę powierzchni, co pozwala — i to jest druga metoda — określić jej temperaturę.

Wreszcie widzimy na Ziemi, że to samo ciało wytwarza różne promieniowania, zależnie od tego, czy znajduje się w płomieniu, czy w łuku elektrycznym, czy w iskrach; dochodzimy w ten sposób do wykrycia i zbadania wpływu temperatury na pojawianie się prążków widmowych. Tą trzecią metodą również można oznaczyć temperaturę gwiazd, a wyniki powinny się zgadzać z tymi, jakie otrzymujemy za pomocą innych metod.

Szybkości radialne gwiazd.

Opisaliśmy wyżej, w jaki sposób kolejne zmiany położenia gwiazdy pozwalają określić jej szybkość po stycznej, czyli szybkość w kierunku prostopadłym do promienia świetlnego, wychodzącego z danej gwiazdy na Ziemię. Szybkość w kierunku patrzenia — albo szybkość radialna — długo wydawała się nieuchwytna dla obserwacji; odkrycie (1843) Austriaka Chrystiana Dopplera (1803—1853), uzupełnione i sprecyzowane (1848) przez Francuza Ludwika Fizeau (1819—1896), pozwoliło na zmierzenie tej szybkości.

Porównanie zaczerpnięte z akustyki posłuży do zrozumienia o co chodzi; parowóz posiada gwizdek wysyłający ton o wysokości np. jakiegoś C (do) z krzyżykiem; stoimy na peronie małej stacji, którą ekspres gwiżdżąc mija bez zatrzymania. Otóż gdy pociąg zbliża się, dźwięk podnosi się do sąsiedniego D (re); ale z chwilą gdy nas minie, dźwięk gwałtownie przeskakuje z D (re) do C (do). Innymi słowy — dźwięk wydaje nam się wyższy,¹

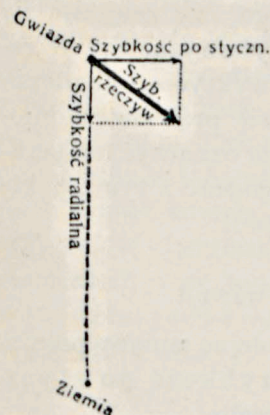


Rys. 120.
Wpływ szybkości na częstotliwość drgań prążków emisji. Stosownie do tego, czy źródło światła zbliża się, czy oddala, ten sam prążek przesuwa się bądź ku czerwieni, bądź ku fioletowi.

¹ Częstotliwość drgań zwiększona.

gdy źródło dźwięków zbliża się, niższy,¹ gdy ono się oddala.

Łącząc ze sobą wyniki astronomii starej (astronomii pozycyjnej) i nowej (astrofizyki) możemy określić rzeczywistą szybkość gwiazdy: jest to po prostu przekątna prostokąta, którego dwoma bokami są (rys. 121):



Rys. 121. Rzeczywista szybkość gwiazdy. — Znajdujemy ją łącząc szybkość po stycznej (wynik wielomiesięcznych obserwacji gwiazdy, rys. 114) z szybkością radialną (znalezioną na podstawie badania widma światła wysłanego przez gwiazdę — rys. 120).

W. J. Humphreysa (ur. w 1862 roku) i J. E. Mohlera (ur. w 1864 roku).

Rys. 122. Sposób określania ciśnienia panującego na powierzchni gwiazd. — Jeżeli badać ten sam prążek, wysłany przez źródło światła znajdujące się na ziemi i na gwieździe, to stwierdza się, że prążek pochodzący z gwiazdy najczęściej przesunął się ku czerwieni: wywołane jest to przez ciśnienie w atmosferze gwiazdy, które oblicza się mierząc przesunięcie prążka.

Czerw. Fiolet.



Jeżeli porównamy ten sam prążek wysłany w różnych warunkach ciśnienia, np. pod ciśnieniem zwykłym (rys. 122, góra), które możemy uważać za małe — i pod

¹ Częstość drgań zmniejszona.

dużym (rys. 122, dół), to widać, że prążek przesunął się najczęściej w kierunku czerwieni, czyli jego częstość drgań zmniejszyła się. Zmianie ciśnienia 100 atmosfer odpowiada zmniejszenie częstości drgań 0,004 części tej różnicy, jaka istnieje między częstością drgań fioletu a czerwieni.

Po odkryciu dwu wymienionych uczonych bardzo wielu astrofizyków zajęło się badaniami wpływu ciśnienia, które rzucają bardzo wiele światła na zagadnienie budowy gwiazd.

Pole magnetyczne, pole elektryczne, ciążenie.

Istnieją jeszcze trzy rodzaje zmian prążków widmowych, które bądź już znalazły, bądź znajdują zastosowanie w astronomii. Są to zjawiska: Zeemana, Starka i Einsteina.

Wpływ pola magnetycznego na emisję światła był najpierw przewidziany matematycznie a później odkryty w Holandii. Sławny i nieodżałowany H. A. Lorentz¹ obliczył ten wpływ, oparłszy się na rozwiniętej przez siebie elektronowej teorii budowy materii; w 1897 r. jego uczeń, Pieter Zeeman (ur. w 1865 r.) odnalazł doświadczalnie przewidziane przez Lorentza wyniki.

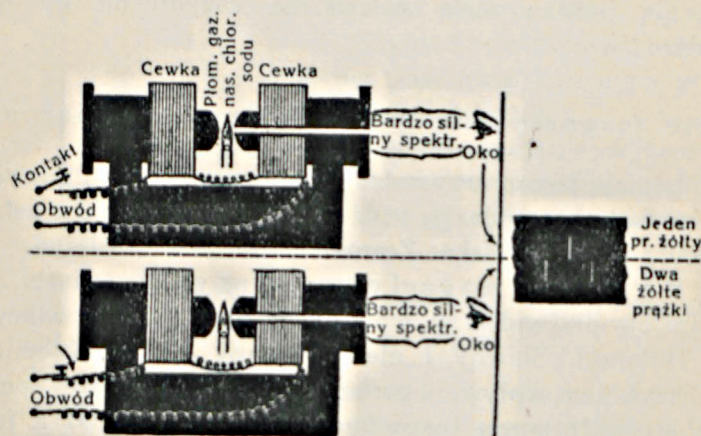
Ograniczymy się do najprostszego przypadku zjawiska Zeemana (rys. 123): badamy, co się dzieje, gdy umieścimy żółty płomień (płomień gazowy, nasycony solą) w polu magnetycznym. Otóż prążek, pierwotnie podwójny, ulega zwielokrotnieniu; zamiast dwu prążków pojawia się 6 (cztery zamiast jednego, dwa zamiast drugiego), przy czym nowe pręciki rozłożone są symetrycznie względem starych. Występuje więc rozszczepienie magnetyczne prążków.

Zjawisko Zeemana ma charakter bardziej prosty dla prążków pojedynczych; prążek taki ulega zdwojeniu.

Wielkość rozszczepienia (rys. 123, dół) jest proporcjonalna do natężenia pola magnetycznego. Gdyby więc

¹ Nagroda Nobla fizyczna w 1902 roku (wspólnie z Zeemanem).

można było dostrzec w widmie gwiazdy zjawisko Zeemana, to można byłoby łatwo poznać natężenie pola magnetycznego panującego na danej gwiazdzie; niestety, widma gwiazd są zbyt słabe na to. Zjawisko Zeemana oddaje natomiast w astrofizyce duże usługi w badaniu Słońca: wielkie słoneczne plamy są siedzibą silnych pól magnetycznych, dziesięć tysięcy razy potężniejszych od ziem-



Rys. 123. Zjawisko Zeemana, czyli wpływ pola magnetycznego na wysłane światło. — Płomień gazu świetlnego przesycany solą morską i wysyłający światło żółte umieszczamy między biegunami dużego magnesu; światło badamy przez bardzo silny spektroskop. 1. Skoro prąd nie płynie (czyli płomień znajduje się w warunkach normalnych, a nie w polu magnetycznym), to widać dwa żółte prążki. 2. Jeżeli prąd płynie (jeśli płomień jest w polu magnetycznym), to poprzednie prążki znikają, a na ich miejsce występuje sześć prążków, z których cztery leżą symetrycznie względem jednego z dawnych prążków, dwa zaś — symetrycznie względem drugiego. Obserwacje Zeemanowskich rozszczepień prążków, wysłanych przez gwiazdy, mogłyby dać nam wskazówki co do istniejących na nich pól magnetycznych.

skiego pola magnetycznego, działającego na namagnesowaną igłę busoli.

Jak w sąsiedztwie magnesu — lub elektromagnesu — istnieje pole magnetyczne, tak też i przestrzeń między okładkami kondensatora jest siedliskiem pola elektrycznego; pole to również może rozszczepić prążki wid-

mowe. Dowiódł tego w 1913 r. niemiecki fizyk Jan Stark (ur. w 1874 r.; nagroda Nobla w 1919 r.), posługując się światłem wywołanym wyładowaniem elektrycznym w rurce próżniowej; w pewnych wypadkach otrzymuje się wynik analogiczny z rysunkiem 123 (dół). Dotychczas zjawisko Starka nie znalazło zastosowania w astronomii; ale wiedzą już o nim astrofizycy i niewątpliwie wezmą je pod uwagę, gdy nastarczy się po temu sposobność.

Pozostaje do omówienia zjawisko Einsteina (1915), będące konsekwencją ogólnej teorii względności (rozdz. III). Sławny uczony przewidywał, że prążki widma gwiazd powinny być przesunięte ku czerwieni w porównaniu z prążkami widma wysyłanego przez źródła światła na Ziemi. Przesunięcie jest zresztą bardzo nieznaczne, a im masa gwiazdy jest większa, jej zaś promień mniejszy, tym jest ono wyraźniejsze.

Zjawisko Einsteina zostało stwierdzone wyraźnie na „towarzyszu“ Syriusza (w 1927 r.). Jest to gwiazda, której gęstość osiąga fantastyczną liczbę 60 kilo na 1 cm³. Na słońcu zjawisko Einsteina występuje bardzo słabo; z tego powodu przez kilka lat powątpiewano o istnieniu tego zjawiska, jednak dziś jego rzeczywistość nie budzi żadnych wątpliwości.

Taką to pomoc wyświadcza astronomii fizyka: dzięki niej obserwatoria poznają gwiazdy, o ile chodzi o ich szybkości, temperatury, ich gęstości i skład chemiczny, a również dowiadują się o ciśnieniu, polu magnetycznym, ba! nawet o polu elektrycznym panującym na ich powierzchni. Tak więc astronomia znalazła w fizyce bardzo silną podporę...

Dobry uczynek nigdy nie ginie, jeszcze bardziej w świecie wiedzy niż w stosunkach społecznych. Gwiazdy — olbrzymy zaczynają interesować fizyka, bowiem widzi on w nich olbrzymie laboratoria, w których ma sposobność poddać swoje teorie próbie faktów. Uczony niemiecki Otto Stern przewidział w 1925 r., że światło

może zamienić się na materię (rozdz. III); warunki tej fantastycznej przemiany — nieskończenie dziwniejszej od wymarzonych transmutacji alchemików — nie mają nic wspólnego z warunkami, do których jesteśmy przyzwyczajeni na Ziemi, ale wydaje się bardzo prawdopodobne, że urzeczywistniają się na gwiazdach, o których przed chwilą mówiliśmy.

Dawniej astronomia dała człowiekowi pojęcie o pracach naukowych i nauczyła go pomiarów czasu oraz zasad mechaniki.

I można by pomyśleć, że ta gałąź wiedzy wyczerpała swą płodność, że będzie tylko zaspokajać próżną ciekawość profanów... Ale tak się nie stało: nigdy jeszcze obietnice jutra nie były wspanialsze niż dzisiaj.



R O Z D Z I A Ł D Z I E W I A T Y

CO TO JEST CZĘSTOŚĆ DRGAŃ?

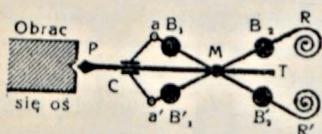
Powszechnie się przyjęło, że pomiędzy podstawowymi pojęciami, które pozwalają na wytworzenie sobie ogólnego poglądu na nauki fizyczne, wymienia się jedynie energię. Jednak nie można pomijać wielkości równie ważnej, choć mniej znanej, bo jej rola została niedawno odkryta: tą wielkością jest częstość drgań. Wielcy i mali „bezdrutowcy” opowiadają na wyścigi o „drganiach wysokiej częstości”, nie wiedząc właściwie, co to jest; ba! można zadziwić nawet wykształconych wskazując, że częstość przejawia się w mechanice i w nauce o sprężystości, w akustyce i w cieple, a również we wszystkich zjawiskach elektromagnetycznych, poczynając od powszechnie używanych prądów przemennych, skończywszy na promieniach gamma, poprzez telegraf bez drutu, podczerwień, światło, ultrafiolet i promienie Roentgena. Napisano już dosyć fałszów o analogiach między falami dźwiękowymi a falami Hertza: jedynie pojęcie o częstości drgań wskazuje, w jakich granicach dają się porównywać ze sobą te fale.

Studia nad częstością drgań wymagają chyba najmniej przygotowań: po pierwsze trzeba mieć pojęcie o dzieleniu, a zwłaszcza umieć podzielić jedność przez dowolną liczbę, większą lub mniejszą od jednego; po wtóre należy posiadać tyle cierpliwości, aby móc z ciekawością przyglądać się obrotom wskazówki sekundnika lub ścisnąwszy w palcach łapki pensety puścić je i obserwować ich drgania.

OBROTY

Ruch obrotowy zyskał największe znaczenie w przemyśle, bowiem bez niego nie można byłoby uzyskać wielkich szybkości jednostajnych, nie wychodząc z war-

sztatu lub fabryki. Szybkość obrotów wyraża się ich liczbą na sekundę; liczba ta daje częstość obrotów, a „jeden obrót na sekundę” zastąpimy wyrazem cykl.¹ W pełnej tabeli częstości znajdujemy, że częstości najszybszych obrotów stosowanych w technice są rzędu 330 cykli,² albo, jak się jeszcze mówi, rzędu jednej trzeciej kilocykla. Dynamo-



Rys. 124. Łatwy do zrobienia przyrząd do mierzenia częstości: tachymetr. Ostrze P pręta PMT wbijamy w rdzeń obracającej się osi. Cztery gałki B₁, B₂, B'₁ i B'₂ oddalają się aż do chwili, w której siła odśrodkowa zostanie zrównoważona przez sprężyny R i R'. Suwak C ześlizguje się w prawo i wskazuje na podziałce częstość obrotów, czyli liczbę obrotów na sekundę.

maszyny na prąd zmienny, zespolone z turbinami (używane często w przemyśle), mają częstość obrotów równą 75 cyklom; koła wagonu kuriera i motory samochodowe mają ich około dwudziestu; koła napędowe odpowiadają na ogół jednemu cyklowi. Dalej już idą ułamki cykli: wskazówka sekundnika ma 17 tysięcznych cykla, wskazówka minutowa 280 milionowych, 12 milionowych wypada na obroty Ziemi dokoła jej osi (pełny obrót w przeciągu jednej doby, czyli w 86.400 sekund) i wreszcie 32 miliardowe

cykla na obrót Ziemi dokoła Słońca (obróć wymaga 1 roku, czyli 365 dni i 6 godzin). Jest to najmniejsza ze spotykanych częstości: maszyny obracają się od 600.000 razy do 4 milionów razy szybciej. Mała częstość wskazuje na długi okres i na odwrót.

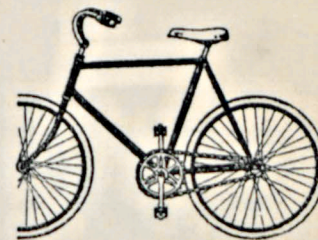
Częstość obrotów mierzymy za pomocą różnych tachymetrów.

Jeżeli chodzi o zmianę częstości, to najprostszego przykładu dostarcza przekładnia rowerowa (rys. 125), czyli całość złożona z łańcucha i dwóch kół zębatach:

¹ Używa się również pojęcia „jednego obrotu na minutę”, który wynosi $\frac{1}{60}$ obrotu na sekundę, czyli $\frac{1}{60}$ cyklu = 0,0167 cyklu.

² 330 obrotów na sekundę, czyli 20.000 na minutę.

w podanym na rysunku przykładzie koło pędne obraca się cztery razy szybciej od pedałów;¹ mamy tu zmieniacz częstości w stosunku 1:4. Można by jeszcze przytoczyć „skrzynkę biegów” w samochodach, bloki dźwigów, układ trybów w zegarach, śrubę bez końca, działającą na zębate koło itd. Powiedzmy od razu, że zajmując się przekładnią roweru przygotowujemy się do zrozumienia innych zmieniaczy częstości, jak na przykład superheterodyn stacji radiofonicznych odbiorczych i ekranów radioskopijnych, służących do bezpośredniego badania płuc lub narządów trawienia. A jednak gdy się zastanowić, to dochodzi się do wniosku, że między tymi trzema aparatami jest tyle podobieństwa, ile między maszyną do szycia a... bykiem.



Rys. 125. Zmieniacz częstości: przekładnia rowerowa. — Całość, złożona z łańcucha i dwu kół zębatach, jest zmieniaczem częstości: jeżeli duże koło ma 32 zęby a małe tylko 8, to częstość obrotów koła tylnego będzie czterokrotnie większa od częstości obrotów pedałów.

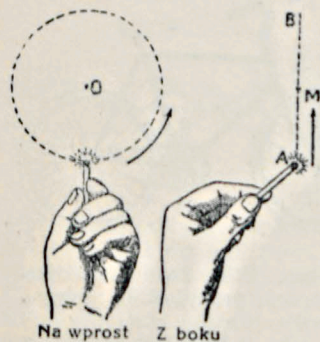
Wahania i drgania.

Można by bezpośrednio badać ruch drgający; ale wielkie znaczenie ma wykazanie jego związku z ruchem obrotowym.

Potrzebny nam do tego materiał eksperymentalny jest najpierwotniejszy i najtańszy: wystarczy pokój, który można zaciemnić, kilka osób dobrej woli i parę zapalek. Rysunki 126 i 127 wskazują zresztą wyraźnie, o co chodzi: zapalka, paląca się przez chwilę a potem zgaszona, ma jeszcze trochę żaru tworzącego w ciemności czerwony punkt; jeżeli zakreślić nią koło o środku O (rys. 126),

¹ Jeżeli koła mają 70 cm średnicy, to długość ich obwodu wynosi 2 metry; na każdy obrót pedałami rower posuwa się o 8 metrów.

to dla patrzącego na doświadczenie z boku koniec zapalniczki na pozór zakreśla pionową linię prostą AB (rys. 127). Ruch po AB jest wahadłowy (albo drgający), jest jednak tylko ruchem obrotowym, oglądanym w rzucie.



Rys. 126 i 127. Związek między obrotami a drganiem. — Jeżeli zakreślić żarzącą zapalniczką koło (środek O, rys. 126), to dla patrzącego z boku zapalniczka wykona drganie AMBMA (rys. 127).

Jeżeli teraz osoba przeprowadzająca doświadczenie zacznie iść prosto przed siebie, zakreślając wciąż zapalniczką koło O (rys. 126), to patrzący z prawej lub lewej strony, nie zobaczą już prostej AB (rys. 127),

lecz krzywą wężykowatą (sinusoidę), którą już poznaliśmy (rys. 10) i z którą jeszcze się spotkamy. Oczywiście, można nadać zapalniczce częstość obrotów zmienną w szerokich granicach, od ułamka cykła do 3 lub 4 cykli (3 lub 4 obroty na sekundę): powiadamy, że układ „ręka — zapalniczka” nie posiada własnej częstości. Przeciwnie, jeśli pozwolimy wahać się ołowiance (w fizyce układ taki nazywa się wahadłem), to zauważymy, że przy określonej długości zawieszenia częstość drgań nie zależy od początkowego odchylenia: wahadło — tak jak antena odbiorcza — posiada własną częstość, która jest tym większa, im jest ono krótsze; na rysunku 128 mamy częstość własną wahań ołowianki dla długości zawieszenia, zawartych między 10 cm a 1 m. Wahadło sekundnika, którego

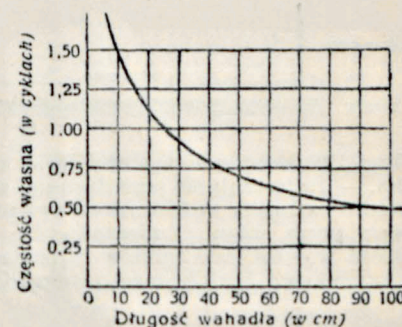
częstość wahań wynosi pół cykła, nie ma metra długości (zegary normandzkie).

Inne przykłady częstości własnej: posiadają ją wszystkie rodzaje vibratorów sprężystych, jak spiralne sprężyny zegarków, sprężyny młoteczka dzwonków elektrycznych, kamertony (stroiki) itp. Na rysunku 129 widzimy zapis wahań stroika o 100 cyklach (100 drgań na sekundę, drugie sol z krzyżkiem od lewej strony klawiatury); a normalne (a wiolinowe, piąte a od lewej strony) odpowiada 0,435 kilocykla. Istnieją pewne zjawiska fizjologiczne mające też własną częstość, prawie nie ulegającą zmianom w normalnych warunkach; należy do nich przede wszystkim pulsacja serca, która ma częstość rzędu 1 cykła¹, oraz oddychanie o częstości zbliżonej do ćwierci cykła.

Tak więc obroty i wahania są najważniejszymi rodzajami zjawisk okresowych (rozdz. I). Skoro jednak wywołamy drgania w środowisku zdolnym do ich przekazywania, występują nowe zjawiska.²

Rozchodzenie się fal sprężystych.

Zjawiska, o których mówiliśmy — obroty i wahania — są okresowe tylko w czasie. Okresowość w przestrzeni

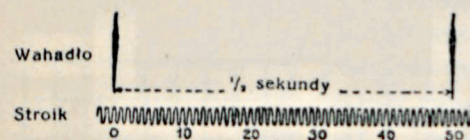


Rys. 128. W jaki sposób zmienia się własna częstość wahań ołowianki zależnie od jej długości.

¹ Tak samo chód (dwa kroki na sekundę); skoro jedna stopa opiera się na ziemi, to druga zachowuje się jak wahadło.

² Wówczas ma się do czynienia z rozchodzeniem się fali sprężystej (lub elektromagnetycznej, jeśli to, co drga, ma ładunek elektryczny).

zjawia się zawsze wówczas, gdy „źródło drgań” znajduje się w środowisku materialnym. Wszystkie ciała stałe, ciekłe i gazowe są zdolne do przekazywania drgań sprężystych (próżnia ich nie przesyła); w związku z tym powstać mogą w nich fale sprężyste, podwójnie okresowe (zarazem w przestrzeni i w czasie), przenoszące ruch bez



Rys. 129. Mierzenie częstości drgań stroika. — Rejestruje się jego drgania, a wahadło zaznacza każdorazowe swe przejście przez pion. Zmierzona tu częstość wynosi 100 cykli (drugie są krzyżkowe, czyli basowe gis pod linią).

Fale wysłane z jakiegokolwiek przyrządu nadawczego mogą być przyjęte przez przystosowany odpowiednio przyrząd odbiorczy: dochodząca do niego moc wzrasta² z powiększaniem się częstości drgań przyrządu nadawczego,³ zmniejsza się zaś bardzo szybko, skoro rośnie wzajemna odległość obu aparatów. Ten drugi fakt jest poparty codziennym doświadczeniem przy użyciu najprostszych przyrządów nadawczych i odbiorczych: gardła i ucha; każdy zauważył, że głos nie niesie, gdy rozmawiający są zbyt oddaleni od siebie.

Dźwięk, z punktu widzenia fizycznego, jest tylko drganiem sprężystym, rozprzestrzeniającym się najczęściej w powietrzu; wobec tego akustyka jest jednym z rozdziałów mechaniki. Ucho ludzkie jest głuche na drgania

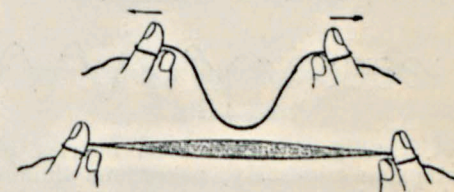
¹ Zjawisko rozchodzenia się fal można obserwować na wielką skalę na falach morskich (z dala od brzegu). Jeśli fala się rozbiła, to energia drgania przechodzi w energię kinetyczną (przenoszenie materii), co ma często bardzo poważne skutki.

² To znaczy — energia dochodząca doń w jednostce czasu.

³ Stąd znaczenie wysokich częstości drgań sprężystych (ultradźwięki).

bądź za niskie, bądź zbyt wysokie; najniższy dźwięk ma częstość 16 cykli — jest to pomruk; dźwięk najwyższy odpowiada 40 kilocyklom (świs).¹ W fortepianach wyzyskujemy siedem oktaf, od 27 cykli (strona lewa, bas) do 3,5 kilocykla (strona prawa, wiolin); głos męski ma rozpiętość między 160 cyklami a 1,1 kilocykla; głos kobiety między 330 cyklami a 2,6 kilocykla.

W instrumentach muzycznych stosujemy drgające struny bądź też drgania słupa powietrza (np. w piszczałkach); tak jedno jak i drugie dają fale stojące. Nazywamy w ten sposób fale typu owych wrzecion, tak łatwych do



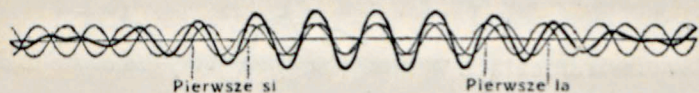
Rys. 130 i 131. Prosty sposób wytworzenia fal stojących. Owija się dokoła palców końce nitki długości 60 cm (rys. 131) i rozciąga się ją w kierunku strzałek: powstaje wówczas jakby wrzeciono, które się szybko zmniejsza. Częstość drgań, zależna od stopnia napięcia nitki, wynosi kilkadziesiąt cykli.

wytworzenia za pomocą nitki (rys. 130 i 131), a które wynikają ze spotkania się fal odbitych na końcach. Częstość własna drgań struny powiększa się ze wzrostem jej napięcia, o czym dobrze wiedzą stroiciele fortepianów; częstość własna wzrasta również wtedy, gdy zmniejsza się masa i długość struny; wysokie tony fortepianów są wywoływane przez struny cienkie i krótkie. Własna częstość drgań piszczałki organów rośnie, jeśli maleje jej długość: zamknięta piszczałka o długości 5,30 m wytwarza głęboki dźwięk o 32 cyklach; gwizdki długości kilku milimetrów wytwarzają drgania o częstości wielu kilocykli.

¹ Ucho jest wyjątkowo czułym organem: gdyby najmniejsza słyszalna moc była pochłaniana przez 1 gram wody i gdybyśmy chcieli podnieść o 1 stopień temperaturę tej wody za pomocą tej energii, to dźwięk musiałby trwać 200.000 wieków. A oko jest jeszcze pięćdziesiąt razy wrażliwsze od ucha...

Dudnienia.

Będziemy tu mówić o zjawisku, które znalazło bardzo ciekawe zastosowanie w dziedzinie częstości drgań elektromagnetycznych (heterodyna, superheterodyna) i w teorii wytwarzania światła przez atomy: chcę mianowicie zająć się teraz dudnieniami.



Rys. 132. Dudnienia. Jeżeli uderzyć pierwsze la i pierwsze si fortepianu (sinusoidy, zakreślone linią cienką), to otrzymujemy rodzaj pulsowania (z powodu trzech wkłnięć na sekundę), który nazwano dudnieniem. Konstrukcja superheterodyny opiera się na dudnieniach drgań elektromagnetycznych.

Dla uzyskania dudnienia wystarczy rozporządzać dwoma drganiami o mało różniące się częstości. Wyobraźmy sobie dla przykładu, że uderzamy równocześnie w dwa klawisze fortepianu: w pierwsze la i w pierwsze si. Posłyszemy wówczas, oprócz obu tych tonów, wzmocnienia i osłabienia dźwięku, występujące trzy razy na sekundę; dudnienie otrzymane w ten sposób przypomina odgłosy, jakie wydaje człowiek płucząc gardło. Łatwo zrozumieć jego przyczynę, przyjrzaawszy się rys. 132: narysowane są tam cienkimi liniami dwie sinusoidy: la (27 cykli) i si (30 cykli); w pewnych chwilach (w środku rysunku) oba drgania są zgodne (albo, jak mówimy, są w fazie) i jak gdyby dodają się do siebie, następuje więc wzmocnienie dźwięku; w następnej chwili (po obu końcach rys. 132) drgania przeciwstawiają się sobie, odejmują się — następuje osłabienie dźwięku. Rysunek wyraźnie wskazuje, że krzywa wypadkowa (rysowana linią grubą) ma częstość drgań wynoszącą 3 cykle.

Jest to zjawisko powtarzające się zawsze: ilekroć nałożymy na siebie dwa drgania, to częstość powstających dudnień będzie równa różnicy częstości drgań

składowych. Tak więc pulsowanie posiada zawsze mniejszą częstość drgań.¹

Wysokie częstości sprężyste.

Ograniczymy się tutaj do rozpatrzenia, jakie z częstości drgań sprężystych są najwyższe. Odpowiedzi dostarcza nam owa tajemnicza teoria kwantów, którą tak często wspominam. Po pierwsze, należy sobie przypomnieć, że „wyczuwalne ciepło“ polega na chaotycznym ruchu cząsteczek i atomów; cząstki materii poruszają się w gazach po liniach prostych, dopóki nie spotkają innej cząstki; w ciałach stałych natomiast wykonują one drganie dookoła pewnych położeń równowagi. Dzięki Einsteinowi i Debye'owi znamy bardzo dokładnie częstość drgań atomów w metalach; znajomość tę można uzyskać na podstawie pomiaru ciepła właściwego, oporu elektrycznego i innych tego rodzaju własności... Wynik jest następujący: częstość drgań każdego atomu może przybierać wszystkie wartości aż do pewnego maksimum, nazwanego „częstością charakterystyczną“; częstości charakterystyczne są niezmiernie wielkie; oto one w miliardach kilocykłów:

Ołów . . .	1,9	Miedź . . .	7,8
Cyna . . .	3,5	Glin . . .	8,4
Srebro . . .	4,6	Żelazo . . .	10
Wolfram . .	7,0	Diamant . .	39

Bardzo charakterystyczne jest to, że ołów, miękki i łatwo topliwy, posiada częstość charakterystyczną względnie niską, gdy natomiast diament, bardzo twardy i nadzwyczaj nietopliwy, odznacza się olbrzymią częstością charakterystyczną: zawiera on bowiem atomy węgla (C), które wykonują 39.000 miliardów drgań na sekundę; takie częstości sprężyste niezbyt są oddalone od częstości elektromagne-

¹ Powiększenie częstości drgań otrzymujemy wzmacniając którąś z harmonicznych zasadniczej częstości drgań; uzyskujemy wtedy drganie o częstości podwójnej, potrójnej, poczwórnej itp.

tycznych (400 miliardów kilocyklów), które odpowiadają światłu czerwonemu.

Co to jest prąd przemienny.

Przejdźmy teraz do częstości drgań elektromagnetycznych; żeby zastanowić się nad wypadkiem konkretnym, zajmijmy się najpierw niską częstością zwykłego prądu przemiennego, jakiego dostarcza nam sieć rozdzielcza miejska.

Przypatrzmy się zarówno o izolowanych metalowych drucikach; cała jej tajemnica tkwi w zygzakowatym „włosku“, zrobionym z czystego wolframu; niech jego długość wynosi np. 50 centymetrów, średnica jego jest rzędu tysięcznych milimetra, a ciężar — mniejszy od decygrama. Zbadamy zachowanie się owego drucika kolejno w trzech wypadkach: gdy jest on izolowany (zimny), gdy jest poddany w obwodzie prądowi stałemu o napięciu 115 wolt i wreszcie gdy jest poddany w obwodzie prądowi przemiennemu o napięciu 115 wolt.

1. Drucik zimny. — W rzeczywistości „czysty wolfram“ jest zawiesziną atomów wolframu¹ i wolnych elektronów: tyle samo jest elektronów, co i atomów; policzono je pośrednio, bowiem rachowanie bezpośrednio byłoby długie i nudne, ponieważ trwałoby ono sześćdziesiąt wieków, gdyby chcieć wyczerpać liczbę samych tylko (swobodnych) elektronów, zawartych w tych 6 centygramach metalu, nawet obliczając po kilkanaście miliardów w ciągu sekundy. Atomy, 340.000 razy cięższe i o 150.000 razy większej średnicy od elektronów, wykonują dokoła swych położeń równowagi drgania, nieznaczne w niskiej temperaturze, o wiele większe w wysokiej; zaraz określimy ich częstość. Jeżeli zaś chodzi o elektrony, to trzeba przypomnieć, że poruszają się one po liniach prostych z prędkościami niezależnymi od temperatury a wynoszącymi

¹ Ten atom (ściślej: jon) składa się z jądra i 73 satelitów (elektronów związanych).

(w wypadku wolframu) 800 kilometrów na sekundę; jednym skokiem przelatują one (we wszystkich możliwych kierunkach) z jednego atomu na drugi; częstość takich przeskoków wynosi na zimno 67 miliardów kilocyklów, a podczas żarzenia jest 8 razy większa.

We wnętrzu metalu panuje zatem niewypowiedziany chaos, wszelako jesteśmy nań głusi i ślepi. A jednak taki jest normalny stan materii; przepływ prądu stałego albo przemiennego wywiera na stan ten bardzo mały jedynie wpływ. Będziemy więc w dalszych (2 i 3) paragrafach używali wyrażen: „prędkość dodatkowa“, „energia dodatkowa“, pamiętając, że wszystko, cośmy teraz powiedzieli, i nadal obowiązywać będzie.

2. 115 wolt prądu stałego. — Wypadek ten był już omawiany szeroko — nawet przy użyciu rysunku¹ — jednak jego istotę łatwo skreślić w kilku wierszach. Mianowicie swobodne elektrony wolframu uzyskują dodatkową prędkość podłużną — w stosunku do drucików — w kierunku od „minus“ do „plus“, wynoszącą jeden metr na sekundę. Mielśmy więc rację mówiąc, że prawie nic się nie zmieniło! Cóż bowiem znaczy bardzo umiarkowane zwiększenie prędkości $\frac{1}{800.000}$ wobec tak nie uporządkowanej gmatwaniny? A jednak nie trzeba więcej, by wywołać olśniewające światło.

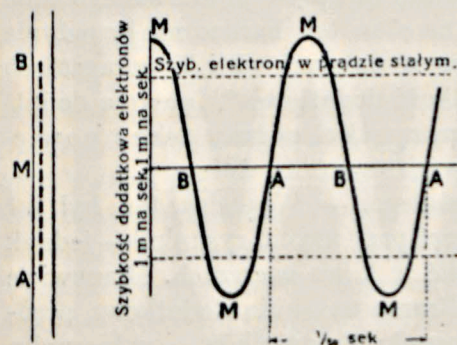
Tak więc elektrony uzyskują dodatkową energię (kinetyczną), której udzielają atomom wolframu 67.000 miliardów razy na sekundę; amplituda drgań atomów powiększa się, a to oznacza rozgrzanie drucików.

3. 115 wolt prądu przemiennego. — Swobodne elektrony wolframu zostają 50 razy na sekundę (taka jest częstość przemian prądu w obwodzie) odepchnięte i przyciągnięte ku obu końcom przewodu (rys. 133). Wykonują więc one oscylacje analogiczne do oscylacji czerwonego końca zapalki (rys. 127); oscylacje te są względem drucików podłużne (rys. 133), a cała droga AB może być do 300 razy

¹ Rozdział VII.

większa od średnicy drucika.¹ Dodatkowa szybkość elektronów waha się pomiędzy 150 cm/sek. ku górze i ku dołowi; dochodzi do zera na końcach A i B ich dróg. Oczywiście, te przymusowe wahania odpowiadają pewnej dodatkowej energii (kinetycznej), która ogrzewa druciki.

Rysunek 134 przedstawia również i dodatkową prędkość elektronów w wypadku, gdy lampa jest włączona do prądu



Rys. 133 i 134. Co to jest prąd przemieniczny? — Elektrony zawarte w drucikach żarówki elektrycznej wykonują drgania takie jak na rys. 127, długość AB (rys. 133) może być do 300 razy większa od średnicy drucika. Największa szybkość w owych drganiach nie przekracza 150 centymetrów na sekundę (rys. 134); na tymże rysunku pokazana jest również dodatkowa szybkość ruchu elektronów od A do B (lub odwrotnie) przy prądzie stałym, potrzebna na to, aby lampa świeciła tak jak przy prądzie przemienicznym.

Porównania: różne mikstury noszą napis: „Przed użyciem wstrząsnąć”. Ruch wstrząsanego płynu we flaszcze daje obraz wahań elektronów pod wpływem prądu przemienicznego; wylanie zaś lekarstwa na łyżkę przypomina ruch elektronów poddanych działaniu prądu stałego.

¹ Wzdłuż przewodu nie przechodzi, przeciwnie niż w wypadku, gdy prąd jest stały.

² Prąd stały może być rozpatrywany jako prąd przemieniczny o częstości „żadnej”, skoro zmienia kierunek zero razy na sekundę.

stałego o 115 woltach: obu liniom poziomym kropkowanym oraz sinusoidzie MBMAM odpowiada jedna i ta sama dodatkowa średnia energia kinetyczna swobodnych elektronów wolframowego przewodu; oto powód, dlaczego możemy używać tych samych lamp tak przy 115 woltach prądu stałego jak i przy 115 woltach prądu przemienicznego.²

Powyższe wywody można zobrazować za pomocą bardzo przyziemnego porów-

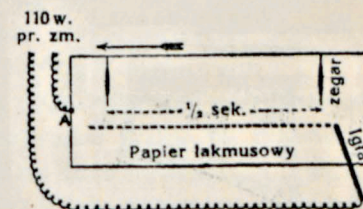
Pomiar niskich częstości elektromagnetycznych.

Nie możemy się tu drobiazgowo zajmować wytwarzaniem prądów przemienicznych; niechaj wystarczy to, że zwykła dynamo-elektromaszyna, dająca prąd przemieniczny (zwana dwubiegunową), obraca się z częstością 50 cykli i wytwarza drgania elektromagnetyczne również pięćdziesięciocyklowe: jest to przykład przejścia od częstości sprężystych do elektromagnetycznych.

Dla zmierzenia owych niskich częstotliwości:

1. Można użyć takiej metody, jaką przedstawia rys. 135, opartej na zjawisku, że każdy biegun jest raz dodatni, raz ujemny: czerwony papier lakmusowy, zwilżony wodą, przesuwamy w kierunku strzałki; punkt A połączony jest z jednym biegunem, punkt P (igła) — z drugim. Gdy P jest ujemne, lakmus barwi się na niebiesko; tak więc otrzymujemy kreskowaną linię niebieską; jeżeli w ciągu $\frac{1}{2}$ sekundy powstaje 25 kresk, jest to dowód, że częstość przemian prądu wynosi 50 cykli.

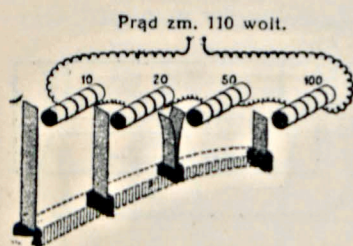
2. Można również zastosować przyrząd oparty na mechanicznym rezonansie; zasilamy mianowicie szereg elektromagnesów (rys. 136) prądem przemienicznym. Przed każdym z nich ustawia się stalową płytkę, mocno przytwierdzoną z jednego końca do podstawki; ponieważ każda płytkę ma inną długość, więc i ich częstości drgań są różne (rys. 128). Wówczas gdy częstość drgań własnych płytki równa jest częstości przemian prądu, dana



Rys. 135. Pomiar częstości przemian prądu. — W ciągu każdej półsekundy, zapisywanej przez zegar, biegun jest 25 razy ujemny i tyleż razy dodatni; skoro ostrze igły żelaznej jest ujemne, wówczas powstaje niebieski znak na czerwonym papierku lakmusowym. Pomiar częstości sprowadza się więc do liczenia znaków.

plytka poczyną silnie drgać. Mamy więc jeszcze jeden przykład zamiany drgań elektromagnetycznych na sprężyste.¹

3. Gdy częstotliwości drgań są wyższe (np. oscylacje elektronów używane w telegrafii bez drutu), posługiwać się można rezonansem nie mechanicznym wprowadzić, lecz



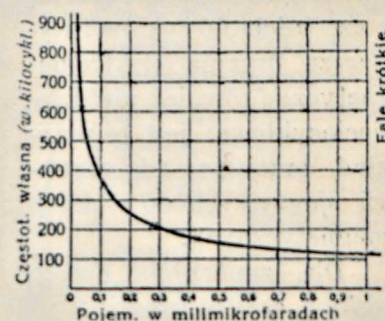
Rys. 136. Inny sposób pomiaru częstotliwości przemian prądu. Umieszczamy szereg drgających blaszek żelaznych (z jednego końca mocno przytwierdzonych) przed szeregiem elektromagnesów połączonych z obwodem. Liczby wskazują własne częstotliwości drgań (w cyklach) blaszek; jeżeli prąd przemienny ma częstotliwość 50 cykli, to zacznie drgać płytka 50-cyklowa.

elektrycznym, opartym na właściwościach obwodów drgających. Taki aparat (zwany powszechnie falomierzem) składa się z cewki, kondensatora zmiennego i ze wskaźnika rezonansu (amperomierz termiczny, telefon itp.).

Promieniowanie drgań elektrycznych.

Opisane tu zjawisko — drgania elektronów wzdłuż metalowych przewodów — jest okresowe tylko w czasie.

¹ Inny przykład: jeżeli okładki transformatora są nie docisnięte, wówczas elektromagnetyczne drgania o częstotliwości 50 cykli wywołują drgania sprężyste o takiej samej częstotliwości: słychać brzęk, odpowiadający pierwszemu sol krzyżkowemu fortepianu. Te brzęki długo przeszkadzały w zastosowaniu prądu przemiennego dla zasilania radiofonicznych stacji odbiorczych.



Rys. 137. Zmiany częstotliwości własnej obwodu odbiornika radiowego w zależności od zmian pojemności (przy założeniu, że samoindukcja jest stała). Krzywa jest identyczna z tą, jaką daje częstotliwość wahań ołowianki (rys. 128) w zależności od jej długości.

elektrycznym, opartym na właściwościach obwodów drga-

Natychmiast jednak pojawia się i okresowość w przestrzemi, ponieważ każde środowisko, nawet próżnia, jest zdolne do przekazywania na odległość energii w szczególnej postaci, którą nazywamy energią promienia elektromagnetycznego. Jedną z największych zdobyczy współczesnej wiedzy jest wykazanie przez Einsteina, że każde promieniowanie cechuje się obecnością niematerialnych (tzn. nie niosących naboju elektrycznych) cząstek, zwanych fotonami; wrócimy do nich niebawem.

Wiadomości o częstościach drgań sprężystych pozwalają nam zrozumieć, że owe częstotliwości niskie są nieodpowiednie dla przesyłania energii na duże odległości.¹ Trzeba więc uciec się do pomocy wysokich częstotliwości, jakich używają np. radiowe stacje nadawcze: Paryż (wieża Eiffla) ma 114 kilocykłów, Paryż P. T. T. — 600 kilocykłów; czyli w antenie wieży Eiffla elektrony wykonują 114.000 drgań na sekundę, w antenie zaś stacji P. T. T. — 600.000 drgań.

Odbiór fal Hertza oparty jest na właściwościach obwodów drgających, to znaczy na zmianach częstotliwości przemian prądów powstających w obwodzie, złożonym z samoindukcji i kondensatora, w zależności od zmian samoindukcji lub zmian pojemności kondensatora. Jeśli na przykład samoindukcja jest stała, nadajemy obwodowi odpowiednią częstotliwość drgań, zmieniając pojemność kondensatora. Warto zauważyć identyczność rysunków 122 i 137, z których pierwszy przedstawia częstotliwość wahań ołowianki w zależności od jej długości, drugi — częstotliwość własną obwodu drgającego o stałej samoindukcji w zależności od jego pojemności;² „obwody krótkofalowe“ są analogiczne do krótkich wahadeł.

Wszelako promieniowanie Hertza o bardzo wysokiej częstotliwości drgań (krótkie fale) przedstawia tę niedogodność, że trudno je wzmacniać. Tej wadzie przeciwdziała się przez instalację superheterodynu, które opierają się na

¹ Rozdział VII.

² Taką samą krzywą otrzyma się przy stałej pojemności, zmieniając samoindukcję.

zasadzie dudnień (rys. 132): aby zamienić częstość drgań Poste-Parisien (880 kilocyklów) na częstość Radio-Paris (215 kilocyklów), wystarczy w samym odbiorniku wywołać drgania elektronowe o częstości 665 kilocyklów; częstość dudnień (880—665) będzie częstością pożądaną.¹

Od podczerwieni do promieni gamma.

Wszystkich częstości drgań elektromagnetycznych nie można urzeczywistnić za pomocą obwodów elektrycznych, bowiem na tej drodze nie przekracza się jednego lub dwóch miliardów kilocyklów... Jednak bardzo łatwo wywołać promieniowanie o dużo wyższej częstości drgań: zwykły imbryk z gorącą wodą wysyła w ciemności promieniowanie o częstości drgań 30 miliardów kilocyklów. To jest właśnie dziedzina podczerwieni, w której leży przeważna część energii wysyłanej przez Słońce ku Ziemi i którą spotykamy w większości sposobów ogrzewania. Podczerwień rozciąga się na przeszło osiem oktaf, od 1 miliarda do 400 miliardów kilocyklów: od kilku lat przeprowadza się próby przejścia od drgań elektrycznych do podczerwieni i niektóre promieniowania można otrzymać już dwoma sposobami. Dawniej promienie ultraczerwone zwano „promieniami cieplnymi”; nazwa ta jest mylna, bowiem każde promieniowanie wytwarza ciepło, skoro tylko napotka pochłaniające je ciało.

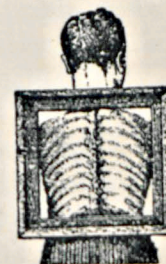
Światło mieści się w jednej oktafie, między 400 miliardami kilocyklów dla skrajnej czerwieni i 800 miliardami dla skrajnego fioletu; barwa żółta znajduje się w okolicy 500, niebieska — 650 miliardów kilocyklów. Oko jest

¹ Zasada heterodyny (od dwu greckich słów: różny i moc) posługujemy się zarówno w radiotelegrafii jak i w radiofonii (patrz rozdz. IX): jeżeli od 880 kilocyklów odjąć 879, wówczas otrzyma się częstość drgań muzycznych — 1.000 cykli. Słowo „superheterodyna” oznacza, że częstość drgań otrzymana jest większa od częstości muzycznych i należy do częstości wysokich.

ślepe na wszelkie inne częstości drgań elektromagnetycznych, tak jak ucho nie słyszy drgań sprężystych, których częstości drgań wykraczają poza granice 16 cykli i 40 kilocyklów (12 oktaf): tak więc dziedzina „słyszalna” jest 12 razy większa od „widzialnej”.

Powyżej fioletu mieszczą się kolejno: pozafiolet (ultrafiolet), bardzo czynny z punktu widzenia chemicznego i niebezpieczny dla wzroku; promienie Roentgena, używane w medycynie i w przemyśle, których badanie prowadzi do bardzo ciekawych teoretycznie wyników; wreszcie promienie gamma, powstające podczas rozkładu radium i pierwiastków radioaktywnych. Niebawem będziemy jeszcze mówić o częstości drgań własnych elektronu i protonu.

Obecnie poprzestaniemy tylko na wzmiance o zmieniaczu częstości drgań i nieco dokładniejszym opisie przyrządu do mierzenia częstości drgań. Wszystkie ciała fluoryzujące i fosforyzujące są zmieniaczami częstości drgań i przeważnie ją zmniejszają (rozdz. VII); ekran rentgenoskopowy (rys. 138) pochłania promienie Roentgena, których częstość drgań wynosi np. 10 miliardów kilocyklów, a wysyła promieniowanie o częstości drgań 20.000 razy mniejszej, czyli wynoszącej 600 miliardów kilocyklów, to znaczy światło zielone. Takie obniżenie częstości drgań usuwa konieczność stosowania fotografii, stwarzając bezpośrednio niejako kinematograficzny obraz tego, co się dzieje wewnątrz organizmu.

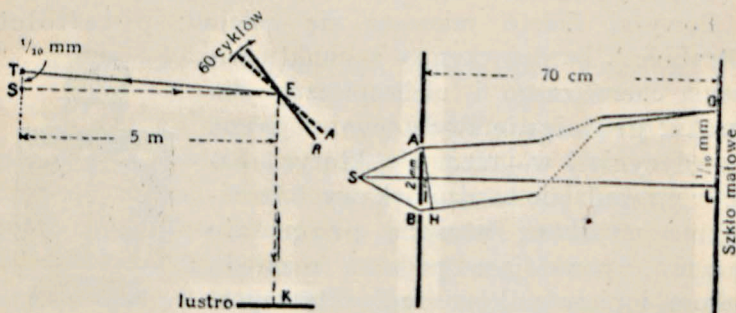


Rys. 138. Zmieniacz częstości drgań: ekran rentgenoskopowy. — Zwykły karton (pokryty platynocyjankiem baru) zmniejsza 20.000 razy częstość drgań promieni, wytwarzając światło zielone.

Częstość drgań światła.

Zonglujemy miliardami miliardów, mówiąc o świetle i promieniach Roentgena. A ileż to razy spotyka się osoby,

które wobec „astronomicznych cyfr“ uśmiechają się z ironią i zarazem z wyższością, chcąc przekonać otoczenie, że nie są tak naiwni, aby wierzyć w przeróżne chimery nieszkodliwych maniaków-uczonych. Trzeba więc zburzyć



Rys. 139 i 140. Przyrząd do mierzenia częstości drgań, złożony z dwu części. — Według lewego rysunku można zmierzyć drogę światła żółtego, przebytą w 1 sek.; rysunek prawy określa drogę, jaką światło przebiega podczas jednego drgnienia. Podzieliwszy pierwszy wynik przez drugi, otrzymuje się piętnastocyfrową liczbę, wyrażającą liczbę drgań świetlnych w ciągu 1 sekundy.

te przesady i pokazać prosty rachunek, dający liczby piętnastocyfrowe: na nim opiera się przyrząd do mierzenia częstości drgań, złożony z dwóch części (rys. 139 i 140).

1. Droga, którą światło przebiega w ciągu sekundy. Źródło światła S wysyła promień żółtego światła SE, odbijany od dwu lusterek, z których jedno, K, jest nieruchome. Jeżeli i drugie lustro E jest również nieruchome, to droga promienia biegnie przez SEKES; ale jeśli obraca się ono z częstością 60 cykli (60 obrotów na sekundę), gdy tymczasem światło przebywa drogę EKE, wówczas znalazłszy się w innej pozycji odbije pod innym kątem promień, który dojdzie wtedy do T (a nie do S), przy czym kąt TES będzie dwa razy większy od kąta obrotu zwierciadła AER. Dane dla rys. 139 są następujące:

$$ST = \frac{1}{10} \text{ milimetra, } SE = EK = 5 \text{ metrów.}$$

Rozumowanie zaś jest następujące: obwód koła o środku E i promieniu ES wynosi około 30 metrów, czyli 300.000 dziesiątych milimetra; kąt TES wynosi więc $\frac{1}{300.000}$ obrotu, a kąt AER dwa razy mniej, czyli $\frac{1}{600.000}$ obrotu. Ponieważ zwierciadło robi 60 obrotów na sekundę, więc czas, w jakim obróci się ono o kąt AER, równy jest $\frac{1}{36.000.000}$ sekundy; w tym samym czasie światło przebiega dziesięciometrową odległość EKE. Skoro zaś kilometr ma sto razy po dziesięć metrów, przeto na jego przebycie światło zużywa $\frac{1}{360.000}$ sekundy.

O wiele dokładniejsze doświadczenia dowiodły — zgodnie z powyższym rachunkiem przybliżonym — że światło biegnie w próżni z prędkością niewiele różniącą się od 300.000 km/sek.

2. Droga, jaką przebywa światło podczas jednego drgnienia. Trzeba tu wspomnieć, że dwa drgania osłabiają się wzajemnie, o ile nie są ze sobą zgodne: dodanie dźwięku do dźwięku może sprawić ciszę; jedno światło dodane do drugiego może wytworzyć ciemność.

Po tej uwadze zrozumiemy rys. 140: źródło światła żółtego S mieści się przed dwiema szczelinami A i B, oddalonymi od siebie o 2 mm. W odległości 70 cm znajduje się matowe szkło, na którym widać przebieg doświadczenia; mianowicie stwierdzamy występowanie prążków kolejno to jasnych, jak w L, to znów ciemnych, jak w O. Odległość między L i O wynosi 0,1 mm: jeżeli w O jest ciemno, oznacza to, że odległość BH, o którą promień BO jest spóźniony względem promienia AO, jest przebywana przez światło w ciągu połowy drgnienia (ponieważ wówczas zachodzi niezgodność w O między tym promieniem, który biegnie z A, a tym, który przychodzi z B).

Łatwo sprawdzić, że trójkąty AHB i ILO są do siebie podobne; AB jest 350 razy mniejsze od IL, a więc BH będzie również 350 razy mniejsze od OL; BH wyniesie przeto $\frac{1}{3.500}$ milimetra, czyli 0,0003 mm. Wobec tego

podczas trwania jednego drgania światło przebiega 0,0006 mm.

3. Częstość drgań żółtego światła. Wiemy już, jakie odległości przebiega światło podczas 1 sekundy i podczas jednej wibracji; najprościej jest wyrazić te liczby w jednakowych jednostkach, np. w 0,0001 milimetra. 300.000 kilometrów, wyrażonych w dziesięciotysięcznych milimetra, wynosi 3.000.000.000.000.000.

Wniosek: w jednej sekundzie będzie tyle drgnień, ile razy 6 zmieści się w powyższej liczbie. W ten sposób znajdujemy piętnastocyfrową liczbę: 500.000.000.000.000 cykli (albo 500 miliardów kilocykli). Piętnastocyfrowa liczba reprezentuje ogrom, boć liczba sekund, które upłynęły od epoki Homera, ma tylko cyfr jedenaście; nieomylnie więc można twierdzić, że podczas jednej sekundy zachodzi więcej drgań żółtego światła, niż było sekund od chwili pojawienia się życia na Ziemi...

A cóż dopiero mówić o promieniach, których częstość drgań jest 20.000 razy większa? o częstościach drgań cząstek elementarnych?

Fale i drobinki.

Nie wtajemniczeni nawet się nie domyślają, że w ostatnich latach jesteśmy świadkami całkowitego przewrotu podstawowych pojęć o świecie, przewrotu podobnego temu, który spowodował zużycie tyle atramentu z okazji teorii względności Einsteina. Dlatego to poruszam, bo te nowe koncepcje blisko wiążą się z pojęciem częstości drgań, które za jednym zamachem zdobyło znaczenie podobne do tego, jakie ma energia.

Początek owych teorii sięga 1900 roku, gdy Niemiec Max Planck w genialnym natchnieniu odkrył kwanty, o których wzmianki gęsto rozsiane są na tych kartkach. W związku z tym już w 1905 roku Einstein założył istnienie „korpusek promieniowania”; dziś już jest pewne, że korpusek te rzeczywiście istnieją — zwiemy je foto-

nami; krótko mówiąc, promieniowanie elektromagnetyczne (którego częstości drgań sięgają od kilku cykli do wielu miliardów miliardów kilocykli) musi składać się nie tylko z fal, lecz także i z korpusek, czyli fotonów: mamy więc fotony radiowe, świetlne, promieni Roentgena; nie niosą one naboju elektrycznego. Fala elektromagnetyczna tylko „pilotażuje” fotony — gromadzi je w jednym miejscu, rozprasza w innym (w punkcie L z rysunku 140 jest dużo fotonów, w punkcie O — bardzo mało). Nadawcza antena radiowa, imbryk z ukropem, żarówka, ziarno radu są wytwórniami fotonów, te zaś przenoszą energię promieniowania. A tym większa jest energia poszczególnego fotonu, im większa częstość drgań prowadzącej fali.

Tu przejawia się przepiękna symetria, którą pierwszy dojrzał Francuz Ludwik de Broglie (1923 r.). Cała rzeczywistość jest jeno promieniowaniem i materią (rozdz. III); wiadano wprawdzie, przede wszystkim dzięki Anglikowi Ernestowi Rutherfordowi, że materia składa się z dwu rodzajów cząstek elementarnych: z elektronu, czyli „ziarnka elektryczności” ujemnej, i z protonu — jądra wodoru — naładowanego dodatnio i 1.840 razy cięższego od elektronu. Ale nigdy przed de Broglie nikt nie domyślał się, że materia ma również i charakter falowy; ten dopiero uczony skojarzył falę „materialną” (ściślej falę materii) z elektronem; przy tym fala posiada własną częstość drgań, wynoszącą 120 milionów miliardów kilocykli, wtedy gdy elektron porusza się bardzo powoli; częstość może jednak dojść do miliardów miliardów kilocykli, gdy chodzi o elektrony wyrzucane z jąder radioaktywnych z szybkością 297.000 km/sek. Częstość drgań fali związanej z powoli poruszającym się protonem osiąga 230 milionów miliardów kilocykli; jest to największa częstość, jaką udało się stwierdzić, gdyż protony, z jakimi mamy do czynienia, nie przekraczają mizernej szybkości 20.000 km/sek.

Taki jest początek owej mechaniki falowej, którą

rozwinęli głównie: Austriak Erwin Schrödinger, Francuz Léon Brillouin i Anglik Dirac, zresztą równolegle do prac Niemców: Heisenberga, Borna i Jordana. W skrócie można powiedzieć, że fale materii prowadzą cząstki (korpuskuły) materii (protony i elektrony), fale zaś elektromagnetyczne prowadzą fotony — korpuskuły promieniowania.

Wewnątrz gwiazd-olbrzymów na pewno odbywają się ciągle przemiany materii w promieniowanie i promieniowania w materię (rozdz. III); trzeba przypomnieć sobie dudnienia (rys. 132), aby zrozumieć narodziny promieniowania z materii, ściślej mówiąc, z fal materialnych elektromagnetycznych o zawsze olbrzymich częstościach drgań.



BIBLIOTEKA WIEDZY

1 CLARENCE AUGUST CHANT
CUDA WSZECHŚWIATA
łatwy wstęp do poznania nieba, z 132 ilustr.
wydanie drugie str. 193

2 LASSAR-COHN
**CHEMIA W ŻYCIU
C O D Z I E N N Y M**
z 28 rysunkami str. 292

3 SIR JAMES JEANS
NOWY ŚWIAT FIZYKI
wydanie drugie z 7 ilustracjami str. 167

4 PAWEŁ DE KRUIF
ŁOWCY MIKROBÓW
z 18 ilustracjami str. 322

5 WILLIAM BEEBE
W GŁĘBINACH OCEANU
Wydanie drugie z 50 ilustr. i mapą str. 180

6 SIR WILLIAM BRAGG
TAJEMNICE ATOMU
z 57 figurami i 32 tabl. zawierającymi 74 ryciny
str. 185

7 W. BUDDENBROCK
ŚWIAT Z MYŚLÓW
z 59 rysunkami str. 245

8 Inż. E. POREBSKI
WIELCY TWÓRCY NAUKI
wydanie drugie z 58 portretami str. 304

9 Prof. JAN CZEKANOWSKI
**CZŁOWIEK
W CZASIE I PRZESTRZENI**
wydanie drugie z 95 ilustr. i mapami str. 280

10 W. H. BOULTON
**WIECZNOŚĆ PIRAMID
I TRAGEDIA POMPEI**
z nowych badań archeologii
z 75 ilustracjami i tablicą barwną str. 265

11 PAWEŁ DE KRUIF
autor „Łowców mikrobów”
**WALKA NAUKI
ZE ŚMIERCIĄ**
wydanie drugie z 16 ilustracjami str. 394

12 J. WEYSSSENHOFF, C. BIAŁOBRZESKI,
L. WERTENSTEIN, S. SZCZENIOWSKI
**O D G W I A Z D Y
DO ATOMU**
wydanie drugie z 46 ilustracjami str. 238

13 JAMES KENDALL
**N O W O C Z E S N A
ALCHEMIA**
z 62 ilustracjami i 16 tablicami str. 256

14 H. G. WELLS
HISTORIA ŚWIATA
z 40 ilustracjami i 10 mapami str. 346

15 B. HAWKS
DZIWY PRZYRODY
wydanie drugie str. 250

16 K. FRISCH
ŻYCIE PSZCZÓŁ
wydanie drugie z 96 ilustracjami str. 163

17 H. i M. VOWLES
CZŁOWIEK
I SIŁY PRZYRODY
z 25 ilustracjami str. 229

18 Dr ARTUR HAAS
ZASADY FIZYKI
Światło — Elektryczność — Ciepło — Materia
z 76 ilustracjami str. 309

19 E. HAWKS
DZIWIW POWIETRZA
I WODY
z 83 ilustracjami str. 248

20 WILLIAM BEEBE
923 METRY W GŁĘB
OCEANU
z 95 barwnymi i czarnymi ilustr. str. 318

21 Dr LUDWIK GROSS
LUDZKOŚĆ W WALCE
O ZDROWIE
z 7 portretami str. 333

22 E. DIMNET
SZTUKA MYŚLENIA
wydanie drugie str. 122

23 WILLIAM BEEBE
KRAJNA WÓD
NONSUCH
z 55 ilustracjami str. 210

24 H. W. VAN LOON
GEOGRAFIA
W KALEJDOSKOPIE
z 16 barwnymi tablicami i 59 rysunkami
str. 389

25 Prof. Dr R. GOLDSCHMIDT
WSTĘP DO NAUKI
O ŻYCIU
z 161 ilustracjami str. 327

26 A. ZISCHKA
JAPONIA
z 25 ilustracjami i 2 mapami str. 415

27 HENRI DE VIBRAYE
MITOLOGIA
z 32 rotograwiurami str. 212

28 RITCHIE CALDER
NARODZINY
PRZYSZŁOŚCI
W RETORCIE UCZONYCH
z 8 ilustracjami str. 250

29 M. A. NOURSE
DZIEJE
400,000.000 NARODU
Chiny od czasów najdawniejszych do chwili
obecnej.
Z 6 mapami i 47 ilustracjami str. 324

30 SIR ARTHUR EDDINGTON
NAUKA NA NOWYCH
DROGACH
z 4 ilustracjami str. 310

31 PAWEŁ DE KRUIP
POGROMCY GŁODU
str. 342

32 Dr ALEXIS CARREL
CZŁOWIEK
ISTOTA NIEZNANA
z portretem autora str. 272

33 T. R. GLOVER
ŚWIAT STAROŻYTNY
z 98 ilustracjami i 8 mapami str. 336

34 ALBERT DRYJSKI
MÓZG I DUSZA
z 57 ilustracjami str. 288

35 WILLIAM BEEBE
GALÁPAGOS
Na krańcach świata
z 84 barwnymi i czarnymi ilustr. str. 346

36 M. BOLL
ZAGADKI ZJAWISK
FIZYCZNYCH
z 60 ilustracjami
DALSZE TOMY W DRUKU

