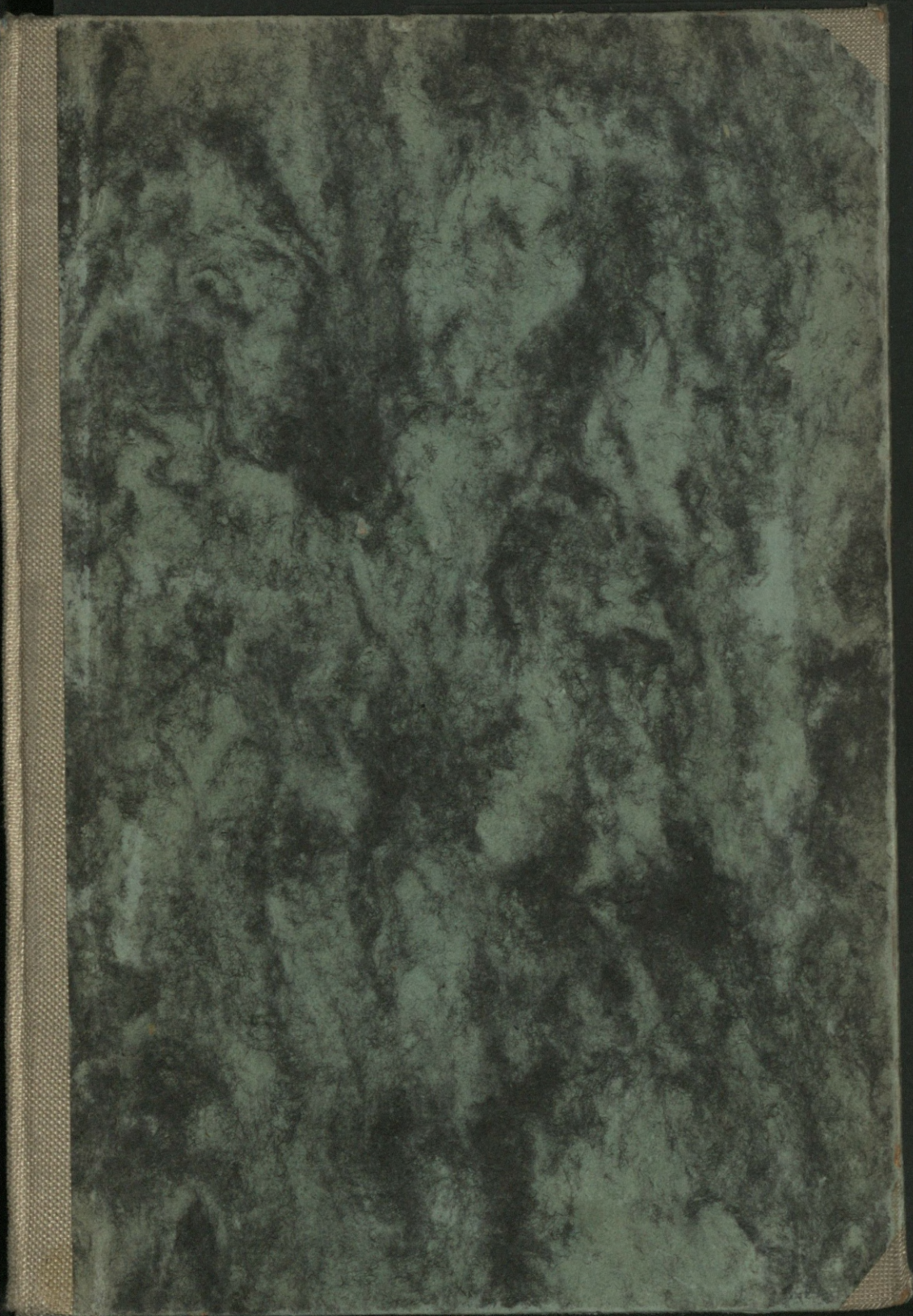
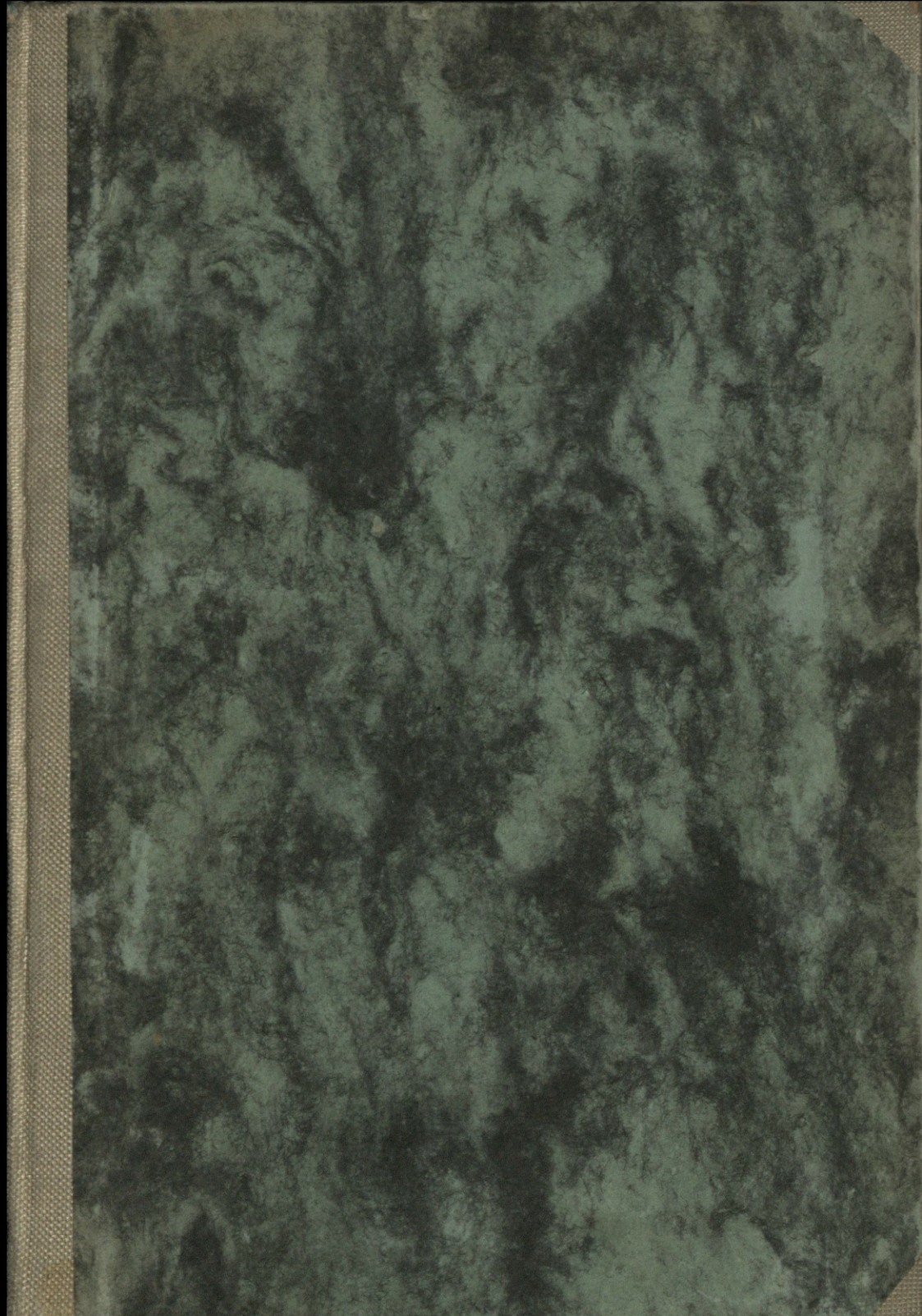


Grey Scale #13



A 1 2 3 4 5 6 M 8 9 10 11 12 13 14 15 B 17 18 19

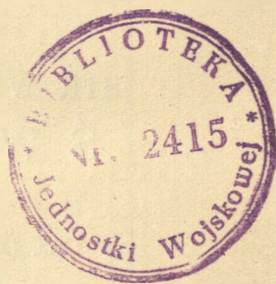




Z DZIEDZINY NAUKI I TECHNIKI

TOM X

C 93



Z DZIEDZINY
NAUKI I TECHNIKI
BIBLIOTEKA POPULARNO-NAUKOWA

TOM X
SIR WILLIAM BRAGG
ŚWIAŁO

PRZEŁOŻYŁ

Doc. Dr WŁ. KAPUŚCIŃSKI

WARSZAWA
NAKŁADEM „MATHESIS POLSKIEJ”
1936

A. Rysunek ten, który zawdzięczamy Sir Jamesowi Dewarowi, przedstawia barwy błonki mydlanej; liczby podają grubość błonki na różnych wysokościach. I p. oznacza $\frac{1}{10000}$ centymetra (str. 163).

B. Fotografia barwna, przedstawiająca powtórzenie w pracowni doświadczenia Newtona. Światło białe projekcyjne (w prawym rogu dolnym) przechodzi przez poziomą szczelinę, wydzielającą wąską wiązkę, następnie przez aparat, który daje widmo na dolnym przesłanym ekranie, trzymanym w łapkach od statywu. Szczelina w tym ekranie przepuszcza część promieni zielonych, przechodzą one przez drugi pryzmat, załamują się w nim i padają na górny ekran. Ponowne rozszczepienie nie zachodzi i promienie zachowują barwę zieloną (str. 98 i 100).

C. Fotografia ta przedstawia widok zgóry prostokątnego basenu, zawierającego roztwój eskuliny i eozyny w wodzie. Światło białe projekcyjne przechodzi przez soczewkę widoczną u góry na rysunku i zostaje rzucone na powierzchnię wody zapożyczając pryzmatu, który jednocześnie rozszczepia je na barwy widmo-owe. Widmo części wiązki widać na ekranie umieszczonym tuż nad powierzchnią wody (z prawej strony). W miejscu, gdzie widmo pada na samą powierzchnię wody, światło o krótszych falach ulega pochłonięciu a za-temat niego pojawia się światło nieco bardziej długofalowe. Eskulina fluoryzuje niebiesko, eozyna zaś żółtawo-zielono; dwa te pa-sma fluorescencyjne widać na le-wo od jasnego odcinka widma. Niebieskawa plamka nieco wyżej pośrodku nie ma znaczenia, jest to poprostu odbicie od szklanej ściany basenu. Fale dłuższe prze-chodzą przez warstwę cieczy i tworzą na dnie basenu podłuż-ną plamę barwy żółtawo-czer-wonej (str. 251).

D. Zdjęcie to zostało wykonane z ręcznie kolorowanej rycin w „Filozofii Naturalnej” Younga. Smugi pionowe w części dolnej przedstawiają barwy interferencyjne błonki mydlanej o grubości rosnącej w kierunku ku stronie prawej (w rzeczywistości doświadczaniu — od góry ku dołowi). Górna część ryciny okazuje, jaki byłby wynik rozszczepienia części dolnej na widmo przy pomocy pryzmatu o poziomej krawędzi. Tak np. niebieskawe plamki (po-winny być one być czysto niebieskie) po lewej stronie dają przytem widma pozbawione części czerwonej. Sąsiednie paski żółte okazują przy rozkładzie widmowym brak fioleto i t. d. Przerwy ciemne razem tworzą zakrzywio-ne smugi ciągłe (str. 161).

Ś W I A T Ł O

NAPISAŁ

SIR WILLIAM BRAGG

O. M., K. B. E., D. SC., F. R. S.

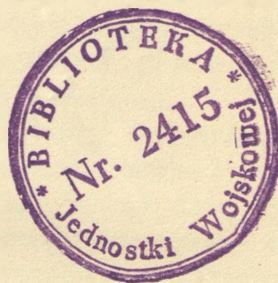
Dyrektor Royal Institution; Laureat Nobla



PRZEŁOŻYŁ

DR WŁADYSŁAW KAPUŚCIŃSKI

Docent Univ. Józefa Piłsudskiego w Warszawie



W A R S Z A W A

NAKŁADEM „MATHESIS POLSKIEJ”

1 9 3 6

53

Tytuł oryginału

THE UNIVERSE OF LIGHT

Pierwsze wydanie oryginału: maj 1933

Przedrukowano: sierpień 1933

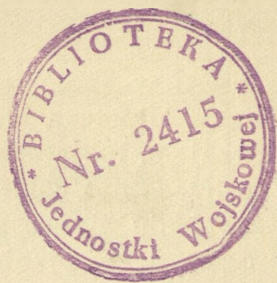
4993

WSZELKIE PRAWA ZASTRZEŻONE



32454/2

Zakłady Graficzne „Drukarnia Bankowa” Warszawa, Moniuszki 11



PRZEDMOWA

Najnowsze postępy fizyki wzbudziły żywe zainteresowanie w szerokich kołach; niewątpliwie przyczynił się do tego fakt, że fascynujące zagadnienia, jakie się tu nasuwają, zostały przedstawione i opisane przez szereg tak świetnych autorów. Sądziłem był, że i ja zdołałbym może przyczynić się w pewnym stopniu do udostępnienia nowych tych zdobyczy wiedzy, przedstawwszy w krótkim zarysie badania dawniejsze, na których opiera się ów rozwój najnowszy. Doświadczenia i rozumowania Newtona i Huygensa, Younga i Fresnela, Crookesa i Thomsona, i wielu innych dawnych i dzisiejszych badaczy, utorowały drogi, prowadzące do stanowisk, z jakich dziś na świat spoglądamy. Trudno jest objąć w całej pełni znaczenie naszej obecnej pozycji, jeśli nie znamy kraju, przez który wiedzie przebyta już droga.

Za nic przewodnią swego opowiadania obrałem to dawne współzawodnictwo pomiędzy dwiema teorjami światła, które było jednym z najpotężniejszych bodźców rozwoju nauki. Korpuskuła i fala, łączone zawsze z imionami Newtona i Huygensa, kolejno zdawały się odnosić ostateczne już zwycięstwo. Walka owa dobiega

kresu w sposób zarówno nieoczekiwany, jak pouczający. Hipotezy, które uważano za wyłączające się nawzajem, mają teraz pogodzić się ze sobą -- i fakt ten ostrzega nas, jakie niebezpieczeństwo kryje się w przyzwoleniu na to, aby nasze obrazy myślowe przeistoczyły się w przedmioty niezłomnej wiary. Wciąż jeszcze trudno nam pojąć, jak teorie te mogą *obie* być prawdziwe; musimy jednak przyjąć, że tak jest w istocie, świadczy bowiem o tem wielka ilość dowodów, popierających każdą z nich. Wnosimy stąd, że to, co w danej chwili leży poza granicami pojmowania — później może stać się czemś zupełnie jasnem, nie tylko dzięki nowym zdobyczom wiedzy, lecz również wskutek wyćwiczenia umysłu w nowych sposobach myślenia. Przyszłe badania, oparte na połączeniu obu dawnych teoryj, okażą się napewno tak samo owocne, jak badania w czasach minionych, gdy żyły one i wyrastały ze współzawodnictwa pomiędzy temi teorjami.

Światło w węższem znaczeniu tego słowa stanowi jedynie niewielką część znacznie obszerniejszej dziedziny zjawisk promieniowania. Jednakże prawa optyki stosują się w szerszym zakresie, niż to przypuszczali badacze - pionierzy, podobnie i prace ich ogólniejsze, niż sądzili, posiadają znaczenie. Długości fal świetlnych mieszczą się w ciasnych granicach, prawa ruchu falowego stosują się wszakże zarówno do niezmiernie krótkich fal promieni Röntgena z jednej strony, jak i do długich fal radjowych z drugiej. Badania, w których są wyzyskane usługi, jakie oddaje światło, posiadają również zasięg olbrzymi. Przedmiotem ich są wielkie przestrzenie astronomiczne — i drobnutkie twory, których uporządkowana zawilość tak samo znaj-

duje się poza zasięgiem naszych oczu; w obu wspomnianych dziedzinach badania te ujawniają ogromną ilość spraw niezmiernie ciekawych i ważnych.

Lecz na tem nie koniec sprawy. Promieniowania najoczywiściej korpuskularne — strumienie elektronów, protonów, atomów, tak łatwo otrzymywane w laboratorjach — podlegają, jak się okazuje, w pewnym stopniu prawom, rządzącym w dziedzinie światła. Fala i korpuskuła są raczej różnymi sposobami ujęcia rzeczy, niż odrębnymi od siebie tworam. Jednem słowem, światło panuje w fizyce — jak i we wszystkich naukach. Rozwój fizyki jest związany z badaniem rozmaitych jego postaci i własności; nowe wspaniałe wyniki, o których wspominaliśmy, są dalszym ciągiem tego rozwoju. Długa to historia; w dziełku niniejszem starano się dać krótki przegląd niektórych dawniejszych jej wydarzeń w tym celu, by zdarzenia nowsze łatwiej było ocenić.

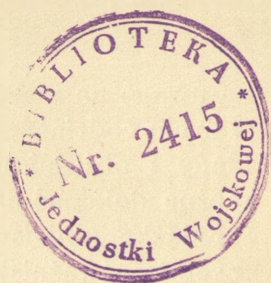
Tytuł książki jest identyczny z tytułem cyklu odczytów, które wygłosiłem w okresie Bożego Narodzenia 1931 w Royal Institution. Odczyty takie wygłaszane są corocznie od lat przeszło stu przed audytorjum, złożonem w większej części z młodzieży. Sam Faraday wygłosił ich nie mniej, niż dziewiętnaście. Prostota i jasność wykładu oraz umiejętna ilustracja doświadczeniami były szczególnie „dostosowane do młodzieńczego grona słuchaczy“ — by użyć nieco osobliwego zwrotu, jaki można jeszcze znaleźć w corocznem ogłoszeniu.

Następcy Faradaya starali się iść w jego ślady, dlatego to i odczyty „gwiazdkowe“ z r. 1931 były wydatnie ilustrowane doświadczeniami; prócz dawno znanych było tam również trochę nowych. Zużytkowałem je w książce niniejszej, jakkolwiek oczywiście trzeba było

znacznie rozszerzyć zarówno ich opis, jak i rozumowania na nich oparte, w porównaniu z tem, co można było powiedzieć w czasie odczytu.

Przy tej sposobności pragnąłbym wyrazić mą wdzięczność tym licznym przyjaciołom, którzy okazali mi swą pomoc przy zaopatrzeniu książki w ilustracje. P. Thorne Baker wykonał większość fotografii barwnych, których brak w książce o świetle dałby się bardzo niekorzystnie odczuć. Rysunki piórkiem zawdzięczaam mej córce, p. Alban Caroe. Profesor C. T. R. Wilson udzielił mi kilku wykonanych przez siebie fotografii torów w komorze ekspansyjnej. Zdjęcie krajobrazu w promieniach podczerwonych oddała mi do rozporządzenia firma Ilford Ltd. Profesor A. Fowler i Dr W. M. Smart byli tak uprzejmi, iż dostarczyli mi fotografii widm, profesor Andrade zaś — ilustracyj uginania światła. Pomysł rysunku 66 podał Dr W. T. Astbury. Większa część fotografii urządzeń doświadczalnych została wykonana w Royal Institution przez p. W. J. Greena i jego asystenta, p. K. Bridgera. Co się tyczy reszty ilustracyj, to starałem się umieścić wzmianki o ich pochodzeniu w odpowiednich miejscach tekstu.

W. H. Bragg.



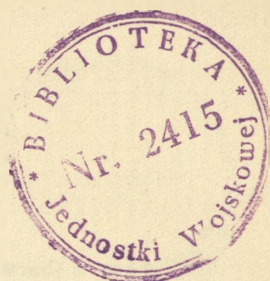
OD TŁUMACZA

Jak wielu czołowych przedstawicieli nauki angielskiej, Sir William Bragg, znakomity fizyk, laureat nagrody Nobla, wsławiony badaniami szczególnie w dziedzinie promieni Röntgena, jest autorem szeregu popularnych książek, obejmujących różne dziedziny fizyki. Książki te, po mistrzowsku przez autora opracowane, ukazały się prawie wszystkie w przekładach polskich, to też autor jest dobrze znany publiczności polskiej. Dzieło niniejsze, jak łatwo widzieć — nie jest podręcznikiem optyki. Jest to niejako zbiór opowiadań o najrozmaitszych zjawiskach z dziedziny nauki o promieniowaniu, utrzymanych w tonie nadzwyczaj popularnym i dzięki temu nie wymagających przy czytaniu żadnego niemal przygotowania specjalnego. Autor porusza wielką liczbę tematów, starając się niektóre zagadnienia oświetlić nader wszechstronnie. Wiele z tych tematów, nawet spośród bardziej interesujących, rzadko spotkać można w książkach tego rodzaju, dzięki czemu omówienie ich dodaje książce Bragga wiele uroku. Przytoczmy tu dla przykładu sprawę powstawania połysku tkanin, opis „zwierciadła magicznego“, sposobu szlifowania brylantów i t. d. Autor zwraca przytem bacz-

na uwagę na zastosowania opisywanych praw i zjawisk w życiu codziennem, czerpiąc — o ile możliwości — przykłady i objaśnienia ze spostrzeżeń, których mnóstwo można dokonać na każdym niemal kroku.

Książka niniejsza, omawiająca jeden z najpiękniejszych i najważniejszych działów fizyki, będzie napewno pożądanem uzupełnieniem cyklu innych dotychczas wydanych książek popularnych Sir Williama Bragga.

W. K.



SPIS RZECZY

Rozdziały

	<i>Str.</i>
I Natura światła	1
II Oko i proces widzenia	44
III Barwy	97
IV O powstawaniu barw	127
V Barwy nieba	165
VI Polaryzacja światła	185
VII Światło słońca i gwiazd	223
VIII Promienie Röntgena	255
IX Fale i korpuskuły	285
Skorowidz	315

SPIS TABLIC

	Str.
<i>Tablica I (barwna)</i>	<i>obok str. tytułowej</i>
II	20
III	21
IV	28
V	40
VI	41
VII	52
VIII	68
IX	69
X	76
XI	84
XII	92
XIII	93
XIV (barwna)	104
XV	172
XVI	173
XVII	196
XVIII	204
XIX	216
XX	248
XXI	249
XXII	276
XXIII	277
XXIV	292
XXV	308
XXVI	309



ROZDZIAŁ I

NATURA ŚWIATŁA

ŚWIATŁO niesie nam wieści o Wszechświecie. Przybywając do nas od słońca i gwiazd, mówi nam o ich istnieniu, ich położeniach, ruchach, budowie — i wielu innych ciekawych rzeczach; biegnąc od przedmiotów, zbliżając nas otaczających, umożliwia nam orjentowanie się w świecie. Rozkoszujemy się kształtami i barwami, które ono przed nami odsłania; posługujemy się nim przy przekazywaniu wiadomości i wymianie myśli. Jeżeli tak rozszerzymy znaczenie tego słowa — mamy zaś wszelkie prawo to uczynić, — by objąć nim obszerne dziedziny promieniowań pokrewnych, choć niewidzialnych dla oka: wówczas „światło“ jest również wielkim „przenośnikiem“ *energji* z jednego miejsca na ziemi, lub we Wszechświecie, w inne, głównie za pośrednictwem przenoszenia tego, co nazywamy „ciepłem“. To samo pojęcie obejmuje również nowoczesną transmisję radjową, promienie Röntgena, promienie ciał promieniotwórczych, oraz, być może, promienie kosmiczne, które wzbudziły ostatnio tak wielkie zainteresowanie. Wszystkie te zjawiska, tak bardzo różniące się od siebie, są przejawami jednego czynnika, którego wspólną powołano do występowania

ła coraz wyraźniej w miarę rozwoju badań nad naturą światła.

Możemy jednak posunąć się jeszcze dalej. W ostatnich latach okazało się, iż pojedynczy *elektron*, ów najdrobniejszy „atom elektryczności“, posiada podobne cechy, jak promieniowania, których dobrze znanym, typowym przedstawicielem jest światło. Same atomy nawet zdają się, pod pewnemi względami, należeć do tej wielkiej kategorii zjawisk.

Światło więc, biorąc pełne znaczenie tego słowa, przenosi energję, podstawowy czynnik życia, oraz umożliwia istotom żywym postrzeganie świata; jest ono pokrewne materji, z której uczynione są wszystkie rzeczy, ożywione i nieożywione. Sferą jego działania jest cały Wszechświat; nie będzie w tem przesady, gdy go nazwiemy — *Kosmosem światła*.

Na początku naszych rozważań musimy zająć się światłem w znaczeniu ściślejszem — światłem, widzialnem dla naszych oczu. Promień świetlny, np. słoneczny, opuszcza swe źródło i dobiega do nas po pewnym czasie. Po drodze doznał on niejednej przygody. Przeniknąć musiał rozżarzone warstwy gazów na powierzchni słońca, oraz atmosferę, otaczającą ziemię. Nie jeden raz może uległ odbiciu i rozproszeniu, aż wreszcie przychodzi do nas od przedmiotu, na który właśnie spoglądamy. To ostatnie odbicie jest najważniejszą dla nas częścią podróży promienia, gdyż mówi nam o tem, gdzie przedmiot ten się znajduje i czym jest wogóle. Wzrok nasz może dowiedzieć się nawet nieco więcej: wprawa i doświadczenie pozwala mu poznać *pochodzenie* światła; nie weźmiemy go przecież przez pomyłkę za jakieś światło sztuczne. Przyrzą-

dy, służące do analizy światła, pozwalają posunąć się o wiele dalej: przy ich pomocy można wysnuć wnioski, dotyczące owych przygód, jakie spotkały światło po drodze; można wykryć skład oraz stan fizyczny atmosfery, przez które przebiegało, a także dowiedzieć się coś niecoś o ciałach, które je odbijały lub rozpraszaly.

Podobnie wygląd okrętu, który, wracając z dalekiej podróży, wpływa powoli na swe miejsce w dokach, mówi nam odrazu, jaki jest jego port macierzysty i jaka była podróż; gdy zaś udamy się na pokład, to przedmioty w rękach pasażerów, lub leżące dokoła, pozwalają wywnioskować, do jakich portów okręt zawiąjał po drodze. W szczegółach tych jest zapisana cała historia podróży.

Promień świetlny, wpadając do oka, również przynosi z sobą opowieść o swych przygodach, — czasami łatwych do odtworzenia, niekiedy znów trudniejszych. Najlepiej oko wykorzystuje wieści o *ostatniem* rozproszeniu promienia przed końcem jego podróży: one to umożliwiają „widzenie“ przedmiotu, na którym to rozproszenie nastąpiło.

Falowa teoria światła

Nasuwa się tutaj oczywiste pytanie, jaka jest natura owego „gońca“ i w jaki sposób przenosi się on z miejsca na miejsce. W dzisiejszych czasach znacznie łatwiej jest zrozumieć przyjęte obecnie wyjaśnienie zjawisk świetlnych, niż jeszcze przed kilkunastu nawet laty. Radjo spopularyzowało pojęcie o pewnych zaburzeniach, które rozchodzą się w postaci fal

ze stacji centralnej, i które są chwywane i odpowiednio przetwarzane przez bliższe i dalsze „odbiorniki“. Słońce wysyła fale zupełnie tak samo, jak rozgłośnia radjowa: oczy nasze chwyają i interpretują ruchy falowe, dochodzące do nich, podobnie jak to czynią odbiorniki z falami ze „studja“. Niema żadnej *istotnej* różnicy pomiędzy obu temi rodzajami fal, jest tylko różnica w rozmiarach. Rozchodzą się one z dokładnie tą samą prędkością; jeżeli jakiś ośrodek jest nośnikiem fal jednego typu, to przenosi również fale typu drugiego. Jedyna różnica polega na tem, że fale świetlne następują po sobie w odstępach o wiele mniejszych, niż fale radjowe; fakt ten ma oczywiście swe skutki, tak, iż pod pewnemi względami światło i fale radjowe zachowują się odmiennie. Rzeczą istotną jest jednak to, iż mają one tę samą naturę.

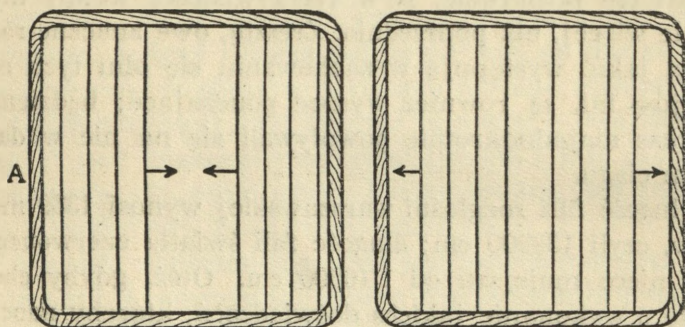
Istnienie tego podobieństwa jest rzeczą zarówno ciekawą, jak i pożyteczną. Falowa teoria światła była zawsze czemś trudnem do zrozumienia, gdyż jej idea podstawowa wydawała się tak niezwykła. Dziś wszakże codziennie znajdujemy w gazetach długości fal, wysyłanych przez różne stacje, dzięki czemu pojęcie „fal“ ogromnie się spopularyzowało. Oczywiście, nie znaczy to bynajmniej, że obecnie wszyscy wiemy, w jakim ośrodku rozchodzą się owe fale i jak jest on rozmieszczony we Wszechświecie. Niekoniecznie też musimy wiedzieć, co to właściwie porusza się tam i napowrót, czy też w górę i nadół, ani nawet o tem, jaki to ruch ma tu odpowiadać dobrze nam znanemu ruchowi fał wodnych np. na powierzchni morza. W rzeczywistości, to wszystko, co większość ludzi wie o radjofonji, ogranicza się do tego, że są tam jakieś fale, których

długość można zmierzyć mniej lub bardziej dokładnie, i że odbiorniki mogą być „nastawiane” na długość fal, wysyłanych przez daną stację. Już jednak i te wiadomości oddają duże usługi przy próbie zrozumienia falowej teorii światła. Widzimy, że inżynier od radja stale posługuje się pojęciem fali i dostosowuje doń całą swą działalność. Pojęcie to zdaje się przez to samo tracić swą nieokreśloność i nabiera cech czegoś praktycznego, jakkolwiek przy bliższem zastanowieniu się nietrudno stwierdzić, iż w rzeczywistości wiemy niewiele więcej, niż poprzednio. Zresztą, owe znaczne różnice, jakie występują w zachowaniu się obu tych rodzajów fal, są również wysoce pouczające; będziemy jeszcze niejednokrotnie powoływali się na nie w dal-
szym ciągu.

Długość fali rozgłośni warszawskiej wynosi 1339 metrów, czyli 133900 cm; długość fali światła czerwonego jest nieco mniejsza od 1/10000 cm. Otóż, gdyby chodziło o wykonanie jakichś doświadczeń, któreby naocznie ilustrowały niektóre własności fal, to widocznie fale radjowe byłyby do tego celu o wiele za długie, świetlne zaś — zbyt krótkie. Musimy więc posłużyć się ruchem falowym, odbywającym się w rozmiarach dogodniejszych; znajdujemy go w ruchu drobnych fal na powierzchni wody. Zajmijmy się więc zbadaniem fal wodnych; mamy prawo odwołać się do ich pomocy, zobrazują nam one bowiem główne cechy ruchu falowego tak dobrze, jak dowolny inny przykład tego ruchu: fale długie, czy krótkie, okazują w zasadzie zjawiska analogiczne.

Doświadczenia z falami na powierzchni wody

Użyjemy do naszego celu płytkiego prostokątnego basenu o szklanem dnie (p. rys. 1); nalewamy doń wody na głębokość około pół centymetra. Zmarszczki, rozchodzące się po powierzchni wody, gdy ją w jakiś sposób zakłócimy, nie są zbyt łatwo widoczne, jeśli patrzeć na nie bezpośrednio; nader dogodnie jednak moż-



Rys. 1. Potrącenie basenu wzbudza fale na powierzchni wody. Dwa ciągi fal, powstałe na obu ściankach bocznych, zbliżają się do siebie na lewym rysunku, a przyniknęły się już nawzajem na prawym.

na śledzić ich ruchy przy użyciu nieosłoniętej lampy, rzucając cienie ich na ekran za pomocą zwierciadła.

Potrąćmy basen w ten sposób, aby wzbudzić fale równoległe do jednego z boków prostokąta. Fale te będą biegły po powierzchni w obu kierunkach i krzyżowały się gdzieś w pobliżu środka; oba ciągi fal przechodzą przez siebie nawzajem i docierają wkońcu do przeciwnych ścianek basenu. Tutaj ulegają odbiciu, poczem

powracają wstecz tą samą drogą, którą przyszły. Te dwa tak proste spostrzeżenia ilustrują dwie najbardziej może charakterystyczne cechy ruchów falowych.

Pierwsze z nich okazuje, że dwa ciągi fal przechodzą przez siebie nawzajem, *nie ulegając przytem żadnym zakłóceniom*. Jest to fakt dobrze wszystkim znany z codziennego doświadczenia, jakkolwiek może nie każdy jasno zdaje sobie zeń sprawę. Gdyby nie ta własność fal, działałyby się wciąż najdziwniejsze rzeczy. Ktoś patrzy na świecę — wysyła więc ona światło w kierunku jego oczu. Przypuśćmy, że ktoś inny spogląda na inną świecę, i że obie linje widzenia przecinają się z sobą. Każdy z obserwatorów widzi świecę, na którą patrzy, równie dobrze, jakgdyby drugiej osoby wcale nie było; jeśliby rzecz miała się inaczej, odczuliśmy to aż nadto wyraźnie. Proszę sobie wyobrazić, co by się działo, gdyby promienie świetlne, rozproszone przez różne przedmioty, znajdujące się w pokoju, przeszkadzały sobie jakoś podczas wszystkich swych niezliczonych skrzyżowań: w powstałym stąd chaosie niepodobna byłoby nic rozróżnić, cały pokój wydawałby się nam poprostu pogrążony w gęstej, nieprzeniknionej mgle. Podobnie i fale z różnych rozgłośni radiowych, krzyżując się z sobą, nie przeszkadzają sobie wzajemnie. Zjawisko, zwane w języku fachowym „interferencją“, ma charakter zupełnie odmienny; zajmiemy się niem szczegółowo w dalszym ciągu. Gdy jeden radioamator słucha Warszawy, powiedzmy w Kaliszu, inny zaś Torunia w Radomiu, żaden z nich nie odczuwa złych skutków tego, że oba ciągi fal przecinają się z sobą gdzieś w okolicy Łowicza. W czasie tego krzyżowania się dwóch układów fal zachodzą niewątpliwie ruchy

bardzo skomplikowane, lecz po minięciu się każdy ciąg biegnie dalej tak, jakgdyby wcale nie był poprzednio powikłany z drugim. Ciągi fal przenikają się więc nawzajem bez żadnych trwałych skutków; sprawa ta odgrywa oczywiście niezmiernie ważną rolę w procesie widzenia.

Fakt, że promienie świetlne przecinają się, nie oddziałując wzajemnie na siebie, był w czasach ubiegłych — a może dla niektórych osób jest i dzisiaj — czemś niewątpliwie niełatwym do zrozumienia. Można było to odczuć szczególnie wyraźnie wtedy, gdy uważano światło za strumień drobnych ciałek, *korpusek*, jak to utrzymywał Izaak Newton. Przeciw jego teorii wysuwano nawet zarzut, iż dwie osoby nie mogłyby patrzeć sobie wzajemnie w oczy, gdyż ciała świetlne, biegnące po tej samej linii w dwóch przeciwnych kierunkach, musiałyby zderzać się ze sobą i spadałyby na ziemię. Zarzut ten nie był zbyt poważny, możnaby bowiem przypuścić, że korpuseki owe są tak małe, iż zderzenia zachodzą nader rzadko. Mamy tu jednak przykład argumentów, jakimi początkowo operowali uczeni w swych rozważaniach nad naturą światła, opartych na nielicznych jedynie doświadczeniach.

W czasach Newtona istniały dwie współzawodniczące z sobą teorie: *korpuskularna*, podana przez Newtona, oraz teoria *impulsów*, broniona przez Huygensa, i będąca poprzedniczką dzisiejszych teorii falowych. Zarówno Newton, jak Huygens zakładali istnienie drobnutkich ciałek; Newton sądził jednak, że światło składa się z poruszających się z ogromną prędkością korpusek; Huygens natomiast wyobrażał sobie, iż ciała te są w spoczynku, wypełniając całkowicie

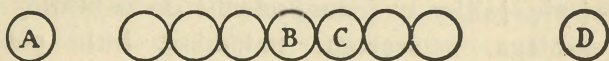
przestrzeń, światło zaś polega na przekazywaniu pewnego rodzaju wstrząśnięć od jednej korpuskuły do sąsiedniej. Przytoczmy tu ustęp z jego „Traktatu o świetle“:

„Jeśli weźmiemy pewną ilość kul jednakowych rozmiarów, wykonanych z jakiejś bardzo twardej substancji i ułożymy je w prostolinijny szereg tak, aby stykały się ze sobą: wówczas, uderzywszy inną podobną kulą w pierwszą kulę szeregu, stwierdzimy, że ruch przenosi się jakby w jednej chwili do ostatniej kuli, która odbiega z szeregu; natomiast kule pozostałe nie poruszyły się dostrzegalnie, a nawet kula uderzająca pozostaje wraz z niemi w spoczynku. Widać stąd, że ruch przenosi się z ogromną prędkością, tem większą, im twardsze są kule“.

„Jest wszakże rzeczą pewną, iż owo rozchodzenie się ruchu nie jest momentalne, lecz kolejne, z kuli na kulę, a więc wymaga pewnego czasu. Gdyby bowiem ruch, czy też zdolność do ruchu, jeśli chcecie, nie przechodził *kolejno* przez owe kule, uzyskałyby one wszystkie ruch w tej samej chwili, a zatem posunęłyby się wszystkie razem, co właśnie się nie dzieje“.

Huygens nie omieszkiał zaznaczyć, iż owe impulsy nie następują po sobie w regularnych odstępach i odrzucił w ten sposób prawidłowość, która jest istotną cechą ruchu falowego, — tą cechą, którą *Young* i *Fresnel* na początku XIX wieku wykorzystali z takim powodzeniem, kładąc podwaliny nowoczesnej teorii światła. Rozwinięciem zasady interferencji podanem przez Younga oraz pojęcia fali poprzecznej — przez *Fresnela*, zajmiemy się później. Należy tu zaznaczyć, iż Huygens zdołał przy pomocy swych impulsów wyjaśnić pro-

stsze zjawiska optyczne, m. in. odbicie światła oraz przenikanie się promieni bez wzajemnego przeszkadzania sobie. Tę ostatnią sprawę objaśnia on przy pomocy rysunku, przytoczonego obok (rys. 2): jeżeli mianowicie kule *A* i *D* popchniemy w kierunkach przeciwnych, tak, aby uderzyły jednocześnie w prostoliniowy rząd kul, wówczas obie odskoczą, jakgdyby zderzyły się z ciałem umocowanym nieruchomo. Impulsy mu-



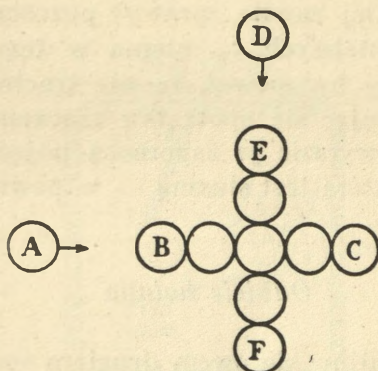
Rys. 2. Jest to kopja rysunku z „Traktatu o świetle” Huygensa. Kula *A* pozostaje w spoczynku po uderzeniu w koniec szeregu kul, kula *D* zaś na drugim końcu zostaje wprowadzona w ruch.

siały tu przebiec przez szereg kul w przeciwnych kierunkach, tak, iż ruch *A* udzielił się *D* i odwrotnie (rys. 2).

Doświadczenie to można wykonać w inny sposób. Rozmieścimy kule na desce tak, jak to wskazano na rys. 3; aby było zachowane prostoliniowe uszeregowanie, spoczywają one w płytkich rowkach, wyciętych w desce. Jeśli popchniemy *A* ku *B* i *D* ku *E*, tak, aby zderzenia zaszły jednocześnie, to *A* i *D* zatrzymają się przy *B* oraz *E*, natomiast *C* i *F* zostaną wprowadzone w ruch. Oba impulsy skrzyżowały się nawzajem w środku układu, nie wywierając na siebie wzajemnie żadnego oddziaływania.

Po Newtonie teoria korpuskularna podupadła, zwyciężyła zaś ostatecznie teoria falowa, gdyż, uzupełniona i zmieniona przez Younga i Fresnela, zdołała wy-

tłumaczyć nie tylko wszystkie zjawiska, znane za czasów Newtona i Huygensa, lecz również wiele innych później odkrytych własności światła. Zobaczymy w dalszym ciągu, że teoria falowa dotychczas nie straciła swego znaczenia; będziemy korzystali w szerokim zakresie z jej obrazów, w szczególności z zachowania się fal wodnych — jak to już zaczęliśmy czynić.



Rys. 3. Inna odmiana poprzedniego doświadczenia.

A i D uderzają jednocześnie o B i E i pozostają w spoczynku, C i F zaś odskakują.

Jest jednak rzeczą niezmiernie ciekawą, iż w ostatnich latach wykryto nowe fakty, których teoria falowa nie może wyjaśnić i które zdają się domagać powrotu do teorii korpuskularnej, podobnej do Newtonowskiej. Należałoby znaleźć jakiś sposób pogodzenia obserwacji, które zdają się być w najskrajniejszej sprzeczności z sobą; nigdy chyba nie było w historii nauki okresu tak gorączkowego, jak czasy obecne, kiedy

to wysiłki, by pojąć i zrozumieć, natężają umysły do ostateczności.

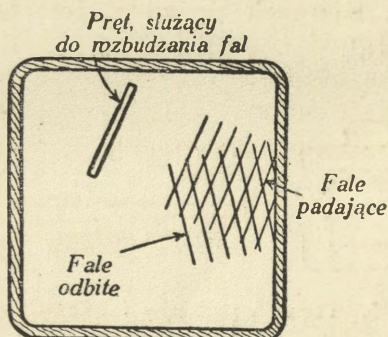
Chwilowo nie możemy posunąć się dalej w tym właśnie kierunku. Musimy teraz zadowolić się zbadaaniem mniej zawiłych własności światła, korzystając przytem z teorii falowej, która odda nam znakomite usługi. Nie zapomnimy bynajmniej o tem, iż niektóre bardziej zawiłe sprawy pozostawiliśmy dla rozważań późniejszych, — niema w tem jednak nic złego. Możemy być pewni, że nie tracimy czasu na próżno, zajmując się spoczątku rzeczami prostszymi i starając się wyrazić je zapomocą pojęć, zaczerpniętych z teorii, która jest słuszna — w pewnym przynajmniej zakresie.

Odbicie światła

A teraz zajmijmy się owem drugim spostrzeżeniem, którego dokonywamy bez trudu, śledząc wzrokiem rozchodzenie się fal w basenie. Jest to zjawisko *odbicia*. Widzieliśmy już, że ciąg fal, dobiegający całą swą szerokością do ściany basenu, jest odrzucany wstecz dokładnie po tej samej linii. Jeśli teraz wytworzymy ciąg fal, który pada na ściankę ukośnie, to przekonamy się, że układ fal odbitych jest nachylony do niej pod tym samym kątem, co fale padające. Odpowiada to dobrze znanej własności światła: oddawna już wiadomo, że promień padający i odbity tworzą równe kąty z powierzchnią zwierciadła (rys. 4).

Dobrze będzie rozpatrzyć w tem miejscu związek pomiędzy dwoma pojęciami, któremi stale będziemy się posługiwali, mianowicie: „promieniem“ oraz „ciągiem“

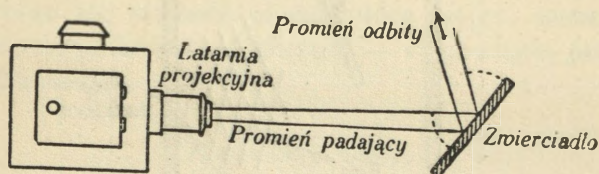
lub „układem“ fal. Wyrazu „promień“ używamy np. w celu oznaczenia jasnej wiązki światła słonecznego, wpadającej do zaciemnionego pokoju przez otwór w okiennicy. Wiązkę tę należy również uważać za ciąg fal, niepodobna jednak przedstawić tego na rysunku zgodnie z rzeczywistością. Trzebaby w tym celu nakreślić, jak na rys. 4, linje równoległe, ozna-



Rys. 4. Rysunek przedstawia odbicie fal od ścianki basenu.

czające kolejne fale; jeśliby przytem wykres ten miał przedstawiać stosunki w wielkości naturalnej, to na długości 1 cm musiałoby mieścić się około 20 000 linii. Mimo to, rozpatrzenie rysunku takiego, jak podany wyżej, prowadzi do stwierdzenia pewnej ważnej okoliczności. Mianowicie „końce“ fal nie mogłyby w rzeczywistości być tak *dokładnie* określone, ażeby np. można było poprowadzić przez nie linję prostą, odpowiadającą ograniczeniu „promienia“. Należałoby raczej oczekiwać, że fale rozszerzają się nieco w obie strony, przyczem „końce“ ich stają się rozmyte

i niewyraźne. Otóż tak właśnie sprawa przedstawia się w przypadku promieni świetlnych; zobaczymy w dalszym ciągu, że ma to wielkie znaczenie z punktu widzenia teorii. Praktycznie biorąc, efekt ten jest nieznaczny i naogół można nie zwracać nań uwagi; wobec tego w większości przypadków wolno rysować „promienie” świetlne tak, jakgdyby światło występowało jedynie w pewnych, prostych liniach ograniczonych, obszarach. Kierunek promieni jest oczywiście prostopadły do fal.

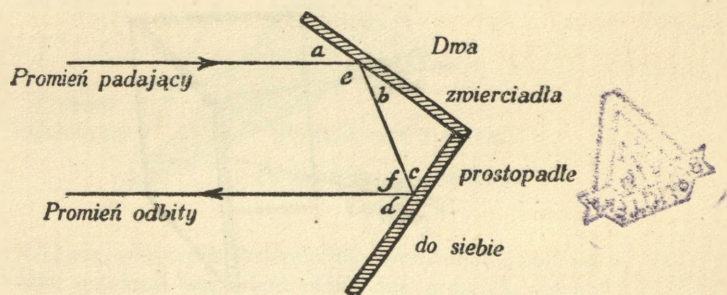


Rys. 5. Promień padający i odbity tworzą jednakowy kąt ze zwierciadłem.

Wykonajmy teraz parę doświadczeń, ilustrujących odbicie promieni świetlnych od powierzchni płaskich. Lampa projekcyjna (rys. 5) rzuca wąską, prostoliniową smugę światła na zwierciadło, od którego wiązka ta się odbija; łatwo można spostrzec nawet bez dokładnych pomiarów, że prawo odbicia stosuje się przynajmniej w przybliżeniu. Tem łatwiej więc przyjmiemy zapewnienie, iż najdokładniejsze nawet pomiary nie wykazują najmniejszych odstępstw od tego prawa.

Odmianą i uogólnieniem opisanego doświadczenia będzie następujące: ustawmy dwa zwierciadła prostopadle do siebie, w ten sposób, aby wspólna krawędź

ich była pionowa; rzućmy na jedno z nich poziomy promień świetlny, tak, aby po odbiciu padł na drugie zwierciadło. Po drugim odbiciu, promień wraca po prostej, równoległej do kierunku promienia pierwotnego, bez względu na to, pod jakim kątem rzucamy ten ostatni na zwierciadło (p. rys. 6). Jeśli jednak krawędź zwierciadeł nie jest pionowa, pro-



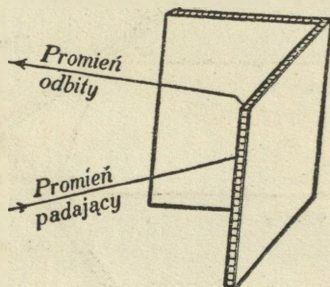
Rys. 6. Dwa odbicia od dwóch zwierciadeł, nachylonych do siebie pod kątem prostym. Oba promienie są do siebie równoległe, jeżeli kierunek linii przecięcia zwierciadeł jest do promieni prostopadły, gdyż $b + c = a + d = 90^\circ$; $e + f = 360^\circ - (a + b + c + d) = 180^\circ$.

mień dwa razy odbity nie będzie już równoległy do pierwotnego (rys. 7).

Dalszą ciekawą ilustrację praw odbicia światła otrzymamy, biorąc trzy zwierciadła wzajemnie prostopadłe do siebie, jak na rys. 8. Promień, padający na jedno z nich i odbijający się kolejno od wszystkich trzech, powraca w kierunku równoległym do promienia pierwotnego, niezależnie od położenia całego układu zwierciadeł. Urządzenie to bywało stosowane nie-

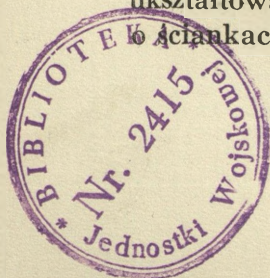
jednokrotnie, przyczem ostatnie z tych zastosowań odznacza się dużą pomysłowością.

Niedawno wydane przepisy nakazują, aby na każdym rowerze był przymocowany czerwony reflektor, któryby odrzucał wstecz, ku jadącemu za rowerzystą kierowcy, światło przednich latarni samochodowych. Nie-

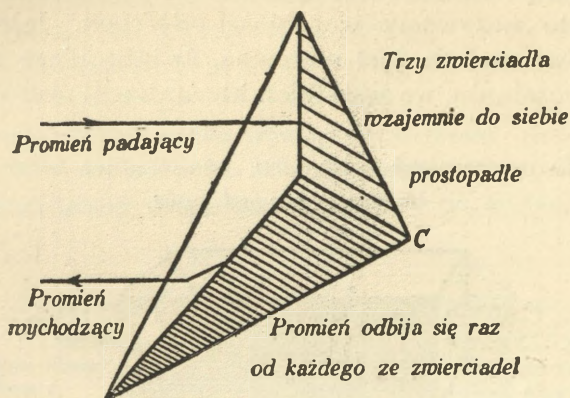


Rys. 7. Nie są one jednak równoległe, jeżeli warunek podany przy poprzednim doświadczeniu nie jest spełniony.

bawem pojawiły się reflektory najrozmaitszych typów, nie wszystkie jednak odbijały światło latarni dostatecznie silnie, a przytem dokładnie w kierunku samochodu. Okazało się rzeczą niezbędną zbadać je wszystkie w National Physical Laboratory i wybrać te, które najlepiej odpowiadają wymaganiom. Jednym z najlepszych był reflektor, oparty na zasadzie układu trzech zwierciadeł (rys. 8); jest to kawałek czerwonego szkła o płaskiej powierzchni przedniej, tylnej zaś ukształtowanej w kilka trójsięciennych ostrosłupów o ściankach wzajemnie prostopadłych. Światło latarni



samochodowej wchodzi przez płaską ściankę przednią i część jego odbija się trzykrotnie na trzech ściankach



Rys. 8. Odbicie od trzech zwierciadeł, ustawionych pod kątami prostymi względem siebie, daje promień, wychodzący zawsze równoległe do padającego na układ, niezależnie od tego, jakie położenie nadamy zwierciadłom.

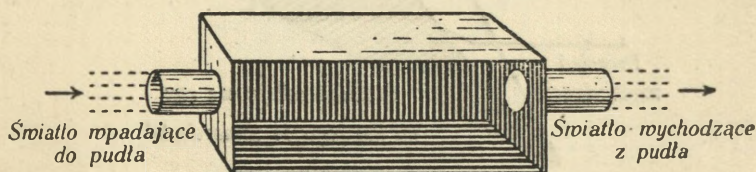
każdej piramidy; wskutek tego, wiązka promieni wychodzi tą samą drogą, którą przysła — t. zn. w kierunku samochodu. O to właśnie chodziło.

Rozpraszanie światła

Niekiedy mówimy o odbiciu światła, kiedy indziej zaś o jego rozpraszaniu. Ważną rzeczą jest pamiętać, iż oba te wyrażenia nie odnoszą się do różnych zjawisk, lecz do różnych warunków, w jakich jedno i to samo zjawisko zachodzi. Światło, napotykające jakąś przeszkodę, zostaje odrzucone wbok. Jeśli dany przedmiot

ma gładką powierzchnię, wówczas nowy bieg promieni jest prawidłowy; o tem zaś, jakie są te nowe kierunki promieni, rozstrzyga kształt powierzchni. Zjawisko to nazywamy wogólności *odbiciem*. Jeżeli jednak powierzchnia jest nierówna, światło ulega rozrzućeniu, rozsianiu, we wszelkich kierunkach: mamy tu do

*Pudło poczernione wewnątrz, zawierające powietrze
oczyszczone od pyłu*



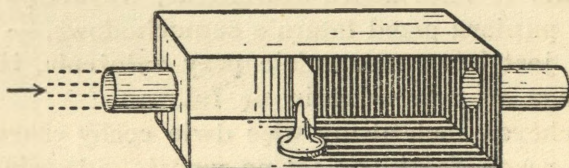
Wewnątrz pudła няма śladu wiązki świetlnej

Rys. 9. Światło przechodzi przez powietrze pozbawione pyłu bez dostroczalnego rozpraszania.

czynienia z *rozproszaniem*. Gdy fale morskie uderzają o wybrzeże, ujęte w obmurowanie, obserwujemy regularne odbicie; jeśli jednak brzeg jest skalisty, nierówny, — wówczas ruch wody jest chaotyczny i niepodobna tam dostrzec regularnego ciągu fal odbitych.

Droga promienia świetlnego, przebiegającego przez pokój, jest widoczna, gdyż w powietrzu unoszą się najrozmaitsze pyłki, które rozpraszają część światła, tak, iż dostaje się ono do naszych oczu. Jeśliby jednak usunąć zupełnie pył z powietrza, to promień nie byłby już widoczny z boku. Aby to wykazać, użyjemy pudła (p. rys. 9), przez które może przebiegać wiązka

światła, wchodząc i wychodząc przez szklane okienka. Przednia ściana pudła, również szklana, pozwala widzieć, co się dzieje wewnątrz. Pozostałe ściany są poczernione od strony wewnętrznej, a na parę dni przed doświadczeniem zostały posmarowane gliceryną, tak, że wszystek pył w pudle osiadł i przylepił się na ścianach; dzięki temu powietrze w pudle jest niemal zupełnie wolne od pyłu. W tych warunkach widać drogę promieni przed wejściem do pudła i po wyjściu z nie-



Biały ekran rozprasza światło

Rys. 10. Kawałek białego papieru stanowi przeszkodę dla biegu światła i rozprasza je, stając się w ten sposób wtórnym źródłem światła.

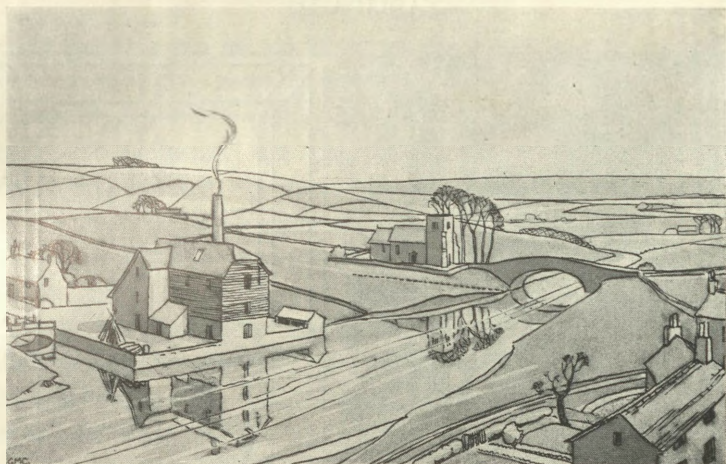
go, lecz przebieg wiązki wewnątrz jest niewidoczny; zgadza się to oczywiście z naszą hipotezą. Jeżeli bowiem promień świetlny składa się z ciągu fal, oko zaś jest organem, który działa tylko wówczas, gdy światło doń wpada, — to jeśli fale nie ulegają już rozpraszaniu na cząstkach pyłu, nie możemy zupełnie widzieć promienia. Można by urządzić tak, że promień świetlny — o dowolnie wielkiem natężeniu — wpadałby do pokoju przez jeden otwór i wychodziłby przez inny, pozostawiając sam pokój w zupełnej ciemności, o ile, po pierwsze, pokój nie byłby oświetlony w jakiś inny sposób, a powtóre, o ile powietrze w nim byłoby

wolne od pyłu. W istocie, pudło nasze jest niejako modelem takiego pokoju. Jeżeli jednak w drodze promieni wstawimy kartkę białego papieru, to zarówno pudło, jak ów pokój, zostaną oświetlone (rys. 10). Niekiedy dobrze jest pamiętać o tem, jak znaczną część światła można w ten sposób w bok skierować. Gdy np. trzeba zmienić oponę na wiejskiej drodze, w nocy, a zapomnieliśmy ręcznej latarki elektrycznej, lampa zaś nie da się obrócić w pożądanym kierunku, możemy mimo to mieć dobre oświetlenie, trzymając kawał białego papieru przed latarnią samochodową. — Wszystko to jest łatwo zrozumiałe przy założeniu, iż światło polega na rozchodzeniu się fal.

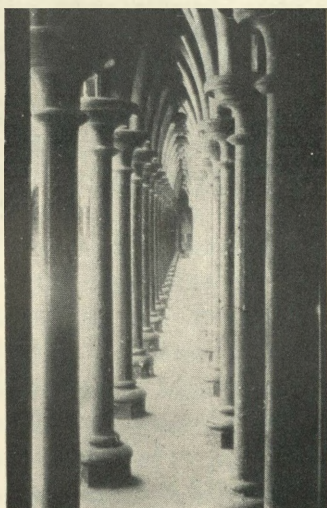
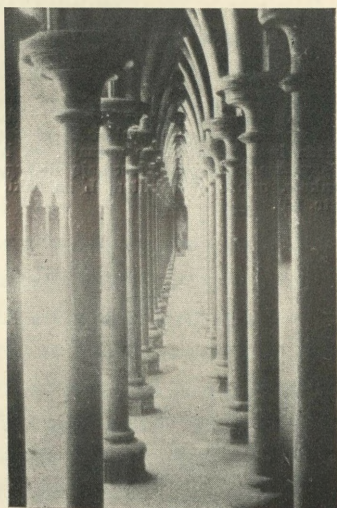
Dotychczas znaleźliśmy więc dwie cechy charakterystyczne rozchodzenia się fal na wodzie, odpowiadające dobrze nam znanym własnościom światła: fale te mogą przenikać się nawzajem, bez przeszkadzania sobie, oraz ulegają odbiciu od powierzchni, na które padają, zupełnie tak, jak to się dzieje ze światłem. Przyjmijmy zatem hipotezę, że światło jest ruchem falowym. Dobrze, ale *w czym?* Otóż musimy przyznać, że nie znamy żadnego ośrodka, w którym miałyby rozchodzić się te fale. Nie jest nim powietrze, gdyż światło słoneczne przebiega przestrzeń, dzielącą słońce od ziemi, gdzie powietrza niema zupełnie. Jednakże uprzednia nieświadomość nasza istnienia takiego ośrodka nie zabrania nam przypuścić, że istnieje on w rzeczywistości; w każdym razie przypuszczenie to okazuje się korzystne dla naszych obecnych celów.

Nasuwa się tu dalsze pytanie: czy fale te są przenoszone zawsze przez *ten sam* ośrodek, czy też np. przez powietrze, gdy rozchodzą się w powietrzu, przez

TABLICA II

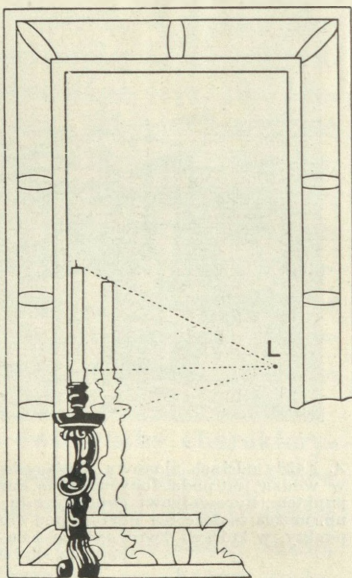
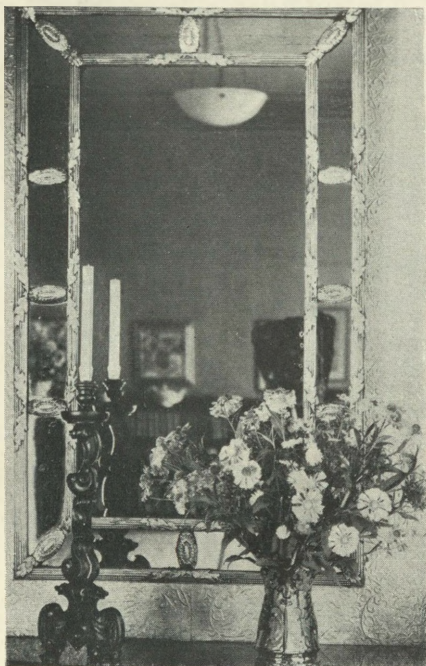


A. Każdy odcinek pionowy, łączący dowolny punkt na tym widoczku z jego odbiciem w wodzie, jest podzielony na dwie równe części przez powierzchnię wody pod danym punktem. Rysownikowi chodziło o to, by ułatwić wyznaczenie poziomu wody. Tak np. można znaleźć ten poziom pod drogą za kościołem, przedłużwszy linię, łączącą punkty, w których zwrócona ku nam strona arkady mostowej dotyka powierzchni wody na obu brzegach rzeki (str. 25).



B. Widok stereoskopowy krużganku w St. Michel. Dwie te fotografie zostały wykonane z dwóch nieco różnych stanowisk. (str. 33).

TABLICA III



Odbicie w zwierciadle płaskim. Zamglony obraz aparatu fotograficznego widać z prawej strony tuż ponad kwiatami. Prosta, łącząca soczewkę z jej obrazem, jest prostopadła do zwierciadła, podobnie, jak i każda inna prosta tego rodzaju, np. łącząca górny koniec świecy z jego obrazem. Wszystkie te proste przecinają się, zgodnie z prawami perspektywy, w jednym punkcie, oznaczonym literą L na szkicu bocznym (p. str. 25).

szkło, gdy biegną w szkło, wreszcie przez coś nieznane-
go na ziemi, gdy przebiegają pozorną pustkę przestrze-
ni międzygwiazdowych? Otóż otrzymamy trafny obraz
tego, co zachodzi we wszystkich tych przypadkach,
gdy przypuścimy, iż ośrodek, przenoszący fale świetl-
ne, wypełnia *całą* przestrzeń, — łącznie z temi
miejscami, gdzie znajduje się szkło, powietrze, czy
coś w tym rodzaju, — *całą* przestrzeń, niezależnie
od tego, czy są tam ciała materialne, czy nie. Mu-
simy sobie wyobrazić, że wszystkie rzeczy widzial-
ne i dotykalne są pogrążone w jakimś wszechogarnia-
jącym oceanie, który nazywamy *eterem*. Gdy światło
biegnie w przestrzeni, zajętej przez materję, fale jego
są przenoszone przez eter; mimo to, materja wywiera
na nie pewien wpływ, może np. zmniejszyć prędkość
ich rozchodzenia się, lub nawet zatrzymać je całkowi-
cie. Sprawami temi zajmijmy się wkrótce bardziej
szczegółowo.

Czy jednak szczególny ten środek istnieje w rze-
czywistości? Pytanie to narzuca się nam odrazu. A jed-
nak, gdy zastanawiamy się nad tem, jak należałoby na
nie odpowiedzieć, zaczynamy wątpić, czy posiada ono
jakieś znaczenie realne, czy jest we właściwy sposób
sformułowane? Usiłując uprzytomnić sobie, co wła-
ściwie znaczy wyrażenie „istnieje rzeczywiście“, żywo
odczuwamy, na jak niebezpiecznym i zdradliwym znaj-
dujemy się gruncie. — Na szczęście, nie mamy po-
trzeby — a nawet nie powinniśmy — trudzić się nad
rozwiązaniem tego zagadnienia, wskutek tego bowiem
zбочylibyśmy od swego przedmiotu: zebrania nă-
szych spostrzeżeń, dotyczących światła i ujawnienia za-
chodzących pomiędzy nimi związków. Stwierdzamy

tu, że wiele spośród tych spostrzeżeń przypomina zachowanie się fal, rozchodzących się w jakimś ośrodku, — przyjmujemy więc ten dogodny sposób rozważania. Być może, iż nie wszystkie zjawiska świetlne dają się przedstawić w ten sposób; istotnie, przekonujemy się, że istnieją takie zjawiska, które nie mieszczą się w schemacie falowym. Obecnie jednak nie ma to dla nas znaczenia. Z chwilą, gdy stwierdzimy, że pierwotne nasze pojęcia są niewystarczające, możemy je zmienić, częściowo lub całkowicie; tymczasem jednak są one niezmiernie użyteczne i dogodne do opisu zjawisk.

Rozszerzanie się boczne promieni świetlnych

Nasuwa się tu zarzut następujący: jeśli promień świetlny, biegnący np. przez pokój, składa się z długiego ciągu fal, rozchodzących się w eterze, to promień ten powinien ulegać stopniowemu „rozpraszaniu“ na boki: „brzeg“ promienia nie powinien być tak ostry, jak to w rzeczywistości widzimy. Zarzut ten jest zupełnie naturalny, i, rzeczywiście, rozszerzanie się promienia istnieje, jest ono wszakże tak nieznaczne, iż w przytoczonym przypadku nie daje się zaobserwować. Nie zawsze jednak sprawa przedstawia się w ten sposób: w pewnych okolicznościach rozszerzanie się wiązki staje się rzeczą istotną i stanowi przyczynę niektórych najbardziej uderzających, a nawet najpiękniejszych, zjawisk optycznych w przyrodzie. O wielkości owego „rozszerzania się“ promienia decyduje stosunek pomiędzy długością fali, a szerokością wiązki. Długość fali światła widzialnego wynosi około $1/20000$ cen-

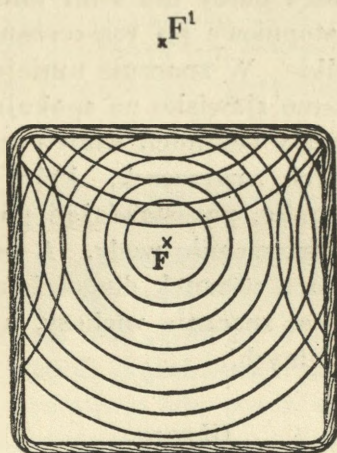
tymetra, co jest bardzo mało w porównaniu z szerokością zwykle obserwowanych wiązek świetlnych; gdyby jednak szerokość ta wynosiła zaledwie mały ułamek centymetra, tendencja ruchu falowego do rozprzestrzeniania się na boki zaznaczyłaby się wyraźnie, jak to zobaczymy w dalszym ciągu. Przypuśćmy, że lokalny sztorm podnosi fale w pewnej części oceanu i pędzi je przed siebie. Jeśli droga burzy ma setki kilometrów szerokości, wówczas stopniowe jej rozszerzanie się jest stosunkowo niewielkie. W znacznie mniejszej skali można dostrzec to samo zjawisko na spokojnej powierzchni stawu, gdy nagły podmuch wiatru wzbudzi na wodzie ciąg drobnych zmarszczek, które rozchodzą się w pewnym kierunku, pozostawiając po obu stronach niezakłóconą powierzchnię wody. A przecież nawet w tych przypadkach stosunek długości fali do szerokości *układu* fal jest znacznie większy, niż w przypadku promieni świetlnych.

Obrazy

Przejdziemy teraz do rozpatrzenia innej sprawy, którą można również zilustrować przy pomocy basenu falowego. Dotknijmy palcem powierzchni wody: z miejsca tego rozbiegają się fale koliste, w sposób dobrze nam znany. Dochodząc do ściany basenu, odbijają się od niej, przyczem łatwo stwierdzić, że zachowują postać kolistą, lecz środek nowego układu kół leży poza obrębem basenu. Jeśli wyobrazimy sobie odcinek prostej, łączący ów środek z punktem, gdzie dotknęliśmy wody palcem, to przekonamy się, że

ściana basenu dzieli ten odcinek na dwie równe części i jest do niego prostopadła. Fale odbite zdają się wybiegać ze wspomnianego nowego środka (rys. 11).

Zupełnie podobnie, gdy kuliste fale świetlne, wychodzące z jakiegoś źródła, np. ze świecy, padają na płaską, wypolerowaną powierzchnię zwierciadła, to po od-



Rys. 11. Odbicie fal kolistych od ściany basenu.
Początkowo wychodzą one z F , po odbiciu zaś
zdają się wychodzić z F' .

biciu zdają się rozchodzić z odpowiednich punktów, położonych poza zwierciadłem. Skoro część tych fal odbitych wpadnie do naszego oka, wówczas odosimy wrażenie, iż pochodzą one w rzeczywistości od owego punktu poza zwierciadłem; ponieważ zaś światło to jest oczywiście takie samo, jak bezpośrednie światło świecy, i ponieważ każdy punkt świecy jest

w ten sposób reprezentowany, wydaje się nam, że tam za zwierciadłem znajduje się świeca. Powiadamy wówczas, że widzimy „obraz” świecy w zwierciadle, położony w takiej samej odległości poza niem, w jakiej przed zwierciadłem znajduje się sama świeca.

Owe fale odbite zdają się zawsze wychodzić z tego samego punktu, niezależnie od tego, gdzie się znajdujemy, są to bowiem fale kuliste (w basenie ruch odbywa się w jednej płaszczyźnie i fale mają postać okręgów kół) i biegną tak, jakgdyby obraz był ich źródłem. Gdy więc poruszamy głową przed zwierciadłem płaskim, lub gdy patrzymy na spokojną powierzchnię wody, przedmioty widziane w odbiciu zdają się zajmować te same położenia, niezależnie od naszych ruchów. Każdy punkt obrazu znajduje się w dokładnie takiej samej odległości poza powierzchnią odbijającą, lub jej przedłużeniem, w jakiej odpowiadający mu punkt przedmiotu znajduje się przed tą powierzchnią.

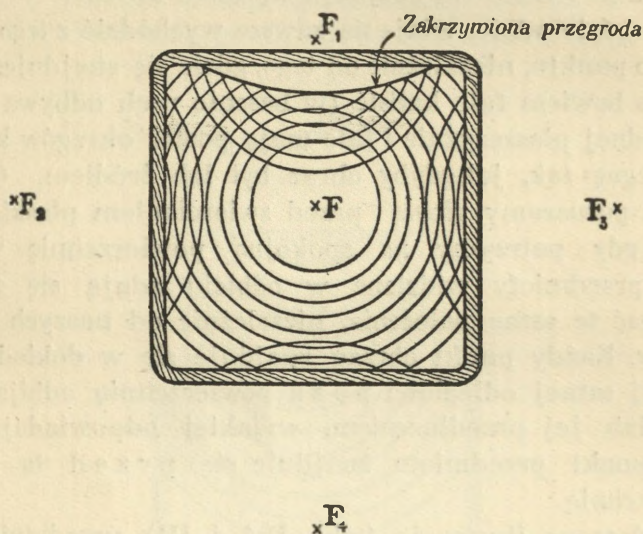
Załączone ilustracje (tabl. II A i III) uwydatniają to jeszcze wyraźniej.

Odbicie od powierzchni zakrzywionych

Wiadomo, że gdy odbicie zachodzi na powierzchniach krzywych, sprawa nie przedstawia się w sposób tak prosty. Patrząc na zwierciadło wypukłe, stosowane często w celach dekoracyjnych, widzimy przedmioty, znajdujące się w pokoju, jakby skupione razem, i to w zmniejszonej skali; są one również nieco zniekształcone i poruszają się zlekka przy ruchach głowy ob-

serwatora. W celu zilustrowania tego stanu rzeczy użyjemy znów basenu falowego.

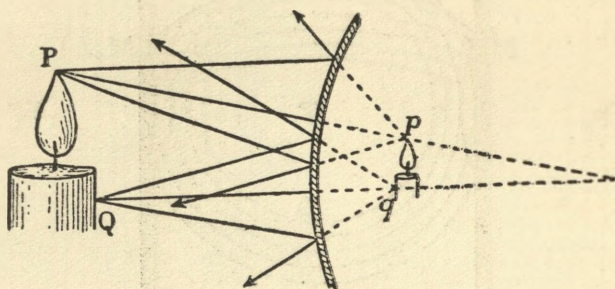
Umieszczamy w nim przegrodę zakrzywioną, która ma odbijać fale, i zwracamy ją wypukłością w stronę



Rys. 12. Odbicie fal wodnych od powierzchni wypukłej. Środek F_1 układu fal odbitych leży teraz znacznie bliżej tej powierzchni, niż pierwotne źródło F . Fale odbite są w tym przypadku tylko w przybliżeniu koliste, różnica ta jest jednak dostrzegalna dopiero przy rozpatrywaniu dużych łuków.

źródła fal. Widzimy teraz, że jeśli wytworzymy, jak poprzednio, ciąg fal kolistych, to fale odbite są zakrzywione *silniej* niż pierwotne; zdają się one i obecnie wybiegać z pewnego punktu za przegrodą, leży on jednak bliżej przegrody niż źródło fal (rys. 12). To

samo zjawisko musi zachodzić i w przypadku światła; odpowiedni schemat mamy na rys. 13. Doświadczenie to wskazuje, dlaczego obraz przedmiotu, widziany w zwierciadle wypukłym wydaje się o tyle mniejszy od samego przedmiotu: poszczególne punkty obrazu, odpowiadające rozmaitym punktom oryginału, są bardziej skupione. Cały pokój w minjaturze

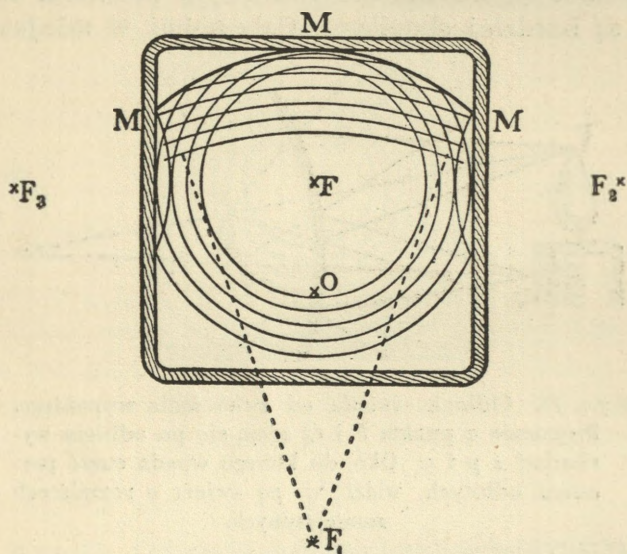


Rys. 13. Odbicie światła od zwierciadła wypukłego. Promienie z punktu P i Q zdają się po odbiciu wychodzić z p i q . Oko, do którego wpada część promieni odbitych, widzi w pq świecę o rozmiarach zmniejszonych.

możemy zobaczyć w zwierciadle wypukłym, zawieszonym na ścianie (tabl. IV A).

Gdy powierzchnia odbijająca jest wklęsła, skutki odbicia mają oczywiście charakter wprost przeciwny (rys. 14). Fale, rozchodzące się w postaci kół, odbijają się podobnie, jak poprzednio, w przybliżeniu jako okręgi kół; jaśli wszakże powierzchnia jest dostatecznie silnie zakrzywiona, nie zdają się one już wychodzić z punktu, położonego za zwierciadłem, lecz, przeciwnie skupiają się w pewnym punkcie przed niem. Jeże-

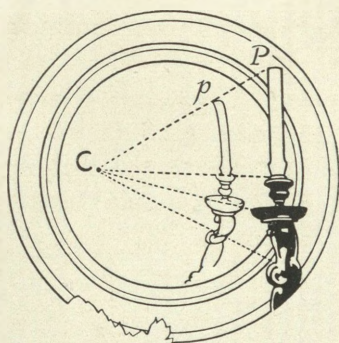
li źródło fal znajduje się w geometrycznym środku kołistego „reflektora“, wówczas fale powracają po odbiciu do tego punktu, przechodzą przezeń i biegną dalej jako ciąg rozbieżny. W miarę tego, jak źródło fal zbliża się do „reflektora“, punkt spotkania się fal, czy-



Rys. 14. Odbicie fal wodnych od powierzchni wklęsłej.

li „obraz“, oddala się odeń i *vice versa*. Podobnie jeżeli umieścimy punkt świecący w „środku krzywizny“ zwierciadła wklęsłego, t. j. w środku powierzchni kulistej, której częścią jest zwierciadło, to obraz punktu przypada również w tym środku. Zbliżając punkt świecący do zwierciadła, sprawiamy, że obraz oddala się odeń i *vice versa* (rys. 15); przesuając źródło światła np. w górę, obserwujemy ruch obra-

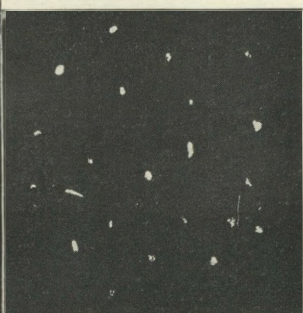
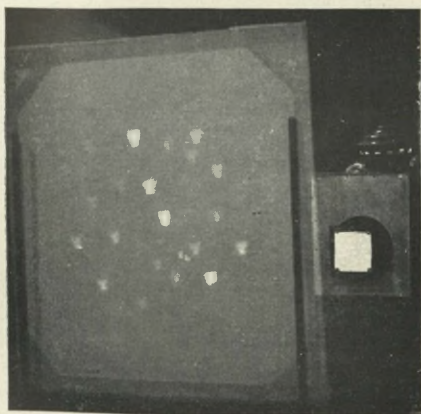
TABLICA IV



A. Odbicie w zwierciadle wypukłym. Obrazy przedmiotów w pokoju, w którym wykonano zdjęcie, są zmniejszone, i zniekształcone, lecz nieodwrócone. Obraz aparatu fotograficznego widać w zwierciadle po lewej stronie.

Zwierciadło jest częścią powierzchni kulistej o środku w *C*. Linja prosta, przechodząca przez środek obiektywu aparatu i obraz tego punktu, musi przechodzić również przez *C*, gdyż promień, wychodzący z soczewki w kierunku do *C* musi po odbiciu powrócić po tej samej drodze; *C* musi więc leżeć poza

środkiem obrazu soczewki na zdjęciu. Punkt ten zaznaczono osobno na bocznym szkicu odtwarzającym zasadnicze cechy charakterystyczne omawianej fotografii. Linje kropkowane pokazują, że proste, łączące każdy punkt na rysunku (np. *P*) z jego obrazem (*p*), przechodzą przez *C*, jak być powinno, ponieważ linja, łącząca dowolny punkt z jego obrazem, musi przechodzić przez środek obiektywu (str. 27).

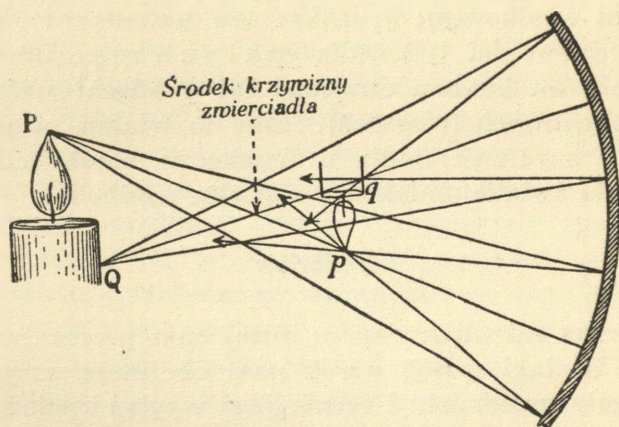


C

B. Doświadczenie ilustrujące zasadę działania kamery z małym otworem. Wyjaśnienie podano w tekście (str. 37).



zu w kierunku przeciwnym — ku dołowi i t. d. Dlatego to, jeżeli przed zwierciadłem wklęsłym ustawimy np. świecę, obraz górnej części płomienia utworzy się udołu, obraz dolnej zaś — ugóry, tak, iż świeca wydaje się odwrócona. Tak samo zresztą, prawa i lewa jej strona zamieniły się w obrazie miejscami.



Rys. 15. Odbicie światła od zwierciadła wklęsłego.

Jeżeli źródło naszych fal wodnych leży w połowie odległości pomiędzy powierzchnią zakrzywioną a jej środkiem krzywizny, to fale niemal całkowicie tracą po odbiciu swe zakrzywienie i biegną dalej po liniach w przybliżeniu prostych i równoległych, zachowując długo swą postać oraz natężenie. Gdy fale są rozbieżne, jakgdyby wychodziły z pewnego punktu poza zwierciadłem, natężenie ich słabnie w miarę rozszerzania się układu; jeśli zaś tworzą wiązkę zbieżną, wówczas przechodzą wkońcu przez jeden punkt, po

którego przekroczeniu znów są rozbieżne i dzięki temu słabną w dalszym ciągu. Chcąc rzucić promień świetlny na znaczną odległość, najlepiej urządzić się tak, by początkowo nie tworzył on ani wiązki rozbieżnej, ani zbieżnej. W przypadku zwierciadła o przekroju kolistym możemy to uskutecznić w przybliżeniu, umieściwszy źródło światła we wspomnianem położeniu środkowym; jednakże ten kształt zwierciadła jest odpowiedni tylko dla małych zwierciadeł, nie pozwala on bowiem otrzymać fal odbitych dokładnie prostoliniowych (płaskich). Aby to właśnie osiągnąć, należy użyć zwierciadła o przekroju parabolicznym, a źródło światła umieścić w ognisku paraboli.

Widzenie

A teraz rozpatrzmy nieco bliżej sam proces „widzenia“. W jaki sposób wzrok nasz obejmuje wszystkie szczegóły przedmiotu i ocenia jego wygląd i położenie?

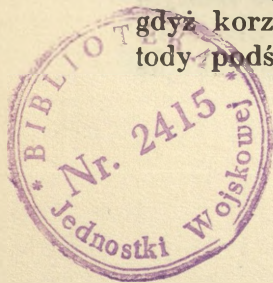
Zasadniczym faktem jest przytem rozpraszanie fal świetlnych, padających na jakąkolwiek substancję; jeśli potem promienie rozproszone dostaną się do naszych oczu, możemy sądzić o kierunku ostatniego odcinka ich drogi. Jest to jedna z danych, oznaczających dla nas „widzenie“. Ponadto, możemy do pewnego stopnia oszacować odległość przedmiotu, opierając tę ocenę na wielkości wysiłku, jaki musimy uczynić, aby widzieć przedmiot wyraźnie. Większość ludzi musi, jak powiadamy, „wysilać“ wzrok, jeżeli chodzi o zobaczenie czegoś bardzo bliskiego, i, przeciwnie, musi zwolnić mięśnie oczne, chcąc widzieć przedmioty odległe; później wyjaśnimy, dlaczego tak się dzieje. Nie

jest to jednak jedyny sposób oceny odległości — a nawet, sądzę, sposób to stosunkowo mało skuteczny. Istnieją wszakże dwa inne, z których korzystamy w szerokim zakresie.

Pierwszy z nich opiera się na ocenie położenia danego przedmiotu w stosunku do innych. Spoglądamy np. na jakiś niewielki przedmiot, powiedzmy, zegarek, leżący na stole odległym o parę metrów, i stwierdzamy, że umiemy ocenić z dużym stopniem dokładności położenie tego przedmiotu: potrafimy w przybliżeniu podać jego odległość od naszych oczu oraz wysokość nad podłogą. Na czym więc opieramy te oceny? Poczęści, na prawie nieświadomem „wymierzeniu“ położenia przedmiotu względem rzeczy otaczających oraz na „obliczeniach“ na tym „pomiarze“ opartych. Przedewszystkiem „przebiegamy wzrokiem“ po przedmiocie. Oczy nasze mogą poruszać się w ten sposób, że fale, rozpraszane przez każdy punkt przedmiotu, dają kolejno wyraźny obraz na najczulszem miejscu siatkówki; wrażenia, jakie otrzymujemy od każdego punktu przedmiotu zostają za pośrednictwem nerwów „przetelegrafowane“ do mózgu, gdzie są zbierane i oceniane. Długotrwała praktyka nauczyła nas interpretować te wrażenia jako pochodzące od rozpraszania światła przez zegarek. Być może, nie przyglądamy się nawet zbyt szczegółowo każdemu punktowi — istotnie, możemy przecież być za daleko, aby móc to uczynić; znamy jednak ogólny wygląd zegarka kieszonkowego, widzieliśmy może, skąd on się tam wziął i że go ktoś kładł na stole. Wszystkie fakty tego rodzaju łączą się w naszym umyśle nawet bez pośrednictwa świadomego myślenia. Osiągnąwszy to stadjum, podświadome rozumowanie

posuwa się dalej w taki mniej więcej sposób: od stołu dzieli nas tyle a tyle metrów podłogi; stół ma zwykłą wysokość, a zegarek leży na jego środku. Na podstawie podobnych spostrzeżeń i rozumowań wytwarzamy sobie pojęcie o położeniu zegarka. Oczywiście, korzystamy przytem z wieloletniej praktyki.

Nietrudno przekonać się, że owo „wymierzanie” i „ocenianie” odgrywa bardzo ważną rolę. Usuńmy możliwość oceny, opartej na ogólnym przeglądzie położenia, a stwierdzimy odrazu, iż o wiele trudniej jest wówczas orzec, gdzie znajduje się przedmiot. Wyobraźmy sobie czarną kulę, zawieszoną na cienkiej nici, widocznej może tuż w pobliżu kuli, lecz niedostrzegalnej wyżej; nie wiemy przytem, gdzie jest punkt zawieszenia kuli i jakie są jej rozmiary. Wskutek tego tracimy tę pomoc w ocenie położenia, jaką mieliśmy poprzednio, gdy znaleźmy, przynajmniej ogólnikowo, rodzaj i wielkość przedmiotu. Zasłońmy jedno oko, nie omawialiśmy bowiem dotychczas współdziałania obojga oczu, które również odgrywa ważną rolę. Spoglądając teraz na kulę, przekonujemy się, że nie jest bynajmniej rzeczą łatwą orzec, w jakiej odległości od nas ona się znajduje. Prawdopodobnie spróbowalibyśmy poruszać głowę na prawo i na lewo, aby wytworzyć sobie choć przybliżone pojęcie o odległości kuli od ściany i sufitu, służącego jej za tło; jeżelibyśmy jeszcze mogli odróżnić jakieś szczegóły na owem tle i dowiedzieć się, jaka jest jego odległość, to uzyskalibyśmy przez to samo pewne informacje o położeniu kuli. Postępowanie takie nie byłoby jednak „uczciwe”, gdyż korzystalibyśmy wówczas z nowej odmiany metody podświadomego „wymierzania” i „obliczania”.



Łatwo można znaleźć inne przykłady tych samych trudności, jakie napotykamy przy ocenie odległości gdy patrzymy jednym tylko okiem i nie możemy zastosować metody „oceny przez wymierzanie”. Leżąc np. pod drzewem i patrząc jednym okiem na liście nad głową, ale tak, abyśmy nie mogli dostrzec, w którym miejscu pnia wyrasta dana gałąź, przekonywamy się, jak trudno ocenić, w jakiej odległości pewna warstwa liści znajduje się za inną.

Widzenie dwójgiem oczu

Obecnie zajmimy się omówieniem widzenia dwuocznego. Znajdujemy w niem nader skuteczną metodę oceny odległości, opartą na zasadzie zupełnie różnej od tego wszystkiego, co rozważaliśmy dotychczas. Dwoje oczu nie widzi *dokładnie tego samego* widoku: mózg zaś umie oceniać — dzięki długiej praktyce — na podstawie tej różnicy względne odległości przedmiotów. Odstęp pomiędzy oczyma jest niewielki i obydwie obrazy różnią się od siebie bardzo nieznacznie, a mimo to — rzecz zdumiewająca — skutki tej różnicy są tak znaczne. Porównyując z sobą parę zdjęć stereoskopowych (np. tabl. II B), znajdziemy w nich wszędzie te nieznaczne różnice. Rysunek na tabl. II B przedstawia portyk kościoła na Mont St. Michel. Zwróćmy uwagę na położenie kolumn na drugim planie względem bliższych: na lewej fotografii są one przesunięte bardziej na lewo względem tych ostatnich, w porównaniu z tem, co widzimy na drugim zdjęciu. Obie te fotografie zostały wykonane z dwóch różnych

stanowisk, zupełnie tak, jakbyśmy spoglądali na portyk dwojgiem oczu.

Stereoskop jest to przyrząd optyczny, przy pomocy którego każde oko może oglądać osobny obraz, dzięki czemu powstaje złudzenie przestrzeni, bryłowatości. Powodzenie tego pomysłu świadczy wyraźnie o tem, jak wielką rolę odgrywa współdziałanie obojga oczu w ocenie odległości i wzajemnych położeń przedmiotów. Współdziałanie to jest ograniczone do nader niewielkiej liczby istot: korzysta zeń człowiek oraz nieliczne inne kręgowce. Większość zwierząt nie może posługiwać się widzeniem dwuocznem, o czym łatwo się przekonać, wzięwszy pod uwagę sposób osadzenia ich oczu.

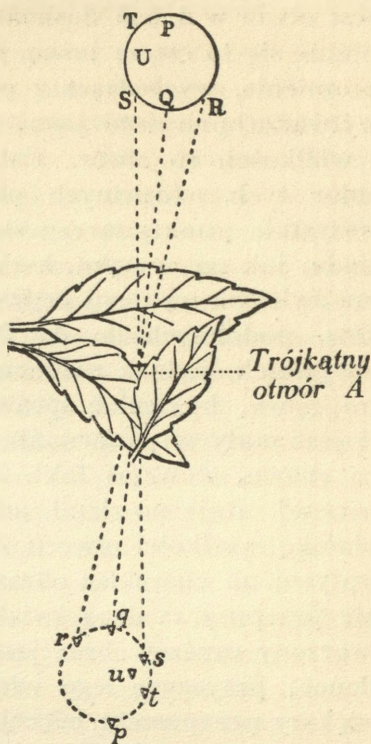
Mały otworek jako przyrząd optyczny

Omawialiśmy wyżej zasady, rządzące odbiciem i rozpraszaniem światła przez powierzchnie, na które padają fale świetlne. Rozpatrzmy jeszcze parę dalszych przykładów zastosowania tych samych zasad.

Nietrudno spostrzec, że jasne plamki, które tworzą na ziemi pod drzewami promienie słoneczne, przedzierające się przez gęstwinę liści, nie okazują zarysów kątowych, ostro załamanych, lecz zaokrąglone: cień pod drzewem jest jakby pocętkowany okrągłymi plamkami. Same otwory, przez które promienie przenikają, są ograniczone brzegami liści i mają kształty o ostrych załamaniach, nie mogą więc być czynnikiem rozstrzygającym o postaci plam świetlnych u podnóża drzewa. W istocie, o tej ostatniej decyduje kształt

tarczy słonecznej, jak to zobaczymy za chwilę.

Niech górne koło na rys. 16 przedstawia słońce, A zaś niech będzie małym otworem w nieprzezroczystej zasłonie dowolnego rodzaju, np. utworzonej z liści drzewa. Promienie, wychodzące z pewnego punktu S na brzegu tarczy słonecznej, padają poprzez otwór A na ziemię w punkcie s, gdzie ulegają rozproszeniu. Część ich dostaje się do oka, a ponieważ są one takie same, jak bezpośrednie promienie słoneczne, więc odnosimy wrażenie, iż w s znajduje się coś, co wysyła promienie, tak jak słońce. Dalej, promienie, pochodzące z punktu Q, tworzą obraz w q, i podobnie dla każdego punktu tarczy słonecznej; w ten sposób powstaje na ziemi obraz całego słońca. Im mniejszy



Rys. 16. Koło w górnej części rysunku przedstawia słońce, w dolnej — jego obraz u podnóża drzewa, powstający wskutek przejścia promieni słonecznych przez trójkątny otwór pomiędzy liśćmi. Każdy punkt tarczy słonecznej wytwarza na ziemi swą własną jasną plamkę trójkątną; koło dolne wraz ze swym półcieniem "jest połączeniem wszystkich tych plamek.

jest otwór w A, tem doskonalsze jest to odwzorowanie. Stanie się to rzeczą jasną, jeśli sobie uprzytomnimy, że promienie, wychodzące z pojedynczego punktu, np. S, wytwarzają na ziemi jasną plamkę tego samego kształtu i wielkości, co otwór. Cały obraz można uważać za zbiór tych oddzielnych plamek, utworzonych przez wszystkie punkty tarczy słonecznej. Niech otwór posiada, jak na rysunku, kształt trójkątny; wówczas plama świetlna na ziemi będzie zbiorem jasnych trójkątów, podobnych do A. Niepodobna narysować ich wszystkich, jednak zaznaczono na rysunku kilka tych trójkątów, by lepiej sprawę wyjaśnić. Jeżeli otwór A jest mały w porównaniu z rozmiarami całego obrazu słońca, wówczas fakt, że każdy punkt tarczy słonecznej daje na ziemi nie jeden punkt jasny, lecz plamkę wielkości otworu A, nie ma dostrzegalnego wpływu na charakter obrazu. Jakkolwiek mały otwór nie przepuszcza dużo światła, można dostrzec, że wytworzony przezeń obraz jest jasnym krążkiem, tak jak słońce; przyczynę tego właśnie wyjaśniliśmy. Otwór większy przepuszcza więcej światła, lecz im znaczniejsze są jego rozmiary, tem bardziej jasna plama na ziemi traci okrągły zarys tarczy słonecznej i zbliża się kształtem do postaci otworu; łatwo to sobie uprzytomnić przy pomocy rysunku 16. Okrągłe są tylko najmniej jasne plamki; fotografia na tabl. V A, przedstawiająca to zjawisko, została wykonana w ogrodzie, w dzień słoneczny. Podczas zaćmienia słońca owe jasne plamki przybierają postać sierpów.

Plamki te nie mają, oczywiście, ostrych brzegów, gdyż nakładające się obrazy otworka nie zlewają się ze sobą tak samo dokładnie na brzegach, jak w środku. Ma-

my tu zjawisko t. zw. *pólcienia* — stopniowego przejścia od zupełnego cienia do jasnych części obrazu.

Nietrudno zademonstrować powstawanie obrazów przy przejściu promieni przez małe otworki. W pobliżu nieosłoniętego łuku elektrycznego umieszczamy okopconą płytkę szklaną. Zróbmy przy pomocy szpilki małeńki otworek w warstwie sadzy: na ekranie, ustawionym w odległości około metra, pojawia się jasna plama, w której łatwo można rozpoznać obraz płonącego łuku. Jeśli zrobimy kilka takich otworków w zasłonie, wówczas każdy z nich daje identyczny obraz na ekranie. Jedynie w przypadku dość dużego otworu kształt jego ma pewien wpływ na postać obrazu.

Urządzenie opisanego doświadczenia przedstawia rysunek na tabl. IV B. Lampa łukowa znajduje się w głębi po prawej stronie; mały kwadracik jasny jest to okopcone szkło, ustawione w drodze wiązki światła z lampy. Zasłonka ta wydaje się jasna, choć pokrywa ją warstwa sadzy, a to spowodu nader silnego oświetlenia z drugiej strony. Otworki w warstwie sadzy są tak małe, że trudno je wyraźnie dostrzec na fotografii, dlatego też na rys. C podano wygląd owego szkiełka w powiększeniu. Ekran, na którym powstają obrazy, oglądamy styłu; widzimy, że położenie ich odpowiada rozmieszczeniu otworków w zasłonie, a kształt — jakby rozdwojony — odzwierciadla dwa świeące końce węgli. Wszystkie te obrazy są przytem podobne do siebie, jakkolwiek same otworki różnią się bardzo pod względem kształtu.

Kamera fotograficzna, oparta na zasadzie małego otworka, daje dobre obrazy, lecz wymaga bardzo długich ekspozycji.

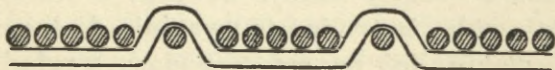
Niezwykłą nieco ilustrację omawianego zjawiska przedstawia rys. C na tabl. V.

Gdy przedmiot jakiś umieścimy tuż przed ekranem, w niezbyt małej odległości od nieosłoniętej lampy łukowej, wówczas półcień jest niemal niewidoczny i kontury cienia występują nader ostro.

Weźmy kawałek kartonu, wycięty tak, aby na ekranie otrzymać zarys twarzy (p. tabl. V B). Jeżeli użyjemy jako źródła światła lampy łukowej, „twarz“ ta ma wygląd suchy i kościsty; gdy jednak zamiast łuku weźmiemy świecę, pojawi się półcień, łagodzący ostre kontury, i obraz przybierze wygląd bardziej naturalny.

Polysk

Innym ciekawym przykładem zjawiska odbicia światła jest *polysk*, jaki niektóre materiały tkane posiadają z natury, lub jaki sztucznie można im nadać. Nie jest rzeczą łatwą orzec ściśle, co mamy na myśli, mówiąc



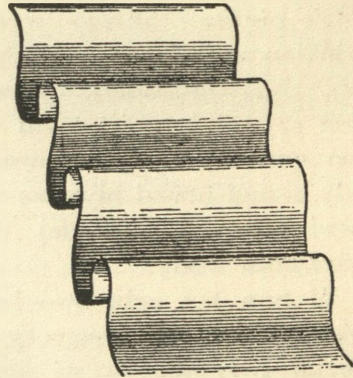
Rys. 17. Sposób tkania, nadający polysk materiałowi. Liczne włókna przebiegają równoległe do siebie nadając powierzchni kształt sfalowany.

o „polysku“, istotne jednak wydaje się to, że światło ma ulegać odbiciu wtedy, gdy się tego nie spodziewamy. Przedmiot o silnym polysku — to nie tylko przedmiot dobrze odbijający; inaczej zwyczajne lustro byłoby najbardziej „polyskliwym“ przedmiotem, a przecież zgodzimy się chyba wszyscy na to, że *polysku* nie ma ono

zupełnie. Ten pogląd na istotę polysku możemy poddać próbie prostego doświadczenia.

Światło latarni projekcyjnej pada pod pewnym kątem na kawałek atlasu, najlepiej kolorowego. Źródło światła znajduje się poza nami, tak, iż promienie, odbite od zwierciadła, położonego w tem samym miejscu co atlas, wogóle nie dostałyby się do naszego oka. Jeśli teraz będziemy obracali ten kawałek atlasu w jego własnej płaszczyźnie, to spostrzemy, iż przez chwilę polyskuje on jasno, i to dwukrotnie podczas jednego całkowitego obrotu. Aby zjawisko było łatwiej widoczne, zgasiłmy wszystkie inne światła w sali. Skąd więc biorą się owe błyski? (p. tabl. VI A).

Oglądając ten materiał przez szkło powiększające, widzimy nici osnowy, biegnące równolegle do siebie; materiał jest tkany w ten sposób, że po jednej — „błyszczącej” — stronie nici osnowy przebiegają ponad kilkoma włóknami wątku, zanim się schowają pod nie, jak to wyjaśnia rys. 17. Po stronie „błyszczącej” zatem duża część powierzchni składa się z włókien, biegnących prostoliniowo i równolegle do siebie; otóż, gdy w naszym doświadczeniu materiał silnie odbija światło, włókna te są prostopadłe do linii, dzielącej na połowę kąt pomiędzy prostem, łączą-



Rys. 18. Rysunek wskazuje, w jaki sposób zmarszczony materiał może odbijać światło w wielu kierunkach.

cemi materiały ze źródłem światła oraz z okiem (rys. 18). Powierzchnia materiału jest bowiem pokryta drobnymi brózdami, światło zaś odbija się od brzegów tych brózek. Oczywiście, każde włókno musi samo mieć powierzchnię dobrze odbijającą; poza tym, efekt omawiany jest wynikiem ułożenia ich równolegle do siebie. Na odwrotnej stronie materiału, gdzie niema takiego wyróżnionego uporządkowania włókien w jednym kierunku, połysk jest znacznie słabszy. Najwidoczniej, prawidłowe ułożenie „brózek“ jest czynnikiem istotnym w naszym zjawisku. To samo możemy zaobserwować na świeżo zoranym polu, gdy brzegi brózd błyszczą się jeszcze od pługa, oraz na oświetlonej i pokrytej drobnymi zmarszczkami powierzchni wody.

W tym też celu owo bródkowanie bywa niekiedy wzmacniane przy pomocy odpowiednich maszyn. Materiał przepuszcza się pomiędzy rozgrzanymi wałkami, w których wycięte są drobniutkie równoległe rowki. Metoda ta znana jest pod nazwą „schreinerowania“, pochodzącą od nazwiska wynalazcy.

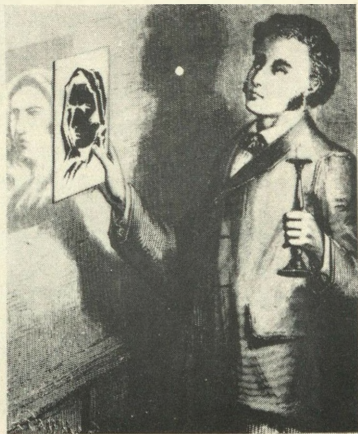
Zwierciadło magiczne

Jako ilustrację zjawisk odbicia światła rozpatrzmy jeszcze osobliwe własności t. zw. „luster magicznych“ japońskich. Strona przednia takiego lustra jest niemal dokładnie płaska i nie zdaje się posiadać żadnych niezwykłych właściwości. Na drugiej stronie znajduje się silnie wgłębiony rysunek, odpowiadający ukształtowaniu dna formy, w której zwierciadło zostało odlane (p. tabl. VI B). Jeśli teraz na lustro takie rzu-

TABLICA V



A. Zdjęcie, wykonane w dzień słoneczny w ogrodzie, pokazuje cień gałęzi, pokrytych bujnym listowiem, rzucony na pionową ścianę. Cień ręki pozwala zorientować się, w jakim kierunku padają promienie. Liczne okrągłe plamki są to obrazy słońca, powstające przy przechodzeniu promieni słonecznych przez małe otworki między liśćmi (str. 36).

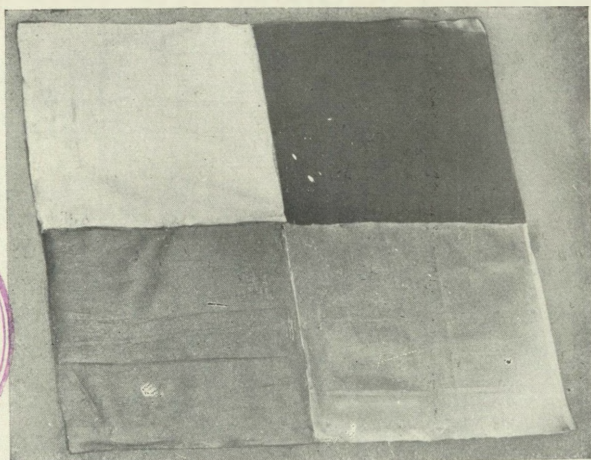


B. Rysunek ten zaczerpnięto z Guillemina *Forces of Nature* („*Sily Przyrody*”). Na cieniu widać, jak „efekt półcieniowy” zaciera zbyt ostre zarysy sylwetki, wyciętej w kartce papieru (str. 38).

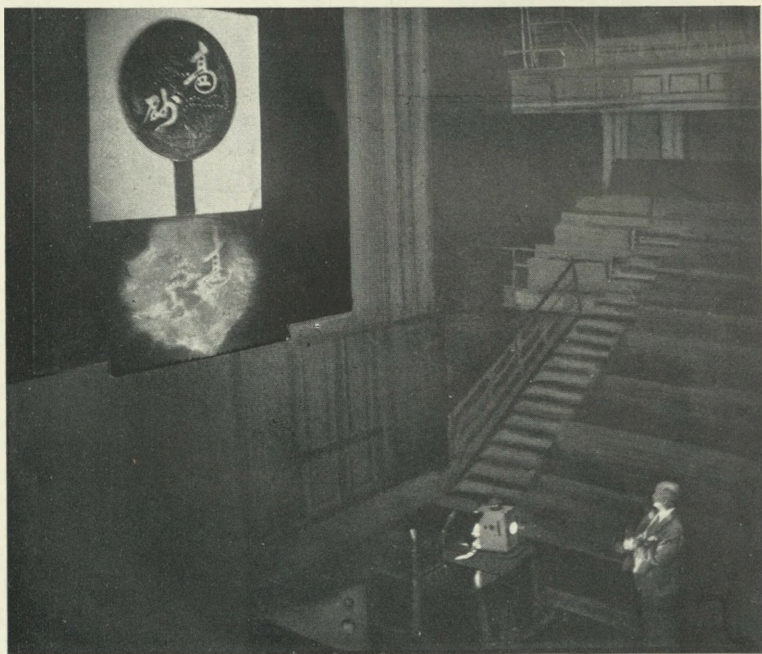


C. Rysunek z Guillemina *Forces of Nature* („*Sily Przyrody*”), ilustrujący działanie „kamery z małym otworkiem” („*camera obscura*”) (str. 38).

TABLICA VI



A. Cztery kawałki satyny, wycięte z tej samej sztuki, ułożono na desce w ten sposób, że włókna ich przypadają w różnych kierunkach. Źródło światła znajduje się poza obserwatorem, spoglądającym na deskę. Kawałki satyny okazują duże różnice jasności (str. 39).



B. W dolnej części ekranu widzimy odbicie od japońskiego „zwierciadła magicznego”; w górnej części rzucono na ekran przy pomocy latarni projekcyjnej, znajdującej się w głębi sali, fotografię odwrotnej strony zwierciadła. Podobieństwo obu obrazów jest zupełnie wyraźne. Fotografia ta jest właściwie zdjęciem kombinowanym; chodziło o to, aby uwidocznić zarówno sposób wykonania doświadczenia, jak i jego wynik, wskutek czego wzajemny stosunek światła i cieni jest zmieniony. Tak np. sala wydaje się jaśniejszą niż ekran, co oczywiście nie jest zgodne z rzeczywistością (str. 40).

cimy wiązkę światła, np. z latarni projekcyjnej, tak, aby światło odbite padło na ekran, wówczas pojawi się na nim rysunek, znajdujący się na tylnej stronie lustra. Czyni to wrażenie, jakgdyby rysunek ten „prze-glądał” na drugą stronę, co jest oczywiście niemożliwe, gdyż zwierciadło jest dość grubym krążkiem metalowym. Ciekawe to zjawisko wydawało się tym, którzy je widzieli, czemś magicznem; okazuje się jednak że wyjaśnienie jest nader proste. Podał je profesor Ayrton w Royal Institution przed pięćdziesięciu przeszło laty. Wyjaśnienie to opiera się na tych zasadach, które już wyżej rozpatrywaliśmy i jest, w istocie, ilustracją praw odbicia światła od powierzchni zakrzywionych.

Profesor Ayrton i przyjaciel jego, profesor Perry, zajmowali niegdyś wysokie stanowiska w szkolnictwie japońskim. Lustro, podobne do opisanego zwierciadła magicznego, są nader pospolite w Japonji, należą bowiem do przyborów toaletowych każdej niemal damy. Ayrtona i Perry’ego zainteresował fakt, że pewna niewielka część tych zwierciadeł okazywała własności „magiczne”. Własności te są same przez się dostatecznie dziwne, lecz jeszcze osobliwszą rzeczą było to, iż nikt nie wiedział, czemu posiadały je zaledwie jedno lub dwa zwierciadła na sto. Badacze ci czynili liczne poszukiwania; dowiedzieli się, że w Chinach poświęcano wiele uwagi omawianemu zjawisku, przyczem wysuwano różne dziwaczne próby wyjaśnienia, lecz żadna z nich nie zadowalała Ayrtona i Perry’ego. Wkońcu, dzięki przypadkowemu spostrzeżeniu, sami oni znaleźli rozwiązanie. Mianowicie, jedno ze zwierciadeł miało na tylnej stronie głęboką rysę od gwoźdźcia: i oto rysa ta wystąpiła w obrazie, rzuconym przez wy-

polerowaną stronę zwierciadła. Fakt ten Ayrton i Perry powiązali z okolicznościami, towarzyszącymi fabrykacji takich zwierciadeł.

Po odlaniu zwierciadła wraz z rzeźbą na odwrotnej stronie, rzemieślnik japoński kładzie je na desce i zaczyna wygładzać nierówności powierzchni przy pomocy odpowiedniej skrobaczki. Na rys. 19 widzimy go przy tej pracy. Zwierciadło, naciskane przez robotnika, ugina się zlekka. „Raz przy razie” posuwa on skrobaczkę w tym samym kierunku, dopóki nie pokryje całej tarczy zwierciadła szeregiem równoległych



Rys. 19. Rzemieślnik japoński poleruje zwierciadło „magiczne”. Ilustracja w japońskim druku ze zbiorów British Museum. (Z dzieła Silvanusa Thompsona *Światło widzialne i niewidzialne*).

pociągnięć; cieńsze części płyty uginają się i poddają narzędziu bardziej, niż grubsze, leżące nad wypukłościami odlewu. Dzięki temu te części cieńsze w nieco mniejszym stopniu podlegają działaniu skrobaczki, i wznosząc się spowrotem po usunięciu nacisku, wy-

stają odrobinę ponad przeciętną powierzchnią zwierciadła. Po ukończeniu serji „pociągnąć“ równoległych w jednym kierunku, rzemieślnik rozpoczyna serję następną pod kątem prostym do poprzedniej, a potem wygładza zwierciadło w rozmaitych innych kierunkach. Wkońcu zatem cała powierzchnia zwierciadła jest pokryta niewielkimi wyniosłościami, które są odwzorowaniem płaskorzeźby na odwrotnej stronie płytki; staje się ono niejako zbiorem szeregu zwierciadeł zlekka wypukłych. Fale świetlne, padające na powierzchnię wypolerowaną, nie odbijają się więc jednakowo od wszystkich punktów tejże; w jednym miejscu powstaje wiązka zbieżna, w innem — rozbieżna, a rodzaj tego zakłócenia jest w bezpośrednim związku z rzeźbą na tylnej stronie. Wydaje się rzeczą dziwną, iż tak znikoma nieregularność powierzchni może być przyczyną zjawiska tak uderzającego. Porównajmy jednak to, co widzimy tutaj, z innemi spostrzeżeniami, przytoczonymi poprzednio. Przy doświadczeniach z „basenem falowym“ cienie, rzucane na ekran, są bardzo wyraźne; powstają one wskutek odchyłania światła w bok przez drobne fale na powierzchni wody, same te fale jednak nie są wcale łatwe do zaobserwowania, gdy spoglądamy wprost na powierzchnię. Widzieliśmy zapewne nieraz owe tak wyraźne „fale“, poruszające się na suficie, gdy za oknem lekki powiew wiatru muska spokojną powierzchnię wody, odbijającą promienie słoneczne.

ROZDZIAŁ II

OKO I PROCES WIDZENIA

Dlaczego na siatkówce nie tworzy się chaos?

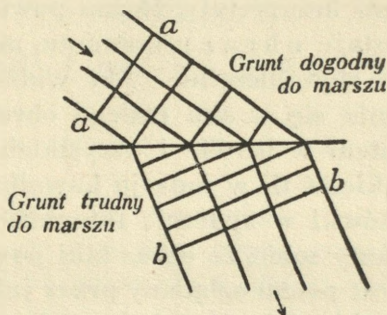
WIDZIELIŚMY już poprzednio, że światło można uważać za ruch fal, które, rozchodząc się ze źródła, ulegają rozpraszaniu i odbiciu, oraz — być może — przekształceniom, dzięki oddziaływaniu różnych przedmiotów, kolejno napotykanym po drodze. Wpadając do oka, światło przynosi wieści o źródle, skąd wyszło, oraz o przygodach, jakich po drodze doznało. W szczególności mówi nam ono o ostatniem, przed wejściem do oka, spotkaniu z przedmiotem materialnym i umożliwia posiadaczowi oka „widzenie” tego przedmiotu.

Gdy do oka wpada chaotyczna mieszanina promieniowań, pochodzących z wielu różnych źródeł i rozproszonych przez liczne przedmioty, trzeba ją najpierw jakoś uporządkować, aby można było coś z tego zrozumieć. Na dnie oka znajduje się powierzchnia czuła na światło — *siatkówka*. Jeśliby każdy układ fal, wchodzący do oka, rozpościł się po całej siatkówce, rozwikłanie tego chaosu byłoby napewno bardzo trudne. Istnieje jednak urządzenie, które zbiera

fale, przychodzące od każdego punktu przedmiotu i skupia je w odpowiednim punkcie na siatkówce. W ten sposób więc wszystkie szczegóły oglądanego widoku są „odwzorowane“ na siatkówce w rzeczywistych swych położeniach wzajemnych oraz zgodnie z indywidualnymi cechami każdego szczegółu. Skomplikowana sieć nerwów przesyła potem wieść o całości do mózgu, który ją dopiero interpretuje. Można powiedzieć, że na siatkówce powstaje o b r a z przedmiotu, nie należy jednak brać tego zbyt literalnie. Akt widzenia nie wymaga utworzenia się w oku małego obrazka, zgodnego z przedmiotem w barwie i wszystkich szczegółach, obrazka na jakimś tle w rodzaju kawałka białego papieru lub matówki w aparacie fotograficznym. Czasami wyobrażamy sobie, że obraz taki powstaje w rzeczywistości i jest potem oglądany przez jakiś organ postrzegający — tak, jak się ogląda malowidło, wiszące na ścianie.

Uporządkowanie chaotycznej mieszaniny promieni, wpadających do oka, jest oparte na wykorzystaniu faktu, że *światło rozchodzi się w różnych ośrodkach z różną prędkością*. Tak np. w szkle światło biegnie z prędkością, wynoszącą około $\frac{2}{3}$ jego prędkości w powietrzu; w wodzie ułamek ten wynosi około $\frac{3}{4}$. Otóż jeśli fala wchodzi do ośrodka, w którym bieg jej jest powolniejszy, i przytem pada ukośnie na powierzchnię, dzielącą oba ośrodki, wówczas zmienia się kierunek jej biegu, gdyż różne części fali poczynają zwalniać swój ruch nie w jednej i tej samej chwili. Znany przykład tej zmiany kierunku można widzieć na wybrzeżu morskiem, gdzie fale, kończące swój bieg na plaży, zawsze łamią się w linje równoległe do brzegu,

niezależnie od kierunku, jaki posiadały na pełnem morzu: prędkość fal maleje bowiem w miarę wkraczania na corazto płytszą wodę, dzięki czemu najbardziej ku przodowi wysunięte części ciągu fal przyzostają się w tyle, dopóki nie nastąpi zupełne wyrównanie frontu równoległe do wybrzeża.



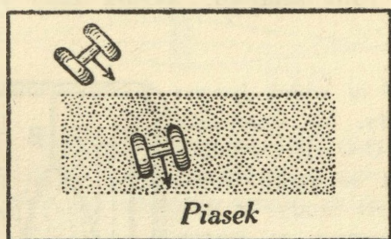
Rys. 20. Linja aa i równoległe do niej przedstawiają szeregi żołnierzy, maszerujących po gruncie równym. Przy wkroczeniu na grunt trudny do marszu szeregi skracają nieco i stają się równoległe do bb, jednocześnie odstępy pomiędzy nimi maleją.

Podobnie żołnierze w marszu łatwo mogą zboczyć z właściwego kierunku, gdy napotkają ciągnący się ukośnie do linji szeregów szmat gruntu trudnego do marszu (rys. 20).

Tę ostatnią sprawę zilustrujemy przy pomocy doświadczenia. Dwa kółka, obracające się swobodnie na wspólnej osi, potoczmy po stole tak, iż natrafią ukośnie na miejsce posypane piaskiem, gdzie ruch jest utrudniony. To kółko, które pierwsze wejdzie na piasek, jest ha-

mowane, wskutek czego kierunek ruchu zmienia się na niemal prostopadły do linii granicznej (rys. 21).

Nietrudno teraz uprzytomnić sobie, w jaki sposób można zmusić posuwający się naprzód ciąg fal do sku-



Rys. 21. Obszar kropkowany na rysunku przedstawia piasek rozsypany na stole. Para swobodnie osadzonych kólek toczy się ku powierzchni posypanej piaskiem i zbacza z pierwotnego kierunku po przekroczeniu granicy.

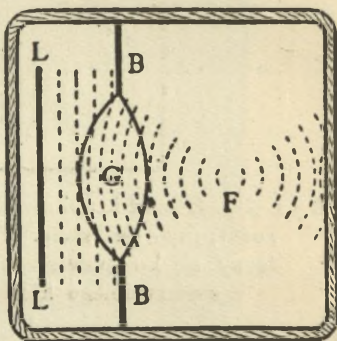
pienia się w jednym punkcie. W tym celu trzeba tylko sprawić, aby środek ciągu musiał przebiec obszar, w którym ruch jest zwolniony w porównaniu z prędkością swobodnie rozchodzących się bocznych części układu fal. Jeżeli kontury tego obszaru są odpowiednio dobrane, fale przybierają kształt półksiężyca; ponieważ zaś każda część fali porusza się w kierunku do tej części prostopadłym, więc fala zbiega się stopniowo w jednym punkcie, skupiając w nim całą swą energję. Punkt taki można nazwać ogniskiem*. Fale przechodzą przez ten punkt i bie-

* W optyce używamy w szczególności tej nazwy tylko wówczas, gdy pierwotny układ fal jest ciągiem fal *plaskich*, jeśli zaś układ fal jest ciągiem fal, pochodzących z jednego punktu („źródła”, „przedmiotu”), to punkt skupienia się fal nazywamy „obrazem” źródła. *Przyp. tłum.*

gną dalej w postaci coraz bardziej rozszerzających się okręgów.

Zjawisko to można zilustrować przy pomocy basenu falowego. Kawalek szyby szklanej, wykrojony tak, że kontur jego przypomina zarys przekroju soczewki, kładziemy na dnie basenu. Woda nad tą szybą jest

Rys. 22. Mamy tu widok basenu falowego zgóry. Na dnie leży szyba szklana *G*, wycięta w kształcie przekroju soczewki; dzięki temu głębokość wody w tym miejscu, wynosząca w innych częściach basenu około 6 mm, jest zmniejszona. Fale rozchodzą się powolniej na wodzie płytkiej, skutkiem czego skupiają się w punkcie *F*; po przekroczeniu tego punktu rozbiegają się pouownie.

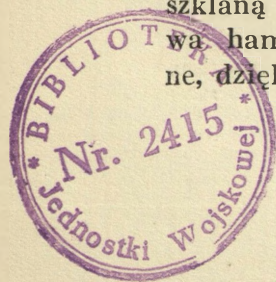


Fale wytwarzamy przez zanurza-

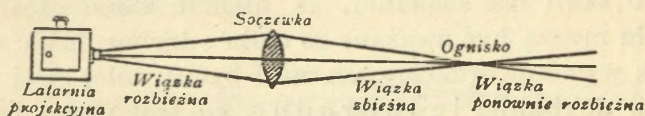
nie i podnoszenie łąty *L*; przegrody *BB* mają na celu zamknięcie faiom drogi, okrążającej soczewkę z boku.

płytsza niż w innych miejscach i fale rozchodzą się tu wolniej. Wzbudzamy je zapomocą łąty drewnianej, równoległej do powierzchni wody; łąta jest przytwierdzona do drgającej sprężyny i naprzemian zanurza się i wynurza z wody. Skupianie się fal widać wyraźnie, jakkolwiek nie jest ono tak dokładne, jak w przypadku światła (rys. 22; por. także tabl. VII A).

Gdy więc na drodze ciągu fal świetlnych umieścimy szklaną soczewkę, wówczas grubsza jej część środkowa hamuje fale bardziej niż cieńsze części brzeżne, dzięki czemu światło skupia się w ognisku, poczem



po przejściu przez nie biegnie dalej znów jako wiązka rozbieżna. Proste doświadczenie, przedstawione na rys. 23, ilustruje to zresztą dobrze wszystkim nam znane zjawisko.



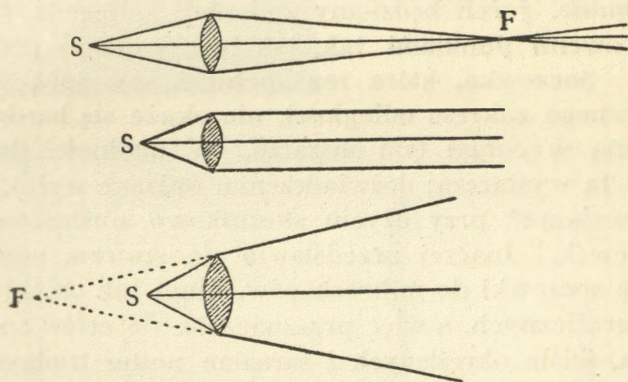
Rys. 23. Działanie soczewki. — Promienie lampy skupiają się w jednym punkcie, z którego rozchodzą się dalej jako wiązka rozbieżna.

Opisane wyżej doświadczenie z basenem falowym, pozwala wytworzyć sobie pojęcie o istocie zjawiska, mogłoby jednak wywołać błędne mniemanie, że działanie soczewki na promień świetlny nie jest zbyt ściśle określone. Otóż, przeciwnie, promienie wychodzące ze źródła punktowego mogą być zebrane w nadzwyczaj małym („ostrem“) ognisku, jeżeli soczewka jest odpowiednio obliczona i skonstruowana. Dzieje się to dlatego, że długość fal świetlnych jest *bardzo mała* w porównaniu z rozmiarami soczewki. Na każdym centymetrze ich drogi mieści się kilkanaście do kilkudziesięciu tysięcy fal; w tym zaś stanie rzeczy układ fal posuwa się naprzód z bardzo nieznacznym jedynie rozszerzaniem się bocznym. Jeśli zmierzają one ku pewnemu określonej punktowi, to zboczenia od wyznaczonej drogi są niezmiernie małe. Fakt ten jest jednym z przykładów bardzo ważnego ogólnego prawa; inne podobne przykłady spotkamy jeszcze niejednokrotnie. Fale świetlne są tak drobne, że do zupełnego wykorzystania wszelkich ich możliwości

niezbędna jest jaknajwiększa umiejętność i sprawność techniczna pracownika huty szklanej i szlifierza soczewek. Istnieje wprawdzie granica tych możliwości, lecz dochodzi się do niej dopiero przy pracy o skali tak subtelnej, że niemal same cząsteczki szkła muszą być uważane za ciała odrębne. Szkło soczewek wysokowartościowych musi być w całej swej objętości dokładnie j e d n o r o d n e, co jest rzeczą bardzo trudną do osiągnięcia, jeśli mamy do czynienia z soczewkami o znaczniejszych rozmiarach; obliczenie odpowiedniego kształtu jest nader zawile, szlifowanie zaś nie może różnić się odeń nawet o grubość włosa, a często i mniej. Oczywiście, do wielu zwykłych celów nie trzeba stawiać umiejętnościom optyka tak wielkich wymagań.

Gdy źródło światła zbliża się do soczewki, „obraz“ oddala się od niej. Zgadza się to w zupełności z naszym poglądem na powstawanie zbieżności promieni. Soczewka opóźnia w pewien określony sposób ruch fal, przechodzących przez jej środek, co powoduje pewną zmianę kształtu fali; dzięki temu staje się ona z rozbieżnej zbieżną. Oczywiście, im większa była pierwotna rozbieżność, tem mniejsza zbieżność z niej powstaje, jak to widzimy na rys. 23 i 24. Istotnie, jeśli źródło dostatecznie zbliży się do soczewki, fale wogóle nie staną się zbieżne po przejściu przez nią; soczewka zdoła wówczas jedynie zniweczyć ich rozbieżność pierwotną, tak, iż stają się one teraz falami płaskimi i biegną dalej, ani nie rozszerzając się, jak wiązka rozbieżna, ani nie skupiając się w jakimś „obrazie“. Odległość źródła od soczewki w tym przypadku zowie się „*odległością ogniskową*“, punkt zaś,

w którym znajduje się źródło — „ogniskiem głównem”. Istnieje oczywiście odwrócenie tego zjawiska: fale płaskie, t. j. fale biegnące z punktu niezmiernie odległego, schodzą się po przejściu przez soczewkę w ognisku głównem.



R y s. 24. Działanie zbierające soczewki dla różnych położeń wzajemnych soczewki i źródła światła.

Jeżeli źródło światła zbliży się do soczewki jeszcze bardziej, rozbieżność zostaje zniesiona jedynie częściowo: wiązka pozostaje rozbieżną, lecz w mniejszym stopniu, jakdyby wychodziła ze źródła bardziej oddalonego.

We wszystkich tych przypadkach źródło, środek soczewki i obraz leżą na jednej prostej. Wynika to z faktu, że soczewka w swej części środkowej zachowuje się jak płaska płytka szklana: promienie, przechodzące przez środek, nie zmieniają swego kierunku.

Różne doświadczenia, zilustrowane przytoczonymi wyżej rysunkami, i łatwe do zademonstrowania w sali

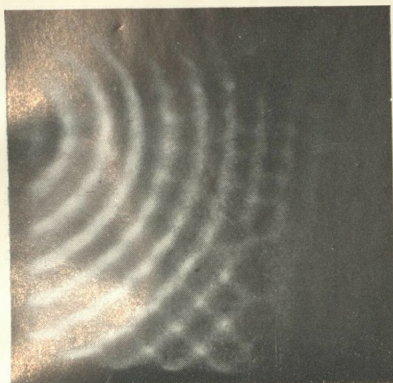
wykładowej, dają się zrealizować jedynie w przybliżeniu. Można wprawdzie wyliczyć kształt soczewki, bardzo dokładnie zbierającej w pewnym punkcie promienie, wychodzące z pewnego innego punktu, lecz obliczenie to jest ważne tylko dla tych dwóch punktów. Nie należy oczekiwać, że skupianie promieni będzie równie dokładne, jeżeli będziemy zmieniali odległość pomiędzy owymi punktami tak, jak to czyniliśmy poprzednio. Soczewka, która ma spełniać swe funkcje dla znacznego zakresu odległości, nie okaże się bardzo dokładną w całym tym obszarze. W ogólności dokładność ta wystarcza; doświadczenia, opisane wyżej, można wykonać przy użyciu stosunkowo niedoskonałych soczewek. Inaczej przedstawia się sprawa, gdy chodzi o soczewki do mikroskopów, lunet lub obiektywów fotograficznych, a więc przeznaczone do celów specjalnych, ściśle określonych i zarazem nader trudnych do osiągnięcia. Każdemu fotografowi wiadomo, jak dalece różni się obiektyw zwykły od najbardziej udoskonalonego obiektywu danego typu.

Obraz utworzony przez soczewkę

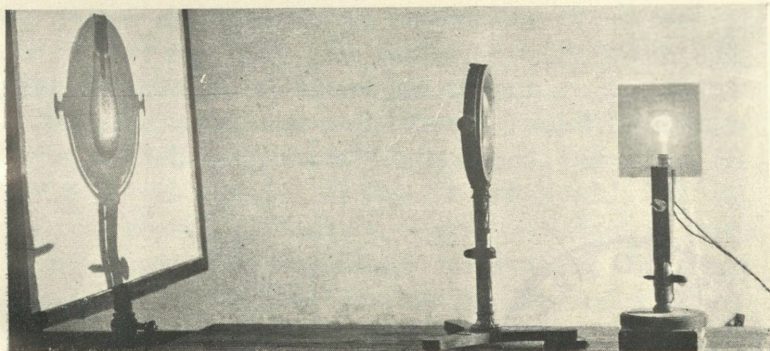
Obecnie, kiedy już wiemy, że promienie, wychodzące z pewnego punktu po jednej stronie soczewki, mogą skupić się w pewnym innym punkcie po stronie przeciwnej, stanie się dla nas rzeczą jasną, w jaki sposób soczewka wytwarza obraz przedmiotu na ekranie.

Rozpatrzmy np. rys. B, tabl. VII, ilustrujący powstanie obrazu lampki elektrycznej. Soczewka, ustawiona bokiem, widoczna w środku rysunku, skupia promienie lampki (na prawo) na ekranie po lewej stronie. Promienie, które wysyła każdy punkt żarzącego się dru-

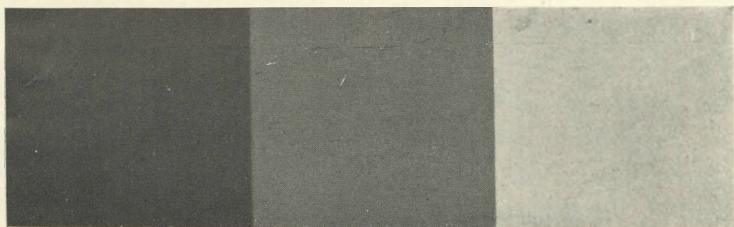
TABLICA VII



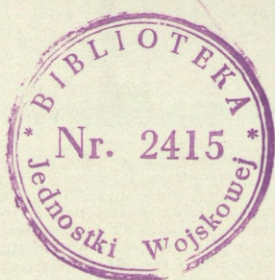
A. Fotografia ta ilustruje zjawisko odwrotne do przedstawionego na rys. 22. Fale wybiegają tu z jednego punktu po lewej stronie i przechodzą nad płytką szklaną, wyciętą w kształcie przekroju soczewki. „Soczewka” znosi rozbieżność fali: po prawej stronie rysunku stały się one już prostoliniowymi. Źródło fal znajduje się tu w ognisku głównym „soczewki”. Fotografję wykonano „na czas”, przyczem błyski światła oświetlały fale synchronicznie z ruchem pręcika, który je wywoływał przez rytmiczne zanurzanie się i wynurzanie z wody (str. 48).



B. Na lewo widzimy tu odwrócony obraz żarówki (po prawej stronie), wytworzony przez soczewkę (pośrodku rysunku). Kwadratowym ekranem, który widać przed lampką, zasłonięto ją w ciągu części ekspozycji, aby uniknąć zbyt silnego nasświetlenia kliszy światłem żarówki. Odwrócony obraz drucika na ekranie powstaje dzięki własnemu światłu drucika; natomiast odwrócony cień bańki lampy jest rzucony przez źródło światła, umieszczone dalej na prawo, poza obrębem rysunku. To samo źródło rzuca cień soczewki i jej podstawki, nieodwrócony dlatego, że odpowiednie promienie nie przeszły przez soczewkę (str. 52).



C. Oba pionowe brzegi każdego kwadratu, jakkolwiek w rzeczywistości jednako cienne, wyglądają nieco odmiennie, przyczem część, graniczącą z powierzchnią ciemniejszą, wydaje się jaśniejsza od części, stykającej się z polem jasnym. Kwadraty wyglądają więc jakby cieniowane (str. 70).



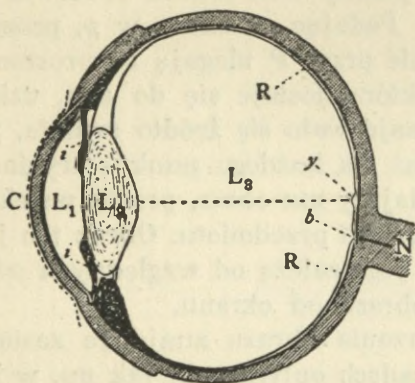
cika, zbierają się na ekranie po przejściu przez soczewkę również w obrazach punktowych, tak bowiem dobrano wzajemne położenia soczewki i ekranu. Oba te odpowiadające sobie punkty oraz środek soczewki leżą na jednej prostej. Padając na ekran w p , promienie, wysłane pierwotnie przez P ulegają rozproszeniu, przyczem część ich, która dostaje się do oka, działa tak, jakgdyby w p znajdowało się źródło światła, podobne do P . Ponieważ dla każdego punktu oryginału znajdzie się odpowiadający mu obraz, przeto na ekranie pojawi się obraz całego przedmiotu. Obraz ten jest odwrócony; rozmiary jego zależą od względnych odległości przedmiotu i obrazu od ekranu.

Ten sposób wytwarzania obrazu znajduje zastosowanie w wielu przyrządach optycznych, jak np. w kamerze fotograficznej. Miejsce ekranu z tabl. VII zajmuje tu klisza światłoczuła, oczywiście osłonięta przez ścianki kamery od wszelkiego naświetlenia ubocznego. Na kliszy powstaje obraz przedmiotu, odwrócony i znacznie zmniejszony.

Budowa oka pod względem optycznym

Optyczna budowa oka przypomina w zasadzie kamerę fotograficzną. Soczewkowata bryłka L_2 , oraz ciała przezroczyste L_1 i L_3 , wypełniające przestrzeń przed i poza soczewką, zmniejszają prędkość światła, które przez nie przebiega, przytem L_2 bardziej niż pozostałe. Zmniejszenie to uwydatnia się silniej na linii środkowej oka, niż bliżej brzegów. Wskutek tego, jak widzieliśmy poprzednio, fale rozbieżne, padające na oko, zostają zebrane na siatkówce, która odpowiada szybie matowej w aparacie fotograficznym. Obraz

przedmiotu zewnętrznego, powstający na siatkówce, jest również odwrócony i o wiele mniejszy od oryginału.



R y s. 25.

- C* rogówka,
R siatkówka,
N nerw,
*L*₁ ciało wodniste,
*L*₂ soczewka,
*L*₃ ciało szkliste,
i tęczówka,
b plamka ślepa,
y plamka żółta.

Położenie matówki w kamerze fotograficznej można zmieniać. Jest to konieczne dlatego, że punkt przecięcia promieni wychodzących z punktu bardziej oddalonego, leży bliżej soczewki niż dla promieni wychodzących z punktu bliższego. Wszyscy przypominamy sobie zapewne, jak to fotograf „nastawia” kliszę stosownie do odległości fotografowanego przedmiotu.

Jak wiadomo, możemy widzieć wyraźnie szczegóły przedmiotów, znajdujących się w bardzo różnych odległościach od nas; oko musi więc posiadać możliwość „nastawiania się”, podobnie jak aparat fotograficzny. Czynią to odpowiednie mięśnie, które mogą zmieniać kształt oka i jego układu soczewek. Tak np., starając się odczytać drobny druk, odczuwamy wysiłek, związany z kurczeniem się mięśni oka — czasami nawet

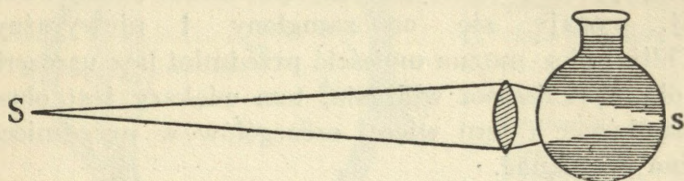
marszczymy przytem czoło. Zwiększamy wówczas *podłużne* rozmiary oka, w szczególności jego soczewki, od przodu ku tyłowi, zmniejszamy je natomiast w kierunkach poprzecznych, skutkiem czego wzrasta „zdolność zbierająca“ oka. Większość ludzi może kurczyć („akomodować“) oczy w takim stopniu, że widzą oni wyraźnie przedmioty w odległości zaledwie 15 do 20 cm; jeżeli jednak zbliżymy przedmiot jeszcze bardziej, wydaje się on zamglony i niewyraźny. Im bliżej oka można umieścić przedmiot bez uszczerbku dla wyrazistości widzenia, tem większy jest obraz na siatkówce i tem więcej szczegółów w przedmiocie można rozpoznać.

Wady optyczne oka i środki zaradcze

Oko normalne może często odróżnić oddzielne gałązki na drzewie, odległym o 50 metrów, jeśli rysują się one na jasnem tle nieba; z drugiej zaś strony, może przystosować się do wyraźnego widzenia drobnych szczegółów z odległości kilkunastu centymetrów. Podobne „wyczyny“ dają nam pojęcie o subtelności budowy oka, która pozwala wytworzyć na siatkówce odrębne obrazy bardzo drobnych przedmiotów. Wiadomo jednak dobrze, iż nie każde oko może to osiągnąć: jedno widzi lepiej na małą odległość, inne — na dużą, a są i takie oczy, które w ogóle nie mogą wyraźnie dostrzec przedmiotu, niezależnie od jego odległości. Te odstępstwa od stanu normalnego można łatwo wyjaśnić przy pomocy kilku prostych doświadczeń.

Przyrząd, mający nam ilustrować proces widzenia, zestawimy w następujący sposób. Dużą, okrągłą kolbę

(rys. 26) napełniamy cieczą, zawierającą w postaci zawiesiny trochę subtelnego proszku, co pozwala dostrzec drogę promieni. W *S* mieści się łuk elektryczny lub lampa „punktowa“, a więc dostatecznie skoncentrowane źródło światła. Tuż przed kolbą umieszczamy soczewkę tak dobraną, aby światło lampy skupiało się na tylnej ścianie kolby.

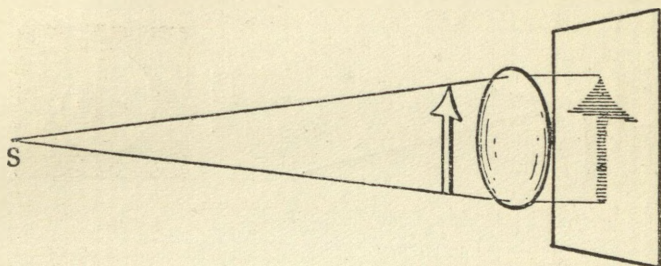


Rys. 26. Promienie łuku elektrycznego *S* są skupione przez soczewkę i ciecz w kolbie w jednym punkcie na tylnej ścianie kolby. Soczewka oraz ciecz przedstawiają schematycznie układ optyczny oka, tylna ścianka flaszki — siatkówkę.

Kolba z cieczą oraz soczewka szklana mają zgrubszą reprezentować kulistą niemal gałkę oczną, oraz soczewkę oka (rys. 25); siatkówka odpowiada tylnej ścianie kolby, promienie zaś skupione na niej w tym doświadczeniu — światło, wchodzącemu do oka normalnego i zbierającemu się na siatkówce: promienie ze źródła punktowego tworzą obraz punktowy. Jak mówiliśmy poprzednio, jest to sprawą nader ważną; tylko w tym przypadku bowiem wieści, które nam przynoszą promienie świetlne, mogą być interpretowane bez zamieszania, spowodowanego przez promienie, pochodzące z innych punktów i padające na to samo miejsce siatkówki.

Jeśli źródło *S* porusza się ku górze, lub ku dołowi, na lewo, lub na prawo — wówczas obraz *s* porusza się

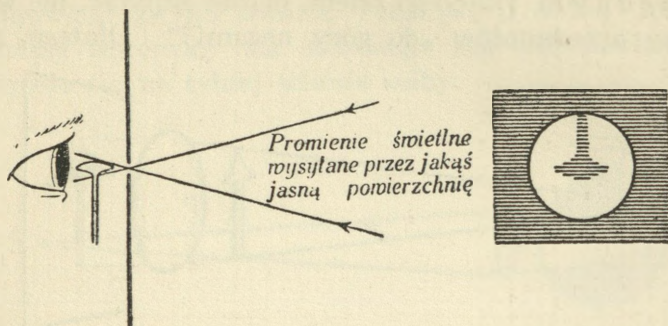
również, lecz odpowiednio ku dołowi lub ku górze, na prawo lub na lewo. Istotnie, występuje tu odwrócenie, które towarzyszy, jak wiemy, działaniu soczewki. Obraz, utworzony na siatkówce, jest również obrazem odwróconym. Dlaczego zatem, można zapytać, nie widzimy przedmiotów „do góry nogami?” Dlatego, że



Rys. 27. Źródło światła *S* rzuca cień przedmiotu na ekran ustawiony w małej odległości od przedmiotu. Wstawienie soczewki o niezbyt krótkiej ogniskowej pomiędzy przedmiotu a ekran, niewiele zmienia wygląd cienia, poza nieznacznym zmniejszeniem jego rozmiarów i pewnym zatarciem konturów.

w czasie, gdy zaczynaliśmy interpretować wrażenia wzrokowe, nauczyliśmy się odróżniać rzecz „wysoką” od „niskiej”, „górną” część przedmiotu od „dolnej”, nie wiedząc jednak, w jaki sposób doszliśmy do tego: wystarczało nam uczenie się empiryczne. Większość ludzi nie wie wcale o tem, że obraz na siatkówce jest odwrócony, nie spotkali się bowiem nigdy z jakimś rzeczywistym dowodem, że tak jest w istocie. Prawdziwy stan rzeczy nie przyszedłby im zapewne nigdy na myśl, chyba, gdyby zobaczyli doświadczenia z soczewką i uprzytomnili sobie funkcję układu soczewek w oku.

Zjawisko to można zademonstrować przy pomocy prostych doświadczeń¹. Ustawmy przedewszystkiem (rys. 27) w niewielkiej odległości od ekranu soczewkę, oraz jakiś przedmiot tuż w pobliżu soczewki. Przekona-



Rys. 28 i 29. Oko umieszczamy w pobliżu małego otworka w kartce papieru. Światło z jasnej powierzchni, np. nieba, przechodzi przez otworek i pada na znaczną część siatkówki, tak iż otworek wydaje się duży. Jeżeli pomiędzy otworkiem a okiem umieścić główkę szpilki, to cień jej na siatkówce musi być „prosty” (nieodwrócony), zgodnie z doświadczeniem poprzednim. Oko jednak widzi coś nakszałt obrazu przedstawionego na rys. 29; wydaje się nam, że szpilka zwrócona jest ostrzem ku górze.

my się, że soczewka nie wpływa na tworzenie się na ekranie cienia owego przedmiotu; cień ten jest oczywiście nieodwrócony względem przedmiotu.

Przekłujmy teraz w kawałku kartonu mały otworek i spójrzmy przezeń, trzymając karton tuż przy oku, na jakąś jasną powierzchnię, np. na niebo, lub jasny abażur lampy (rys. 28). Oko widzi wówczas duże, jasne koło, gdyż oświetlona jest znaczna część siatkówki.

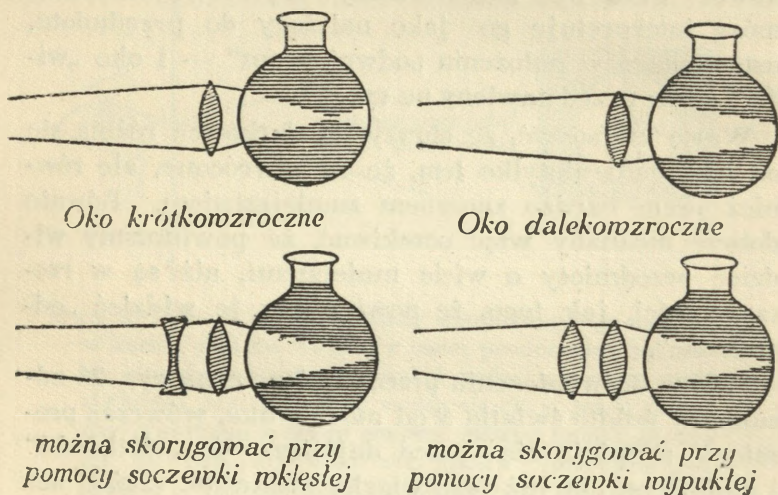
¹ Silvanus Thompson. *Światło widzialne i niewidzialne*, str. 44.

Chodzi o to, że soczewka oka nie może skupić w jednym punkcie promieni tak silnie rozbieżnych, jak te, które przechodzą przez otworek. Umieścimy teraz pomiędzy tym ostatnim a okiem główkę szpilki; czynność ta może nam zabrać nieco czasu. Otóż cień na siatkówce musi być nieodwrócony (rys. 27), natomiast mózg interpretuje go jako należący do przedmiotu, ustawionego w położeniu „odwróconem” — i oko „widzi” obraz przedstawiony na rys. 29.

Warto zaznaczyć, że obrazy na siatkówce różnią się od oryginału nietylko tem, że są odwrócone, ale również swem bardzo znacznem zmniejszeniem. Równie dobrze możnaby więc oczekiwać, że powinniśmy widzieć przedmioty o wiele mniejsze, niż są w rzeczywistości, jak tego, że powinniśmy je widzieć „odwrócone”.

Jeśli w doświadczeniu przedstawionem na rys. 26 odśuniemy źródło światła *S* od modelu oka, wówczas promienie skupiają się przed dojściem do „siatkówki” i padają na nią już jako wiązka rozbieżna. Jeżeli natomiast *S* zbliży się zbyt do oka, to promienie nie przecięły się jeszcze w chwili, gdy padają na „siatkówkę”. W obu przypadkach obraz jest zatarty, niewyraźny. To samo dzieć się musi również z okiem, chyba że jest jakieś urządzenie, które tej nieostrości zapobiega. Soczewka i pozostałe części układu optycznego oka mogą być *odkształcane* działaniem różnych mięśni ocznych i w ten sposób widzenie dostosowuje się w pewnych granicach do danych warunków. Owa zdolność przystosowania bywa bardzo różna: jak już wspominaliśmy, oko normalne zdolne jest przystosować się do widzenia ze zdumiewającą wyrazistością zarówno

szczegółów odległego krajobrazu, jak i do czytania książki z odległości dwudziestu kilku cm. Zdarzają się jednak oczy tak zbudowane, że przedmioty odległe wydają się im zamglone, wyraźnie zaś mogą widzieć tylko przedmioty bliskie. Tym „krótkowzroczne



Rys. 30 i 31. Widzimy tu, w jaki sposób można skorygować wady oka krótkowzrocznego i dalekowzrocznego.

nym“ oczom pomaga użycie soczewek cieńszych w środku, niż na brzegach, t. j. wklęsłych: wobec tego, że oko takie zbiera fale zbyt silnie, trzeba je skorygować za pomocą soczewki, która z większą rozbieżnością promieni dzięki temu, że hamuje je bardziej na brzegach niż w środku. Odwrotnie, oko które nie może wytworzyć dostatecznie zbieżnej wiązki promieni, powinno być zaopatrzone w soczewkę wypukłą, t. j.

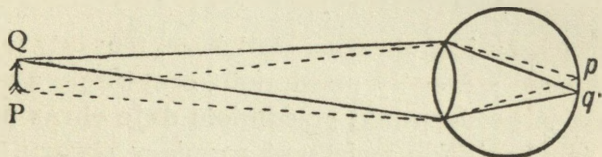
grubszą w środku. Konieczność stosowania takich soczewek pojawia się u wielu ludzi po osiągnięciu późniejszego wieku, soczewka oka ulega bowiem z biegiem lat spłaszczeniu (por. rys. 30 i 31).

Powiększenie

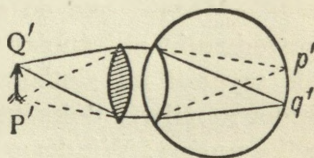
Im większy jest obraz na siatkówce, tem łatwiej można odróżnić szczegóły przedmiotu, oczywiście z zastrzeżeniem, iż każdy punkt przedmiotu daje obraz punktowy. Aby możliwie zwiększyć rozmiary obrazu, należy jaknajbardziej zbliżyć przedmiot do oka; granicę zakresła tu zdolność oka do zmiany rozbieżności wiązek i wprowadzania zbieżności takiej, by punkt przecięcia wiązek wypadł na siatkówce. Chcąc obejrzeć jakiś przedmiot możliwie dokładnie, zbliżamy go do oka tak, jak tylko można. Wiadomo jednak, że musimy zatrzymać się w pewnym punkcie dość ściśle oznaczonym; jest to punkt, od którego począwszy układ optyczny oka odmawia usług. Nie zyskamy nic przy większem jeszcze zbliżeniu przedmiotu: rozmiary obrazu rosną, lecz szczegóły zacierają się. Aby tę trudność pokonać, używa się soczewki, zwiększającej zdolność zbierającą oka: jest to zwykle szkło powiększające (lupa) w najrozmaitszych swych postaciach.

Przy użyciu takiej soczewki (rys. 32) przedmiot można o wiele bardziej zbliżyć do oka, przyczem wyrazistość nie ponosi uszczerbku na rzecz powiększenia. Zwykłe „szkło do czytania“, którem posługujemy się przy odczytywaniu drobnego druku, lub oglądaniu szczegółów jakiegoś rysunku, daje powiększenie niezbyt znaczne, a konstrukcja jego nie wymaga nad-

zwyczajnej staranności. Im znaczniejsze jest żądane powiększenie, tem bardziej rosną wymagania, stawiane konstruktorowi soczewek: dużo starannej i dokładnej pracy trzeba włożyć w konstrukcję soczewek, przeznaczonych do użytku botanika, geologa lub zegarmistrza.



R y s. 32. Oko nieuzbrojone nie może widzieć wyraźnie przedmiotów bliższych niż PQ , którego obraz oznaczono pq ; natomiast



spomocą soczewki skupiającej oko może utworzyć wyraźny obraz $p'q'$ na siatkówce nawet jeśli przedmiot ($P'Q'$) znajduje się w odległości znacznie mniejszej. Obraz ten jest większy od pq .

A zresztą, stosowalność samej metody, opisanej powyżej, jest ograniczona, pomimo całej umiejętności konstruktora. Przedmiot badany nie zawsze można zbliżyć do oka w takim stopniu, aby otrzymać żądane duże powiększenie. Dlatego też stosuje się wówczas metodę zupełnie odmienną.

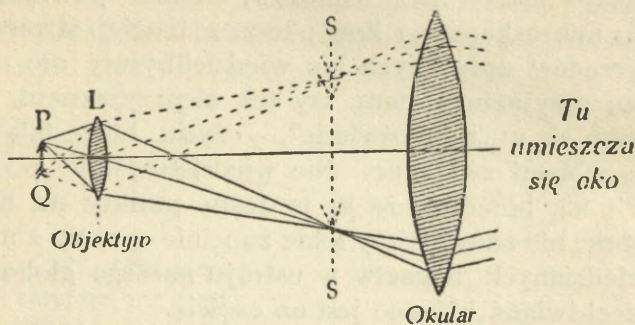
Mikroskop i luneta

Spróbujmy sobie uprzytomnić, jak ogromne znaczenie posiadają te sprawy dla człowieka. Ze światem,

który możemy widzieć i badać okiem nieuzbrojonem, graniczą z obu stron wielkie dziedziny, niedostępne dla zwykłej obserwacji wzrokowej. Oczywiście, można „przeżyć życie“ bez okularów, szkieł powiększających, mikroskopów i lunet; lecz, z drugiej strony, bez przyrządów optycznych nie wiedzielibyśmy nic o tem życiu, przyjaznem nam, czy też nieprzyjaznem, krzewiącem się w „mikroświecie“, — życiu, które tak ściśle jest z nami związane. Nie wiedzielibyśmy o gwiazdach nic ponadto, że są to jasne punkty na niebie. Istotnie, nie zdawaliśmy sobie zupełnie sprawy z niewypowiedzianych bogactw w ustroju naszego globu oraz Wszechświata, którego jest on częścią.

We wspomnianej wyżej nowej metodzie tworzymy przede wszystkim *obraz* przedmiotu, który chcemy badać, a potem rozpatrujemy *ten obraz* przez szkło powiększające. Zyskujemy w ten sposób podwójnie: najpierw, możemy uczynić obraz o wiele większym od oryginału, powtóre, możemy łatwiej „dostać się“ do niego. Przypuśćmy np., że mały przedmiot PQ , jasno oświetlony, umieściliśmy blisko soczewki L (rys. 33); na ekranie SS powstaje obraz powiększony. Oświetlenie musi być silne, aby obraz był dostatecznie jasny nawet przy znacznem powiększeniu. Teraz zastosujemy lupę do oglądania tego obrazu. Można go rzucić na biały ekran SS i obserwować sprzodu, lecz o wiele lepiej będzie oglądać go z drugiej strony przez soczewkę umieszczoną tak, jak wskazuje rys. 32. Ekran jest wówczas niepotrzebny, gdyż promienie, wychodzące z każdego punktu przedmiotu, skupią się w odpowiednim punkcie w miejscu, gdzie przedtem był ekran, poczem wejdą do oka jako wiązka rozbieżna, jak to

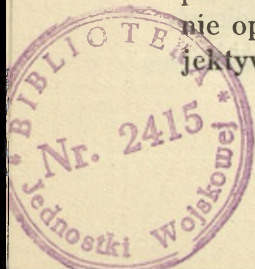
widzimy na rysunku. Co więcej, w tym przypadku cała ilość światła wchodzi do oka, gdy tymczasem ekran sporo rozprasza.



Rys. 33. Schemat mikroskopu. Jasno oświetlony przedmiot PQ rozprasza promienie świetlne, przy których pomocy soczewka L , zwana obiektywem, wytwarza w SS' obraz znacznie większy od przedmiotu. Obraz ten ogląda się przez inną soczewkę, zw. okular, tak samo jak przedmiot $P'Q'$ na rys. 32.

Taka jest zasada działania mikroskopu. W układzie optycznym (rys. 33) mamy tu dwie główne części: *obiektyw*, który wytwarza obraz powiększony, oraz *okular*, przez który obraz ten oglądamy. Wielkość powiększenia mikroskopu zależy od konstrukcji obu tych części; należy tu znów podkreślić, że warunkiem niezbędnym do osiągnięcia możliwie najlepszych wyników, jest bardzo wysoki stopień umiejętności technicznej konstruktorów.

Jeśli chodzi o ułatwienie oku dostrzeżenia szczegółów przedmiotów odległych, stosuje się podobne urządzenie optyczne. Wobec tego, że nie można tu zbliżyć obiektywu do przedmiotu, obraz nie może być powięk-



szony; okular (lupa) pozwala jednak przez oglądanie obrazu widzieć szczegóły przedmiotu daleko lepiej, niżby to było możliwe dla oka nieuzbrojonego.

Im większa odległość ogniskowa obiektywu, tem większy jest pierwszy obraz; dlatego to potężne lunety astronomiczne posiadają tak znaczną długość. Jednakże wyłania się wówczas sprawa dostatecznego oświetlenia, ponieważ światło, przechodzące przez obiektyw, rozkłada się na całą powierzchnię obrazu. Jeśli zatem powiększenie jest znaczne, obiektyw musi być wielkich rozmiarów; granicę, jaką można pod tym względem osiągnąć, zakreślają koszty konstrukcji.

Być może dobrze będzie powtórzyć tu raz jeszcze to ujęcie zagadnienia, które przytoczyliśmy przy opisie mikroskopu. Przypuśćmy, że mamy ustawiony aparat fotograficzny, gotowy do zdjęcia. Osłoniwszy się od przeszkadzającego bocznego światła, i patrząc przed założeniem kliszy na matówkę, widzimy na niej odwrócony obraz przedmiotów fotografowanych. Chcąc dostrzec drobne szczegóły tego obrazu, moglibyśmy obejrzeć go przez lupę. Zbliżywszy ją do matówki, uprzytomnimy sobie jednak odrazu, że daleko lepiej będziemy mogli dostrzec te szczegóły po usunięciu matówki: promienie, które skupiają się w pewnym punkcie na szkłe i ulegają rozproszeniu na wszystkie strony, będą mogły teraz wpaść do lupy nieosłabione wskutek rozpraszania.

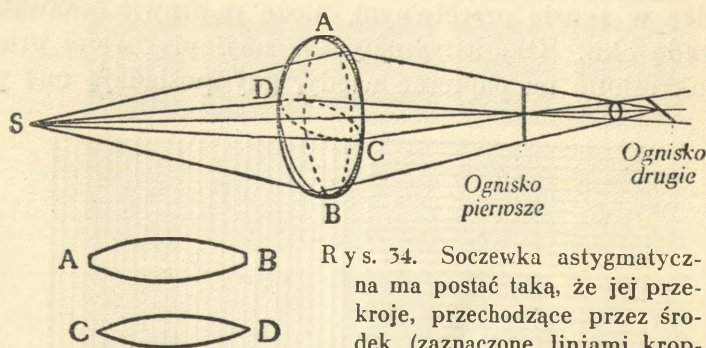
Reasumując, mamy zatem trzy stą d j a w rozwoju zasięgu wzroku. W pierwszym posługujemy się okiem nieuzbrojonym; w następnem, mającem zastosowanie jedynie do drobnych i bliskich przedmiotów, pomagamy oku przez użycie soczewki, czyli szkła powiększa-

jącego; w trzeciem wreszcie, najpierw obiektyw wytwarza obraz przedmiotu, poczem obraz ten rozpatrujemy przez szkło powiększające, czyli okular. Budowa wszystkich mikroskopów i lunet, jakkolwiek różnorodna w szczegółach, opiera się na tej zasadzie. Dużo pomysłowości ujawnia się w konstrukcji przyrządów przeznaczonych do specjalnych celów, jak np. nowoczesnych lornet polowych. Opis podobnych instrumentów przekraczałby jednak zakres naszych obecnych rozważań.

Astygmatyzm

Wiadomo dobrze, iż ludzie bardzo znacznie różnią się pomiędzy sobą pod względem „bystrości“ wzroku. Nie którzy spośród nas nie mogą dostrzec szczegółów przedmiotów odległych, innym sprawia trudność czytanie książki. Braki te naprawiamy przez użycie odpowiednich okularów. Oko wzorcowe, przystosowane do wymagań przeciętnego człowieka, nie istnieje. Wobec takich różnic pod tym względem, tak znacznych, że w celu dostosowania wzroku do widzenia na żadaną odległość, musimy często uciekać się do sztucznych środków, nie może nas dziwić fakt, że i pod innemi względami oczy nasze odchylają się niekiedy od normy, w szczególności od postaci symetrycznej, którą za normalną możemy uważać. Jeżeli promienie ze źródła punktowego, położonego na osi soczewki, mają skupiać się w jednym punkcie, soczewka musi być s y m e t r y c z n ą dokoła tej osi. Łatwo spostrzec, co się dzieje, jeżeli warunek ten nie jest spełniony. Weźmy soczewkę tak oszlifowaną, że krzywizna jej w kierunku piono-

wym AB jest mniejsza niż w kierunku poziomym CD . Okazuje się, że światło ze źródła punkowego nie może skupić się w j e d n y m punkcie po drugiej stronie soczewki. Silniejsze zakrzywienie przekroju poziomego czyni promienie, leżące w płaszczyźnie tegoż, bardziej zbieżnymi niż promienie w płaszczyźnie pionowej. Widzimy to na rys. 34.



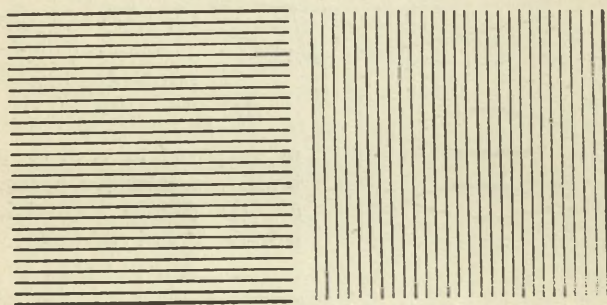
Rys. 34. Soczewka astygmatyczna ma postać taką, że jej przekroje, przechodzące przez środek (zaznaczone linjami kropkowanymi na rysunku), nie są

wszystkie jednakowe. Tak np. krzywe przekroju CD są zakrzywione bardziej, aniżeli AB . Promienie z S , nie schodzą się po przejściu przez soczewkę, w jednym punkcie, lecz w dwóch krótkich „liniach ogniskowych”, wskazanych na rysunku. Pierwsza z nich leży w płaszczyźnie rysunku, druga jest do niej prostopadła.

W pewnej odległości od soczewki wszystkie promienie przechodzą przez mały odcinek pionowy; nieco dalej przecinają się w podobnym odcinku poziomym. W odległościach pośrednich pomiędzy tamtymi dają się objąć małym kółkiem, nigdzie jednak nie przecinają się w j e d n y m punkcie — dlatego też zjawisko to nosi nazwę „astygmatyzmu”¹. Oko, posiadające tę wadę,

¹ a — przecięcie, σ — punkt (gr.) Przyp. tłum.

nie widzi całkiem wyraźnie żadnego przedmiotu, ani bliskiego, ani dalekiego. Na szczęście, nietrudno obmyśleć i skonstruować odpowiednie soczewki kompensujące. Oko astygmatyczne posiada dwa wyróżnione kierunki: najmniejszej i największej krzywizny; oczywiście niekoniecznie muszą one być poziome czy też pionowe (rys. 34). Otóż soczewka, która wytwarza różnicę w sensie przeciwnym, może poprawić omawianą wadę oka. Oko astygmatyczne najlepiej widzi proste nakreślone na papierze wtedy, gdy posiadają one pe-

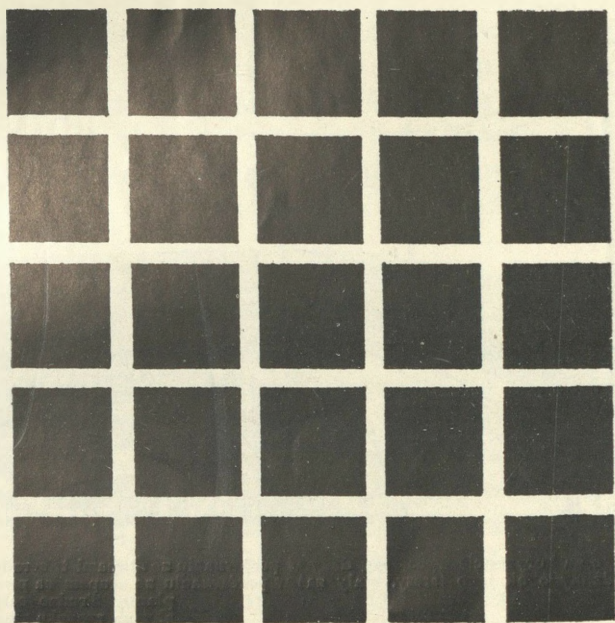


R y s. 35. Próba astygmatyzmu oka.

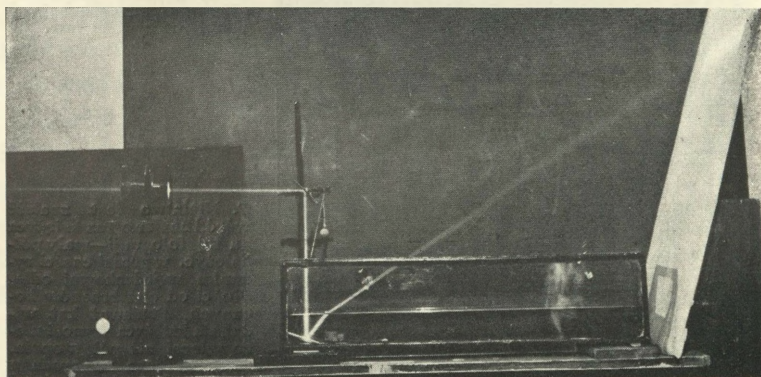
wien oznaczony kierunek. Tak np., patrząc na rys. 35, może ono widzieć wyraźniej linje poziome w porównaniu z pionowymi, lub odwrotnie; albo też może zauważyć różnicę przy powolnem obracaniu rysunku w jego własnej płaszczyźnie. Wyjaśnia się to w sposób następujący.

Przypuśćmy, że soczewka oka przypomina kształtem soczewkę przedstawioną na rys. 34 i że promienie ze źródła punktowego po przejściu przez nią skupiają się na siatkówce w krótkiej linii pionowej. Każdy punkt

TABLICA VIII

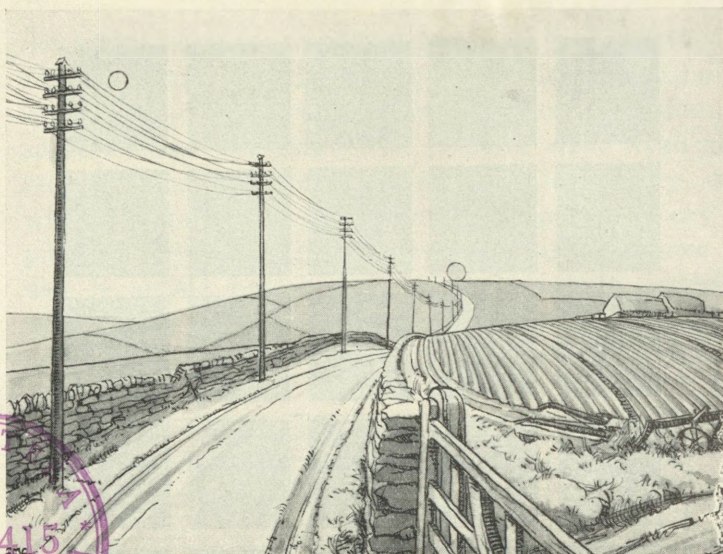


A. W miejscach, gdzie przecinają się białe paski, powstaje złudzenie pojawiających się i znikających cieni (str. 71).



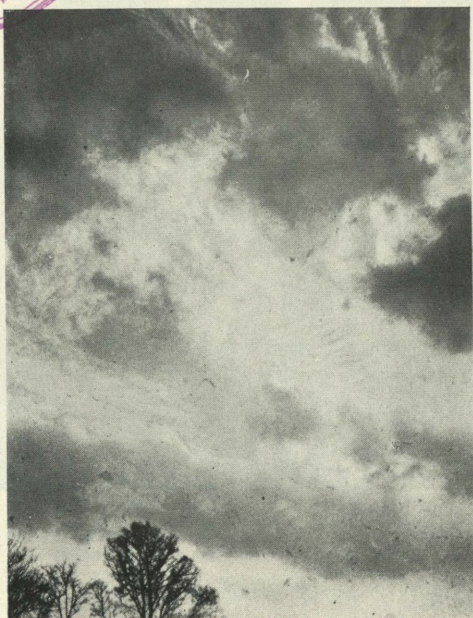
B. Fotografia urządzenia, pozwalającego zademonstrować załamanie wiązki świetlnej na granicy pomiędzy wodą i powietrzem (str. 79).

TABLICA IX

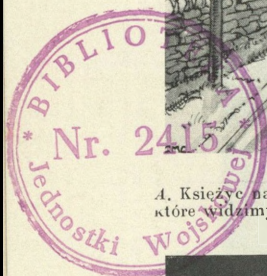


A. Księżyc na horyzoncie wydaje się duży w porównaniu ze słupami telegraficznymi, które widzimy obok jego tarczy, mały zaś w porównaniu ze słupem na pierwszym planie. Trudno oczekiwać,

aby na rysunku mogło wystąpić omawiane złudzenie, jakkolwiek można ułatwić jego powstanie, zakrywając najpierw jeden rysunek księżyca, a potem drugi. Do wywołania efektu psychologicznego potrzebne są warunki rzeczywiste (str. 73).



B. Niełatwo jest znaleźć wśród chmur obraz księżyca na tej fotografii—mały półksiężyc, w górnej części rysunku, w jednakowej odległości od obu brzegów bocznych. Ponieważ kąt widzenia księżyca wynosi nieco więcej niż pół stopnia, średnica jego na rysunku powinna być mniej więcej równa jednej stu dwudziestej części długości ogniskowej kamery, jest to bowiem stosunek rozmiarów do odległości przedmiotu, który widzimy pod wspomnianym kątem (str. 74).

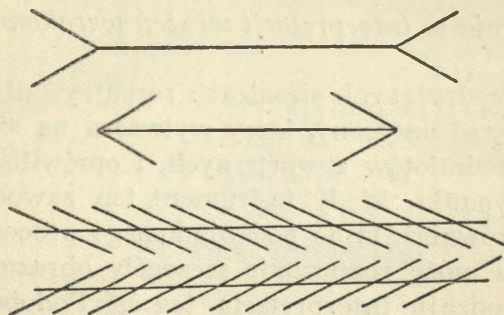


pionowej linii na rysunku jest na siatkówce rozciągnięty w krótką linijkę pionową; te ostatnie zlewają się więc wszystkie w jedną wyraźną linię pionową. Przeciwnie, jeśli linja na rysunku jest pozioma, a każdy jej punkt rozciąga się w linijkę pionową, to powstaje stąd linja pozioma zatarta i niewyraźna.

Złudzenia w interpretacji wrażeń wzrokowych

Na poprzedzających stronicach rozpatrywaliśmy oko jako przyrząd optyczny, który wytwarza na siatkówce obrazy przedmiotów zewnętrznych, i omówiliśmy rozmaite przypadki, kiedy instrument ten zawodzi. Widzieliśmy również, iż do podświadomego procesu, dzięki któremu mózg rozpoznaje szczegóły obrazu, należy pewnego rodzaju interpretacja tegoż. Podobnie, jak błędy w układzie optycznym, mogą również występować *błędy w interpretacji*, bądź to wskutek braku doświadczenia, nieuwagi, bądź też — czego trudniej uniknąć, — dzięki samej naturze procesów fizjologicznych, za których pośrednictwem światło przekształca się na impuls nerwowy, te zaś w dalszym ciągu na wrażenie. Tak np. powiedziałbym, że dobrze znane złudzenie, dotyczące długości linii poziomych na rys. 36, powstaje głównie wskutek niedostatecznego wysiłku uwagi. Linja dolna wydaje się krótsza, gdyż oko umieszcza jej koniec gdzieś wewnątrz ostrza, zamiast prześledzić przebieg jej do samego wierzchołka. Złudzenie to nie zwiedzie doświadczonego rysownika, podobnie, jak nie będzie on sądził, że dwie dłuższe linje na rys. 37 są do siebie nachylone, jakkolwiek pobieżny rzut oka może dawać to złudzenie.

Z drugiej strony, jeśli jakaś plama ciemna graniczy z inną, jaśniejszą, wówczas powstaje złudzenie, że plama jasna jest jeszcze bardziej rozjaśniona w pobliżu linii zetknięcia, natomiast druga plama wydaje się blisko tej granicy ciemniejsza niż nieco dalej. Cechy każdej z plam są „podkreślone“ przez obecność pozostałej.



Rys. 36 i 37. Dwa dobrze znane złudzenia optyczne. Czy na górnym rysunku linie poziome są równej długości? Czy dwie dłuższe linie na dolnym rysunku są do siebie równoległe?

Wskutek tego układ ciemnych kwadratów, przedstawiony na tablicy VII C, przybiera wygląd „cieniowany“. Być może zresztą, że działa tu więcej przyczyn, i nie jestem pewien, czy wpływ każdej z nich jest dokładnie wyznaczony. Jedną z najważniejszych rozważa Shelford Bidwell w swych „Osobliwościach światła i wzroku“, mianowicie nieświadomą *zmianę wzorca oceny*. Po spojrzeniu na ciemną plamę widok jasnej wywiera na oko wrażenie silniejsze niż należałoby tego oczekiwać: wartość jego wzorca jasności uległa chwilowo obniżeniu. Być może również, iż to rozjaśnienie przez kontrast powstaje częściowo wskutek

pewnego zjawiska fizjologicznego, mianowicie rzeczywistego zmęczenia siatkówki, spowodowanego przez światło, które wykrywać jest jej zadaniem.

Gdy patrzymy na ów rysunek, wzrok nasz wędruje z jednego miejsca w inne: spoglądając na pole średnio ciemne bezpośrednio po jaśniejszem, czynimy to oczywiście zlekka zmęczonemi; jeśli przedtem patrzyliśmy na pole ciemniejsze — wzrok wypoczął był nieco. Plama może więc w pierwszym przypadku wydawać się ciemniejsza, niż w drugim. Jednakże, niezależnie od tego, czy zmęczenie odgrywa tu rolę, czy nie, zmiana wzorca oceny działa napewno, gdyż według Bidwella cieniowany wygląd pól „występuje wyraźnie, jeśli rysunek oświetlimy przez bardzo krótką chwilę zapomocą iskry elektrycznej“.

Ciekawe zjawisko tego samego rodzaju zademonstrował przed laty profesor William Stirling podczas odczytu w Royal Institution; rysunek jego widzimy na tabl. VIII A. Białe paski wydają się ciemniejsze w miejscach, gdzie się z sobą przecinają. Możnaby tu przypuścić, że część białego paska, położona dalej od tych miejsc, wydaje się jaśniejszą od owych „narożnych“ kwadracików dlatego, że w swem bezpośrednim otoczeniu posiada więcej czerni.

Jednem z najsłynniejszych złudzeń optycznych jest pozorne zwiększenie się tarczy księżyca w pobliżu horyzontu. Trudno wprost uwierzyć, gdy widzi się czerwoną tarczę wschodzącego księżyca, na której tle ostro znaczą się zarysy dalekich drzew lub budynków, że nie jest ona większa niż wówczas, gdy świeci nam wysoko nad głowami. Łatwo jednak fakt ten sprawdzić: moneta dwudziestogroszowa, umieszczona w odległo-

ści dwóch metrów, dokładnie pokrywa księżyc zarówno wtedy, gdy znajduje się on na horyzoncie, jak i w zenicie. Oczywiście jest rzeczą, iż kąt, pod którym widzimy księżyc, musi być w obu wypadkach ten sam, gdyż odległość jego od nas nie uległa przecież zmianie. Refrakcja astronomiczna, którą zajmujemy się później, wywiera jedynie bardzo mały wpływ na ten kąt, i powoduje, przeciwnie, nieznaczne *zmniejszenie* rozmiarów na horyzoncie. Złudzenie nie powstaje zatem wskutek jakiejś zmiany wielkości obrazu na siatkówce, ani też jakichś wad oka. Musi ono polegać jedynie na błędzie w interpretacji. Niema, zdaje się, powodu do podawania w wątpliwość często przytaczanego wyjaśnienia, iż przyczyną omawianego zjawiska jest również zmiana wzorca. Dla oceny wielkości przedmiotów widzianych na sklepieniu niebieskiem przyjmujemy nieświadomie różne skale, zależnie od ich odległości od zenitu. Widzimy na niem chmury, płynące ku widnokręgowi, przyczem pozorne rozmiary ich wciąż maleją. Samolot staje się coraz mniejszy i mniejszy w miarę tego, jak oddala się od nas; kąt, pod którym go widzimy, zmniejsza się ciągle, aż wreszcie aeroplan znika za odległym wzgórzem, jako maleńki punkcik. Natomiast kąt widzenia księżycy nie ulega takiej zmianie, i widząc go w pobliżu horyzontu, oceniamy jego rozmiary według skali, którą przyzwyczajaliśmy się stosować do tej części sklepienia niebieskiego: dlatego też wydaje się on nam ogromny. Gdybyśmy ujrzeli samolot, wyłaniający się na widnokręgu spoza dalekiej wioski i posiadający te same rozmiary pozorne, co w chwili przelotu nad naszymi głowami, wydawałby się nam on większy od całej wioski — byłby to niewąt-

pliwie widok przerażający. A jednak tak właśnie sprawa przedstawia się w przypadku księżyca; niema więc w tem nic dziwnego, że wydaje się na widnokręgu większy, wbrew wszelkim naszym wiadomościom o jego rzeczywistych własnościach i wbrew naszemu przeświadczeniu, iż nie może on być wówczas n a p r a w d ę większy niż w zenicie. Rozumowanie powyższe ilustruje tablica IX A.

Księżyc bywa wyobrażany na rysunkach i obrazach zazwyczaj znacznie większy, niżby to być powinno ze względu na stosunki geometryczne. Być może, iż malarz zwiększa pozornie rozmiary księżyca dlatego, że żadna farba nie zdoła oddać należycie jego blasku, — chcąc więc w ten sposób podkreślić jego znaczenie i wspaniałość. Kwestja, czy postępowanie takie jest usprawiedliwione, należy do dziedziny twórczości artystycznej, którą nie możemy się tu zajmować. Jeżeli obraz ma przedstawiać przedmioty w prawdziwej wielkości kątowej, gdy odsuniemy go na odległość wyciągniętego ramienia, wówczas księżyc powinienby na nim mierzyć około 5 milimetrów w średnicy; przy wybo-rzej innej odległości, z jakiej ma się oglądać obraz, należałoby w odpowiednim stosunku zmienić rozmiary namalowanego księżyca.

Należy pamiętać, że niezależnie od tego, gdzie znajduje się obserwator, widzi on księżyc pod tym samym kątem, natomiast każdy inny przedmiot, przedstawiony na obrazie, zmienia swe rozmiary pozorne wraz ze zmianą położenia obserwatora. Z drugiej strony, z geometrycznego punktu widzenia, wielkość księżyca na rysunku zależy od tego, w jakiej odległości od oka znajduje się obraz. W przypadku fotografii zależy ona

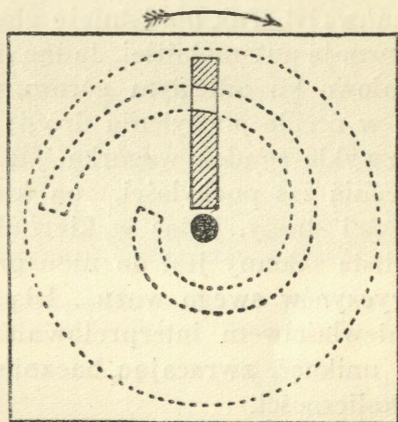
od odległości soczewki od kliszy. Na tabl. IX B spotykamy dość niezwykle przykład tego stanu rzeczy.

Innym typem złudzenia optycznego, niewątpliwie dobrane nam wszystkim znanym, jest pozorne zwiększenie się odległości na fotografii. Przy oglądaniu fotografii znajomego nam pokoju, uderza odrazu fakt, iż wydaje się on znacznie „głębszy“, niżbyśmy skłonni byli oczekiwać.

Z punktu widzenia stosunków geometrycznych, fotografia nie może kłamać; omawianego zjawiska nie można przypisać zniekształceniu obrazu, powstającemu skutkiem użycia soczewki. Złudzenie polega niewątpliwie znów na błędnej interpretacji, a w szczególności na zastosowaniu niewłaściwego wzorca oceny. Tak dalece przywykliśmy do tego, że odległe przedmioty są większe, niż na to wskazują pozorne ich rozmiary, iż stosujemy odmienną skalę oceny, gdy na nie patrzymy, lub myślimy o nich. Na szkicach początkującego rysownika dalekie wzgórza są z dziesięć razy wyższe, niż w rzeczywistości. Odwrotnie, gdy wewnątrz pokoju jest przedstawione w poprawnej geometrycznej postaci, takiej, jaką posiada obraz pokoju na siatkówce, wówczas przeceniamy odległość przedmiotów, znajdujących się w końcu pokoju.

Znane jest złudzenie, dotyczące ruchu, którego źródłem jest również zastosowanie fałszywego wzorca oceny. Podczas jazdy pociągiem, połączonej z dłuższem przypatrywaniem się mknącym za oknem widokom, wzrok przywyka do ruchu i uważa go niejako za stan normalny. Gdy pociąg zatrzyma się, doznajemy przez chwilę złudzenia, iż przedmioty za oknem poruszają się naprzód, albo też pociąg — wstecz. Proste doświad-

czenie, podane przez Bidwella (rys. 38), doskonale okazuje to zjawisko. „Przezroczem“ do latarni projekcyjnej służyć nam będzie kwadratowa płytk metalowa, w której wycięto pionową szczelinę. W innej płytce, obracającej się dookoła osi prostopadłej do pierwszej płytki, wycięto szczelinę w kształcie jednego zwoju



R y s. 38. W płytce, obracającej się przed latarnią projekcyjną, wycięto spiralną szparę, w płytce nieruchomej zaś — szczelinę prostolinjową. Cel tego urządzenia objaśniono w tekście. Ob. Bidwell, *Osobliwości światła i wzroku*, str. 147.

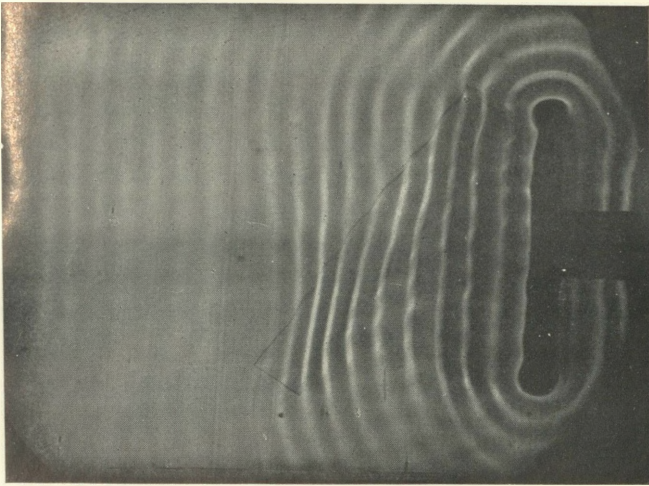
spirali. Po umieszczeniu całości w latarni projekcyjnej, światło może przejść tylko przez miejsce przecięcia się obu szczelin i na ekranie pojawia się jasna plama na ciemnem zresztą tle. Przy obrocie drugiej płytki plama świetlna wędruje po ekranie i znika wreszcie u góry; w tej samej chwili u dołu zjawia się nowe „światelko“, rozpoczynając znów ruch ku górze. W ten sposób, jedna jasna plamka wciąż biegnie za drugą.

Po kilkunastu sekundach zatrzymujemy obrót płytki: wydaje się wówczas, że plamka wędruje ku dołowi, i złudzenie to trwa przez kilka sekund. Podobnych zjawisk nie można przypisywać jakimś wadom optycznego mechanizmu oka; są one związane z interpretacją wrażeń przez mózg. Zapewne niejednen z czytelników przypomni sobie inne analogiczne złudzenia, jeśli je niegdyś zauważył. Tak np. istnieje złudzenie, którego czasami doznają automobiliści. Jadąc drogą, wznoszącą się stopniowo ku odległym góróm, łatwo można pomylić się w ocenie pochylenia drogi; mianowicie przecenia się zwykle spadek wzgórką, z którego się zjeżdża, niedocenia zaś pochyłości, na którą wóz się wspina. Z drugiej strony, jadąc w kierunku przeciwnym, automobilista skłonny jest do nieusprawiedliwionej dumy z wyczynów swego wozu... Błąd polega tu po prostu na niewłaściwym interpretowaniu obserwacji; można go uniknąć, zwracając bacniejszą uwagę na wszystkie okoliczności.

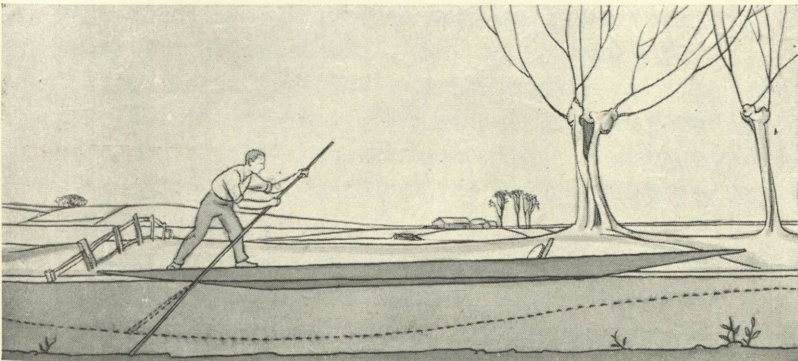
Trwałość wrażeń wzrokowych

Zjawisko znane pod nazwą trwania wrażeń wzrokowych ma charakter odmienny od dotychczas rozpatrywanych, jest ono bowiem związane z pewnemi stałemi właściwościami oka. Oddziaływanie wywarłe przez pewien bodziec na siatkówkę, jest postrzegane jeszcze przez ułamek sekundy po ustaniu działania bodźca. Tyndall zademonstrował to zjawisko przy pomocy bardzo prostego doświadczenia. Latarnia projekcyjna rzuca stożek promieni świetlnych; poruszając szybko białym prętem, przecinamy

TABLICA X

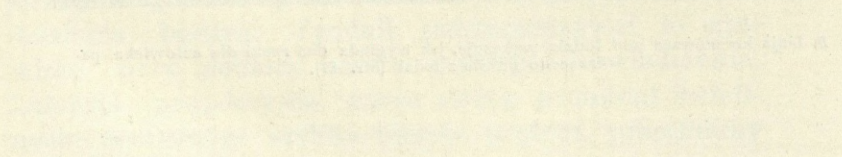
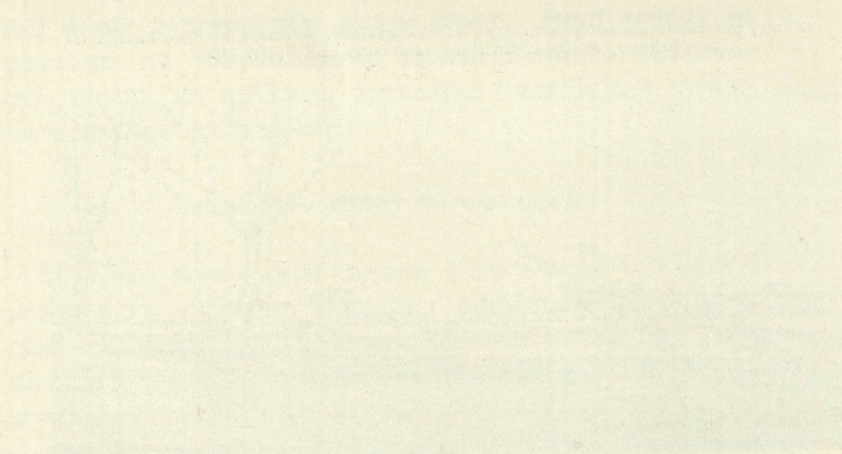
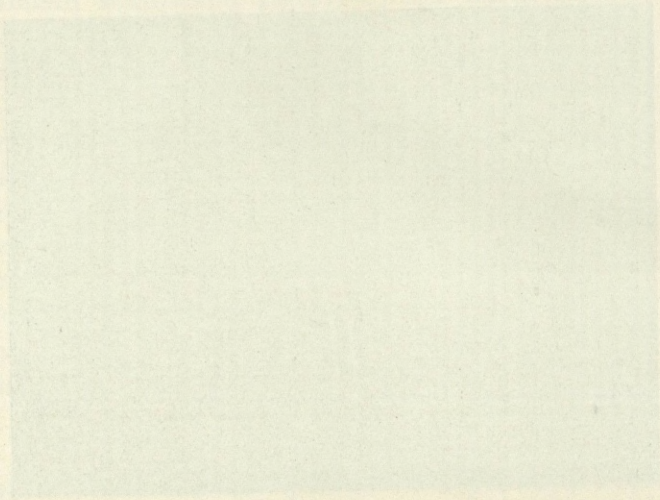


A. Fale, przechodzące nad prostokątną szybką szklaną, położoną na dnie basenu faldowego, okazują chwilowe załamanie czoła (str. 79).



B. Linja kreskowana pod łodzią wskazuje, jak wygląda dno rzeki dla człowieka, patrzącego na nie z łodzi (str. 81).

1911



stożek ów jakby mieczem. Nie widać przytem ruchu pręta, lecz białe koło, takie, jakieby powstało, gdyby w bieg promieni wstawić biały ekran, tylko mniej jasne: oko widzi pręt jednocześnie we wszystkich jego położeniach. Jeśli np. kręcimy szybko w powietrzu łańcuszkiem od zegarka w świetle lampy, zasilanej prądem przemiennym, to odbicie światła od ogniów ukazuje nam łańcuszek w szeregu położen kolejnych. Gładkie, bez dostrzegalnych przerw, działanie aparatu projekcyjnego w kinematografie, zawdzięczamy trwaniu każdego wrażenia przez czas dostatecznie długi.

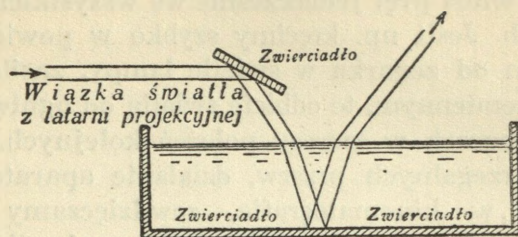
Zasadnicze zjawiska załamania światła

Zjawisko załamania światła rozpatrywaliśmy w związku z naturalnym układem optycznym, jakim jest oko, oraz z takimi układami sztucznymi, jak mikroskop i luneta. Z załamaniem światła wiąże się wiele dobrze znanych codziennych zjawisk, które stanowią ciekawe przykłady skutków zeń wpływających.

Przypominamy sobie, że załamanie zachodzi przy przejściu fal z jednego ośrodka do innego, jeżeli prędkości fal w obu ośrodkach są różne. Zbadajmy przede wszystkim to zjawisko przy pomocy kilku prostych doświadczeń.

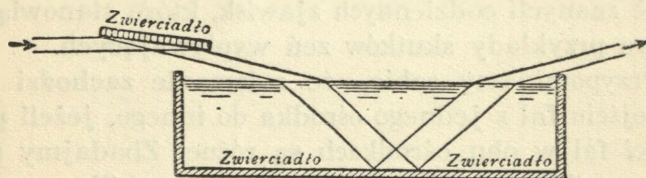
Rzućmy wiązkę światła (rys. 39 i 40) na zwierciadło, które odbija ją ku dołowi, wgłąb dużego naczynia z wodą. Woda jest zlekka zabarwiona, dzięki czemu widać w niej drogę wiązki świetlnej, jedna zaś ze ścian naczynia jest szklana, tak iż możemy obserwować, co się dzieje wewnątrz. Na dnie naczynia leży zwierciadło; wiązka promieni odbija się zatem od niego, raz

jeszcze przechodzi przez warstwę wody i wybiega na-
zewnątrz. Łatwo można przytem zaobserwować załama-
nie wiązki przy wejściu do wody i wyjściu z niej; można



Rys. 39. W naczyniu przedstawionem na rysunku znajduje się ciecz zlekka zabarwiona, przyczem przednia ściana naczynia jest szklana, aby można było widzieć drogę promieni. Dno naczynia jest zwierciadłem.

również stwierdzić, że im ukośniej rzucamy światło na powierzchnię wody, tem większy jest kąt odchylenia promieni od pierwotnego kierunku. Widzimy również,



Rys. 40. Na rysunku tym mamy przedstawioną drogę promieni, wchodzących do wody bardziej ukośnie, niż na rys. 39.

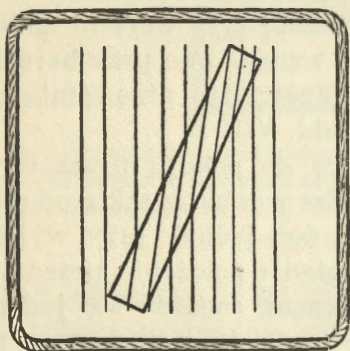
iż promień odbity od zwierciadlanego dna powraca drogą s y m e t r y c z n ą względem drogi promienia padającego. W szczególności, promień, który niemal muska powierzchnię przed wejściem do wody, wychodzi z niej tak samo ślizgając się prawie po powierzchni.

Mamy tu ilustrację ważnego twierdzenia, orzekającego, iż droga promienia świetlnego jest *odwracalna*. Jeżeli ustawimy zwierciadło dokładnie prostopadłe do wiązki światła, wówczas promienie powracają tą samą drogą, którą przyszły, podlegając tym samym odbiciom i załamaniom w odwrotnej kolejności. Doświadczenie wyżej opisane daje również pojęcie o wielkości odchylenia wiązki świetlnej przy wejściu do wody i wykazuje, jak znacznie wzrasta ono przy bardziej ukośnem padaniu wiązki. Fotografję urządzenia doświadczalnego widzimy na tabl. VIII B.

Wiązka światła, wchodząca do pokoju przez szybę okienną, zbacza na swej drodze wewnątrz szkła od pierwotnego kierunku, powraca doń jednak przy wyjściu z szyby, wskutek czego wygląd i położenie przedmiotów, znajdujących się za oknem, zmienia się jedynie bardzo nieznacznie. Jak się to dzieje, wskaże nam następujące doświadczenie z „basenem falowym“. Na dnie tegoż kładziemy płytkę szklaną w kształcie wydłużonego prostokąta. Czoła fal, wytworzonych w zwykły sposób, zbaczają na chwilę od pierwotnego kierunku w miejscu, gdzie woda jest płytsza, lecz powracają doń po minięciu płytki. Widzimy to na tabl. X A i na rys. 41. Szyba z dobrego szkła okiennego jedynie przesuwająco w bok promienie, nie zmieniając ich kierunku, to zaś trudno jest wogóle zauważyć. Jeżeli jednak obie powierzchnie szyby nie są do siebie równoległe, wówczas przedmioty widziane przez nią wydają się zniekształcone: zdarza się to często, gdy mamy do czynienia ze szkłem w gorszym gatunku.

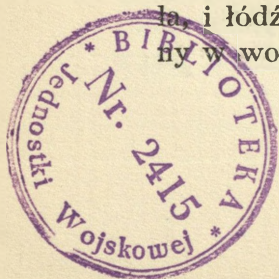
Teraz jesteśmy w stanie wyjaśnić jeszcze jedno dobrze znane zjawisko. Gdy patrzymy w wodę, a dno

jest widoczne, wówczas głębokość wydaje się zawsze mniejsza, niż jest w rzeczywistości. Oko sądzi o odległości przedmiotu, oceniając, gdzie znajduje się punkt, z którego zdają się wychodzić promienie, wpadające do oka. Spowoduje załamania światła przy wyjściu z wody, oko podlega złudzeniu, jak to okazują ry-



Rys. 41. W basenie falowym leży na dnie prostokątna płytką szklana; fale przebiegają nad nią. Chwilowe odchylenie czoła fal znika, gdy miną one płytkę. Doświadczenie to wyjaśnia, dlaczego kierunek promienia świetlnego nie ulega zmianie przy przejściu przez szybę szklaną o ściankach płasko-równoległych.

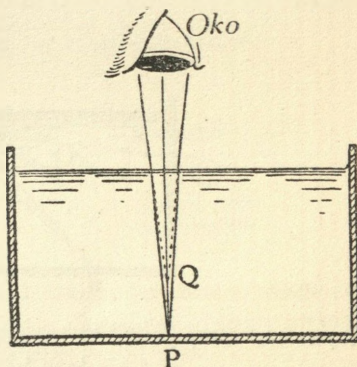
sunki 42 i 43. Przy patrzeniu prostopadle zgóry, pozorna głębokość wynosi $\frac{3}{4}$ istotnej; to pozorne zmniejszenie głębokości jest tem wybitniejsze, im bardziej ukośne są promienie. Tak np. człowiekowi, zaglądającemu do wnętrza akwarjum, dalsze części tegoż zawsze wydają się zakrzywione, ryby zaś, uwijające się w wodzie, przybierać mogą dziwne kształty. Gdy popychamy drągiem łódź na bardzo płytkiej wodzie, gdzie ociera się ona niemal o dno, doznajemy zawsze złudzenia, iż woda przed nami jest już tak płytka, że nieuchronnie utkniemy na piasku. Jednak w miarę tego, jak posuwamy się naprzód, woda jakby się pogłębiała, i łódź może płynąć dalej. Kij, częściowo zanurzony w wodzie, wydaje się złamany u powierzchni, po-



nieważ zanurzone jego części są pozornie przesunięte ku górze (ob. tabl. X B).

Załamanie promieni słonecznych w atmosferze wywiera wpływ na czas pozornego zachodu słońca. Ponieważ światło rozchodzi się w powietrzu wolniej niż w przestrzeni próżnej, wolnej od materji, przeto promienie słoneczne odchylają się od swego pierwotnego

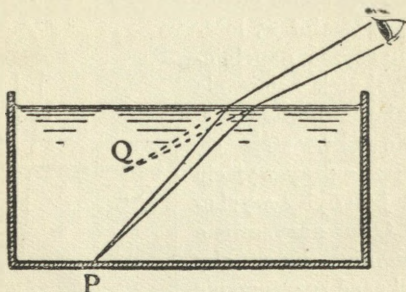
Rys. 42. Oko O spogląda pionowo zgóry na przedmiot P , leżący na dnie naczynia napełnionego wodą. Wskutek załamania światła wiązka promieni z P wpadająca do oka, staje się bardziej rozbieżną przy wyjściu z wody, tak, jakgdyby wychodziła z Q . Oko narysowano nieproporcjonalnie duże, aby można było okazać rozszerzenie się wiązki. Odległość Q od powierzchni wynosi $\frac{3}{4}$ całkowitej głębokości wody.



kierunku, zanim dobiegną do powierzchni ziemi. Ta zmiana kierunku jest największa wtedy, gdy promienie padają na powierzchnię atmosfery jaknajukośniej, t. zn. gdy słońce jest na widnokręgu. Wówczas (rys. 44) promienie, wychodzące z punktu P tarczy słonecznej, dotrą jeszcze do obserwatora w O , jakkolwiek jego horyzont przypada w kierunku OH —t. j. w kierunku równoległym do spokojnej powierzchni wody w O . Punkt P jest więc jeszcze widoczny, choć znajduje się już pod horyzontem. Słońce zachodzi „optycznie” p ó ź n i e j niż „geometrycznie”; zmiana kierunku promieni ma war-

tość taką, że „geometryczny“ zachód słońca następuje mniej więcej wtedy, gdy *dolny* brzeg tarczy dotyka właśnie horyzontu.

W następnym rozdziale rozpatrzmy towarzyszące załamaniu rozszczepienie światła białego na jego barwy składowe. Obecnie wystarczy nadmienić, iż promienie niebieskie lub zielone załamują się bardziej, niż żółte lub czerwone. Wskutek tego ostatnie promienie za-

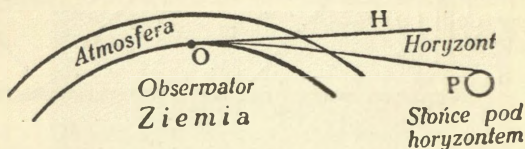


R y s. 43. Przy patrzeniu bardziej ukośnem *Q* jest bliżej powierzchni i nie leży bezpośrednio nad *P*.

chodzącego słońca należą właśnie do bardziej łamliwych — jeśli nie przeszkodzą temu inne okoliczności, co zresztą niemal zawsze się zdarza. Stąd pochodzi t. zw. „*zielony promień*“, rozbłyskujący niekiedy na parę sekund tuż po zachodzie, lub tuż przed wschodem słońca; pojawienia się jego można oczekiwać tylko wtedy, gdy powietrze jest bardzo spokojne i jednorodne.

Nawet w przypadku, gdy światło przechodzi z jednego ośrodka gazowego do innego, ulega ono załamaniu, jeśli gęstości tych gazów są różne, lub jeśli gęstość jest niejednakowa w różnych miejscach tego samego gazu, np. w razie występowania różnic temperatury lub ci-

śnienia. Przedmioty widziane przez warstwę powietrza, unoszącego się nad ogniskiem rozpalonem w polu, zdają się drżeć i falować, gdyż promienie świetlne ulegają nieregularnym odchyleniom w chaotycznej mieszaninie gorących i zimnych gazów. To samo dostrzegamy, patrząc poprzez ogrzane prądy powietrzne, unoszące się nad świecą lub lampą. W gorących krajach powietrze w sąsiedztwie gruntu ogrzewa się od rozpalonej ziemi, dzięki czemu odległe szczegóły krajobrazu znajdują się w ciągłym ruchu.

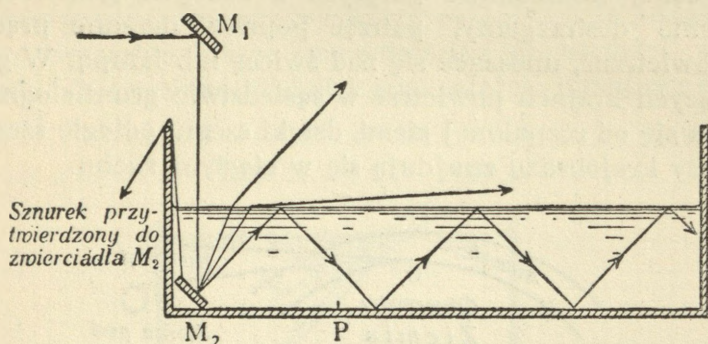


Rys. 44. Obserwator, patrząc w kierunku horyzontu, widzi słońce, znajdujące się pod horyzontem, dzięki odchyleniu promieni w atmosferze

Całkowite odbicie wewnętrzne

T. zw. całkowite odbicie wewnętrzne jest przyczyną wielu interesujących zjawisk. Wracając do doświadczenia, przedstawionego na rys. 40, możemy zauważyć, że promień, który po odbiciu od dna ledwo zdołał — nader ukośnie — wymknąć się z naczynia, był przedtem stosunkowo silnie pochylony względem powierzchni wody. Możemy zadać sobie pytanie, co dzieje się z promieniem, który padnie zdołu na tę powierzchnię, tworząc z nią kąt jeszcze mniejszy. Doświadczenie to łatwo wykonać, jeśli inaczej umieścimy zwierciadła.

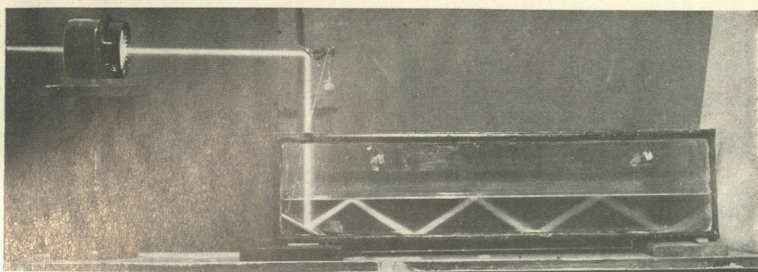
M_1 rzuca wiązkę światła wgląd naczynia, pionowo ku dołowi, na drugie zwierciadło M_2 (rys. 45), którego nachylenie można zmieniać. Przy stopniowym pochylaniu M_2 , poczynając od położenia poziomego, promień od-



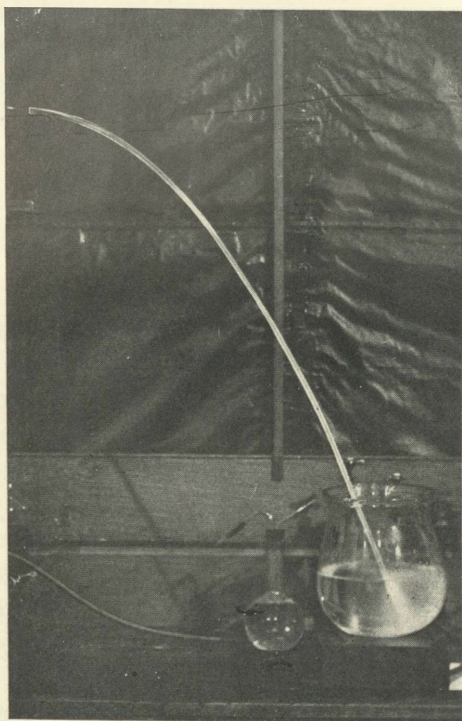
Rys. 45. Przekrój naczynia z wodą, w którym można zdemontować całkowite odbicie wewnętrzne. Wiązka światła z latarni projekcyjnej, rzucona na zwierciadło M_1 , odbija się odeń i pada na M_2 . To ostatnie zwierciadło może być pochylane pod różnymi kątami przy pomocy przywiązanego doń sznurka. W pewnym położeniu odbija ono wiązkę, która łatwo wydostaje się z wody; w innym — promień ledwo zdoła wybiec, ślizgając się niemal po powierzchni; w jeszcze innym—ulega on wewnętrznemu odbiciu od powierzchni wody.—Na dnie naczynia leży również zwierciadło.

bity pada na powierzchnię wody coraz to ukośniej; przy pewnym kącie nachylenia ledwo udaje mu się wydostać nazewnątrz, jak to widzieliśmy poprzednio. Wreszcie, po przekroczeniu tego kąta, promień nie może już wyjść z wody i zostaje odbity spowrotem ku dołowi. Odbicie to jest *całkowite*, a więc doskonalsze, niż gdybyśmy powierzchnię wody zastąpili srebrzonem

TABLICA XI



A. Na tej fotografii rzeczywistego doświadczenia widzimy kilka całkowitych odbić od powierzchni wody. Można również spostrzec, że ostatni promień, wychodzący z naczynia, ulega przytem załamaniu. Zwierciadło M_2 (rys. 45) nachylone jest tu bardziej niż na fotografii przedstawionej na tabl. VIII B (str. 85).



B. Doświadczenie Tyndalla, ilustrujące zjawisko całkowitego odbicia wewnętrznego. Światło wchodzi do strumienia wody w miejscu, gdzie wybiega on z naczynia i unoszone jest ku dołowi przez strumień. ródłem światła jest łuk elektryczny, ustawiony poza naczyniem; soczewka, umieszczona w ścianie naczynia, skupia światło na strumieniu. Zarówno łuk, jak soczewka nie są widoczne na fotografii (str. 85).



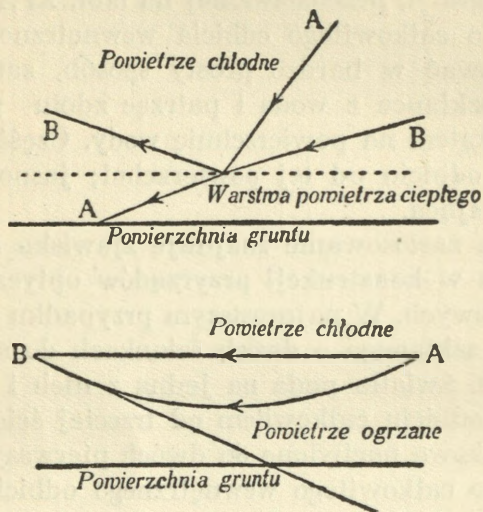
zwierciadłem; stąd to pochodzi nazwa zjawiska. Jeżeli naczynie jest dostatecznie długie w porównaniu z głębokością wody, odbicia od powierzchni i od zwierciadła na dnie mogą zachodzić kilkakrotnie. Widzimy to na fotografii, przedstawionej na tabl. XI A.

Zjawisko całkowitego odbicia wewnętrznego można zaobserwować w bardzo prosty sposób, zanurzwszy łyżkę w szklance z wodą i patrząc zdołu pod odpowiednim kątem na powierzchnię wody. Część łyżki widzimy w odbiciu od tej powierzchni; jasność obrazu jest uderzająca.

Szerokie zastosowanie znajduje zjawisko całkowitego odbicia w konstrukcji przyrządów optycznych, np. lornet polowych. W najprostszym przypadku używa się pryzmatu szklanego o dwóch ściankach do siebie prostopadłych. Światło pada na jedną z nich i wychodzi drugą po odbiciu całkowitem od trzeciej ściany, która jest jednakowo nachylona do dwóch pierwszych.

Zjawisko całkowitego wewnętrznego odbicia ilustruje piękne doświadczenie Tyndalla, demonstrowane przezeń przed laty na odczycie w Royal Institution. Z naczynia (tabl. XI B) wypływa woda nieprzerwanym strumieniem przez otwór wpobliżu dna. Strumień ten na całej swej długości, aż do miejsca, gdzie niemal bezszumnie wpada do podstawionego naczynia, jest spoisty, nie rozpada się na krople. W ściance górnego zbiornika, naprzeciw otworu, wprawiona jest soczewka, zapomocą której skupiamy w początkowym punkcie strumienia wiązkę światła lampy łukowej. Wiązka ta ulega licznym odbiciom kolejnym na zewnętrznej powierzchni strumienia, tak że wydaje się, jakgdyby woda unosiła z sobą światło ku dołowi. Nieraz można zaobserwować po-

dobne zjawisko np. przy nalewaniu wody z dzbanka do miednicy, jakkolwiek nie uwydatnia się ono może tak wybitnie, jak w opisanem doświadczeniu. Podobne urządzenie, tylko z zamianą strumienia wody na



Rys. 46 i 47. Gdy dolne warstwy atmosfery są cieplejsze niż sąsiednie górne, wówczas promienie świetlne mogą ulec załamaniu lub nawet wewnętrznemu odbiciu, w sposób przedstawiony na powyższych schematach.

wygięty pręt szklany, stosuje się czasami w celu doprowadzenia wiązki światła, mającej oświetlać przedmioty oglądane przez mikroskop.

Gdy powierzchnia gruntu ogrzeje się silnie od słońca, przylegające do niej warstwy powietrza mogą mieć temperaturę wyższą niż sąsiednie warstwy górne; istnieją wówczas w atmosferze warunki, sprzyjające powstaniu zjawiska całkowitego odbicia wewnętrznego, które

stanowi zwykłą przyczynę powstawania *mirażu* (*fata morgana*).

Wyobraźmy sobie dla prostoty, że pomiędzy warstwą powietrza gorącego wpobliżu powierzchni gruntu, a leżącą nad nią warstwą chłodniejszą, istnieje wyraźna granica, jak to zaznaczono na rys. 46. Promień *A* jest po przekroczeniu tej granicy mniej nachylony do poziomu niż poprzednio, ponieważ prędkość światła w powietrzu ciepłym jest większa niż w zimnym. Promień *B* pada na powierzchnię graniczną tak ukośnie, że odbija się w niej całkowicie, jakby od zwierciadła. Granica pomiędzy warstwami cieplejszemi a zimnemi nigdy nie jest tak ostra, jak na rysunku: zawsze istnieje stopniowe przejście od jednych do drugich. Wynik pozostaje jednak ten sam, a tylko droga promienia jest w tym przypadku zakrzywiona, jak to widzimy na rys. 47, nie zaś ostro załamana, jak na rys. 46. Promień, wybiegający z odległego przedmiotu, może zatem wpaść do oka nietylko po swej zwykłej drodze prostolinjowej, lecz również idąc po linii zakrzywionej (rys. 47). Oko widzi wówczas promienie, które biegną od jakiegoś drzewa, od nieba i t. d. tak, jakby wychodziły one z ziemi, co oczywiście wywołuje złudzenie, iż pomiędzy obserwatorem a owym drzewem znajduje się woda; obecność wody poznajemy przecież zawsze po tem, że w niej odbijają się różne przedmioty. Zjawisko to można często spostrzec w dzień upalny nawet w naszych szerokościach geograficznych, gdy bruk rozgrzeje się silnie, zwłaszcza, gdy oko znajduje się, dzięki ukształtowaniu terenu, mniej więcej na poziomie bardziej odległych części gruntu; niekiedy można tam wówczas dostrzec jakby odbicie nieba, czy też barwnych ubiorów.

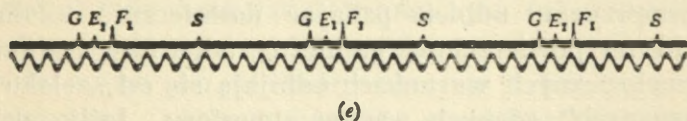
Niektóre ciekawe zjawiska, zachodzące przy transmisji radjowej, tłumaczą się w sposób bardzo podobny do powyższego wyjaśnienia mirażu. W górnych obszarach atmosfery znajdują się warstwy, odbijające fale radjowe spowrotem ku ziemi. Gdyby nie ta okoliczność, transmisja radjowa na wielkie odległości byłaby prawie niemożliwa, zwłaszcza przy użyciu fal krótkich, powiedzmy, 50-metrowych: fale te bowiem nie podążałyby — zachowując dostateczne natężenie — za krzywizną ziemi. Jak już mówiliśmy, natura ich jest zupełnie taka sama, jak i fal świetlnych, tak iż analogja jest tu bardzo bliska. Wspomniane warstwy zawierają wiele cząsteczek naelektryzowanych tudzież wolnych elektronów, których obecność zawdzięczamy promieniowaniu słonecznemu, zwłaszcza o falach krótszych niż świetlne. Energja tych promieniowań zużywa się na częściowe rozbijanie cząsteczek powietrza, odrywanie od niektórych z nich elektronów; te ostatnie wkońcu przyczepiają się do innych cząsteczek, tak iż otrzymujemy w atmosferze zarówno cząsteczki naelektryzowane dodatnio i ujemnie, jak i elektrony swobodne. Jednocześnie odbywa się nieustannie rekombinacja, tak iż stan atmosfery odpowiada równowadze obu tych procesów. Gdy promieniowanie posiada duże natężenie, silniejsza też jest „elektryfikacja“ atmosfery w tych warstwach, przez które promienie przenikają. Ponieważ energja ich ulega przytem pochłonięciu, nie wywierają one nigdy większego wpływu na powietrze w pobliżu powierzchni ziemi; w warstwach wyższych natomiast „elektryfikacja“ jest dość silna, aby mieć wpływ dostrzegalny na rozchodzenie się fal radjowych.

Wpływ ten polega na tem, iż przy przejściu z warstw dolnych do warstw „zelektryfikowanych“ fale ulegają załamaniu, a więc odchyleniu w bok, zupełnie jak promień świetlny, przechodzący z wody do powietrza w doświadczeniu na rys. 39. Zjawisko to zaobserwowano doświadczalnie, i można też zdać zeń sprawę przy pomocy rachunku, opartego na elektromagnetycznej teorii światła. Dla naszych celów obecnych wystarczy stwierdzenie faktu.

Otóż, podobnie jak promień światła na rys. 45 ulega wewnętrznemu odbiciu padając dostatecznie ukośnie zdołu na powierzchnię graniczną, tak i fale radjowe w analogicznych warunkach odbijają się od „zelektryfikowanych“ górnych warstw atmosfery. Jeśli „elektryfikacja“ jest dostatecznie silna, odbicie nastąpi nawet przy prostopadłym padaniu fal na warstwę. Często jednak zdarza się, zwłaszcza w porze nocnej, gdy stopień „elektryfikacji“ jest mniejszy, że odbicie zachodzi tylko przy dostatecznie ukośnem padaniu. „Promień“ odbity powraca ku ziemi i może być wykryty w miejscowościach dostatecznie odległych, gdy tymczasem do miejsc bliższych sygnał nie dochodzi. Przypomina to zupełnie stosunki, które spotkaliśmy w doświadczeniu, przedstawionem na rys. 45, gdzie promień odbity nie może paść na dno basenu bliżej zwierciadła M_2 niż w punkcie P .

Przejście od atmosfery niezelektryfikowanej do warstwy, zawierającej rozdzielone naboje elektryczne nie jest — i zresztą wcale nie musi być — nagłe. Im bardziej stopniowe jest to przejście, tem łagodniej zakrzywioną jest droga promienia odbitego, jak to widzimy na schemacie rys. 47.

W atmosferze istnieją przynajmniej dwie warstwy, które powodują takie odbicie fal radiowych: jedna na wysokości nieco przekraczającej 100 km, znana odawna pod nazwą warstwy Kennelly'ego-Heaviside'a, druga na wysokości kilka razy większej, zresztą nader zmiennej, wykryta w 1927 roku przez Appletona. Sygnały, wysyłane z East London College, otrzymuje się w King's College na Strandzie niby echa głosowe, odbite od sufitu, przyczem jeden sygnał daje

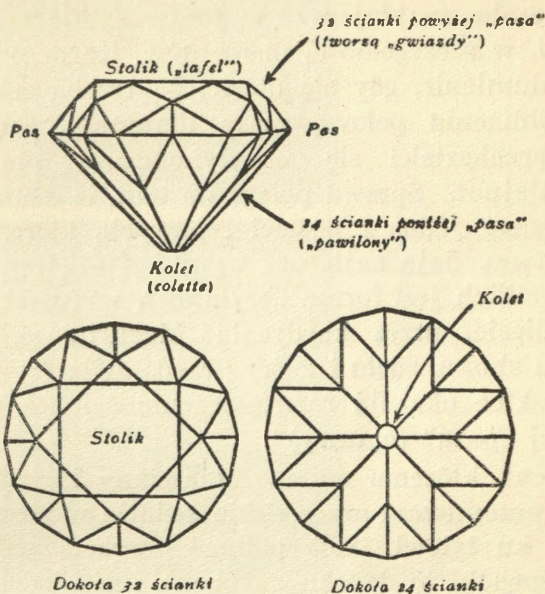


Rys. 48. Wykres przyrządu samopiszącego, okazujący odbicie fal radiowych od różnych warstw atmosfery (E. V. Appleton).

kilka ech. Na rys. 48 mamy wykres odbioru ciekawego szeregu takich ech. Linja falista jest to skala czasu: 1115 całkowitych fal przypada na jedną sekundę. Ząbek *G* oznacza chwilę otrzymania sygnału drogą przyziemną; — chwila ta zgadza się, praktycznie biorąc, z chwilą wysłania sygnału. *E* jest znakiem przybycia pierwszego echa od warstwy najniższej. W *F* — przychodzi sygnał odbity od warstwy wyższej, w *S* zaznacza się słabe echo, dochodzące z tak wielkiej odległości, że przyczyna je wywołująca nie jest jeszcze znana.

Jest rzeczą ciekawą, że głoś również spotyka w górnych częściach atmosfery warstwy, od których może ulec odbiciu, jeśli pada na nie dostatecznie ukośnie. Warstwy te są zapewne w jakimś związku z temi, któ-

re omawialiśmy przed chwilą. Pochłanianie promieniowania słonecznego, stanowiące przyczynę „elektryfikacji“, musi wytwarzać ciepło; niedawno obliczono, iż w górnych częściach atmosfery muszą znajdować się



Rys. 49. Górny rysunek przedstawia wygląd diamentu oszlifowanego na brylant, z boku; rysunki dolne przedstawiają rozmieszczenie ścianek powyżej i poniżej „pasa” (oprawy).

warstwy o bardzo wysokiej temperaturze. W powietrzu ogrzanem głos rozchodzi się z prędkością większą niż normalna, a więc musi zachodzić odchylenie „promieni“ głosowych w sposób zupełnie analogiczny do opisanych poprzednio zjawisk świetlnych. Na tem polega przyczyna faktu, że echa bardzo silnych detona-

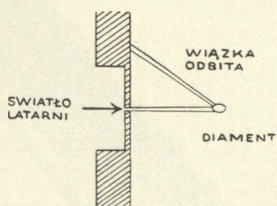
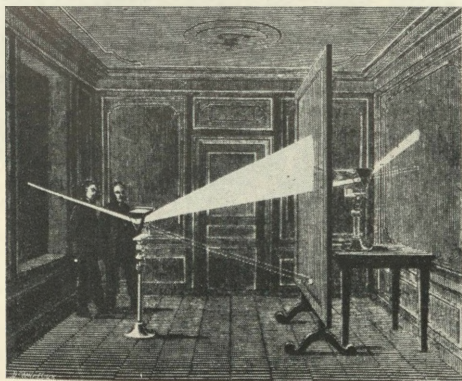
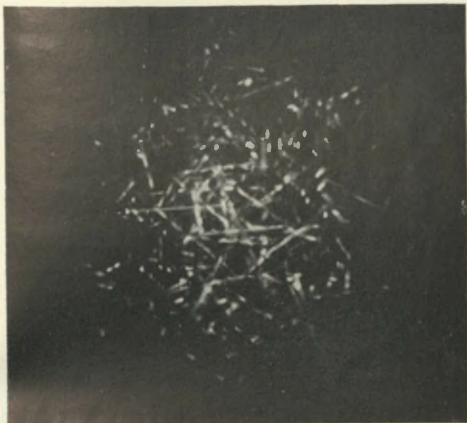
cyj można słyszeć nie tylko w pobliżu źródła dźwięku, lecz również na bardzo znacznych odległościach, natomiast w odległościach pośrednich może panować zupełna cisza.

Ciekawy przykład zastosowania zjawisk odbicia i załamania znajdujemy w pracy szlifierza drogich kamieni, w szczególności diamentów. Każdego ogarnąć musi zdumienie, gdy się dowie, że trzeba zeszlifować w przybliżeniu połowę masy diamentu, zanim kamień przekształci się w wykończony, prawdziwie cenny klejnot. Sprawa polega na tem, iż diament musi otrzymać jedną z postaci typowych, które, jak się przekonano, dają najlepsze wyniki. Najkorzystniejszą ze wszystkich jest forma „brylantu“, wynaleziona, jak wieść niesie, przez kardynała Mazariniego. Widok brylantu z boku, zdołu i z góry przedstawia fig. 49. Dwa dolne szkice okazują rozmieszczenie ścianek powyżej i poniżej „pasa“ (oprawy)*.

Diament, któremu nadano omawiany kształt, zupełnie nie przepuszcza przez siebie światła w kierunku od przodu ku tyłowi. Gdy patrzeć przezeń na światło w ten sposób, że do oka zwrócona jest „kolet“, wówczas wydaje się on zupełnie ciemny. Wszystkie promienie, padające na przednią część brylantu, są odrzucone wstecz i wychodzą znów z części przedniej, w ogólności nie w dokładnie tym samym kierunku i nie z tej samej ścianki, przez którą dany promień wszedł do wnętrza. Na rys. 50 wykreślono kilka takich możliwych dróg promieni. W ten sposób brylant uzyskuje tak wysoko cenioną własność „iskrzenia się“. Nie-

* Za pomoc przy ustaleniu polskiej terminologii szlifierskiej składam podziękowanie Panu A. Turczyńskiemu. *Przyp. tłum.*

TABLICA XII



A. Odbicia światła od pojedynczego diamentu. Światło wchodzi do pokoju przez mały otworek w ścianie, jak to pokazano na załączonym schemacie. Otworek ten jest również widoczny na środku fotografii. Można też dostrzec waziotką słabą wiązkę światła aż do miejsca, gdzie pada ona na diament, dzieląc się tam na wielką ilość promieni odbitych; każdy z nich daje na ścianie jedną plamkę (str. 96).

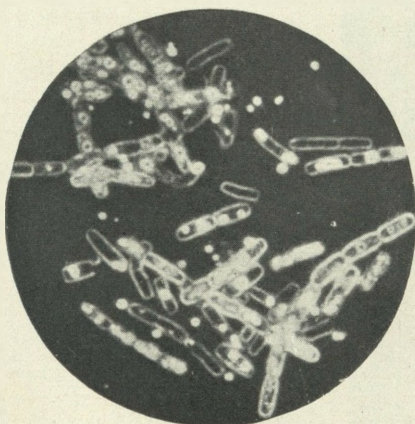
B. W takim samym urządzeniu jak poprzednie zamiast diamentu użyto kryształu cyrkonu (str. 96).

C. Doświadczenie Newtona, według rysunku z dzieła Guillemina „*Forces of Nature*”. Promień światła słonecznego jest rozszczepiony na widmo zapomocą pryzmatu. Część tego widma przechodzi przez szczelinę w ekranie i pada na drugi pryzmat, nie ulegając już wższakże dalszemu rozszczepieniu (str. 98 i 100).

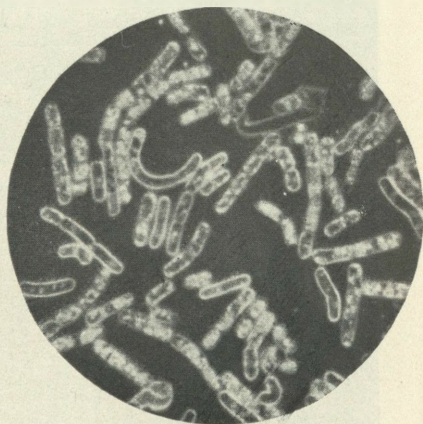
TABLICA XIII



A. Stary napis na podstawie głosi: „Pierwszy teleskop odbiciowy wynaleziony przez Sir Isaaka Newtona i wykonany przezeń własnoręcznie w r. 1671”. Wysokość przyrządu około 45 cm. Za pozwoleniem *Royal Society* (str. 121).



1



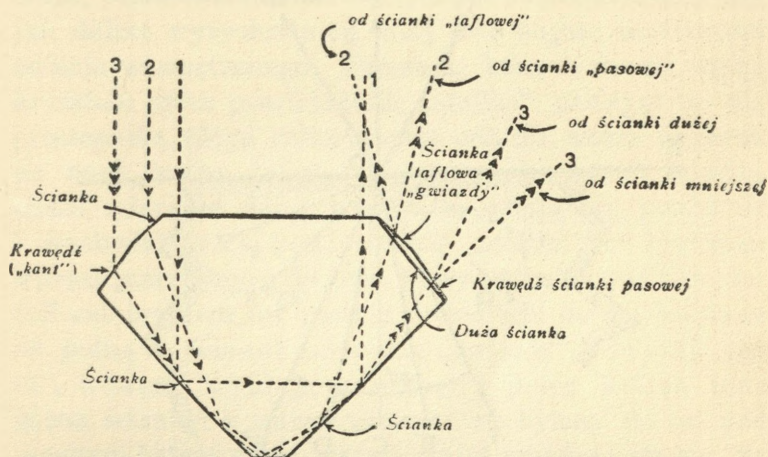
2

B. Mikrofotografie bakterij (*B. Megatherium*, powiększenie 2000), wykonane przez J. E. Barnarda, członka *Royal Society*:

(1) przy zastosowaniu światła widzialnego, w możliwie najkorzystniejszych warunkach;
(2) w świetle nadfioletowym (2743 Å).

W obiektach, które mają na zdjęciu (1) wygląd okrągłych białych plamek można w (2) rozróżnić drobniejsze szczegóły (str. 124).

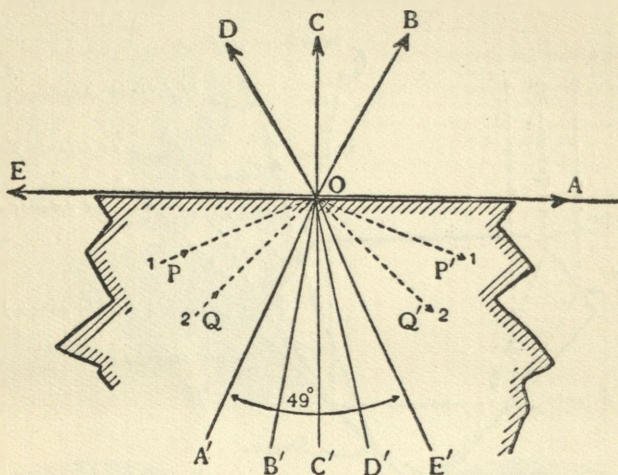
zależnie od tego, gdzie się znajduje i w jakim położeniu względem oka go trzymamy, zawsze jest rzeczą niemal pewną, że do oka dostanie się od klejnotu jakiś promień, pochodzący z któregoś ze źródeł światła w pokoju, czy też od jasnego nieba. Można powiedzieć, że brylant odbija nieustannie światło z nie-



Rys. 50. Widzimy tu kilka dróg, (wybranych w charakterze przykładu spośród wielu innych), któremi biegnie promień świetlny, wchodzący do brylantu sprzodu; po 2 załamaniach i licznych całkowitych odbiciach wewnętrznych, wybiega on znów z części przedniej, nie zdoławszy dostać się na drugą stronę brylantu.

oczekiwanych źródeł; nie może on, oczywiście, dawać więcej światła, niż go otrzymuje, lecz odbicia są tak liczne i jasne, a przytem zmieniają się tak często, że gra ich jest nader miła dla oka, tem bardziej, że zachodzi tu również rozszczepienie światła białego na barwy, które, jak zobaczymy wkrótce, zawsze towarzyszy załamaniu światła.

Diamant, będący poprostu, jak wiadomo, krystaliczną postacią węgla, odznacza się bardzo silnem załamaniem promieni światła, które wchodzi do jego wnętrza. Ilustruje to rys. 51. Promienie *A*, *B*, *C*, *D*, *E* załamują się przy wejściu do diamentu i biegną dalej



Rys. 51. Spółczynnik załamania światła diamentu jest bardzo znaczny. $A'O A$ zaledwie jeszcze może wybiec z kryształu; promienie takie, jak QOQ' ulegają całkowitemu odbiciu wewnętrznemu. Promienie mogą przebiegać zaznaczone drogi w obu kierunkach.

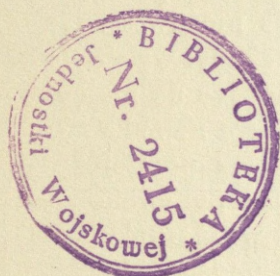
w kierunku A' , B' , C' , D' , E' . Światło rozchodzi się w diamentcie o wiele wolniej niż w powietrzu; stosunek odpowiednich prędkości wynosi średnio 2,5, zależy on zresztą od długości fali. Z tego powodu całkowite odbicie wewnętrzne okazuje tu również pewne godne uwagi własności. Promienie $A'O$, $B'O$... $E'O$ wychodzą z diamentu w kierunkach OA , OB ,... Jednakże spo-

śródo nich $A'O$ i $E'O$ ledwo zdołają się „wymknąć“, i to ślizgając się wzdłuż powierzchni; natomiast promienie, wychodzące z punktów 1, 2... wzdłuż linii PO , QO i t. d., wogóle nie opuszczają wnętrza diamentu i zostaną odbite wewnętrznie jako OP' , OQ' ... Kąt $A'OE'$ wynosi za ledwie 49° . Jeżeli teraz przyjrzymy się przekrojowi brylantu, przedstawionemu na rys. 50, to przekonamy się, jak dalece wyzyskane są tutaj owe bogate możliwości odbicia wewnętrznego. Promień, który wchodzi wgłąb kryształu przez powierzchnię „stolika“, padając na nią prostopadłe, ulega całkowitemu odbiciu, skoro napotka na swej drodze jedną ze ścianek bocznych poniżej „pasa“: biegnie dalej wpoprzek, odbija się ponownie i wychodzi przez powierzchnię „stolika“ w kierunku wprost przeciwnym do tego, który posiadał padając. Jeżeli zaś promień ów padnie równolegle do osi klejnotu na jedną ze ścianek bocznych „gwiazdy“ powyżej „pasa“, wówczas wybiega nazewnątrz przez którąś inną górną ściankę; a nawet promień nachylony do osi pod pewnym kątem może jeszcze wyjść przednią stroną. Na rysunku wykreślono kilka możliwych dróg; każdą z nich światło może przebywać w dwóch przeciwnych kierunkach.

Zjawiska te można zademonstrować przy pomocy pięknego doświadczenia pokazowego. Przez mały otwór w ścianie wpuszczamy do sali smukłą wiązkę światła z lampy łukowej, znajdującej się w sąsiednim pokoju; wiązka ta pada na brylant, umieszczony przednią ścianką prostopadłe do niej w odległości około metra od otworka. Ściany zaciemnionej sali pokrywają się wówczas setkami świetlnych punkcików, powstałych przez odbicie światła od brylantu; przy po-

ruszaniu kamienia, opisują one zawile drogi, splatające się w przepiękne wzory (tablica XII A).

Inne kryształy, jak np. cyrkon, okazują równie piękne zjawiska, nie są jednak tak cenione jako klejnoty, spowodu znacznie mniejszej twardości. Odbicia od kryształu cyrkonu widzimy na tablicy XII B.



ROZDZIAŁ III

B A R W Y

Widmo

JEDNĄ z cech światła jest jego *barwa*. Zadajmy sobie teraz pytanie: od jakiej własności „mechanizmu” światła cecha ta zależy?

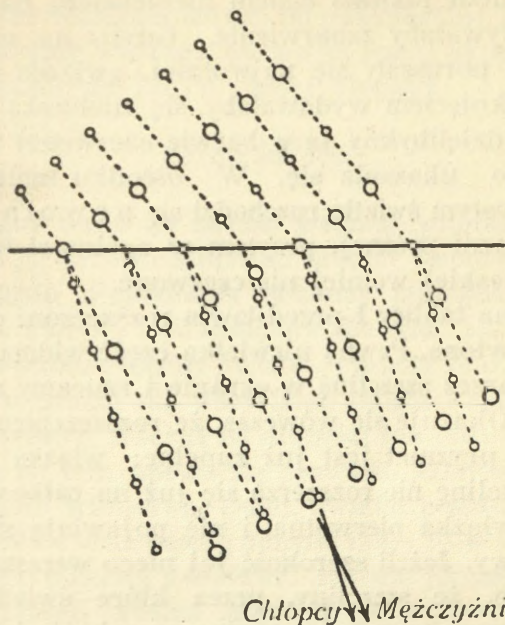
Jeśli mamy uważać światło za ciąg fal w pewnym ośrodku, któremu nadajemy miano eteru, to odpowiedź na to pytanie jest natychmiastowa. *Barwa zależy od długości fali światła*, to znaczy od odległości pomiędzy dwiema sąsiednimi „górami” fali. Dowód tego prostego twierdzenia odłożymy na później, zanim go jednak podamy, dobrze będzie pamiętać o tym stanie rzeczy.

Światło, pochodzące z dowolnego źródła, może być wogółności rozłożone na szereg składników, które oddzielnie wzięte dają wrażenie barw. Składniki te nie są od siebie ostro odgraniczone, lecz zlewają się ze sobą wzajemnie w łagodnych przejściach. Najprostsza metoda analizy światła polega na użyciu szklanego pryzmatu; w ten właśnie sposób Newton rozpoczął długi szereg doświadczeń, które stały się podwaliną optyki fizycznej i stanowią jedną z najważniejszych jego zdobyczy naukowych. Urządzenie doświadczeń Newto-

na widzimy na tablicach XII C i I B. Wiązka światła słonecznego wchodzi do ciemnego pokoju przez otwór w okiennicy i pada na pryzmat szklany. Przy wyjściu z pryzmatu mamy zupełny rozkład: światło zostało rozciągnięte w pas barwny, zwany *widmem*. Czerwony kraniec widma tworzą promienie najmniej odchyłone przez pryzmat, fioletowy — promienie, odchyłone najsilniej. Inne barwy mieszczą się pomiędzy temi granicami, nie oddzielone od siebie nawzajem jakimiś wyraźnemi linjami, jakkolwiek naturalne poczucie barw wyróżnia w widmie barwy czerwoną, pomarańczową, żółtą, zieloną i różne odcienie błękitnej i fioletowej. Rys. D tablicy XIV przedstawia barwną fotografię widma.

Jak się okazało, fale czerwone — znów wyprzedzamy tutaj tok wykładu — są najdłuższe ze wszystkich, jakie dostrzegamy w widmie; na drugim jego końcu przypadają fale najkrótsze. Posługiwaliśmy się już porównaniem fal świetlnych z szeregiem maszerujących żołnierzy, którzy napotykają granicę nierównego, trudnego do marszu terenu, przecinającą ukośnie ich front. Podobnie, jak ten ostatni skręca nieco i dąży do przybrania kierunku równoległego do owej linii granicznej: tak fale padające zmieniają również swój kierunek, i to w ten sam sposób. Obecnie analogję tę rozszerzymy. Jeżeli w owych szeregach maszerują mali chłopcy, nie zaś dorośli mężczyźni, wówczas zmiana kierunku marszu będzie większa, gdyż nierówności gruntu, na który wkraczają, stanowią dla ich krótkich nówek większą przeszkodę. Jeśli zaś będą maszerowali zarówno mężczyźni, jak chłopcy (fig. 52), to na granicy rozdziela się jedni od drugich: chłopcy skręcają bardziej

niż dorośli i nie tylko będą pozostawać nieco w tyle, lecz będą posuwali się w innym kierunku. W podobny sposób pryzmat oddziela fale krótkie od długich; przy-



Rys. 52. W górnej części rysunku maszerują w prostoliniowych szeregach naprzemian mężczyźni i chłopcy (oznaczeni większymi i mniejszymi kółkami) po gruncie równym. Dolna część rysunku oznacza grunt nierówny, trudny do marszu; szeregi utworzone przez chłopców zbaczają na nim więcej, niż mężczyźni. Dla zachowania analogji przypuszczamy, że każdy szereg stara się zachować swą linię i że nie wchodzi one sobie nawzajem w drogę. Odległości pomiędzy szeregami *nie* przedstawiają długości fal.

toczona wyżej analogja może służyć do zapamiętania, że te ostatnie są mniej odchylane przez pryzmat, niż pierwsze.

Fale wszelkich długości, czyli wszelkich barw, rozchodzą się w przestrzeni próżnej z tą samą prędkością. Gdyby było inaczej, gwiazda, skrywająca się właśnie za innym jakimś ciałem niebieskiem, np. księżycem, okazywałaby zabarwienie. Gdyby np. promienie niebieskie poruszały się najwolniej, gwiazda taka tuż przed zniknięciem wydawałaby się niebieska; i przeciwnie, widzielibyśmy ją w barwie czerwonej w chwili ponownego ukazania się. W ośrodku materialnym przezroczystym światło rozchodzi się p o w o l n i e j, niż w przestrzeni próżnej, przytem w ogólności fale krótkie (niebieskie) wolniej niż czerwone.

Rys. B na tablicy I przedstawia rozszerzone doświadczenie Newtona. Pewną niewielką część widma przepuszczamy przez szczelinę w ekranie i rzucamy na drugi pryzmat. Okazuje się wówczas, że rozszczepienie przez pierwszy pryzmat jest już zupełne: wiązka wycięta przez szczelinę nie rozszerza się już na całkowite widmo, jak wiązka pierwotna, i nie pojawiają się żadne nowe barwy. Jeżeli szerokość jej nieco wzrasta, to tylko dlatego, że szczeliny, przez które światło przechodzi, muszą same mieć pewną szerokość, dzięki czemu barwy mieszają się zlekka ze sobą. Wskutek tego druga szczelina przepuszcza pewien zbiór długości fali, czyli barw, który po przejściu przez drugi pryzmat tworzy wiązkę nieco rozbieżną. Im węższe, a więc bardziej selektywne są szczeliny, tem ten ostatni efekt jest mniej wybitny; przeciwnie, jeśli pierwsza szczelina jest bardzo szeroka, wówczas różnobarwne plamy na ekranie nakładają się na siebie tak, że w środku obrazu wszystkie barwy łączą się w barwę białą, jak to widzimy na rys. A tablicy XIV.

Doświadczenia te wykazują, że załamanie światła w pryzmacie, czy w innym przyrządzie, w którym wyzyskana jest zależność prędkości światła od długości fali, daje odrazu ostateczną analizę światła. Dla oka jest ona rozszczepieniem na poszczególne barwy; — jak zobaczymy wkrótce, można ją lepiej określić, jako rozszczepienie na fale o różnej długości.

Cechy światła

Doszliśmy teraz do bardzo ważnego punktu. Okazuje się, iż po przeprowadzeniu analizy światła zapomocą pryzmatu niepodobna dokonać jakiegoś dalszego rozkładu, któryby był dostępny dla oka: na tem kończą się *widzialne* cechy światła. Posiada ono prędkość, tę samą w próżni dla wszystkich długości fali, a w innych ośrodkach zależną od długości fali oraz od natury ośrodka; na tem opiera się zjawisko załamania światła i analiza widmowa. Dalej, światło posiada oczywiście *natężenie* oraz pewną długość fali; i to w s z y s t k o, jeśli chodzi o cechy *widzialne*. Istnieje jednak inna jeszcze własność, zwana *stopniem polaryzacji*, zależna w bardzo prosty sposób od k i e r u n k u, w jakim fale wykonywają swe indywidualne drgania. Fale na wodzie wznoszą się i opadają; w przypadku światła niema takiego wyróżnionego kierunku — ruch może odbywać się z prawej strony ku lewej równie dobrze, jak zgóry nadół, lub w dowolnym innym kierunku pośrednim pomiędzy tamtymi. Cechą tą zajmiemy się później: oko nie dostrzega jej bezpośrednio i wspominamy tu o niej tylko dlatego, aby uzupełnić nasz spis własności światła.

Natura promienia świetlnego jest zatem określona

całkowicie — o ile chodzi o cechy widzialne — skoro dane jest jego natężenie i długość fali. Jeśli promień jest złożony, czyli stanowi mieszaninę promieniowań o różnej długości fali, należy jeszcze podać natężenie każdej składowej — i to wszystko. Istnieje wprawdzie dodatkowa nieskończona złożoność naszych wrażeń barwnych, lecz nie zawdzięczamy jej różnorodności cech światła jako takiego, lecz różnicom w reakcji oka i mózgu na światło. Rzeczy te należy bacznie od siebie odróżniać.

Zakres długości fali

Łatwo spostrzec, że wyobrażanie sobie światła jako rodzaju ruchu falowego, oddawało nam, przynajmniej dotychczas, znakomite usługi. Podstawowymi własnościami światła widzialnego są właśnie te cechy, które ruch falowy dobrze obrazuje. Wobec tego powstaje zupełnie naturalne pytanie, czy nasze wiadomości o zachowaniu się innych fal — np. wodnych — nie nasuwają myśli o jakichś zjawiskach, które miałyby swe odpowiedniki w przypadku światła.

Otóż nader oczywistą cechą fal morskich jest ogromny zakres *długości fali*, t. j. odstępu pomiędzy grzbietami fal sąsiednich. Na jednym krańcu mamy długie fale oceaniczne, na drugim — drobnutki zmarszczki, tworzące się na wodzie przy lekkim podmuchu wiatru. Gdy rozpatrzymy światło z tego punktu widzenia, uderza nas odrazu fakt nader ciekawy: długości wszystkich fal widzialnych zawarte są w b a r d z o w ą s k i c h granicach.

Długość fali światła czerwonego wynosi nieco mniej

niż 0,0001 cm, długość krótkich fal przeciwnego końca widma jest niecałe dwa razy mniejsza. Wszystkie inne fale widzialne mieszczą się między temi dwiema granicami.

Czy zatem niema w promieniowaniu innych długości fali? A może światło posiada jakąś cechę dotychczas nam nieznaną, wobec czego teoria falowa zawodzi, gdyż nie przewiduje ograniczeń, którym podlega widzenie?

Doświadczenie wykazuje, iż teoria falowa nie zawodzi bynajmniej i że ograniczenia, o których mowa, mają swe siedlisko w naszym wzroku, nie zaś w tem, co możnaby widzieć, gdyby oczy nasze były inaczej zbudowane. Dotychczas zbadano doświadczalnie olbrzymi zakres długości fali, począwszy od tych, jakie stosuje się w radjofonji, wyrażających się w setkach metrów, do wysyłanych przez niektóre ciała promieniotwórcze, dziesiątki tysięcy razy krótszych od najkrótszych fal widzialnych. Zakres fal, które oddziałują na nasz wzrok, jest małym ułamkiem całości, niezależnie od skali, w jakiej ten ułamek oceniamy.

Tymczasem przebywać będziemy w tych właśnie wąskich granicach, w obszarze oczywiście niezmiernie dla nas ważnym, w nim bowiem mieszczą się wszystkie zjawiska, związane z procesami widzenia. Wszystkie sprawy, dotyczące barw, są związane z tem, jak powstają fale ze wspomnianej dziedziny, jak wpływa na nie odbicie od powierzchni różnych ciał, lub przejście przez te ostatnie, z tem wreszcie, jak fale te są odbierane i interpretowane przez oczy i mózg.

Działanie barwnika

W urządzeniu, którem się teraz posłużymy, światło lampy łukowej przechodzi przez szczelinę i pada na soczewkę, dającą na ekranie obraz szczeliny. Przed szczeliną umieszczamy pryzmat: wąski, biały obraz jej rozciąga się w barwne widmo, jak to widzimy na rys. D tabl. XIV. Można je uważać za zbiór częściowo nałożonych na siebie obrazów szczeliny, odpowiadających różnym długościom fali, na które pryzmat rozszczepia światło padające. Umieścimy kawałek czerwonego szkła przed szczeliną: z widma znikają wszystkie barwy, z wyjątkiem czerwonej (tablica XIV E). Widzimy tu, że nie ma *zamiany* jednej barwy w inną, lecz jedynie działanie *niszczące*. Kawałek szkła czerwonego nie zawdzięcza swej charakterystycznej własności zamianie innych barw na czerwień: on je niszczy wszystkie, z wyjątkiem czerwonej. Mamy tu cechę istotną wszelkiego barwienia: dana barwa powstaje dzięki przesianiu i usunięciu wszelkich innych barw, z wyjątkiem pewnych resztek, które tworzą właśnie zabarwienie przedmiotu „przesiewającego“.

Patrzac uważnie na czerwony obraz, który powstaje na ekranie przy użyciu czerwonego szkła w opisanem przed chwilą doświadczeniu, można stwierdzić, że jest on ostro odgraniczony u góry i u dołu, natomiast obie granice boczne są rozmyte. W pierwszym przypadku idzie bowiem o obrazy górnego i dolnego końca szczeliny, tworzące się na tej samej linii przy wszelkich długościach fali; rozmycie brzegów bocznych świadczy zaś o tem, iż w tworzeniu się tego obrazu bierze udział światło nie jednej tylko ściśle określonej długości fali,

TABLICA XIV

A. Widmo przedstawione na tej fotografii różni się tem od zdjęć na tabl. XIIIC lub I B, że zamiast szczeliny użyto kolistego otworu. Nakładające się obrazy są więc tu kołami; środek fotografii jest prawie biały, gdyż nakładają się tu na siebie niemal wszystkie barwy (str. 100).	C. Światło pada zgóry na naczynie z wodą, do której wrzucono różne substancje fluoryzujące w postaci proszku. Proszek ten opada stopniowo w wodzie, rozpuszczając się przytem (str. 251)
B. Nakładające się koła barwne zostały rzucone z oddzielnych latarni; światło jednej z nich przepuszczono przez szkło czerwone, drugiej — przez szkło zielone. W miejscu, gdzie plamy zielona i czerwona się nakładają, powstaje zabarwienie żółte, jak to okazuje załączona fotografia barwna (str. 110).	
D. Fotografia barwna widma. Światło z latarni projekcyjnej przepuszczono przez wąską szczelinę; widmo składa się w rzeczywistości z szeregu obrazów szczeliny, utworzonych przez światło różnych barw czyli długości fali (str. 98 i 104).	F. Szybka ze szkła żółtego odcina tylko fioleto (str. 105).
E. Szybka ze szkła czerwonego, umieszczona w drodze światła białego, usuwa z widma wszystkie niemal barwy, z wyjątkiem bliskich czerwonego krańca widma, tak iż to ostatnie wydaje się znacznie skrócone (str. 104)	G. Roztwór chlorofilu pochłania niektóre części widma, zwłaszcza pewien obszar w skrajnej czerwieni. Fotografia barwna tak zmienionego widma. (str. 135).
H. Światło latarni projekcyjnej jest pozbawione części barwy niebieskiej wskutek przejścia przez naczynie z cieczą, zawierającą subtelną zawiesinę. Pozostałe barwy dają na ekranie zabarwienie czerwone, przypominające słońce o zachodzie (str. 170).	
I. Fioletowy kwadrat w środku wydaje się dla oka nierównomiernie zabarwiony; wydaje się raczej niebieskawy w pobliżu kwadratu czerwonego, czerwony zaś — w pobliżu niebieskiego (str. 116).	

Działanie barwnika

W urządzeniu, któremu się teraz posłużymy, światło lampy łukowej przechodzi przez soczewkę, dającą nam ekran z szczeliną umieszczamy przy ekranie rozciąga się w barwne widmo, jak to widzimy na rys. D

Widmo przedstawione na rys. D składa się z szeregu kolorów, które w rzeczywistości są cząstkami światła, które w tym celu zostały rozdzielone. W tym celu użyjemy kawałka czerwonego szkła, który umieścimy przed szczeliną: z widna z wyjątkiem czerwonej (tab. XIX, rys. E) nie ma zmiany jednej barwy, nie działanie niszczące. Kawałek szkła czerwonego nie zawdzięcza swej charakterystycznej własności zmianie barwy, lecz własności przesłaniania światła.

Widmo z wyjątkiem czerwonego (tab. XIX, rys. F) przedstawia nam obraz, który otrzymamy, gdy przed ekranem umieścimy kawałek czerwonego szkła.

Widmo z wyjątkiem czerwonego (tab. XIX, rys. G) przedstawia nam obraz, który otrzymamy, gdy przed ekranem umieścimy kawałek czerwonego szkła.

Widmo z wyjątkiem czerwonego (tab. XIX, rys. H) przedstawia nam obraz, który otrzymamy, gdy przed ekranem umieścimy kawałek czerwonego szkła.

Widmo z wyjątkiem czerwonego (tab. XIX, rys. I) przedstawia nam obraz, który otrzymamy, gdy przed ekranem umieścimy kawałek czerwonego szkła.

Widmo z wyjątkiem czerwonego (tab. XIX, rys. J) przedstawia nam obraz, który otrzymamy, gdy przed ekranem umieścimy kawałek czerwonego szkła.

Widmo z wyjątkiem czerwonego (tab. XIX, rys. K) przedstawia nam obraz, który otrzymamy, gdy przed ekranem umieścimy kawałek czerwonego szkła.

Widmo z wyjątkiem czerwonego (tab. XIX, rys. L) przedstawia nam obraz, który otrzymamy, gdy przed ekranem umieścimy kawałek czerwonego szkła.

Widmo z wyjątkiem czerwonego (tab. XIX, rys. M) przedstawia nam obraz, który otrzymamy, gdy przed ekranem umieścimy kawałek czerwonego szkła.

Widmo z wyjątkiem czerwonego (tab. XIX, rys. N) przedstawia nam obraz, który otrzymamy, gdy przed ekranem umieścimy kawałek czerwonego szkła.

Widmo z wyjątkiem czerwonego (tab. XIX, rys. O) przedstawia nam obraz, który otrzymamy, gdy przed ekranem umieścimy kawałek czerwonego szkła.

Widmo z wyjątkiem czerwonego (tab. XIX, rys. P) przedstawia nam obraz, który otrzymamy, gdy przed ekranem umieścimy kawałek czerwonego szkła.

Widmo z wyjątkiem czerwonego (tab. XIX, rys. Q) przedstawia nam obraz, który otrzymamy, gdy przed ekranem umieścimy kawałek czerwonego szkła.

Widmo z wyjątkiem czerwonego (tab. XIX, rys. R) przedstawia nam obraz, który otrzymamy, gdy przed ekranem umieścimy kawałek czerwonego szkła.

Widmo z wyjątkiem czerwonego (tab. XIX, rys. S) przedstawia nam obraz, który otrzymamy, gdy przed ekranem umieścimy kawałek czerwonego szkła.

Widmo z wyjątkiem czerwonego (tab. XIX, rys. T) przedstawia nam obraz, który otrzymamy, gdy przed ekranem umieścimy kawałek czerwonego szkła.

Widmo z wyjątkiem czerwonego (tab. XIX, rys. U) przedstawia nam obraz, który otrzymamy, gdy przed ekranem umieścimy kawałek czerwonego szkła.

Widmo z wyjątkiem czerwonego (tab. XIX, rys. V) przedstawia nam obraz, który otrzymamy, gdy przed ekranem umieścimy kawałek czerwonego szkła.

Widmo z wyjątkiem czerwonego (tab. XIX, rys. W) przedstawia nam obraz, który otrzymamy, gdy przed ekranem umieścimy kawałek czerwonego szkła.

Widmo z wyjątkiem czerwonego (tab. XIX, rys. X) przedstawia nam obraz, który otrzymamy, gdy przed ekranem umieścimy kawałek czerwonego szkła.

Widmo z wyjątkiem czerwonego (tab. XIX, rys. Y) przedstawia nam obraz, który otrzymamy, gdy przed ekranem umieścimy kawałek czerwonego szkła.

Widmo z wyjątkiem czerwonego (tab. XIX, rys. Z) przedstawia nam obraz, który otrzymamy, gdy przed ekranem umieścimy kawałek czerwonego szkła.

Widmo z wyjątkiem czerwonego (tab. XIX, rys. A) przedstawia nam obraz, który otrzymamy, gdy przed ekranem umieścimy kawałek czerwonego szkła.

Widmo z wyjątkiem czerwonego (tab. XIX, rys. B) przedstawia nam obraz, który otrzymamy, gdy przed ekranem umieścimy kawałek czerwonego szkła.

Widmo z wyjątkiem czerwonego (tab. XIX, rys. C) przedstawia nam obraz, który otrzymamy, gdy przed ekranem umieścimy kawałek czerwonego szkła.

Widmo z wyjątkiem czerwonego (tab. XIX, rys. D) przedstawia nam obraz, który otrzymamy, gdy przed ekranem umieścimy kawałek czerwonego szkła.

Widmo z wyjątkiem czerwonego (tab. XIX, rys. E) przedstawia nam obraz, który otrzymamy, gdy przed ekranem umieścimy kawałek czerwonego szkła.

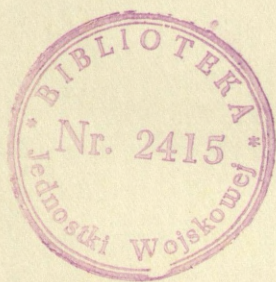
Widmo z wyjątkiem czerwonego (tab. XIX, rys. F) przedstawia nam obraz, który otrzymamy, gdy przed ekranem umieścimy kawałek czerwonego szkła.

Widmo z wyjątkiem czerwonego (tab. XIX, rys. G) przedstawia nam obraz, który otrzymamy, gdy przed ekranem umieścimy kawałek czerwonego szkła.

Widmo z wyjątkiem czerwonego (tab. XIX, rys. H) przedstawia nam obraz, który otrzymamy, gdy przed ekranem umieścimy kawałek czerwonego szkła.

TABLICA XIV





lecz zaczerpnięte z pewnego wąskiego obszaru fal w czerwieni. Mamy tu więc częściowe nakładanie się obrazów.

Przy użyciu szkła żółtego otrzymujemy pas barwny bardzo szeroki (tabl. XIV F); w istocie, na pierwszy rzut oka widmo wydaje się niemal takie samo, jakgdyby żadnego szkła nie było, i dopiero bliższe przyjrzenie się wykazuje, że skrajny fiolet zniknął. Wydaje się rzeczą dziwną, że szkło żółte przepuszcza tak duży zakres fal, gdyż raczej bylibyśmy skłonni przypuszczać, iż barwa tego szkła jest barwą czystą (prostą). Doświadczalnie stwierdzamy jednak, że światło przepuszczone przez szkło żółte zawiera wielką różnorodność fal, z których każda, wzięta oddzielnie, inaczej działałaby na oko; musimy stąd zatem wysnuć wniosek, iż „czystość” czyli „prostota” barwy nie oznacza t e j s a m e j rzeczy dla pryzmatu, co dla oka. Jest to nadzwyczaj ciekawa właściwość procesu widzenia. Zanim jednak zajmiemy się szczegółowo rozpatrzeniem tej sprawy, powróćmy jeszcze na chwilę do zjawiska barwienia.

W cieczach zabarwionych, podobnie jak w kolorowym szkłe, barwy powstają przez niszczenie barw; to samo jest również przyczyną zabarwienia ciał stałych. Gdy nakładamy warstwę farby wodnej na biały papier, nie wytwarzamy światła nowego rodzaju, lecz niszczymy niektóre już istniejące rodzaje światła. Biały papier rozprasza wszystkie barwy nań padające; malując, nakładamy nań warstewkę przezroczystej cieczy, którą światło przenika dwukrotnie, zanim dobiegnie do naszych oczu: raz na swej drodze do papieru, spowrotem po rozproszeniu przez ten ostatni. Jeśli ciecz ta pochłania wszystkie długości fali, z wyjątkiem czer-

wieni, to wyłącznie ta barwa powraca do oka: zamalowaliśmy papier „czerwoną farbą“. Jeśli ciecz pochłania tylko fiolet, wówczas papier odbija barwę o odcieniu żółtym; jeśli tylko czerwień, — powstaje barwa niebiesko - zielona, i t. d. Gdy nakładamy na papier różne farby, warstwą po warstwie, wzrasta ilość czynników „niszczących“ i z nieumiejętnych rąk pozostałość wyjść może jako zabarwienie o tonie ciemnym i brudnym.

Inaczej sprawa przedstawia się z farbami olejnymi. Zawierają one substancję stałą, która odbija i rozpraszają światło padające i odgrywa rolę białego papieru w malarstwie akwarelowem. Światło nie dochodzi więc wcale do płótna i jedna warstwa farby może być dostatecznie gruba, aby zupełnie pokryć warstwę, znajdującą się pod nią. Ten sam efekt osiąga się z farbami wodnymi przez zmieszanie ich z bielą chińską.

Fakt, że barwnik wytwarza daną barwę przez zniszczenie innych, jest oczywiście w bezpośredniej sprzeczności z nasuwającym się tu przypuszczeniem, iż jakąś barwę możnaby zamienić w inną. Widzimy tu znowu, że teoria falowa daje nam właściwe wskazówki. Wiemy przecież, że układ fal nie może zamienić się bezpośrednio w układ fal innej długości: długie fale oceaniczne nie stają się zbiorem drobnych zmarszczek wodnych po przejściu przez jakiś otwór lub po odbiciu się od ściany. Dlatego też nie można oczekiwać, aby światło czerwone stało się niebieskiem lub vice versa po przejściu przez ciało zabarwione, lub też po odbiciu od jakiegoś przedmiotu. Źródło światła jest źródłem wszystkich barw tego światła; musimy więc przypuścić, że białe światło słońca zawiera w jakiś

sposób cały zakres barw widmowych, zanim jeszcze zostały one rozszczepione przez pryzmat.

Analizując w ten sposób światło, pochodzące z różnych źródeł, stwierdzamy, że widma ich nie są wogółności identyczne. Widmo żółtego światła lampy naftowej np. nie zawiera fal krótkich; nawet widmo słońca zmienia się od czasu do czasu. Kawałek niebieskiej tkaniny posiada przypisywaną mu barwę dlatego, że w świetle dziennym barwnik zawarty w tkaninie pochłania przeważną część światła padającego, odrzuca zaś do oka wyłącznie ciemny błękit. W świetle lampy naftowej sukno to wydaje się czarne dlatego, że światło jej nie zawiera jedynej barwy, którą może ono odbijać — nic zatem nie ulega odbiciu.

Jeśli rzucimy kolejno wszystkie barwy widma na wiązanek napozór „czysto“ żółtych pierwiosnków, to zauważymy, że barwa ich zmienia się przytem: w czerwieni kwiaty wydają się czerwone, w części żółtej okazują swój naturalny kolor, w zielonej — są zielone, w ciemnym błękitcie natomiast wydają się czarne, — jest to jedyny zakres długości fali, którego nie odbijają. Podobnie, obserwowana przez nas barwa każdego przedmiotu zależy nietylko od zawartych w nim barwników, lecz również od światła, w którym przedmiot ów widzimy. Światło słoneczne, wpadające do pokoju, może naprzód paść na ścianę białą, albo też na ścianę lub dywan kolorowy — i zależnie od tego zmieni się cały rozkład barw w pokoju.

Czemże więc jest owa barwa *biała*, z której analizy zdają się powstawać wszystkie barwy? Oczywiście skłaniamy się do odpowiedzi, że jest to zwykle światło dzienne; jak jednak widzieliśmy, to ostatnie nie jest

czemś niezmiennem pod względem jakości — wiedzą o tem dobrze fotografowie. Gdy słońce zniża się ku zachodowi, światło dzienne staje stosunkowo bogatsze w barwę pomarańczową i czerwoną. Na szczycie wysokiej góry zawiera ono więcej błękitu, niż u jej podnóża. Białe światło dzienne nie jest więc czemś łatwem do ścisłego określenia. Istnieje pewna przeciętna mieszanina długości fali, którą nazywamy „barwą białą“, i ta definicja wystarcza dla zwykłych celów. Jeśli chodzi o większą dokładność, wówczas powinny być podane względnie siły (natężenia) składników, bądźto bezpośrednio, bądź pośrednio w stosunku do pewnych wzorców świetlnych, które same skoalei mogą być opisane w sposób ścisły i zupełny. Nie ma jakiegoś światła absolutnie białego: białosc jest cechą *przez nas* określoną. Powinnoby się raczej mówić, że to p o w i e r z c h n i a papieru i t. p. jest b i a ł a; wyraża to, iż powierzchnia owa odbija lub rozprasza *całkowicie* wszelkie rodzaje światła. „Białosc“ jest cechą „bierną“ w porównaniu z „czynnymi“ cechami światła. Biała powierzchnia wydaje się czerwoną w świetle czerwonym, niebieską — w świetle niebieskiem i t. d. Lecz nawet przy tem określeniu zawdzięcza ona swą nazwę zdolności równomiernego odbijania promieni w i d z i a l n y c h, przypadających w wąskim obszarze, dostrzegalnym dla wzroku; gdybyśmy wyszli poza ten obszar, mogłaby się okazać konieczną rewizja naszego sądu. Tak np. benzen, ciecz przezroczysta i bezbarwna, przepuszcza promienie widzialne: gdyby jednak wzrok nasz dostrzegał fale nieco krótsze od fioletowych, musielibyśmy uważać benzen za ciecz zabarwioną, gdyż pochłania on te właśnie promienie nadfioletowe.

Oddziaływanie oka na barwy

Dotychczas zajmowaliśmy się udziałem jakości światła w powstawaniu wrażeń barwnych; skolei musimy omówić, jak reaguje oko na to, co na nie pada.

Zaczniemy od pewnego doświadczenia. Ustawmy dwie lampy łukowe w ten sposób, że rzucają one przy użyciu kolistych otworów i soczewek dwie jasne, białe plamy na ekran; przesuwając jedną z lamp lub soczewek, możemy plamy te nałożyć na siebie. Jeśli przed jedną z lamp umieścimy płytkę ze szkła niebieskiego, przed drugą zaś — z żółtego, to część wspólna obu plam otrzymuje światło błękitne od jednej lampy, a żółte od drugiej. Część ta wydaje się *biała* dla oka. Wiemy jednak, że *f a r b a* niebieska, zmieszana z żółtą, daje zieloną: zachodzi tu więc pozornie sprzeczność. Łatwo ją jednak wyjaśnić. Jeżeli przed *jedną* lampą umieścimy *oba* szkła, niebieskie i żółte, plama świetlna rzucona przez nią będzie istotnie zielona. Można było tego oczekiwać, widzieliśmy bowiem, że szkło żółte odcina niebieski koniec widma, łatwo zaś okazać, że szkło niebieskie odcina czerwień. Gdy promień biały przepuścimy przez obie płytki, z widma pozostaje tylko część środkowa, gdzie przeważa barwa zielona. Rzucając jednak na ekran plamy niebieską i żółtą, przyczem część wspólna wydaje się białą, nie powodujemy dwóch kolejnych absorbcyj; przeciwnie, osiągamy przez to, że do oka dostaje się jednocześnie światło niebieskie i żółte. Mieszanina światła w części wspólnej obu plam zawiera wszystkie barwy widma i, jakkolwiek barwy

z jego dziedziny środkowej występują może w nadmiarze, całość wydaje się oku mniej lub więcej biała.

To samo doświadczenie, wykonane przy użyciu szkła czerwonego i zielonego daje wynik podobny. Miejsca, gdzie obie plamy się nakładają, jest żółte; gdy zaś obie płytki umieścimy przed jedną lampą, odcinając one wszystkie barwy i ekran jest ciemny. Badanie przy pomocy pryzmatu wykazuje, że szkło czerwone przepuszcza tylko barwę czerwoną, zielone zaś usuwa czerwień i część błękitu. A zatem przez obie płytki razem nie przejść nie może, natomiast część wspólna dwóch plam zawiera wszystkie barwy z wyjątkiem niebieskiej, to zaś, jak widzieliśmy poprzednio, daje dla oka wrażenie barwy żółtej (tabl. XIV B).

W podobnych doświadczeniach spotykamy więc zaskakujący fakt, że barwa, która dla oka wydaje się „czysta“, może być bardzo złożoną mieszaniną wielu rodzajów światła, z których każdy z osobna posiadałby swą własną barwę. W pewnem określonym miejscu w widmie przypada barwa żółta, odpowiadająca światłu o bardzo wąskim zakresie długości fali; światło żółte natomiast, które przechodzi przez żółte szkło, zawiera *prawie wszystkie* widzialne długości fali. Dalsze badania wykazują, że ilość kombinacji, dających tę samą — dla oka — barwę żółtą, jest nieograniczona. Jest to fakt nader godny uwagi, gdy porównamy go z funkcjonowaniem ucha w dziedzinie fal głosowych. W świecie dźwięku sygnały rozchodzą się za pośrednictwem ruchu falowego, w sposób analogiczny do tego, jaki nam charakteryzuje — przynajmniej tymczasowo — dziedzinę zjawisk optycznych. Tam jednak środki przenoszące dźwięk są napewno materialne: — powietrze,

lub inne gazy, ciecze, ciała stałe. Zarówno w przypadku głosu, jak światła, jakość wrażenia zależy od długości fali. Im krótsze fale, tem wyższy dźwięk — i odwrotnie. Długość fali najniższego tonu fortepianu wynosi około dziesięciu metrów; dla tonu najwyższego sięga ona zaledwie kilku centymetrów. Do tego punktu analogja pomiędzy dźwiękiem a światłem jest zupełna; znika ona wszakże, skoro porównamy zjawiska, powstające przy nakładaniu się dźwięków oraz światel. Widzieliśmy, że gdy dwie wiązki świetlne o różnych barwach równocześnie wpadają do oka, doznaje ono wrażenia barwy „czystej”: oko jest niezdolne rozpoznać mieszaninę i odróżnić jej składniki. W przypadku dźwięku natomiast ucho zawsze może stwierdzić, że działa nań mieszanina dźwięków o różnej częstości: analizuje ono akordy, a towarzyszy temu uczuciu przyjemne lub nieprzyjemne, zależnie od ich składu. Ma to znaczenie istotne w muzyce; jak wielkie, o tem łatwo się przekonać, jeśli uprzytomnimy sobie, co by się z nią stało, gdyby można było każdy akord zastąpić jakimś pośrednim „czystym“ tonem!

Niejednokrotnie próbowano zbudować instrument, któryby działał na zmysł wzroku przez grę barw na ekranie, przyczem naciśnięcie klawiszy rzucałoby na ekran różnokolorowe światła. Próby te spęzły na niczem, o tyle, iż nie udało się stworzyć czegoś nawet w przybliżeniu tak potężnego, jak muzyka. Bardzo być może, iż przyczyną tego niepowodzenia jest niezdolność oka do analizowania „akordów“ świetlnych. Analogja pomiędzy wzrokiem a słuchem jest daleko mniejsza, niż przypuszczali ci, którzy chcieli zbudować „organy świetlne“. Za coś analogicznego do zespołu jednoczes-

nie brzmiących dźwięków możnaby raczej uważać jednoczesne rzucenie kilku barw na różne części ekranu; analogje są jednak przysłowiowo niepewną podstawą rozumowań.

Przyjmuje się zazwyczaj, że ucho zawiera szereg „odbiorników“, z których każdy odpowiada wyłącznie na dźwięki zawarte w małym przedziale częstości drgań. Ucho możnaby porównać z pokojem, zapełnionym mnóstwem ostro nastrojonych odbiorników radiowych. Oka natomiast nie można porównać z czemś tak różnorodnem i selektywnem: jego „odbiorniki“ muszą być mniej liczne i mniej „wyspecjalizowane“. Oczywiście, bardzo wiele badań poświęcono próbom wyjaśnienia owego mechanizmu odbiorczego: nie można się jednak dziwić, że zupełne rozwiązanie tak zawilego zagadnienia nie zostało dotychczas osiągnięte. Udało się już jednak otrzymać pewne ogólne wyniki. Powszechnie przyjmuje się, że — jeśli znów użyć analogji z radjotelegrafją — wchodzą tu w grę *trzy* odbiorniki. Każdy z nich odpowiada na duży zakres fal, podobnie jak bardzo „nieselektywny“ radjoodbiornik; dwa odpowiadają najsilniej na oba krańce widma widzialnego, a trzeci na jego część środkową, w pewnym stopniu jednak każdy z nich reaguje na większą część widma. Nasze wrażenia barwne zależą od tego, jaki silnie jest pobudzany każdy z tych trzech odbiorników przez światło, wpadające do oka. Jeśli brak jednego z nich, powiedzmy tego, który jest szczególnie wrażliwy na czerwień, lub jeśli czynny on jest tylko częściowo, wówczas oko staje się w mniejszym lub większym stopniu nieczułe na działanie barwy czerwonej; trudno wówczas odróżnić czerwone kwiaty od zielonych liści. Sporo lu-

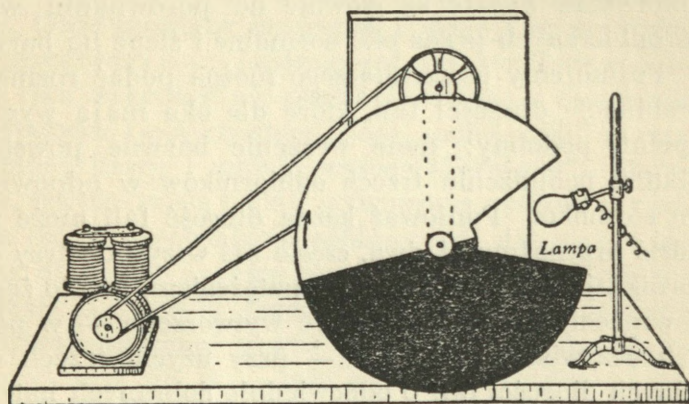
dzi cierpi wskutek takiego defektu na ślepotę barw, przyczem najczęściej zawodzi „czerwony“ odbiornik. Posiadacz anormalnego oka może zupełnie nie wiedzieć o swym defekcie. John Dalton, słynny pionier chemji, nie wiedział wcale, że jest ślepy na barwy, dopóki nie wykrył tego Tomasz Young, gdy Dalton miał lat czterdzieści. Teorje, dotyczące „zakresu wrażliwości“ owych odbiorników oparte są głównie na porównaniu wrażeń odbieranych przez oko normalne i ślepe na barwy.

Pojmujemy teraz, dlaczego można podać rozmaite kombinacje długości fali, które dla oka mają wygląd zupełnie podobny: dane wrażenie barwne powstaje wskutek pobudzenia trzech odbiorników w odpowiednim stosunku. Ponieważ każda długość fali może pobudzić przynajmniej dwa, często zaś wszystkie trzy odbiorniki, jakkolwiek z różnem natężeniem, przeto żądane wrażenie barwne może być wytworzone — w pewnych oczywiście granicach — przy użyciu trzech dowolnych długości fali o odpowiednio dobranych natężeniach względnych.

Barwy dopełniające

Założywszy, że owe organy odbiorcze mogą „męczyć się“ przy użyciu i tracić na sprawności, możemy łatwo wyjaśnić częste występowanie t. zw. „*barw dopełniających*“. Jeśli np. popatrzymy przez kilka sekund na jakiś przedmiot jaskrawo zabarwiony, i skierujemy potem wzrok na jasną, najlepiej białą, powierzchnię, wówczas ujrzymy jakby unoszącą się przed oczyma plamę odmiennej barwy, która porusza się zgodnie z ruchami oczu. Tłumaczy się to tem, że róż-

ne odbiorniki nie są zmęczone w jednakowym stopniu. Jeśli patrzyliśmy na barwę czerwoną, odbiornik „czerwony“ „zmęczył się“ bardziej niż dwa pozostałe, tak iż potem, gdy do oka wpada światło białe, te właśnie odbiorniki są pobudzone silniej, dzięki czemu pojawia się zabarwienie niebieskawo-zielone.



Rys. 53. Tarcza obraca się w kierunku wskazanym strzałką. Czerwona lampa ukazuje się w pewnych odstępach czasu przez wycięty sektor; wydaje się ona nie czerwoną, lecz zieloną. Tarcza powinna być silnie oświetlona.

Uderzający przykład tego zjawiska możemy otrzymać przy użyciu całego widma, np. łuku elektrycznego, rzuconego na biały ekran. Przez kilkanaście sekund spoglądamy na pewien zaznaczony czemś punkt w widmie, poczem gasimy łuk i zapalamy światło w pokoju. Na ekranie pojawia się wówczas coś nakształt „odwróconego widma“: barwa zielono-niebieska tam, gdzie poprzednio była czerwona, czerwona zamiast nie-

bieskiej, w środku widma zaś zamiast jasnozielonej występuje purpura.

Możnaby spodziewać się, że barwy dopełniające obserwowane w przytoczonym przypadku będą znacznie słabsze, niż barwy pierwotne; niżej opiszemy jednak bardzo ciekawe doświadczenie, które okazuje, iż sprawa może przedstawiać się wprost przeciwnie. Sporządźmy z tektury okrągłą tarczę o średnicy około 45 cm, usuńmy z niej jeden wycinek, jak na rys. 53, i podzielmy resztę powierzchni na dwie połowy, czarną i białą. Tarczę umieszczamy na osi tak, aby mogła obracać się z prędkością 2—3 obrotów na sekundę. Za tarczą ustawiamy czerwoną lampę (p. rysunek); sprzodu oświetlamy silnie tarczę i wprawiamy ją w obrót. Przed oczyma naszymi przesuwają się wówczas kolejno: przez krótką chwilę czerwony drucik żarówki, następnie biała połowa tarczy, potem czarna połowa, znów żarówka i t. d. W czasie, gdy biała część tarczy zakrywa żarówkę, musimy, jak wiadomo, doznać, dzięki reakcji, wrażenia zieleni. Otóż jest rzeczą ciekawą, iż to ostateczne wrażenie jest o tyle silniejsze od czerwieni drucika, że podczas ruchu tarczy wogóle nie dostrzegamy barwy czerwonej: reakcja jest tu silniejsza od działania pierwotnego. Nader osobliwie wygląda to przejście czerwonej barwy żarówki w zieloną. Przy obrocie tarczy w przeciwnym kierunku nie ma zmiany barwy, pozostaje ona czerwoną, gdyż w tym przypadku czarna część tarczy zakrywa lampę natychmiast po tej chwili, gdy ją ujrzeliśmy, nie ma więc światła, które wzbudzałoby reakcje wtórne.

Złudzenia barwne

Zjawiska tego rodzaju zawdzięczają swe powstanie takim właściwościom oka, które nie zależą od nas; inne znów są niewątpliwie skutkiem, przynajmniej w części, zastosowania fałszywych wzorców oceny: przykłady tego mieliśmy już poprzednio, za chwilę zaś zobaczymy, iż wskazana przyczyna może działać również w przypadku oceny barw. Jeśli np. ułożymy jedno obok drugiego trzy barwne pola: czerwone, purpurowe i niebieskie (tabl. XIV J), to trudno poprostu wmówić w siebie, że całe pole środkowe jest zabarwione jednostajnie. Wpada ono wyraźnie w odcień czerwony w miejscu, gdzie graniczy z polem niebieskim, a wydaje się raczej niebieskawem w pobliżu pola czerwonego. Można tu przypuścić, że wzrok nasz pada przez chwilę na pole czerwone, wskutek czego męczą się „czerwone“ organy odbiorcze oczu, gdy więc potem spojrzymy na pole purpurowe, wówczas jego „czerwoność“ mniej się uwydatnia. Można zresztą przyjąć również, iż w pobliżu pola czerwonego wytwarzamy sobie fałszywy „wzorec purpury“, zawierający zbyt wiele czerwieni, gdyż na chwilę przywykamy do nadmiaru tej barwy. Oba te wyjaśnienia nie są identyczne, jakkolwiek niełatwo może byłoby rozstrzygnąć, które z nich jest słuszne.

Ze zjawiska tego korzysta się często w malarstwie i dekoracji barwnej. Przez umieszczenie obok danej barwy innej, odpowiednio dobranej, można tamtą „podkreślić“ lub zmienić pozornie jej odcień. Tak np. wygląd obrazu zawieszonego na ścianie zależy od

wszystkich tych wpływów, które wyżej rozpatrywaliśmy. Na pierwszym miejscu należy postawić charakter bądźto naturalnego, bądź też sztucznego oświetlenia pokoju; zresztą światło to ulega zmianom wskutek odbicia i rozproszenia od najrozmaitszych przedmiotów w pokoju, nim jeszcze padnie na obraz. Wreszcie, na wrażenia nasze wywiera wpływ otoczenie obrazu i zabarwienie przedmiotów, na które patrzyliśmy tuż przed spojrzeniem na obraz, lub na które, być może, patrzymy od czasu do czasu. Idealnym sposobem wystawienia obrazu byłoby, zdaje się: oświetlić go tak samo, pod względem natężenia i jakości, jak w czasie malowania — i dać mu otoczenie takie, jakieby mu wyznaczył sam twórca. Obraz, malowany na otwartem powietrzu w jasnym świetle dziennem wygląda wtedy inaczej, niż gdy widzimy go przy zwykłym świetle sztucznem, przytem oczyma, których wzorzec oceny uległ zmianie z chwilą zapadnięcia zmroku. Jeżeli oświetlimy kawałek białego papieru lampą naftową, obok zaś umieścimy drugi kawałek papieru oświetlony światłem dziennem — doświadczenie takie nie trudno urządzić w pracowni — wówczas pierwszy kawałek wydaje się brunatno-pomarańczowy w porównaniu z drugim; wieczorem jednak właśnie tamten byłby dla nas wzorcem „białości“. Przedmioty o innych barwach okazują oczywiście analogiczne zmiany. Dziś, gdy tak szeroko rozpowszechnione jest jasne oświetlenie sztuczne, niema tak wielkiej różnicy pomiędzy dniem i nocą, lecz nawet najjaśniejsza i najbielsza „półwatowa“ lampa elektryczna nie jest równoważna światłu dziennemu. Jeśli chodzi o możliwie dokładne naśladowanie światła dziennego, należy znacznie osła-

bić natężenie fal długich, zawartych w świetle sztucznem, przez zastosowanie niebieskiego szkła w lampie: światło elektryczne zawiera wprawdzie promienie niebieskie, lecz w ilości niewystarczającej. Użycie lamp, dających „światło dzienne“, rozpowszechniło się w czasach ostatnich z różnych powodów: potrzebne są w sklepach przy oglądaniu materiałów, jeśli odbywa się to przy świetle sztucznem; niekiedy uciekają się do ich usług malarze i dekoratorzy. Zmiany barw przy zmianie oświetlenia są niekiedy wprost uderzające. Dwa kawałki sukna mogą wydawać się zielone w świetle dziennem: przy świetle sztucznem jeden jest zielony, a drugi brunatny — i t. d.

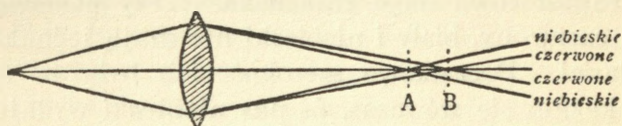
„Aberacja chromatyczna“

Soczewka nie może zebrać w jednym punkcie, bez zastosowania specjalnych skomplikowanych zabiegów, całej ilości światła, padającego na nią z jakiegoś źródła; zawsze bowiem przy załamaniu światła białego promienie niebieskie są odchylane silniej niż czerwone. Widzimy to na rys. 54: promienie niebieskie przecinają się w punkcie leżącym bliżej soczewki, niż promienie czerwone. Jeśli umieścimy kawałek papieru w *A*, otrzymamy niebieskawy punkt otoczony obwódką czerwoną, w *B* obwódka będzie niebieska, nigdzie jednak nie spotkamy punktu, w którym zbierałyby się wszystkie barwy ¹.

Zjawisko to okazuje również oko. Spoglądając przez jakiś otwór, np. przez okno, na jasne niebo, moż-

¹ Zjawisko to nosi nazwę „aberracji chromatycznej“. *Przyp. tłum.*

na często zauważyć czerwony lub niebieski rąbek, obrzeżający prostokąt ramy okiennej, przyczem pojawienie się tej czy innej barwy zależy od okoliczności, które wpływają na nastawienie oka. Jednakże wspomniana niezdolność jednoczesnego skupienia wszystkich długości fali zazwyczaj nie przeszkadza nam prawie zupełnie. Natomiast w przyrządach optycznych, gdzie chodzi o uzyskanie powiększenia, podobna wada byłaby fatalną; na szczęście, jak zobaczymy za chwilę, można skonstruować soczewki „achromatyczne“, tak iż trudność ta została pokonana.



Rys. 54. Promienie niebieskie skupiają się w punkcie A, bliższym soczewki niż promienie czerwone (B).

Brak achromatyzmu oka posiada pewne ciekawe konsekwencje. Ponieważ promienie czerwone odchylają się mniej niż niebieskie, układ optyczny oka musi być bardziej wydłużony w kierunku od przodu ku tyłowi w razie przystosowania się do widzenia przedmiotu czerwonego. Otóż wielkość wysiłku, do jakiego trzeba zmusić mięśnie oka, świadczy poczęści o odległości przedmiotu: im wysiłek ten jest znaczniejszy, tem przedmiot wydaje się nam bliższy. Wynika stąd skłonność do omyłek w ocenie odległości, mianowicie, że przedmioty czerwone są bliżej od niebieskich, — przy innych warunkach jednakowych. Dlatego to prawdopodobnie pokój o obiciu czerwonym wydaje się mniejszy, niż pokój niebieski. Możnaby przypusz-

zać, że barwę niebieską podświadomie łączymy ze znaczną odległością, opierając się na spostrzeżeniach dokonanych w czasie wycieczek, jednakże pierwsza z wymienionych przyczyn wydaje się ważniejszą. Czerwone litery na jaskrawym plakacie zdają się wychylać ku nam z szeregu liter niebieskich. Podobnie, widząc przedmioty niebieskie i czerwone jednakowych rozmiarów i w tej samej odległości od nas, skłaniamy się do przypuszczenia, że niebieskie są większe, gdyż sądzimy, że znajdują się dalej od nas niż czerwone.

Nader ciekawy przykład tego złudzenia przedstawia trójkolorowa flaga francuska. Trzy pionowe jej pasy: czerwony, biały i niebieski nie mają jednakowej szerokości. Początkowo szerokość ich była ta sama, lecz okazało się wówczas, że pas niebieski wydaje się szerszy od czerwonego. Specjalna komisja zbadała sprawę i zaleciła obrać szerokość pasów niebieskiego, białego i czerwonego w stosunku 30 : 33 : 37, przyczem liczby te wyznaczono na drodze eksperymentu tak, aby pasy wydawały się dla oka jednakowo szerokie. Przypuszczalnie oko wyobraża sobie pas niebieski jako położony w większej odległości od czerwonego, wówczas zaś fakt, że kąty, pod którymi widzimy oba te pasy, są w rzeczywistości równe, prowadziłby do dalszej interpretacji, iż pas niebieski jest większy od czerwonego. Niektórzy nowsi badacze sądzą jednak, iż zupełne wyjaśnienie tego zjawiska jest bardziej skomplikowane. (Hartridge, Journ. of Psychology 52, 212, 1918).

W świetle niebieskiem można widzieć wyraźnie w odległościach mniejszych, niż w świetle czerwonym. Fale krótsze skupiają się jeszcze na siatkówce, gdy dłuższe kierują się ku punktowi położonemu już poza siatków-

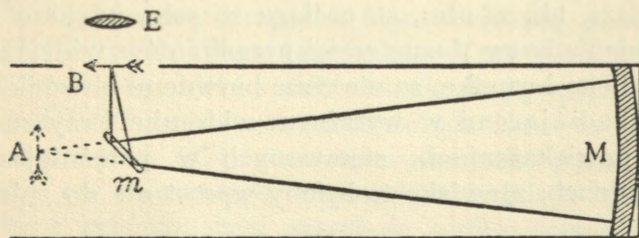
ką, nawet przy największym wysiłku akomodacyjnym oka. Na tem opiera się częściowe przynajmniej wyjaśnienie faktu, że szczegóły naszego najbliższego otoczenia widzimy wyraźniej w świetle niebieskiem niż w czerwonym.

Rozszczepienie barw, towarzyszące każdemu załamaniu promienia światła białego, staje się sprawą poważną przy zastosowaniu w celu wzmoczenia potęgi wzroku — przyrządów optycznych, gdyż przy tworzeniu się obrazów powiększonych wchodzą w grę załamania silniejsze, niż w oku, co pociąga za sobą większe rozszczepienie barw. Jasne części przedmiotów, widzianych przez lichą lornetkę, są otoczone barwnymi obwódkami, przeszkadzającymi w wyraźnem widzeniu. Przy znacznych powiększeniach, stosowanych w potężniejszych przyrządach, zjawisko to byłoby wprost nie do zniesienia.

Jest rzeczą ciekawą, że Newton uważał trudność tę za niemożliwą do przezwyciężenia; dlatego też zarzucił on użycie soczewek jako obiektywów swych teleskopów i stosował zamiast nich zwierciadła kuliste. Zwierciadło, podobnie jak soczewka, może wytworzyć obraz, który oglądamy potem zbliżając przez okular, nie daje wszakże rozszczepienia barw. Na rys. 55 M oznacza duże zwierciadło wklęsłe, które utworzyłoby obraz w A , gdyby nie małe zwierciadło płaskie m , kierujące w bok promienie odbite od M , tak iż obraz powstaje w B ; tu zaczyna się rola okularu E . Jeśliby obraz tworzył się w A , głowa obserwatora przeszkadzałaby promieniom dobiec do M . Teleskop Newtona mamy przedstawiony na tabl. XIII A.

Istnieje jednak sposób uniknięcia zabarwienia ob-

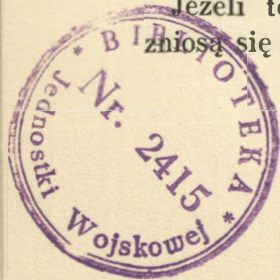
razów, po raz pierwszy zastosowany w praktyce przez J. Dollonda, który w r. 1758 przedstawił Towarzystwu Królewskiemu w Londynie pierwszą lunetę *achromatyczną*. Konstrukcja jej opiera się na tem, że rozszczepienie, towarzyszące załamaniu promieni, nie jest doń proporcjonalne dla różnych rodzajów szkła. Można skonstruować dwie soczewki, jedną ze szkła „crown”, drugą z cięższego „flintu”, takie, że rozszczepienie barw widmowych w obu soczewkach jest j e d n a-



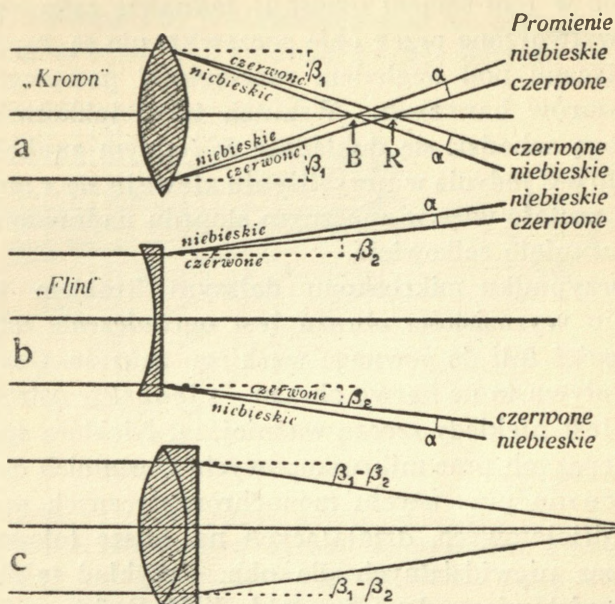
Rys. 55. Schemat teleskopu Newtona.

kowe, natomiast całkowite odchylenie promieni — r ó ż n e. Schemat przejścia wiązki światła przez wypukłą soczewkę z crownu przedstawia rys. 56a, przy czem ogniska dla promieni niebieskich oznaczono literą *B*, czerwonych — *R*. Z drugiej strony, soczewka wklęsła z flintu oddziaływa na tę samą wiązkę tak, jak to widzimy na rys. 56b. Przeciętne odchylenie promieni jest już mniejsze, niż w przypadku soczewki z crownu, lecz rozszczepienie barw α ma wartość poprzednią.

Jeżeli teraz złożymy obie soczewki, rozszczepienia zniósł się wzajemnie, nie zniósł się zaś średnie odchy-



lenia promieni, gdyż zdolność zbierająca soczewki z crownu przewyższa zdolność rozpraszającą soczewki flintowej. Łączne ich działanie przedstawia rys. 56c.



Rys. 56. Schemat (a) przedstawia bieg promieni przy użyciu soczewki z crownu. Jej zdolność zbierającą charakteryzuje wielkość kąta β_1 , zdolność rozszczepiającą, czyli odsunięcie czerwieni od fioletu, wskazuje kąt α . Szkic (b) przedstawia soczewkę z flintu o mniejszej, niż (a) zdolności zbierającej ($\beta_2 < \beta_1$), lecz o takiej samej jak (a) zdolności rozszczepiającej α . Na dolnym rysunku obie soczewki złożone razem nie oddzielają barwy czerwonej od niebieskiej, zachowują jednak zdolność zbierającą równą $\beta_1 - \beta_2$.

W ten sposób zatem wiązka świetlna zostaje zebrana w jednym punkcie bez pojawienia się barw — mamy tu achromatyczny, lub raczej *prawie* achroma-

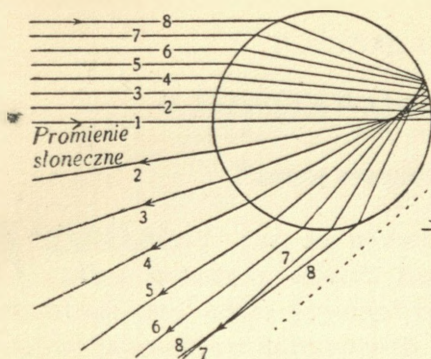
tyczny układ soczewek. Dwie dowolnie obrane długości fali, jak np. oznaczona wyżej literą *B* (w błękicie) i *R* (w czerwieni), zawsze można w opisany wyżej sposób skupić w tem samym ognisku; jednakże całkowite widma, wytworzone przez obie soczewki, nie są zupełnie identyczne pod względem rozciągłości poszczególnych obszarów barwnych. Wskutek tego, jakkolwiek *B* i *R* mogą schodzić się dokładnie w jednym punkcie, to inne barwy jedynie w przybliżeniu zlewają się z temi. Zło zostało więc w znacznym stopniu naprawione, lecz nie usunięte całkowicie.

W przypadku mikroskopu dalszym krokiem ku osiągnięciu wyrazistości obrazu jest ograniczenie użytych długości fali do pewnego wąskiego zakresu. Oczywiście, wpływa to na barwę obrazu — jednakże ostrość zarysów jest niekiedy rzeczą ważniejszą. Niektóre spośród najlepszych prac mikroskopowych z ostatnich czasów wykonano przy użyciu monochromatycznych promieni nadfioletowych, działających na kliszę fotograficzną, lecz niewidzialnych dla oka. Przykład takich zdjęć przedstawia podana na tabl. XIII B fotografia bakteryj.

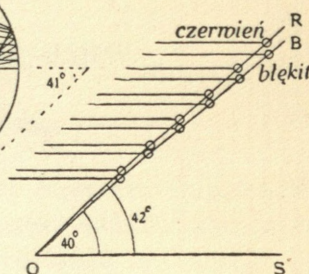
Omówione tu sprawy, związane z rozszczepieniem barw, potęgują jeszcze trudności, piętrzące się przed konstruktorem przyrządów optycznych. Im znaczniejsze jest żądane powiększenie, tem bardziej rosną wymagania z zakresu umiejętności technicznych, niezbędnych przy konstrukcji soczewek. Nasze wiadomości zarówno o świecie przedmiotów bardzo małych, jak bardzo wielkich, zawdzięczamy w głównej mierze użyciu lunet i mikroskopów — wielka zatem należy się wdzięczność tym, którzy poświęcili się ich ulepszaniu.

Tęcza

Iskrzące się w promieniach słonecznych barwy kropel, zwisających po deszczu z liści lub ogrodzeń drucianych, są wynikiem załamania i odbicia światła; na oddala-



R y s. 56a.



R y s. 56b.

R y s. 56a. Koło przedstawia kulistą kroplę wody. Równoległa wiązka promieni słonecznych wchodzi do jej wnętrza u góry i wychodzi po dwóch załamaniach i jednym odbiciu; liczby wskazują odpowiadające sobie promienie. Większa część promieni wychodzi prawie równoległe do linii, tworzącej kąt 41° z promieniami pierwotnymi (w rzeczywistości 40° dla promieni niebieskich, 42° dla czerwonych).

R y s. 56b. Wskutek tego, do obserwatora w O, patrzącego w dowolnym kierunku pod kątem 42° do linii, łączącej O ze słońcem (które znajduje się poza obserwatorem), dobiega światło czerwone od każdej kropli, przypadającej na linii widzenia. Wszystkie wspomniane kierunki tworzą razem stożek o osi OS. Stożek niebieski leży wewnątrz czerwonego.

jące się chmurze deszczowej barwy te zespalają się w tęczę. Załączone rysunki objaśniają, jak się to dzieje.

Należy tu zaznaczyć, że tęczą nie znajduje się w jakiejś określonej odległości od obserwatora, jakkolwiek barwy jej przypadają w kierunkach ściśle oznaczonych.

ROZDZIAŁ IV

O POWSTAWANIU BARW

Zasada rezonansu

WIDZIELIŚMY już, że barwy powstają najczęściej przez usunięcie innych barw. Światło słoneczne jest mieszaniną, którą pryzmat rozkłada na szereg elementów jakościowo odmiennych. Oko rozróżnia je jako odrębne barwy, fizyk zaś w swej pracowni — jako rozmaite długości fali. Mówiliśmy już także o ciekawym urządzeniu oka, dzięki któremu barwy oraz ich mieszaniny mogą być postrzegane i przekazywane mózgowi w celu interpretacji.

Zastanówmy się teraz nieco dokładniej nad tem, w jaki sposób odbywa się owo „zniszczenie“ barw. Światło słoneczne pada na przedmioty nas otaczające — liście, trawę, kwiaty, ptaki, owady, samą ziemię wreszcie — i wszędzie mamy do czynienia z barwami, wszędzie więc zejść musiało unicestwienie pewnych barw. Jak się to dzieje? Dzięki jakiemu procesowi barwniki spełniają swe zadanie?

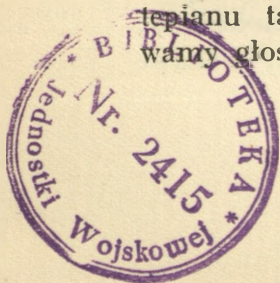
Warto tu zaznaczyć, że choć większość barw otaczającego nas świata zawdzięczamy działaniu barwników, to jednak istnieją również inne nadzwyczaj ciekawe

i ważne przyczyny powstawania barw — przytem może najpiękniejszych spośród wszystkich zjawisk tego rodzaju. Należą tu zjawiska *uginania* i *interferencji*; zajmujemy się ich rozpatrzeniem w swoim czasie, obecnie zaś ograniczymy się do działania barwników, które — przynajmniej w znaczeniu ilościowym — jest główną przyczyną powstawania barw.

Cała zagadka tkwi tutaj w t. zw. „*zasadzie rezonansu*“, której przejawy są zresztą nader pospolite i łatwe do zaobserwowania. Weźmy pod uwagę prosty przykład oddziaływania jednych widełek strojowych na inne, nastrojone na ten sam ton. Oba kamertony, przytwierdzone do swych pudełek rezonujących, ustawiamy obok siebie na stole, poczem jeden z nich silnie pobudzamy do dźwięczenia, pociągając smyczkiem po jego ramionach. Po kilku sekundach zmuszamy go do milczenia dotknięciem palca: przekonywamy się wówczas, że drugie widełki dźwięczą, chociaż wcale ich nie dotykaliśmy — zostały one wprowadzone w ruch przez pierwszy kamerton. Po chwili można zgłuszyć dźwięk drugiego: okaże się, że pierwszy odzyskał spowrotem część energii, którą poprzednio wydawał, i że dźwięczy on słabiutko.

Jest rzeczą istotną, aby kamertony były „dostrojone“. Jeśli przyczepimy odrobinę wosku do ramienia któregośkolwiek z nich, przenoszenie się energii tam i spowrotem ustaje i zjawisko „rezonansu“ nie występuje.

Można przytoczyć wiele innych analogicznych przykładów. Jeśli naciśniemy ostrożnie jeden klawisz fortepianu tak, aby odsunąć tłumik od struny, i zaśpiewamy głośno daną nutę, wówczas struna zacznie rezo-



nować, co można usłyszeć, gdy przestaniemy śpiewać. Żadna inna struna nie odpowie w ten sposób: głos i struna muszą być dostrojone unisono, chyba że odźwięk nastąpi z tego powodu, iż niema źródeł dźwięku zupełnie „czystych“, lecz każde zawiera zarówno ton podstawowy, jak i wyższe tony harmoniczne, co daje nowe możliwości współbrzmienia.

Śpiewacy, obdarzeni potężnym głosem chcą się niekiedy, że potrafią strzaskać puhar szklany, nie dotykając go bynajmniej, a tylko śpiewając głośno tuż przy nim ten sam ton, jaki wydawałby puhar, gdyby go wzbudzić do dźwięku lekkim uderzeniem.

Najpospolitszem jednak w naszych czasach zjawiskiem rezonansu jest to, na którym polega odbiór radjowy. Przy „dostrojeniu“ odbiornika, korzystamy bezpośrednio z zasady rezonansu: obracamy guziki aparatu dopóty, dopóki okres, czy też częstość drgań elektrycznych w jego kondensatorach i cewkach nie zrówna się dokładnie z okresem drgań fal, dochodzących ze stacji nadawczej. Różne stacje wysyłają fale o różnej częstości, które różnią się od siebie zupełnie tak samo, jak jedna barwa różni się od innej: każda stacja ma swą własną częstość, swój „kolor“. Odbiornik nasz jest jakby „barwnikiem“, pochłaniającym pewną określoną barwę, przyczem możemy tu zmieniać ów „barwnik“, dopóki nie pocznie absorbować barwy żądanej. Im lepszy odbiornik, tem dokładniejsze jest dostrojenie, „wylawiające“ żadaną stację z możliwie zupełną „eliminacją“ wszystkich innych.

Aby znaleźć odpowiedź na pytanie, dlaczego strojenie jest tak potrzebne i tak skuteczne, wystarczy wziąć pod uwagę jakiś specjalny przypadek rezonansu, gdzie

ruch jest tak powolny, że można dogodnie śledzić poszczególne jego fazy. Wyobraźmy sobie dziecko na huśtawce, którą ktoś stara się wprowadzić w ruch. Huśtawka posiada swój naturalny okres ruchu tam i spowrotem, swą częstość „własną“, t. zn. określoną liczbę wahaní w ciągu minuty czy innego oznaczonego przeciągu czasu. Jeśli huśtawka otrzymuje impulsy zawsze w odpowiednich chwilach, to amplituda wahaní wciąz wzrasta, aż wreszcie osiągamy stan taki, że energia jednego impulsu zużywa się w całości na zwalczanie oporu powietrza i innych sił, przeciwstawiających się ruchowi. Jeżeli jednak impulsy następują po sobie bądźto w odstępach nieprawidłowych, bądź nawet prawidłowych, lecz różnych od okresu wahaní huśtawki, wówczas kolejne impulsy niweczą wzajemnie swe działanie. Jedno popchnięcie może nastąpić w chwili, gdy huśtawka się oddala — i to jest korzystne, — inne znów w chwili zbliżania się huśtawki — co oczywiście stara się ruch zahamować, i tak dalej. Wielka ilość prawidłowych impulsów osiągnie skutek jedynie wtedy, gdy odstęp czasu pomiędzy kolejnymi popchnięciami będzie zgodny z okresem wahaní, w przeciwnym bowiem razie impulsy te będą co pewien czas naprzemian to wzmagaly, to hamowały ruch.

Gdy dźwięczący kamerton wzbudza drgania w innym, wówczas każdy poszczególny impuls jest niezmiernie słaby, jako że przenosi się wyłącznie za pośrednictwem powietrza; lecz dzięki doskonałemu zestrojeniu skutki impulsów dodają się do siebie. Rytmiczny marsz oddziału wojska po moście może stać się niebezpiecznym, gdy jeden z okresów drgania mostu zgadza się z okresem kroków żołnierzy; przy słabej konstrukcji, most może

wówczas nie wytrzymać wzbudzonych w ten sposób silnych drgań. Dlatego to nieraz rozkazuje się oddziałowi „zmieszać krok” podczas marszu po moście. Podobnie sprawa się przedstawia i w innych przypadkach rezonansu: słabe impulsy wywierają skutek, jeśli są należycie dostrojone.

Absorbacja światła o pewnej długości fali przez barwniki jest również zjawiskiem rezonansu, podobnem do przytoczonych wyżej; przypomina ona szczególnie odbiór radjowy, jest bowiem zjawiskiem natury elektrycznej i oddziaływa na fale eteru, różniące się tylko pod względem długości od tych, które stosuje się w radjofonji. Odbiornik radjowy pochłania długie fale eteru, — w barwniku zachodzi absorbacja krótkich fal świetlnych.

Odbiornik radjowy zawiera układ odpowiednio dobranych kondensatorów elektrycznych i cewek. Atomy i cząsteczki są „odbiornikami” świetlnymi: wiemy o tem dobrze, jakkolwiek przeprowadzenie dokładnego porównania, punkt po punkcie, z owymi większemi odbiornikami jest rzeczą trudną i skomplikowaną.

Istnieją jednak pewne niezmiernie ciekawe ogólne cechy atomów i cząsteczek, rozpatrywanych jako rezonatory, i omówieniem tych właśnie cech zajmujemy się obecnie. Weźmiemy pod uwagę niektóre najważniejsze ze znanych barwników.

W celu należytego wyjaśnienia związku pomiędzy odbiorem i absorbcją musimy tu najpierw rozpatrzyć jedną sprawę. Gdy dźwięczący kamerton wzbudza w innym drgania, część emitowanej przezeń energii musi zużyć się w tym procesie. Podobnie każdy odbiornik radjowy pochłania pewną ilość energii z eteru; prawda,

iż przy pomocy urządzeń, dobrze znanych specjalistom, może on być pobudzany do czerpania energii ze źródła włączonego do układu odbiorczego, lecz obecnie nie o to nam chodzi.

Wyobraźmy sobie dźwięczący kamerton, który wysyła energję na wszystkie strony. Niech fale głosowe, rozchodzące się w pewnym kierunku, napotkają obszar, w którym znajduje się wielka ilość kamertonów, nastrojonych na ton tej samej wysokości. Wszystkie one zostają wprowadzone w ruch, wskutek czego energia fal ulega pochłanianiu. Najwidoczniej więc w kierunku rozważanym rozchodzi się już mniej energii: wprowadzie bateria kamertonów - odbiorników emituje ten sam ton, lecz całkowita ilość energii wysłanej, nie może przewyższać ilości energii zaabsorbowanej, a zresztą rozchodzi się ona przecież we *wszelkich* kierunkach — niewątpliwie więc na kierunek pierwotny przypadnie mniej energii: innemi słowy, ów zbiór kamertonów działa jak o s r o d e k p o c h ł a n i a j ą c y. Jeżeli w źródle fal jest również dwoje lub troje widełek strojowych o tonach odmiennych od tonu owej baterji kamertonów, wówczas ta ostatnia nie pochłania bynajmniej energii z fal dźwiękowych tamtych niedostrojonych widełek: — działanie baterji jest „selektywne”, pochłania ona jedną długość fali, a innym pozwala rozchodzić się bez przeszkody.

Analogja z działaniem barwnika jest tu oczywista. Barwnik jest zbiorem identycznych atomów i cząsteczek, które mogą wszystkie emitować i pochłaniać światło o pewnych oznaczonych długościach fali. Używamy tu liczby mnogiej, gdyż kamerton jest o wiele zbyt prostym źródłem dźwięku, by móc należycie reprezento-

wać rozmaite możliwe drgania atomu lub cząsteczki. Widmo światła białego, które przeszło przez obszar, zawierający owe skomplikowane oscylatory, musi okazywać więcej niż jedną przerwę.

Drgania atomów i cząsteczek

Atomy i cząsteczki mają rozmiary bardzo małe. Wprowadzimy tu jednostkę długości dogodną dla wyrażania rozmiarów atomowych, t. zw. jednostkę Ångströma, czyli angström ($\text{\AA}$), równą jednej stumiljonowej części centymetra. Istnieją 92 różne rodzaje atomów; cząsteczki składają się w ogólności z niewielu atomów: 2, 3, 4 i t. d. Cząsteczka złożona z 20, 30 lub więcej atomów zalicza się już do dużych. Średnice atomów są rzędu wielkości 1—3 $\text{\AA}$.

Przy pomocy rozmaitych metod udało się dość dokładnie wyznaczyć owe tak drobne rozmiary. Istotnie, metody analizy rentgenowskiej pozwalają skutecznie to z bardzo wielką dokładnością, przynajmniej w przypadku, gdy te atomy i cząsteczki wchodzi w skład kryształów. W wielu przypadkach chemicy są w stanie utworzyć sobie pojęcie o planie budowy cząsteczki, jak rozmieszczone są atomy względem siebie, i z jakimi sąsiadami każdy z nich jest związany. Wyników tych prowadzą uciążliwe badania reakcyj chemicznych, t. zn. wszystkich tych procesów, w których cząsteczki różnych rodzajów, wprowadzone w zetknięcie, wymieniają pomiędzy sobą atomy i tworzą nowe kombinacje. Sprawa ta jest o wiele za obszerna, abyśmy mogli ją tu omawiać; wystarczy wspomnieć, że badania tego rodzaju posiadają olbrzymie znaczenie — zwłaszcza dotyczy to tej gałęzi chemii, która zajmuje

się cząsteczkami, odgrywającymi specjalnie ważną rolę w budowie organizmów żywych. Jak możnaby zgóry oczekiwać, własności cząsteczki zależą od uporządkowania atomów — podobnie, jak charakter budynku zależy od tego, jak są rozmieszczone różne jego części składowe — cegły, deski, dachówki i t. d. W ostatnich czasach przyszły z pomocą chemikom w tych badaniach promienie Röntgena. Zobaczymy w dalszym ciągu, w jaki sposób uzupełniają i rozszerzają one wiadomości, uzyskane metodami chemicznymi.

Otóż, aczkolwiek opis drgań cząsteczki nie jest rzeczą tak łatwą, jak opis ruchów kamertonu, to jednak w niektórych przypadkach możemy znaleźć pewne związki pomiędzy „tonami“ cząsteczki, a jej budową. Ponieważ zaś wykrycie takich związków jest rzeczą bardzo ciekawą i często ważną z punktu widzenia przemysłu, przeto cząsteczki „barwiące“ badane były nadzwyczaj starannie, zwłaszcza, o ile chodzi o „tony“, czyli „częstości własne“, oraz skład i postać samych cząsteczek.

Chlorofil

Rozpocznijmy nasz przegląd od cząsteczki chlorofilu, jednej z najbardziej interesujących, a z punktu widzenia zjawisk życiowych najważniejszej ze wszystkich cząsteczek. Budowa jej jest bardzo złożona i badania nad tą cząsteczką nie posunęły się dotychczas zbyt daleko. Zaczynamy jednak od niej dlatego, że ona to barwi nam cały świat roślinny; co więcej, ona to zbiera energję promieni słonecznych i przekształca ją na postacię użyteczne dla nas. Z jednej strony dzięki niej

napawamy się pięknem pól i lasów, z drugiej zaś za jej pośrednictwem przyroda czyni pierwszy krok w hierarchji zjawisk życiowych. Zresztą, węgiel i ropa, które odgrywają tak ważną rolę w stosunkach ludzkich, są to zapasy energii, zaczerpnięte w wiekach ubiegłych przez chlorofil z promieni słonecznych.

Rzućmy w zwykły sposób na ekran widmo, otrzymane przez rozszczepienie w pryzmacie światła słońca lub łuku elektrycznego i umieścmy w drodze promieni naczynie, zawierające chlorofil — łatwo i dogodnie można go otrzymać np. z liści pokrzywy —; spostrzeżemy wówczas, że fale długie są silnie pochłaniane, z wyjątkiem wąskiego pasma w dalekiej czerwieni (tabl. XIV G). W innych częściach widma również pojawiają się słabsze pasma, krótkofalowy zaś koniec widma znika. Rzeczą zasadniczą jest tu jednak absorbcja fal długich. Częsteczka chlorofilu „odpowiada“ na ten specjalny obszar długości fali w świetle słonecznem i pochłania przytem energję. Chemja wykazuje, że „wzmocniona“ w ten sposób — jeśli można użyć tego wyrażenia — cząsteczka chlorofilu może łączyć się z wszędzie obecną cząsteczką dwutlenku węgla (CO_2), tworząc następnie „węglowodany“ — skrobie i cukry — które są podstawą życia roślin. Jedząc rośliny lub zwierzęta roślinożerne, również czerpiemy siły życiowe z pochłaniania przez chlorofil promieni czerwonych.

Jedną z najgodniejszych uwagi zdobyczy naukowych jest niewątpliwie stwierdzenie faktu, iż ta właśnie cząsteczka odgrywa rolę tak ważną. Występuje ona we wszystkich roślinach; wiadomo wprawdzie, że istnieją dwie różne jej postacie, pomijając to jednak wszystkim roślinom jedna i ta sama cząsteczka służy do tego

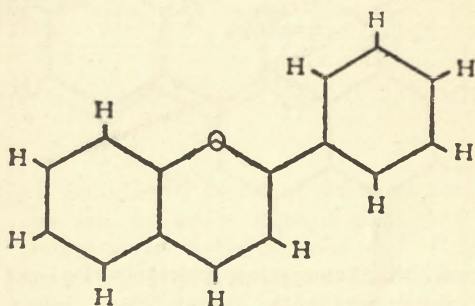
samego celu. Sprawa staje się jeszcze bardziej interesująca, jeśli weźmiemy pod uwagę, że hemoglobina, która posiada tak ważne znaczenie w życiu zwierzęcem, ma podobną budowę. Wielka jakaś, nieznana jeszcze tajemnica kryje się w tem powszechnem zastosowaniu jednej specjalnej postaci cząsteczki. Skład jej jest znany: zawiera ona 55 atomów węgla, 72 wodoru, 5 tlenu, 4 azotu i 1 magnezu — twór istotnie dość skomplikowany. Nader niewiele jednak wiadomo dotychczas o bardzo ważnem zagadnieniu, dotyczącem uporządkowania tych atomów w cząsteczce.

Barwy kwiatów

Skolei zwróćmy się do barw kwiatów. I tutaj cała ich gama zależy od niewielkiej ilości form podstawowych, jakkolwiek oczywiście w tym przypadku muszą występować liczne formy pochodne — barwy te są przecież tak nieskończenie rozmaite. Jedną z najważniejszych wśród owych cząsteczek jest *karotyna*, barwnik, który w jednej z jego odmian otrzymano z marchwi już przed stu laty. Cząsteczka ta składa się z 40 atomów węgla i 56 atomów wodoru, niewiele wiadomo jednak o sposobie ich połączenia pomiędzy sobą. Innym barwnikiem roślinnym jest *ksantofil*, różniący się od karotyny pod względem budowy tylko tem, że posiada dodatkowo dwa atomy tlenu. Żółte i czerwone barwy kwiatów zawdzięczamy głównie dwu wymienionym barwnikom oraz ich odmianom. Pierwszy z nich znajduje się np. w złotogłowach, pierwiosnkach i brodawnikach; ostatni — w nagietkach, jaskółczem zielu i słonecznikach. Barwniki te istnieją również w liściach roś-

lin, i gdy chlorofil znika w jesieni, one to nadają liściom „barwy jesienne“. W ostatnich czasach wykazano, że witamina A wytwarza się z karotyny pod działaniem światła nadfioletowego.

Dalej mamy ciekawe substancje, znane pod nazwą *antocjanin*, również barwiące liczne gatunki kwiatów. W tym przypadku skład i budowa cząsteczki są znane; można przytem stwierdzić, iż pewne określone zmiany

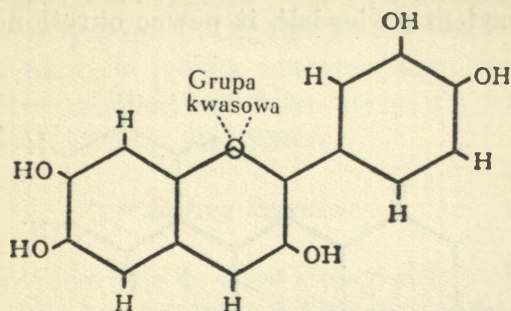


Rys. 57. Schemat ten przedstawia rozmieszczenie atomów w pierwotnej cząsteczce antocjaniny, której pochodnymi są barwniki kwiatowe.

postaci cząsteczki powodują zmiany barwy. Schemat struktury podstawowej widzimy na rys. 57: główną jej cechą są ciekawe połączenia atomów węgla i tlenu w sześciokątne pierścienie. Atomy węgla, nie zaznaczone osobno na rysunku, znajdują się we wszystkich wierzchołkach sześciokątów z wyjątkiem punktu O, gdzie tkwi atom tlenu. Wodory przyłączone są w punktach, oznaczonych literami H. Uporządkowanie atomów zostało tu wyznaczone metodami chemicznymi.

Cały ten układ jest prawdopodobnie płaski, nie moż-

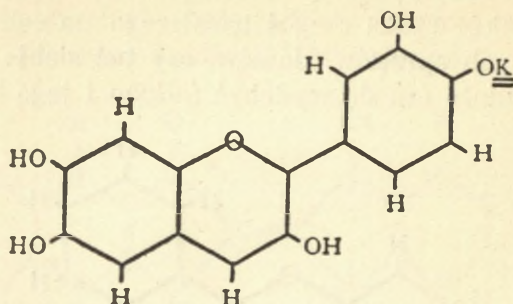
na jednak uważać tego za rzecz pewną. Niektóre inne cząsteczki, zawierające sześciokątne pierścienie węglowe (t. zw. pierścienie benzenowe), są, jak tego dowodzą metody rentgenowskie, płaskie, przyczem sześciokąt jest regularny, a długość boku wynosi $1,42 \text{ \AA}$ ($1 \text{ \AA} = 1/100\,000\,000 \text{ cm}$).



Rys. 58. Antocjanina, której barwę swą zawdzięcza róża, tworzy się z formy, przedstawionej na rys. 57 przez luźne dołączenie grupy kwasowej do atomu tlenu i zastąpienie w pewnych miejscach wodorów grupami wodorotlenowymi. Cząsteczka ma teraz charakter kwasowy.

Antocjaninom zawdzięczamy liczne odmiany barw czerwonych, purpurowych i niebieskich. Na rysunku 58 na przykład podano schemat odmiany, nadającej barwę róży; od postaci zasadniczej rys. 57 różni się ona głównie kwasową grupą atomów, dołączoną do atomu tlenu. Jeśli grupę tę usunąć i nadać cząsteczkom charakter zasadowy przez zastąpienie wodoru na jednym końcu cząsteczki atomem potasu, otrzymamy tę antocjaninę, która barwi bławatki na niebiesko (rys. 59).

W niektórych okolicach dzieci sadzą niebieskie dzikie hiacynty w pobliżu mrowiska, przyczem wydzielający się kwas mrówkowy powoduje przemianę błękitnej barwy kwiatów na czerwoną.



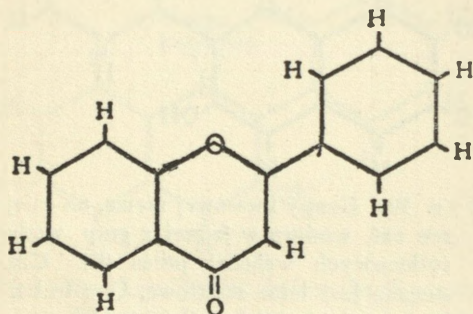
R y s. 59. Grupy kwasowej niema, na miejsce zaś wodoru w jednej z grup wodorotlenowych wchodzi potas (K). Część cząsteczki jest teraz zasadową. Ona to barwi bławatek na niebiesko.

Istnieje pewna niewielka odmiana szkieletu cząsteczki antocjanin, przedstawiona na rys. 60, a polegająca na dołączeniu jednego atomu tlenu. Zmiana ta sprawia, iż nowe ciało — barwnik pierwiosnka — staje się rozpuszczalne w wodzie; być może, to właśnie jest przyczyną faktu, iż pierwiosnki tak wyraźnie tracą barwę pod wpływem wilgoci.

Substancje barwiące

Od niepamiętnych czasów ludzie wydobywali barwniki z roślin; rzecz ciekawa jednak, iż rzadko używano przytem naturalnych substancyj barwiących, zawar-

tych w liściach i kwiatach, korzystano natomiast z tych części składowych roślin, które nie odgrywają żadnej roli w zabarwieniu samej rośliny. Barwy naturalne są zbyt nietrwałe. Zmiany ich, towarzyszące biegowi pór roku, są rzeczą właściwą wśród zjawisk Przyrody, człowiek wszakże szuka czegoś trwalszego do celów ozdabiania swych sprzętów, domów, czy też siebie samego. Tak np. udało mu się wydobyć *indygo* i jego bliskiego

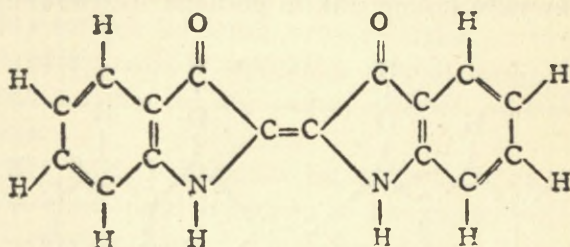


R y s. 60. Podstawowa forma antokszantyny tworzy się z takiejże formy antocyjaniny przez dodanie jednego atomu tlenu, silnie związanego z węglem w pierścieniu środkowym zamiast atomu wodoru.

krewniaka urzet z korzeni pewnych roślin, które nauczył się był uprawiać. Z tych substancyj oraz ich pochodnych farbiarze wytworzyli wiele dobrze znanych rodzajów barw.

Budowa cząsteczki indyga jest dokładnie znana; schemat jej przedstawia rys. 61. Od czasu, gdy w r. 1883 została ona ostatecznie wyświetlona przez A. von Bayera, syntetyczna fabrykacja indyga zastąpiła w zupełności dawny bardziej uciążliwy sposób otrzymywania

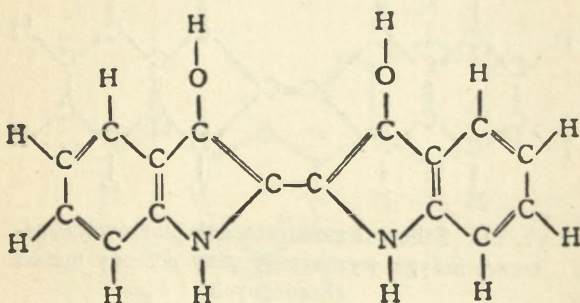
go z rośliny. Przy użyciu indyga napotykamy pewne ciekawe i charakterystyczne sprawy. Samo przez się jest ono nierozpuszczalne w wodzie, co oczywiście jest wielką zaletą dla substancji, mającej barwić przedmioty wystawiane na zmiany pogody. Do samego procesu farbowania potrzebny jest jednak roztwór, w którym możnaby zanurzyć tkaninę. Aby pokonać tę trudność,



Rys. 61. Schemat rozmieszczenia atomów w cząsteczce indyga, wyznaczony przy pomocy metod chemicznych.

farbiarz poddaje indygo pewnym działaniom chemicznym, dzięki którym do jego cząsteczek doczepiają się po dwa atomy wodoru (rys. 62). Cząsteczka tak zmieniona ma tę własność, że łączy się z cząsteczkami wody — t. zn. indygo staje się rozpuszczalne w wodzie. Jednocześnie staje się b e z b a r w n e; fakt ten doskonale ilustruje punkt, który staraliśmy się uwydatnić, mianowicie, iż pochłanianie światła przez cząsteczki jest zjawiskiem o charakterze rezonansu. Widzieliśmy poprzednio, że ton dźwięczących widełek strojowych ulega zmianie, gdy do jednego lub do obu ramion doczepimy odrobinę wosku: skutek obciążenia kamertonu drgania zostały zwolnione. Jeśli więc istnieje tu

jakaś analogja, powinniśmy oczekiwać, że „ton“ czy też „tony“ cząsteczki również mogą być zmienione przez jej „obciążenie“, t. zn. przez dołączenie różnych atomów w odpowiednich miejscach. Istotnie, chemik-farbiarz eksperymentuje z podobnemi dodatkami: stara się on znaleźć, co i gdzie powinien dodać do cząsteczki. Jednocześnie musi on dbać o zapewnienie farbie „trwałości“: zwykle koleje, jakim podlega ufarbowany prze-



Rys. 62. Cząsteczka indyga przekształcona na postać rozpuszczalną.

zeń materiał, nie powinny rozluźniać lub odrywać owych „dodatków“.

Dziedzina fal widzialnych jest nader wąska, nie-trudno więc przesunąć „ton“ cząsteczki do zupełnie innego obszaru widma lub nawet poza jego granice. To właśnie dzieje się z cząsteczką indyga, gdy czynimy ją rozpuszczalną w wodzie: przedtem pochłaniała ona fale długie, przepuszczając jednocześnie błękit, obecnie przepuszcza wszystkie fale — dlatego też roztwór jest bezbarwny.

Nie stanowi to jednak przeszkody w farbowaniu. Materiał zanurzamy w roztworze indyga, przyczem

barnik łączy się z włóknami; otóż atomy wodoru, uprzednio dodane do cząsteczki indyga, można usunąć bardzo łatwo zapomocą działania powietrza. Natychmiast po wyjęciu materiału z kąpieli farbiarskiej cząsteczki poczynają wracać do swej postaci normalnej, dającej barwę „indygową“. Tkanina jest wówczas odporna na wilgoć; cel farbiarza został osiągnięty.

Marzanna, którą dawni Brytowie ozdabiali swe ciała dwa tysiące lat temu, oraz cesarska purpura Rzymian, wydobywana z mięczaka *Murex*, mają budowę cząsteczki opartą na tej samej postaci podstawowej, co indygo.

Barwy liści i kwiatów są oczywiście najbardziej rozpowszechnionymi barwami w otaczającej nas przyrodzie — z wyjątkiem barw nieba i morza, któremi zajmujemy się wkrótce. Te ostatnie, podobnie jak błękit dali i barwy zorzy, nie są wywołane przez barwniki i tłumaczą się w sposób zupełnie odmienny. Są dalej barwy minerałów i skał, niektóre z nich tak żywe, iż substancyj tych używa się jako farb; barwy ich powstają również dzięki zjawisku absorbcji, można więc zaliczyć je do tej samej klasy, co barwniki, które przed chwilą rozpatrywaliśmy.

Uginanie światła

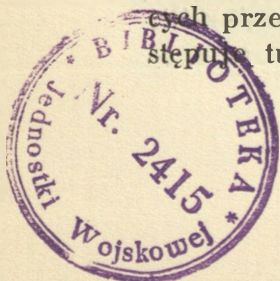
Obecnie jednak musimy przejść do zaznajomienia się z nową dziedziną — z innymi przyczynami powstawania barw, zupełnie różnymi od zjawisk częściowego pochłaniania, które omawialiśmy dotychczas.

Mieliśmy już poprzednio sposobność podkreślić godny uwagi fakt, iż promień światła ulega na swej

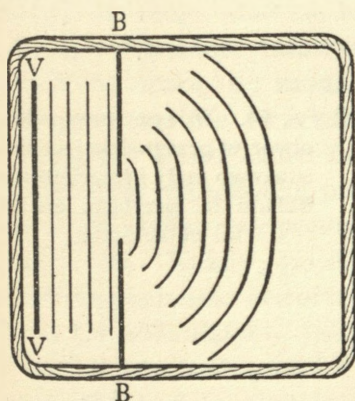
drodze jedynie bardzo nieznacznemu „rozszerzaniu się”, i widzieliśmy, iż fakt ten nie łatwo było zrozumieć przy założeniu, że światło jest rodzajem ruchu falowego. Istotnie, Newton uważał go za najważniejszy zarzut przeciw teorii falowej. Doświadczenia z falami wodnymi, wykonywane np. przy pomocy naszego „basenu falowego”, wykazują zawsze mniej lub bardziej wyraźne rozchodzenie się fal na boki; możnaby więc wraz z Newtonem przypuszczać, że zjawisko to powinno wystąpić również w przypadku światła w sposób tak wybitny, iż brak jego dowodzi niesłuszności teorii falowej. W rzeczywistości wszakże to, co wydawało się groźnym zarzutem przeciw tej teorii, przekształciło się w jeden z najsilniejszych d o w o d ó w na jej korzyść. Bliższe zbadanie sprawy przekonywa, iż owo rozszerzanie się promieni na boki może być bardzo nieznaczne i trudne do wykrycia, jeśli długość fali jest mała w porównaniu z poprzecznymi rozmiarami promienia. W przypadku światła stosunek tych dwu wielkości jest najczęściej bardzo mały, tak iż rozszerzanie się promieni jest trudne do zaobserwowania — okoliczność to niewątpliwie pomyślna dla procesu widzenia.

Sprawa ta ma ogromne znaczenie dla teoryj światła. Musimy zatem zbadać ją dokładnie, kierując się przytem wskazówkami, zaczerpniętymi z doświadczenia.

Wstawmy do basenu falowego dwie przegrody, pozostawiając między nimi przerwę, i wytwórzmy ciąg fal (rys. 63), biegnących ku otworowi i przechodzących przez niego: stwierdzimy natychmiast, że zawsze występuje tu pewne rozpraszanie się fal na boki. Fale



po drugiej stronie barjery stanowią do pewnego stopnia przedłużenie pierwotnego układu fal i są do nich równoległe. Z obu stron nowego układu tworzy się coś, co możnaby nazwać jego „skrzydłami“, i co właśnie rozprzestrzenia się na boki. Im szerszy jest otwór, tem ważniejszą rolę odgrywa część środkowa, przedłużająca prawidłowy ruch naprzód pierwotnego układu fal, a tem mniejsze znaczenie posiadają „skrzydła“. Jeśli otwór jest bardzo mały, część środkowa razem ze



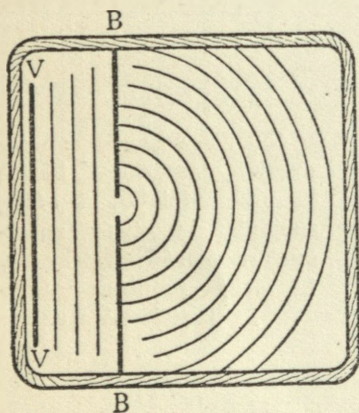
Rys. 63. Fale wzbudzone przez drgającą deseczkę *V* biegną ku przegrodzie *B*, w której znajduje się otwór znacznych rozmiarów. Dalszy bieg fal zachowuje przez czas jakiś kształt otworu.

skrzydłami tworzą półkole, i zaburzenie po przejściu przez otwór rozchodzi się jednakowo na wszystkie strony, jak na rys. 64.

Mówiąc o rozmiarach otworu, mamy na myśli jego rozmiary w stosunku do długości fali. Dany otwór, który może być duży dla fal krótkich, odgrywa rolę małego otworka i powoduje półkoliste rozchodzenie się (jak na rys. 64) fal dostatecznie długich.

W basenie falowym niepodobna odtworzyć stosunków, zachodzących w przypadku światła. Fale nasze

są zawsze zbyt długie w stosunku do odpowiednich otworów. Jeśli chodzi o światło, otwór szerokości 1 cm jest jakieś 20 tysięcy razy większy od długości fali; łatwo można sobie wyobrazić, jak niezmiernie mała jest część „skrzydłowa“ układu fal w stosunku do środkowej. Aby można było dokładnie odtworzyć odpowiednio zjawiska świetlne należałoby powiększyć tysiące razy rozmiary basenu falowego i otworu w przegrodzie.



Rys. 64. W tym przypadku otwór w przegrodzie jest stosunkowo mały i przedłużenie układu fal przybiera postać fal półkolistych.

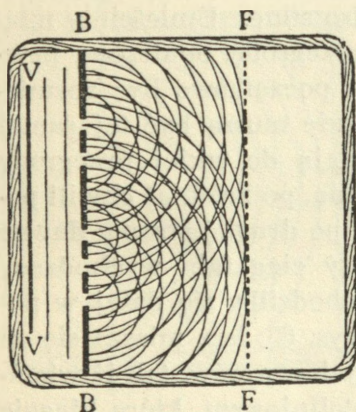
Doświadczenia z falami wodnymi uczą nas wszakże, iż rozszerzanie się fal na boki musi w pewnej mierze zawsze zachodzić; jednocześnie staje się dla nas rzeczą jasną, iż w zwykłych warunkach nie powinniśmy go zupełnie dostrzegać w przypadku promieni świetlnych. W warunkach specjalnie dobranych, takich, jakie możemy wytworzyć w laboratorium, uginanie staje się dostrzegalne; innymi słowy, możemy okazać, że w odpowiednich warunkach światło „zachodzi poza węgly“. Doświadczenia z falami wodnymi wskazują ponadto,

że fale długie i krótkie mogą niejednakowo łatwo „obchodzić węgły“, długość fali odgrywa bowiem rolę w tem zjawisku; dzięki temu mogą pojawiać się barwy. Tak też jest w istocie, ponieważ jednak całe zjawisko niełatwo jest zaobserwować w zwykłych warunkach, tem bardziej zatem trudno dostrzegalne jest owo rozszczepianie światła na barwy.

Zastosujemy teraz w doświadczeniach z basenem falowym pewne urządzenie, które pozwoli nam zrozumieć, dlaczego w przypadku światła wspomniane zabarwienia mogą stać się bardzo silne. Umieścimy mianowicie w basenie falowym przegrodę, opatrzoną pewną liczbą otworów; mogą one początkowo być rozmieszczone dowolnie i niekoniecznie muszą być tej samej wielkości. Fale, które dobiegają do takiej przegrody i częściowo przechodzą przez nią, po krótkiej chwili połączą się i odtworzą ponownie po drugiej stronie dawne czoło fali. Każdy pojedynczy ciąg fal, wychodzący z któregośkolwiek otworu, rozchodziłby się dalej w postaci fal półkolistych, jak na rys. 65, lecz miesza się on z falami, wychodzącymi z innych otworów, tak iż w końcu powstaje fala o czole prostolinjowem, która biegnie w kierunku pierwotnym. Celem tego doświadczenia jest okazanie, że wszystkie owe półkoliste ciągi fal składają się na jeden układ fal o czole prostolinjowem.

Wyobraźmy sobie teraz, iż wspomnianą wyżej przegrodę zastąpiono inną, w której otwory rozmieszczone są w równych odstępach. Nie muszą one koniecznie mieć jednakowych rozmiarów, dogodniej jednak wziąć właśnie takie. Wykonajmy wykres, który pozwoli nam orzec, co będzie się działo w tym przypadku; jest to nawet łatwiejsze, niż przeprowadzenie

rzeczywistego doświadczenia, gdyż basen jest za mały do tego celu. Wykres ten przedstawia rys. 66. Pomi-
mo pozornej komplikacji składa się on poprostu z pół-
okręgów zakreślonych dokoła środków otworów. Każdy
zbiór półokręgów przedstawia fale półkoliste, jakieby
powstały, gdyby w przegrodzie był tylko jeden dany
otwór. W rzeczywistości wszystkie te układy zespala-
ją się w jeden i, podobnie jak w doświadczeniu poprzed-
nim, tworzy się ciąg fal, który można uważać za prze-



Rys. 65. Jeśli fale (rys. 64
przechodzą przez większą
liczbę otworów, może wytwor-
zyć się nowe czoło fali, za-
znaczone linią przerywaną,
równoległą do czoła pierwot-
nego.

dłużenie — o zmniejszonej energii — ciągu pierwot-
nego. Czoło tego ciągu jest równoległe do pierwotnego
czoła fal i uwydatnia się coraz wyraźniej w miarę od-
dalania się od przegrody. Dotąd doświadczenie opisy-
wane nie różni się niczem, poza równością odstępów
pomiędzy otworami, od doświadczenia przedstawionego
na rys. 65.

Występuje tu wszakże nowe zjawisko, które może
pojawić się tylko wtedy, gdy otwory są rozmieszczone

w r ó w n y c h odstępach. Prócz tego czoła, które odpowiada falom, biegnącym w kierunku pierwotnym, tworzy się inne czoło u k o ś n e, równoległe do linii OB na rysunku. Powstaje ono dzięki współdziałaniu fal, należących do poszczególnych układów półkolistych; fale te nie wychodzą jednak z otworów w t e j s a m e j chwili, lecz w pewnych dostępach czasu. Czoło jest styczne np. do pierwszego półkola, należącego do pierwszego otworu, do drugiego półkola z drugiego otworu i t. d. Na rysunku widać je najlepiej, jeśli patrzeć nań w kierunku równoległym do OB i bardzo ukośnie, umieściwszy oko niemal w płaszczyźnie papieru. Rys. 67, będący jakby skrótem pełnego wykresu 68, uwydatnia to może wyraźniej.

Wskutek utworzenia się nowego czoła fal, część energii rozchodzi się w nowym kierunku; mamy tu do czynienia z t. zw. „promieniem ugiętym“. Zjawisko to, *uginanie*, czyli *dyfrakcja*, bywa stale obserwowane w laboratorjach optycznych; istotnie, stanowi ono podstawę pewnych nader dokładnych metod analizowania światła, o których wkrótce pomówimy.

Obracając wykres (rys. 68) w jego własnej płaszczyźnie i patrząc wzdłuż linii OC i OD, łatwo dostrzec, że po przejściu przez zasłonę tworzą się jeszcze inne czoła fal, a więc nowe kierunki ruchu energii: mówimy tu o wiązkach ugiętych *drugiego, trzeciego i t. d. rzędu*. Na rysunku długość fali przyjęto równą $\frac{1}{4}$ odległości pomiędzy otworami, wskutek czego, jak okazuje rysunek, z obu stron pierwotnego kierunku mamy trzy wiązki ugięte.

Zjawisko omawiane nie zachodzi, jeśli otwory w zasłonie nie są rozmieszczone w równych odległościach

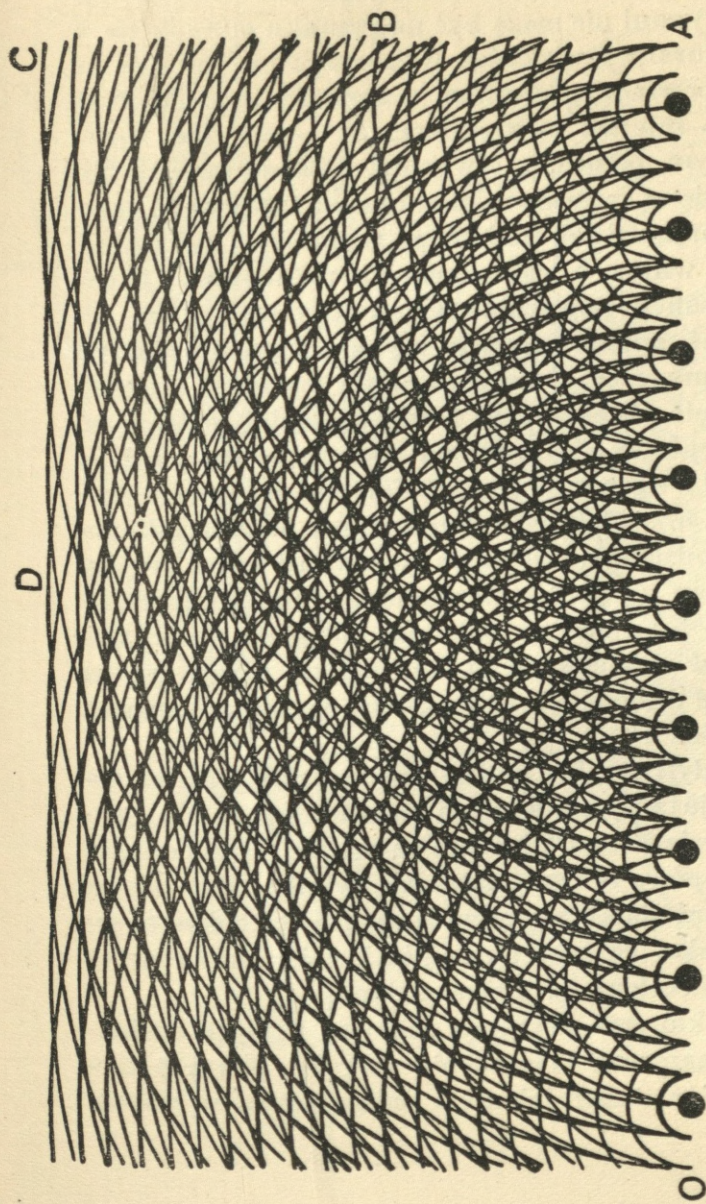
od siebie. Jedynie w przypadku prawidłowego rozmieszczenia prostolinjowe czoło fal może być styczne do pewnego układu fal półkolistych* i może stanowić wyznik łącznego ich działania. Ilustruje to rys. 68.

Należy zaznaczyć, że odchylenie ugiętych promieni świetlnych jest tem mniejsze, im krótsze są fale i im większe odstępny pomiędzy otworami. Na rys. 67 pokazano ugięcie pierwszego rzędu dla fal dwóch różnych długości. Tablica XV A daje dalszą ilustrację tej sprawy: występują tu zjawiska ugięcia w licznych rzędach.

Doświadczenie z uginaniem światła jest bardzo proste. Na płytce szklanej nakreślono w równych odstępach szereg rys równoległych, kilka tysięcy na centymetrze, przyczem pokrywają one prostokąt o bokach długości kilku centymetrów. Jest t. zw. *siatka dyfrakcyjna*. Nakreślenie naprawdę dobrej siatki jest sprawą niezmiernie trudną; najlepsze z nich wykonano przy użyciu paru zaledwie słynnych maszyn dzielniczych. Wielkiem uznaniem cieszą się siatki wykonane przez Rowlanda w Baltimore; doskonała maszyna dzielnicza znajduje się również w National Physical Laboratory w Anglii.

Światło łuku wychodzi z latarni przez wąską szczelinę, której obraz rzucamy na ekran. W teorii, omawianej wyżej, nie wspominaliśmy wcale o soczewce i o szczelinie, obie te rzeczy są jednak niezbędne, jeżeli obrazy na ekranie mają być wyraźne i jasne. Przypuśćmy, że szczelina jest pionowa, siatka zaś umieszczona tak, że rysy jej są równoległe do szczeliny; wówczas rys. 69 przedstawia przekrój poziomy urzą-

* w którego utworzeniu wszystkie otwory biorą udział. *Przyp. tłum.*



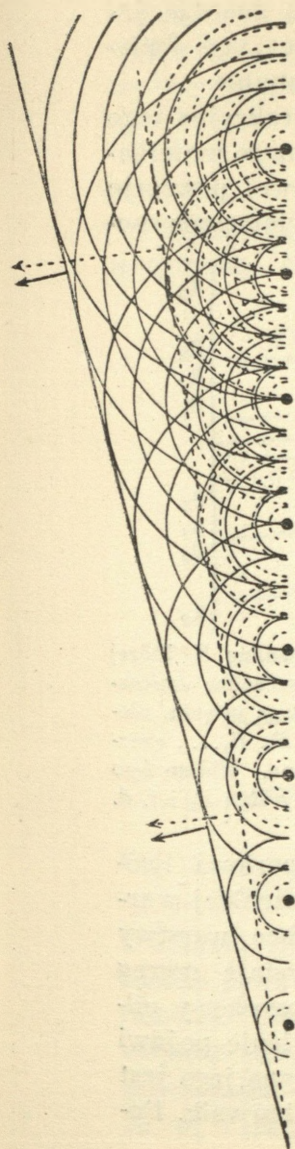
Rys. 66. Kółka czarne przedstawiają zbiór równoodległych otworów w przegrodzie basenu falowego, albo też zbiór równoodległych cząstek, rozpraszających światło w postaci fal kołowych (lub kulistych, jeśli rozszerzymy rozważania na trzy wymiary). Fale poruszają się na rysunku ku górze, a czoło ich jest równoległe do OA; czoło DC tworzy się w sposób wyjaśniony już na rys. 65. Pozatem powstają również inne czoła fal; aby je dostrzec, należy spojrzeć ukośnie wzdłuż rysunku w kierunku OA, OB, OC i OD po kolei. Inne czoła fal, oprócz przytoczonych, nie występują. (Rys. W. T. Astbury'ego).

dzenia, przyczem oczywiście długości fali i odstępów pomiędzy rysami nie mogą być na rysunku odtworzone w swej naturalnej wielkości. Niezarysowane miejsca na szkle odpowiadają otworom w zasłonie (rys. 66), rysy zaś, jako miejsca nieprzezroczyste — częściom zasłony leżącym pomiędzy otworami. Różne długości fali uginają się w rozmaitych kierunkach: fale światła czerwonego najbardziej, fioletowego najmniej, i na ekranie powstaje widmo o tem samym uporządkowaniu barw, co w opisanem poprzednio widmie pryzmatycznym. Co więcej zaś, widmo powtarza się w drugim i wyższych rzędach, przyczem za każdym razem jest coraz bardziej rozciągnięte, dzięki czemu barwy są lepiej rozdzielone.

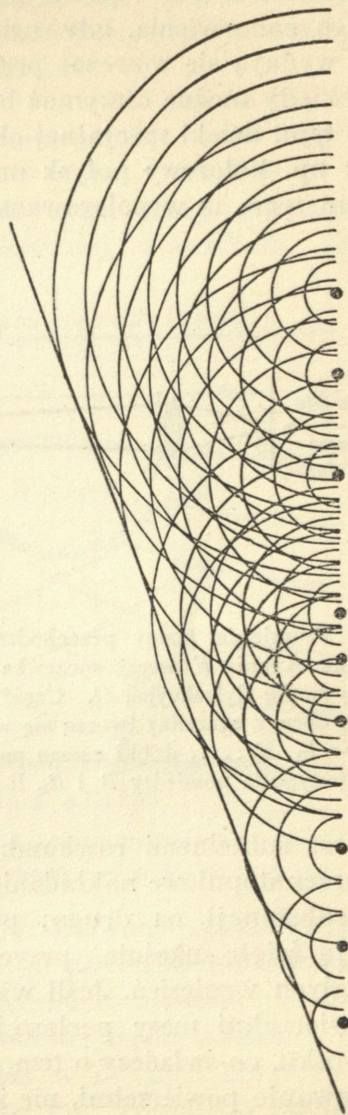
Ten sposób otrzymywania widm posiada tę zaletę, iż pozwala wyznaczyć długość fali każdej ugiętej barwy. Z rys. 67 widać, że istnieje związek pomiędzy długością fali, odstępem sąsiednich rys siatki i kątem między promieniem ugiętym a kierunkiem promienia pierwotnego. Kąt ten możemy zmierzyć, odległość rys została ustalona w czasie sporządzania siatki; można zatem wyznaczyć długość fali i to z bardzo wysokim stopniem dokładności.

Siatkę dyfrakcyjną można również nakreślić na dobrze odbijającej powierzchni metalicznej, np. na „metalalu zwierciadlanym“, którego używa się na zwierciadła do teleskopów. W tym przypadku światło odbija się od powierzchni siatki, przyczem zachodzą dokładnie te same zjawiska, co przy przejściu światła przez siatkę, nakreśloną na płycie szklanej.

Barwy, któremi połyskują pokrywy skrzydeł niektórych chrząszczów, zabarwienie skrzydeł pewnych motyli oraz piór ptasich, jak np. w ognie pawia, są zjawis-



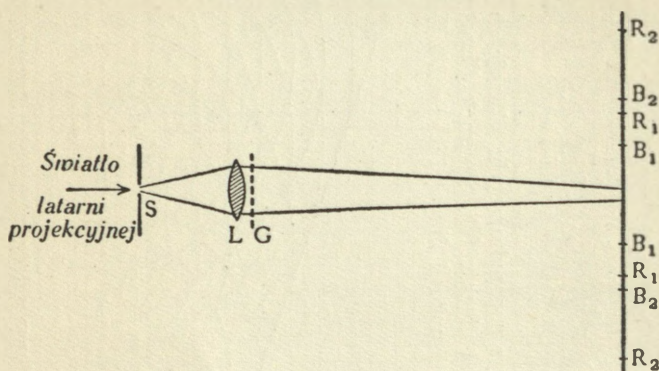
Rys. 67. Rysunek ten jest niejako wyciągiem z poprzedzających; okazuje on tworzenie się fal ugiętych I-go rzędu, oraz zależność ich kierunku od długości fali. Stosunek długości fal krótszych do dłuższych na rysunku odpowiada w przybliżeniu stosunkowi długości fal światła fioletowego i czerwonego.



Rys. 68. Widzimy z tego rysunku, że prawidłowy ugięty układ fal tworzy się tylko wówczas, gdy źródła drgań (czarne kropki) są rozmieszczone w równych odstępach od siebie. Prosta, narysowana tak, aby stykała się z „wierzchołkami” niektórych fal (t. zn. półokręgów) przechodzi pomiędzy dwiema wierzchołkami innych; wskutek tego część fal wytwarzała na czole ogólnem „wierzchołek”, inna część natomiast — „dolinę”, czego wynikiem jest wzajemne niszczenie się oddziaływań. „Interferencja” pomiędzy poszczególnymi układami fal będzie omówiona obszerniej później.

kami uginania. Pióra pawie nie okazują znanego jaszkrawego zabarwienia, gdy oglądamy je „pod światło” — wydają się wówczas poprostu brunatne.

Niekiedy można otrzymać barwy dyfrakcyjne tego samego typu dzięki specjalnej obróbce danego materiału. Tak np. kolorowy połysk masy perłowej powstaje skutkiem tego, iż wypolerowana jej powierzchnia po-



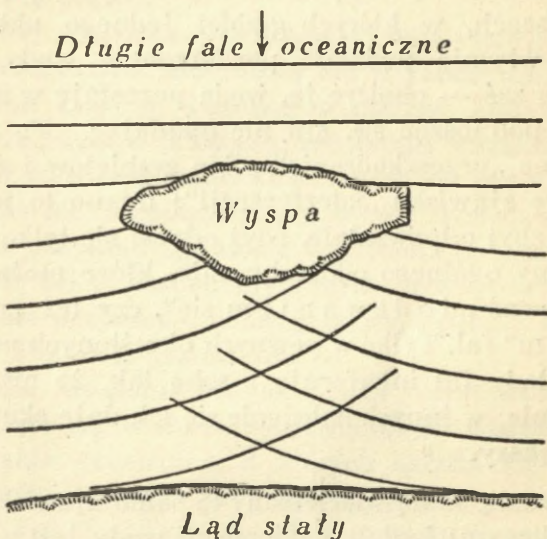
Rys. 69. Promienie lampy przechodzą przez szczelinę S , której obraz na ekranie E tworzy soczewka L . Przed szczeliną umieszczona jest siatka dyfrakcyjna G . Część światła ulega ugięciu; niebieskie obrazy szczeliny tworzą się w punktach $B_1, B_2, \dots$, czerwone w $R_1, R_2, \dots$, dzięki czemu powstają widma. Widmo I-go rzędu przypada pomiędzy B_1 i R_1 , II-go pomiędzy B_2 i R_2 i t. d.

kryta jest subtelnymi rowkami. Masa perłowa tworzy się przez stopniowe nakładanie jednej cienkiej warstewki substancji na drugą; przy obróbce warstwy te zostają ścięte ukośnie, przyczem powstaje szereg równoległych wzniesień. Jeśli wykonamy woskowy odciśnięcie powierzchni masy perłowej, zabarwienie pojawi się na wosku, co świadczy o tem, iż przyczyną jego jest ukształtowanie powierzchni, nie zaś jakiś barwnik. Po-

dobnie barwy nieba i morza są w znacznej mierze zjawiskiem dyfrakcji, jednakże sprawę ich powstawania musimy rozpatrzyć oddzielnie.

Interferencja

Przejdziemy teraz do opisu innej przyczyny powstawania barw, pokrewnej zjawiskom uginania,



Rys. 70. Fale oceaniczne okrążają z dwóch stron wyspę i nakładają się na siebie w sposób wskazany na rysunku.

a zwanej *interferencją*; mówimy „pokrewnej“, gdyż można ją również uważać za bezpośredni wynik teorii falowej. Charakterystyczne to zjawisko, towarzyszące ruchowi falowemu, można często zaobserwować na powierzchni morza, gdy w pewnym obszarze krzyżują się z sobą dwa ciągi fal. Niedaleko południowego

wybrzeża Australji leży wysepka (rys. 70), która dzieli na dwie części fale, biegnące z oceanu Antarktycznego; po okrążeniu wysepki z dwóch stron, oba układy krzyżują się ze sobą w obszarze pomiędzy wysepką a lądem stałym. Wynika stąd ciekawe zjawisko. Tam, gdzie spotykają się grzbiety fal, woda wzbija się w górę strumieniem bryzgów; gdzie zaś dolina spotyka dolinę, wytwarza się zagłębienie o podwójnej głębokości. W miejscach, w których grzbiet jednego układu fal miałby właśnie podnieść powierzchnię wody, dolina drugiego zaś — obniżyć ją, woda pozostaje w spoczynku, nie podnosząc się, ani nie opadając. To właśnie wzajemne „przeszkadzanie“ sobie grzbietów i dolin dało nazwę zjawisku „interferencji“; miano to jednakże nie jest zbyt odpowiednie, gdyż odnosi się tylko do jednej formy ogólnego oddziaływania, które możnaby raczej nazwać „*d o d a w a n i e m* się“, czy też „*n a k ł a d a n i e m*“ fal. Tylko w pewnych określonych punktach dwa układy fal interferują z sobą tak, że niszczą się wzajemnie; w innych nałożenie się ich daje skutek dwa razy większy.

Na małą skalę widzieliśmy to samo zjawisko w basenie falowym: kształt powierzchni wody jest w każdej chwili poprostu sumą form powierzchni poszczególnych układów falowych. W zjawisku interferencji niema więc nic takiego, czegobyśmy nie mogli dostrzec i śledzić, obserwując poruszającą się powierzchnię wody. Tak np. na morzu można nieraz widzieć drobne zmarszczki, rozchodzące się po powierzchni większej fali, która sko lei „jedzie“ na długiej fali oceanicznej. Każdy z tych układów fal porusza się na zakrzywionej powierzchni

układu większego tak, jakgdyby powierzchnia ta była płaska.

Gdy zatem Tomasz Young wygłosił na wykładzie w Royal Institution w pierwszych latach XIX w. zasadę interferencji i zastosował ją do wytłumaczenia pewnych uderzających zjawisk optycznych, ujął on w sposób genialny zjawisko, które każdy może zaobserwować w dowolnej chwili.

Podstawy zjawiska interferencji i omawianego wyżej zjawiska uginania nie różnią się w rzeczywistości od siebie, oba one są bowiem wynikiem addytywnego charakteru ruchów falowych; zazwyczaj wszakże wprowadza się to rozróżnienie, które odnosi się raczej do rodzaju zjawisk, rozpatrywanych w obu tych działach.

Jako przykład zjawiska interferencji weźmy powstawanie barw baniek mydlanych. Young sam obrał ten właśnie przykład i podał jego wyjaśnienie w swem dziele o Filozofji Naturalnej * .

Błonka mydlana jest to cienka warstewka wody, utrzymująca się w stanie spójnym dzięki wzajemnemu przyciąganiu cząsteczek, z których składa się mydło. Gdy promień świetlny pada na taką przezroczystą błonkę, część światła odbija się od jej przedniej powierzchni, część zaś od tylnej, poczem oba promienie odbite, biegnąc razem wstecz, interferują ze sobą podobnie jak dwa układy fal, które okrążają wspomnianą poprzecznie wysepkę. W odbiciu od błonki mydlanej występuje wszakże charakterystyczna prawidłowość. Fale odbite od przedniej powierzchni dodają się do fal drugiego układu, które dwukrotnie przebyły grubość błonki i dzięki temu są nieco opóźnione względem

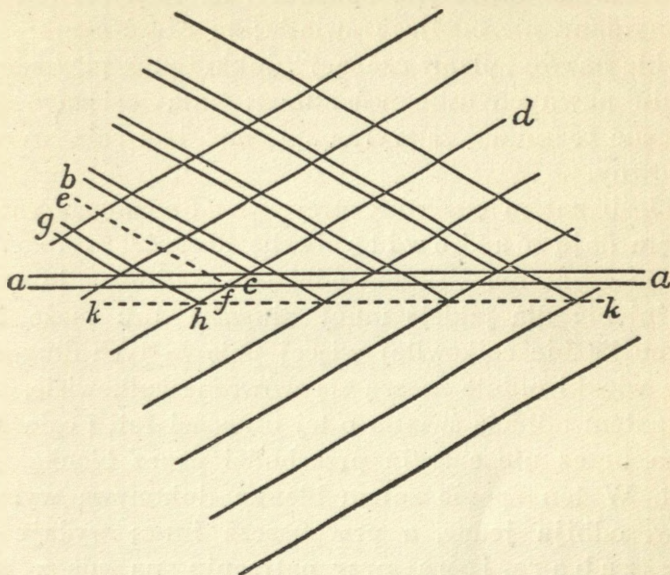
* t. j. o fizyce teoretycznej. *Przyp. tłum.*

pierwszych. Oba układy muszą się z konieczności nakładać na niebie, tam gdzie „grzbiet“ spotyka się z „grzbietem“, powstaje działanie podwojone — i t. d.

Otóż to opóźnienie drugiej grupy odbitej względem pierwszej zależy od tego, ile drogi nałożyła ona przy dwukrotnem przejściu przez błonkę, to zaś zależy skolei od grubości błonki i kierunku promieni względem jej powierzchni. Opóźnienie to można wyrazić w długościach fali danego rodzaju światła. Przypuśćmy, że wynosi ono całkowitą ilość długości fali: 1, 2, 3 lub więcej. Wówczas oba układy biegną zupełnie zgodnie, grzbiet z grzbietem, dolina z doliną; oba więc dodają się, tworząc falę o podwójnej „obszerności“ (amplitudzie) drgań, a tem samem, jak można wykazać, o energii czterokrotnie większej niż energia każdego z promieni odbitych.

Należy tu zaznaczyć, że do opóźnienia obliczonego z danych geometrycznych trzeba dodać połowę długości fali. Ma to następującą przyczynę fizyczną. Pierwsze odbicie zachodzi w powietrzu od powierzchni wody, drugie zaś w wodzie od „powierzchni powietrza“. Odbicia te różnią się od siebie: przy drugim w akcie odbicia zachodzi strata połowy długości fali, jak to zaznaczono na rys. 71. Mamy tu to samo zjawisko, co w przypadku piscożalek organowych, gdzie odbicie fal głosowych od otwartego lub zamkniętego końca piscożalki okazuje analogiczne różnice. Łatwo uprzytomnić sobie, że jakieś założenie tego rodzaju jest konieczne, w przeciwnym bowiem razie, gdyby grubość błonki zmniejszała się aż do zera, obie wiązki odbite musiałyby biec zupełnie zgodnie, a przecież odbicie od nieistniejącej błonki nie powinno wów-

czas wcale zachodzić. Strata połowy długości fali зда-
je całkowicie sprawę z braku odbicia w przypadku



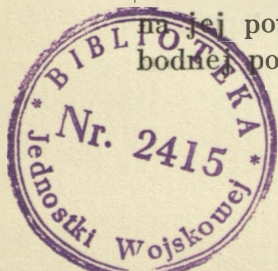
Rys. 71. Ciąg fal pada na cienką błonkę aa z jakiejś substancji przezroczystej. Na górnej powierzchni zachodzi odbicie: weźmy np. pod uwagę bcd , gdzie bc przedstawia część odbitą, część cd zaś jeszcze nie dotarła do błonki. Jeżeli cd oznacza grzbiet tej części fali, bc jest grzbietem części pozostałej (odbitej). Fale biegną dalej, tracąc przy odbiciu od przedniej powierzchni część jedynie swej energii, i padają na drugą powierzchnię. Tu tracą w akcie odbicia $\frac{1}{2}$ swej długości, jak to wyjaśniono w tekście. Linja kreskowana ef pokazuje, gdzie znajdowałby się grzbiet fali odbitej, jeśliby odbicie na tylnej powierzchni miało ten sam charakter, co na przedniej. Strata $\frac{1}{2}$ długości fali odsuwa falę odbitą aż do gh ; odbicie zachodzi tak, jakby powierzchnią odbijającą było kk ; to dodatkowe opóźnienie pozornie zwiększa grubość błonki.

błonki niezmiernie cienkiej, ponieważ dokładnie „rozstraja“ ona oba odbicia: „grzbiety“ jednego układu

fal przypadają ściśle w miejscach, gdzie są „doliny“, a stąd wynika interferencja i wzajemne zniesienie się fal. Bardzo łatwo jest spostrzec, że najcieńsze błonki mydlane nie odbijają światła; ta część błonki nosi zwykle nazwę „plamy czarnej“, jakkolwiek przy zachowaniu pewnych ostrożności może ona osiągnąć tak znaczne rozmiary, że wyraz „plama“ jest całkiem nie stosowny.

Jeśli zatem wszystkie przyczyny opóźnienia razem wzięte dają całkowitą liczbę długości fali, to mamy do czynienia z silnem odbiciem. Jednakże to samo opóźnienie dla jakiejś innej długości fali może być równe liczbie całkowitej więcej połowa tych długości; obie wiązki odbite znoszą się wówczas całkowicie, nicma zatem odbicia światła o tej długości fali i cała niesiona przez nie energia przechodzi przez błonkę bez strat. W ten sposób zatem błonka dokonywa wyboru barw, odbija jedne, a przepuszcza inne; wydaje się więc zabarwiona przy patrzeniu na nią z którejkolwiek strony.

Barwa światła odbitego pod pewnym kątem zależy, jak widzieliśmy, od grubości błonki. Jeśli kolistą obrączkę drucianą zanurzymy w roztworze mydła i po wyjęciu umieścimy w położeniu pionowem, ciecz spływa stopniowo ku dołowi, tak iż grubość błonki wzrasta w tym kierunku; wskutek tego różnie zabarwione części błonki przybierają kształt pasów poziomych. Jedno z najpiękniejszych doświadczeń optycznych otrzymamy, kierując prąd powietrza wąskim strumieniem ukośnie na błonkę, co powoduje powstawanie wirów na jej powierzchni. Podobnie jak w wirach na swobodnej powierzchni wody, ciecz dąży wskutek ruchu



obrotowego ku obwodowi: pasy zabarwione przybierają kształt owali otaczających środek. Powstają przytem nader żywe barwy, gdyż dmuchanie oraz ruchy w błoncie czynią ją coraz cieńszą, wiemy zaś, iż barwy baniek mydlanych są tem piękniejsze, im cieńszą jest błonka i najżywsze są tuż przed utworzeniem się „plamy ciemnej“ lub przed pęknięciem bańki.

Wyjaśnienie tego faktu nie jest trudne, a ciekawe jest jeszcze i dlatego, że pisał o tem Young, dołączając nawet ręcznie kolorowaną rycinę w swej książce (tabl. I D).

Przypuśćmy, że opóźnienie drugiego promienia odbitego względem pierwszego wynosi dwie tysięczne milimetra. Fale czerwone o długości 0,8 tysięcznych nie wystąpią w promieniu odbitym, gdyż $0,8 \times 2,5 = 2$, tak iż „opóźnienie“ jest równe $2\frac{1}{2}$ długości fali światła czerwonego. Nieobecne będą również dwie inne długości fali z dziedziny światła widzialnego, mianowicie 0,57 i 0,44 tysięcznych mm, ponieważ $0,57 \times 3,5 = 0,44 \times 4,5 = 2$, t. zn., że opóźnienie wynosi odpowiednio $3\frac{1}{2}$ oraz $4\frac{1}{2}$ długości fali. Wogóle więc będziemy mieli trzy luki w widmie: w dalekiej czerwieni (0,8), w części żółtej (0,57) i niebieskiej (0,44); inne luki w widmie widzialnem nie wystąpią. Barwa światła odbitego będzie utworzona ze zmieszania barw pozostałych.

Przypuśćmy teraz, że „opóźnienie“ jest większe i wynosi np. 4 tysięczne mm. Będziemy tu mieli większą ilość luk w widmie światła odbitego, przyczem odstęp pomiędzy niemi będą mniejsze. Mamy tu: $4 = 0,73 \times 5,5 = 0,62 \times 6,5 = 0,53 \times 7,5 = 0,47 \times 8,5 =$ wreszcie $0,42 \times 9,5$, a wszystkie te długości fali: 0,73, 0,62 i t. d. przypadają w dziedzinie widma widzialne-

go. Otóż jeżeli usunąć z widma kilka wycinków rozmieszczonych w równych odstępach, to, jak wykazuje doświadczenie, mieszanina pozostałych barw jest *stabo* zabarwiona. Istotnie, zabarwienie błonki występuje intensywnie tylko wtedy, gdy jest ona tak cienka, że „opóźnienie“ wynosi połowę lub $1\frac{1}{2}$ długości fali — wogóle małą ilość połówek długości fali.

Young wykazał to, badając światło odbite od błonki mydlanej przy pomocy pryzmatu. Wyodrębnił on wąską wiązkę tego światła przy pomocy pionowej szczeliny i w drodze przepuszczonych przez nią promieni umieścił pryzmat, otrzymując w ten sposób widmo, tak jak my to uczyniliśmy ze światłem łuku elektrycznego. Wynik doświadczenia przedstawia fig. D na tabl. I, będąca reprodukcją oryginalnego rysunku Younga (fig. I D została obrócona o 90°). Widzimy tu, że omawiane wyżej luki mają wygląd rozmytych pasm, przebiegających ukośnie w widmie. Pochodzi to stąd, że przerw tych jest niewiele, i dzielą je znaczne odstępny, w widmie górnej części błonki (lewa strona), natomiast występują one licznie i w odstępach mniejszych w dolnych częściach błonki, gdzie jest ona grubsza (prawa strona).

Proste to wytłumaczenie barw cienkich błon wykorzystał Young dla poparcia teorii falowej. Sam Newton przeczuwał niejako to wyjaśnienie, uważał je wszakże tylko za dodatkową skomplikowaną hipotezę, będącą niezbędnym uzupełnieniem jego teorii korpuskularnej. Young, potwierdzając w ten sposób zasadę interferencji, uczynił wielki krok naprzód ku wykazaniu, że hipoteza fal wystarcza do wyjaśnienia znanych wówczas zjawisk.

Przykład zabarwienia cienkiej błonki mamy przedstawiony na tabl. I A.

Prostych zjawisk, opartych na zabarwieniu cienkich błonek, nie obserwuje się zazwyczaj w wielkiej skali, w drobnej jednak występują one dość często. One to nadają zabarwienie stali hartowanej pokrytej cienką warstewką tlenków żelaza. Im zawdzięczamy powstawanie żywych barw, gdy na powierzchni wody utworzy się cienka warstewka oliwy lub nafty. Widać je w pęknięciach szkła i innych materiałów przezroczystych; występują jako t. zw. *pierścienie Newtona*, gdy położymy soczewkę na płytce szklanej, dzięki czemu tworzy się między nimi cienka warstwa powietrza. Wobec tego, że grubość tej warstwy wzrasta od środka na zewnątrz, powstają zabarwione *pierścienie* współśrodkowe, przyczem środkiem ich jest punkt zetknięcia soczewki z płytką.

Z zasadą interferencji spotkamy się ponownie w innej części naszych rozważań, mianowicie przy wyjaśnieniu tych zjawisk z dziedziny promieni Röntgena, z których korzystamy przy wyznaczaniu budowy kryształów. Ważną jest ona również dla elektrotechniki, która ma do czynienia z sumowaniem się przemiennych prądów elektrycznych, biegnących nakształt fal wzdłuż przewodzących drutów.

Interferencja znajduje ważne zastosowanie w akustyce, wyjaśniając powstawanie dudnień oraz innych zjawisk, związanych z dźwiękami muzycznymi. Gdy radio nadaje ton strojeniowy, można znaleźć takie miejsca w pokoju, w których „grzbiety“ fal głosowych stale spotykają „doliny“: panuje tam względna cisza, w innych znów miejscach dźwięk jest stale silny.

Interferencja zachodzi tu pomiędzy falami pierwotnego dźwięku, a ich odbiciami od ścian pokoju i od sprzętów. Przesuwając głowę, można usłyszeć zachodzące przytem zmiany w natężeniu dźwięku.

ROZDZIAŁ V
BARWY NIEBA

Selektywne rozpraszanie światła

RÓŻNORODNE zabarwienia, jakie możemy obserwować na niebie: zasadniczy jego błękit, wieńce, pojawiające się niekiedy dokoła słońca i księżyca, czerwień, złoto i seledyn zorzy porannej i wieczornej — wszystkie te zjawiska zawdzięczamy oddziaływaniom pomiędzy falami świetlnymi a cząsteczkami, z których składa się atmosfera, i najrozmaitszymi cząstkami, które w niej się unoszą. W atmosferze niema substancji *zabarwiającej*, — jakiegoś *barwnika*, który pochłaniałby pewne części widma, a przepuszczał inne. Mamy tu do czynienia nie z niszczeniem barw, lecz z ich *rozdzieleniem*. Wyrażano dawniej pogląd, że samo powietrze ma barwę błękitną, lub też zawiera niebieski gaz, pochłaniający barwę czerwoną. Jeśliby jednak to było prawdą, słońce, księżyc i gwiazdy wydawałyby się, w miarę zniżania się na sklepieniu niebieskiem ku horyzontowi, coraz wyraźniej błękitne, gdyż promienie ich musiałyby przenikać coraz grubszą warstwę powietrza na swej drodze do naszego oka. W zenicie błękit nieba powi-

nienby być bledszy niż nisko nad widnokregiem, co — jak wiemy — jest niezgodne z rzeczywistością.

Teorja falowa daje tu lepsze wyjaśnienie. Różnorodne cząstki, unoszące się w powietrzu, muszą rozpraszać światło tak samo, jak skały, sterczące nad powierzchnią morza, łamią i rozpraszają fale morskie. Krótkie fale świetlne, które wchodzą w skład niebieskiego końca widma, są łatwiej rozpraszane na wszystkie strony niż dłuższe fale czerwone — podobnie jak skała, przez którą przelewają się wielkie fale bez zmiany kierunku swego ruchu, odrzuca w bok drobne zmarszczki na powierzchni wody. W ten sposób zatem fale świetlne ulegają rozdzieleniu, powodując powstanie barw. Na podstawie tego przypuszczenia można oczekiwać, że barwa słońca w pobliżu horyzontu powinna przechodzić w żółtą, a nawet w czerwoną, gdyż dłuższa droga promieni w powietrzu usunie więcej promieni niebieskich. Jednocześnie, część rozproszonego światła niebieskiego wytworzy błękitne zabarwienie nieba.

Przykłady zjawiska rozpraszania światła są nader pospolite. Dym, unoszący się z komina, wydaje się niebieski na ciemnem tle, zwłaszcza, gdy rozpraszające światło cząstki węgla są bardzo małe, jak np. przy paleniu drzewem lub przy dawno niepodsyćcanem ognisku węglowem. Węgiel w kawałku jest oczywiście czarny, lecz rozpraszanie światła przez nadzwyczaj subtelne cząstki dymu odgrywa rolę ważniejszą, niż absorbcja. Aby mogła powstać wyraźna barwa niebieska, rozmiary cząstek muszą być mniejsze niż długość fali świetlnej, a wówczas wpływ absorbcji jest stosunkowo nieznaczny. Jeżeli wszakże widzimy dym na jasnem tle

białej chmury lub słońca, to wydaje się on brunatny lub czerwony.

Dym z palącego się papierosa ma barwę niebieską gdy unosi się wprost w powietrze, lecz wypuszczony z ust jest szary, gdyż cząstki jego pokryły się wilgocią z ciepłego oddechu i dzięki swym zwiększonym rozmiarom rozpraszają silniej fale dłuższe.

Światło czerwone rozchodzi się w mglistym powietrzu lepiej niż białe, cząstki wody bowiem nie rozpraszają długich fal czerwonych tak silnie, jak niebieskie. Szkło żółte, umieszczone przed obiektywem aparatu fotograficznego, ułatwia sfotografowanie szczegółów zamglonego krajobrazu, gdyż pochłania ono rozproszone promienie niebieskie. Rozproszone światło latarni samochodowych mogłoby nieraz „oślepić“ kierowcę, dlatego też często przesłania się je czerwonymi szklami, aby usunąć fale krótsze. Podobnie do kierowania ruchem ulicznym w gęstej mgle używa się czerwonych sygnałów. Nowsze doświadczenia wykazały jednak, że światło czerwone nie daje wielkich korzyści, gdyż cząstki mgły są tak duże, że rozpraszają wszystkie fale widzialne. Dopiero fale podczerwone, których omówieniem zajmemy się wkrótce, są tak długie, że nie ulegają znacznieszemu rozproszeniu.

Rozpraszanie przez cząsteczki

Widzimy więc, że teoria falowa tłumaczy z łatwością występowanie barw podczas przechodzenia promieni świetlnych przez atmosferę, w której unoszą się drobne cząstki. Mogą to być ziarenka pyłu lub cząsteczki pary wodnej; i jedne i drugie uważano w swoim czasie za

czynniki decydujące. Tyndall np. przypisywał cząsteczkom pary wodnej powstawanie błękitu nieba. Jednakże lord Rayleigh (starszy) wykazał drogą rachunku, że przyczynę tego zjawiska można znaleźć w samych cząsteczkach powietrza. Oczywiście, rozmiary ich są bardzo małe, znacznie mniejsze od długości fal świetlnych, lecz ich działanie rozpraszające — jakkolwiek niezmiernie drobne w przypadku cząsteczki pojedynczej — wzięte łącznie dla wielkiej ilości cząsteczek jest dostateczne, by wyjaśnić pochodzenie światła, które otrzymujemy od błękitnego nieba. W pobliżu powierzchni ziemi atmosfera zawiera w zawiesinie liczne cząstki materjalne, które również rozpraszają światło; wysokość „atmosfery pyłu“ nie przekracza jednak tysiąca metrów. Na wysokości 1500 m nad poziomem morza, w obserwatorium na Mount Wilson w Kalifornji, zmierzono natężenie światła otrzymywanego od nieba i porównano uzyskaną stąd wartość z wynikiem teorii Rayleigha: okazało się, że obie te wartości są z sobą całkowicie zgodne.

Światło rozproszone z promieni słonecznych, przenikających dolne warstwy atmosfery, nie posiada barwy tak czystego błękitu, jak w obszarach wyższych, gdzie niema pyłu, który dodaje fale dłuższe do tych, jakie zawdzięczamy rozproszeniu przez same cząsteczki powietrza. W wyższych szerokościach geograficznych, zwłaszcza w Anglji, w powietrzu znajduje się zazwyczaj dużo wilgoci i barwa nieba wydaje się blade, jakby wodnista, w porównaniu z głębokim błękitem nieba w krajach położonych w niższych szerokościach geograficznych. Kraje te nie zawsze jednak cieszą się niebem lazurowym: — czasami suchy, gorący wiatr podnosi tu-

many pyłu, błękit znika, bezbarwne niebo ciemnieje, aż wreszcie ulewa spłókuje pył, myjąc niebo w literalnem znaczeniu słowa.

Tyndall podał następujące piękne doświadczenie w celu ilustracji teorji, że przyczyną błękitnego zabarwienia światła rozproszonego są drobniotkie cząstki, tworzące zawiesinę w gazie. Metrowej długości rurę szklaną, zamkniętą na obu końcach płytkami szklanymi, umieszczamy tak, jak to przedstawia rys. B tabl. XV; przez rurę można przepuścić wiązkę światła. Po opróżnieniu rury z powietrza, napęlniamy ją mieszaniną powietrza, chlorowodoru i pary azotynu butylowego; wskutek zachodzących reakcyj chemicznych po paru minutach tworzy się w gazie zawiesina, złożona z bardzo subtelnych cząstek. Ważną rzeczą jest, iż cząstki owe mają mniejwięcej jednakowe rozmiary. Rozpraszają one światło niebieskie; w miarę ich tworzenia się i stopniowego wzrostu, obserwator, spoglądający na rurę z boku, dostrzega początkowo słabe zabarwienie ciemnobłękitne, którego natężenie zwiększa się stopniowo, przyczem barwa rozjaśnia się wraz ze wzrostem rozmiarów cząstek. Zgodnie z entuzjastycznym opisem Tyndalla „wytwarzamy w ten sposób błękit, który może współzawodniczyć z najczystszym niebem włoskiem, jeśli go nawet nie przewyższa“.

W podobnem doświadczeniu, nader łatwem do wykonania, promień świetlny przechodzi przez naczynie szklane, napęlnione bardzo rozcieńczonym roztworem tiosiarczanu sodowego, i pada na ekran, tworząc jasną białą plamkę. Gdy dodamy do roztworu nieco rozcieńczonego kwasu solnego, po paru minutach zaczynają wydzielać się drobne ziarnka siarki, których rozmiary stop-

niowo wzrastają. Jednocześnie światło, przechodzące przez naczynie, przybiera barwę żółtą, a potem czerwoną; biały krążek na ekranie staje się żółtem słońcem, później zaś słońcem w chwili zachodu. Woda zaś w naczyniu wydaje się początkowo niebieska, przy końcu doświadczenia natomiast szara, jak gęsta mgła. Widzimy to na barwnym rysunku (tabl. XIV H).

Tyndall sądził, że po całkowitem usunięciu pyłu i pary z użytej przezeń rury, nie pozostałoby w niej nic, co mogłoby rozpraszać światło, nic zatem nie możnaby dostrzec przy obserwacji rury z boku. Przypuszczenie to było błędne, doświadczenie jego wszakże wykazywało wyraźnie istnienie rozpraszania przez ziarenka zawieszin, oraz zależność barwy światła rozproszonego od wielkości ziarenek.

Obecny lord Rayleigh zwrócił uwagę na to, że rozpraszanie światła przez cząstki powietrza powinno być dostrzegalne nawet w rurze o tych rozmiarach, co użyta w doświadczeniu Tyndalla. Wskazał on, że niebo wysyła światło rozproszone nawet wówczas, gdy jest oświetlone tylko przez księżyc; a ponieważ światło słońca jest pół miliona razy silniejsze od księżycowego, więc światło słoneczne, rozproszone przy przejściu przez ilość powietrza, równoważną $1/500\,000$ części atmosfery, powinno być tak łatwo dostrzegalne, jak niebo nocne, oświetlone przez księżyc w pełni, t. zn. że rozpraszanie przez kilkucentymetrową warstwę powietrza powinno być już dostrzegalne. Istotnie, przewidywania te sprawdziły się, gdy dokonano doświadczeń z pomocą odpowiednich przyrządów optycznych.

Oczywiście, znaczna część wspaniałego zabarwienia słońca i nieba o świcie i zmierzchu pochodzi z rozpra-

szania przez pył i parę wodną, nakładającego się na zjawiska, spowodowane przez cząsteczki powietrza. Czasami warstwa dymu, np. z pożaru stepu, dodaje ciemnej czerwieni do barw nieba. Pół wieku temu, po wybuchu wulkanu Krakatoa, który wyrzucił w powietrze ogromne ilości najdrobniejszego pyłu, barwy zórz porannych i wieczornych w ciągu wielu miesięcy odznaczały się wyjątkowem bogactwem i pięknością, pył ten bowiem rozpostarł się po całej ziemi i opadał niezmiernie powoli.

Dalekie wzgórza, widziane przez powietrze zlekka zamglone, wydają się niebieskawe, chociaż oczywiście nie wysyłają one ku nam niebieskiego światła. Barwa ta pochodzi od cząsteczek i zawiesin w warstwie atmosfery, dzielącej od nas owe wzgórza: przestrzeń tę wypełnia przecież część nieba.

Chmura jest zbiorowiskiem kropeł, o rozmiarach wogółności tak znacznych, że rozpraszają one wszystkie barwy widzialne; gdy więc obłoki odbijają ku nam światło słoneczne, błyszczą śnieżną białością. Znajdując się pomiędzy nami a słońcem mogą niekiedy zupełnie nie przepuszczać światła, i wydają się wówczas prawie czarne; tylko na brzegach przechodzi i ulega rozproszeniu tyle światła, że tworzy się srebrzysta obwódka.

Barwa morza

Błękitny kolor głębokiego morza należy tłumaczyć w podobny sposób. Było jednak rzeczą trudniejszą wykazać, że tak jest w istocie, i nawet wybitni badacze, jak np. Lord Rayleigh (senior) mieli pod tym względem wątpliwości. Zapewne, znaczną część błękitnej barwy morza zawdzięczamy odbiciu nieba w wodzie; możnaby

nawet na pierwszy rzut oka przypuszczać, że przyczyna ta tłumaczy całokształt zjawiska. Łatwo spostrzec, że pod błękitnem niebem morze również ma barwę błękitną, zwłaszcza gdy lekki wiatr marszczy jego powierzchnię, i zbocza fal odbijają ku nam światło, padające zgóry. Pod niebem pochmurnem morze jest szare.

Wpobliżu wybrzeża woda ma barwę zieloną, zawiesina bowiem, utworzona z bardzo drobnego piasku, rozprasza krótkie fale, gdy zaś słońce prześwieca aż do piaszczystego dna, do światła rozproszonego dodaje się nieco odbitej barwy żółtej. Przy obecności wodorostów, ciemno brunatne barwy w połączeniu z błękitem i zielenią dają różne odcienie purpury. Niekiedy woda, zarówno słodka, jak morska, zawiera tyle substancyj stałych w postaci subtelnej zawiesiny lub tyle drobnutkich pęcherzyków powietrza, iż niewielka nawet ilość wody wydaje się zieloną; tak np. woda z jeziora Pukaki na Nowej Zelandji, zasilana z lodowców, nawet w kubelku jest zielona. Zresztą, zjawisko to jest niewątpliwie dość częste.

Mamy zatem liczne przykłady, które okazują, że substancje, znajdujące się w wodzie w postaci zawiesin, mogłyby nadawać morzu błękitną jego barwę; można jednak wykazać, że same cząsteczki wody rozpraszają tę barwę tak, jak cząsteczki powietrza. Ostatnio prof. C. V. Raman z Kalkuty wysnuł z obserwacji poczynionych w czasie podróży morskiej wniosek, że fioletowy błękit głębokich mórz należy tłumaczyć właśnie w ten sposób, oraz dowiódł przy pomocy doświadczeń laboratoryjnych, że bardzo czysta woda istotnie rozprasza promienie świetlne.

Promień światła, padający na spokojną powierzchnię

czystej wody, nie ulega w miejscu, na które pada, rozproszeniu we wszelkich kierunkach; sama ta powierzchnia jest zatem niewidzialna, niema bowiem na niej szczegółów, które możnaby dostrzec. Drzewo rosnące nad brzegiem nie rzuca na czystą wodę cienia; pojawia się on jednak, gdy woda jest mętna i gdy ilość zawieszonych cząstek wystarcza, ażeby spowodować rozproszenie światła, zanim zdołało ono przeniknąć wgląd, — wtedy bowiem miejsca, w których światło słoneczne nie pada na powierzchnię, mają inny wygląd. Cienia takiego nie należy mieszać z *odbiciem* drzewa w wodzie; tamten leży na powierzchni, obraz odbity zaś znajduje się w takiej głębokości *pod* nią, jak wysoko wznosi się drzewo nad wodą. Obłok rzuca cień na sfalowaną, mieniającą się powierzchnię morza, gdyż zatrzymuje światło, któreby odbijało się w naszą stronę od owych fal i zmarszczek; przy gładkiem zaś, spokojnem morzu widać *odbicie* chmury w wodzie. Cień okrętu na wodzie jest niedostrzegalny w tych miejscach, gdzie morze jest czyste i barwy ciemno-błękitnej. Cień widać tylko tam, gdzie ruch okrętu wzburzył wodę i nappełnił je pęcherzykami powietrza. Ścianki tych banieczek powietrznych odrzucają światło w naszą stronę, tak iż jeśli jest ono odcięte przez korpus okrętu, rozpraszanie nie zachodzi — i powstaje cień.

Na powierzchni mętnej rzeki cienie występują zupełnie wyraźnie (tabl. XIV).

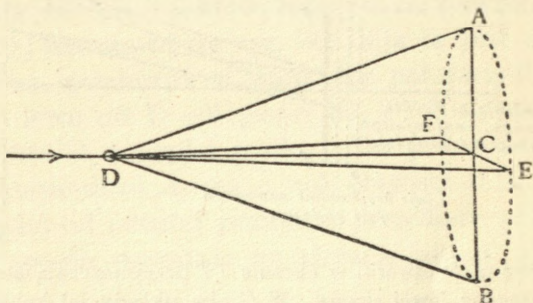
Wieńce dokoła słońca i księżyca (halo)

„Wieńce“ widoczne czasami dokoła słońca i księżyca są to również zjawiska rozpraszania, zachodzące w specjalnych warunkach. Jeśli cząstki zawiesiny są bardzo

małe, rozpraszają światło we wszelkich kierunkach; jeśli natomiast rozmiary ich są duże w porównaniu z długością fali światła, wówczas odbijają światło jak zwykłe przedmioty lub np. jak krople wody. Istnieją pewne rozmiary „krytyczne“, pośrednie pomiędzy owymi przypadkami skrajnymi, które właśnie powodują zjawisko „wieńców“, mianowicie gdy kropelki oraz długości fal świetlnych mają mniej więcej te same rozmiary. Analogiczny przypadek mieliśmy z siatką dyfrakcyjną, kiedy to odległość sąsiednich rys była tego samego rzędu wielkości, co długość fali świetlnej (rys. 66). Wiązki ugięte występują wyraźnie tylko wówczas, gdy wspomniany warunek przybliżonej równości rozmiarów jest spełniony. Jeżeli odstęp pomiędzy środkami otworów są zbyt duże, wówczas te ostatnie działają niezależnie od siebie; jeżeli, przeciwnie, odstęp są zbyt małe, to wtórne czoła fal (rys. 66) nie mogą się wytworzyć. Podobnie, aby zjawiska uginania zachodziły na kropelkach, te ostatnie nie powinny być ani za duże, ani zbyt drobne.

Łatwo spostrzec, że jeśli kropelka wody, zawieszona w powietrzu, wytwarza wogóle jakieś zjawisko dyfrakcyjne, innemi słowy, jeśli jest przyczyną rozszczepienia barw, to musi powstawać „wieniec“, gdyż w ten tylko sposób dyfrakcja może się tu ujawnić. Skoro światło o pewnej długości fali ulega szczególnie silnemu rozproszeniu w jakimś określonym kierunku — co stanowi zasadniczą cechę zjawiska uginania, — i jeśli światło rozproszone pada na ekran, wówczas musi powstać na nim *pierścień* o środku w punkcie C (rys. 72), t. j. w środku rzutu kropki na ekran. Pochodzi to stąd, że ów specjalny kierunek, o którym mowa, może mieć do-

wolne położenie dokoła linji DC, o ile tylko tworzy z nią ten sam kąt. Można również oczekiwać, że im krótsza fala, tem mniejszy kąt zawiera kierunek silnego rozproszenia z kierunkiem promienia pierwotnego, tak iż halo, wytworzone przez pojedynczą kroplę, musi być zabarwione, przyczem barwa niebieska znajduje się po wewnętrznej stronie pierścienia. Zjawisko to można łatwo zademonstrować doświadczalnie. Nim to jednak uczynimy, zajmiemy się nieco bliżej stroną teoretyczną,

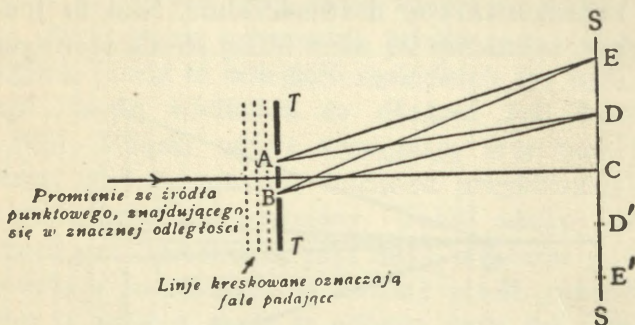


Rys. 72. Jeśli jakiś promień ugięty przez kroplę D tworzy kąt ADC z pierwotnym kierunkiem DC , wówczas zbiór wszystkich promieni ugiętych utworzy na ekranie pierścień, jak na rysunku, ponieważ wszystkie kierunki takie, jak DA , DB , DE , DF zawierają ten sam kąt z DC .

w ten sposób bowiem uzyskamy dalsze dowody siły odkrywczej teorii falowej.

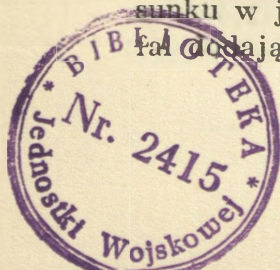
Wyobraźmy sobie przedewszystkiem doświadczenie, które przy pewnym nakładzie pracy i staranności można wykonać w laboratorium. W kartce papieru SS (rys. 73) przebijmy dwa małe otworki o środkach A i B i umieśćmy ją przed „punktowem” źródłem światła, jak zaznaczono na rysunku. Mówimy o źródle „punktowem”, gdyż źródło o większych roz-

miarach wytworzyłoby tyle nakładających się na siebie obrazów dyfrakcyjnych, że zjawisko, które chcemy tu zaobserwować, byłoby zupełnie zatarte. Po drugiej stronie ekranu *SS* z *A* i *B* rozchodzą się dwa układy fal kulistych; na drodze ich możemy ustawić ekran *TT*. W pewnych punktach tegoż oba układy fal są zgodne



Rys. 73. Dwa małe otworki w ekranie *TT* przepuszczają fale świetlne, nadbiegające z lewej strony. W *C* oba układy fal kulistych, wychodzących z *A* i *B*, wzmacniają się i dają jasność. Jeśli *DB* jest dłuższe od *DA* o $\frac{1}{2}$ długości fali, w *D* nie ma światła, ponieważ oba układy fal znoszą się na mocy zasady Younga. W *E* znów jest jasność, jeżeli *EB* jest dłuższe od *EA* o całą długość fali, a więc jeżeli oba układy fal znów są zgodne w fazie. Dalsze linje jasne i ciemne występują naprzemiennie. Położenia ich zależą od długości fali; dla barwy niebieskiej odpowiednie linje są rozmieszczone w mniejszych odstępach, niż dla czerwonych.

w fazie w chwili padania i skutki przez nie wywierane dodają się do siebie; w innych natomiast znoszą się przez interferencję, dając ciemność. Tak np. w *C*, t. j. w punkcie leżącym na ekranie *TT* w płaszczyźnie rysunku w jednakowej odległości od *A* i *B*, oba układy fal dodają się i wytwarzają plamkę jasną. Odnosi się



to nie tylko do punktu C, który leży w płaszczyźnie papieru, lecz również do wszystkich punktów na ekranie jednakowo oddalonych od A i B, bez względu na to, czy leżą one w płaszczyźnie rysunku, czy też nie. Istotnie też powstaje tu jasny prążek, zaznaczony na następnym rysunku linią poziomą przechodzącą przez C. Rysunek ten przedstawia widok ekranu TT, widzianego sprzodu.

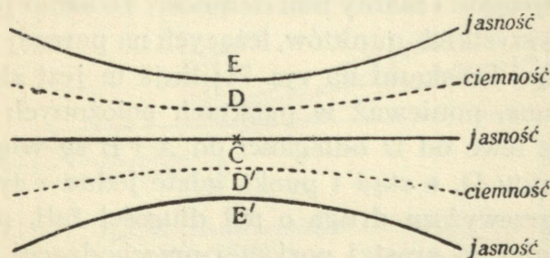
W punkcie D na ekranie, takim, że DA jest o pół fali dłuższe od DB, oba układy fal stale przeciwdziałają sobie wzajemnie i mamy tam ciemność. To samo jest słuszne dla wszystkich punktów, leżących na pewnej linii, zaznaczonej kreskami na rys. 74; linja ta jest zlekka zakrzywiona, ponieważ w punktach położonych na prawo i na lewo od D odległości od A i B są większe niż dla punktu D, a stąd i punkt, gdzie jedna z tych odległości przewyższa drugą o pół długości fali, przypada nieco dalej od prostej poziomej przechodzącej przez C. W ten sposób powstaje na ekranie układ jasnych linii.

Opisanemu zjawisku towarzyszy rozdzielenie barw, położenie bowiem punktów takich, jak D i E oraz linii przez nie przechodzących, zależy od długości fali. Tak np. linje jasne *niebieskie* leżą bliżej prostej poziomej na rys. 74, niż linje czerwone; w rzeczywistości owe linje jasne tworzą zbiór widm.

Przypuśćmy teraz, że kartę opatrzoną otworkami A i B obracamy szybko dokoła osi prostopadłej od niej i przechodzącej przez środek odcinka AB; obraz na ekranie obraca się również. Otworki A i B są teraz równoważne pierścieniowemu wycięciu, lub, jeśli początkowo stykały się może ze sobą, stają się jednym większym otworem kolistym. Obraz na ekranie przejdzie w „ho-

lo“ o środku w C i o promieniu nieco większym od CE. To ostatnie zjawisko łatwo zademonstrować, nakreślwszy na kartce dwie czarne linje, odpowiadające jasnym krzywym, przechodzącym przez E i E' i obracając kartkę w jej własnej płaszczyźnie dokoła C jako środka. Jeśli linje na tym rysunku są barwne, można jeszcze dokładniej naśladować halo.

A zatem światło przechodzące przez dwa otworki kołiste, które obracają się w opisany sposób, tworzy „ha-



Rys. 74. Na rysunku tym jest przedstawiony schematycznie ekran TT (rys. 73) widziany sprzodu. Linje ciągłe oznaczają miejscę jasne, przerywane — ciemne. Z całego szeregu tych linii na rysunku przedstawiono jedynie kilka. Każda z nich jest właściwie wąskim widmem.

lo“ i jakkolwiek nie są one zupełnie równoważne jednemu otworowi większemu, to jednak jest rzeczą jasną, że biorąc je zamiast tego ostatniego, nie popełniamy wielkiego błędu, i że usunięcie tej nieścisłości nie zmieniałoby w znaczniejszym stopniu wyglądu halo.

Opisane doświadczenie nie jest łatwe do wykonania, chyba w warunkach starannie dobranych, a to spowodowało małości niektórych wymiarów, w grę wchodzących. Jeśliby odległość pomiędzy środkami otworów A i B wynosiła $\frac{1}{2}$ mm, a odległość ekranu TT od SS 1 metr, to

promień halo, zresztą nader słabego, miałby zaledwie około 2 mm długości.

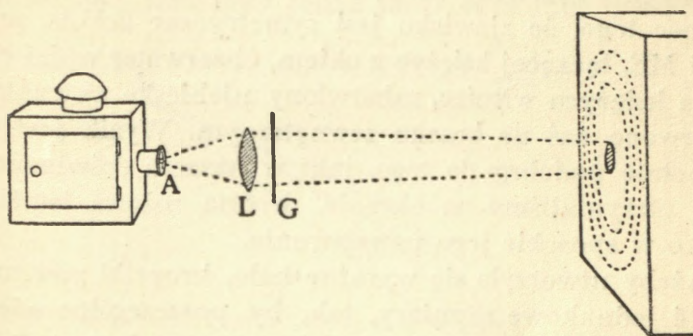
Musimy uczynić jeszcze jeden krok, aby uzupełnić nasze wyjaśnienie. Zwróćmy bowiem uwagę na to, iż właściwie wykazaliśmy dotychczas, w jaki sposób może powstać halo przy przejściu światła przez mały otworek, gdy tymczasem pragnęlibyśmy raczej dowiedzieć się, jakie będą skutki przejścia światła obok małej przeszkody. Otóż można wykazać, iż oba te zjawiska są tu równoważne — w obu przypadkach powstaje to samo halo. Jest to prostym lecz interesującym wnioskiem z teorii falowej, na który zwrócił uwagę w r. 1837 Babinet. Tok jego rozumowania był następujący.

Przypuśćmy, że ekran SS jest szklany. Gdyby szkło było wszędzie czyste, halo nie powstałoby, natomiast utworzyłoby się, jeśliby, przeciwnie, poczerniono cały ekran z wyjątkiem małego otworka. Otóż przypadek zupełnie przezroczystego szkła można uważać za połączenie dwu innych przypadków: ekranu czarnego z małym otworkiem oraz czystego z małą, czarną plamką na miejscu otworka. Połączenie obu tych przypadków daje to samo co przypadek pierwszy (ekran zupełnie przezroczysty), który, jak wiemy, nie wywiera żadnego wpływu na to, co się dzieje w punktach takich, jak E. Oba te rozkłady natężeń światła muszą więc tak interferować z sobą, że znoszą się nawzajem. Ruch falowy może być zniesiony jedynie przez inny ruch falowy o jednakowych wychyleniach i o tej samej długości fali, lecz odbywający się tak, że „grzbiety fal” pierwsze przypadają dokładnie w „dolinach” drugiego i vice versa. A zatem czarna plamka na przezroczystym ekra-

nie musi również wytwarzać halo o t y m s a m y m charakterze, co mały otworek w czarnym ekranie. Różnica pomiędzy niemi, powodująca wzajemne znoszenie się ich przy nałożeniu, nie jest bezpośrednio dostrzegalna dla oka: poprostu jeden układ fal jest przesunięty względem drugiego naprzód lub wstecz o pół długości fali.

Przejdźmy obecnie do rzeczywistego doświadczenia. Aby powstało halo o rozmiarach dogodnych dla obserwacji, cząstki muszą być bardzo małe, mierzące np. $1/10$ do $1/50$ mm w średnicy. Halo wytworzone przez jedną taką cząstkę miałooby jasność zbyt małą, aby można było je dostrzec. Nie trudno jest wszakże połączyć działanie tysięcy takich cząstek. Jeśli umieścimy płytkę szklaną prostopadle do wąskiej wiązki światła i chuchniemy na nią, wówczas maleńkie kropelki osadzone na szkłe „dodają” swe własne „wieńce”, zwłaszcza, jeżeli wszystkie mają w przybliżeniu jednakowe rozmiary. Jakkolwiek bowiem kropelki te zajmują różne położenia na płytce, to jednak szerokie, rozmyte ich wieńce nakładają się — praktycznie rzecz biorąc — wzajemnie na siebie, i kombinacja ich daje efekt dostrzegalny (rys. 75). Na czystej płytce szklanej, leżącej przez pewien czas w zacisznym pokoju, gromadzi się tyle pyłu, że okazuje ona halo; jeżeli jednak chuchniemy na płytkę, to ilość kropelek jest tak znaczna, iż zjawisko występuje daleko wyraźniej. Spoczątku kropelki są bardzo drobne; ciekawy widok przedstawia wzmacnianie się pierścieni „pyłowych” dzięki rozpościeraniu się na ekranie nowych pierścieni, które skolei kurczą się szybko w miarę tego, jak najdrobniejsze kropelki parują i zlewają się w większe. W pierścieniach tych wy-

stępują wszystkie barwy, przedstawiając w ciemnym pokoju istotnie piękny widok. W doświadczeniu opisywanym w ekranie zazwyczaj znajduje się otwór, przez który przechodzi główna wiązka światła i ginie w ten sposób dla oka; w przeciwnym bowiem razie jaskrawe oświetlenie białego ekranu przez tę wiązkę przeszkadzałoby obserwacji subtelnych zabarwień w halo.



Rys. 75. Światło, wychodzące z latarni przez mały otwór *A*, zbiera soczewka *L* na otworze pudła, widocznego po prawej stronie rysunku. Wpadając do pudła, które jest poczernione wewnątrz, światło ulega pochłonięciu. Płatka szklana *G* pokryta subtelnym pyłem lub kropelkami mgły, powoduje powstawanie halo, które pojawia się na ścianie pudła; usunięcie wiązki głównej pozwala łatwo dostrzec słabe stosunkowo zjawisko halo.

Wieńce dokoła słońca lub księżyca powstają w podobny sposób, należy jednak zaznaczyć, że oko nie otrzymuje promieni o różnych barwach od *jednej i tej samej kropli* (rys. 76). Niech *M* oznacza księżyc, *E* zaś oko obserwatora. Kropelka, zawieszona w atmosferze w *D*, wytworzyłaby na ekranie, jak w opisanym wyżej doświadczeniu, wieniec, którego środkiem byłby punkt przecięcia prostej *MD* z ekranem. Przypuśćmy, że oko

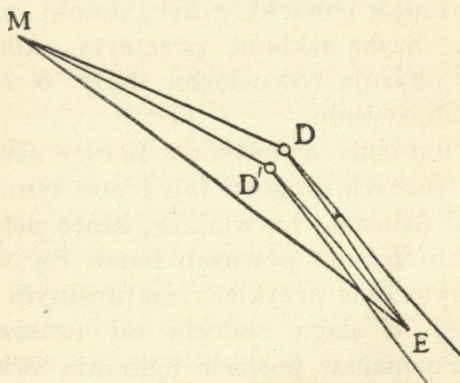
znajduje się w zewnętrznej części halo i widzi barwę czerwoną, pochodzącą z ugięcia przez D; ponieważ pierścień niebieski leży wewnątrz czerwonego, przeto promienie niebieskie, ugięte przez tę samą kropelkę nie wpadają do oka. Jednakże jakaś inna kropelka, np. w D', wytwarza halo, którego niebieskie promienie mogą właśnie dostać się do oka; oko więc otrzymuje promienie czerwone od D, i niebieskie od D', przyczem wobec tego, że zjawisko jest symetryczne dokoła prostej ME, łączącej księżyc z okiem, obserwator widzi dokoła księżycy wieniec, zabarwiony niebiesko wewnątrz, czerwono zaś na brzegu zewnętrznym. Wynik jest tu zupełnie podobny do tego, jaki w naszym doświadczeniu otrzymaliśmy na ekranie, drobna różnica istnieje tylko w sposobie jego powstawania.

Ażeby utworzyło się wyraźne halo, kropelki powinny mieć jednakowe rozmiary, tak, by poszczególne wieniec nakładały się i wzmacniały wzajemnie swe działania. Im większe jest halo, tem mniejsze kropelki je wywołują.

Łatwą jest rzeczą odtworzyć to doświadczenie przy obserwacji subiektywnej. Wystarczy tylko spojrzeć na jasny punkt świecący przez szybkę szklaną, na której znajduje się cienka warstewka subtelnych kropelek, wytworzona przez chuchnięcie.

Ciekawe zastosowanie uginania światła podał T. Young w swym „eriometrze“, dziś jeszcze używanym przyrządzie, służącym do pomiaru średnicy włókien wełny. Jeśli w biegu wiązki świetlnej umieścimy cienkie włókno prostopadle do jej kierunku, to na ekranie, na który rzucamy cień włókna, pojawiają się po obu stronach cienia równoległe do niego jasne linje. Wyjaśnia się to

w sposób podobny, jak w omawianym wyżej przypadku dwóch małych otworków; nie mamy zresztą potrzeby szczegółowo się nad tem zastanawiać. Jeżeli w biegu promieni umieścimy większą ilość włókien, prostopadłych do wiązki, lecz posiadających zresztą najrozmaitsze kierunki, wówczas różne pary linii będą się krzyżowały na ekranie; jeśli ich jest dostatecznie dużo, skutek będzie taki, jakgdyby jedna jasna para linii wykonała



Rys. 76. Kropelka w D wysyła światło czerwone do oka obserwatora, kropła w D' wysyła światło niebieskie. Dzięki temu tworzy się zabarwiony wieniec dokoła księżyca, widocznego w kierunku EM .

obrót dokoła promienia jako osi, podobnie, jak to mieliśmy poprzednio przy omawianiu rys. 74. Innymi słowy, pojawi się halo, którego średnica zależy od grubości włókien.

Przyrząd ten przedstawia rys. C na tabl. XV. Obserwator spogląda na jakieś źródło światła o małych rozmiarach, np. na otworek w zasłonie jasno oświetlony z drugiej strony, poprzez zwitek włókien, umieszczony

na odpowiednim sztyfciku. Dokoła punktu świeżącego widoczny jest pierścień dyfrakcyjny.

Zjawiska uginania można zaobserwować na każdym niemal kroku. Światło latarni ulicznych tworzy barwną gwiazdę, jeśli spojrzeć na nie przez tkaninę parasola; „promienie“ tej gwiazdy są równoległe do wątku i osnowy tkaniny. To samo widać poprzez jedwabną zasłonę lub jakikolwiek inny, delikatny i nie nazbyt nieprzezroczysty materiał. Dziecko, patrzące na ogień przez przymknięte powieki, widzi „słomki, wychodzące z płomieni“. Szyba szklana, przetarta załuszczoneym gałgankiem, okazuje równoległe ślady o czerwonym i zielonym zabarwieniu.

Zjawiska uginania wytwarzają barwy zawsze przez *rozdzielenie* różnych długości fali i pod tym względem różnią się od działania barwników, które polega na selektywnym *zniszczeniu* pewnych barw. Są one, jak to ilustrują przytoczone przykłady, naturalnym wynikiem teorii falowej. W ciągu stulecia od czasów Younga zbadano najrozmaitsze postacie uginania światła; teoria dyfrakcji wyjaśniła w sposób całkowicie zadowalający obserwowane zjawiska oraz pozwoliła przewidzieć inne, dotychczas nieznane. Fakt ten stanowił — i stanowi jeszcze obecnie — jedną z podstaw teorii falowej. W tym zakresie faktów musi ona być zgodna z prawdą.

ROZDZIAŁ VI

POLARYZACJA ŚWIATŁA

O jakościach światła

ŚWIATŁO posiada pewną właściwość taką, której oko nie może bezpośrednio ani dostrzec, ani zmierzyć. Kierunek rozchodzenia się, natężenie, barwa — wszystko to może być zaobserwowane i odgrywa rolę w procesie widzenia; własności te, czy też cechy analogiczne, przysługują w s z y s t k i m rodzajom fal — falom eteru, falom wodnym i powietrznym falom dźwięku. Owa wspomniana wyżej właściwość dodatkowa wyróżnia natomiast rozmaite *postacie* fali. Jest ona związana z charakterem ruchu w samej fali: nie z ruchem postępowym *układu* fal, lecz z ruchem *ośrodka*, w którym się one rozchodzą.

Tak np., gdy fale biegną po powierzchni morza, w każdym danym miejscu woda podnosi się i opada w miarę tego, jak fale punkt ten mijają. *Naprzód* rozchodzi się tylko *postać* fali, nie materja, z której się ona składa; okręt czy inny jakiś przedmiot, pływający na powierzchni, nie posuwa się naprzód wraz z falą, lecz podnosi się tylko i opada, kołysząc się zlekka wprzód i wstecz. Człowiek, pływający nawznak na otwartem morzu, unosi się na grzbietach i obniża w doli-

nach przechodzących pod nim fal, lecz nie zabierają go one z sobą w kierunku swego ruchu. Dopiero w pobliżu wybrzeża, gdzie ruch ten przybiera inny charakter i nie jest, ściśle biorąc falą, lecz „kpielą“, woda rzucona jest z siłą na brzeg, a wraz z nią i ów pływak. Fale morskie są „poprzeczne“, ruch cząstek wody zachodzi tu bowiem prostopadle do kierunku rozchodzenia się całego układu fal.

Ruch powietrza w fali głosowej jest zupełnie odmienny. Cząsteczki powietrza poruszają się naprzód i wtył, w kierunku ruchu układu fal, nie zaś w poprzek tego kierunku. Podczas swych „Wykładów Gwiazdkowych“ Tyndall ustawił w sali wykładowej szereg chłopców, z których każdy trzymał ręce na ramionach towarzysza, stojącego przed nim, i popchnął silnie ostatniego z nich: pchnięcie to przebiegło, jak fala pulsu, przez całą linję — i chłopiec na przeciwległym końcu upadł na przygotowany dlań materac. Wszystkie poruszenia zachodziły wzdłuż linji, wytyczonej przez szereg chłopców. Gdyby, zamiast silnego pchnięcia, demonstrator potrząsał był ostatnim w szeregu wprzód i wstecz, kolejne impulsy rozchodziłyby się wzdłuż linji jako układ fal, ilustrując w wielkiej skali rozchodzenie się głosu w powietrzu lub innym ośrodku. Cząsteczki powietrza odpowiadają w tej analogji chłopcom, oczywiście jednak ruchy ich są nieporównanie szybsze niż te, jakie miały miejsce w doświadczeniu Tyndalla.

Nakoniec wyobraźmy sobie, że szarpniemy w bok linję, której jeden koniec jest przytwierdzony nieruchomo, a drugi trzymamy w ręku. Wzdłuż linji pobiegnie fala wygięcia — i zjawisko to jest bardziej zbliżone do rozchodzenia się światła, niż który-

kolwiek z poprzednio omówionych przykładów. Jest to fala „poprzeczna“, jak fale morskie, nie zaś „podłużna“, jak głosowe. W falach morskich jednak kierunek ruchów wody jest ograniczony: cząstki wody podnoszą się i opadają, lecz nie przesuwają się wcale w kierunku poziomym prostopadle do kierunku rozchodzenia się fali. Lina owa przedstawia analogję zupełniejszą: boczne jej ruchy mogą odbywać się w dowolnych kierunkach do niej prostopadłych. To samo przypuszczenie musimy uczynić w przypadku światła, aby zdać sprawę z pewnych zjawisk, o których będzie mowa niżej.

Znaczenie tej hipotezy polega na tem, iż pozwala ona obdarzyć światło nową własnością, której nie można wprowadzić wykryć bezpośrednio przy pomocy wzroku, lecz która ujawnia się innemi sposobami i — oczywiście — domaga się wyjaśnienia. Jak zobaczymy, cechę tę wykrywamy zwykle przy pomocy niektórych kryształów; można ją zaobserwować na wielką skalę w świetle pogodnego nieba oraz w świetle odbitem od ciał przezroczystych, np. od powierzchni morza.

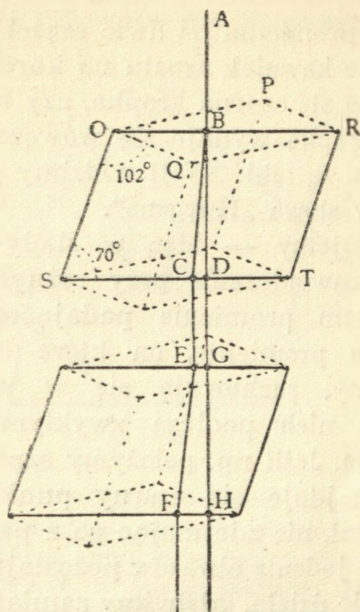
Wobec wielkiego znaczenia, jakie sprawa ta posiada, oraz wobec faktu, że poświęcone jej badania szeregu uczonych odegrały ważną rolę w powstaniu społecznych poglądów na naturę światła, rozpatrzmy ją od pierwszych jej początków, od czasów Newtona i Huygensa; historia tego zagadnienia posłuży nam zarazem piękną ilustracją stopniowego rozwoju idei naukowej.

„Z Islandji, wyspy na Morzu Północnem, pod 66 stopniem szerokości“, pisał Christian Huygens w r. 1678 w swym „Traktacie o świetle“, „sprowadza się pewien rodzaj kryształu, czyli przezroczystego kamienia, wielce godnego uwagi ze względu na swą postać oraz inne

cechy, lecz przedewszystkiem ze względu na osobliwe załamywanie się światła“. Wiemy dzisiaj, że większość kryształów okazuje podobne własności, niewątpliwie jednak „kamień islandzki“ wyróżnia się tu rozmiarami, przezroczystością oraz nader wybitnem występowaniem owego zjawiska. Huygens powiada, że pierwszy zwrócił uwagę na ten kryształ Erasmus Bartholinus, lecz on, Huygens, pisze mimo to swój traktat, „gdyż przykładałem się nader pilnie do ścisłego zbadania tych własności załamywania światła, aby upewnić się w nich całkowicie, zanim przystąpię do wyjaśnienia ich przyczyn“.

Fotografje kryształów szpatu islandzkiego widzimy na tabl. XVII i XVIII. Wiemy obecnie, że jest to węglan wapnia o składzie chemicznym CaCO_3 . Szpat daje się łatwo łupać wzdłuż pewnych płaszczyzn, przybierając w sposób naturalny kształt rombościanu. Widać to na rys. A, tabl. XVII, najlepiej w przypadku kryształu, leżącego na stole poniżej większych kawałków, użytych do doświadczeń; por. zresztą rys. A na tabl. XVIII. Przy dwóch narożach rombościanu, O i T (rys. 77) wszystkie trzy kąty, w nich się schodzące, są rozwarte i wynoszą blisko 102° . Sprawą, która przedewszystkiem zainteresowała Huygensa, był ciekawy fakt podziału każdego (z wyjątkiem pewnych przypadków specjalnych) promienia, wchodzącego do kryształu, na dwa promienie, biegnące wewnątrz niego w różnych kierunkach. Jakkolwiek oba te promienie przy wyjściu z kryształu przybierają kierunek pierwotny, to jednak drogi ich pozostają już rozdzielone, chociaż są do siebie równoległe. Rys. 77, skopjowany z „Traktatu“ Huygensa, objaśnia tę sprawę. Przyjmujemy dla prostoty, że promień AB pada na ściankę kryształu prostopadle; dzieli się on

w nim na dwa promienie BC i BD , które przy wyjściu z kryształu stają się równoległe: CE i DG . Widzimy to wyraźnie na fotografii A, tabl. XVII. Promień świetlny,



Rys. 77. Rysunek ten jest skopjowany z podanego w „Traktacie“ Huygensa. Dla prostoty przyjęto, że kryształ został ścięty tak, iż odcinki OP , OQ i OS są równe; wówczas OT jest osią, przechodzącą przez O , a $ORTS$ — przekrojem, zawierającym oś. Promień AB pada prostopadłe na ścianę $OPRQ$ i dzieli się na promień zwyczajny BD , będący przedłużeniem padającego, oraz nadzwyczajny BC , o kierunku odmiennym. Oba one leżą w płaszczyźnie $ORTS$. Po wyjściu z kryształu oba promienie będą w kierunku promienia padającego.

pada tu na kawał szpatu; nieco dymu pozwala uwi-
docznić drogę promienia w powietrzu. Podwójny ślad
jest niewidoczny wewnątrz szpatu, kryształ jest bowiem

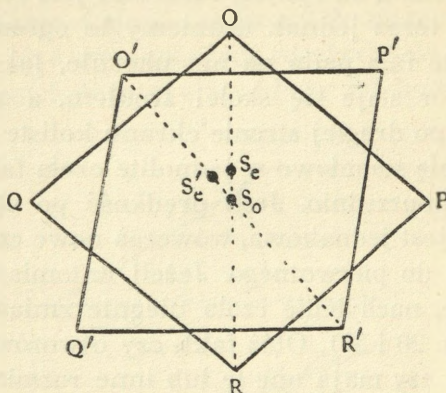
tak przezroczysty, że światło nie ulega w nim niemal zupełnie rozproszeniu; po wyjściu z kryształu jednak oba promienie znów są widoczne w zadymionem powietrzu.

Ten podział promienia na dwie części można okazać również, kładąc kawałek szpatu na kartkę papieru, na której znajduje się czarna kropka, czy też jakikolwiek inny znak: kropka wydaje się wówczas podwojona. Tak np. na rys. A, tabl. XVIII widzimy podwojone początkowe litery słowa „Huygens“.

Jeżeli spróbujemy — idąc w ślady Huygensa — wykonać to doświadczenie przy różnych położeniach szpatu względem promienia padającego, to stwierdzimy, że oba promienie, na które dzieli się promień pierwotny, zachowują się w odmienny sposób. Jeden z nich podlega zwykłym prawom załamania światła. Jeśli np. położymy szpat na papierze, na którym znajduje się czarny punkt, i będziemy obracali kryształ, nie zdejmując go z papieru, to przekonamy się, że jeden z obrazów pozostaje w spoczynku, tak, jakby to się działo, gdybyśmy zamiast szpatu wzięli kawałek szkła (rys. 78). Drugi obraz natomiast okrąża tamten po kole, przyczem położenie jego związane jest wyraźnie z postacią i położeniem kryształu: prosta, łącząca oba obrazy, jest równoległa do dwusiecznej kąta rozwartego ścianki. Obraz nieruchomy wydaje się znacznie bliższy, co świadczy o silniejszym załamaniu światła w tym przypadku; musi ono zatem biec w kryształ wolniej, niż światło, tworzące drugi obraz.

Promień, który podlega zwykłym prawom załamania, nosi nazwę *zwyyczajnego*, pozostały — *nadzwyczajnego*. Huygens postawił sobie za cel znaleźć prawi-

dła, rządzące kierunkiem promienia nadzwyczajnego, i osiągnął w tem całkowite powodzenie, przy użyciu pomysłowych metod, opisanych w jego „Traktacie“. Nie zdołał jednak wytłumaczyć fizycznych właściwości tych promieni, ani też nie udało mu się powiązać ich z na-



Rys. 78. Rysunek ten przedstawia związek pomiędzy obrazem zwy-
czajnym i nadzwyczajnym czarnego punktu, widzianego przez
kryształ szpatu islandzkiego. Obserwator widzi czarne punkty
w S_0 i S_e , przyczem S_0 wydaje się bliższym. Przy obrocie kry-
ształu, np. do położenia $O'P'R'Q'$, plamka S_0 pozostaje nieru-
choma, natomiast S_e przesuwa się do S_e' , który to punkt leży na
przekątnej $O'R'$. Przy przesuwaniu kryształu po papierze bez
obracania go oba obrazy pozostają nieruchome.

turą kryształu. Jego opowieść o tem niepowodzeniu jest, jak wkrótce zobaczymy, równie interesująca, jak sprawa-
zodanie z sukcesów na polu geometrycznego ujęcia
zjawisk.

Poprzednie badania Huygensa nad odbiciem i za-
łamaniem fal na powierzchni, oddzielającej powietrze
od szkła, wody, czy też wogóle dzielących jeden ośro-

dek przezroczysty od innego, doprowadziły go do zastosowania pewnej konstrukcji geometrycznej, którą i my posługiwaliśmy się w poprzednich rozważaniach.

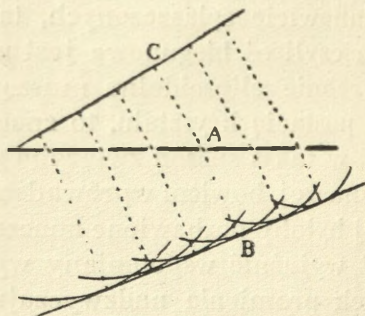
Przypuśćmy, że fala napotyka w swym ruchu przegrodę, opatrzoną szeregiem otworów. W doświadczeniu, przedstawionem na rys. 66, czoło fali jest równoległe do przegrody, teraz jednak usuniemy to ograniczenie, zakładając, że fala pada na nią ukośnie, jak na rys. 79. Każdy otwór staje się skolei źródłem, z którego rozchodzą się po drugiej stronie ekranu koliste zmarszczki, zlewające się stopniowo w jednolite czoła fal, jak to widzieliśmy poprzednio. Jeśli prędkość po obu stronach przegrody jest jednakowa, wówczas nowe czoło fali jest równoległe do pierwotnego. Jeżeli natomiast prędkości te są różne, nachylenie czoła ulegnie zmianie (rys. 79, a także rys. 20 i 21). Otóż fakt, czy otworów jest mniej lub więcej, czy mają one te lub inne rozmiary, nie może tu stanowić żadnej różnicy; możnaby ich wziąć bardzo dużo w bardzo małych odległościach od siebie, a nawet możnaby tu wogóle usunąć ekran.

Zanim przejdziemy dalej, zwróćmy jeszcze uwagę na jedno. Fala cząstkowa, wychodząca w naszym doświadczeniu z A, dobiega, jak widzimy z rysunku, do B, gdzie współdziała w utworzeniu czoła fali. Jeśliby otwór A został zasłonięty, to w B dałby się odczuć pewien brak w zaburzeniu ośrodka; w analogji optycznej powiemy, że padałoby tam *mniej* światła. W przypadku ekranu fikcyjnego, który jedynie ma zaznaczyć granicę między dwoma ośrodkami przezroczystymi, zasłona umieszczona w A, rzucałyby *cień* w B. Możemy więc powiedzieć, że prosta AB jest kierunkiem *promienia* po załamaniu; przed załamaniem kierunek ten wyznaczała



linia CA. Tak przedstawia się Huygensowska analiza zjawiska załamania światła.

Jeśliby analogiczne wyjaśnienie miało znaleźć zastosowanie w przypadku k r y s t a ł u, to jasną jest rzeczą, że należałoby tu wprowadzić pewne zmiany czy uzupełnienia. Promień nadzwyczajny nie powstawałby po prostu skutkiem tego, że w kryształach mamy do czynienia z dwiema prędkościami rozchodzenia się światła, którym odpowiadają dwa układy fal kulistych. Przy



Rys. 79. Układ fal przenika przez otwory w przesłonie do ośrodka w którym prędkość ich jest mniejsza, niż poprzednio. Koliste fale cząstkowe tworzą jedno z czoł wypadkowego układu fal.

dwóch prędkościach istniałyby rzeczywiście dwa promienie, oba jednak musiałyby podlegać zwykłemu prawom załamania, gdy tymczasem promień nadzwyczajny podlega prawom specjalnym, w których odgrywa rolę położenie kryształu względem promienia padającego.

Huygens przekonał się zatem, iż praw rządzących zachowaniem się promieni nadzwyczajnych nie można powiązać z falami kulistymi, spróbował więc „co da za-

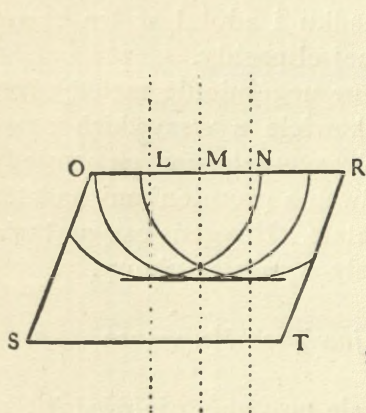
łożenie fal eliptycznych, czy raczej sferoidalnych“. Otóż okazało się, że założenie to *wystarcza* do rozwiązania omawianego zagadnienia. Było rzeczą zupełnie naturalną, że Huygens wziął pod uwagę *elipsoidę*, jest to bowiem najprostsza z powierzchni poza kulą, która nie wchodzi w rachubę, jako zbyt prosta. Elipsoida — dobrze znanym jej przykładem jest ziemia — powstaje wskutek obrotu elipsy dokoła jednej ze swych osi, będącej również osią elipsoidy. Fale Huygensa miały zatem rozchodzić się w postaci powierzchni elipsoidalnych, a mianowicie spłaszczonych, tak jak ziemia, której średnica czyli oś biegunowa jest najkrótsza.

Owe powierzchnie elipsoidalne muszą mieć oczywiście związek z postacią kryształu, to znaczy, że oś elipsoidy musi być w jakiś sposób związana z krawędziami rombościanu, inaczej bowiem wprowadzenie powierzchni elipsoidalnej byłoby pozbawione znaczenia. Pozwala to natychmiast wyjaśnić wspomniany wyżej fakt (rys. 77), iż kierunek promienia nadzwyczajnego znajduje się w związku z postacią kryształu.

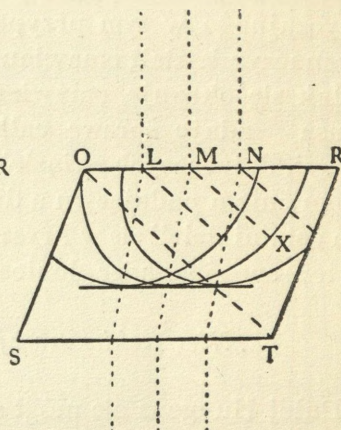
Jeśli tak jest w rzeczywistości, to istnieje tylko jeden możliwy kierunek osi elipsoidy: musi on schodzić się z kierunkiem *osi kryształu*. Jest to kierunek owej prostej, przechodzącej przez punkt O, rys 77 (gdzie wszystkie kąty wynoszą po 102°), i jednakowo nachylonej do trzech ścian, schodzących się w tym punkcie. Należy przytem pamiętać, że oś kryształu nie jest jakąś oznaczoną *linją*, lecz pewnym oznaczonym *kierunkiem*: oś można przeprowadzić przez każdy dowolny punkt. Na rys. 77 oś przeprowadzona przez O przechodzi przez przeciwległe naroże rombościanu tylko wówczas, gdy odcinki OP, PQ i OS są równe, co zależy tylko od spo-

sobu wycięcia danego kryształu. Położenie osi jest związane z fizycznymi własnościami kryształu, nie zaś z rozmiarami jego krawędzi.

Rozpatrzmy teraz, w jaki sposób Huygens zastosował nową tę koncepcję do wyjaśnienia swych obserwacji. Weźmy pod uwagę przypadek zilustrowany na rys. 77, gdzie promień AB przedstawia układ padają-



Rys. 80.



Rys. 81.

Rys. 80 i 81. Rysunki 80 i 81 ilustrują konstrukcję Huygensa dla promieni zwyczajnych i nadzwyczajnych w szpacie islandzkim.

cych na kryształ fal płaskich, równoległych do przedniej powierzchni kryształu. Dalszy bieg czoła fali (rys. 80 i 81) można wyznaczyć na podstawie metody Huygensa, kreśląc powierzchnie falowe, rozchodzące się z różnych punktów, L, M, N płaszczyzny, na którą fala pada. W przypadku, gdy stosują się zwykle prawa załamania, powierzchnie falowe na rysunku są kulami, jak to widzieliśmy już poprzednio, linje kropkowane zaś

wskazują przebieg promieni. Promień zwyczajny zachowuje się tak, jakby kryształ utworzony był np. ze szkła. Natomiast dla promieni nadzwyczajnych zamiast kul mamy powierzchnie falowe elipsoidalne o osiach równoległych do osi kryształu (rys. 81). Widzimy teraz, że czoło fali w kryształach porusza się ukośnie, co zdaje sprawę z faktów zaobserwowanych. Huygens zmierzył wielkość odchylenia promienia nadzwyczajnego od zwyczajnego w tym przypadku i zdołał w ten sposób wyznaczyć kształt omawianej elipsoidy.

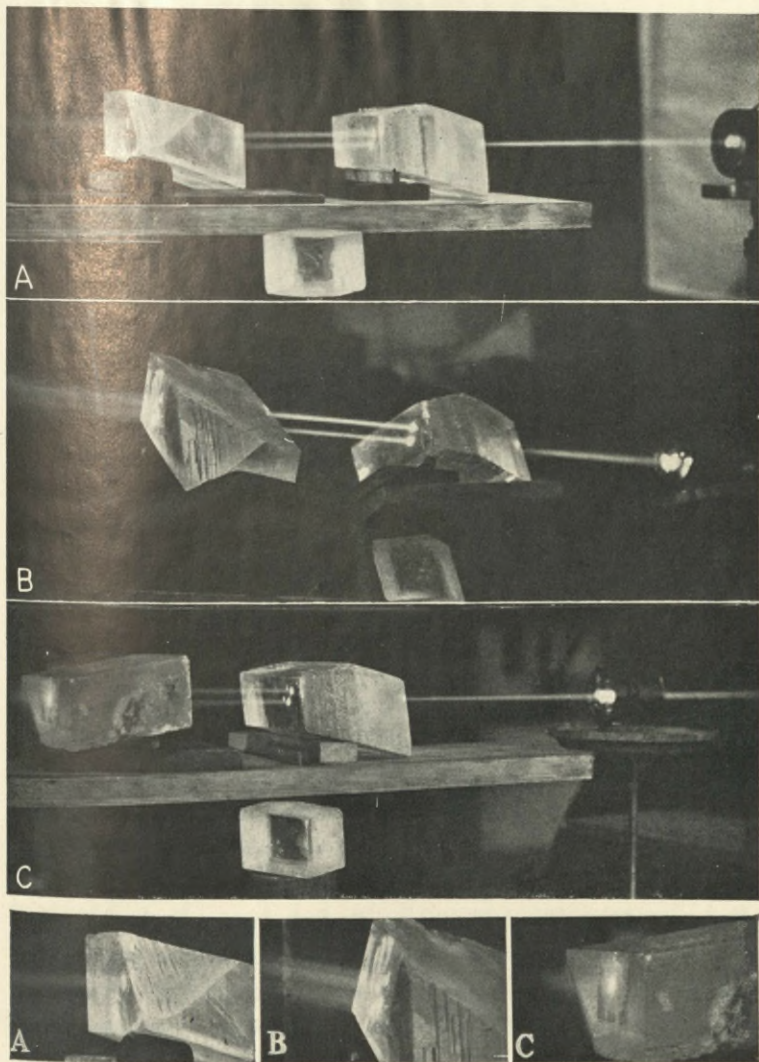
Jak się okazuje, omawiane uogólnienie metody Huygensa zdaje sprawę całkowicie z wszystkich obserwacji, dotyczących związków geometrycznych pomiędzy promieniem padającym a dwoma promieniami, na które ten ostatni dzieli się w kryształach. Huygens osiągnął więc w ten sposób nader doniosły wynik naukowy.

„Nieoczekiwane zjawisko“ Huygensa

Dalej Huygens nie mógł się posunąć, nie wiedział bowiem o istnieniu i naturze tej cechy światła, którą dziś zwiemy *polaryzacją*. Trudności, jakie tu napotkał, przedstawimy najlepiej jego własnymi słowami. Opisuje on w następujący sposób „nieoczekiwane zjawisko, dotyczące promieni, które przechodzą przez dwa oddzielne kryształy; przyczyna tego zjawiska nie jest wyjaśniona“. Rysunek Huygensa, ilustrujący jego obserwacje, znajdujemy na fig. 77, fotografie zaś na tabl. XVII A, B, C przedstawiają rzeczywisty bieg promieni we wspomnianem zjawisku. Opis Huygensa brzmi:

„Zjawisko polega na tem, iż jeśli położymy dwa kryształy jeden na drugim, lub umieścimy je w pewnej od-

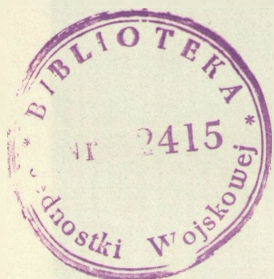
TABLICA XVII



A. Dwa kryształy szpatu islandzkiego ustawiono w położeniu „równoległym”. Są to duże bryły (własność Royal Institution) nie wycięte w prawidłowe rombościany; widać jednak, że naturalne krawędzie są istotnie równoległe. Pojedynczy promień świetlny z latarni, uwidoczniiony przez zady-mienie powietrza, ulega w pierwszym pryzmacie rozdwojeniu; odstęp pomiędzy wiązkami wzrasta po przejściu przez drugi kryształ. Widać, że białe plamki, zaznaczające punkty wyjścia promieni z kryształu, znajdują się na prostej równoległej do dwusiecznej rozwartego kąta ścianki, na której leżą (str. 188, 189, 196, 199).

B. Tu obrócono szpat o pewien kąt, tak, aby ściany „wyjściowe” promieni były do siebie równole-głe w obu kryształach. Promienie wychodzące z pierwszego kryształu ulegają dalszemu podziałowi i na ostatniej ścianie pojawiają się cztery plamki (str. 196, 199).

C. Drugi kryształ obrócono o 180° od położenia przedstawionego na rysunku A. Obie bryły przy-padkowo posiadają prawie jednakową grubość, tak iż oba promienie, padające na drugi kryształ, łączą się w jeden przy wyjściu z niego (str. 196, 199). Na dodatkowych fotografiach uwidoczniiono ściany wyjściowe w większych rozmiarach, co pozwala lepiej dostrzec wspomniane wyżej plamki 1, znaczące miejsce wyjścia promieni.



ległości od siebie tak, aby wszystkie ścianki jednego z nich były równoległe do odpowiednich ścian drugiego, wówczas promień świetlny, np. AB, rozpada się w pierwszym kryształcie na dwa, BD i BC, dzięki regularnemu i nieregularnemu załamaniu. Po wejściu do drugiego kryształu każdy z tych promieni biegnie w nim, *nie* dzieląc się ponownie na dwa promienie; ten, który załamał się regularnie, DG, ulega znów tylko takiemu samemu załamaniu (GH), drugi zaś, CE, — załamaniu nieregularnemu (EF)... Otóż jest rzeczą zadziwiającą, dlaczego promienie CE i DG, padające z powietrza na drugi kryształ, nie dzielą się tak, jak pierwszy promień AB. Można by powiedzieć, że promień DG, przechodząc przez górny szpat, utracił coś, co jest niezbędne dla wprowadzenia w ruch substancji, odgrywającej rolę przy załamaniu nieregularnym; i podobnie, promień CE utracił coś, co jest niezbędne do wprowadzenia w ruch substancji, odgrywającej rolę przy załamaniu regularnym...“ Należałoby więc oczekiwać, że promień zwyczajny pozostanie już zawsze zwyczajnym, nadzwyczajny zaś — zawsze promieniem nadzwyczajnym. Huygens mówi dalej: „Istnieje wszakże inny fakt, który obala to rozumowanie. Jeżeli bowiem umieścimy kryształy tak, że płaszczyzny przecięć głównych przecinają się pod kątem prostym... wówczas promień załamany regularnie, jak np. DG, ulega jedynie załamaniu *nieregularnemu* w kryształcie dolnym, i odwrotnie, promień załamany nieregularnie, jak CE, załamuje się dalej tylko w sposób *regularny*...“ Oznacza to, że promień zwyczajny stał się nadzwyczajnym i *vice versa*. Głównem nazywamy przecięcie, przechodzące przez jedną z krawędzi, tworzących tępe naroże rom-

bościanu (rys. 77) i dzielące na połowę kąt pomiędzy dwiema pozostałymi krawędziami, np. OSTR na rys. 77.

„We wszystkich jednak nieskończenie licznych położeniach, oprócz tych, o których przed chwilą była mowa“ (t. zn. tych, gdzie przekroje główne są równoległe albo też prostopadłe do siebie), każdy z promieni DG i CE rozdwaja się ponownie przy załamaniu w dolnym kryształ, tak iż z pojedynczego promienia AB powstają cztery, bądź to o jednakowej, bądź o bardzo różnej jasności, zależnie od tego, czy położenia obu kryształów są mniej lub bardziej zgodne; nie zdaje się jednak, aby zawierały one łącznie *więcej* światła, niż pojedynczy promień AB.

„Kiedy zastanawiamy się nad pytaniem, czym się to dzieje, że przy tych samych promieniach CE i DG okoliczność, czy dzielą się one na dwa promienie czy też nie, zależy od *położenia dolnego kryształu*, gdy tymczasem promień AB *zawsze* ulega rozdzieleniu, to wydaje się nieuniknionym wniosek, iż fale świetlne po przejściu przez pierwszy kryształ przyjmują pewną formę czy skłonność, dzięki której, napotykając drugi kryształ — w pewnych jego położeniach — mogą wprawić w ruch *obie* substancje odpowiadające dwu typom załamania światła; w innych zaś położeniach czynią to z *jedną tylko* z tych substancyj. Jak się to jednak dzieje, o tem nie mogę dotychczas powiedzieć nic, co by mnie zadowalało“. Dlatego też Huygens „badania te pozostawia innym“. Nie zdołał on odgadnąć, czym jest owa „pewna forma czy skłonność“: oto promień świetlny po wyjściu z pierwszego kryształu posiada „boki“, „strony“, jeśli użyć wyrażen powszechnie później używanych. Wzmianka o „dwu różnych rodzajach substan-

cji“ odnosi się do podanego przez Huygensa objaśnienia podwójnego załamania i nie przedstawia tu dla nas znaczenia.

Spostrzeżenia Huygensa są zilustrowane na fotografiach (tabl. XVII). Na rys. A promień świetlny dzieli się na dwa, przechodząc przez bryłkę szpatu islandzkiego (z prawej strony), przyczem bieg promieni uwiidocznia się wyraźnie w umyślnie zadymionem powietrzu. Drugi kryształ szpatu umieszczono tak, iż jego krawędzie są odpowiednio równoległe do krawędzi pierwszego. Orientacje obu kryształów są identyczne, innemi słowy, znajdują się one w podobnem położeniu. W tym przypadku niema nowego podziału promieni, lecz przejście przez drugi szpat powoduje jedynie większe rozsuniecie się dwu dawniej już istniejących. Bieg promieni można obserwować albo według śladu wiązek świetlnych w zadymionem powietrzu, albo też na jasnych plamkach, tworzących się dzięki rozpraszaniu światła na niewypolerowanej powierzchni w miejscach, gdzie promienie wchodzi do kryształów lub z nich wychodzą. Można stwierdzić, że prosta łącząca owe plamki jest równoległa do dwusiecznej kąta rozwartego ścian, zgodnie z tem, co widzieliśmy na rysunkach poprzednich.

Na fotografii B tabl. XVII drugi kryształ obrócono o pewien kąt dokoła kierunku promieni jako osi. Po przejściu przez ten kryształ otrzymujemy tu *cztery* promienie. Miejsce, z którego fotografowano bieg promieni, zmieniono tak, aby ten dalszy podział zaznaczył się wyraźniej. Mamy tu przykład jednego z „nieskończenie licznych innych położzeń“ Huygensa.

Na tablicy XVII C drugą bryłę szpatu obrócono o dwa

kąty proste. Obecnie oba promienie, wychodzące z pierwszej bryły, łączą się w jeden po przejściu przez drugą. Oba kawałki szpatu mają przypadkowo tę samą grubość, wskutek czego działania ich znoszą się nawzajem.

Doświadczenie Malusa

Stulecie minęło bez nowych prób wyjaśnienia opisanych zagadkowych zjawisk. W r. 1808 Malus spojrział przypadkowo przez kawałek szpatu islandzkiego na okna pałacu Luxemburskiego w Paryżu, oświetlone promieniami zachodzącego słońca, i stwierdził ze zdumieniem, że oba obrazy nie są jednakowo jasne. Obracając trzymany w ręku kryształ, podobnie jak się to czyni z jednym ze szpatów w doświadczeniu Huygensa, rys. 78 — było to zresztą rzeczą zupełnie naturalną wobec uroku, jaki przedstawia widok obu obrazów, krążących dokoła siebie — Malus spostrzegł, że jasność ich kolejno *wzrasta i maleje*. Otóż to samo zachodzi właśnie we wspomnianem doświadczeniu Huygensa; Malus stwierdził więc w ten sposób, że światło *odbite* od szkła posiada również „strony”. Aby opisać właściwości takiego promienia, wprowadził on termin „polaryzacja”, co miało znaczyć, że wchodzą tu w grę — gdy spoglądamy wzdłuż promienia — różnice tego rodzaju, jakie istnieją np. pomiędzy różnymi kierunkami, nakreślonymi na busoli: linja, łącząca „bieguny” N i S różni się od linji wschód-zachód, lub jakiegokolwiek innej. Wybór tego słowa nie był bardzo szczęśliwy, gdyż „biegunowość” oznacza raczej cechę kierunkowości, połączoną z pewną różnicą charakteru obu

„końców“: można ją zastosować np. do strzały, ale nie do... kija od portjery.

Nietrudno powtórzyć doświadczenie Malusa (tabl. XVIII B). Na fotografii tej widzimy kryształ szpatu islandzkiego w takim położeniu, iż promień zwyczajny i nadzwyczajny leżą w jednej płaszczyźnie pionowej. Na drodze promieni umieszczono szybę szklaną tak, że ewentualny promień odbity przypada w tej samej płaszczyźnie. Przekonywamy się, że promień zwyczajny ulega odbiciu, nadzwyczajny zaś nie. Promienie okazują „boki“.

Działo się to w czasie, gdy Young rozwijał swą zasadę interferencji fal i starał się zrehabilitować teorię faliową, która długi czas była usunięta w cień. Fizycy ówczesni byli stanowczymi zwolennikami korpuskularnej teorii światła, opartej na pracach Newtona, wobec czego Young spotkał się z silną opozycją. Odkrycie Malusa zwiększyło tylko kłopoty Younga, nie mógł on bowiem wytłumaczyć, w jaki sposób fale takie jak on je sobie wyobrażał, mogłyby okazywać różne „strony“. Trudność ta pochodziła stąd, iż Young nie zdołał objąć wszystkich możliwości teorii; zakładał on, że drgania świetlne są podobne do dźwiękowych, że więc odbywają się *w kierunku* rozchodzenia się układu fal. Obraz zjawisk, podany przez Younga, był oparty na przypuszczalnem zachowaniu się substancyj takich, jak stal, szkło lub woda, analogicznem do tego, co zachodzi w Tyndallovskim doświadczeniu z szeregiem хлоп-
ców. Takie ruchy nie posiadają oczywiście żadnych cech „bocznych“. Długi czas upłynął, zanim Young spostrzegł, iż trudność tę można usunąć, założywszy, że fale świetlne są *poprzeczne*. Może się to wydawać dziw-

nem, jeśli zważymy, że fale morskie posiadają właśnie ten charakter; jednakże sam fakt, że występują one jedynie na *powierzchni*, mógł wydawać się przeszkodą w zastosowaniu tego obrazu do rozchodzenia się pewnego ruchu falowego w *głębi* wody. Niewątpliwie wiele osób odczuwało lub odczuwa tę samą trudność. Jest to jeden z nieustannie zdarzających się skutków stosowania analogji.

Drgania poprzeczne w teorii Younga i Fresnela

W końcu Young znalazł wyjście. W r. 1817, 9 lat po odkryciu Malusa, pisał on do Arago: „Zastanawiałem się również nad możliwością choćby niezupełnego wyjaśnienia tej własności światła, która stanowi polaryzację, bez odrzucenia niewątpliwie słusznej teorii falowej“. Przytacza możliwość istnienia „drgań poprzecznych, rozchodzących się w kierunku promienia, przy czem ruchy cząstek odbywałyby się w pewnym kierunku stałym względem promienia. I to“ — dodaje — „byłoby właśnie polaryzacją“. Piszac to, Young nie przypuszczał jeszcze, że ruchy cząsteczek mogą zachodzić wyłącznie *prostopadle* do promienia, nie zaś w dowolnych kierunkach ukośnych względem tegoż. W każdym razie jednak uczynił wielki krok naprzód. Młody, wysoce uzdolniony inżynier francuski, Fresnel, ocenił znaczenie tej myśli i wykazał w dalszym ciągu, że może ona stać się podstawą teorii, obejmującej wszystkie zjawiska rozchodzenia się światła w kryształach, łącznie z rozdwojeniem promieni i polaryzacją. W tym bowiem czasie Fresnel był już twórcą teorii interferencji światła, którą opracował samodzielnie, nie wiedząc o tem,

że tego samego dzieła dokonał był już Young w Anglii. Uznał on jednak bez wahania pierwszeństwo Younga i bronił z zapałem jego poglądów. Oto, co pisał doń w r. 1816: „Jeśli jednak może mnie coś pocieszyć po tej utracie pierwszeństwa, to chyba tylko to, że spotkałem uczzonego, który wzbogacił fizykę tak wielką liczbą ważnych odkryć i przyczynił się równocześnie w znacznym stopniu do wzmocnienia mego zaufania do przyjętej przeze mnie teorii“. Odpowiedź Younga zawierała wyrazy równie uprzejme. Górujące znaczenie teorii falowej w XIX stuleciu było niewątpliwie w poważnej mierze dziełem połączonej pracy tych dwóch ludzi.

Od czasu, gdy zostało ustalone, że drgania świetlne są poprzeczne, teoria falowa rozwijała się w dalszym ciągu pomyślnie aż do końca ubiegłego wieku. Wykazała ona dostateczną żywotność, by sprostać licznym rozszerzeniom w nowych kierunkach; uczeni przekonywali się, że mogą się na niej opierać przy wyjaśnianiu nawet bardzo zawiłych zjawisk.

Opis tego rozwoju zaprowadziłby nas zbyt daleko od głównego naszego celu — którym jest naszkicowanie w ogólnych zarysach tej roli, jaką światło odgrywa we Wszechświecie. Zresztą, wielu działów teorii falowej nie można wyłożyć bez matematyki wyższej i powołania się na inne teorie — przedewszystkiem z dziedziny elektryczności i magnetyzmu. Powróćmy jednak do spostrzeżenia Huygensa i zobaczmy, w jaki sposób koncepcja polaryzacji poprzecznej rozwiązuje omawiane wyżej trudności. Jednocześnie zobaczymy, jak cała ta sprawa wiąże się z poglądami na budowę kryształów, poglądami, które tak bardzo rozwinęły się w la-

tach ostatnich. Przedewszystkiem podajmy nowe określenia używanych terminów.

W promieniu spolaryzowanym ruchy, czy też drgania są wszystkie równoległe do jednego kierunku, oczywiście prostopadłego do promienia. Fale morskie można nazwać spolaryzowanymi, wszystkie bowiem ruchy odbywają się w kierunku pionowym, prostopadłym do kierunków poziomych, w których rozchodzą się fale. Niema potrzeby tworzyć sobie konkretnego wyobrażenia tego „czegoś” co „porusza się” w promieniu świetlnym: wystarczy wziąć pod uwagę *ruch falowy* z towarzyszącymi mu zjawiskami interferencji i t. d.

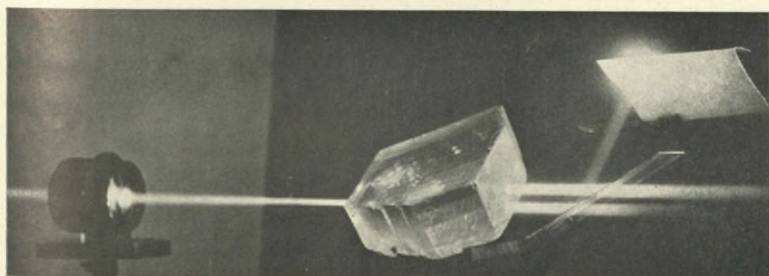
Promień niespolaryzowany, czyli *naturalny*, nie ma wyróżnionego kierunku drgań, pomijając to, że wszystkie one zachodzą prostopadle do kierunku promienia. Promienie świetlne są najczęściej niemal zupełnie wolne od polaryzacji, jakkolwiek pewien jej stopień występuje dość często, gdyż polaryzacja towarzyszy odbiciu światła. Przypominamy sobie, że oko nie może odróżnić, czy dany promień jest niespolaryzowany, czy też częściowo lub całkowicie spolaryzowany.

Przypuśćmy teraz, że promień naturalny, czyli niespolaryzowany, rozpada się, wchodząc do kryształu, na dwa promienie o jednakowem natężeniu, z których każdy jest całkowicie spolaryzowany — i że drgania w obu tych promieniach są do siebie prostopadłe. Będziemy mogli w ten sposób zdać sprawę z naszych doświadczeń. Tak na przykład w tabl. XVII A w promieniu pierwotnym zawarte są drgania poprzeczne o kierunkach dowolnych, jednakże oba promienie, wychodzące z pierwszego kryształu, musimy już uważać

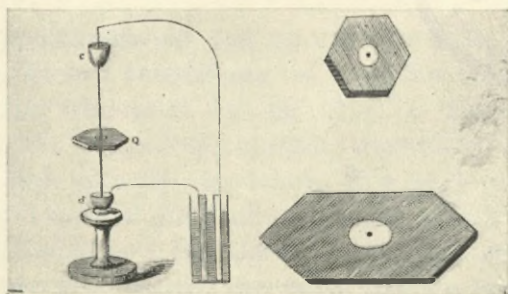
TABLICA XVIII



A. Przedmioty widziane przez graniastosłup ze szpatu islandzkiego wydają się podwojone (str. 190).



B. Kryształ szpatu islandzkiego dzieli promień pierwotny na 2 promienie. Linja, łącząca miejsca, gdzie promienie te wychodzą z kryształu, jest równoległa do dwusiecznej kąta rozwartego na odpowiedniej ścianie. Drgania świetlne w promieniu dolnym (zwykczajnym) są prostopadłe do wspomnianej linii, a zatem równoległe do szyby odbijającej. Część promieni ulega odbiciu od tej szyby, jak to widzimy na fotografii. Drgania w promieniu górnym (nadzwyczajnym, co można poznać po tem, że jest on przesunięty względem promienia padaj.), są równoległe do linii, łączącej punkty wyjścia promieni. Promień ten nie odbija się zupełnie od szyby (str. 210).



C. Rysunek załączony zaczerpnięty z książki Tyndalla „Ciepło rozpatrywane jako ruch“, str. 244. Przedstawia on doświadczenie Sênarmonta nad przewodzeniem ciepła w kryształach (str. 208, 213).



zać za spolaryzowane. Drgania promienia zwyczajnego (dolnego na rysunku — przedłużenie padającego) zachodzą w kierunku takim, że przy wejściu do drugiego szpatu niema dalszego podziału. Promień zwyczajny w pierwszym kryształ — biegnie również jako zwyczajny w drugim: drgania jego zachodzą już w odpowiednim kierunku; podobnie promień nadzwyczajny pozostaje nadzwyczajnym. Jeśli jednak umieścimy drugi kryształ w położeniu przedstawionem na rys. B tabl. XVII, wówczas drgania każdego z promieni, które wyszły z pierwszego kryształu, zachodzą w kierunkach takich, że promienie te nie mogą przejść przez drugi kryształ jako drgania o charakterze bądź to promienia zwyczajnego, bądź nadzwyczajnego: — oba owe promienie muszą ulec powtórnemu rozdzieleniu. Na rys. C tabl. XVII promień zwyczajny pierwszego kryształu staje się nadzwyczajnym dla drugiego i vice versa. Działanie pierwszego jest odwrócone przez drugi. Jeśli przypuszczenie nasze jest słuszne, omawiane zjawiska są niewątpliwie wynikiem struktury kryształu. Cóż zatem w tej strukturze może być ich przyczyną?

Polaryzacja jako wynik struktury kryształu

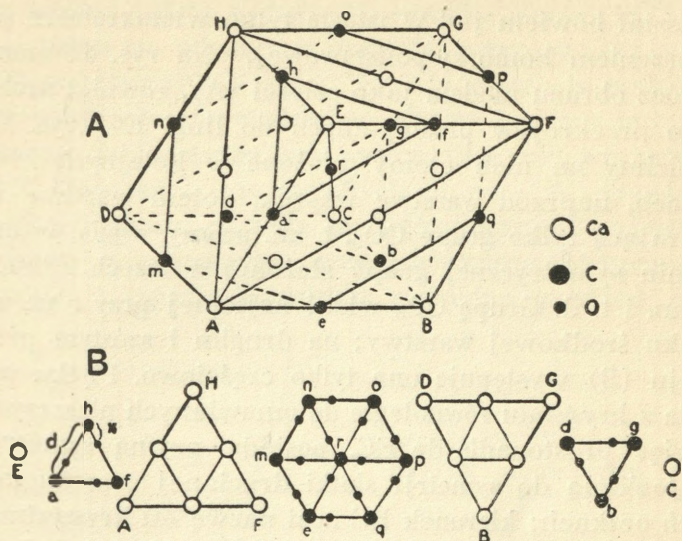
Faktem podstawowym jest uporządkowanie atomów w kryształ, czemu zawdzięcza on wszystkie swoje charakterystyczne własności. Jak się okazuje, własności te są niezmiernie rozpowszechnione, wszystkie bowiem substancje stałe okazują tendencję do przejścia w stan krystaliczny i naogół zbliżone są do tego stanu o wiele bardziej, niżby o tem świadczył ich wygląd zewnętrzny. Promienie X w bardzo znacznym stopniu rozszerzy-

ły nasze wiadomości o tym przedmiocie. Atomy i cząsteczki, z których składa się kryształ, są rozmieszczone w pewien prawidłowy sposób, zgodnie z określonym planem charakterystycznym dla danego kryształu. Po między kryształem a kawałkiem szkła istnieje podobna różnica, jak pomiędzy jakąś tkaniną lub kawałem drewna z jednej strony, a nierozciągniętym kawałkiem kauczuku z drugiej. Różne własności drewna, jak: przewodnictwo cieplne, wytrzymałość na zgniecenie lub rozerwanie, kurczenie się przy suszeniu i t. d. zależą od kierunku.

Uporządkowanie części w kryształach występuje w skali o wiele drobniejszej i nie może być zaobserwowane bezpośrednio — atomy i cząsteczki są przecież niedostrzegalnie małe. O tem, że uporządkowanie to jest prawidłowe, wnioskowano oddawna stąd, że zewnętrzna postać kryształu jest tak doskonała i tak swoista; obecnie promienie Röntgena pozwalają wyznaczyć plan uporządkowania i rozmieścić atomy w odpowiednich położeniach. Niektóre ugrupowania są bardzo proste, jak np. w soli kamiennej lub diamencie. W przytoczonych przypadkach są one nawet tak proste, że zjawisko, które staramy się w tej chwili powiązać z budową kryształu, wcale w nich nie występuje: do tego potrzebny jest pewien stopień komplikacji w budowie. W szpacie islandzkim komplikacja jest wystarczająca, a przytem posiada taki charakter, że efekt optyczny jest bardzo wybitny. Ta okoliczność oraz doskonała forma kryształów, które mogą osiągać znaczne rozmiary, są przyczyną specjalnego zainteresowania, jakie przypa-
dło w udziale szpatowi.

Na rys. 82 mamy model szpatu islandzkiego, okazu-

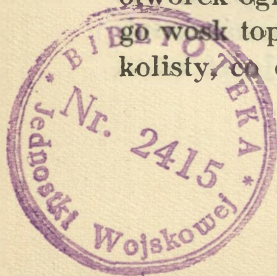
jący położenie jego atomów zgodnie z wynikami analizy röntgenowskiej. Jak w każdym kryształ, istnieje



Rys. 82. Rys. A przedstawia ugrupowanie atomów, z których zbudowany jest szpat islandzki CaCO_3 . Kółka puste oznaczają atomy wapnia, czarne — atomy węgla. Atomy tlenu opuszczono, aby nie komplikować rysunku. Rozmieszczenie atomów w kolejnych warstwach, prostopadłych do osi głównej EC , podano na rysunku B. Atomy tlenu reprezentują tu małe kółeczka czarne. Rysunki te przedstawiają tylko względne położenia atomów. Odległość pomiędzy kolejnymi warstwami w B wynosi 2,78 jednostek Angströma, nieco ponad jedną czteromilionową mm. Rozmiary i kształt atomów nie są zaznaczone na rysunku, wyznaczenie ich bowiem jest znacznie trudniejsze, niż podanie względnych położań środków atomów.

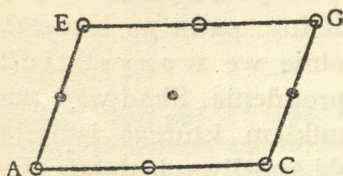
tu pewna „komórka podstawowa”; model nasz ma wymiary dostateczne, aby objąć kilka takich komórek lub jej części. W każdej komórce znajduje się jeden atom

wapnia, jeden atom węgla i trzy atomy tlenu. Model ma najwidoczniej tę samą postać, co kryształ szpatu na rys. 77; oczywiście można tego oczekiwać, duży kryształ bowiem jest w istocie tylko wielokrotnem powtórzeniem komórki podstawowej. Na rys. 82 mamy oprócz obrazu modelu jako całości (A), również szereg jego przekrojów prostopadłych do linii EC (rys. B). Widzimy na nich atomy ułożone w kolejnych warstwach, naprzód warstwę wapnia, potem warstwę zawierającą tylko grupy CO_3 , t. zn. atomy węgla, w otoczeniu symetrycznej grupy złożonej z trzech atomów tlenu, i t. d. Grupę CO_3 widać najlepiej przy r na rysunku środkowej warstwy; na drugim i szóstym przekroju (B) występuje ona tylko częściowo. Płytkę wyciętą z kryształu równolegle do omawianych płaszczyzn, a więc prostopadle do EC, posiada pewną *symetrię*, analogiczną do symetrii siatki drucianej o sześciokątnych oczkach; kierunek EC nosi nazwę *osi* kryształu ze względu na tę symetrię dokoła niego. W doświadczeniach fizycznych, wykonanych z taką płytką, wspomniana symetria ujawnia się natychmiast. Tak np. już przed wielu laty krytalograf Sénarmont mierzył przewodnictwo cieplne kwarcu metodą przedstawioną na rys. C tabl. XVIII. Kwarce, podobnie jak szpat islandzki, należy do kryształów, posiadających jedną oś symetrii, przeto liczne ich własności fizyczne są podobne. Sénarmont wyciął z kwarcu płytkę prostopadle do osi i przewiercił otworek przez środek płytki, poczem pokrył ją cienką warstewką wosku. Druć przeciągnięty przez otworek ogrzewano prądem elektrycznym, wskutek czego wosk topił się. Granica części stopionej miała kształt kolisty, co dowodzi, że ciepło rozchodziło się od drutu



jednakowo we wszystkich kierunkach. Gdy jednak użyto płytki wyciętej nie pod kątem prostym do osi, wówczas kontur części stopionej nie był kołem, lecz krzywą owalną, jak to widzimy na rysunku. Kształt tej krzywej różnił się od koła najbardziej wówczas, gdy oś leżała w płaszczyźnie płytki. Doświadczenie to pozwoliło stwierdzić, że przewodnictwo cieplne kwarcu jest największe w kierunku osi, najmniejsze zaś we wszystkich kierunkach prostopadłych do osi. W dowolnym innym kierunku posiada ono pewną wartość pośrednią.

Nawet w przypadku skomplikowanego ugrupowania atomów w szpacie islandzkim nietrudno spostrzec, o ile



Rys. 83. Ugrupowanie atomów w szpacie islandzkim w płaszczyźnie $EACQ$ (rys. 82), co odpowiada płaszczyźnie $OSTR$ rys. 77.

mniejszy jest stopień symetrii w jakiejś płaszczyźnie zawierającej oś, w porównaniu z płaszczyzną do osi prostopadłą. Rozmieszczenie atomów wapnia i węgla w płaszczyźnie zawierającej oś wskazane jest na rys. 83. Niema tu wcale symetrii sześciokątnego ugrupowania przedstawionego na rys. 82.

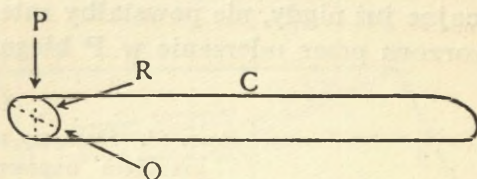
Tak więc osobliwości budowy szpatu islandzkiego — jak zresztą większości kryształów — sprawiają, że tak jego właściwości, jak i zjawiska fizyczne w nim zachodzące, zależą od wziętego pod uwagę *kierunku* w kryształcie. Widzieliśmy to na przykładzie rozchodzenia się ciepła. Otóż podstawowem zjawiskiem przy rozchodzeniu się światła w materji są drgania, na które—jakkol-

wiek odnosimy je do eteru kosmicznego — materia wywiera pewien wpływ. Można więc spodziewać się, że prędkość biegu światła w kryształach powinnaby zależeć od tego, w jakim kierunku zachodzą drgania świetlne względem kierunków charakterystycznych dla budowy kryształu. Wszystkie drgania prostopadłe do osi kryształu muszą mieć podobny charakter, tak jak w analogicznym przypadku rozchodzenia się ciepła. Skutkiem tego wszystkie promienie, w których drgania są prostopadłe do osi, rozchodzą się z tą samą prędkością. Są to właśnie Huygensowskie promienie zwyczajne. Wszystkie inne biegną z innymi prędkościami i stanowią promienie nadzwyczajne.

Gdy jednakże promień świetlny pada na kryształ, drgania jego zachodzą pierwotnie we wszystkich kierunkach prostopadłych do promienia. Skąd więc powstaje to „rozsortowanie“, skutkiem którego istnieją w kryształach tylko dwa kierunki możliwych drgań: jeden prostopadły do osi, odpowiadający promieniowi zwyczajnemu, i drugi, tworzący promień nadzwyczajny?

Odpowiedź na to pytanie brzmi podobnie, jak w wielu innych przypadkach podziału energii drgań. Przykładem posłużą nam drgania stalowego pręta. Przypuśćmy najpierw, że pręt ma przekrój kołowy. Jeśli podeprzemy go luźno w środku i uderzymy jeden z końców, pręt będzie zgiął się tam i spowrotem pewną ilość razy na sekundę, wydając odpowiedni ton: obojętną jest przytem okoliczność, z której strony uderzyliśmy pręt. Jeśli wszakże przekrój jego jest zlekka eliptyczny, mamy zjawisko bardziej skomplikowane. Pręt zgiął się wówczas łatwiej w jednym kierunku, niż w pro-

stopadłym do tamtego. Jeśli go uderzymy w P (rys. 84), od strony spłaszczonej części elipsy, otrzymamy drgania powolniejsze, niż gdy uderzenie nastąpi w kierunku prostopadłym (Q) — ton w pierwszym przypadku jest niższy niż w drugim. Przypuśćmy teraz, że uderzyliśmy w kierunku strzałki R. Pręt nie da wówczas tonu *pośredniego* między tonami poprzednio otrzymanymi, lecz *mieszanię* obu tych tonów; to właśnie chcieliśmy podkreślić. Energia drgań, udzielona prętowi przy uderzeniu w R, dzieli się natychmiast na dwie części: jed-

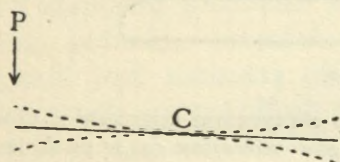


Rys. 84. Pręt stalowy o przekroju eliptycznym uderzony w Q wydaje ton wyższy, niż wówczas, gdy uderzymy go w punkcie P, leżącym na płaskiej części elipsy. Po uderzeniu w R pręt wydaje wyższy ton "Q" i niższy "P", nie zaś jakiś ton o wysokości pośredniej.

na z nich jest nagromadzona w drganiach powolniejszych, pozostała — w szybszych. Jeśli R jest bliższe P niż Q, przeważa ton niższy i vice versa.

Dźwięk, który wydaje pręt uderzony w ten sposób, powstaje wskutek prawidłowych zmian postaci pręta wzbudzających zgęszczenia i rozrzedzenia powietrza, czyli fale głosowe. Zmiany wspomniane polegają na kolejnych ruchach pręta pomiędzy dwoma położeniami, w których jest on najbardziej wygięty, jak to pokazano na rys. 85. Uderzenie w P daje ton niższy, gdyż pręt w tym przypadku łatwiej ulega zgięciu. Zaburze-

nie owo można również rozpatrywać jako falę biegnącą tam i napowrót wzdłuż pręta. Fala ta, wywołana przez uderzenie, rozchodzi się z prędkością zależną od sztywności pręta oraz od jego „masywności”. Dobiegłszy do końca pręta, fala ulega odbiciu. Ten sposób opisu drgań pręta jest równoważny poprzedniemu, jeśli należycie uwzględnimy skomplikowane zjawiska odbicia na końcach, które nie są tak proste, jak w przypadku napiętej struny. Gdyby pręt był nieskończenie długi, fala powstała z uderzenia biegłaby w nieskończoność, nie powracając już nigdy, nie powstałby zatem dźwięk. Fala wytworzona przez uderzenie w P biegnie wolniej

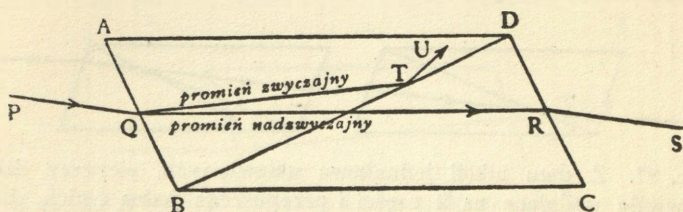


Rys. 85. Drgający pręt (rys. 84) przybiera naprzemian kształt, zaznaczony liniami przerywanymi.

niż fala wytworzona przez uderzenie w Q, a więc pozostanie w tyle za tą ostatnią.

Światło biegnące w kryształach okazuje analogiczne zjawiska. Drgania w prostolinjowej wiązce, w promieniu, zachodzą w jednym z dwóch kierunków do siebie prostopadłych, lub równocześnie w obu tych kierunkach. Istnieje w kryształach coś, co odpowiada „sztywności” pręta, tak iż oba te drgania rozchodzą się z różnymi prędkościami i jedno z nich wyprzedza pozostałe. W szpacie islandzkim owa „sztywność” jest najmniejsza dla drgań prostopadłych do osi, jest przytem jednakowa dla wszystkich drgań tego rodzaju, podobnie jak przewodnictwo cieplne w doświadczeniu Sénar-

monta (tabl. XVIII C). Wskutek tego jedno z drgań w promieniu biegnącym w dowolnym kierunku jest prostopadłe do osi — na rys. 77 jest ono prostopadłe do płaszczyzny papieru. Pozostałe drganie musi być prostopadłe do pierwszego, podobnie jak w przypadku pręta. Jeśli jest ono równoległe do osi, to rozchodzi się z największą szybkością, jaką wogóle w kryształach może posiadać; im bliższe jest równoległości, tem większą ma prędkość. Dlatego to odpowiednia powierzchnia fa-

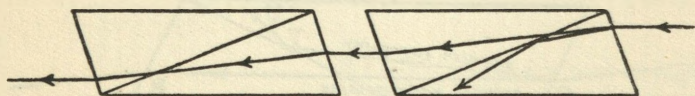


Rys. 86. Pryzmat Nicol'a (nikol). Podłużny kawałek szpatu islandzkiego, rozcięty na dwie części, skleja się balsamem kanadyjskim. Położenie przecięcia w kryształach dobrane jest w taki sposób, że tylko jeden z dwóch promieni, na które dzieli się światło padające, może przejść przez przyrząd.

lowa jest elipsoidą o kierunku osi zgodnym z osią kryształu. Drganie prostopadłe do osi biegnie natomiast z jednakową prędkością niezależnie od kierunku promienia, przeto jego powierzchnie falowe są kulami. Tak więc zagadnienie Huygensa jest rozwiązane w tem znaczeniu, że można je wyjaśnić zapomocą pojęć zaczerpniętych z dobrze znanych zjawisk i praw mechaniki.

Doświadczenia ze światłem spolaryzowanym są wielce ułatwione przy użyciu przyrządu wynalezione

przez Williama Nicola (rys. 86). Kawałek szpatu islandzkiego, przecięty na dwie części wzdłuż linii BD, skleja się ponownie balsamem kanadyjskim. Otóż światło biegnie w balsamie szybciej niż jeden z dwóch promieni w szpacie, mianowicie zwyczajny, podlegający zwykłemu prawom załamania. Przeciwnie, prędkość światła w balsamie jest mniejsza niż promienia nadzwyczajnego w szpacie. Oba promienie rozchodzą się w balsamie z tą samą prędkością: polaryzacja nie wpływa bowiem na prędkość światła w cieczy; jedynie w

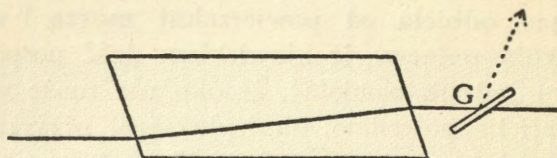


Ryc. 87. Z dwu nikoli jednakowo ustawionych, pierwszy dzieli światło padające na 2 części i przepuszcza jedną z nich, drugi nie dzieli (ponownie tego promienia, ani też go nie zatrzymuje. Jeżeli jednak obrócimy drugi nikol o 90° dokoła prostej równoległej do dłuższych krawędzi, wówczas taka para zupełnie nie przepuszcza światła.

kryształach prędkość światła zależy od orientacji kierunku drgań względem kryształu. Dzięki temu pomysłowemu urządzeniu, p. rys. 86, promień zwyczajny pada na balsam pod kątem takim, że ulega całkowitemu odbiciu (p. rys. 45), drugi promień zaś przechodzi. W pryzmacie Nicola * ulega więc pochłonięciu połowa energii promienia pierwotnego, reszta zaś wychodzi zeń jako światło spolaryzowane. Dobre kryształy szpatu są rzadkie, co sprawia, iż cena dużych nikoli jest bardzo wysoka.

* zwanym krótko nikolem (*Przyp. tłum.*)

Jeśli, jak to widzimy na rys. 87, przesyłamy promień kolejno przez dwa nikole, wówczas ilość światła przepuszczonego przez układ zależy od ustawienia pryzmatów względem siebie. Ustawmy pierwszy nikol tak, żeby drgania świetlne promienia przepuszczonego przezeń były np. równoległe do płaszczyzny rysunku; jeżeli drugi nikol umieścimy dokładnie tak samo, wówczas promień przejdzie i przez niego, bez dalszej straty natężenia. Skoro jednak obrócimy drugi nikol o 90° , będzie on całkowicie pochłaniał padający nań promień



Rys. 88. Promień spolaryzowany pada na płytkę szklaną i ulega słabemu jedynie odbiciu, przechodząc prawie w całości przez płytkę. Jeżeli jednak obrócimy płytkę (albo nikol) o 90° dookoła promienia jako osi, występuje silne odbicie. (Doświadczenie Malusa).

spolaryzowany i światło wogóle nie przejdzie przez układ. Zjawisko to mamy zilustrowane na fotografii w tabl. XIX A i B.

Z pomocą nikola można zademonstrować, dogodniej nawet niż poprzednio, polaryzację światła odbitego od powierzchni ograniczającej ciało przezroczyste.

Wiązkę światła spolaryzowanego rzucamy na płytkę szklaną G (rys. 88), poczem stopniowo obracamy nikol dookoła jego osi. Okazuje się, że gdy przecięcie główne nikola schodzi się z płaszczyzną papieru, jak na rys. 88, promień odbija się od szkła z małym natężeniem.

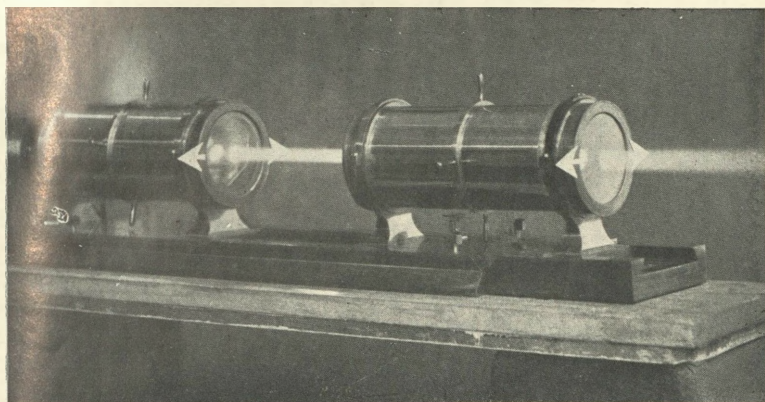
Skoro natomiast obrócimy nikol o 90° od położenia poprzedniego, odbicie staje się silniejsze. Zgodnie z naszymi wyobrażeniami o powstawaniu polaryzacji w kryształach, świadczy to, iż płytka szklana odbija światło najsilniej wówczas, gdy jego drgania są do niej *równoległe* (por. również tabl. XVIII B). Płytkę szklaną powinna tworzyć kąt około 35° z promieniem. Jest to poprostu powtórzenie doświadczenia Malusa.

Ponieważ światło odbite od powierzchni ciał przezroczystych jest w mniejszym lub większym stopniu spolaryzowane, przeto liczne, w naturalnych warunkach zachodzące, odbicia od powierzchni morza i wogóle wody czynią polaryzację zjawiskiem dość pospolitem. Należy tu jednak pamiętać, że oko nie może wykryć polaryzacji bezpośrednio; niezbędny jest przyrząd polaryzujący, jak nikol lub płytka szklana trzymana pod odpowiednim kątem. Tak np. spoglądając w określonych kierunkach na obraz, można pozbyć się przykrych odbić od szkła, patrząc przez nikol i obracając go dopóki nie zgasi tych odbić. Może się to stać dlatego, że są one spolaryzowane. Jest to jednak możliwe tylko w pewnych położeniach obserwatora względem obrazu i nie ma praktycznego znaczenia dla zwiedzających muzeum. Podobnie jest rzeczą możliwą — w niektórych przypadkach — zgasić światło odbite od powierzchni morza i zajrzeć w jego głąb. Metody tej używano niekiedy przy obserwacji z samolotu, nie jest ona jednak również praktyczna w zastosowaniu.

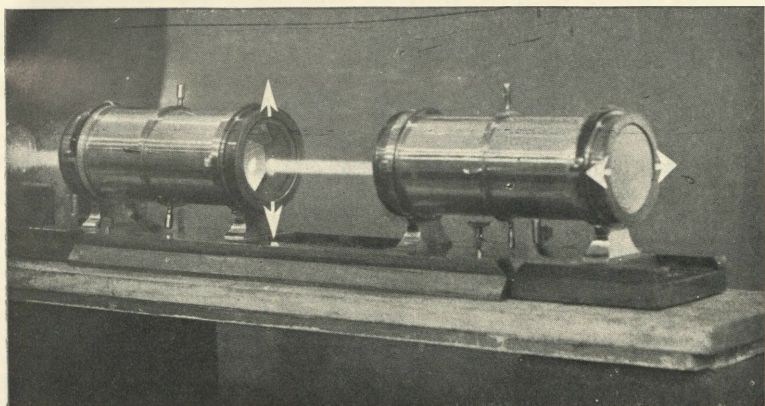
Polaryzacja światła nieba

Nadzwyczaj ciekawy przypadek polaryzacji światła, występujący w przyrodzie, przedstawia światło nieba;

TABLICA XIX

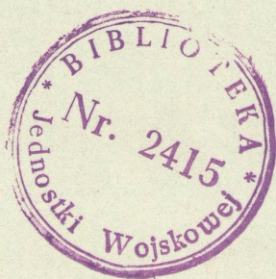


A



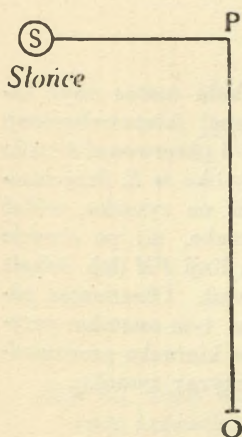
B

Promień świetlny, wychodzący z jednego nikola, przechodzi przez drugi, gdy oba są „równoległe”. Biała strzałka, przyczepiona do pryzmatów, wskazuje położenie ich przecięć głównych. Promień nie przechodzi przez drugi nikol, jeśli ustawimy go „prostopadle” do pierwszego. Bieg promieni uwidoczniono przez zadymienie powietrza (str. 215).



jest on ciekawy przedewszystkiem dlatego, że raz jeszcze przekonywa nas o przydatności teorii falowej do wyjaśniania zjawisk przyrody, powtóre zaś dlatego, iż w badaniach nad nim ujawniono wiele pomysłowości; zawdzięczamy im również kilka pięknych i efektownych doświadczeń.

Polaryzację światła nieba łatwo zaobserwować przy pomocy nikola (rys. 89). Niech S oznacza słońce, P — cząsteczkę rozpraszającą, O — oko obserwatora. Gdy

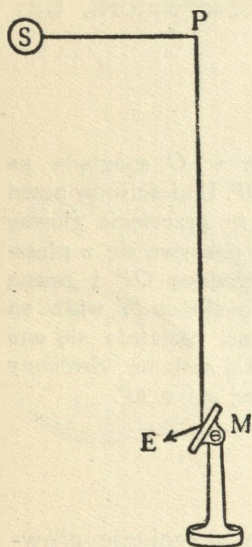


Rys. 89. Obserwator w O spogląda na niebo w kierunku OP . Umieściwszy przed okiem nikol, tak, że przecięcie główne ($ABCD$ na rys. 86) pokrywa się z płaszczyzną OPS , zawierającą OP i prostą od obserwatora do słońca S , widzi on niebo przyciemnione; rozjaśnia się ono natomiast, jeśli nikol zostanie obrócony dookoła swej osi o 90° .

trzymamy nikol w ten sposób, że jego przecięcie główne leży w płaszczyźnie SPO , niebo wydaje się ciemne, rozjaśnia się natomiast, gdy obrócimy nikol o 90° dookoła jego osi. To samo doświadczenie można oczywiście wykonać z *szybą* szklaną, nie zaś — należy o tem pamiętać — ze zwierciadłem posrebrzonym. Przy urządzeniu takim, jak na rys. 90, oko znajdujące się w E widzi odbicie nieba w zwierciadle; jeśli teraz obrócimy podstawę zwierciadła o kąt prosty, tak iż będzie ono

zwrócone „en face“ ku czytelnikowi, obraz odbity staje się ciemniejszy.

Zakładaliśmy poprzednio, że drgania światła, które przechodzi przez nikol, odbywają się w płaszczyźnie przecięcia głównego. Drgania fal, rozproszonych przez P w kierunku oka lub zwierciadła na rys. 89 i 90, są zatem prostopadłe do płaszczyzny papieru. Otóż teoria

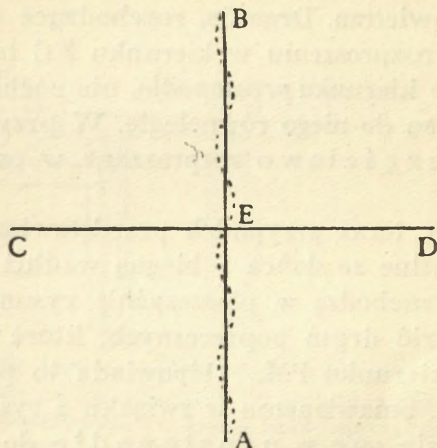


Rys. 90. Zamiast nikola można użyć kawałka szyby szklanej (nieposrebrzonej) *M* (por. tabl. XVII B) i obserwować światło odbite, umieściwszy oko w *E*. Przy ustawieniu takim, jak na rysunku, widać jaśniejszy obraz nieba, niż po obrocie zwierciadła dokoła linii *PM* (lub dokoła pionowej osi statywu). Obserwując odbicie, należałoby w tym ostatnim przypadku spoglądać w kierunku prostopadłym do płaszczyzny rysunku.

falowa prowadzi do wniosku, że tak być powinno. Spróbujmy to wyjaśnić przy pomocy analogji.

Wyobraźmy sobie dwie linki, długości około 10 metrów, związane razem w punktach środkowych, i trzymane za końce — lekko napięte — przez czterech ludzi, A, B, C i D (rys. 91). W pewnej chwili A posyła wzdłuż liny w kierunku AE szereg drgań, odbywają-

cych się w płaszczyźnie pionowej. Skoro osiągną one punkt E i węzeł zacznie poruszać się pionowo, do góry i na dół, poczynają rozchodzić się fale zarówno w kierunku EC i ED , jak i w przedłużeniu pierwotnego kierunku — do EB . Jeśli jednak A nada linie drganie *boczne*, zaznaczone krzywą kreskowaną, wówczas wzdłuż



Rys. 91. Dwie linki, związane w punkcie E , są trzymane na czterech końcach. Jeśli wzbudzimy w A drganie w płaszczyźnie rysunku (zaznaczone linią falistą), wprowi ono w ruch linkę BE , lecz pozostawi w spoczynku CD . Jeżeli natomiast drgania są prostopadłe do owej płaszczyzny, wówczas zarówno AB i CD zostaną wprawione w ruch.

EC i ED fale nie rozchodzą się, gdyż E nie może wogóle poruszać się tak, aby przesłać drgania poprzeczne wzdłuż EC i ED , chyba że drganie pierwotne wysłane z A zawiera jakąś składową pionową. W obecnym przypadku fala przechodzi częściowo poza E , w kierunku ku B , jako drganie poprzeczne, węzeł E poddaje się

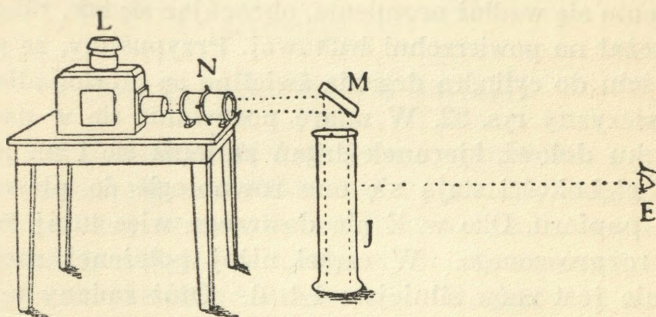
bowiem na tyle, aby przepuścić drgania ku B. W zjawisku optycznym niema oczywiście tej trudności w przejściu poza E, którą napotykamy w doświadczeniu z linami. Światło z A rozchodzi się zawsze swobodnie poza E.

Doświadczenie opisane miało na celu zilustrować rozpraszanie światła przez drobne ciała, takie jak np. cząsteczki powietrza. Drgania, rozchodzące się wzdłuż AE, ulegają rozproszeniu w kierunku EC lub ED, jeśli są do tego kierunku *prostopadłe*, nie zachodzi to natomiast, gdy są do niego *równoległe*. W przypadku pośrednim są częściowo rozpraszane w omawianych kierunkach.

Rozpatrzmy teraz przypadek przedstawiony na rys. 90. Fale świetlne ze słońca S biegną wzdłuż SP. Jeżeli drgania ich zachodzą w płaszczyźnie rysunku, to nie mogą wzbudzić drgań poprzecznych, które rozchodziłyby się w kierunku PM. Odpowiada to pierwszemu przypadkowi, omawianemu w związku z rys. 91. Jeżeli jednak drgania owe są *prostopadłe* do płaszczyzny papieru, to, spotykając rozpraszającą cząsteczkę w P, mogą wzbudzić fale poprzeczne w kierunku PM, zupełnie tak, jak się działo w doświadczeniu z linami. Promienie, biegnące wprost od słońca po linii SP, zawierają napewno fale poprzeczne wszelkich rodzajów; natomiast światło, rozchodzące się wzdłuż PM, składa się z fal, których drgania są *prostopadłe* do płaszczyzny rysunku. Światło, otrzymywane od nieba, jest zatem spolaryzowane.

Sprawy te zilustrujemy kilkoma pięknymi doświadczeniami. Światło lampy projekcyjnej, spolaryzowane przez nikol N, odbija się od posrebrzonego zwierciadła

M, ustawionego w ten sposób, że promień odbity biegnie w naczyniu J pionowo ku dołowi (rys. 92). Promień odbity jest również spolaryzowany. Przypuśćmy np., że drgania światła wychodzącego z nikola są poziome i prostopadłe do płaszczyzny rysunku; będą one miały ten sam kierunek również na swej drodze we wnętrzu cylindra J. Napełnijmy go czystą wodą, w któ-



Rys. 92. Światło latarni projekcyjnej *L*, spolaryzowane przez nikol *N*, odbija się od zwierciadła *M* do wnętrza wysokiego naczynia *J*, napełnionego cieczą, w której unosi się subtelna zawiesina. Natężenie światła rozproszonego zależy od kierunku rozproszenia, co objaśniono w tekście.

rej znajduje się odrobina żywicy w postaci zawiesiny złożonej z drobniuchnych ziarenek. Te ostatnie rozpraszają światło niejednakowo w różnych kierunkach. Dla oka umieszczonego w *E* w płaszczyźnie rysunku cylinder będzie wydawał się jasno oświetlony. Jeśli jednak obserwator obejdzie go dokoła i spojrzy nań z boku tak, jak czytelnik patrzy na ten rysunek, wówczas naczynie wydaje się ciemne. Taka sama zmiana następuje, gdy obserwator stoi w miejscu, a obracamy nikol. Jeżeli doświadczeniu przyglądają się jednocześnie

różni obserwatorowie z różnych stron, wówczas jednym naczynie wydaje się jasne, innym ciemne.

Uderzające to zjawisko w nieco zmienionem wykonaniu staje się niepospolicie piękne. W cylindrze rozpuszczamy pewną ilość cukru. Cukier, podobnie jak liczne inne substancje, wywiera zarówno w stanie stałym, jak i w roztworze, ciekawy wpływ na światło spolaryzowane, przechodzące przezeń: kierunek drgań zmienia się wzdłuż promienia, obracając się tak, jakgdyby leżał na powierzchni śrubowej. Przypuśćmy, że przy wejściu do cylindra drgania świetlne są prostopadłe do płaszczyzny rys. 92. W miarę posuwania się w naczyniu ku dołowi, kierunek drgań zmienia się i na pewnej głębokości stają się one równoległe do płaszczyzny papieru. Oko w E nie dostrzega więc tutaj światła rozproszonego. W części niżej położonej rozpraszanie jest znów silniejsze i t. d. Otóż zmiany te zachodzą w odstępach zależnych od długości fali, przy czem drgania światła niebieskiego „skręcają się“ o wiele szybciej, niż światła czerwonego — dzięki temu cylinder zdaje się wypełniony wspaniałą mieszaniną barw, o natężeniu tem większem, im głębsza jest dana warstwa. Umieszczając płytkę kwarcową w drodze promieni pomiędzy nikolem a naczyniem, sprawiamy, iż żywe barwy pojawiają się w niem od samego wierzchu. Płytką taką bowiem, wyciętą prostopadłe do osi kryształu, posiada, podobnie jak cukier, zdolność skręcania kierunku drgań; ustawienie jej zatem rozdziela rozmaite długości fali już odrazu przy wejściu do naczynia.

ROZDZIAŁ VII

ŚWIATŁO SŁOŃCA I GWIAZD

GWIAZDY wydają się nam jasnymi punktami, poruszającymi się—wszystkie razem—po sklepieniu niebieskiem. Astronomowie dawno już udowodnili, że ruch ten świadczy nie tyle o rzeczywistych ich ruchach, co raczej o obrocie ziemi dookoła osi. Długotrwałe subtelne obserwacje wykazują, że gwiazdy przesuwają się nieco względem siebie, jednakże przesunięcia te są tak nieznaczne iż kształt gwiazdozbiorów nie zmienił się od czasów, gdy ludzie opisali je po raz pierwszy. W ciągu ostatnich stu lat umiejętność odczytywania wieści, które przynosi nam światło, rozwinęła się ogromnie. Jesteśmy teraz w „bliskim kontakcie“ z gwiazdami. Nie są już one dla nas tylko chaosem jasnych punkci-ków, bezładnie rozsianych po niebie; ani nawet rojem słońc, świecących jak nasze i rozproszonych w głębinach przestrzeni. Stały się one dla nas częścią żywego Wszechświata, podobnie, jak jest nią nasz układ słoneczny. Umiemy mierzyć ich odległości, masy, jasności, badać ich ruchy i budowę, a nawet określić w zarysie zarówno minione, jak przyszłe ich dzieje. Nasz świat

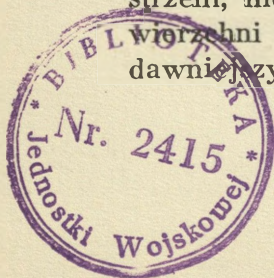
wiedzy i spostrzeżeń rozszerzył się nagle, my zaś zaczynamy pojmować rządzące nim prawa.

Astronomja, nauka, której początki sięgają odległej starożytności, zajmowała się w wiekach ubiegłych niemal wyłącznie obserwacjami *położeń* ciał niebieskich. Posługując się biegiem promieni świetlnych przy pomiarze kątów, wyznaczano w ten sposób pozorne ruchy słońca, księżyca i gwiazd na sklepieniu niebieskiem.

Ogromny rozwój wiedzy astronomicznej w ciągu stu lat ostatnich ma swój początek w badaniu *światła* ciał niebieskich jako takiego, a nie tylko w badaniu *kierunku*, skąd ono przychodzi. Jakość i natężenie światła słonecznego charakteryzuje naturę i fizyczne właściwości źródła; studjowanie tych cech światła daje nam nowe środki badania, a jednocześnie otwiera nowe możliwości dla tych metod, które stosowane były od tak dawna.

Odległości gwiazd

Obserwacje dawniejsze umożliwiały wyznaczenie *odległości* niektórych przynajmniej ciał niebieskich. Pomiarzy takie są niezmiernie interesujące i ważne: zawsze przecież wzbudza podziw fakt, że gwiazdy nie są jedynie jasnymi punktami na wielkiej sferze, której środek stanowi ziemia, lecz bryłami podobnymi do słońca pod względem rozmiarów, temperatury i innych właściwości, rozszaniami w ogromnych obszarach przestrzeni, nie zaś ograniczonymi do jednej jedynej powierzchni sfery niebieskiej. Dlatego to jednym z najdawniejszych usiłowań astronomów było wyznaczanie

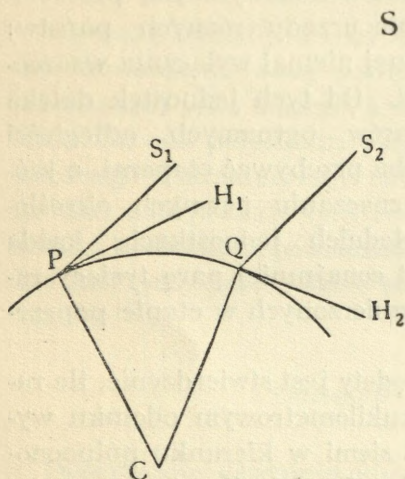


odległości; do dziś pozostaje ono jednym z najmozolniejszych jego zadań.

Przedewszystkiem niezbędny jest wybór *jednostki długości*. Pomiar odległości polega na porównaniu jej z pewną jednostką wzorcową, przyczem ta ostatnia musi zresztą nadawać się do celów astronoma. Podstawą wszelkich pomiarów długości są sztaby metalowe, wykonane i przechowywane z nadzwyczajną pieczołowitością przez odpowiednie urzędy różnych państw; w użyciu są w chwili obecnej niemal wyłącznie wzorcowy metr i wzorcowy yard. Od tych jednostek daleka jeszcze droga do pomiarów ogromnych odległości gwiazdnych. Drogę tę trzeba przebywać etapami, z których każdy polega na wyznaczaniu pewnych określonych odległości w odpowiednich jednostkach; każda wspomniana odległość jest conajmniej parę tysięcy razy większa od odległości zmierzonych w etapie poprzednim.

Pierwszem zadaniem geodety jest stwierdzenie, ile razy metr mieści się w kilkukilometrowym odcinku wytyczonym na powierzchni ziemi w kierunku północno-południowym. Na obu końcach tej linii astronom ustawia swe teleskopy i mierzy różnicę szerokości geograficznej pomiędzy danymi punktami. Mógłby on np. obrać do tego celu gwiazdę, która w pewnej chwili znajduje się dokładnie w stronie południowej dla obu obserwatorów, ku której więc jest skierowana wytyczona linja. W owej chwili należałoby w obu obserwatorjach wyznaczyć wysokość gwiazdy nad horyzontem, wyrażoną w stopniach; różnica dwóch otrzymanych w ten sposób kątów jest właśnie różnicą szeroko-

ści geograficznej. Gdyby ziemia była płaska, różnica ta równałaby się zeru, ponieważ kierunek horyzontu byłby w obu miejscach ten sam, gwiazda zaś jest przecież tak niezmiernie odległa. Obserwowana w rzeczywistości różnica zależy od zakrzywienia powierzchni ziemi i może być wykorzystana do pomiaru tej krzywizny.



Rys. 93. Obserwator w P widzi horyzont w kierunku PH_1 . Kąt S_1PH_1 jest wysokością kątową gwiazdy S nad horyzontem. Podobnie SQ_2H_2 jest wysokością kątową tej samej gwiazdy, obserwowanej w Q . Różnica pomiędzy tymi dwoma kątami równa się kątowi PCQ , będącemu różnicą szerokości geograficznych obu obserwatorów.

Jeśli zatem P , Q (rys. 93) oznaczają wspomniane dwa punkty na powierzchni ziemi, PS_1 i QS_2 — kierunki ku gwiazdzie S (praktycznie rzecz biorąc, linie te są równoległe), nadto PH_1 i QH_2 — kierunki poziome w P i Q , wówczas różnica pomiędzy dwoma mierzonymi kątami S_1PH_1 i S_2QH_2 jest równą kątowi pomiędzy PH_1 i QH_1 , t. zn. kątowi pomiędzy liniami poprowadzonymi z P i Q do środka ziemi. W ten sposób znamy już PQ i kąt PCQ , skąd otrzymujemy PC — długość promienia ziemskiego. Ziemia nie jest dokładną kulą, lecz

elipsoidą. Promień przechodzący przez biegun ma długość 6357 km, promień równika jest o 21 km dłuższy.

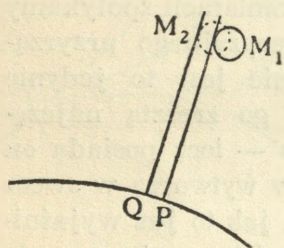
Jest to zakończenie drugiego etapu: ziemia sama staje się teraz podstawą (bazą) dla pomiarów odległości większych; obecnie bowiem, gdy rozmiary i kształt jej są znane, można obliczyć rzeczywistą odległość dwóch dowolnych punktów jej powierzchni na podstawie pomiarów szerokości i długości geograficznej — pomiarów, które mogą być uskutecznione wyłącznie przy pomocy teleskopu i zegara. Nie jest więc rzeczą konieczną mierzenie tej odległości krok za krokiem za pomocą przykładania podziałki metrowej.

W tych i innych analogicznych pomiarach spotykamy się z użyciem teleskopu, jako precyzyjnego przyrządu mierniczego. Dla astronoma nie jest to jedynie przyrząd „powiększający” — jak go zresztą najczęściej używa większość spośród nas — lecz posiada on znaczenie o wiele szersze. Obiektyw wytwarza w swym ognisku obraz pewnej części nieba, jak to już wyjaśniliśmy w rozdz. II. Również w ognisku umieszcza się w odpowiednich odstępach szereg cieniutkich drucików lub nici pajęczych, tak iż oko widzi przez okular jednocześnie zarówno obraz nieba, jak i owe nici. Teleskop można odpowiednio skierować tak, aby obraz gwiazdy czy innego badanego przedmiotu schodził się z jedną z nici. Potem nastawiamy teleskop w ten sposób, że obraz innej jakiejś gwiazdy przypada na tej samej nitce, i potrzebny do tego obrót teleskopu wyznaczamy przy pomocy przytwierdzonych do niego podziałek kątowych. Przy innych obserwacjach teleskop można pozostawić nieruchomy, obserwator zaś śledzi pozorny ruch gwiazd, dopóki inna badana gwiazda nie

przejdzie przez tę samą nitkę. W ten sposób wchodzi tu w grę okres obrotu ziemi. Obserwacje takie ulegały stopniowym ulepszeniom w ciągu stuleci i osiągnęły obecnie wysoki stopień dokładności, co pozwala astronomom rozciągać pomiary na coraz bardziej odległe obszary przestrzeni.

Następnym etapem jest pomiar odległości księżyca i słońca; ten ostatni pomiar jest konieczny dla posunięcia się jeszcze dalej w omawianych badaniach. Je-

.S



Rys. 94. Dla obserwatora w P gwiazda S ulega zakryciu przez księżyc gdy ten ostatni znajduje się w położeniu M_1 ; w Q zakrycie zachodzi, gdy księżyc znajdzie się w M_2 . Odległość M_1M_2 jest równa znanej odległości PQ . Stąd można wyznaczyć prędkość ruchu księżyca.

żeli w dwóch odległych punktach powierzchni ziemi wyznaczymy chwilę, w której księżyc mija pewien określony punkt nieba, np. jakąś gwiazdę lub brzeg słońca podczas zaćmienia, to jest wówczas rzeczą możliwą obliczenie odległości księżyca od ziemi. Pomiarzy takie dają bowiem prędkość ruchu księżyca, zupełnie tak samo, jak prędkość samochodu można wyznaczyć z notatek o czasie przejazdu, sporządzonych przez dwóch policjantów, znajdujących się w znanej odległości od siebie.

Na rys. 94 linie PM_1 i QM_2 są równoległe — jeżeli są nimi tylko w przybliżeniu, to można wprowadzić od-

powiednią poprawkę — wobec czego $M_1 M_2$ jest równe PQ_1 , t. j. wiadomej odległości na powierzchni ziemi. Znając więc w ten sposób prędkość ruchu księżycy oraz czas całkowitego obiegu dokoła ziemi, można natychmiast obliczyć promień orbity.

W podobny sposób — jakkolwiek obliczenia nie są tak proste — wyznaczono odległość słońca od ziemi na podstawie obserwacji chwil, w których Wenus zdaje się wchodzić na tarczę słoneczną lub z niej schodzić, albo na podstawie pomiarów położen pozornych planetoidy Erosa * na sferze niebieskiej, przyczem spostrzeżenia te są wykonywane w odległych od siebie obserwatoriach. Różnice obserwowane są nader małe; nawet jeśliby astronomowie umieszcili się na dwóch przeciwległych „krańcach“ ziemi i gdyby mogli w tych warunkach dokonać dobrych spostrzeżeń, różnica czasu w przypadku Wenusy nie przekraczałaby pięciu minut.

W ten sposób otrzymano jako wartość promienia orbity ziemskiej blisko 150 milionów km; astronomowie zdobyli „bazę“, z której zdołali dokonać ostatniego „skoku“ w przestrzenie międzygwiazdowe.

Z wartości takiej „bazy“ dla wyznaczania względnych ruchów ziemi oraz gwiazd zdawano sobie sprawę oddawna, na długo przedtem, zanim można było posłużyć się nią w konkretnym rachunku. W prostej analogii, podanej przez Jeansa **, dziecku, bujającemu się na huśtawce, wydaje się, że otaczające je bliższe przedmioty poruszają się tam i napowrót na tle utworzonym przez przedmioty bardziej odległe. Podobnie i dla obserwatora ziemskiego niektóre gwiazdy powin-

* Tekst uzgodniono w tem miejscu z rzeczywistością (*Przyp. tłum.*).

** „Wszechświat“, (przekład polski w nakł. „Mathesis Polskiej“).

ny poruszać się tam i spowrotem względem innych, zgodnie z krążeniem ziemi po jej orbicie dookoła słońca. Ruchy takie udało się istotnie stwierdzić po raz pierwszy dopiero w r. 1838, a to z tego powodu, iż są one niezmiernie drobne, o wiele mniejsze, niż oczekiwano, i niemożliwe do wykrycia przy pomocy dawniejszych, stosunkowo niedoskonałych instrumentów. W roku wspomnianym stwierdzono, że trzy gwiazdy: 61 Łabędzia, α Centaura i α Lutni wykonywają na tle sfery niebieskiej ruchy, które, aczkolwiek niezmiernie małe, są niewątpliwie realne. Gwiazdy te są tak odległe od nas, że światło biegnie od nich do ziemi w ciągu kilku lat: np. od α Centaura przez 4,31 lat. Najlepiej można sobie uprzytomnić ogrom tej odległości, gdy porównamy ten czas z 500 sekundami, które zużywa światło na przebycie 150 milionów km, dzielących nas od słońca.

Opisaną metodą zdołano wyznaczyć odległości jedynie niewielu najbliższych gwiazd. Pozostałe są tak daleko, że najlepsze nawet teleskopy nie pozwalają dostrzec żadnej różnicy w ich położeniu przy obserwacji z dwóch przeciwległych punktów orbity ziemskiej. Jest rzeczą zdumiewającą, że tak wiele zdołano użyć nawet dla tej nielicznej grupy gwiazd najbliższych, gdyż — by użyć liczby okrągłej — są one od nas *miljon* razy bardziej odległe niż bliższe planety. Astronomowie wyrażają te odległości w „*latach świetlnych*”.

Prędkość światła

Nie zajmowaliśmy się dotychczas liczbową wartością prędkości światła, żadne bowiem z omawianych wyżej zjawisk od wartości tej nie zależy. Obecnie jed-

nak musimy sobie wytworzyć o niej pewne pojęcie, jeżeli wyrażenie „rok świetlny“ ma mieć dla nas jakieś określone znaczenie.

Czas, w ciągu którego światło przebiega jakąś oznaczoną odległość na powierzchni ziemi, jest tak krótki, że można go wykryć jedynie przy pomocy nader precyzyjnych przyrządów: już Galileusz próbował wykonać takie doświadczenie, lecz bez powodzenia. Niema więc w tem nic dziwnego, że w pierwszych pomiarach, które w istocie dostarczyły po raz pierwszy dowodu, iż światło rozchodzi się z o k r e ś l o n ą prędkością, wykorzystano drogę o długości 300 miljonów km, t. j. średnicę orbity ziemskiej.

Jak głosi często przytaczane opowiadanie, Olaf Römer obserwował w Paryżu w drugiej połowie XVII wieku czasy zaćmień księżyców Jowisza w cieniu jego bryły, i obliczył z szeregu obserwacyj średni okres obiegu każdego księżycy. Okazało się przytem, że gdy ziemia i Jowisz znajdowały się w możliwie najmniejszej odległości wzajemnej, każde zaćmienie zachodziło około 8 minut *przed* terminem obliczonym na podstawie wartości średnich. Natomiast przy największej odległości obu planet od siebie, każde zaćmienie *opóźniało się* o 8 minut. Römer wysnuł stąd słuszny wniosek, że owe odstępstwa od wyników rachunku pochodzą stąd, że światło wymaga pewnego czasu na przebycie średnicy orbity ziemskiej. Nietrudno obmyśleć tu prostą analogję. Wyobraźmy sobie angielskiego finansistę, który stale otrzymuje co tydzień list z Australji, zawsze przesyłany mu pod jego rzeczywistym adresem w danej chwili. Jeśli ów finansista ma zwyczaj podróżować stale tam i spowrotem pomiędzy Londynem i Du-

blinem, to w Londynie otrzyma list przed upływem przeciętnego terminu, w Dublinie natomiast z opóźnieniem; różnica pomiędzy trwaniem podróży listu z Australji do Londynu i do Dublina równa jest czasowi podróży listu pomiędzy temi dwoma miastami. Wobec tego, ponieważ światło zużywa blisko 1000 sekund na przebycie średnicy orbity ziemi, ocenionej na 300 milionów kilometrów, przeto prędkość światła musi wynosić *300 tysięcy km na sekundę*.

Istnieją również inne metody wyznaczania tej wartości; obecnie znamy ją bardzo dokładnie. Z tą samą szybkością rozchodzą się wszelkie fale w eterze kosmicznym; w ciałach przezroczystych takich, jak szkło lub woda, prędkość ta jest nieco mniejsza, a w powietrzu tylko odrobinę mniejsza od wartości przytoczonej. Często cytuje się fakt, że dzięki tej ogromnej prędkości muzyka transmitowana przez radjo dociera do odległych krajów na falach eteru wcześniej, niż zdoła osiągnąć przeciwległego końca sali koncertowej — w postaci fal głosowych w powietrzu.

W omawianych wyżej pomiarach odległości gwiazdnych światło służy tylko do wyznaczania kierunku. Do tego celu używano go od tysięcy lat, aczkolwiek przed wynalezieniem przez Galileusza teleskopu spełniało to zadanie może niezbyt dokładnie. I obecnie jeszcze ciągle udoskonalenia teleskopów zwiększają dokładność pomiarów kątowych, a tem samem wartość obserwacyj położenia ciał niemieskich. Z drugiej strony jednak istnieje zupełnie nowa gałąź nauki, która analizuje *jakość* światła dochodzącego do nas od gwiazd i pozwala wysnuć stąd wnioski dotyczące ich przyrody i ruchów.

Analiza światła gwiazd

Pierwszym krokiem ku rozszerzeniu naszej wiedzy w tym nowym kierunku jest zastosowanie pryzmatu lub siatki dyfrakcyjnej do analizy światła gwiazdy. Spotykamy tu zawsze te same barwy widmowe, rozciągające się od czerwieni do fioletu, gdyż wzrok nasz dostrzega te jedynie promieniowania z całego ich zespołu, wysyłanego przez każdą gwiazdę. Jasność wszakże różnych części widma nie jest jednakowa u różnych gwiazd: gwiazda niebieskawa jest zawsze gorętsza od czerwonej. Istotnie, temperaturę gwiazd można wyznaczyć z położenia w widmie miejsca o największem „natężeniu“. Opiera się to na godnem uwagi prawie przyrody, zgodnie z którym rodzaj światła, wysyłanego przez jakąś substancję, zależy jedynie — z wyjątkiem pewnych specjalnych przypadków — od temperatury, nie zaś od natury tej substancji. Tak np., patrząc na zagłębienie, utworzone w palenisku z kawałków węgla, a więc będące jakby rodzajem rozpalonej do czerwoności „groty“ o małym otworze, w której wszystko ma tę samą wysoką temperaturę, — nie widzimy zarysów leżących wewnątrz kawałków węgla, jak nie widzieliśmy kawałków metalu czy porcelany, jeśliby znajdowały się one wewnątrz owej „jaskini“ i przybrały już temperaturę paleniska. Węgiel, metal i porcelana wysyłają w tej samej temperaturze promienie tej samej jakości, niepodobna ich przeto odróżnić od siebie. W piecu, w którym wskutek zastosowania miecha panuje temperatura wyższa, „jakość“ światła jest różna od jakości światła, pochodzącego ze zwykłego paleniska węglowego: jest ono bielsze, ponieważ

miejsce największego natężenia w widmie przesunęło się w stronę niebieskiego krańca widma i więcej promieni niebieskich wchodzi do naszego oka. Gdyby można było osiągnąć temperaturę 6000°C , światło pieca byłoby identyczne ze światłem dziennym, gdyż tyle wynosi w przybliżeniu temperatura słońca. Niektóre gwiazdy są jeszcze gorętsze i stosunkowe natężenie promieni niebieskich jest u nich jeszcze większe. A zatem o temperaturze gwiazd możemy wnioskować z charakteru jej widma, t. zn. ze względnego rozkładu energii na różne długości fali. Opiera się to na uprzednim zbadaniu w laboratorjach zależności pomiędzy „jakością” widma a temperaturą źródła światła. Jednakże temperatury, osiągane w pracowniach, są o wiele niższe od temperatur gorętszych gwiazd, a przeto w pomiarach temperatur gwiazdowych tkwi pewna doza niepewności. Musimy tu bowiem założyć, że prawo słuszne dla „laboratoryjnego” zakresu temperatur stosuje się również poza granicami, w których zostało sprawdzone bezpośrednimi doświadczeniami. Przykłady widm gwiazdowych podano na tabl. XX A.

Omawiany związek między temperaturą a jakością widma można zilustrować nader prostym doświadczeniem. Rzucamy na ekran widmo łuku elektrycznego i przerywamy prąd. Wraz z przygasaniem rozżarzonych węgli i spadkiem ich temperatury zanika i widmo, lecz najpierw ginie błękit, czerwien zaś naostatku.

Analiza widmowa gwiazd

Bliższe badanie widma gwiazdy pozwala wysnuć szereg wniosków dotyczących jej przyrody. Analiza

światła przez pryzmat okazuje, że widmo to — jeśli pominąć wpływ wyższej temperatury — jest podobne do widma dowolnej innej rozżarzonej bryły, jak np. węgla w lampie łukowej: z jednym wszakże ważnym wyjątkiem. W widmie gwiazdy *brak* pewnej liczby dokładnie oznaczonych, w ogólności niezmiernie wąskich zakresów długości fali.

Podobne przypadki absorbcji promieniowania spotkał się już poprzednio, gdy była mowa o powstawaniu barw. Różnica w obecnym przypadku polega na tem, że „luki“ w widmie są tak ostro i dokładnie zaznaczone oraz zazwyczaj tak liczne. Ilustrację tych specjalnych właściwości widzimy na fotografiach tabl. XX A.

Wyjaśnienie omawianego stanu rzeczy jest nader łatwe: opiera się ono na analogjach stosowanych już poprzednio, mianowicie na porównaniu z widełkami strojowymi, tudzież z odbiornikami radjowymi. Musimy jedynie rozpatrzeć teraz nieco dokładniej te porównania, chodzi bowiem o to, aby zdawać sobie sprawę z ważnego związku, jaki istnieje pomiędzy nadajnikiem a odbiornikiem w przypadku różnych rodzajów promieniowania, dźwięku, fal radjowych i światła.

Punkt pierwszy jest nader prosty. Pojedynczy kamerton wydaje ton bardzo czysty — innemi słowy, dźwięk jego składa się z fal powietrznych o pewnej ściśle oznaczonej częstotliwości. Te fale głosowe rozchodzą się we wszystkich kierunkach. Jeśli w jakimś miejscu napotkają inny kamerton o dokładnie tym samym „stroju“, to wprawia go w ruch i oczywiście zużyją na to pewną ilość energji. A zatem dźwięk rozchodzący się w owym kierunku ulegnie osłabieniu: innemi słowy, mamy tu

przypadek a b s o r b c j i. Strata owa nie zostanie wyrównana przez dźwięczenie drugiego kamertonu, gdyż wysyła on swe fale również na wszystkie strony, nie może więc pokryć całej straty w kierunku rozważanym; jak widzieliśmy wyżej, na tem polega pochłanianie światła i powstawanie barw. Podkreślmy tu fakt, że układ nadawczy i odbiorczy są nastrojone na ten sam „ton“. Zupełnie podobnie, rozgłośnia radjowa wysyła fale dokładnie „nastrojone“ w pewnym wąskim zakresie długości fali; gdyby nie zwracać na to uwagi, transmisja radjofoniczna byłaby niemożliwa. Jeśli odbiornik może być dokładnie dostrojony do tej samej częstości, wówczas będzie on absorbował część energii wysyłanej przez stację centralną, której energia ulega wskutek tego zmniejszeniu. Radjoodbiornik może również wysyłać energję, przynajmniej w niewielkich ilościach; emituje on wówczas fale o dokładnie tej samej częstości, co stacja nadawcza, na którą odpowiada. Pewne odbiorniki można stroić, jak wiadomo, bardzo „ostro“; jeżeli radjostacja wysyła fale o częstości bardzo zbliżonej do ich własnej, wówczas odbiorniki takie odpowiadają tylko przy bardzo starannem „dostrojeniu“, lecz reagują wówczas z wielkiem natężeniem.

W podobny sposób atom może być wprowadzony w drgania przez ogrzanie ciała, w którego skład wchodzi. Gdy emitowane przezeń promieniowanie napotka atomy, zdolne do drgania z tą samą częstością — lub z *temi samemi częstościami* — wówczas energia tego promieniowania ulega częściowemu pochłonięciu i rozchodzi się dalej osłabiona. I tutaj ważną rolę odgrywa dokładność nastrojenia. Atom odosobniony, nie podlegający wpływom, wywieranym przez atomy sąsiednie,

można porównać z dobrym radjoodbiornikiem: drgania jego zawierają się w bardzo wąskim przedziale częstości drgań, lub lepiej: przedziałach, atom bowiem należałoby porównać raczej z dzwonem lub struną skrzypcową, niż z kamertonem. Ten ostatni wyróżnia się budową niezmiernie prostą — wysyła on niemal wyłącznie jeden ton; natomiast dzwon, struna i atom wysyłają jednocześnie pewną ilość „tonów”. Każdy z nich jednak jest nader ściśle określony i można dostroić się doń bardzo dokładnie. Ta ostrość dostrojenia jest charakterystyczna dla atomów gazu, gdyż w gazie są one prawie stale *niezależne* od siebie; zachodzą wprawdzie zderzenia, lecz przeciąg czasu, w ciągu którego odległość między atomami jest tak mała, iż mogą one wywierać wzajemnie wpływ na swe drgania, jest krótki. Zbiór atomów gazu, emitujących promieniowanie, przypomina więc dobrą stację radiową nadawczą; są one natomiast analogiczne do dobrego, czyli „selektywnego” radjoaparatu, gdy to promieniowanie „odbierają”.

Jeśli więc promień świetlny, zawierający wszelkie częstości, przechodzi poprzez tłum takich „selektywnych” atomów, wówczas występuje „ostra” absorbcja, usunięcie określonych częstości, i w widmie pojawia się szereg wąskich przerw, jak to widzimy na tabl. XX A. Gaz emitujący wysyła promieniowanie o częstościach tych samych, które pochłania. Okazuje to rys. B tabl. XX.

Widmo słońca

Widmo słoneczne okazuje olbrzymią ilość owych wąskich przerw, czyli „linij”, „prążków”, jak się je

zwykle nazywa. Jeżeli ogrzejemy różne substancje, jak żelazo, wapń i t. d. do tak wysokich temperatur, by przeszły one w stan świecących par, wówczas każda z nich emituje światło złożone z pewnej liczby ściśle określonych częstości drgań. Otóż wszystkie te linje można odnaleźć w widmie słońca. Stąd wypływa oczywisty wniosek, że światło słoneczne musiało gdzieś przejść przez chmury, złożone z odpowiednich atomów; co się tyczy substancyj takich, jak żelazo lub wapń — a zresztą i większości innych pierwiastków — musiało się to zdarzyć właśnie na słońcu, gdyż nigdzie pozatem na drodze promienia nie panuje temperatura dostatecznie wysoka, by przeprowadzić te substancje w stan świecącej pary. Jeżeli więc poddamy analizie widma słońca, gwiazd i innych świecących ciał niebieskich i porównamy je z widmami emitowanymi w laboratorium przez świecące pary różnych pierwiastków, to natychmiast można przekonać się, czy pierwiastki te istnieją na badanych ciałach niebieskich. Badania te przeprowadzone na większą skalę początkowo dzięki entuzjazmowi Hugginsa, Lockyera i innych uczonych współczesnych zyskały później na znaczeniu, przekonano się bowiem, że chodzi tu o coś niepomrotnie ważniejszego, niż o prostą odpowiedniość pomiędzy położeniami określonych częstości drgań w widmach obu typów. Częstości drgań charakterystyczne dla każdego pierwiastka zależą od warunków, w jakich się on znajduje: atom może być pozbawiony jednego lub wielu spośród swych elektronów, każda zaś taka zmiana zmienia jego „tony“. Ów stan atomu zależy od temperatury i gęstości gazu, w ten sposób więc analiza widma gwiazdy pozwala wysnuwać wnioski dotyczące zarów-

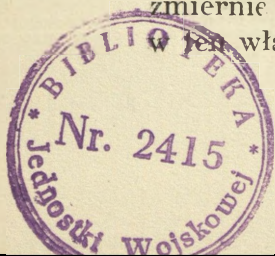
no składu chemicznego materji gwiazdy, jak i jej stanu fizycznego.

Pierwiastki, istniejące na ziemi, wykryto również na gwiazdach. W jednym przypadku, który stał się sławny, istnienie pierwiastka zostało wykazane przez Lockyera w związku z badaniami nad widmem słońca *zanim* jeszcze pierwiastek ten otrzymano w laboratorium. Stwierdzono mianowicie, iż pewne wybitne prążki widma słonecznego nie odpowiadają żadnej ze znanych podówczas substancyj. Lockyer wysnuł więc wniosek, iż istnieje nowy pierwiastek, który nazwał „*helem*“. Dopiero w wiele lat później udało się go wydobyć z kleweitu i innych minerałów. Obecnie hel jest dobrze znany, jako najlepszy gaz do napełniania balonów, jest on bowiem niewiele cięższy od wodoru, a przytem niepalny. Dla badacza hel stanowi obiekt bardzo interesujący, gdyż cząstki α , wysyłane przez substancje promieniotwórcze, są właśnie atomami helu. Dzięki swej olbrzymiej prędkości cząstki α mogą wdzierać się do innych atomów aż do samego jądra, które niekiedy ulega przytem rozbiciu i które zazwyczaj odchyła je z prostolinijnego ich biegu. Badania tych zjawisk stały się podstawą nowoczesnych teoryj atomistycznych, gdyż w rękach Rutherforda i jego współpracowników ugruntowały jądrową teorię budowy atomu oraz to wszystko, co się na teorii tej opiera.

Wyłania się tu ważne zagadnienie, na które musimy znaleźć odpowiedź. Założyliśmy, że słońce wysyła promieniowanie, które dałoby całkowite widmo („*ciągłe*“), gdyby nie to, że na swej drodze do nas musiało przejść przez atmosferę słońca, zawierającą rozmaite pierwia-

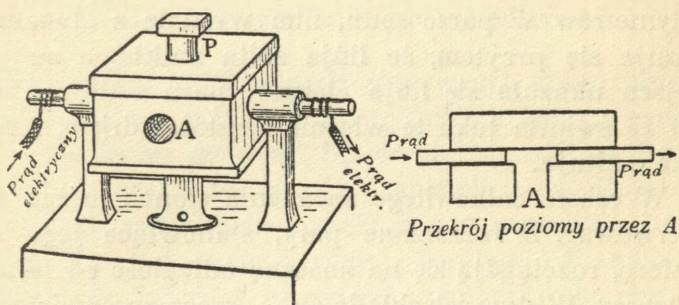
stki w stanie gazowym. Gazy owe same muszą świecić, wysyłając światło o tych samych częstościach drgań, które pochłaniają, powodując pojawianie się ciemnych prążków w widmie. Skąd się jednak bierze to promieniowanie pierwotne? Musi ono być tak obfite, że po jego pochłonięciu przez atmosferę słońca powstaje luka, której nie może pokryć świecenie samej atmosfery. Pozaatem energia jego jest rozpostarta po całym widmie, nie zaś ograniczona do pewnej liczby ściśle oznaczonych częstości drgań.

Mówiliśmy już, że atomy uwolnione od wszelkich wpływów zewnętrznych emitowałyby wyłącznie swe częstości własne. Atomy jednak nie są całkowicie od siebie niezależne. Przez pewien czas każdy z nich przebywa w bliskim sąsiedztwie innego, gdy mianowicie dzięki bezładnym ich ruchom następuje „zderzenie się” dwóch atomów. W owych chwilach atomy nie emitują już tak ściśle drgań o częstościach sobie właściwych. Jeśli atomy są tak „słoczone”, że prawie stale podlegają takim oddziaływaniom wzajemnym, wówczas zakresy częstości właściwych rozszerzają się, aż wreszcie stykają się, zachodzą na siebie — i w ten sposób emitowane jest całe widmo ciągłe. Spróbujmy wyjaśnić to przy pomocy grubej analogji. Jeśli by wrzucić do jakiejś skrzynki kilka kamertonów wraz z podstawkami i potrząsnąć gwałtownie skrzynką, to usłyszeliśmyy chaos brzękliwych dźwięków, niewątpliwie w ogólności różnych od poszczególnych dźwięków owych widełek strojowych. Atomy w bryle słonecznej są rozmieszczone bardzo ciasno i poruszają się, dzięki panującej tam niezmiernie wysokiej temperaturze, nader energicznie; jest właśnie sposób zdać możemy sprawę z „ciągłego”



charakteru widma. Chłodniejsza nieco atmosfera, otaczająca słońce, pochłania niektóre fale, i stąd pochodzą prążki widmowe.

Warunki te można odtworzyć w doświadczeniu laboratoryjnym. Przepuszczamy prąd elektryczny przez dwie sztabki węglowe, wsunięte do wnętrza skrzynki



R y s. 95. Piec, który tu widzimy, zbudowany jest z materiału ogniotrwałego. Wewnątrz można zapalić łuk elektryczny, poczem wrzuca się jakiś metal przez otwór *P* w przykrywce. Gdy wyjmemy zatyczkę *P*, pary metalu uchodzą tędy i światło wysyłane przez otwór *A* rozkłada się w spektroskopie na jasne widmo linijowe. Po zatkaniu otworu *P*, pary wypełniają przewód prowadzący do *A* i światło musi przez nie przechodzić; wskutek tego w widmie pojawiają się linie ciemne w tych miejscach gdzie były linie jasne.

z gliny ogniotrwałej przez otwory w ściankach (rys. 95); otrzymujemy w ten sposób rodzaj piecyka elektrycznego. Węgłe początkowo stykamy z sobą, poczem, jak zwykle, rozsuwamy je i umieszczamy w łuku elektrycznym kawałek metalicznego sodu. Żółta chmura świecącej pary sodu wznosi się ku górze i uchodzi z pieca przez otwór w pokrywie. Światło łuku wybie-

ga z pieca przez mały otwór w bocznej ścianie, jak-gdyby przez rodzaj tunelu, i pada na soczewkę, potem na pryzmat, dając wkońcu na ekranie widmo. Jasna żółta linja sodu zaznacza się w niem nader wyraźnie. Zamykamy teraz otwór w pokrywie pieca, tak iż rozżarzony gaz może znaleźć ujście tylko przez otwór A. Światło łuku musi zatem przebiec drogę długości kilku centymetrów w parze sodu, nim wyjdzie z „tunelu“; okazuje się przytem, że linja żółta znikła, a na jej miejscu ukazała się linja ciemna: para sodu pochłonięła ze światła łuku te właśnie częstotliwości drgań, jakie sama emituje.

W czasie całkowitego zaćmienia słońca można zaobserwować, iż rozżarzone pary, stanowiące jego atmosferę, rozciągają się na znaczną odległość od zakrytej tarczy. Widmo ich składa się — rzecz zrozumiała — z licznych prążków jasnych.

Jest rzeczą ciekawą i ważną, że gaz świecący, którego widmo składa się z prążków jasnych, da widmo „ciągłe“, jeśli całkowita ilość gazu będzie dostatecznie duża. Zawsze bowiem istnieją w tem widmie pewne ślady wszelkich innych promieniowań, oprócz tych specjalnych częstotliwości drgań, które odpowiadają atomom danego gazu. Otóż te ostatnie częstotliwości drgań ulegają większemu niż tamte osłabieniu, przy przechodzeniu przez gaz, dlatego też wybiegają w przestrzeń jedynie z warstw zewnętrznych, gdy tymczasem promieniowania o innych długościach fali mogą wy-dostać się z warstw głębszych. Jeśli głębokość masy gazu jest dostateczna, oba te wpływy równoważą się nawzajem, tak iż oba typy promieniowania mają jednakowe natężenie — i otrzymujemy widmo „ciągłe“.

Jest ono wówczas, jak wiemy, charakterystyczne dla danej temperatury i nie należy od natury ciała emitującego. A więc „ciągly“ charakter widma jakiegoś ciała niebieskiego nie świadczy o tem, iż jest ono ciałem stałym*, lecz jedynie o tem, że ilość materji w niem jest dostatecznie duża.

Zbliżanie się i oddalanie gwiazd od ziemi

Przy pomocy dokładnych obserwacyj nieco innego typu można wyznaczyć prędkość, z jaką pewna gwiazda zbliża się do ziemi, lub od niej się oddala. Gdy np. gwiazda pędzi ku ziemi, „zgniąta“ ona niejako fale świetlne przed sobą, dzięki czemu wszystkie fale skracają się, stając się bardziej „łamliwe“. Podobnie zbliżający się ku nam samochód „zgniąta“ fale głosowe, oddalający się zaś — „rozciąga“ je: codzień przecież słyszymy, jak spada wysokość wszystkich dźwięków wydawanych przez mijające nas samochody w chwili, gdy przejeżdżają obok nas. Jeżeli samochód posiada prędkość np. 40 km na godzinę, spadek ten wynosi blisko pół tonu. Gdyby gwiazda wysyłała jedynie widmo ciągłe, pozbawione prążków, nie moglibyśmy wykryć tego przesunięcia, fale bowiem położone w skrajnym fiolecie, uległyby skróceniu i przestałyby być widzialne, na przeciwległym krańcu zaś fale odrobinę zbyt długie, tuż poza granicą widzialności, weszłyby dzięki skróceniu w obszar czerwony — widzialny — widma. Wszystkie długości fali zostałyby zmniejszone, zarówno widzialne, jak niewidzialne, lecz część widzialna wydałaby się nam niezmienną,

* lub ciekłem (*Przyp. tłum.*).

gdyż na wzrok nasz działałby ten sam co przedtem zbiór fal. W prążkach widmowych wszakże występuje dostrzegalne przesunięcie; zjawisko to było po raz pierwszy opisane przez Dopplera. Położenia prążków w widmie można zmierzyć bardzo dokładnie, a prócz tego wielkość przesunięcia jest proporcjonalna do prędkości gwiazdy względem ziemi; dzięki temu można więc wyznaczyć prędkość względną obu tych ciał wzdłuż łączącej je linii. Ilustrację tego zjawiska mamy na fotografii C tabl. XX. Widzimy tu dwa widma światła, które otrzymujemy od dwóch brzegów w tarczy słonecznej: wschodniego i zachodniego. W pierwszym przypadku źródło światła zbliża się ku ziemi wskutek obrotu słońca dokoła osi, w drugim oddala się od niej. W obu przypadkach światło przeszło przez atmosferę ziemską, dzięki czemu w obu widmach występują prążki, pochodzące od absorbcji przez tlen atmosferyczny. Widma zestawiono tak, aby te właśnie prążki dokładnie schodziły się ze sobą; w obu widmach zatem jednakowe długości fali przypadają dokładnie w tem samym miejscu. Otóż łatwo spostrzec, że położenia innych prążków w obu widmach wykazują drobne różnice: są to prążki powstałe wskutek absorbcji w atmosferze słonecznej. Ten brak zgodności jest wynikiem zjawiska Dopplera; prążki są zlekka przesunięte w stronę krótkofalową widma w przypadku światła pochodzącego od zbliżającego się brzegu słońca, i vice versa. Obecność prążków tlenu umożliwia dokładne porównanie obu widm. Przesunięcia w widmach gwiazdowych nie są tak łatwe do okazania, jak w tym przypadku. Należy tu zaznaczyć, że omawiane

przesunięcie jest jednakowe dla wszystkich linii widma słonecznego.

Pomiary tego rodzaju są niezależne od odległości, dzięki czemu wyłania się ciekawa sytuacja: prędkość zbliżania się lub oddalania gwiazd można zmierzyć ze znacznym stopniem dokładności pomimo tego, że większość ich jest tak od nas odległa, iż „boczne“ ich przesunięcia na tle sklepienia niebieskiego są niedostrzegalne. W ten sposób wykryto np., że dalekie mgławice — lub przynajmniej te nieliczne spośród nich, które są dostatecznie jasne dla omawianych badań — oddalają się od nas, przyczem mgławice najbardziej odległe zdają się posiadać największą prędkość. Jest to źródło nowoczesnych hipotez o *rozszerzaniu się Wszechświata*. Liczne gwiazdy zbliżają się i oddalają się od nas naprzemian w prawidłowych odstępach czasu. Jest rzeczą oczywistą, że każda taka gwiazda posiada ciemną towarzyszkę, dokoła której krąży. Jednakże te, oraz inne analogiczne badania — jak sprawa rzeczywistej jasności różnych gwiazd oraz wniosków wysnuwanych z danych, dotyczących jasności i temperatury — należą właściwie do obszerniejszego wykładu astrofizyki. Nasz cel będzie osiągnięty, skoro zdamy sobie sprawę, ile wiadomości dostarcza światło, dochodzące do nas z wszystkich części Wszechświata.

Zatrzymajmy się tu na chwilę, aby rozpatrzeć pewną dobrze znaną osobliwość światła gwiazd, mianowicie ich *migotanie*. Jest ono skutkiem niejednorodności atmosfery ziemskiej. Zjawiskiem analogicznym jest drżenie przedmiotów widzianych poprzez rozgrzane powietrze, unoszące się nad ogniskiem, roznieconem na polu, lub nad świecą, w pokoju. Promienie gwiazdy

biegną do obserwatora po drodze, która jakgdyby fałduje zlekka. Niekiedy światło ulega przez chwilę częściowemu zgaszeniu, gdy jakaś część atmosfery, różniąca się nieco od otoczenia pod względem zdolności załamывania światła, odrzuci w bok promienie. Występuje przy tem również zabarwienie, gdyż promienie czerwone, dochodzące do oka od gwiazdy, nie biegną dokładnie po tej samej drodze, co niebieskie, i owa przeszkadzająca część atmosfery może zgasić jedną z tych barw, pozostawiając inne. Efekt ten nie uwydatnia się wyraźnie przy bezpośredniej obserwacji gwiazdy, łatwo go jednak dostrzec, jeśli obserwować obraz gwiazdy w zwierciadle, którem wciąż poruszamy zlekka: — punkcik świetlny rozpada się wówczas na sznur barwnych klejnotów. Dokładniejsze badania przy pomocy spektroskopu wykazują, że poprzez widmo gwiazdy nieustannie przebiegają ciemne plamy w kierunku od czerwieni do fioletu, albo też w odwrotnym, zależnie od tego, czy gwiazda znajduje się w zachodniej czy we wschodniej stronie nieba. Nietrudno to wyjaśnić. Ziemia, obracając się dokoła osi z zachodu na wschód, pociąga z sobą atmosferę, a więc i ową „zakłócającą“ jej część. Jeśli zatem gwiazda świeci na niebie zachodniem, wówczas zgaszeniu ulega najpierw barwa czerwona, niebieska później, a to dlatego, że promienie czerwone gwiazdy w zachodniej stronie nieba dochodzą do oka drogą mniej zakrzywioną, bardziej ku zachodowi położoną, niż droga promieni niebieskich.

Promieniowania niewidzialne

Usuniemy teraz granice, jakie zakresliliśmy sobie poprzednio i zajmimy się falami *niewidzialnymi*. Przedewszystkiem zwrócimy się do tych, które leżą w pobliżu dziedziny widzialnej po obu jej stronach. Jesteśmy tu całkowicie uzależnieni od przyrządów; na szczęście znamy kilka sposobów wykrywania promieniowań niewidzialnych; głównym wśród nich jest fotografja. Klisze fotograficzne można uczulić tak, aby stały się wrażliwe na różne odmiany tych promieniowań. W istocie, zwykłe klisze, będące w użyciu od wielu lat, są szczególnie czułe nie tylko na krótsze fale widma widzialnego, lecz również i na część widma, leżącą tuż poza krańcem fioletowym — na tak zwany „*nadfiolet*“. Trudność polegała na uczuleniu klisz na fale dłuższe, lecz niedawno udało się i to osiągnąć. W ostatnich czasach wyniki te wzbudziły wielkie zainteresowanie. Jeden z nich ilustruje znakomicie niektóre sprawy, omawiane w poprzednich rozdziałach tej książki.

Przypominamy sobie, że promienie czerwone ulegają mniejszemu odchyleniu przez atomy i cząsteczki powietrza oraz przez pyłki i kropelki mgły, niż promienie niebieskie z drugiego krańca widma. Skutkiem tego, jeśli klisza jest czuła na czerwień, a tem bardziej, jeśli czułość jej sięga w dziedzinę podczerwoną, może ona uchwycić w kamerze fotograficznej obraz przedmiotów, tonących dla oka we mgle i oparach. Udało się w ten sposób odfotografować góry z odległości dziesiątków kilometrów, lub uzyskać piękne zdję-

cia dalekich widoków, sfotografowanych np. przez kanał La Manche lub Morze Irlandzkie wówczas, gdy dla oka nie było z nich widać ani śladu. Fotografje reprodukowane na tabl. XXI (Ilford Co.) przedstawiają piękny przykład tego zastosowania promieni podczerwonych. Aparat fotograficzny posiada oczywiście tę wielką przewagę nad okiem, że wyrazistość wytworzonego przezeń obrazu rośnie wraz z czasem działania światła — co posiada wielkie znaczenie również dla astronomji. Filtry świetlne zatem, mające na celu usunięcie fal krótszych, nie są bynajmniej bezużyteczne, jeśli pochłaniają do pewnego stopnia również promienie czerwone i podczerwone: wystarczy wówczas przedłużyć czas naświetlania. Fale same są oczywiście jeszcze dostatecznie drobne, by móc odtworzyć subtelne szczegóły obrazu.

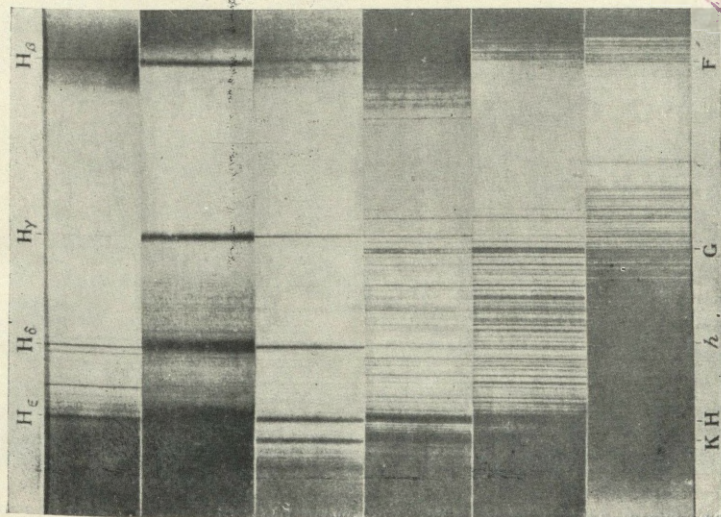
Na fotografiach tych zielona roślinność występuje zawsze silnie: przypomnijmy sobie, że chlorofil nie pochłania dalekiej czerwieni, skutkiem czego światło odbite od liści i trawy działa silnie na owe specjalnie uczulone klisze. Drzewa, krzewy oraz trawa wyglądają jakby pokryte śniegiem.

Dla fizyka promienie podczerwone są szczególnie interesujące dlatego, że powstają one raczej dzięki drganiom *cząsteczek*, niż atomów i badanie ich pozwala rozwiązywać zagadnienia z dziedziny budowy *cząsteczek*.

Wyrażenie „promienie nadfioletowe“ oznacza często tę niewidzialną część promieniowania słonecznego, dochodzącego do powierzchni ziemi, która składa się z fal *krótszych* niż fale widzialne. W świetle wysyłanem przez słońce muszą zawierać się fale jeszcze kró-

TABLICA XX

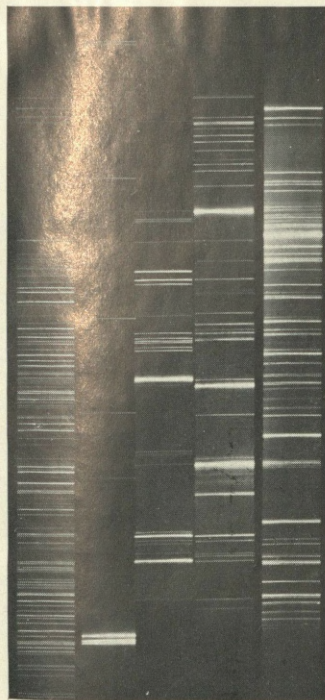
Typy
widmowe



Fiolet

Błękit

Zieleń



Żelazo

Magnez

Wapń

Stront

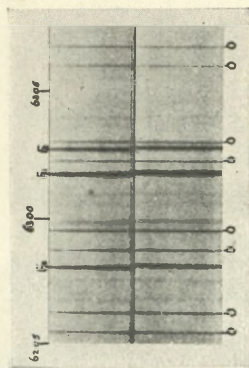
Bor

B. Widma kilku pierwiastków znajdujących się w stanie świecącego gazu (w łuku elektrycznym) [str. 237] A. Fowler.

A. Kilka widm gwiazdowych, okazujących przesunięcie się maksimum natężenia począwszy od gorących białych gwiazd typu F (np. Procyon i Canopus) do chłodniejszych czerwonych gwiazd typu M (Antares i Betelgeuze) (str. 234, 237).
Z lewej: W. M. Smarła „Słońce, gwiazdy i wszechświat”.

Wschód

Zachód



C. Przykład zjawiska Dopplera: porównanie widm zbliżającego się ku nam i oddalającego się brzozy tarczy słonecznej. Prążki powstające wskutek pochlaniań przez tlen w atmosferze ziemskiej umieszczono w obu widmach dokładnie nad sobą; widzimy, iż prążki żelaza (pocho-

Wojkowej
Nr. 2415
BIBL



Z przedstawionych tu zdjęć (Ilford Co.) dolne wykonano przy użyciu filtra podczerwonego, górne zaś w warunkach zwykłych. Zwróćmy uwagę, że niebo wydaje się ciemne, jako że nie rozprasza promieni podczerwonych. Przeciwnie, trawa i drzewa rozpraszają dużo podczerwieni, dlatego wydają się białe. Cały światłocien obrazu jest anormalny, ponieważ wchodzą tu w grę promienie różne od tych, na jakie wrażliwe jest oko. Podkreślić również należy niezwykłą wyrazistość drobnych szczegółów zwłaszcza w odległych częściach krajobrazu (str. 248).

sze, lecz pochłania je atmosfera ziemska. Granicą jest tu długość fali, wynosząca 0,0003 cm; promieniowania nadfiołkowe o fali krótszej nie dochodzą do powierzchni ziemi. Pochłonięcie tych promieni ogrzewa atmosferę, tak iż na wysokości stukilkudziesięciu kilometrów (i większej) temperatura jej jest o wiele wyższa niż na samej powierzchni. Warstwa taka różni się pod względem swych własności tak dalece od warstw niższych, że występuje silne odbicie od niej zarówno fal radiowych, jak głosowych: wspominaliśmy o tem już poprzednio.

Fluorescencja

Promienie nadfiołkowe wywierają różnorodne energetyczne oddziaływania, z których nie wszystkie jeszcze są w całej ich doniosłości ocenione. Jednym z najbardziej godnych uwagi i najdawniej znanych jest pobudzanie niektórych ciał do świecenia, czyli do *fluorescencji*. Rzuciwszy widmo łuku elektrycznego na ekran pokryty siarczanem chininy, widzimy barwy daleko poza końcem fioletowym widma — uczyniliśmy w ten sposób widzialnym nadfiolet. Zjawisko to przybiera znacznie na wyrazistości, gdy użyjemy soczewki i pryzmatu *kwarcowego* zamiast szklanych. Kwarc przepuszcza promienie nadfiołkowe o wiele łatwiej, niż szkło, które jest zresztą całkowicie nieprzezroczyste dla fal najkrótszych. Przypominamy sobie, że szkło wydaje się nam substancją przezroczystą dlatego, iż nie pochłania promieni widzialnych; gdyby jednak wzrok nasz był wrażliwy raczej na nadfiolet lub też i na podczerwień, wówczas nazwalibyśmy przezroczystem nie

szkło, lecz w pierwszym przypadku kwarc, w drugim sól kamienną.

Zabarwienie ekranu fluoryzującego, występujące w miejscach, gdzie pada nań światło nadfiołkowe, posiada w całym niemal tym obszarze odcień niebieskawyy. Nie jest to bynajmniej jakaś barwa *nowa*; badania spektroskopowe wykazują, że zawiera ona długości fali, należące do pewnej części widma widzialnego. To nie nadfiolet staje się widzialny, lecz tylko *wzbudza* on emisję światła widzialnego: znika promieniowanie o pewnej długości fali, a na jego miejsce pojawia się światło o *innej* długości fali. Napozór zdaje się to przeczyć naszym doświadczeniom z ruchem falowym: przyjmowaliśmy przecież zawsze, że ani odbicie, ani załamanie lub ugięcie nie zmienia długości fali i nie obserwowaliśmy podobnych zjawisk we wspomnianych prostych doświadczeniach. Niema tu jednak sprzeczności; założenia owe były poprawne i zgodne z doświadczeniem. Obecnie mamy do czynienia nie ze zwykłym odbiciem czy załamaniem, lecz z czemś innem, czemś, co rzeczywiście posiada cechy nader szczególne. W istocie, napotykamy tu pierwszą oznakę tego, iż nasza teoria falowa nie jest wystarczająca; nie tego, że jest ona fałszywa, lub że powinniśmy cofnąć niektóre twierdzenia jej dotyczące — lecz, że istnieją zjawiska, których nie może ona objąć i wytłumaczyć. Sprawy te staną się jaśniejsze w dalszym ciągu.

Opiszemy tu bardzo interesujące doświadczenie, ilustrujące stan, jaki osiągnęliśmy w toku naszych rozważań. Przez szczelinę w zasłonie okiennej wpada do zaciemnionego pokoju światło słoneczne i po przejściu przez soczewki i pryzmaty daje widmo na powierzchni

wody w naczyniu, do którego wrzucono trochę eozyny lub innego silnie fluoryzującego barwnika (tabl. I C). Promienie czerwone i żółte przechodzą swobodnie poprzez roztwór i padają na dno basenu; wszystkie pozostałe natomiast zostają zatrzymane na powierzchni. Własne barwy ich znikły; na miejscu zieleni, błękitu i fioletu widać ciemno-zielony pas, podobny do wstążki, pływającej po wodzie. Pas ten sięga daleko poza fioletowy kraniec widma, jak to łatwo można sprawdzić, położywszy w tem miejscu na wodzie kawałek białego papieru. Jeżeli szczelina jest dostatecznie wąska, wówczas można widzieć dokładnie główne prążki widma słonecznego; występują one również w części nadfioletowej, co znów świadczy o tem, że nie ma jakiejś istotnej różnicy pomiędzy promieniowaniem widzialnem i niewidzialnem dla nas. Niebieskie i zielone promienie widma przenikają w ciecz jedynie na bardzo nieznaczną głębokość, ulegając w całości zamianie na promienie o mniejszej częstotliwości drgań już w najbliższem sąsiedztwie powierzchni. Światło czerwone natomiast przechodzi wgląd bez przeszkody. Zwróćmy uwagę, iż w zjawisku tem zaznacza się wyraźnie pewna „degradacja“: zamiast barw, które znikły, pojawiają się inne, w ogólności bliższe czerwonego krańca widma. Porównaj także tabl. XIV C.

Fluorescencja nie jest zjawiskiem rzadkiem — łatwo ją np. zaobserwować na powierzchni mineralnego oleju smarowego w naczyniu szklanem: niebieski odcień na powierzchni jest właśnie przejawem fluorescencji.

Jak już wspominaliśmy, powietrze pochłania bardzo krótkie fale, tak iż światło słoneczne nie zawiera fal krótszych od pewnej określonej granicy. Umiemy jed-

nak wieloma sposobami wytwarzać fale krótsze niż te, jakie jeszcze otrzymujemy od słońca: otóż można przytem stwierdzić, że zdolność wzbudzania fluorescencji wzrasta szybko w miarę malenia długości fali. Lampa rtęciowa jest bardzo obfitem źródłem fal krótkich, które, jeśli łuk płonie w rurze kwarcowej, wydostają się nazewnątrz. Patrzenie na taką lampę jest szkodliwe dla oczu; światło słoneczne byłoby również szkodliwe, gdyby atmosfera nie pochłaniała fal krótkich. Pod wpływem światła powstają przytem najróżnorodniejsze barwy, tworząc efekty o szczególnej piękności. Istnieją filtry, które zatrzymują wszystkie promienie widzialne, przepuszczają zaś tylko nadfioletowe; ciała fluoryzujące, naświetlane poprzez taki filtr, zdają się świecić same przez się. Spójrzmy przez filtr na lampę (której oczywiście w tych warunkach nie widzimy): możemy sobie na to pozwolić, gdyż, jeśli znajdujemy się w nieco większej odległości od lampy, to osłabione promienie nadfioletowe nie zdołają w ciągu krótkiego czasu wyrzeć szkodliwego wpływu na oczy. Widać wówczas dziwne zjawisko: cały pokój wydaje się wypełniony świetlistą mgłą. Powstaje ona wskutek fluorescencji, wzbudzonej przez promienie nadfioletowe w cieczach znajdujących się wewnątrz oczu; jest to więc zjawisko całkowicie subiektywne. Gdy wstawimy jakąś zasłonę, zatrzymującą te promienie, świecąca mgła znika.

Rozbrajanie elektryczności przez promienie nadfioletowe

Inną, godną uwagi własnością światła nadfioletowego, jest zdolność rozpraszania elektryczności ujemnej

z niektórych metali, zwłaszcza z metali alkalicznych i cynku. Łatwo to wykazać doświadczalnie. Przypuśćmy, że przy pomocy maszyny elektrostatycznej wytwarzamy szereg iskier pomiędzy dwiema kulkami, z których jedna, cynkowa, odgrywająca rolę bieguna ujemnego, posiada powierzchnię świeżo oczyszczoną i amalgamowaną rtęcią. Druga kulka połączona jest z ziemią. W czasie działania maszyna ładuje kulkę cynkową elektrycznością ujemną, dopóki nabój ten nie wytworzy w powietrzu między kulkami napięcia wyższego, niż to, jakie może ono wytrzymać: następuje wówczas pokonanie oporu powietrza i przebiega *iskra elektryczna*.

Jeżeli teraz na kulkę cynkową rzucimy z jakiegokolwiek źródła światło nadfiołkowe, iskrzenie ustaje: elektryczność ujemna nie może nagromadzić się na kulce, ponieważ promienie nadfiołkowe natychmiast rozbrajają ją w powietrzu. Po wstawieniu płytki szklanej pomiędzy źródło światła a kulkę, iskra zaczyna bić ponownie, szkło bowiem zatrzymuje promienie nadfiołkowe, jakkolwiek jest przezroczyste dla światła widzialnego. Dziwne wrażenie wywiera nagłe pojawianie się i przerywanie iskrzenia przy wstawianiu i usuwaniu płytki szklanej.

Te i inne podobne doświadczenia nasuwają myśl, że im *krótsze* są fale, tem *silniejsze* wywierają one działania, a więc że należałoby doświadczenia te powtórzyć z falami o możliwie małej długości. Wówczas bowiem udałoby się, być może, uzyskać niektóre zjawiska w postaci bardziej wyraźnej, co sprzyjałoby niewątpliwie ich wyjaśnieniu. Jak się okazuje, tak jest istotnie: zastosujemy tu *promienie Röntgena*. Przedewszystkiem jednak musimy upewnić się, czy można uważać je za

fale eteru z tą samą dozą słuszności, co światło. Zbadamy następnie ich własności i znajdziemy tam te same zjawiska, co w przypadku światła nadfioletowego, lecz wyrażone w postaci o wiele wybitniejszej. Zobaczymy również, że teoria falowa nie umie zdać sprawy, w pewnym zakresie przynajmniej, z wielu nader ważnych faktów doświadczalnych i wymaga uzupełnienia w sposób, którego dotychczas jeszcze nie rozumiemy w całej pełni. Zagłębiamy się teraz w zagadnienia, które nadają ogromny urok dalszym naszym rozważaniom, być może właśnie dlatego, że nie są jeszcze całkowicie rozwiązane.

ROZDZIAŁ VIII

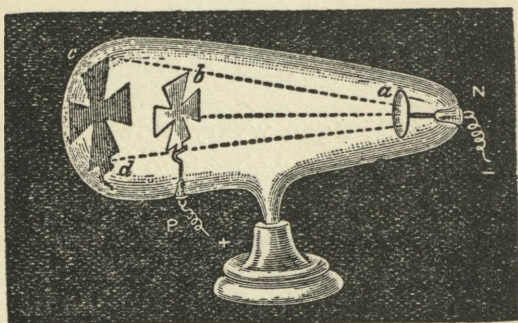
PROMIENIE RÖNTGENA

W ROKU 1895 Röntgen wykrył nowy rodzaj promieniowania, któremu, wobec tego iż natura jego była nieznana, nadał nazwę *promieni X*. Związek pomiędzy tem nowem promieniowaniem a formami dawniej znanymi stał się natychmiast przedmiotem usilnych badań: w ciągu kilku tygodni Röntgen ustalił najgłówniejsze właściwości promieni X, nie wyprowadzając jednak ostatecznych wniosków o ich naturze. Dopiero w r. 1912, gdy von Laue wykazał, iż promienie te mogą się u g i n a ć, podobnie jak światło zwyczajne, przekonano się, że są to *nadzwyczaj krótkie fale eteru*. Jako siatki dyfrakcyjnej użył Laue *kryształu*; opisem jego metody zajmiemy się wkrótce.

Promienie Röntgena są zatem identyczne ze światłem pod względem swej natury, okazują jednak w porównaniu z niem znaczne różnice jakościowe. Fakt ten sprzyja wybitnie rozszerzeniu ogólnych naszych wiadomości o promieniowaniu. Szczególnie zaś ważny jest dlatego, że badania nad tak krótkimi falami dowodzą, iż jakkolwiek teoria falowa znajduje potwierdzenie

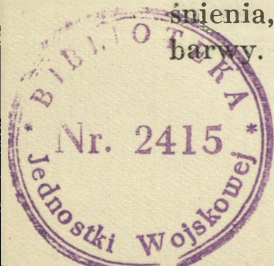
w tych swoich zastosowaniach, o których mówiliśmy dotychczas, to jednak nie może być uważana za teorię zupełną: w swej dawnej postaci jest ona niezdolna do objęcia wielkiej liczby nowych faktów. Obecnie jesteśmy świadkami nader ciekawego procesu powolnego kształtowania się teorii ogólniejszej.

Promienie X powstają w ogólności wskutek wyładowań elektrycznych w przestrzeni, w której ciśnienie

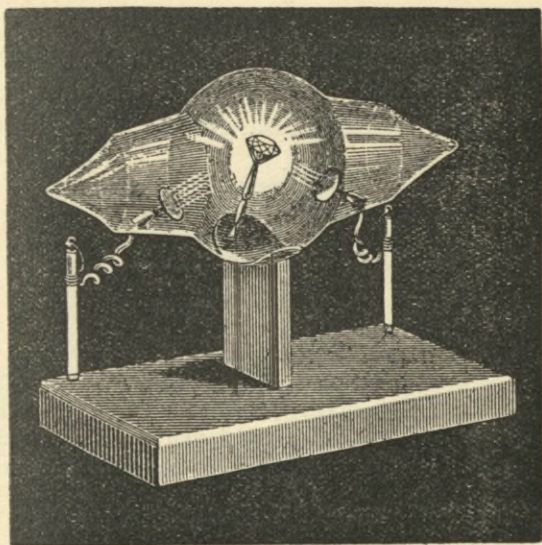


Rys. 96. Katoda, czyli biegun ujemny, znajduje się po prawej stronie w *a*. Promienie biegną w bańce po liniach prostych i wzbudzają fluorescencję na ścianie przeciwległej. Krzyż metalowy *b* rzuca ostro zarysowany cień.

powietrza czy innego gazu jest niezmiernie niskie. Wyładowania elektryczne, „iskra“, stanowiły od setek lat przedmiot zainteresowania badaczy, jednakże wielki krok naprzód uczyniono dopiero wówczas, gdy zaczęto przepuszczać wyładowania w szklanej rurce czy bańce, którą opróżniono z powietrza w mniejszym lub większym stopniu. W miarę zmniejszania się ciśnienia, iskra wydłuża się, rozszerza i nabiera żywszej barwy. Po udoskonaleniu przez Crookesa pompy próż-



niowej, które pozwoliło osiągnąć ciśnienia rzędu jednej milionowej części ciśnienia atmosferycznego, zaobserwowano nowe, nieznane dotychczas zjawisko. Biegun ujemny staje się wówczas źródłem promieniowania, które biegnie po linjach prostych przez bańkę i mo-

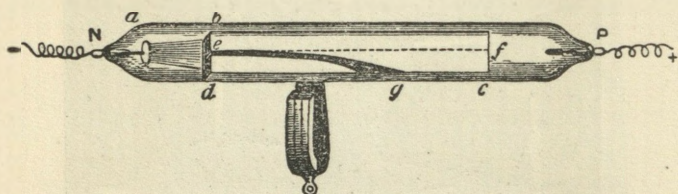


R y s. 97. Promienie wzbudzają żywą fluorescencję diamentu, umieszczonego pośrodku bańki.

że wywierać działania mechaniczne. Promienie te wytwarzają ciepło, padając na przeciwległą ściankę rurki lub na jakiekolwiek ciało, umieszczone na ich drodze; wzbudzają żywą fluorescencję szkła i wielu mineralów; uderzając o skrzydełka leciutkiego wiatraczka, mogą wprowadzić go w ruch. Wreszcie, co jest własnością niezmiernie ważną, ulegają one odchyleniu przy zbli-

zeniu magnezu: wskazuje to, iż promienie owe składają się z *biegnących prostoliniowo cząstek naelektryzowanych*. Strumień takich cząsteczek jest równoważny prądowi elektrycznemu, musi więc podlegać działaniu magnezu.

Doświadczenia Crookesa ilustrują rysunki 96, 97, 98 i 99, wykonane z oryginalnych klisz, użytych w drukowaniu sprawozdaniu z jego odczytu, wygłoszonego w Royal Institution w kwietniu 1879 r. Crookes przypuszczał, że nowe promieniowanie składa się z jakichś czą-

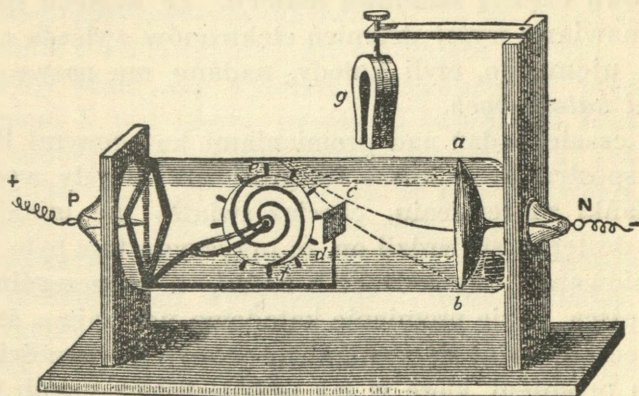


Rys. 98. Szczelinka *e* umieszczona przed katodą *a* wycina z pęku promieni katodowych wąską wiązkę; łatwo jest wówczas zaobserwować wychylenie tej wiązki przy zbliżeniu magnezu.

steczek: dowodził on, że stosowane przezeń pompy próżniowe osiągnęły taki stopień udoskonalenia, iż nieliczne stosunkowo cząsteczki, które jeszcze pozostały w bańce, mogą przebiegać, nie zderzając się z sobą nawzajem, drogi porównywalne z rozmiarami bańki.

Według Crookesa, materja w tym stanie różni się od gazu tak znacznie, jak gaz od cieczy. W zakończeniu rozprawy, przedstawionej Royal Society w tym samym roku (1879) pisze on, jakby w niejasnem, lecz ciekawem przeczuciu przyszłości, przeczuciu, które miało częściowo się sprawdzić:

„Zjawiska, zachodzące w tych opróżnionych rurkach, objawiają fizyce świat nowy — świat, w którym materia istnieje w czwartym stanie skupienia, w którym słuszną jest korpuskularna teoria światła, a światło nie zawsze rozchodzi się prostoliniowo: do światła tego jednak nigdy nie zdołamy się dostać, lecz musimy



Rys. 99. Katoda *a* posiada tu kształt czaszy kulistej, dzięki czemu promienie zbierają się w jednym punkcie. Normalnie ekran *C* zatrzymuje promienie, lecz magnes *g* odchyli je tak, iż przechodząc nad ekranem *c*, uderzają o skrzydełka wiatraczka *ef*, który poczyną szybko się obracać. Gdy odwrócimy magnes o 180° , promienie przechodzą pod *c* i wiatraczek obraca się w przeciwnym kierunku.

zadowalać się obserwacjami i doświadczeniami, dokonywanymi zewnątrz“.

J. J. Thomson, Wiechert i inni wykazali, że promienie omawiane składają się ze strumienia cząstek, niosących ładunki elektryczne *ujemne*, o wiele mniejszych nawet od atomu wodoru — czyli t. zw. „elektronów”. Przekonano się, że elektrony mogą być oderwane od

atomów wszelkiego rodzaju, jeśli tylko rozporządzamy dostatecznie wysokiem napięciem elektrycznem, którego nam dostarcza np. cewka indukcyjna, czy też inne odpowiednie urządzenie elektryczne; elektrony pochodzące z dowolnego źródła są wszystkie zupełnie do siebie podobne. Najwidoczniej więc elektron jest podstawową częścią składową materji. Ze względu na to, że omawiany wyżej strumień elektronów wybiega z biegunu ujemnego, czyli katody, nadano mu nazwę *promieni katodowych*.

W czasie badań nad promieniami katodowemi Röntgen spostrzegł, że klisze fotograficzne ulegały wpobliżu bańki zaczernieniu, chociaż światło nie miało do nich dostępu; stwierdził on, że przyczyną tego było promieniowanie, wychodzące z bańki, a w szczególności z miejsca, gdzie promienie katodowe uderzają o ścianki, poczem zajął się zbadaniem ogólnych własności nowych promieni, które w tak przypadkowy sposób udało mu się wykryć.

Pod wieloma względami przypominają one światło. Rozchodzą się po liniach prostych i rzucają ostre cienie; nie towarzyszy im, w dostrzegalnym stopniu, przenoszenie materji; działają na kliszę fotograficzną, wzbudzają fluorescencję pewnych substancyj i, podobnie jak światło nadfiołkowe — rozbrajają naboje elektryczne z przewodników. Pod innemi względami natomiast nowe promienie wydawały się różne od światła. Zwierciadła, pryzmaty i soczewki, które zmieniają kierunek biegu promieni świetlnych, nie wywierały podobnego wpływu na promienie X; zwykle siatki dyfrakcyjne nie ugięły ich; przy użyciu kryształów nie dostrzeżono ani podwójnego załamania, ani polaryzacji.

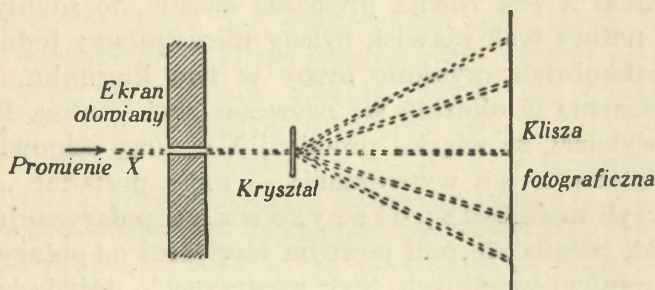
Ponadto są one nadzwyczaj *przenikliwe*: zdawało się, że nic nie może ich zatrzymać całkowicie, jakkolwiek wszelkie rodzaje materji pochłaniają je w pewnym stopniu, przytem atomy cięższe silniej niż lżejsze. Rychło zwrócono uwagę na wynikającą stąd zdolność tych promieni do ujawniania wewnętrznej budowy ciał nieprzezroczystych dla światła; tak np. kości rzucają cienie o wiele głębsze, niż otaczające mięśnie.

Gdyby udało się wykazać bezspornie, że prędkość promieni X jest równa prędkości światła, to identyczność natury tych zjawisk byłaby niewątpliwa; jednakże, jakkolwiek czyniono próby w tym kierunku, doświadczenia te okazały się naówczas zbyt trudne. Barkla wykazał, że wiązka promieni X — przy odpowiedniej metodzie ich wytwarzania — może posiadać „boki“, czyli może być *s p o l a r y z o w a n a*, polaryzacja ta jednak różniła się pod pewnym względem od polaryzacji promieni świetlnych. Spór rozstrzygnęło doświadczenie Laue'go, który wykazał, iż można otrzymać zjawisko *uginania* promieni Röntgena, zupełnie analogiczne do dyfrakcji światła; jeżeli więc na zjawisku uginania opiera się falowa teoria światła, to dokładnie te same dowody przemawiają za falową teorią promieni Röntgena.

Doświadczenie Laue'go

Rozpatrzmy teraz szczegóły sławnego doświadczenia Laue'go, które pozwoliło wysnuć tak daleko sięgające wnioski. W zasadzie było ono nader proste. Należało przepuścić wąską wiązkę promieni X przez kryształ, umieściwszy za nim kliszę fotograficzną tak, aby pro-

mienie padały na nią po wyjściu z płytki (rys. 100). Laue przypuszczał, że obok środkowego obrazu na kliszy, powstającego w miejscu, gdzie pada na nią wiązka, pojawią się obrazy dodatkowe: przypuszczenie to opierał on na rozważaniu analogicznych zjawisk, zachodzących, jak już wiemy, w przypadku światła. Gdy ciąg fal eteru odbija się od płytki, porysowanej równoległymi linjami, gdy przechodzi przez taką płytkę, lub gdy przenika ośrodek, w którym zawieszone są



Rys. 100. Promienie Röntgena przechodzą przez mały otworek w ekranie ołowianym i padają na kryształ. Na kliszy fotograficznej tworzy się obraz dyfrakcyjny Laue'go.

drobniutkie cząstki o jednakowych rozmiarach, — wówczas występują prawidłowe odchylenia promieni w różnych kierunkach, stanowiące to, co zwiemy „wiązkami ugiętymi“. Omawialiśmy już poprzednio kilka przykładów, ilustrujących to zjawisko. We wszystkich tych przypadkach jest rzeczą konieczną, aby pomiędzy długością fali z jednej strony, a odległością sąsiednich rys, czy też średnicą cząstek z drugiej, nie było zbyt wielkiej różnicy. Laue sądził, że niepowodzenia dawniejszych prób wykrycia dyfrakcji promieni X można przypisać temu, iż warunek wspomniany nie był

spełniony. Jeśli fale promieni X są — jak wolno było przypuszczać — tysiące razy krótsze od fal świetlnych, to napróżno poszukiwano uginania tych promieni, używając zwykłych siatek dyfrakcyjnych w zwykły sposób stosowany w optyce. Należałoby tu użyć siatek o linjach nakreślonych tysiące razy gęściej, niż normalnie. Jest to jednak rzeczą niemożliwą: niepodobna przecież nakreślić milionów równoległych rys na szerokości jednego centymetra.

Może jednak sama przyroda dostarcza nam narzędzia, którego nie umiemy wykonać w pracowni? Odpowiednią dla promieni X siatką dyfrakcyjną mógłby być *kryształ*, którego atomy są, jak wówczas już przyjmowano, ułożone w sposób prawidłowy, w odległościach wzajemnych — o ile można było wnosić z obliczeń — porównywalnych z długościami fali promieni X. Sprawa, czy przypuszczenia te były należycie uzasadnione, czy nie, stała się bezprzedmiotową w chwili, gdy w roku 1912 współpracownicy Laue'go, Friedrich i Knipping, istotnie wykonali owo doświadczenie i to z wynikiem najzupełniej dodatnim. Na kliszy fotograficznej pojawił się skomplikowany lecz symetryczny układ plamek, niepodobny wprawdzie do obrazów dyfrakcyjnych, dawanych przez promienie świetlne, lecz posiadający niewątpliwie tę samą naturę. Okazało się wkrótce, że każdy kryształ wytwarza właściwy sobie układ plamek; doświadczenie to nie tylko zapoczątkowało nową metodę badania promieni X, lecz również nową metodę badania *budowy kryształów*. Przykłady wzmiankowanych obrazów dyfrakcyjnych podano na tablicy XXII fig. A i B; czytelnik zechce je porównać z fig. C tabl. XXIII.

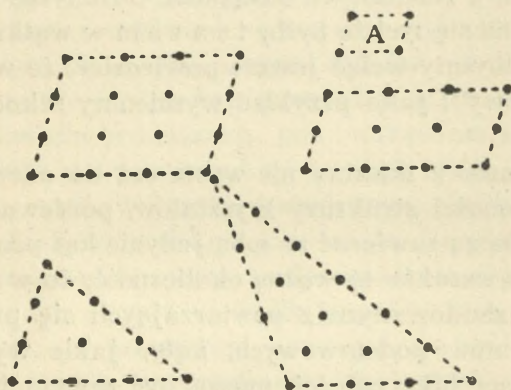
Aby wyjaśnić sprawę należycie, musimy rozpatrzyć pokrótce szczegóły doświadczalne oraz założenia eksperymentu Laue'go. Omawialiśmy już niektóre zjawiska, związane z budową kryształów w przypadku szpattu islandzkiego; obecnie musimy jednak rozpatrzyć te sprawy ponownie i to z ogólniejszego punktu widzenia.

Najbardziej wybitnymi i charakterystycznymi cechami kryształu są: prawidłowość jego postaci oraz występowanie gładkich płaskich powierzchni ścian i ostrych krawędzi. Porównywając z sobą kryształy o tym samym składzie chemicznym, przekonywamy się, że kąty pomiędzy ścianami są zawsze dokładnie jednakowe, gdy natomiast stosunkowe wielkości powierzchni ścianek mogą być bardzo różne, czyli, w języku technicznym, ścianki mogą być niejednakowo wybitnie rozwinięte. Nasuwa się naturalny wniosek, że mamy tu do czynienia z prawidłowością wewnętrżnej budowy, polegającą na powtarzaniu się w przestrzeni pewnego zasadniczego elementu o rozmiarach zbyt drobnych, aby można było go dostrzec oddzielnie. Jako prostą analogję weźmy pod uwagę kawałek materiału, utkanego w zwykły sposób, z osnową i wątkiem przebiegającymi pod kątem prostym względem siebie. Niezależnie od tego, jakbyśmy ten materiał podarli, różne części będą posiadały kąty proste na wszystkich rogach, lecz kawałki te bynajmniej nie muszą być kwadratowe. Istnieją tu dwa kierunki główne, wzajemnie do siebie prostopadłe, i wszystkie rozdarcia zachodzą pod kątem prostym do jednego z owych kierunków. Jeśliby oba te kierunki były dokładnie jednakowe pod wszel-

kiemi względami, np. pod względem łatwości rozdarcia i charakteru wystrzępionych brzegów, wówczas wątek i osnowa musiałyby być i d e n t y c z n e: musiałyby składać się z takich samych nici i w tych samych odstępach w obu przypadkach. Moglibyśmy wtedy słusznie orzec, iż podstawowym wzorem tkaniny jest „kwadrat“. Byłoby tak nawet w przypadku, gdyby zarówno osnowa, jak i wątek posiadały budowę złożoną, gdyby np. oba składały się z włókien barwnych biegnących w rozmaitych odstępach. O ile tylko schemat powtarzania się tychże byłby t e n s a m w wątku i osnowie, moglibyśmy wciąż jeszcze powiedzieć, że wzór jest „kwadratowy“; jako przykład wymienimy szkocki „tartan“.

Porównanie z tkaniną nie wystarcza do odtworzenia całej złożoności struktury kryształów, ponieważ wątek i osnowa mogą zawierać ze sobą jedynie kąt prosty; ilustruje ono wszakże tę ważną okoliczność, że w każdym układzie, zbudowanym z powtarzających się prawidłowo elementów podstawowych, *kąty*, jakie występują w strukturze jako całości, muszą być zawsze jednako-
we — wielkość powierzchni ścian natomiast zastrzeżeniu podobnemu bynajmniej nie podlega. Element podstawowy, powtarzający się prawidłowo we wszelkich kierunkach, wyznacza formę całości pod względem wielkości kątów. Jeżeli np. element pewnego układu płaskiego ma postać małego czworokąta A na rys. 101, wówczas cała figura może posiadać najrozmaitsze kształty, zilustrowane na tej samej rycinie. Kąty u wierzchołków mogą być nieraz inne niż w A, bądź co bądź jednak są one ściśle takie same w różnych egzemplarzach owych figur złożonych.

Podobnie, w przestrzennej strukturze kryształu mogą wystąpić najrozmaitsze płaszczyzny ścian, które jednak okazują tę samą stałość wzajemnych nachyleń. Ponieważ tego stanu rzeczy musimy oczekiwać, jeśli kryształ składa się z elementów prawidłowo powtarzających się we wszystkich kierunkach i ponieważ fakty zgadzają się z oczekiwaniami, przeto możemy na tej podstawie przypuścić, że nasze pierwotne poglądy na budowę kryształów są słuszne.



Rys. 101. Elementem tych płaskich układów punktowych jest czworokąt *A*. Wynik powtarzania się elementu *A* może przybrać rozmaite postacie, z których kilka podano na rysunku. Boki tych figur mogą tworzyć ze sobą tylko pewne określone kąty,

Co teraz nastąpi, jeśli na strukturę tego typu padnie ciąg fal eteru?

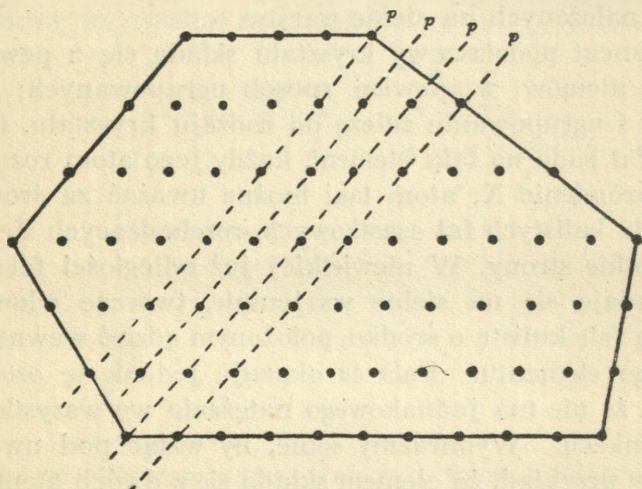
Kryształ można uważać za zbiór *warstw* rozmieszczonych w równych odstępach, podobnie jak w dwóch wymiarach prawidłowy zbiór punktów może być uważany za układ, złożony z równoległych *rzędów*. Po dział na rzędy można skutecznie różnymi sposobami

b a m i, jak to zaznaczono na rys. 102; podobnie i każdy kryształ można podzielić na równoległe warstwy nieskończenie wieloma sposobami.

Zagadnienie uginania promieni X dogodnie jest rozpatrywać kolejnymi „etapami”: rozpoczynając od rozpraszania przez pojedynczy element, przejść do działania warstwy, złożonej z takich elementów, kończąc na rozpraszaniu przez cały kryształ, zbudowany z szeregu nałożonych na siebie warstw.

Element podstawowy kryształu składa się z pewnej ilości atomów w pewien sposób ugrupowanych; ów skład i ugrupowanie zależą od rodzaju kryształu. Gdy ciąg fal pada na taki element, każdy jego atom rozpraszają promienie X; atom taki można uważać za środek układu kulistych fal cząstkowych, rozchodzących się na wszystkie strony. W niewielkiej już odległości fale te nakładają się na siebie wzajemnie, tworząc wkońcu jedną falę kulistą o środku, położonym gdzieś wewnątrz danego elementu. Fala ta okazuje jednak tę osobliwość, że nie ma jednakowego natężenia we wszystkich kierunkach. Wyobraźmy sobie, by wziąć pod uwagę prosty przykład, że element składa się z dwóch atomów A i B, przyczem odległość A—B równa się połowie długości fali (p. rys. 103). Niech fale padające dochodzą równocześnie do obu tych atomów; fale rozproszone wybiegają więc z obu źródeł również jednocześnie. W kierunku ABC oba układy przeciwstawiają sobie nawzajem swe działania: „góra“ jednego z układów przypada w miejscu, gdzie drugi tworzy „dolinę“. W tym kierunku zatem oba układy z noszą się wzajemnie, i to samo ma miejsce w kierunku przeciwnym BAD. Natomiast w każdym innym kierunku nie ma zu-

pełnego znoszenia się przez interferencję; tak np. w kierunkach zaznaczonych strzałkami P, oba układy wzmacniają się do pewnego stopnia i to tem wydatniej, im bardziej odległy jest kierunek P od C lub D. W omawianym przypadku wynik nałożenia się fal rozproszonych będzie posiadał postać kuli, natężenie wszakże nie będzie jednakowe w różnych miejscach tej powierzch-



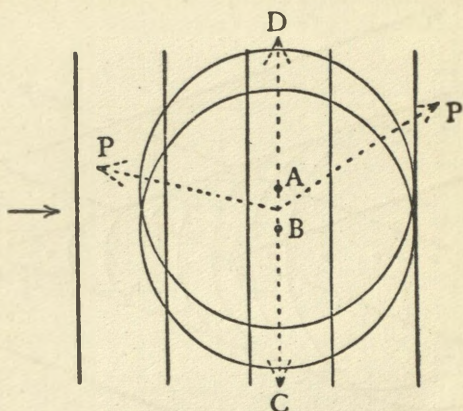
Rys. 102. Punkty na tym rysunku mogą być uporządkowane w szeregi wieloma sposobami.

ni; w punktach takich jak C i D natężenie fali będzie równe zero.

Przy innych ugrupowaniach atomów otrzymuje się inny rozkład natężenia na powierzchni fali kulistej, tem bardziej skomplikowany, im większą komplikację okazuje owo ugrupowanie.

Komplikacja ta nie ma jednak wpływu na tok na-

szych rozumowań i wspomnieliśmy o niej jedynie dlatego, aby uczynić obraz bardziej realnym. Rzeczą istotną jest to, że wszystkie elementy zachowują się jednakowo, bez względu na to, z jakich i jak ugrupowanych atomów się składają. Chwilowo możemy nie zwracać uwagi na nierównomierność rozkładu energii na po-

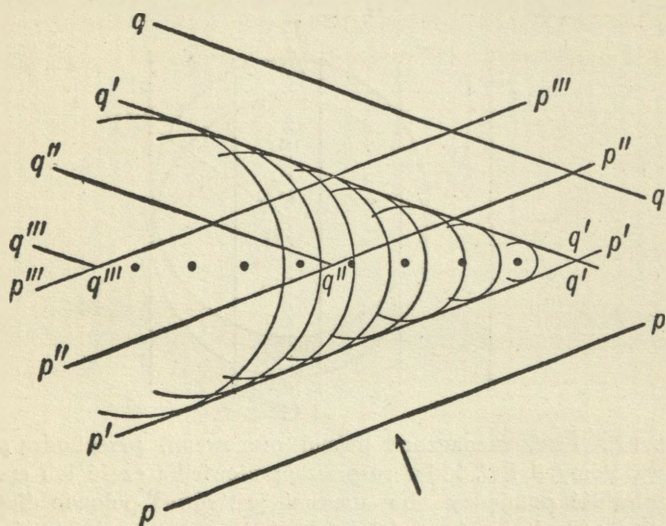


Rys. 103. Fale, zaznaczone linjami pionowymi, przechodzą przez dwa atomy *A* i *B*, które rozpraszają niewielką część ich energii. Odległość pomiędzy obu atomami jest równa połowie długości fali. Rozchodzące się z *A* i *B* fale kuliste znoszą się wzajemnie w kierunkach *ABC* lub *BAD*, gdyż „dolina” jednej przypada tu w miejscu, gdzie znajduje się „góra” pozostałej. W innych wszakże kierunkach, takich jak np. *P*, energia ulega rozpraszaniu. Mamy tu w rzeczywistości specjalny przypadek rysunku 73.

wierzchni fal rozproszonych; musimy jedynie pamiętać, że mają one ostateczny kształt kulisty, i wychodzą z prawidłowo rozmieszczonych punktów, reprezentujących poszczególne elementy.

Rozpatrzmy teraz łączne działanie wszystkich elementów jednej warstwy. Przypuśćmy, że czarne pun-

kty na rys. 104 przedstawiają część elementów warstwy prostopadłej do płaszczyzny papieru. Linje pp , $p'p'$ i t. d. oznaczają w przekroju układ fal padających. W miarę tego, jak fale przebiegają przez punkty-elementy, z każdego z nich poczyną rozchodzić się cząstkowa fala kulista; z ich nałożenia się powstaje



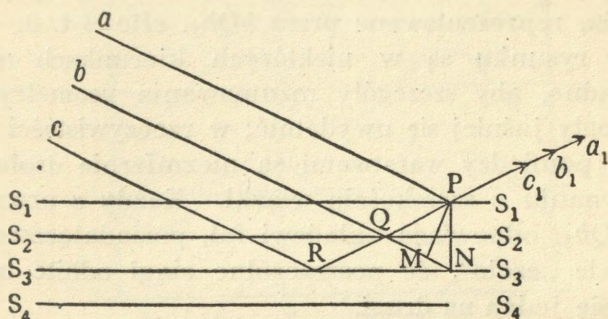
Rys. 104. Fale $p'p'$... przechodzą przez szereg punktów rozpraszających. Większa część energii biegnie dalej w pierwotnym kierunku, część jednak ulega odbiciu w postaci fal qq , $q'q'$...

wypadkowa fala odbita. Jest to w istocie jeszcze jeden przykład zastosowania zasady Huygensa. Mamy tu do czynienia ze zwykłym odbiciem, które tem tylko różni się od odbicia w zwierciadle, że w fali odbitej zawiera się jedynie część energii padającej. Z doświadczeń wiadomo, że część ta — w przypadku pojedynczej warstwy odbitej — jest niezmiernie drobna. Pro-

mienie X przebiegają nieraz miliony warstw, zanim wiązka padająca zaniknie całkowicie.

Analogiczne zjawisko obserwuje się nieraz w przypadku dźwięku. Głos może ulec prawidłowemu odbiciu od rzędu żelaznych sztachet, przyczem jednak przeważna część energii fal głosowych przechodzi przez przeszkodę. Takie odbicie dźwięku słychać np., gdy przejeżdża się w samochodzie wzdłuż ogrodzenia.

Należy zaznaczyć, że prawidłowe rozmieszczenie ele-



Rys. 105. Schemat ten ilustruje odbicie ciągu fal od układu regularnie rozmieszczonych warstw, z których każda odbija drobny ułamek energii, niesionej przez fale padające.

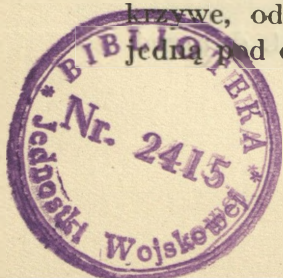
mentów czy też punktów, reprezentujących je na rys. 104, nie jest konieczne, jeśli chodzi o działanie *jednej* warstwy. Podobnie i odstępy pomiędzy sztachetami niekoniecznie muszą być równe, aby mogło powstać echo: głos odbija się nawet od zwykłego płotu. Prawidłowość rozmieszczenia odgrywa ważną rolę dopiero wówczas, gdy badamy możliwości odbicia od wielu *różnych* układów płaszczyzn wewnątrz kryształu.

Na schemacie, rys. 105, linje S_1 , S_2 , S_3 i t. d. przed-

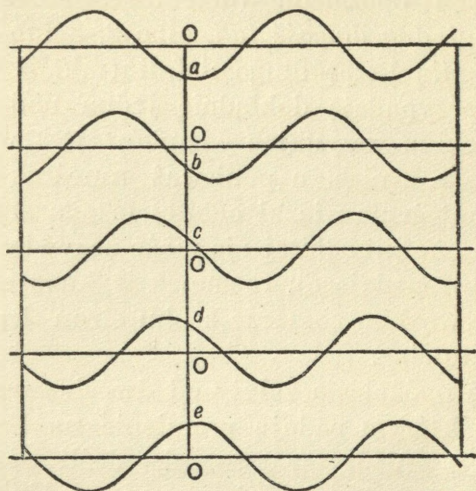
stawiają przecięcia tych płaszczyzn z płaszczyzną papieru; rysujemy je jako linje pełne, nie zaś jako szeregi punktów, ponieważ — jak mówiliśmy — rozmieszczenie na odpowiedniej płaszczyźnie „elementów“, czy też reprezentujących je punktów, nie odgrywa roli. Również dogodniej jest oznaczyć — linjami a , b , c i t. d. — *kierunki* rozchodzenia się fal, zamiast samych fal. A zatem aPa_1 przedstawia odbicie fali od pojedynczej warstwy (płaszczyzny), któreśmy rozpatrywali przed chwilą. Oprócz układu fal aPa_1 występują odbicia, reprezentowane przez bQb_1 , cRc i t. d. Rozmiary rysunku są w niektórych kierunkach mocno przesadne, aby szczegóły rozumowania geometrycznego mogły jaśniej się uwydatnić; w rzeczywistości odległości pomiędzy warstwami są niezmiernie drobne w porównaniu z szerokością wiązki. Każdy z promieni, np. bQb_1 , odpowiada układowi fal, posiadającemu tak szerokie „czoło“, że poszczególne ciągi odbite nakładają się jeden na drugi.

Ciąg odbity bQb_1 musi przebiec dłuższą drogę, niż aPa_1 , zanim wyjdzie z kryształu i złączy się z aPa_1 . Jeżeli wykreślimy prostopadłe odległości PM i PN, to ową nadwyżkę drogi przedstawia odcinek MN.

Tak samo ciąg cRc_1 opóźnia się względem bQb_1 o tyle, co ten ostatni względem aPa_1 , ponieważ odległości kolejnych warstw są równe. Dalsze odbicia poza cRc_1 następują jedno za drugim w prawidłowych odstępach. Fala odbita przez cały kryształ jest sumą tych wszystkich odbitych fal cząstkowych. Sumowanie to mamy przedstawione schematycznie na rys. 106, gdzie krzywe, odpowiadające ciągom odbitym umieszczono jedną pod drugą, przyczem każda krzywa jest cofnięta



względem sąsiedniej górnej o odległość MN. Wszystkie te fale należy zsumować; tak np. wzdłuż linii pionowej, zaznaczonej na rys. 106, musimy dodać do siebie odcinki Oa , Ob , Oc i t. d., biorąc ze znakiem dodatnim



Rys. 106. Schemat, wykazujący że fale odbite (rys. 105) dają w sumie zero, chyba że zgadzają się z sobą dokładnie w fazie. Suma $Oa + Ob + Oc + \dots$ jest równa zeru, gdyż wśród milionów odcinków, które musimy do siebie dodać, występuje tyleż wyrazów dodatnich co ujemnych. Wyjątek stanowi przypadek, gdy wszystkie odbicia są zgodne w fazie, co na powyższym wykresie wyraziłoby się tem, że maxima wszystkich układów przypadłyby dokładnie jedno nad drugim (na jednej prostej pionowej).

te, które leżą nad odpowiednią linią poziomą, i z ujemnym — położone poniżej tej linii. Zazwyczaj suma tych wielkości będzie równa zeru, z równem bowiem prawdopodobieństwem okażą się one nad linią,

co i pod nią, a wśród milionów tych odcinków będą reprezentowane wszelkie możliwe długości, nie przekraczające oczywiście pewnego maximum. Znaczy to, że wiązki odbitej *nie*ma: składniki jej zniosły się z sobą nawzajem. Istnieje wszakże jeden wyjątek od tej reguły. Jeżeli opóźnienie (przedłużenie drogi) wynosi *dokładnie jedną długość fali*, albo 2, 3 lub wogóle jakąś *całkowitą* liczbę długości fali (tak, iż krzywe na rys. 106 przypadają dokładnie jedna nad drugą) — wówczas suma wszystkich odcinków jest wielokrotnością jednego z nich, a ponieważ mnożnik jest duży, przeto i natężenie wiązki odbitej osiąga znaczną wartość. Ilość energji odbitej nie może oczywiście przekraczać energji padającej, rachunek wykazuje jednak, iż w bardzo wąskim obszarze z obu stron kąta odbicia jest ono zupełne.

Wartość opóźnienia zależy od dwóch czynników: od kąta, pod którym padają promienie na kryształ i od odległości pomiędzy warstwami. Jeśli promienie są prawie prostopadłe do płaszczyzn, opóźnienie odpowiada podwójnej odległości pomiędzy sąsiednimi warstwami: jest to jego wartość maksymalna. Im ukośniej padają promienie, tem opóźnienie jest mniejsze; przy padaniu niemal stycznem do powierzchni kryształu staje się ono bardzo małe. Jeżeli tylko więc długość fali nie jest zbyt duża, zawsze musi znaleźć się taki kąt padania, że dla niego różnica dróg *dokładnie* równa się danej długości fali, lub kilku tym długościom; pod takim właśnie kątem występuje silne odbicie promieni.

Jeśli pierwotne promienie zawierają jedną tylko długość fali, trzeba obracać kryształ, zanim natrafi się na

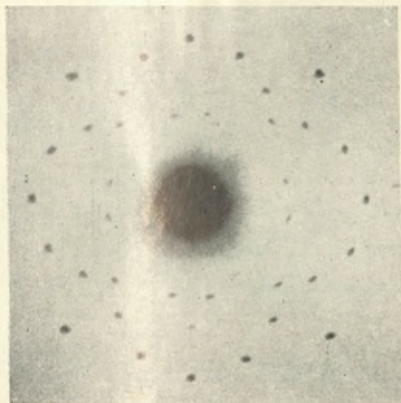
właściwy kąt. Gdy natomiast kąt padania ma wartość stałą, wówczas można otrzymać zjawisko odbicia, rzucając na kryształ wiązkę złożoną z mieszaniny różnych fal, spośród których zostanie wyodrębniona przez odbicie właściwa długość fali, reszta zaś przejdzie przez kryształ. Lord Rayleigh (starszy) zademonstrował był na odczycie w Royal Institution analogiczne doświadczenie z dziedziny akustyki; ułatwia ono zrozumienie tamtego doświadczenia z kryształami i promieniami X dzięki temu, że odbywa się w tylekroć większej skali. Fale głosowe wytwarza piszczałka o bardzo wysokim tonie; długość ich wynosi zaledwie parę centymetrów, a więc znacznie mniej niż długość fal np. głosu ludzkiego, natomiast setki milionów razy więcej od długości fali promieni X. Ton owej piszczałki jest tak wysoki, że wiele osób, zwłaszcza starszych, już go nie słyszy. Pozatem mamy kilka ekranów z muslinu, wielkości 30×30 centymetrów, umieszczonych w równych odstępach równolegle do siebie na podstawce tak skonstruowanej, że można przy jej pomocy zmniejszyć lub zwiększyć odstęp odrazu pomiędzy wszystkimi sąsiednimi ekranami (p. tabl. XXII C). Ekran y te odpowiadają warstwom na rys. 105; każdy z nich odbija niewielki ułamek padającej fali głosowej, natomiast większa część jej przechodzi swobodnie.

Jeżeli teraz ustawimy piszczałkę i ekran tak, jak to przedstawia fotografia na tabl. XXII C, wówczas może nastąpić odbicie dźwięku od ekranów. Obecność odbitej fali głosowej wykrywamy łatwo przy pomocy t. zw. „czułego płomienia”. Jest to strumień gazu świetlnego, uchodzący pod znacznym ciśnieniem z długiej, wąskiej rurki, opatrzonej zwężonem ujściem. Ciśnienie regu-

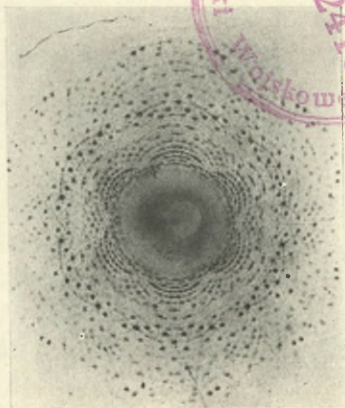
luje się tak, aby płomień był bliski przejścia w stan głośnego, burzliwego palenia się; w tych warunkach wysokie dźwięki sprawiają, że płomień kurczy się i migocze w sposób niezmiernie uderzający. Bezpośrednią przyczyną tego zjawiska są szybkie zmiany ciśnienia w fali głosowej. W doświadczeniu naszym umieszczamy czuły płomień tak, aby mógł on wykryć ewentualną falę *odbitą*, lecz osłaniamy go przed bezpośrednim oddziaływaniem piszczalki.

Można wówczas stwierdzić, że w miarę tego, jak zmieniamy stopniowo przy pomocy owej podstawki odległość pomiędzy sąsiednimi ekranami, płomień przechodzi przez kolejne fazy spokojnego i burzliwego palenia się. Wyjaśnia się to zupełnie tak samo, jak w przypadku opisanego wyżej zjawiska z promieniami X. Burzliwe palenie się świadczy, iż odbicia od wszystkich ekranów wzmacniają się, to zaś zachodzi wtedy, gdy odstęp pomiędzy nimi są takie, iż opóźnienie którejś fali odbitej względem sąsiedniej odpowiada całkowitej liczbie długości fali.

Lord Rayleigh zastosował tę analogję w celu wyjaśnienia jaskrawych barw, występujących w kryształach chloranu potasowego. Kryształy te posiadają osobliwą budowę, składają się bowiem z kolejnych warstw substancji krystalicznej, różniących się jedynie orjentacją osi optycznych. Grubość takiej warstwy jest tysiące razy mniejsza od odległości pomiędzy muślinowymi ekranami, lecz przewyższa również tysiące razy odstęp warstw, zawierających elementy sieci krystalicznej: grubość owa jest tego rzędu wielkości, co długość fali światła widzialnego. We wszystkich tych trzech przypadkach stosuje się to samo rozumowanie.

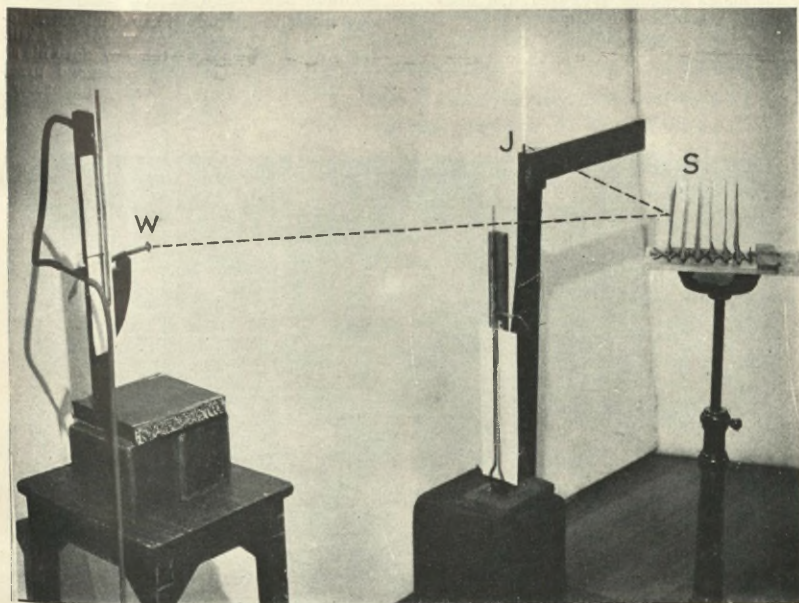


A. Obraz dyfrakcyjny promieni Röntgena przy użyciu kryształu soli kamiennej (str. 278).



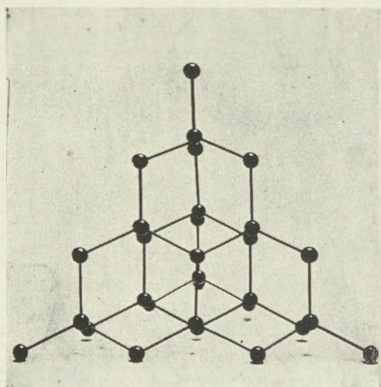
Bannister

A. Uginanie promieni X przez kaliofilit (str. 278).



C. Fotografia aparatury, demonstrowanej przez lorda Rayleigha opisaną na str. 275. W jest to piszczałka, S — ekrany a J — czuły płomień. Linia kreskowana zaznacza w przybliżeniu drogę fal głosowych, które działają na płomień. Fotografia przedstawia wygląd płomienia, gdy piszczałka nie dzwoni, lub gdy ekrany (widziane na rysunku „zboku“) nie są ustawione tak, że odbicia od nich wzmacniają się nawzajem. Dzięki specjalnemu kształtowi wylotu rurki w J, płomień nie reaguje na dźwięk, dochodzący bezpośrednio od W. Gdy odstęp między ekranami jest odpowiednio dobrany, płomień rozszerza się i kurczy do wysokości parokrotnie mniejszej od normalnej.

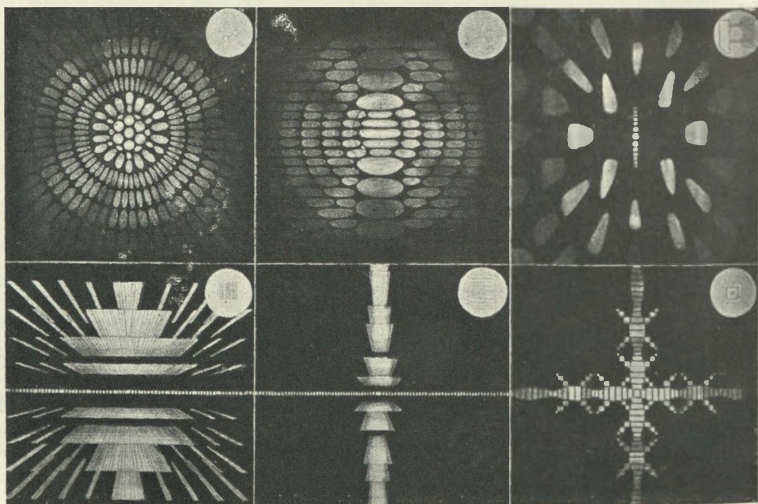
TABLICA XXIII



A. Model budowy djamentu. Kulki przedstawiają atomy węgla jedynie pod względem położenia wzajemnych, nie zaś kształtu lub rozmiarów. Odległości pomiędzy środkami sąsiednich atomów wynoszą 1,54 angströmów (t. j. 1,54 stumiljonowych części centymetra).

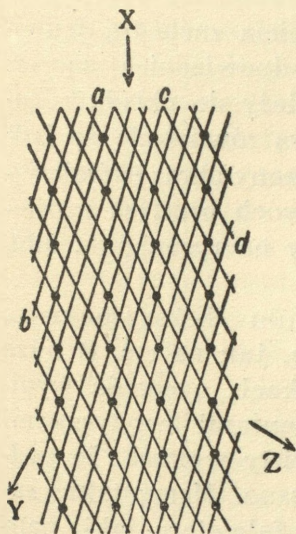


B. Ugrupowanie cząsteczek w kryształach kwasu stearynowego. Każdy zygawkowaty łańcuch przedstawia atomy węgla w jednej cząsteczce kwasu. Wzajemna odległość środków sąsiednich atomów C wynosi 1,54 angströma, podobnie jak w djamencie. Modele A i B są wykonane w różnej skali. (Grupy końcowe oraz atomy wodoru nie są zaznaczone). Ze schematu podanego przez A. Mullera z Davy Faraday Laboratory (str. 279).



C. Kilka optycznych obrazów dyfrakcyjnych Fraunhofera (zaczepniętych z Guillemina „Siły przyrody“). Światło ulega tu ugięciu przez zasłone, zawierającą prawidłowy układ drobnych otworków, jak np. przez kawałek pióra ptasiego. Oryginał w przeciwieństwie do niniejszej reprodukcji, jest barwny. Porównajmy te optyczne widma dyfrakcyjne z widmami dyfrakcyjnymi promieni X (tabl. XXII A,B).

Musimy rozpatrzyć jeszcze jedną okoliczność, zanim zdołamy zdać sobie sprawę z doświadczenia Laue'go. Należy pamiętać, że podział kryształu na zbiór warstw równoległych może być wykonany nie w jeden sposób, lecz nieskończenie wieloma sposobami. Przypuśćmy np., że rys. 107 przedstawia rozmieszczenie elementów w kryształach układu regularnego; na schemacie takim moż-



Rys. 107. Punkty czarne przedstawiają elementy podstawowe kryształu układu regularnego; skala wynosi około 100 000 000 : 1. Strzałka X oznacza kierunek padającej wiązki promieni X. W kierunku Y zachodzą odbicia od płaszczyzn równoległych do *ab*, w kierunku Z zaś — od płaszczyzn równoległych do *cd*; występują również odbicia w innych kierunkach, nie zaznaczonych na rysunku.

na dogodnie przedstawić conajwyżej przekrój kryształu z płaszczyzną rysunku. Wyobraźmy sobie, iż kryształ został podzielony płaszczyznami równoległymi do *ab*; nastąpi wówczas częściowe odbicie promieni X od tego układu. Z wiązki pierwotnej — która powinna zawierać fale najrozmaitszych długości — ulegną odbiciu w kierunku Y fale ściśle określone, mianowicie te, dla których „opóźnienie“ równa się jednej długości fali;

opóźnienie to zależy, jak już mówiliśmy, od odległości pomiędzy płaszczyznami oraz od kąta padania.

Można wszakże podzielić ten sam kryształ na warstwy, które przecinają płaszczyznę rysunku wzdłuż linii równoległych do *cd*. W tym przypadku odbicie zachodzi pod innym kątem, i promienie odbite mają inne długości fali. Biegają one w kierunku *Z*, dając inną plamkę na kliszy.

W ten sposób zatem liczne odbicia zachodzą jednocześnie, powodując powstanie odpowiednich zaczerwień na kliszy. Jeżeli kryształ należy do układu regularnego, promienie padające zaś są równoległe do jednej z krawędzi sześciianu, to utworzony obraz dyfrakcyjny jest symetryczny względem dwóch prostych prostopadłych do siebie, jak to widzimy na rysunku A, tabl. XXII.

Jeśli kryształ należy do układu heksagonalnego, otrzymujemy figurę sześcioboczną, jak na rys. B tejże tablicy. We wszystkich przypadkach zgodność wyników zaobserwowanych z oczekiwaniami teoretycznymi jest zupełna. Skąd wynika oczywisty wniosek, że podstawowe przypuszczenie jest słuszne. Mamy takie samo prawo uważać promienie X za fale eteru, jakie nam przysługuje w stosunku do światła.

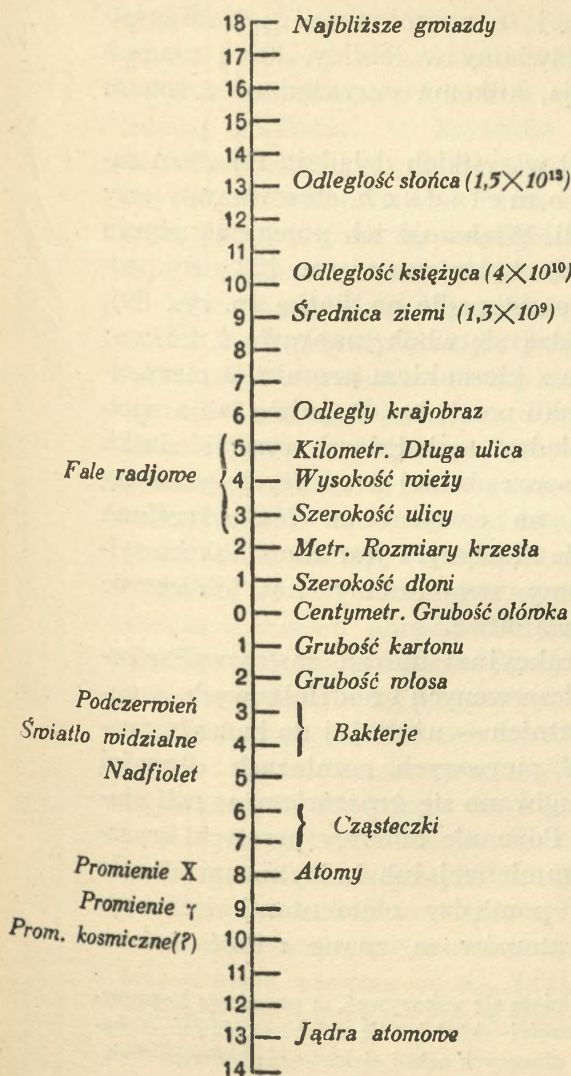
Dwa podane przykłady fotografii Laue'go (tabl. XXII A i B) okazują nadę wybitne różnice; widzimy tu ogromną różnorodność, jaką napotykamy w tego rodzaju fotogramach. Każdy kryształ ma niejako swój własny „podpis”. Niekiedy łatwo jest wyznaczyć strukturę kryształu z charakteryzującego ją obrazu; w innych razach sprawa ta jest trudniejsza, a w większej jeszcze ilości przypadków rozwiązanie zagadnienia

przekracza możliwości współczesnej techniki eksperymentalnej. Każda substancja w stanie stałym zawiera części krystaliczne, liczne zaś materiały są w całości aglomeratem kryształów; łatwo więc pojąć, iż znajomość budowy krystalicznej danej substancji pozwala często wyjaśnić jej własności. Przykłady tego znajdujemy na tablicy XXIII A i B, nie możemy jednak zając się szczegółowem rozpatrzeniem tej sprawy, gdyż badania owe rozwinęły się tak dalece, że należyty ich opis wymagałby dużej rozprawy. Musimy więc zadowolnić się stwierdzeniem, że promienie X również mogą być uważane za fale eteru.

Pod tę samą rubrykę można podciągnąć także niektóre promienie wysyłane przez ciała promieniotwórcze, mianowicie t. zw. promienie γ . Wkrótce po pierwszym doświadczeniu Laue'go wykazano, że promienie γ ulegają odbiciu od kryształu soli kuchennej zupełnie tak, jak promienie Röntgena. Jeśli więc promienie X są falami eteru, muszą być niemi również promienie γ . Te ostatnie są znacznie przenikliwsze od promieni Röntgena, mogą bowiem przechodzić przez warstwy ołowiu kilkucentymetrowej grubości, zachowując jeszcze dostrzegalną część pierwotnego natężenia.

Na przeciwległym krańcu skali znajdują się fale eteru, stosowane w radjotelefonji, a wytwarzane przy pomocy urządzeń elektrycznych. Dowód, że są one tej samej natury co światło, dał Clerk Maxwell, obliczwszy prędkość rozchodzenia się takich fal i stwierdziwszy, że równa się ona prędkości światła. Hipoteza, że światło jest zaburzeniem elektromagnetycznem, prowadzi pozatem do szeregu wniosków, które znalazły potwierdzenie doświadczalne.

Reasumując, możemy stwierdzić, iż znane są nam fale eteru o bardzo różnych długościach. Rozpoczynamy od długich na setki metrów fal, używanych w radiotelegrafji i wytwarzanych na drodze elektrycznej. Zmniejszając rozmiary generatorów można odpowiednio zredukować długość fal; w ten sposób udało się uzyskać fale długości zaledwie paru centymetrów. Poniżej rozciąga się luka, trudna—ze względów technicznych — do wypełnienia, lecz odnajdujemy wątek ponownie w dziedzinie drgań podczerwonych, o długościach fali kilkudziesięciu czy kilku mikronów. Dalej rozciąga się dziedzina światła widzialnego, o której oczywiście wiemy wielekroć więcej, niż o pozostałych obszarach; dziedzina bardzo wąska, gdyż długość fal najdalszej czerwieni nie dosięga 1 mikrona, najdalszego fioletu zaś niewiele jest mniejsza od połowy mikrona. Całość zawiera się zatem mniej więcej w jednej oktawie. Następnie spotykamy nadfiolet, którym to terminem obejmujemy zwykle długości fal poczynszyszy od graniczających ze światłem widzialnem aż do niezbyt wyraźnie oznaczonej wartości gdzieś koło 0,1 mikrona. Potem rozciąga się obszar trudny do opanowania z punktu widzenia doświadczalnego, gdyż promienie są tu silnie pochłaniane przez powietrze i wszystkie badania muszą być prowadzone w próżni. Niełatwą rzeczą było przekroczyć tę lukę i dojść do promieni X na przeciwnym jej brzegu; jednakże udało się to osiągnąć w czasach ostatnich. W dziedzinie promieni X praca doświadczalna jest znów łatwa, dzięki nowym metodom, opartym na zastosowaniu siatki krystalicznej; wreszcie dochodzimy do promieni γ o coraz większej przenikliwości i наконец — być może — do niezmiernie prze-



Tablica ta podaje względne rozmiary rozmaitych przedmiotów, jakie możemy obserwować i mierzyć. Jest to jakby zbiór „półek“, na których rozmieszczamy okazy przedmiotów różnych wielkości, od olbrzymich do niezmiernie małych. Na półce środkowej, oznaczonej 0, ulokujemy centymetr oraz grubość ołówka, reprezentującą przedmioty o rozmiarach tego rzędu. Na sąsiedniej wyższej półce umieszczamy przedmiot o rozmiarach około 10 cm; przykładem służy np. szerokość dłoni. Jeszcze wyżej będą przedmioty mierzące około metra w średnicy, np. mniejsze meble. Szerokość ulicy reprezentuje 10 metrów, wysokość wieży — 100 m i t.d. Poniżej zera, pierwsza półka zawiera coś o grubości 1 mm, np. kawałek kartonu; dalej, na niższej półce mieści się grubość włosa — i t. d. Bakterje znajdują się na różnych wysokościach na 3 i 4 półce dolnej; cząsteczki na 6 i 7; atomy — prawie na 8. Po drugiej stronie linii pionowej zestawiono w podobny sposób różne długości fali. Niektóre odległości podano liczbowo; np. odległość słońca od ziemi wynosi 15 milionów milionów cm, czyli $1,5 \times 10^{13}$; jak widzimy, przypada ona na 13 półce górnej.

nikliwych promieni „kosmicznych“, które mają do nas przybywać z przestrzeni Wszechświata i są, jak się zdaje, natury pokrewnej z promieniami γ .^{*} Wszystkie te wielkości zestawiamy w tablicy, którą uzupełniono, dla porównania, kilkoma przykładami o innym charakterze.

Krótki ten przegląd wszystkich dziedzin fal eteru zakończymy wzmianką o m e t o d a c h, stosowanych przy pomiarze długości fali. Większość ich polega na użyciu siatki dyfrakcyjnej, co objaśniono na str. 152. Gdy promień świetlny pada prostopadle na siatkę (p. rys. 69), wiązki ugięte rozchodzą się w bok, naprawo i nalewo; kąt, który tworzą one z kierunkiem promienia pierwotnego, zależy od stosunku pomiędzy długością fali a wielkością odstepu pomiędzy sąsiednimi rysami siatki. W przypadku siatki sporządzonej przy użyciu maszyny dzielniczej, ilość rys na centymetrze jest określona przez samo urządzenie maszyny, i jest znana. Skoro tylko więc wyznaczylśmy wspomniany kąt, obliczenie długości fali jest rzeczą łatwą.

Metodę siatki dyfrakcyjnej można zastosować również do promieni podczerwonych i nadfioletowych, a nawet — w czasach ostatnich — użyto jej do badania promieni Röntgena. W pierwszych pomiarach długości fali promieni X posługiwano się *kryształami* w roli siatek dyfrakcyjnych. Poznanie budowy prostych kryształów, jak np. soli kamiennej lub kalcytu, umożliwiło obliczenie odległości pomiędzy elementami sieci krystalicznej. Ciężary atomów są znane z dość dużym

* Najnowsze badania zdają się wskazywać, iż promienie kosmiczne w zasadniczej swej części składają się z promieniowań o charakterze korpuskularnym, niosących nabój elektryczny. *Przyp. tłum.*

stopniem dokładności z danych fizycznych i chemicznych. Tak np. w soli kamiennej atomy są ugrupowane w prostolinjowe szeregi; ciężar centymetra sześciennego soli jest znany, podobnie jak ciężary atomów sodu i chloru; z tych danych można wyznaczyć odległości pomiędzy atomami w kryształach (rys. 105), mierząc zaś odpowiedni kąt odbicia, obliczamy następnie długości fali użytych promieni. Bardziej szczegółowo pomiary te potraktowane są w książkach, poświęconych opisowi wspomnianych nowych metod.

Niedawno udało się zaobserwować uginanie promieni X na zwykłych siatkach dyfrakcyjnych. Światło musi przytem padać na siatkę nader u k o ś n i e, wobec ogromnej różnicy pomiędzy długością fali a odstępem sąsiednich rys w „sztucznej“ siatce dyfrakcyjnej. Przypomnijmy sobie, że doświadczenie tego rodzaju uważano w swoim czasie za zbyt trudne, aby warto było go próbować, i dlatego właśnie Laue zaproponował użycie kryształu w roli siatki dyfrakcyjnej. Jednakże ważne znaczenie takich pomiarów długości fali oraz stwierdzenie faktu, że promienie X są najściślej spokrewnione ze światłem, były przyczyną, iż wykonano dalszą — pomyślnym wynikiem uwieńczoną — próbę w tym kierunku. Być może, iż nowa metoda jest dokładniejsza od tej, która posługuje się kryształem: napewno zaś jest bardziej bezpośrednia. Warto nadmienić, że przy pomocy metody „kryształu“ można porównywać długości fali promieni X pomiędzy sobą oraz odległości atomów w kryształach również pomiędzy sobą z dokładnością o wiele większą od tej, jaką można osiągnąć przy porównaniu wielkości obu wymienionych typów z wzorcami długości.

Długość fali promieni γ można również wyznaczyć przy pomocy kryształów. Pozostają nam jedynie długie fale radjowe; dla nich wystarczy znaleźć częstotliwość, t. zn. ilość drgań w ciągu sekundy. Wspólna wszystkim falom eteru prędkość rozchodzenia się jest znana, a zatem na podstawie częstotliwości możemy obliczyć ich długość.

ROZDZIAŁ IX

FALE I KORPUSKUŁY

W POPRZEDNIM rozdziale była mowa o tem, że w doświadczeniach naszych rozporządzamy nader szerokim zakresem fal elektromagnetycznych. Niektóre spośród nich, zawarte w pewnym wąskim obszarze, są widzialne dla naszych oczu; inne wykrywać można za pośrednictwem ich działania na kliszę fotograficzną. Bardzo długie fale radjowe są „chwytane“ przy pomocy odpowiednich zespołów przyrządów elektrycznych, noszących nazwę odbiorników radjowych. O innych metodach wykrywania fal będziemy mieli jeszcze sposobność pomówić w dalszym ciągu.

Te charakterystyczne zjawiska, które skłoniły nas do uważania światła widzialnego za rodzaj fal w eterze, występują dla każdego promieniowania; w szczególności należy tu *d y f r a k c j a*, którą posługiwaliśmy się w szerokim zakresie. Można więc oczekiwać, że wszelkie inne zjawiska, stwierdzone dla pewnego typu promieniowania, będzie można odnaleźć uwydatnione mniej lub bardziej wybitnie również u innych jego rodzajów.

Istnieje pewne zjawisko, które występuje wybitnie w przypadku fal najkrótszych, słabiej zaś dla fal o większej długości: jest to tak zwane *zjawisko foto-*

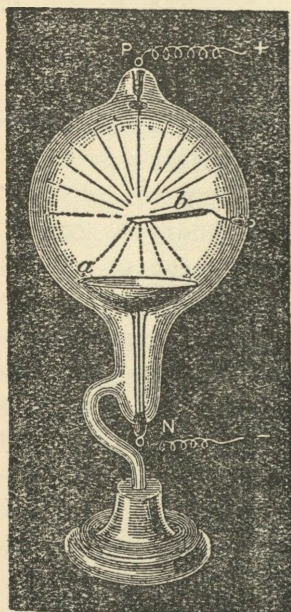
elektryczne. Tutaj to właśnie, jak i w innych pokrewnych dziedzinach, teoria falowa, która oddała nam do tychczas tyle usług, *zawodzi* i nie umie objaśnić obserwowanych zjawisk; fakty te właśnie doprowadziły fizykę do obecnego nader ciekawego stanu. W r. 1905 Einstein dał wyraz pogładowi, że teoria korpuskularna została zarzucona zbyt pochopnie.

Zjawisko fotoelektryczne

Nietrudno objaśnić, na czym polega to zjawisko. Światło, padając na materję, sprawia, iż jej atomy wysyłają elektrony; stąd też pochodzi nazwa zjawiska. Ponieważ promienie X i γ można również zaliczyć do światła, więc nazwa ta stosuje się i do efektu wywołanego ich działaniem. Emisja elektronów jest w tym ostatnim przypadku zjawiskiem nader wybitnem, dogodnem do obserwacji i pomiarów, jest więc rzeczą prostszą badać ją przy użyciu tych krótkich fal. Należy zaznaczyć, iż występuje ona dla całego obszernego zakresu długości fali, używamy zaś w doświadczeniach fal bardzo krótkich tylko z tego powodu, że są one dogodniejsze do badania efektu fotoelektrycznego niż fale dłuższe, np. widzialne, dla których zresztą ten efekt wykryto w czasach, gdy promienie X nie były jeszcze znane.

Najłatwiej chyba uzyskać można ogólną charakterystykę zjawiska fotoelektrycznego, rozpoczynając ją od rozpatrzenia, w jaki sposób powstają promienie X w lampie röntgenowskiej, oraz jakie są dalsze ich losy już nazewnątrz lampy.

Zasadnicze części lampy czy też „rury“ röntgenowskiej są następujące: a) sama lampa lub „bańka“ wykonana przynajmniej częściowo ze szkła, b) dwa przewodniki metalowe: *katoda* oraz *anoda* czyli *antykatoda*.

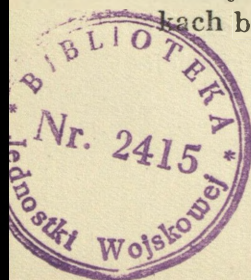


Rys. 108. Rysunek ten, podobnie jak figury 96—99, jest odbitką oryginalnej matrycy, przeznaczonej do ilustracji odczytu Crookesa w Royal Institution w r. 1879. W bańce szklanej u dołu mieści się katoda czyli biegun ujemny; u góry znajduje się biegun dodatni, czyli anoda, lecz położenie jego nie odgrywa roli. Przeszkodą, w którą uderzają promienie, służy kawałek drutu platynowego *b*; mógłby on za razem odgrywać rolę anody. Wklęśła katoda koncentruje na nim cały strumień promieni. By użyć słów Crookesa: „druć platynową nie tylko rozżarza się do białości, lecz wyrzuca iskry na wszystkie strony, co świadczy o tem, że istotnie drut ten topi się.

Doświadczenie przytoczone miało na celu okazać, iż pod działaniem promieni katodowych wywiązuje się ciepło; dopiero w 20 lat później dowiedziano się, że drut wysyła przytem promienie X. Bańka przedstawiona na rysunku ma około 15 cm wysokości.

da, czyli biegun dodatni. Obserwowaliśmy już poprzednio niektóre zjawiska, towarzyszące wyładowaniu elektryczności w takiej rurze przy bardzo niskiem ciśnieniu powietrza. Z katody wyrzucany jest strumień

elektronów, podobnie jak z ujścia rury wodociągowej wybiega strumień wody. Ten rój elektronów porusza się prostoliniowo, można go jednak odchylić przy pomocy magnesu — wywiera on działania mechaniczne i o g r z e w a ciała, na które pada. Jednocześnie miejsca bombardowane przez elektrony są źródłem promieni Röntgena. Strumień promieni katodowych nie jest bezpośrednio uzależniony od położenia bieguna dodatniego; jeżeli antykatoda bombardowana przez elektrony ma być jednocześnie anodą, musi być umieszczona przy fabrykacji lampy w odpowiednim miejscu, aby jej mógł dosięgnąć strumień elektronów. Wydaje się napozór, że biegun dodatni nie odgrywa żadnej roli, tak jednak nie jest i znaczenie jego polega na tem, iż uzupełnia on, zamyka, obwód elektryczny. On to udziela dodatniego naboju atomom i cząsteczkom, które go mają przenosić; jako stosunkowo ciężkie, owe cząstki naelektryzowane dodatnio nie osiągają ogromnych, przez swą wielkość się ujawniających prędkości elektronów w promieniach katodowych. Wyraźne boczne ograniczenie wiązki katodowej, tudzież prostoliniowy jej bieg w rurze od katody jest rzeczą nader godną uwagi. Jeśli w rurze znajdują się resztki gazu, wówczas przebieg wiązki staje się widoczny dzięki zderzeniom pomiędzy pędzącymi elektronami a cząsteczkami gazu: ślad wiązki zaznacza się w postaci wąskiej smugi świecącej. Doświadczenie wskazuje, że kształt jej zależy w znacznej mierze od postaci katody oraz samej bańki, bezpośrednio zaś od działania naboju elektrycznych, gromadzących się na ściankach bańki.



Crookes sądził, że wiązka promieni katodowych składa się z „materji promienistej“ wyrzucanej z katody.

Pogląd Crookesa był ostro zwalczany, okazało się bowiem, że promienie katodowe mogą wychodzić przez cienkie miejsca w ścianie rury nazewnątrż, w powietrzu otaczające, zaznaczając swą obecność słabem świeceniem dostrzegalnem w ciemności. Tak samo promienie te przenikały przez bardzo cienkie zastony, umieszczone na drodze ich wewnątrż samej rury. A zatem, dowodzono, promienie katodowe nie mogą składać się z cząstek naelektryzowanych, jak przypuszczał Crookes, lecz muszą być rodzajem fal. W owych czasach uważano za rzecz niemożliwą, aby jakiekolwiek cząstki materjalne mogły przechodzić — prostolinjowo — przez najcieńsze nawet blaszki spoistej substancji. Jednakże Crookes miał zupełną słuszość: J. J. Thomson udowodnił bowiem później, że promienie katodowe składają się z naelektryzowanych ujemnie „korpuskul“, jeśli użyć jego pierwotnej terminologii, czyli „elektronów“, jak je potem nazwano. Thomson zdołał zmierzyć nabój elektronu oraz jego masę i wykazał, że otrzymuje się przytem we wszelkich warunkach i przy użyciu najrozmaitszych baniek próżniowych *identyczne wartości* naboju i masy. Masa owa jest nader mała: atom wodoru, uważany dotychczas za najmniejszą cząstkę materji w przyrodzie, przewyższa pod tym względem elektron 1845 razy. Powszechne występowanie elektronów dowodzi, że należą one do podstawowych składników budowy atomów; jak wiadomo, obecnie, można uważać normalny atom za złożony z dodatniego jądra oraz z odpowie-

dniej ilości elektronów, równoważacej dodatni nabój jądrowy.

Prędkość elektronów, wyrzucanych z katody, wyznaczono zapomocą metod elektrycznych i magnetycznych, okazało się przytem, czego można było zresztą oczekiwać, że im wyższe jest napięcie elektryczne przyłożone do biegunów rury, tem szybciej biegną elektrony. Aby wyrazić tę sprawę ściślej, trzeba użyć terminów fachowych: napięcie 10 woltów wytwarza prędkość równą $1/100$ prędkości światła, 1000 woltów blisko $1/10$ tej prędkości, przy 100000 woltach prędkość elektronów nie o wiele jest mniejsza od prędkości światła. Jednakże przy najwyższych nawet napięciach prędkość elektronów nie przekracza prędkości światła, lecz w miarę wzrostu napięcia dąży coraz powolniej do tej prędkości, jak do granicy.

Nowoczesna lampa röntgenowska jest to przyrząd nader starannie obmyślony i zbudowany (tabl. XXIV). Zasadnicze części pozostały te same, lecz doświadczenie nauczyło nas, jak wielkie znaczenie ma dokładne rozplanowanie i rozważenie wszystkich szczegółów, jeśli chodzi o osiągnięcie dobrych wyników; jednakże nad sprawami temi zatrzymywać się nie będziemy.

Przejdźmy teraz do kwestji powstawania promieni Röntgena. Jak wspomniano wyżej, istnienie ich wykazał po raz pierwszy Röntgen i stwierdził, że wychodzą one z miejsca, gdzie wiązka promieni katodowych uderza o ściankę rury lub o dowolne ciało ustawione na drodze tej wiązki. Energja strumienia promieni katodowych przekształca się częściowo w energję promieni X — w daleko znaczniejszej jednak części przechodzi ona w miejscu uderzenia w ciepło. Wytwarzają

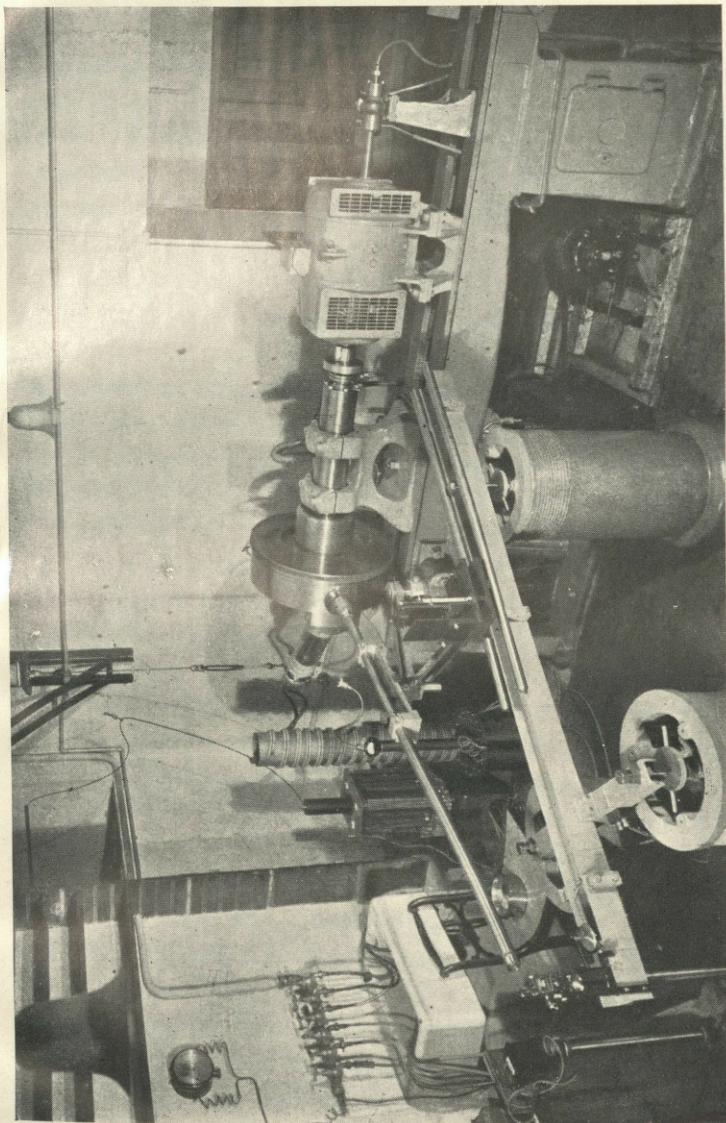
się przytem tak znaczne ilości ciepła, że przy dłuższym przepływie prądu rychło następuje przedziurawienie szklanej ścianki rury, chyba, że mamy do czynienia z jakąś bardzo słabo działającą lampą. Zazwyczaj bombardowaniu promieniami katodowymi poddaje się jakiś masywny kawał metalu o dużym ciężarze atomowym, jak platyna lub wolfram — zresztą nawet taka antykatoda może rozgrzać się do czerwoności, jeśli nie posiada odpowiedniego urządzenia do chłodzenia wodą.

Wyobraźmy więc sobie owe promienie X wybiegające na wszystkie strony z miejsca, gdzie elektrony uderzają w umieszczoną na ich drodze przeszkodę. Kierunek ich i natężenie ujawni nam klisza fotograficzna. Nietrudno było stwierdzić, jak o tem już wspominaliśmy, że rozchodzą się one prostoliniowo i posiadają zdolność przenikania — bez zmiany kierunku — wszelkich substancyj, które znajdują się na ich drodze. Okazało się również, że przenikliwość ta zależy w znacznym stopniu od warunków wytwarzania promieni. Im szybciej biegną elektrony w wiązce promieni katodowych, tem przenikliwsze są wytworzone przez nie promienie Röntgena. Jakość tych ostatnich zależy też w pewnej mierze od rodzaju ciała bombardowanego przez elektrony: im większy jest jego ciężar atomowy, tem znaczniejszy udział w powstałej mieszaninie mają promienie przenikliwe; chociaż, aby wytworzyć silnie przenikliwe promienie X na dowolnej antykatodzie, trzeba użyć elektronów dostatecznie szybkich. Antykatoda w lampach röntgenowskich, służących do celów lekarskich, wykonana jest zazwyczaj z wolframu; do analizy struktury kryształów częściej używa się

antykatod miedzianych lub żelaznych, ponieważ chodzi tu o uzyskanie promieniowania „miększego“, mniej przenikliwego.

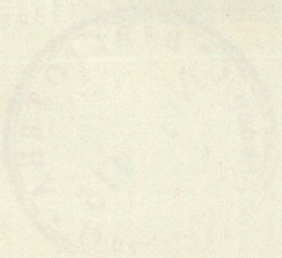
Przenikliwość promieni X jest cechą najważniejszą przy zastosowaniu ich do różnych celów praktycznych, między innymi do diagnostyki i terapii. Objąsnimy to na prostych przykładach. Promienie zbyt miękkie, t. zn. mało przenikliwe, nie dają chirurgowi dobrego obrazu złamanej kończyny; nie mogą one w dostatecznej mierze przeniknąć przez mięśnie, i na kliszy fotograficznej, umieszczonej pod kończyną prześwietlaną, części miękkie rzucają cienie prawie tak silne, jak i kości. Jeśli do lampy przyłożymy wyższe napięcie („więcej woltów“), wówczas prędkość elektronów wzrasta, promienie stają się bardziej przenikliwe i mięśnie nie dają już silnego cienia, natomiast kości, zawierające wapń i inne cięższe atomy, pochłaniają promienie jeszcze w takim stopniu, że wyraźny, dobrze zarysowany cień kości odbija od słabego cienia rzucanego przez mięśnie. Gdyby znów napięcie było zbyt wysokie, to nawet kości nie zatrzymywałyby promieni w stopniu dostatecznym i dawałyby również słabe cienie.

Analiza promieni X przy pomocy kryształów okazuje z łatwością, że przenikliwość tych promieni zależy bezpośrednio od długości ich fali. Wpływ zwiększenia prędkości elektronów bombardujących polega na skracaniu fali wytworzonych przytem promieni X. Przy wzroście natężenia wiązki promieni katodowych, t. zn. ilości elektronów padających na antykatodę w ciągu sekundy, wzrasta również natężenie promieni Röntgena: klisza fotograficzna, wystawiona na ich



Instalacja do otrzymywania promieni X o stosunkowo długiej fali i wielkimi natężeniami do celów analizy kryształów. Antykatedoda jest bryła stalowa, ważąca 2 centnary i wykonywana 2000 obrotów na minutę. Dzięki temu ruchowi, oraz chłodzeniu wodą, jest odprowadzane ciepło, które wytwarza się wskutek bombardowania promieniami katodowymi. Antykatedoda mieści się wewnątrz walca, spoczywającego na podstawie tokarni, po lewej stronie. Motor, wprawiający antykatedodę w ruch obrotowy, widoczny jest z prawej strony na tejże podstawie. Promienie X przechodzą wzdłuż długiej, wąskiej rury (na lewo) do podstawki kryształu, widocznej z lewej strony u dołu. Promienie odbite wpadają do kamery, ustawionej na suweczkach; widzieć ją nieco poniżej środka rysunku (str. 246).





działanie, zaczernia się szybciej. Rodzaj promieni X, czyli innymi słowy ich długość fali, bynajmniej nie zależy od ilości elektronów w strumieniu promieni katodowych, lecz j e d y n i e od ich prędkości. Ilość elektronów decyduje o natężeniu, prędkość — o długości fali.

A teraz przejdźmy do zjawiska fotoelektrycznego. Promienie X powodują emisję elektronów przez wszelkie ciała, na które padają, przyczem zużywa się na to ich energia. Nie chodzi tu o działanie wywierane na dane ciało, wzięte jako całość, lecz na poszczególne atomy, z których się ono składa. Promienie X mają niejako do czynienia z *indywidualnymi* atomami i nie obchodzi ich wcale to, w jaki sposób owe atomy są połączone ze sobą w cząsteczki, ani też to, jak są zespolone cząsteczki w danym ciele. Wiązka promieni X, przebiegająca przez jakiś atom, posiada pewną szansę, pewne *prawdopodobieństwo* podziałania nań i wyrzucenia elektronu. W każdym razie prawdopodobieństwo to jest bardzo małe: gdyby bowiem udawało się to promieniom X przy każdym spotkaniu z atomem, energia wiązki wyczerpałaby się bardzo prędko. Na jeden traf „pomyślny“ przypadają miliony milionów niepowodzeń. Bądź co bądź wartość tego prawdopodobieństwa nie zależy od faktu, czy dany atom jest doczepiony do innych atomów, czy też nie. Oczywiście twierdzenie to nie może być prawdziwe dla wszystkich długości fali: wiemy przecież dobrze, iż absorbcja fal ś w i e t l n y c h zależy w ogromnej mierze od składu chemicznego ciała. W przypadku promieni X jednak ten wpływ nie odgrywa najmniejszej roli. Zdołano wprowadzić wykryć kilka przykładów wpływu składu chemicznego ciała na

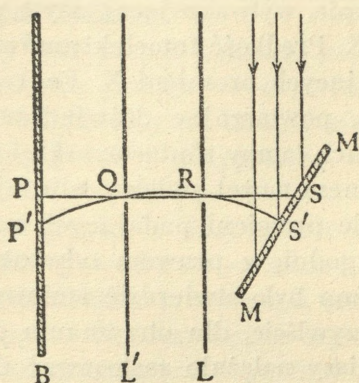
pochłanianie promieni Röntgena, lecz są to przypadki rzadkie, a ponadto sam efekt jest tak drobny, iż jego badanie przedstawia duże trudności.

Jeżeli termin „wyrwanie elektronu“ zastosujemy również w tych przypadkach, gdy skutek oddziaływania promieni X na atom ujawnia się tylko w przeniesieniu elektronu z właściwego mu miejsca w atomie na inne miejsce w tymże samym atomie, nie zaś w wyrzuceniu go *poza obręb atomu* — wówczas wyczerpaliliśmy, praktycznie rzecz biorąc, całkowicie wszystkie typy działania promieni X. Oddziałują one na materję tylko temi dwoma sposobami, i tylko na tych dwóch drogach ujawniają swoją obecność. Podobnie, jak poruszające się elektrony w lampie röntgenowskiej wzbudzają promienie X, tak obecnie te ostatnie wprawiają w ruch elektrony. Promienie X, padając na sole srebrne zawarte w kliszy fotograficznej, są dla elektronów bodźcem do działania i powodują w ten sposób istotne dla całego procesu zachodzącego w kliszy reakcje chemiczne. Przenikając przez ciało ludzkie, wywierają na tkanki działanie za pośrednictwem wyrzucanych przez siebie elektronów: sprawa przedstawia się tak, jakgdyby ciało poddane było działaniu drobniutkich pocisków wybuchających.

Rzeczą nader ważną jest zbadanie, jaką *p r ę d k o ś ć* posiadają elektrony wyrzucane przez atomy podczas działania promieni X. Oddawna już próbowano znaleźć odpowiedź na to pytanie — jedno z pierwszych doświadczeń w tym kierunku wykonał Innes w r. 1907. Sama metoda jest bardzo prosta. Promienie Röntgena padają na płytkę MM i wyrzucają z niej elektrony we wszelkich kierunkach. W dwóch ekranach L i L' znaj-

dują się małe otworki Q i R. Elektrony, przechodzące przez te otworki, padają na kliszę w P, przyczem R, Q i P leżą na jednej linii prostej. Rysunek 109 podaje schematycznie rozmieszczenie zasłon, płytki i kliszy, bez podania jednak wszystkich szczegółów aparatury, niezbędnych przy użyciu czułych klisz fotograficznych.

Jak już mówiliśmy, strumień poruszających się elektronów może być odchylony ze swego prostoliniowego toru działaniem magnesu: droga elektronów zakrzywia



Rys. 109. Schemat doświadczenia Innesa.

się w okrąg koła, dążąc do utworzenia zamkniętego obwodu. Wielkość tego wygięcia zależy od siły magnesu z jednej strony, oraz od naboju elektrycznego, prędkości i masy nośników elektryczności z drugiej. W czasie, gdy Innes wykonywał swe doświadczenia, nabój i masa elektronów były znane z pomiarów J. J. Thomsona. Innes przypuścił — zresztą słusznie — że nośnikami naboju w jego doświadczeniu były właśnie elektrony. W pewnem dokładnie określonym położeniu

wpobliżu swego przyrządu umieścił Innes magnes; wiązka elektronów, zaznaczająca swą obecność działaniem na kliszę, nie biegła obecnie prostoliniowo, lecz tworzyła łuk koła $S'RQP'$. Mierzając względne położenie Q , R i P' można znaleźć promień tego koła, znając zaś siłę magnesu, łatwo obliczyć jedyną wielkość niewiadomą, t. zn. prędkość elektronów.

Z doświadczeń tych otrzymano wynik ogromnej doniosłości. Okazało się, że elektrony wyrzucane posiadają znaczną prędkość, porównywalną z prędkością elektronów w lampie, wytwarzającej użyte w doświadczeniu promienie X . Prędkość fotoelektronów nie zależy od natężenia padających promieni X . Fakt ten stwierdzono z łatwością, powtarzając doświadczenie przy różnych odległościach lampy röntgenowskiej od płytki MM . Przy ośmiokrotnem nawet zwiększeniu tej odległości — tak, iż natężenie promieni padających na płytkę zmalało 64 razy, zgodnie z prawem odwrotnych kwadratów — nie można było stwierdzić zmiany w położeniu plamki P' . Oczywiście, dla otrzymania dostrzegalnego zaczernienia kliszy należało zastosować dłuższą ekspozycję, lecz wynika to ze zmniejszenia się ilości elektronów w wiązce. *Ilość elektronów zmalała — prędkość jednak pozostała ta sama.*

Z drugiej strony stwierdzono, że przy zastosowaniu szybszych elektronów w lampie röntgenowskiej, a zatem przenikliwszych promieni X , elektrony wyrzucane z płytki poruszają się również z większą prędkością.

Zmiana rodzaju płytki MM nie wywierała znaczniejszego wpływu. Przy zwiększeniu ciężaru atomowego, np. przy zastąpieniu srebra złotem, w wiązce pojawiało

się nieco elektronów szybszych. Prędkości elektronów zawierają się bowiem w pewnych granicach, przyczem prędkości największe przewyższają najmniejsze o jakieś 20%; otóż dolna granica prędkości pozostawała bez zmiany, górna natomiast podwyższała się nieco. W porównaniu z pozostałymi spostrzeżeniami, fakt ten — jak przypuszczano już wówczas i jak o tem wiemy obecnie — był jedynie zjawiskiem ubocznym, wtórnym.

Doświadczenia Innesa zostały potwierdzone i rozszerzone przez innych badaczy.

Tak więc cały ten zespół zjawisk przedstawia się w sposób stosunkowo prosty. Początkiem jego jest bombardowanie antykatody w lampie röntgenowskiej elektronami o prędkości — przypuśćmy — ściśle oznaczonej, aczkolwiek w praktyce nie jest rzeczą łatwą utrzymanie tej prędkości w dostatecznie ciasnych granicach. W stadium pośrednim — mamy przeniesienie energii za pośrednictwem promieni X nazewnątrz, poprzez ściany lampy. W ostatecznym wyniku otrzymujemy *znow* elektrony biegnące z prędkościami tego samego rzędu, co prędkość elektronów pierwotnych, w rzeczywistości jednak nie dorównywającami tej ostatniej. Sprawa przedstawia się tak, jakgdyby strumień elektronów ukrywał się i znikał gdzieś na chwilę, poto, by pojawić się w innem miejscu — tylko, że oczywiście nie możemy przypuścić, aby to były *te same* elektrony w obu przypadkach. Nie możemy ich przecież czemś poznać, jak na przykład moglibyśmy zabarwić przepływający strumień wody. Materiał, z którego wykonana jest lampa, płytka MM, oraz całe rozplanowanie doświadczenia, mają znaczenie niewielkie lub nie po-

siadają go wcale. Proces rozpoczyna się od elektronów, poruszających się z pewną prędkością w pewnym miejscu, kończy się zaś na elektronach, biegnących z prawie tą samą prędkością w jakimś innym miejscu.

Dobrze będzie wyobrazić sobie omawiany proces w ogromnym powiększeniu, w ten sposób bowiem uzyskamy wyobrażenie o stosunkowych rozmiarach elektronów i atomów oraz całego urządzenia eksperymentu. Przypuśćmy, że antykatoda lampy röntgenowskiej została powiększona sto milionów razy, a więc mniej więcej do rozmiarów księżycy. Bombardujące ją elektrony są jeszcze zbyt drobne, by można było je dostrzec gołym okiem. Odległość księżycy od ziemi odpowiada teraz zgrubsza odległości dzielącej w zwykłych warunkach lampę röntgenowską od obserwatora. Atomy mają w naszym modelu rozmiary wiśni lub śliwki. „Księżyc“ bombardują niezmiernie subtelne niewidzialne ciała, reprezentujące elektrony; jednocześnie z powierzchni „ziemi“ poczynają wyskakiwać, w najrozmaitszych jej punktach, podobne ciała; jedno, powiedzmy, z kamienia, leżącego na szczycie jakiejś góry w Andach, następne z kropli wody w Oceanie Indyjskim, dalsze skolei — z liścia na jakimś drzewie rosnącym w Europie i t. d. Kolejne te zdarzenia są wybitnie izolowane jedno od drugiego. Poza tem, wtórne korpuskuły, wyrzucone z „ziemi“ posiadają prędkości zawsze zbliżone do tych, z jakimi biegną „ciałka“ bombardujące „księżyc“.

Jest rzeczą jasną, że włączenie tych osobliwych zjawisk do zwykłych właściwości ruchu falowego jest zupełnie niemożliwe na gruncie teorii falowej w tem uję-

ciu, jak ją tu przedstawiliśmy. Zasadnicza trudność polega na wyjaśnieniu przenoszenia energii z jednego miejsca w inne. Nie możemy się przecież obejść bez założenia, iż takie przenoszenie w rzeczywistości zachodzi. Na pierwszy rzut oka możnaby przypuścić, że energia elektronu, który wylatuje z atomu, gdy pada nań promień X, jest zaczerpnięta z *tego właśnie* atomu, promień zaś jedynie *pobudza* atom do działania, jak to czynimy np. pociągając za spust strzelby. Gdyby jednak tak było w istocie, należałoby oczekiwać, iż każdy atom powinien wyrzucać swój pocisk z jakąś oznaczoną, jemu właściwą prędkością. Otóż stwierdzamy przeciwnie, że prędkość elektronu wtórnego *nie zależy* od natury atomu, który go wyrzuca, lecz od rodzaju „pobudzającego” promieniowania röntgenowskiego. Oczywiście niepodobna sobie wyobrazić, by prędkość pocisku zależała od tego, *kto* pociąga za spust strzelby.

Niedostateczność hipotezy „działania spustowego” promieni X uwydatnia się jeszcze wyraźniej, gdy weźmiemy pod uwagę inne doświadczenie, które można wykonać z promieniami wysyłanymi przez ciała promieniotwórcze. Rozróżniamy trzy rodzaje tych promieni: α , β i γ . Pierwsze składają się ze strumienia atomów *helu* i nie interesują nas obecnie. Promienie β są to *elektrony*, poruszające się z bardzo znacznymi prędkościami, zazwyczaj przekraczającymi prędkość promieni katodowych w lampach röntgenowskich. Promieniowanie trzeciego rodzaju — promienie gamma — jest tej samej natury, co światło lub promień X; przenikliwsze od tych ostatnich znajduje się w analogicznym stosunku do promieni β , jak promień X do elektronów

promieni katodowych. Przy przechodzeniu promieni γ przez atomy pewna bardzo nieznaczna część tych ostatnich wysyła elektrony o prędkości nader zbliżonej do prędkości promieni β tego ciała promieniotwórczego, które jest jednocześnie źródłem promieni β i γ . Cały ten proces odpowiada najwidoczniej oddziaływaniu pomiędzy elektronami i promieniami X — w istocie jest to ten sam proces, w innej tylko skali. Wszystko, co się tyczy jednego z tych przypadków, ważne być musi w pewnej mierze również w pozostałych.

Otóż doświadczenia, których tu szczegółowo opisywać nie będziemy, wykazują, iż gdy promienie γ wzbudzają promień β , ten ostatni nie wybiega z atomu w dowolnym przez „ślepy traf“ wybranym kierunku, lecz zachowuje mniej lub bardziej dokładnie kierunek padających promieni γ . Fakt ten trudno jest wytłumaczyć na gruncie „teorii działania wyzwalamącego“: czy bowiem można sobie wyobrazić, by kierunek wystrzału był w jakikolwiek sposób uzależniony od tego, z której strony podejdzie do strzelby człowiek, pociągający za spust — jeśli oczywiście funkcja jego ogranicza się wyłącznie do aktu naciśnięcia spustu?

Hipotezę o „działaniu wyzwalamącym“ należy zatem odrzucić. Promienie X muszą więc jakoś udzielać atomowi energii, którą otrzymuje elektron wyrzucony. Jak się to jednak dzieje?

W miarę tego, jak promień röntgenowski, rozpatrywany jako fala, odbiega coraz dalej od swego źródła, nagromadzenie takiego zapasu energii trwałoby bardzo długo. Atom jest tworem bardzo małym w porównaniu z rozmiarami rozszerzającej się kuli, na której mieści się energia fali; czerpałby on więc ener-

gję tak powoli, że zanim nagromadziłyby się dostateczna jej ilość, zużyłyby się zapewne i przestałyby działać lampy röntgenowskie. A przecież promienie X poczynają wyrzucać elektrony w tej samej chwili, gdy lampa zacznie działać. Co więcej, byłoby znów trudno zrozumieć, dlaczego prędkość wyrzuconego elektronu nie zależy od rodzaju atomu, z którego on pochodzi, lecz od prędkości elektronów w pierwotnym strumieniu promieni katodowych. Trudność tę ujrzymy wyraźniej, wyobrazivszy sobie znowu model w zwiększonej skali. Przypuśćmy, że z pewnej wysokości, powiedzmy 30 metrów, spadła w morze deska: woda rozbrzguje się na wszystkie strony, a po powierzchni morza rozbiega się układ kolistych fal. Mijają one po drodze okręty i łodzie, nie działając na nie zupełnie, aż wreszcie, po przebyciu tysięcy kilometrów, napotykają jeszcze jeden okręt — i efekt jest katastrofalny: ze ścian statku zostaje wyrwana deska i wylatuje w górę na wysokość 25 metrów; może zresztą 20, a może 5 metrów — wszystkie te liczby wydają się jednakowo absurdalne. A jednak mamy tu wcale dobrą analogję z próbą wyjaśnienia zjawiska fotoelektrycznego na podstawie prostej teorii falowej.

Z trudności tej istnieje jedno tylko wyjście; jest ono zupełnie proste, bezpośrednie, i zdaje sprawę ze wszystkich faktów doświadczalnych, które przed chwilą rozpatrywaliśmy. Aby powiązać z sobą te fakty, musimy uważać promień X za *coś korpuskularnego*, co zabiera dla siebie energję elektronu w lampie röntgenowskiej w tem miejscu i w tej chwili, gdy elektron ten zderza się z jakimś atomem antykatody. To „coś“ biegnie dalej jako określona całość; zdolne jest przenik-

nać po drodze ściankę lampy i inne substancje, wkońcu jednak przy jednym z niezliczonych spotkań z atomami, zachodzi proces odwrotny do tego, który dał początek promieniowi: energia zostaje przelana na jakiś elektron i ten ostatni wylatuje z atomu, jak to obserwujemy w doświadczeniu. Jaki atom spowodował pierwszą, a jaki drugą przemianę — to nie może mieć wielkiego znaczenia; widać również, iż prędkość drugiego elektronu może być równa prędkości pierwszego, lub przynajmniej zbliżona do niej. Podobnie staje się zrozumiałą związek pomiędzy kierunkami ruchu promienia X lub gamma, a kierunkiem prędkości elektronu, który je wytworzył, czy też został przez nie wyrzucony z atomu.

Jest to *teoria korpuskularna*; doszliśmy zatem do punktu, gdzie zjawiska zdają się skłaniać nas do stosowania pojęcia *korpuskuły promieniowania*, zamiast pojęcia *fali*, które dotychczas oddawało nam tak znakomite usługi.

Czemże jednak jest owa korpuskuła, od której oczekujemy spełnienia tych samych zadań? Przed wielu laty * wyraziłem był przypuszczenie, że mogłaby nią być jakaś „para neutralna“, połączenie elektronu z jakąś masą obdarzoną kompensującym ujemny nabój elektronu ładunkiem dodatnim. Para taka, jako pozbawiona naboju, powinna by przenikać przez materję bez porównania łatwiej, niż każdy z jej składników, wzięty oddzielnie, gdyż jej elektryczne i magnetyczne pole byłoby ograniczone do bardzo małego obszaru. Sądziłem był wówczas, że para taka mogłaby się składać z dwóch nośników korpuskularnych promieniowań

* *Philosophical Mag.*, październik 1907 i nast.

ciał promieniotwórczych: z elektronu i z dodatnio naelektryzowanego atomu helu. Przypuszczenie to wydało się tembardziej możliwe, że nie było wówczas jeszcze rzeczą pewną, iż promienie Röntgena są tej samej natury, co światło. Skoro jednak stało się jasne, że promienie X są falami o tyle, o ile „fallowem“ jest światło, światło zaś czemś tak dalece korpuskularnem, jak niem zdają się być promienie X — z tą chwilą nie można już było uważać światła i promieni X za zjawiska odrębne, jak tego żądałaby hipoteza „par neutralnych“.

„Paczka“ energii, która zajęła miejsce korpuskuły Newtona, nosi obecnie nazwę „fotonu“. Światło wszelkiej długości fali, promienie X, promienie podczerwone i t. d. można uważać za strumień fotonów. Pojęcie neutronu nie zostało jednak odrzucone całkowicie, ostatnio bowiem znaleziono dowody jego istnienia, jako nader ścisłego połączenia elektronu i dodatnio naelektryzowanej cząstki — protonu*.

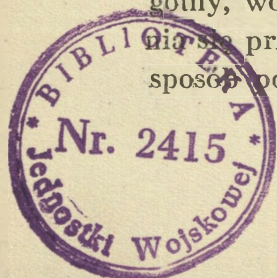
W r. 1911 C. T. R. Wilson podał niezmiernie pomysłową metodę, pozwalającą uzyskać jeszcze jedno potwierdzenie zarówno wyników doświadczalnych, o których właśnie była mowa, jak i wniosków z nich wyprowadzonych. Metoda Wilsona daje dowody przekonujące, bo naoczne. Opiera się ona na pewnych zjawiskach, które, być może, wymagają krótkiego objaśnienia wstępnego.

Przedewszystkiem trzeba zaznaczyć, iż elektron, poruszający się w gazie, może odrywać elektrony od niektórych atomów, poprzez które lub w pobliżu których

* Można również rozważać neutron jako cząstkę elementarną, proton zaś jako połączenie neutronu i elektronu dodatniego. *Przyp. tłum.*

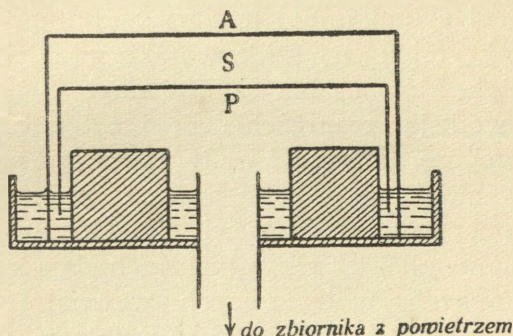
przebiega. Aby móc to zdziałać, musi on posiadać prędkość przekraczającą pewną określoną wartość — około 1000 km na sekundę. Przy mniejszej prędkości elektron nie może przedrzeć się przez gaz, lecz ulega zatrzymaniu i wchłonięciu w jednym z pierwszych spotkań z atomami. Elektron wprowadzony w ruch przez promień X wylatuje z prędkością 10 do 100 razy większą od przytoczonej wyżej; elektron zaś wyrwany z atomu przez promień γ posiada prędkość jeszcze większą. Długość drogi elektronu w powietrzu lub w innym gazie o zwykłej temperaturze i ciśnieniu mierzy się w pierwszym przypadku na milimetry lub centymetry, w drugim — na metry. W obu przypadkach tor elektronu, zarówno krótki, jak długi, zaznacza się obecnością atomów, od których zostały oderwane elektrony, tudzież atomów, do których chwilowo przyczepiły się owe elektrony oderwane. Na torze więc zakreślonym przez ów szybki elektron znajdują się atomy obdarzone nabojem zarówno dodatnim jak ujemnym. Natychmiast zaczyna działać rekombinacja: atomy, zawierające elektrony nadliczbowe, oddają je tym, które poniosły były straty. Jednakże przez parę sekund czy minut istnieją oba rodzaje atomów naelektryzowanych.

Drugą podstawą doświadczeń C. T. R. Wilsona jest dobrze znane zjawisko ochładzania się gazu przy rozprężaniu: w procesie tym zużywa się energja, którą gaz czerpie z własnego zasobu ciepła. Jeżeli gaz jest wilgotny, wówczas para wodna ma tendencję do skraplania się przy rozprężeniu. Meteorologowie tłumaczą w ten sposób powstawanie chmur i deszczu, występujących



często po nagłym obniżeniu się ciśnienia atmosferycznego.

Para wodna, skraplająca się w tych warunkach, tworzy kropelki przede wszystkim dookoła cząstek obdarzonych nabojem elektrycznym.



Rys. 110. Rysunek ten podaje schemat „komory Wilsona”. Wewnątrz komory w oszklonej pokrywie *A* przesuwą się tłok *P*. Przestrzeń poniżej *P* łączy się ze zbiornikiem powietrza, w którym ciśnienie może być zmieniane. W części *S* obserwuje się ślady promieni; część ta jest odcięta od *P* oraz od powierzchni zewnętrznej przy pomocy zamknięcia wodnego, jak w gazometrze. Jeśli ciśnienie pod *P* nieco zwiększymy, tłok *P* przesuwą się ku górze, np. do położenia zaznaczonego na rysunku. Gdy teraz obniżymy nagle ciśnienie poniżej *P*, tłok spada z głuchym łoskotem; powietrze w *S* rozpręża się i oziębia. Jeżeli w *S* są obecne ślady torów elektronów lub cząstek α , mgła osiada na nich i można je sfotografować przy zastosowaniu odpowiednio silnego oświetlenia.

Metoda doświadczenia Wilsona jest teraz zupełnie jasna. Jeśli w wilgotnym gazie, który poddamy nagłemu rozprężeniu, znajdują się tory elektronów wraz ze swymi naelektryzowanymi „odłamkami”, to para wodna skropli się przede wszystkim w obrębie torów; przy-

odpowiedniem oświetleniu tory te uwydatnią się na ciemnem tle w postaci wąskich smug jasnych. W ten sposób można więc uwidocznic *tory pojedynczych elektronów*.

W zasadniczych swych częściach aparatura Wilsona jest niezmiernie prosta (rys. 110). Składa się ona z metalowej cylindrycznej komory o średnicy kilkunaśtu cm, zakrytej u góry szklaną pokrywą. Dno komory stanowi tłok, który można obniżyć nagle o żądany odciniek, powodując rozprężenie się i oziębienie powietrza w komorze. Mała ilość wody utrzymuje w niej powietrze w stanie nasyconym parą. Promienie badane można wpuszczać przez odpowiednie okienka w ściankach komory, albo też mogą one pochodzić z ciał promieniotwórczych umieszczonych wewnątrz komory.

Na tabl. XXV i XXVI widzimy przykłady „fotografij Wilsonowskich“. Widać z nich odrazu, że ślady, które zawdzięczamy działaniu promieni X, zaczynają się i kończą wewnątrz komory. Pokrzywione i nieregularne kształty tych torów są wynikiem nieustannych odchyień, jakim ulegają elektrony, przedzierające się poprzez tłum atomów gazu. Niekiedy zagięcia są nader ostre: w tych przypadkach elektron przeniknął był już na pewną odległość w głąb atomu, zderzywszy się z nim niemal centralnie — elektron zbliżył się w ten sposób do jądra bardziej niż zazwyczaj, obiegłszy je szybko dokoła, podobnie jak kometa, która znalazła się w pobliżu słońca. Nierównomierny, jakby złożony z oddzielnych punkcików, wygląd śladów wynika z niejednakowego w różnych przypadkach oddziaływania poruszających się elektronów na atomy. Niekiedy zostaje wyrzucony pojedynczy elektron, w innem miej-

scu cała grupa, jeden blisko drugiego, kiedy indziej znów wyrwanie elektronu przez elektron pierwotny odbywa się z taką gwałtownością, że ów elektron oswobodzony zdoła sam, dzięki uzyskanej energii, oderwać kilka elektronów od atomów, które po drodze napotka. W miarę tego, jak elektron zbliża się do kresu swej drogi, działanie jego staje się coraz energiczniejsze: wskutek zmniejszania się prędkości coraz dłużej przebywa on w każdym napotkanym atomie, sprawiając coraz to poważniejsze skutki. W początkowych częściach toru przenika on dzięki znaczniejszej prędkości szybciej poprzez atomy i wyrządza im mniej szkody. Widać to wyraźnie na fotografii śladów promieni β na tabl. XXV C; prędkość ich jest niekiedy tak wielka, że kropelki mgły zrzadka jedynie rozsiane są na prostolinjowym wówczas torze, tak iż nieraz wprost trudno go dostrzec. Zwróćmy jeszcze uwagę na to, że im przenikliwsze są promienie X, tem dłuższe tory zakreślają wyzwolone przez nie elektrony.

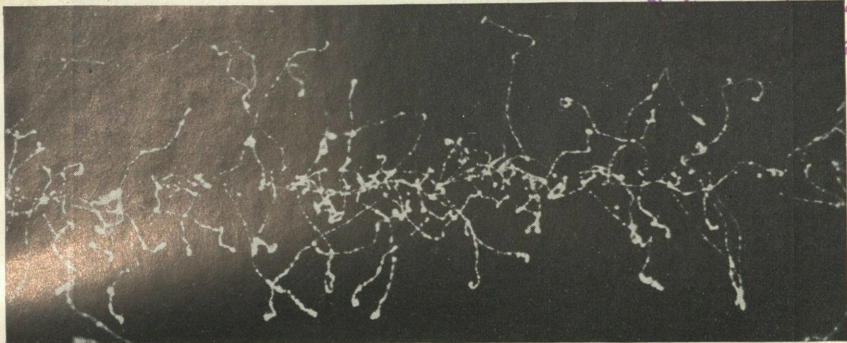
Widzieliśmy już poprzednio, że promienie nadfioletowe mogą rozbroić przewodnik naelektryzowany ujemnie: działanie to jest i d e n t y c z n e z wprawianiem w ruch elektronów przez promienie X. Światło nadfioletowe wyrzuca elektrony z atomów, na które pada; prędkość tych elektronów jest o wiele mniejsza i samo zjawisko można zaobserwować jedynie w sprzyjających warunkach. Elektrony poruszają się tu tak powoli, że *rodzaj* materji naświetlonej odgrywa zasadniczą rolę. Różne substancje wywierają różnej wielkości siły elektryczne — zresztą nieznaczne — przeciwdziałające odrywaniu elektronów. Siły te są o wiele z a m a ł e, aby przeszkodzić działaniu promieni X, w przypad-

ku światła natomiast mogą one zatrzeć typowy obraz zjawiska fotoelektrycznego. Tak np. czysta powierzchnia płytki cynkowej traci nabój ujemny z łatwością, gdy tymczasem przy zanieczyszczeniu jej przez dłuższe działanie powietrza efekt zanika niemal całkowicie.

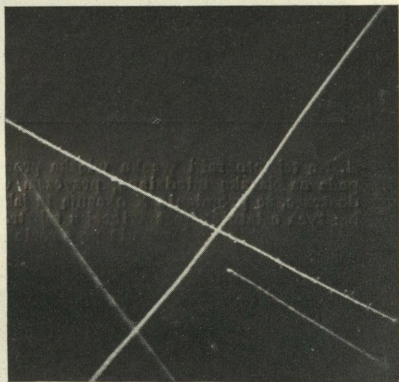
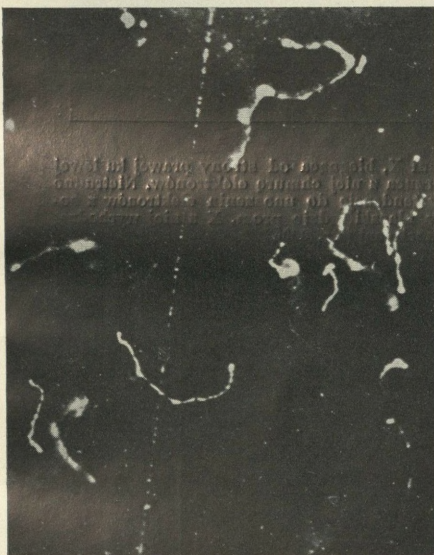
Dłuższe fale świetlne wywierają niewątpliwie skutki analogiczne, jak fale krótsze. I one także mogą oddziaływać na pojedyncze elektrony wewnątrz atomów, lecz energia przeniesiona nie wystarcza w tych przypadkach do wyrwania elektronu z więzów atomowych. Być może, dlatego właśnie *nie widzimy* promieni podczerwonych, gdyż czułość oka na światło zdaje się zależeć od działań natury elektrycznej, polegających na przesunięciach elektronów. Podobnie można przypuszczać, iż fale bardzo krótkie — nadfiołkowe i t.d. — są szkodliwe dlatego, że elektrony, wprawione przez nie w ruch, uzyskują zbyt wielkie prędkości i wywierają zbyt gwałtowne działania. Te same powody decydują o tem, że klisza fotograficzna reaguje silnie na fale krótsze, a jedynie z trudnością daje się uczulić również na fale podczerwone.

Przedstawiony wyżej obraz wzajemnych oddziaływań elektronów oraz różnych odmian promieniowania nosi, w swych ogólnych zarysach, cechy prostoty i jasności. Elektron zostaje wprawiony w ruch w lampie röntgenowskiej i zderza się z jakimś atomem antykatody: energia elektronu przenosi się na coś, co odniedawna nosi miano *fotonu*. Ten ostatni biegnie po linii prostej, przenikając po drodze różne substancje w stopniu mniejszym lub większym, zależnie od swej energii. Wcześniej czy później owo przeszywanie i przenikanie

B.



C.

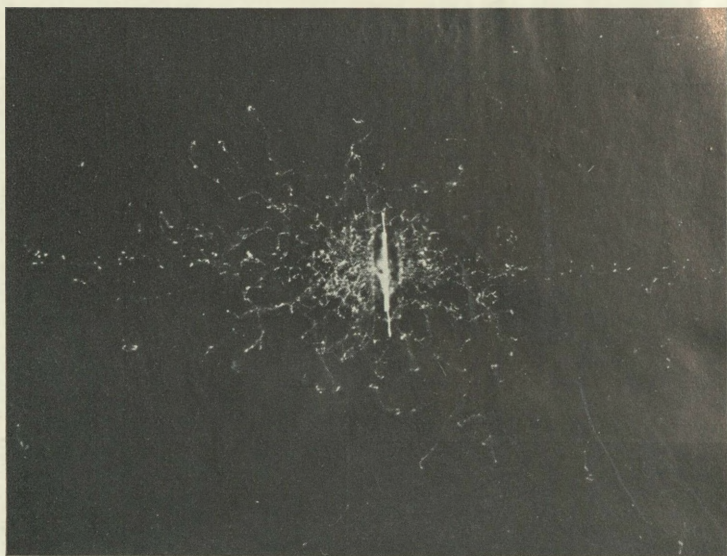


A. Ślady cząstek α —atomów helu—których drogi są niemal na całej swej długości dokładnie prostolinijowe. Kropelki mgły są tu tak liczne i tak bliskie sobie, że ślady te mają wygląd ciągłych białych linii. Cząstki α są wyrzucane przez ciała promieniotwórcze (str. 306). B. Ślady powstające przy przejściu promieni Roentgena. Same te promienie nie są widoczne na fotografii; przebiegają one w postaci wąskiej prostolinijowej wiązki wpoprzek zdjęcia, na którym wszakże nie

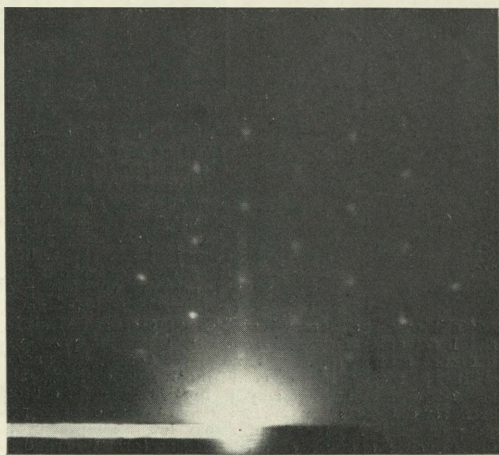
występują ślady prostolinijowe, jak to widać np. na fotografii C niniejszej tablicy. Ślady widoczne na fotografii B zawdzięczamy elektronom, wyrzucanym przez promienie X z niektórych napotkanych po drodze atomów. Kręty kształt tych torów jest nader charakterystyczny; elektrony są zbyt lekkie, by mogły zachować kierunek swego biegu, jak promienie α , przy nieustannem zderzaniu się z atomami. Mamy tu ilustrację faktu, o którym była już mowa, że działania promieni X zawdzięczamy właśnie ruchowi wyzwolonych przez nie elektronów.

Na zdjęciu promienie X biegną od strony lewej ku prawej (str. 306). C. Mamy tu kilka oddzielnych śladów; niektóre z nich są torami bardzo szybkich elektronów, promieni β . Na małej części swej drogi, widocznej na fotografii, przebieg ich jest prostolinijowy. Promienie X biegną od góry zdjęcia ku dołowi. Jeden ze śladów zawiera tak mało kropelek mgły, iż jest ledwo dostrzegalny (str. 307).

TABLICA XXVI



A. Na tej fotografii wąska wiązka promieni X, biegnąca od strony prawej ku lewej pada na blaszkę miedzianą, przyczem wyrzuca z niej chmurę elektronów. Nietrudno dostrzec, że promienie X okazują tu jakby tendencję do unoszenia elektronów z sobą: tych ostatnich jest więcej z tej strony blaszki, gdzie prom. X z niej wychodzą, niż po stronie przeciwnej (str. 300).



B. Dyfrakcja elektronów (G. P. Thomson). Strumień elektronów pada na powierzchnię kryształu, klisza fotograficzna zaś ustawiona była tak, aby trafiły na nią wiązki ugięte (str. 310).

atomów kończy się spotkaniem fatalnem: foton znika jako taki, energję zaś unosi z sobą znów jakiś inny elektron. Elektron ten w locie swym traci energję — foton temu losowi nie podlega — wskutek odrywania elektronów od atomów, przez które przechodzi. Może się zdarzyć, iż w jednym z tych spotkań straci on resztę swej energji, tworząc nowy foton i t. d. Ostatecznie cała energja ulega rozproszeniu w postaci ciepła lub zużyciu na procesy chemiczne. Niekiedy zdarza się, iż spotkania owe nie są tak proste: energja fotonu lub elektronu może ulec w jednym zderzeniu *p o d z i a ł o w i* pomiędzy obu partnerów; jednakże te uboczne raczej zjawiska, jakkolwiek niezmiernie interesujące i ważne, muszą pozostać poza ramami niniejszego krótkiego szkicu. Rzeczą zasadniczą jest dla nas to, że istnieją dwa twory — przyczem jeden z nich jest obdarzony nabojem, — które mogą przenosić energję w przestrzeni, mogą oddawać ją po pewnym czasie, każdy na swój sposób — i wreszcie mogą wymieniać z sobą nawzajem swe zasoby energetyczne.

Przytoczona koncepcja światła we wszystkich jego postaciach jest oczywiście niezgodna — przynajmniej napozór — z teorią falową, która oddała i oddaje jeszcze tak wielkie usługi w nauce. Zanim jednak zajmemy się rozpatrzeniem tej sprzeczności, musimy posunąć się nieco dalej w naszych dotychczasowych rozważaniach, przyczem napotkamy jeszcze o wiele więcej kwestyj, domagających się wyjaśnienia.

Światło w swych różnorodnych formach zachowuje się czasami jak *f a l e*, czasami zaś jak *k o r p u s k u ł y*; otóż, czy nie może zajść przypadek taki, że twory, które *przywykliśmy* traktować jako *korpuskuły*, w pew-

nych okolicznościach będą zachowywały się jak *fale*?

Doświadczenie okazuje, że i taka dwoistość rzeczywiście istnieje. Fakt ten nietrudno jest zademonstrować przy użyciu odpowiedniej aparatury, jakkolwiek dopiero w ostatnich latach zdano sobie sprawę, że dodatni wynik takiego doświadczenia jest możliwy, i po wielu poszukiwaniach obmyślono najbardziej odpowiedni jego schemat. Przy przejściu wąskiej wiązki *elektronów* przez *k r y s z t a ł* pojawia się charakterystyczny obraz *dy f r a k c y j n y*, zupełnie analogiczny do obrazu otrzymanego za pośrednictwem promieni X. Na rys. B, tabl. XXVI widzimy przykład ugięcia *elektronów*, zaczerpnięty z pracy G. P. Thomsona. *Elektrony* przenikają w materję jedynie na bardzo małą głębokość, tak iż należy tu posługiwać się niezmiernie cienkimi błonkami krystalicznymi. Zjawiska tego samego rodzaju otrzymuje się również przy *o d b i c i u* *elektronów* od płytki krystalicznej. Po przewyciężeniu trudności technicznych efekty omawiane są zupełnie wyraźne: *elektrony zachowują się tu jak fale*.

Zwróćmy się wkońcu do samego *atomu*, o którym przecież nikt nigdy nie pomyślał nawet jako o czemś różnem od materjalnego ciała. Doświadczenia z atomami są trudniejsze, okazuje się jednak, że i w tym przypadku strumień atomów, padający na kryształ, tworzy po odbiciu obraz dyfrakcyjny. Wszystkie więc elementy podstawowe, z których zbudowany jest świat materji, ujawniają tę *dwoistość*: każdy z nich, zależnie od okoliczności, może zachowywać się jak *korpuskuła*, albo też jak *fala*. Wprowadzone przez nas rozgraniczenie pomiędzy materją i promieniowaniem przestaje

być różnicą jakości i przechodzi raczej w różnicę ilościową.

W powyższym krótkim szkicu pominięto z konieczności wiele faktów doświadczalnych oraz związków i analogij teoretycznych, które pozwoliłyby na skreślenie obrazu o śmielszych zarysach i bogatszego w szczegóły. Przestrzeń i czas jednakże — w prozaicznym znaczeniu tych słów — stawiają nam tu granice.

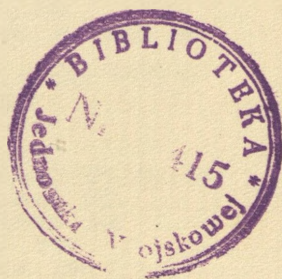
To rozszerzenie naszego poglądu na naturę rzeczy jest niewątpliwie jednym z najważniejszych wyników najnowszych badań. Niepodobna było przewidzieć istnienia owej podstawowej powszechności i jednorodności. Zniknięcie mgieł ukazało w odsłaniającym się przed nami widoku łączące ogniwa i podobieństwa tam, gdzie, jak sądziliśmy, występują jedynie przedziały i różnice. Światło widzialne i niewidzialne, promienie X, promienie ciał promieniotwórczych, elektrony, sama materja wreszcie — mają, jak się obecnie okazuje, wspólne własności i powinny być zespolone w jedność — w jakiś sposób, który dotychczas jeszcze nie całkowicie pojmujemy. Najwybitniejszym brakiem w naszym ujęciu sprawy jest trudność zrozumienia natury czegoś, co może w pewnej chwili być pomyślane jako fala, w następnej zaś jako korpuskuła. W jaki sposób mamy sobie wyobrazić pozorną tę sprzeczność?

Być może, doszliśmy tu do punktu, gdzie wyborem sposobu wyrażania się kierują osobiste skłonności. Faktem jest, że pewna ilość zjawisk przyrody może być ujęta najlepiej na gruncie teorii falowej, inny zaś, równie ważny i uderzający zbiór zjawisk, może być wyrażony najjaśniej przy pomocy terminów teorii korpuskularnej. Otóż, jak mówi Jeans, nie mamy pra-

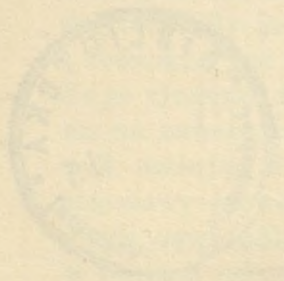
wa oczekiwać, że zawsze zdołamy wyrazić nowe zjawiska i nowe pojęcia w terminach już w danej chwili używanych. Zastosowanie przez nas pojęcia fali oraz korpuskuły jest poprawne i dozwolone w odpowiednim dla tych pojęć miejscu; gdybyśmy rozporządzali lepszymi obrazami, lepiej może umielibyśmy unikać sprzeczności. I obecnie nawet, rozwój nowej mechaniki falowej okazuje, w jaki sposób możemy stopniowo zdążać do poprawy położenia. Gdy poryw wiatru wzbudzi fale na ograniczonym obszarze powierzchni morza, wówczas posuwają się one naprzód jako pewna grupa, jako odrębna całość. Prędkość grupy, wziętej w całości, nie jest identyczna z prędkością fali wewnątrz niej; fale przesuwają się nieustannie od tyłu do czoła grupy i zanikają tutaj stopniowo. Mamy tu dwie rzeczy odrębne: grupę fal jako całość i poszczególne fale wewnątrz grupy. Posuwająca się naprzód grupa fal zawiera pewien zasób *energji*; fale jej zaś, jeśli drogi ich przetną się ze sobą, okażą wszelkie zjawiska *interferencji*. Mamy tu więc analogję z fotonem pod obu charakterystycznymi dlań względami. Próby ujęcia własności promieniowania przy pomocy nowej tej metody doprowadziły już do nader pomyślnych wyników.

Jednakże jest rzeczą oczywistą, iż nie możemy kazać tego zjawiska i wynikających zeń wniosków wtłoczyć raz na zawsze w ramy dziś stosowanych pojęć. Whewell, malując w swej „Historji nauk indukcyjnych“ stopniowy rozwój falowej teorii światła, wskazuje, że każde nowe odkrycie w optyce mieściło się doskonale w ramach schematu, który dlań przygotowała teoria, i podkreśla, że jest to nieomylna oznaka teorii prawdziwej, różniąca ją od teorii błędnej; korpuskular-

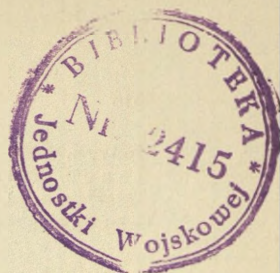
na teoria Newtona musi na zawsze ustąpić miejsca teorii falowej. Bystry ten myśliciel nie przewidział był załamania się nieprzerwanego ciągu sukcesów tej ostatniej teorii. Obie teorie dawne, jak niewątpliwie i nowa mechanika falowa, czy wreszcie koncepcje przyszłe, jeszcze nie powstałe, odgrywają jedynie rolę *więzów*, które łączą ze sobą grupy zjawisk, pozwalają rozumować jaśniej i wytyczać nowe kierunki badań. Jeśli, jak w omawianym tu przypadku, napotykamy dręczące umysł sprzeczności—muszą one być wynikiem niedoskonałości naszych teoryj i obrazów; nie są też potrzebne nadmierne wysiłki w poszukiwaniach ich rozwiązania. Przyjdzie ono w swoim czasie, gdy dalsze badania pogłębia naszą wiedzę o zjawiskach i pozwolą nam spojrzeć na nie z wyższego punktu widzenia. Tymczasem zaś poznaliśmy cudowną ogólną zasadę, która obejmuje i łączy wszystkie postacie promieniowania, wszystkie rodzaje materji. Mamy zaiste prawo powiedzieć, że Wszechświat utkany jest ze *światła*, jeśli słowu temu przypiszemy pełne jego znaczenie, które przed nami teraz się odsłania.



The first of these is the fact that the United States is a young nation, and its history is a history of growth and expansion. The second is the fact that the United States is a nation of immigrants, and its history is a history of the struggle for assimilation and the creation of a new American identity. The third is the fact that the United States is a nation of free men and women, and its history is a history of the struggle for freedom and the expansion of the rights of citizenship.



The fourth is the fact that the United States is a nation of opportunity, and its history is a history of the struggle for the realization of the American dream.



SKOROWIDZ

Achromatyzm, 118
Alfa cząstki, 239
Andrade, prof. E. N., tabl.
XV A
Antocjanina, 137
Antoksantyna, 140
Antykatoda, 287
Appleton, prof. E. V., 90
Astygmatyzm, 66

Babinet, 179
Bakterje, 124 i tabl. XIII B
Barnard, J. E., tabl. XII B
Barw, dotyczące złudzenia, 116
Barw widzenie, 109
Barwa, morza, 171
Barwa, nieba, 165
Barwniki, 139
Barwy dopełniające kwiatów,
136
Barwy, ślepotą, 113
Basen falowy, 6
Baza (w kryształach), 264
Beta promienie, 299
„Białe” światło, 107
Bidwell, Shelford, 70
Błękit nieba, 168
Błona bańki mydlanej, 157

Cechy światła, 101, 185
Chlorofil, 134
Cięż na mętnej wodzie, 173
Crookes, 256, 287
Cyrkon, 96

Dalton, 113
Diamant, 92

Długości fali, ich zakres, 102
Dollond, 122
Dopełniające barwy, 113
Dopplera zjawisko, 244
Drgania, atomów i cząsteczek
133
Drgania, świetlne, poprzeczne,
202
Dwuoczne widzenie, 33
Dyfrakcja, p. Uginanie
Dyfrakcyjna siatka, 150

Elektronów uginanie, 310
Elektrony, 289
Eozyna, fluorescencja, 251
Eriometr, 182
Eter, 21

Fale i korpuskuły, 285
Fali postać w kryształach, 194
Falowa teoria, 3
Farby (pigmenty), 105, 109
Fluorescencja, 249
Fotoelektryczne zjawisko, 286
Foton, 308
Fraunhofer, tabl. XXIII C
Fresnel, 202

Galileusz, 231
Gamma promienie 279, 280, 299
Gwiazd migotanie, 245
Gwiazd odległości, 224
Gwiazd ruchy, 243
Gwiazd widma, 234

Halo p. Wieńce,
Hel, 239
Huygens, 8, 187 i nast., 196 i nast.

Indygo, 140
Innes, 294
Interferencja, 155
Islandzki szpat, 188, 207

J e a n s J., 229, 311
Jednostka podstawowa w budowie kryształu, 264

Katoda, 256
Kennelly-Heaviside'a warstwa, 90
Korpuskularna teoria promieni X, 301
Korpuskularna teoria światła, 8
Kryształy a promienie X, 262 i nast., 285
Księżyc, i słońce, ich odległości, 228
Księżyc, na horyzoncie, 71

L a u e, von, 225
Laue'go fotografie, 278
L o c k y e r, 239
Luneta, 62

Magiczne zwierciadło, 40
M a l u s, 200
M a x w e l l, Clerk, 279
Migotanie gwiazd, 245
Mikroskop, 62
Miraż, 87
Molekularne rozpraszanie światła, 167

Nadfiolkowe promienie, 247
Nadfiolkowych promieni działanie na przewodniki naelektryzowane, 252
Nadfiolkowe promienie, fotografia przy ich pomocy, 124
N e w t o n, I z a a k, 8, 187
Newtona badania widmowe 97
Newtona teleskop, 121
Niewidzialne promieniowania, 247
Nikol, 213

Obrazy, 23
Odbicie światła, 12
Odbicie całkowite wewnętrzne, 83
Odbicie na powierzchniach krzywych, 25
Odbicie na powierzchniach płaskich, 14
Odbicie promieni X przez kryształy 272
Odległości, gwiazd, 224
Odległości, księżyca i słońca, 228
Odwrócenie linii widmowych, 240, 242
Ogniskowa, 50
Oko, 53
Oko, optyczne wady, 55
Olejne malarstwo, 106
Otworek mały jako przyrząd optyczny, 34

Podzerwień, fotografia w p., 247
Polaryzacja, jako wynik budowy kryształu, 205
Polaryzacja światła, 185
Polaryzacja światła nieba, 216
Połysk, 38
Poprzeczne drgania świetlne, 202
Powiększenie, 61
Półcień, 37
Promienie X, p. Röntgena promienie
Pył, obrazy dyfrakcyjne, 180
Pył, powietrze wolne od p., 19

R a m a n, C. V., 172
R a y l e i g h, lord, 170
R a y l e i g h, lord, (starszy), 168, 275
Refrakcja atmosferyczna, 81
Rezonansu zasada, 127
Rozpraszanie światła, 17
R ö m e r, 231
Röntgen, 255
Röntgena promienie, 255, 290
Röntgena promienie i kryształy, 262 i nast.

Röntgenowskie lampy, 290
Ruchu złudzenia, 74

Sénarmont, 208

Siatkówka, 44

Siatkówka, obraz odwrócony
na niej, 57

Soczewki, ich działanie, 48

„Spust”, hipoteza działania pro-
mieni X, 299

Stearynowy kwas, tabl. XXIII B

Stereoskopowe działanie, 33

Stirlinga złudzenie, 71

Tablica rozmiarów 281

Teleskop, 62

Tęcza, 125

Thomson, J. J., 289, 295

Thomson, prof. G. P., 310

Trwanie obrazów, 76

Tyndall, 85, 169, 186

Uginanie, 149

Uginanie promieni X w kry-
ształach, 263, 282
wykres, 151

Wewnętrzne całkowite odbicie.
83

Whewell, 312

Widmowa analiza, gwiazd, 234

Widmowa analiza, słońca, 237

Widmowe linje, ich odwrócenie,
240, 242

Widzenie, 30

Widzenie dwuoczne, 33

Widzenie, trwanie wrażeń
światlnych, 76

Wieniecokoła księżyca, 181

Wieniec (halo), 173

Wilson C. T. R., 303

Wklęsłe zwierciadło, 29

Woda, pozorna głębokość, 80

Wodne farby, 105

Wypukłe zwierciadło, 27

X promienie, p. Röntgena pro-
mienie

Young, Tomasz, 157, 182, 202

Zakres długości fali, 120

Załamanie światła, 45, 77

Załamanie światła w atmosferze,
p. Refrakcja atmosferyczna,

Złudzenia barwne, 116

Złudzenia optyczne, 69

Złudzenia ruchu, 74

388



398

WYDAWNICTWA „MATHESIS POLSKIEJ”

Z DZIEDZINY NAUKI I TECHNIKI

Biblioteka popularno-naukowa

- Tom 1. NIEBO. Astronomja dla laików. Napisał Sir James Jeans. Przetłóżył *Dr Wł. Kapuściński*. Wydanie drugie. Str. XII, 196, 47 tablic i mapy nieba.
- Tom 2. NOWE DROGI NAUKI Kwanty i materja. Napisał Dr Leopold Infeld, doc. Uniw. J. K. Str. X, 283, 27 fig. w tekście i na tabl. oraz 3 portr. W opr. pl. zł 11,60.
- Tom 3. CZŁOWIEK USTÓKROTNIONY. Dzieje cywilizacji na wesóło Napisał Hendrik van Loon. Przetłóżył *P. Hulka-Laskowski*. Str. VIII, 230. Ze 181 rys. autora. W opr. pl. zł 11,60.
- Tom 4. ZAGADNIENIA WSPÓŁCZESNEJ NAUKI. Indeterminizm. Zależność przyrodoznawstwa od środowiska. Napisał prof. M. Planck i prof. E. Schrödinger, laureaci Nobla. Przetłóżył *E. Poznański*. Str. VIII, 93. Z 3 portr. W opr. pl. zł 6,20.
- Tom 5. ŻYWE MASZYNERJE. Napisał prof. A. V. Hill, laureat Nobla. Przetłóżył Prof. *Dr J. Dembowski*. Str. XVI, 222 z 105 fig. w tekście oraz na 24 tabl. W opr. pl. zł 11,60.
- Tom 6. W POSZUKIWANIU ISTOTY ŻYCIA. Napisał Dr Jan Dembowski, prof. Uniw. S. B. Str. XII, 356 z 98 fig. i 8 tabl. W opr. pl. zł 14,—.
- Tom 7. STARE RZEMIOSŁA A NOWA NAUKA. Napisał Sir W. H. Bragg, laureat Nobla. Przetłóżyła inż. *M. Kubaszevska*. Str. XII, 218 z 59 fig. i 41 tab. W opr. pl. zł 12,—.
- Tom 8. ŚWIAT KRYSTAŁÓW. Napisał Dr Z. Weyberg, prof. Uniw. J. K. Str. XII, 298 z 250 tabl. i portr. autora. W opr. pl. zł 12,—.
- Tom 9. ŚWIAT DŹWIEKÓW. Napisał Sir W. H. Bragg. Przetłóżył i uzupełnił inż. Dr *J. Roliński*. Str. XII, 244 z 124 fig. W opr. pl. zł 12,—.
- Tom 10. ŚWIATŁO. Napisał Sir W. H. Bragg, Przetłóżył *Dr Wł. Kapuściński*. Str. XII, 320 z 110 fig. i 26 tabl. w tem 2 kolorowe.
- Tom 11. ZIEMIA. Fizyka Ziemi, mórz i atmosfery. Napisał Dr Edward Stenz. Str. XII, 312 z 66 fig. i 26 tabl.
- Tom 12. KLASYCZNE OBLCZE NATURY. Napisał Dr L. Wertheinstein, prof. W. W. P. Bogato ilustrowane.
- Tom 13. MÓZG I JEGO MECHANIZM. Napisałi prof. I. P. Pawłow, prof. Ch. S. Sherington i prof. E. D. Adrian, laureaci Nobla. Przetłóżyli, wstępem oraz objaśnieniami zaopatrzyli Dr *J. Konorski* i Dr *S. Miller*. Str. XII, 173. Z 3 portretami. W opr. pl. zł 8,—.
- Tom 14. BIOLOGJA. Napisałi prof. J. B. S. Haldane i prof. J. Huxley. Przetłóżyła Dr *L. Lubińska*. Z 123 fig.

Dalsze tomy w przygotowaniu.

WYDAWNICTWA „MATHESIS POLSKIEJ”

BIBLIOTEKA „MATHESIS POLSKIEJ”

Wydawana przez Stanisława Warhaftmana

Tom 1 i 2.

DZIEJE ROZWOJU FIZYKI w zarysach. Napisali Dr M. Grotowski, M. Sadzewiczowa, Dr W. Werner i Dr S. Ziemecki. Wydanie nowe, całkowicie przerobione. Tom I. Z 78 fig. i 10 portretami. Zł 30, w opr. płóc. zł 35. Tom II. Z 214 fig., 10 tabl. i 14 portretami. Zł 48, w opr. płóc. zł 53. Tanie wydanie (bez portretów) zł 50. za oba tomy.

Tom 3.

FIZYKA WSPÓŁCZESNA. Wykład przystępny nowych pojęć fizyki współczesnej. Napisał prof. O. D. Chwolson. Przełożył St. Warhaftman. Z 41 fig. W opr. płóc. zł 25.

Tom 4.

WSZECHŚWIAT. Gwiazdy — Mgławice — Atomy. Napisał Sir James Jeans. Przełożył Dr Wł. Kapuściński. Wydanie drugie uzupełnione według 3-go wydania oryginału.

Tom 5.

NOWE OBLCICHE NATURY. Pogląd na świat fizyki współczesnej. Napisał Sir A. S. Eddington. Przełożył Dr A. Wundheiler. W opr. pł. zł 14,60.

Tom 6.

HORYZONTY NOWEJ NAUKI. Napisał Sir James Jeans. Przełożył prof. Dr S. Szczeniowski.

WIELCY LUDZIE — WIEKIE DZIEŁA

EPOKOWE WYNAŁAZKI w Ameryce i w Europie. Historia ich powstania i ich twórców. Napisał inż. W. Kaempffert. Przełożył i uzupełnił Dr A. Kojrański. Z 350 fig. Cz. 1—16, cz. 2—14. Całość w opr. płóc. zł 33,80.

T. A. EDISON. Życie i dzieła. Napisał W. H. Meadowcroft. Przełożył i uzupełnił Dr E. Stenz. Z 15 planszami. W opr. płóc. zł 13,40.

„MATHESIS POLSKA” DLA MŁODZIEŻY

300 000 KM NA SEKUNDE Z Dr WSZĘDOBYLSKIM. Napisał Dr Wszędobylski. Z 28 planszami. W opr. kart. zł 10, w opr. pł. zł 13. NAJCIĘKAWSZA PODRÓŻ Z Dr WSZĘDOBYLSKIM. Napisał Dr Wszędobylski. Z 41 planszami. W opr. półpł. zł 10, w opr. pł. zł 13.

Nowa seria niezwykle zajmujących książek dla młodzieży, zawierająca bogaty materiał naukowy z różnych dziedzin wiedzy, podany w sposób niezmiennie poglądowy, zajmujący i oryginalny.



32457/
2