

~~1809 H~~

B. P. im. L.



1000084275



821834

166190

18044.

WYDAWNICTWO CZASOPISMA „PRZYRODA I PRZEMYSŁ.”

# WYKŁAD FIZYKI

OPRACOWANY NA PODSTAWIE NAJNOWSZYCH BADAŃ

*494*

przez

D<sup>n</sup> Pawła Reis'a.

TOM II.

FIZYKA WŁAŚCIWA.

Ruch falowy, Akustyka i Optyka.



WARSZAWA.

Drukiem Aleksandra Pajewskiego, ulica Niecała Nr. 12.

1874.

WYKŁADY



323 984

12

WYKŁADY Z HISTORII, ANATOMII I FIZIOLOGII

53



ДОЗВОЛЕНО ЦЕНЗУРОЮ.

Варшава, 2 (14) Января 1875 года.

Външній, Акадѣмскій і Офіційн.



WYKŁADY

WYKŁADY Z HISTORII, ANATOMII I FIZIOLOGII

WYKŁADY

# TREŚĆ TOMU II<sup>go</sup>.

## DRUGA CZĘŚĆ FIZYKI

### NAUKA O RUCHU CZĄSTECZEK CZYLI FIZYKA WŁAŚCIWA.

#### *Oddział czwarty.*

*strona.*

Ruch cząsteczkowy w ogólności czyli ruch falowy . . . . . 1

#### *Oddział piąty.*

### **Nauka o głosie czyli Akustyka.**

1. Określenie akustyki . . . . .	24
2. Powstawanie głosu . . . . .	39
3. Brzmienie.	
a) Koloryt muzyczny . . . . .	71
b) Współbrzmienie . . . . .	75
c) Konsonans i dyssonans . . . . .	80
4. Siła dźwięku . . . . .	85
5. Rozchodzenie się dźwięku . . . . .	87

#### *Oddział szósty.*

### **Nauka o świetle czyli Optyka.**

1. Definicje optyki . . . . .	94
2. Powstawanie światła . . . . .	95
3. Rozchodzenie się światła . . . . .	98
4. Nauka o odbijaniu się światła. Katoptryka . . . . .	106
5. Nauka o załamaniu światła. Dioptryka . . . . .	118
6. Nauka o rozkładaniu się światła na barwy czyli dyspersja światła. Nauka o barwach . . . . .	144
7. Oko i przyrządy optyczne. Optyka fizyologiczna i praktyczna . . . . .	180
8. Nauka o interferencji i polaryzacji światła. Optyka teoretyczna . . . . .	230

THESE TOILETTE

TOILETTE

TOILETTE

TOILETTE

TOILETTE

TOILETTE

TOILETTE

10	TOILETTE
15	TOILETTE
20	TOILETTE
25	TOILETTE
30	TOILETTE
35	TOILETTE
40	TOILETTE
45	TOILETTE
50	TOILETTE

TOILETTE

TOILETTE

55	TOILETTE
60	TOILETTE
65	TOILETTE
70	TOILETTE
75	TOILETTE
80	TOILETTE
85	TOILETTE
90	TOILETTE
95	TOILETTE
100	TOILETTE



## DRUGA CZĘŚĆ FIZYKI.

# Nauka o ruchu cząsteczek czyli Fizyka właściwa.

### ODDZIAŁ CZWARTY.

## Ruch cząsteczkowy w ogólności czyli ruch falowy.

**Fale wodne** (Bracia Weber 1826). Przez ruch falowy rozumiemy każdy ruch drgający cząsteczek lub też cząstek ciała. Cząsteczki ciała mogą wprawdzie oprócz ruchów drgających wykonywać i inne ruchy, jak np. ruchy obrotowe około swoich osi, ruchy postępowe i t. p.; lecz ruchy drgające zawsze przeważają i dla tego też możemy ruchy cząsteczek nazwać ruchami falowemi. Nazwa ruchu falowego wzięta jest ze znanego zjawiska ruchu wody rzek, jezior i mórz, których powierzchnie uginają się i podnoszą w kształcie form krzywych, gdy na nie działają siły uderzające lub ugniatające.— Wzniesienie nad poziomem nazywa się *górami fali*, obniżenie zaś—*doliną*; góra i dolina razem wzięte tworzą *całą falę*. Wysokość wierzchołka góry nad poziomem i głębokość najniższego punktu doliny razem wzięte stanowią *wysokość całej fali*. Odległość między początkiem góry fali, t. j. między miejscem, gdzie takowa zaczyna występować z poziomu, a końcem doliny, t. j. miejscem, gdzie fala znowu się z poziomem przecina, nazywa się *długością fali*.

*Ruch falowy wody polega na wznoszeniu się i opadaniu cząstek wody.* Ponieważ w ruchu falowym góra w jednym miejscu znika, by znowu powstać obok w tem miejscu, gdzie poprzednio była dolina, to pozornie zdaje się, że ten ruch falowy polega na przesuwananiu się całej masy wody góry na miejsce doliny, czyli innemi słowy, zdaje się, jakoby cząstki wody miały ruch poziomy. Łatwo jednak się przekonać, że ten ruch poziomy jest tylko pozornym;

w tym celu dość jest położyć kawałek drzewa na wodę w ruchu falowym będącą; wtedy zauważymy, że kawałek drzewa nie przynosi się wraz z górą na inne miejsce powierzchni wody, lecz kołysze się pionowo, z góry na dół.— Zresztą łatwo okazać, że taki ruch wstępujący i zstępujący cząstek wody tworzy fale.

Niech 1, 2, . . . 8 (fig. 104) będą 8 cząstek powierzchni wody równo od siebie oddalonych, które wykonywają identyczne drgania po drodze eliptycznej,



Fig. 104.

prostoliniowej lub kołowej, i to w ten sposób, że cząstki rozpoczynają swoje ruchy nie jednocześnie, lecz po sobie, w równych odstępach czasu. Oczywiście, że przy takim stanie rzeczy, gdy cząstka 1-sza wróciła do pierwotnego swego położenia, czyli gdy wykonała całkowite drganie, to następne cząstki odpowiednio przeszły  $\frac{7}{8}$ ,  $\frac{6}{8}$ , . . . swoich dróg, czyli w tym samym czasie będą w punktach 2', 3' . . . i t. d.; cząstka zaś 9 jeszcze wcale ze swego położenia równowagi nie wyszła, a punkty pośrednie będą w położeniach pośrednich. Łącząc nowe położenia cząstek liniją krzywą ciągłą, będziemy mieli wyraźny kształt fali.

Za pomocą przyrządu falowego *Eisenlohra* lub maszyny falowej *Fessela* (fig. 105) można również doświadczalnie pokazać, że rząd cząstek kolejno po so-



Fig. 105.

bie drgających tworzy kształt falisty. Tem cośmy wyżej powiedzieli, dowiedliśmy tylko, że ruch drgający może wytworzyć kształt falisty, lecz nie wykazaliśmy, czy fale wodne rzeczywiście utworzone są z drgających cząstek. Bracia *Weber* dowiedli tego w r. 1825, dorzucając do wody znajdującej się w rynnie falowej utworzonej z tafli szklanych ziarenek bursztynowych i obserwując ich ruch. Przekonali się oni, że ruch górnych cząstek jest eliptyczny, że oś pionowa tych elips coraz bardziej się zmniejsza w miarę tego jak głębokość wzrasta, i że w końcu w głębokości wyrównywającej blisko stokrotnej wysokości fali cząstki wody drgają tylko w kierunku poziomym.

Oprócz tego ze sposobu powstawania fal wodnych wynika, że cząstki ich muszą mieć ruch drgający. Fale bowiem wodne powstają wskutek uderzenia lub ciśnienia wywartego na powierzchnię wody, przez wiatr lub upadający kamień. Ten sposób powstawania fal najlepiej daje się naśladować, wsysając w rurkę słup wody i takowy następnie opuszczając napowrót. W podobnych razach woda w jednym miejscu doznaje większego ciśnienia, aniżeli w innych; ciśnienie to udziela się jednakowo wszystkim cząstkom sąsiednim i to w kierunku od dołu ku górze, przez co woda naokoło wznosić się musi, zupełnie tak samo, jak w naczyniach połączonych woda w jednym ramieniu natychmiast się wznosi, gdy na powierzchni w drugim ramieniu wywieramy ciśnienie większe aniżeli w pierwszym. W pierwszym zatem momencie ruchu falowego cząstki wody, na które wywarliśmy ciśnienie, mają ruch zstępujący i tworzą dolinę, cząstki zaś naokoło tego miejsca będące mają ruch wstępujący i tworzą pierścieniową górę fali. Lecz góra ta z powodu swego ciężaru opada, prędkość wstępująca coraz bardziej się zmniejsza, staje się zerem i w końcu zamienia się na prędkość zstępującą, wytworzoną działaniem siły ciężkości. Doszedłszy do poziomu, cząstki nie mogą nagle wrócić do stanu równowagi, gdyż na zasadzie bezwładności muszą się obniżyć pod poziom, przez co w drugim momencie od rozpoczęcia ruchu, na miejscu góry pierścieniowej powstaje dolina, gdy jednocześnie w miejscach sąsiednich, wskutek ciśnienia hydrostatycznego zstępujących cząstek tej doliny, powstaje góra. Ta ostatnia góra zapada się w trzecim momencie i zamienia się w dolinę, lecz jednocześnie wywołuje w sąsiedztwie powstawanie trzeciej góry. W ten sposób praca pierwotna z punktu początkowego ruchu rozchodzi się na zewnątrz do coraz obszerniejszych pierścieniowatych gór i dolin; głębokości i wysokości tych dolin i gór coraz bardziej zmniejszać się muszą, gdyż ta sama praca mechaniczna udziela się coraz większym masom; w dostatecznej odległości od początku wysokości gór stają się nieskończenie małemi i ruch falowy ustaje. Tłomaczenie powyższe wyjaśnia nietylko ruch wstępujący i zstępujący cząstek, lecz zarazem pokazuje nam, że wskutek bocznego ciśnienia cząstek jako też równi pochyłych gór powstaje ruch boczny, który łącząc się z ruchem pierwotnym daje początek ruchowi krzywolinijnemu. Krzywe, po których cząstki się poruszają, będą linijami zamkniętymi, jeśli przez jedno i to samo miejsce fale o jednakowych wymiarach i kształtach przechodzić będą, jeśli zaś fale stają się coraz mniejszemi, to linije krzywe ruchu cząstek będą spiralnemi eliptycznemi.

**Własności i wymiary fal wodnych.** 1. Długością fali nazywamy długość drogi, na jaką się ruch drgający rozchodzi, podczas gdy cząstka wykonywa jedno całe wahnięcie. Gdyż każda następna cząstka fali rozpoczyna swój ruch drgający później, aniżeli cząstka ją wyprzedzająca, wskutek czego każda cząstka tej fali ma odmienne położenie od innych cząstek fali, a tem samem i sama fala ma w każdym punkcie inny kierunek, t. j. innymi słowy wzdłuż fali, cząstki obok siebie będące mają wszelkie możliwe położenia, jakie jedna cząstka podczas jednego wahnięcia przyjmuje. Z tego określenia wypada, iż:

2. Cząstki, które oddalone są od siebie na długość jednej lub więcej całkowitych fal, czyli, co na jedno wychodzi, na parzystą liczbę półfali, ma-

ją jednakowy ruch drgający, t. j. jednakowy kierunek ruchu, jednakową prędkość i znajdują się w jednakowej odległości od położenia równowagi, czyli jak się mówi, mają jednakowe fazy drgania. 3. Cząstki, które oddalone są od siebie na długość nieparzystej liczby półfal (jak np. 1 i 5, lub 2 i 6 fig. 104) znajdują się w przeciwnych fazach drgania.

Ruch falowy, który dotychczas uważaliśmy, w którym cząstki stopniowo zostają wprowadzone w ruch drgający, nazywa się ruchem drgającym *rozchodzącym się*. Ruch falowy przeciwnie, w którym wszystkie cząstki jednocześnie rozpoczynają i jednocześnie kończą swój ruch, nazywa się ruchem falowym *stojącym*. W obu tych ruchach drgania mogą być *poprzeczne*, lub *podłużne*, to jest kierunki drgań mogą być prostopadłe do kierunku rozchodzenia się ruchu, lub też od niego równoległe; kierunek rozchodzenia się ruchu bywa zwykle jednym z głównych kierunków drgającego ciała, np. kierunek powierzchni wody. Do głównych wymiarów fali oprócz wielkości, *dalekości drgania* (amplitudy drgania), to jest odległości najniższego położenia cząstki drgającej od jej najwyższego położenia, należy też i *prędkość rozchodzenia się* ruchu falowego, to jest droga, na którą ruch rozchodzi się w ciągu jednej sekundy. Prędkości tej nie należy brać za jedno z *prędkością drgania*, to jest z prędkością drgających cząstek; zamiast tej ostatniej prędkości może też służyć czas jednego wahanicia, t. j. czas, w którym cząstka dokonywa całkowitego obiegu, gdyż ten przy jednakowych drganiach jest odwrotnie proporcjonalnym do prędkości drgania.

Między różnemi wymiarami fali zachodzą następujące związki: Im silniejsze jest uderzenie wywołujące powstawanie fal, tem szybciej uderzone cząsteczki poruszać się będą, tem większe zatem one wykonywać będą ruchy, przez co podczas jednego wahanicia fale tem dalej rozchodzić się będą. Wysokość zatem fali i jej długość powiększają się wraz z powiększeniem siły uderzenia. Czas zato drgania zmniejszy się, lub przynajmniej w mniejszym stosunku wzrośnie, gdyż do większej siły uderzenia przybywa jeszcze i powiększona prędkość wytworzona wskutek spadania cząstek wody z większej wysokości. Ponieważ zatem w krótszym czasie ruch rozchodzi się na większą przestrzeń, to z powiększeniem się uderzenia wzrastać musi i prędkość rozchodzenia się fal. Prędkość zatem rozchodzenia się fal wodnych jest zależną od ich wysokości i długości; wysokie fale szybciej się rozchodzą niż niskie; rzucając kamień do krańcowych kręgów systemu fal wodnych, zobaczymy, że nowe kręgi szybciej rozchodzić się będą aniżeli poprzednie. Bardzo nieznaczny wpływ na prędkość rozchodzenia się fal wywiera natura cieczy, gdyż lubo wskutek powiększenia się gęstości cieczy powiększa się siła wytwarzająca fale, to za to powiększa się i masa, która w ruch zostaje wprowadzona. Większym jest wpływ głębokości cieczy; w głębokiej wodzie prędkość rozchodzenia się fal jest większą aniżeli w płytkiej, chociaż nie jest do niej proporcjonalną. Przyczyny opóźniania się ruchu fal w płytkiej wodzie szukać należy w tarcu i przyleganiu cieczy do dna, które dla tego wywierają mogą

wpływ na prędkość rozchodzenia się fal, gdyż ruch cząstek wody może się udzielić aż do 350-cio krotnej wysokości fali. Wskutek opóźniania ruchu fal w miejscach płytkich i w bliskości brzegów, fale późniejsze doganiają poprzedzające, przez co powiększają ich wysokość; wskutek tej samej przyczyny fale odbite łączą się z falami przybywającymi. Tym sposobem powstają bardzo wysokie fale, które bijąc o brzegi tworzą wiry. Gdy na otwartym morzu, jak np. na morzu Niemieckim wysokość gór fali wynosi od 2—3<sup>m</sup>, a na oceanach najwyżej dosięga 10<sup>m</sup>, to przy brzegach wysokość ta dochodzi do 20<sup>m</sup>; co więcej, zdarza się, że podczas burz fale morskie biją tak wysoko, że przewyższają latarnię morską przy Eddynstone (mającą 40<sup>m</sup> wys.) o własną jej wysokość. Jeśli natężenie wiatru przechodzi pewną granicę, to ciśnienie jego przeszkadza powstawaniu gór, wskutek czego fale stają się niższymi, lecz za to za ustaniem wiatru tem wyżej się podnoszą; zjawisko to żeglarze nazywają *wkleśłem morzem*. Prędkość fali morskich wynosi od 10<sup>m</sup> do 30<sup>m</sup>, dla tego też fale często wcześniej dosięgają brzegów niż wiatr, który je wytworzył; co więcej, zdarza się nawet, że wiatr wcale brzegu nie dosięga.

Oprócz zwyczajnych wahadłowych ruchów falowych wody morskiej są jeszcze i inne ruchy falowe, które jako mniej ważne pominiemy.

**O ruchach falowych w ogólności.** Zupełnie tak samo jak ciecz wskutek zewnętrznego ciśnienia wywartego w pewnym miejscu ich powierzchni, i wskutek własnego ciężaru zostają wprawione w drgania, tak samo też i mniejsze lub większe cząstki każdego ciała wskutek działania siły zewnętrznej i sprężystości czyli sił cząsteczkowych mogą również być wprawione w drganie. I taki ruch nazywa się ruchem falowym, gdyż i w tym razie szereg cząsteczek pierwiastkowo w linii prostej będących tworzy jedną lub więcej fal, gdy jedna z cząsteczek siłą zewnętrzną została wyprowadzoną z położenia równowagi i

gdy ruch ten udzielił się innym cząsteczkom. O tem możemy się łatwo przekonać w następujący sposób. Jeśli cząsteczkę *a* (fig. 106) pewna siła wyprowadzi do położenia *a'*, to w tem nowem położeniu odległość cząsteczek *a* i *b* zostanie zwiększoną; a że odpychanie międzycząsteczkowe silniej się zmniejsza aniżeli przyciąganie, to wskutek zmiany położenia cząsteczki *a* względem *b*, odpychanie między niemi znacznie się zmniejszyło, przyciąganie zaś mało tylko, więc cząsteczka *b* będzie teraz silniej przez cząsteczkę *a'* przyciąganą niż poprzednio. Z drugiej znów strony, ponieważ ta sama cząsteczka *b* doznaje przyciągania od cząsteczki *c*, więc pójdzie ku *b'*. gdy jednocześnie *a'* pójdzie dalej ku *a''*. Cząsteczka *a''* działa tak samo na *b'* i pociąga ją ku *b''*, gdy je-

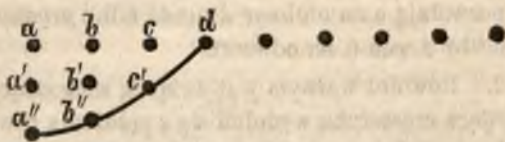


Fig. 106.

dnocześnie b' i d działając na cząsteczkę c, pociągają ją ku c'. Łatwo widzieć, że cząsteczki a", b', c' i d tworzą już połowę doliny fali. Śledząc dalej za ruchem cząsteczek, przekonywamy się, że gdy cząsteczka a" wróciła do pierwotnego położenia a, przejdzie je i znowu do niego wróci, to się utworzy cała fala. Powstaje więc w tym razie postępujący ruch falowy poprzeczny, dla którego również służy twierdzenie, że długość fali równa się długości drogi, na którą ruch się rozchodzi w ciągu jednego drgania. Jeśli siła działająca porusza cząsteczki w kierunku szeregu, po którym są ułożone, jak to ma miejsce przy drganiach podłużnych, to przy ruchu cząstek naprzód następuje zgęszczenie, przy cofaniu się zaś ich za położenie równowagi ma miejsce rozszerzanie. W tym wprawdzie przypadku cząsteczki drgające nie tworzą fal, lecz zobaczymy później, że i w tym nawet razie kształt falowy odpowiada wewnętrznemu procesowi ruchu; dla tego też i ruch taki nazywają również ruchem falowym; zgęszczenie i rozrzedzenie razem uważane tworzą falę, do której długości dają się zastosować wyżej przytoczone prawo.

**224.** **Związek zachodzący między wielkościami ruchu falowego w ciałach sprężystych.** 1. Niech będzie długość fali  $= l$ , prędkość rozchodzenia się ruchu  $= c$ , czas drgania  $= T$ , liczba drgań w jednej sekundzie, czyli krócej liczba drgań  $= n$ . Oczywiście, że  $T = \frac{1}{n}$  sek. Ponieważ długość fali  $l$  równa się długości drogi, na której ruch się rozchodzi w ciągu czasu  $T$ , więc otrzymany następujące bardzo ważne równania zasadnicze:

$$l = cT; \quad l = \frac{c}{n} \dots \dots \dots, \quad (25)$$

które pozwalają nam obliczyć długość fali z prędkości rozchodzenia się ruchu lub z liczby drgań (i na odwrót).

2. Również ważnym jest związek zachodzący między drogą  $s$ , na którą drgająca cząsteczka wydalila się z położenia równowagi, a czasem  $t$  na to potrzebnym, lub też między prędkością  $v$  w tym momencie, a czasem  $t$ .— Droga  $s$  nazywa się *wychyleniem*, *elongacją*, czas  $t$  nazywa się *czasem fazy*. Wyprowadzimy ten związek sposobem elementarnym według *Ettingshausena*. Do tego potrzebnem jest pewne przypuszczenie co do związku zachodzącego między siłą odprowadzającą cząsteczki do ich położenia równowagi, a drogą  $s$ . Jeśli sobie przypomnimy, że tą siłą odprowadzającą cząsteczki jest siła sprężystości, i że (według 65) sprężystość jest proporcjonalną do wielkości zmiany położenia, to zgodzimy się na słuszność przypuszczenia, że siła odprowadzająca cząsteczki do równowagi jest proporcjonalną do do drogi  $s$ .

Jeśli zatem cząsteczka, której masa równa się  $m$ , zostanie wyprowadzoną z położenia równowagi a (fig. 107) ku punktowi b, to skutek przyciągającego

działania sprężystości, prędkość cząsteczki  $m$  coraz bardziej się zmniejsza, aż w punkcie  $b$  stanie się równą zeru; doszedłszy do tego punktu cząsteczka z coraz bardziej wzrastającą prędkością wraca do punktu  $a$ , lecz tam się nie zatrzyma, gdyż na zasadzie prawa bezwładności dalej poruszać się będzie ku  $b'$ . Ponieważ zaś z wyjściem poruszającej się cząsteczki z punktu  $a$ , siła sprężystości znowu usiłuje ją wracać do położenia równowagi, więc prędkość cząsteczki w punkcie  $b$ , stanie się zerem; potem cząsteczka znów wraca do  $a$  i kończy jedne drganie. Drgania te na zasadzie prawa zachowania sił wiecznie trwać będą, jeśli tylko przeszkody i siły zewnętrzne ruchu tamować nie będą. Oznaczając siłę przyciągającą jednostkę masy w jednostce odległości przez  $k$ , znajdziemy, że w odległości  $ao = s$ , na naszą cząsteczkę działa siła mks. Jeśli ta siła przyciągająca w czasie  $dt$ , przez który się cząsteczka porusza od  $o$  do  $o'$ , powiększa jej prędkość o  $dv$ , to

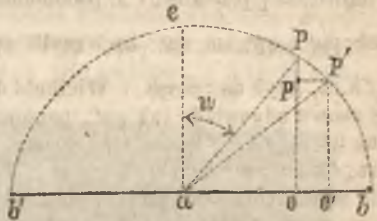


Fig. 107.

na zasadzie formuły (6) otrzymamy drugie wyrażenie na siłę  $\frac{m \cdot dv}{dt}$ . Porównując dwa wyrażenia na siłę, otrzymamy

$$m \cdot ks = \frac{m \cdot dv}{dt}, \text{ z kąd } \frac{dv}{dt} = ks.$$

Oznaczając bardzo małą drogę  $oo'$  przez  $ds$  i mnożąc strony ostatniego równania przez  $ds$ , otrzymamy  $\frac{dv}{dt} \cdot ds = ks \cdot ds$ , a że  $\frac{ds}{dt} = v$ , więc  $v \cdot dv = ks \cdot ds$ . Ponieważ dalej  $k = \sqrt{k} \cdot \sqrt{k}$ , to możemy jeszcze ostatnie równanie napisać w kształcie

$$\frac{v \cdot dv}{\sqrt{k} \cdot \sqrt{k}} = s \cdot ds,$$

z kąd otrzymujemy proporcję:

$$ds : \frac{dv}{\sqrt{k}} = \frac{v}{\sqrt{k}} : s.$$

Dla otrzymania geometrycznego znaczenia tej proporcji, w punktach  $o$  i  $o'$  wyprowadźmy prostopadłe  $op = \frac{v}{\sqrt{k}}$  i  $o'p' = \frac{v-dv}{\sqrt{k}}$ , poprowadźmy  $p'q$  równoległe do  $ab$  i linie  $pa$ ,  $p'a$  i  $pp'$ ; będzie  $p'q = ds$  i  $pq = op - o'p' = \frac{v}{\sqrt{k}} - \frac{v-dv}{\sqrt{k}} = \frac{dv}{\sqrt{k}}$ ; zatem proporcja wyżej podana przejdzie w  $p'q : pq = op : ao$ . Ponieważ linie proporcjonalne są bokami dwóch trójkątów prostokątnych  $pp'q$  i  $apo$ , więc te dwa trójkąty są podobne, i kąt  $pp'q = apo$  lecz ponieważ dalej  $pp'q + p'pq = 90^\circ$ , więc i  $apo + p'pq = 90^\circ$ , czyli że kąt  $app'$  jest kątem prostym. Innymi słowy, jeśli w każdym punkcie drogi cząsteczki wyprowadzimy do niej prostopadłe i na nich odłożymy długości równe prędkościom w tych punktach podzielonym przez  $\sqrt{k}$ , i końce tak otrzymanych linii po-

łączy my linijami prostemi, otrzymamy linię łamaną (krzywą), której elementa są prostopadłe do linij poprowadzonych ku stałemu punktowi a; czyli że tą linią będzie koło, którego środek jest w a, i którego promień równa się wychyleniu  $ab = r$ . Ztąd wypada, że długość prostopadłej wyprowadzonej w punkcie a czy-

li  $ac = r = \frac{u}{\sqrt{k}}$ , gdzie u oznacza prędkość jaką cząsteczka ma w punkcie a, czyli największą prędkość. Z podobieństwa trójkątów wyż wspomnianych wypa-

da też  $pp' : qp' = ap : op$ , czyli  $pp' : ds = r : \frac{v}{\sqrt{k}}$ , zkad  $pp' = \frac{r \cdot ds \cdot \sqrt{k}}{v}$

$= r \sqrt{k} \cdot dt$ , gdyż  $ds = v \cdot dt$ . Wielkość dt oznacza czas odpowiadający drodze ds, której znowu odpowiada łuk  $pp'$ ; ponieważ zaś łukowi ep odpowiada czas t, więc więc  $ep = rt \sqrt{k}$ . Oprócz tego wiemy, że  $ep = rw$ , gdzie w oznacza kąt eap, więc  $rt \sqrt{k} = rw$ , czyli  $t \sqrt{k} = w$ . Teraz łatwo nam będzie obliczyć wyrażenia dla wychylenia (elongacyi) i prędkości cząsteczki. Jakoż wychylenie  $s = ao$

$= ap \cdot \sin apo = r \sin w = r \sin t \sqrt{k}$  i  $op = \frac{v}{\sqrt{k}} = ap \cos apo = r \cos w = r \cos t \sqrt{k}$ , zkad otrzymujemy wzory

$$s = r \sin t \sqrt{k} \quad \text{i} \quad v = r \sqrt{k} \cos t \sqrt{k} = u \cos t \sqrt{k} \quad \dots \quad (26)$$

wyrażające związek między wychyleniem, prędkością faz i czasem faz.

Do powyższych wzorów wchodzi jeszcze niewiadoma wielkość k, którą wy-rugować możemy, stosując powyższe wzory do ćwiartki drgania. Łuk odowiadający ćwiartce drgania  $= \frac{1}{2} \pi r$ , a czas  $= \frac{1}{4} T$ , gdzie T oznacza czas całego drgania, a ponieważ w ogólności  $ep = rt \sqrt{k}$ , więc  $\frac{1}{2} \pi r = \frac{1}{4} r T \sqrt{k}$ , zkad otrzymujemy

$$T = \frac{2\pi}{\sqrt{k}} \quad \dots \quad (27)$$

wzór niezmiernie ważny, który jeszcze wyjaśnimy przy końcu paragrafu. Jeśli wartość  $\sqrt{k}$  obliczoną z tego wzoru podstawimy we wzory (26), otrzymamy

$$s = r \sin \frac{2\pi t}{T} \quad \text{i} \quad v = r \frac{2\pi}{T} \cos \frac{2\pi t}{T} = u \cos \frac{2\pi t}{T} \quad \dots \quad (28)$$

wzory nie zawierające ilości k.

Te dwa wzory dają nam dokładny obraz ruchu drgającego, gdyż podstawiając w nie za t wartości niżej podanego szeregu, dla wychylenia i prędkości otrzymujemy wartości jasno wykazujące naturę ruchu cząsteczek.

Jeżeli  $t = 0, \frac{1}{4} T, \frac{1}{2} T, \frac{3}{4} T, T, \frac{5}{4} T, \frac{3}{2} T, \frac{7}{4} T, 2T, \frac{9}{4} T, \frac{5}{2} T, \frac{11}{4} T, 3T$   
 to  $s = 0 \quad r \quad 0 \quad -r \quad 0 \quad r \quad 0 \quad -r \quad 0 \quad r \quad 0 \quad -r \quad 0$   
 i  $v = u \quad 0 \quad -u \quad 0 \quad u \quad 0 \quad -u \quad 0 \quad u \quad 0 \quad -u \quad 0 \quad u$ .

Z wzorów powyższych można też otrzymać graficznie wykreślenie drgań, wykazujące dobitnie ich podobieństwo do fal wodnych. Przenosząc bowiem 12 części T jako dwunaste części okręgu koła (fig. 108), którego promień równa się r, to wstawy tych części czyli połowy odpowiednich cięciw prostopadłych dają nam wychylenia, dostawy zaś—prędkości, odkładając czasy drgania na przedłużonej średnicy poziomej koła, i w tak otrzymanych punktach wystawiając prostopadłe do niej, na nich odcinając wielkości odpowiednich wstaw i ich końce łącząc linią ciągłą, otrzymamy linię falistą wyobrażającą nam drgania cząstek.



Wzór  $T = \frac{2\pi}{\sqrt{k}}$  nie zawiera amplitudy (dalekości)  $r$ ; zatem czas drgania **225.**

nie zależy od amplitudy, zupełnie tak samo jak czas małych wahań wahadła nie zależy od długości łuku wahańca; prawdę tą wyrażamy twierdząc, iż *drżania ciała sprężystego są jednoczasowe* (izochroniczne). Łatwo to sprawdzić doświadczalnie za pomocą sprężyny pionowo zawieszanej i obciążonej ciężarkami, sprężyna bowiem taka większe i mniejsze drżania w jednakowym odbywa czasie. Własność ta znacznie odróżnia drżania ciał sprężystych od ruchu falowego cieczy, wywołanego ciśnieniem hydrostatycznym i siłą ciężkości. Gdy bowiem

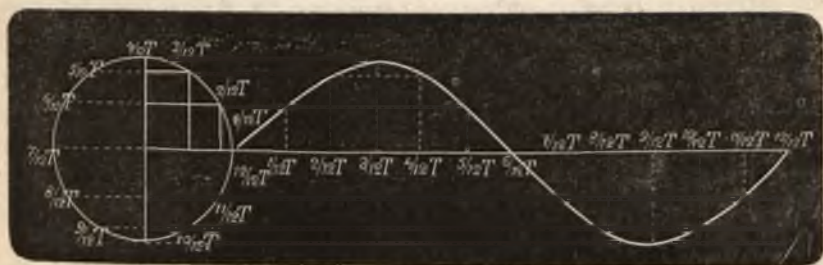


Fig. 107.

w ruchach falowych cieczy czasy drżania jako wysokości spadku zależne są od wysokości fali czyli amplitudy, ale prawie niezależne od natury cieczy; to drżania ciał sprężystych są niezależne od amplitudy, lecz zatem są zależne od natury ciała drżającego, gdyż ilość  $k$  wchodząca do wzoru na  $T$ , jako zależna od sprężystości ciał, jest różną dla różnych ciał. Taka sama różnica zachodzi też i co do prędkości rozchodzenia się  $c$ . Dla otrzymania z wzoru (25)  $l = cT$  wartości wykazującej zależność jej od natury ciała drżającego trzeba nam przedewszystkiem wyrazić  $T$  wzorem zawierającym zamiast ilości  $k$  moduł sprężystości. Moduł ten w naszym przypadku jest to siła, która zdolną jest uczynić szereg cząsteczek fali dwa razy dłuższym, gdy ona działać będzie w kierunku tego szeregu, a zatem w jednym tylko kierunku. W naszym zaś przypadku siła sprężystości działa nie tylko w kierunku uważanego przez nas szeregu cząstek, lecz we wszystkich kierunkach każdej płaszczyzny przechodzącej przez ten szereg, a zatem już nie działa siła  $e$ , lecz siła  $2\pi \cdot e$ , gdyż przez pomnożenie przez  $2\pi$  uskuteczniamy przejście od jednego kierunku płaszczyzny do wszystkich jej kierunków <sup>1)</sup>. Ponieważ zaś siła sprężystości działa na szereg punktów nie tylko na jednej płaszczyźnie, lecz na wszystkich płaszczyznach przechodzących przez szereg cząstek, więc należy  $2\pi \cdot e$  pomnożyć przez  $2\pi$ . Widzimy zatem, że siła sprężystości, która przedłuża szereg o długość  $l$ , jest  $2\pi \cdot 2\pi \cdot e$ ; siła więc, która przedłuża o dłu-

<sup>1)</sup> Dla obznajmionych z rachunkiem całkowym dowodzenie to jest bardzo jasne, gdyż różniczką siły jest  $e d\varphi$ , gdzie  $d\varphi$  oznacza kąt utworzony przez dwa kierunki nieskończenie bliskie; całkując w granicach od 0 do  $2\pi$  otrzymamy  $2\pi e$ .

gość = 1 będzie  $\frac{2\pi \cdot 2\pi \cdot e}{l}$  (65). Jeśli masa jednostki objętości szeregu cząsteczek równa się  $d$ , to masa całego szeregu równa się  $ld$ ; z kąd wypada, że siła sprężystości działająca na jednostkę masy =  $\frac{4\pi^2 e}{l^2 d}$ ; siła zaś ta działająca w jednostce odległości na jednostkę masy jest właśnie  $k$ , zatem

$$k = \frac{4\pi^2 e}{l^2 d}.$$

Podstawiając tę wartość za  $k$  we wzór (27) dający  $T$ , otrzymamy

$$T = \frac{2\pi}{\sqrt{\frac{4\pi^2}{l^2 d}}}, \text{ czyli } T = l \sqrt{\frac{d}{e}} \dots \dots \dots (29)$$

Podstawiając tę wartość we wzór  $c = \frac{l}{T}$ , otrzymamy  $c = \frac{1}{l \sqrt{\frac{d}{e}}}$  czyli

$$c = C \sqrt{\frac{e}{d}} \dots \dots \dots (30)$$

gdzie  $C$  oznacza ilość stałą zależną od kierunku w jakim cząsteczki drgają odnośnie do kierunku rozchodzenia się drgań, i która zwykle równa się jedności. Wzór ten na prędkość rozchodzenia się fal pokazuje, że ona nie zależy ani od amplitudy, ani też od czasu i liczby drgań. *Wielkie i małe, szybkie i powolne drgania w jednym ciełe rozchodzą się z jednakową prędkością; w różnych zaś ciałach prędkość ta jest prosto proporcjonalną do pierwiastku kwadratowego z modułu sprężystości i odwrotnie proporcjonalną do pierwiastku kwadratowego z gęstości, lecz w każdym razie jest niezależną od amplitudy i czasu drgania.* Przeciwnie ruchy falowe cieczy tem prędzej się rozchodzą, im wyższe są fale i im szybciej cząsteczki drgają.

Wzory (28) służą dla obliczenia wychylenia i prędkości drgania cząsteczki, na którą działa jakaś siła zewnętrzna, a zatem dla pierwszej cząstki fali, Można jednak wzory te uogólnić do cząsteczek oddalonych od pierwszej na odległość  $x$ , i do których ruch dochodzi po czasie  $t'$ , danym przez wzór (25)  $t' = \frac{x}{c}$ ; dla tej cząstki czas drgania jest  $t - t'$ , zatem dla niej wychylenie

$$s = r \sin \frac{2\pi (t - t')}{T} = r \sin 2\pi \left( \frac{t}{T} - \frac{x}{cT} \right),$$

a że  $cT = l$ , będzie

$$\left. \begin{aligned} s &= r \sin 2\pi \left( \frac{t}{T} - \frac{x}{l} \right) \\ v &= r \cos 2\pi \left( \frac{t}{T} - \frac{x}{l} \right) \end{aligned} \right\} \dots \dots \dots (31)$$

**226.** Przecinanie się fal czyli interferencya (Fresnel 1830). 1. *Inteferencya fal rozchodzących się w jednym kierunku, i których cząsteczki jednakowo drgają.* Jeżeli dwie fale o różnych początkach rozchodzą się po jednym szeregu czą-

steček, to każda cząsteczka otrzymuje z każdej fali pewną oznaczoną amplitudę; jeśli fale rozchodzą się w tym samym kierunku, to amplituda cząsteczki równa się sumie obu amplitud, jeśli zaś fale rozchodzą się w kierunkach wprost przeciwnych, to amplituda cząstek równa się różnicy amplitud, a zatem może też być równą zeru, co ma miejsce, gdy obie amplitudy są sobie równe. Przypadek pierwszy (jednokierunkowość amplitud) będzie miał miejsce, kiedy obie fale wychodzą z punktów oddalonych od siebie o wielokrotności długości całych fal czyli o parzystą liczbę półfal; przypadek przeciwnie drugi (przeciwkierunkowość fal) następuje, gdy góra jednej fali zapełnia dolinę drugiej, czyli gdy obie fale wychodzą z punktów oddalonych od siebie na  $\frac{1}{2}$ ,  $\frac{3}{2}$ ,  $\frac{5}{2}$ ,  $\frac{7}{2}$  i t. d. długości fali, czyli, jak mówią, gdy różnica w fazach obu fal jest nieparzystą liczbą półfal.

Jaśniej to wypada z rozbioru matematycznego. Wychylenie cząsteczki sprawione jedną falą wyraża się według wzoru (31):

$$s = r \sin 2\pi \left( \frac{t}{T} - \frac{x}{l} \right);$$

jeśli początek drugiej fali jest oddalony od początku pierwszej na odległość  $a$ , to odległość cząsteczki drgającej od tego drugiego początku będzie  $x-a$ ; więc jego wychylenie wyrazi się wzorem

$$s_1 = r_1 \sin 2\pi \left( \frac{t}{T} - \frac{x-a}{l} \right).$$

Ponieważ cząsteczka drgająca odchyli się z położenia równowagi na obie te odległości, więc wychylenie jej będzie

$$S = r \sin 2\pi \left( \frac{t}{T} - \frac{x}{l} \right) + r_1 \sin 2\pi \left( \frac{t}{T} - \frac{x-a}{l} \right).$$

Dla otrzymania z tego wzoru amplitudy drgania, należy mu nadać kształt wzoru (31), w którym  $r$  oznacza amplituda. Przekształcenie uskuteczniamy rozwijając ostatnią wstawę według wzoru na  $\sin(m+n)$ , otrzymamy:

$$\begin{aligned} \sin 2\pi \left( \frac{t}{T} - \frac{x-a}{l} \right) &= \sin 2\pi \left( \frac{t}{T} - \frac{x}{l} + \frac{a}{l} \right) = \sin 2\pi \left( \frac{t}{T} - \frac{x}{l} \right) \\ &\quad \cos \frac{2\pi a}{l} + \sin \frac{2\pi a}{l} \cos 2\pi \left( \frac{t}{T} - \frac{x}{l} \right). \end{aligned}$$

Podstawiając tę wartość we wzorze na  $S$  i wyrzucając wspólne czynniki, otrzymamy:

$$S = \sin 2\pi \left( \frac{t}{T} - \frac{x}{l} \right) \left\{ r + r_1 \cos \frac{2\pi a}{l} \right\} + r_1 \cos 2\pi \left( \frac{t}{T} - \frac{x}{l} \right) \sin \frac{2\pi a}{l}$$

Wyznamy teraz dwie wielkości  $R$  i  $D$  w ten sposób, by

$$R \cos \frac{2\pi D}{l} = r + r_1 \cos \frac{2\pi a}{l}$$

$$R \sin \frac{2\pi D}{l} = r_1 \sin \frac{2\pi a}{l}$$

i podstawmy je w równanie S, otrzymamy:

$$S = R \sin 2\pi \left( \frac{t}{T} - \frac{x}{l} \right) \cos \frac{2\pi D}{l} + R \cos 2\pi \left( \frac{t}{T} - \frac{x}{l} \right) \sin \frac{2\pi D}{l} \text{ lub}$$

$$S = R \sin 2\pi \left( \frac{t}{T} - \frac{x-D}{l} \right).$$

Ponieważ ten wzór ma kształt zwykły, więc R oznacza teraz nową amplitudę. Dla otrzymania jej wielkości podnieśmy do kwadratu dwa równania dające nam R i D, otrzymamy:

$$R^2 \cos^2 \frac{2\pi D}{l} = r^2 + 2r r_1 \cos \frac{2\pi a}{l} + r_1^2 \cos^2 \frac{2\pi a}{l}$$

$$R^2 \sin^2 \frac{2\pi D}{l} = r_1^2 \sin^2 \frac{2\pi a}{l},$$

dodając dwa wzory otrzymamy

$$R^2 = r^2 + 2rr_1 \cos \frac{2\pi a}{l} + r_1^2; \text{ zskąd } R = \sqrt{r^2 + r_1^2 + 2rr_1 \cos \frac{2\pi a}{l}}$$

Wzór ten zgodny z wzorem (14) otrzymanym dla przekątni równoległoboku, pokazuje, że składanie drgań odbywa się według tych samych praw co i składanie sił.

Jeśli różnica fal równa się wielokrotności całych fal to jest  $a = n l$ , to  $\cos \frac{2\pi a}{l} = \cos 2n\pi = 1$ , więc  $R = \sqrt{r^2 + r_1^2 + 2rr_1} = r + r_1$ . Jeśli prze-

ciwnie  $a =$  nieparzystej liczbie połówek fal, t. j.  $a = \frac{2n+1}{2} l$ , to  $\cos \frac{2\pi a}{l} = \cos (2n+1)\pi = -1$ , więc  $R = \sqrt{r^2 - 2rr_1 + r_1^2} = r - r_1$ ; jeśli w tym razie  $r = r_1$ ; dowiedliśmy tym sposobem wyżej wypowiedzianych twierdzeń.

Wszystkie te niezmiernie ważne zjawiska można wywołać za pomocą maszyny falowej *Fessel'a*; można je także wywołać w wodzie lub rtęci. W tym celu puszcza się z dwóch blisko siebie położonych miejsc krople rtęci lub wody na powierzchnię poziomą rtęci. W miejscach, gdzie się równocześnie schodzą dwie góry fal lub dwie doliny, powstaje wyższa góra, lub głębsza dolina, tam zaś gdzie się góry fal schodzą z dolinami, ruchy składowe wzajemnie się osłabiają, a przy równych amplitudach drgań nawet zupełnie niweczą.

**227.** 2. *Interferencya fal o przeciwnych kierunkach postępowych, lecz o jednakowym kierunku drgań.* Jeśli dwie fale, których początki oddalone są na długość fali, których długość i amplitudy są sobie równe zejdą się po upływie czasu jednego drgania, to góra i dolina jednej zejdzie się odpowiednio z doliną i górą drugiej i one wzajemnie się zniosą; wszędzie będzie powierzchnia gładka. Po upływie następnej ćwiartki czasu drgania, doliny obu fal przypadną we środku odległości ich początków, utworzą tam dolinę dwa razy głębszą, gdy tymczasem po obu stronach tej doliny zejdą się połowy gór i utworzą przez to połowy gór dwa razy większą wysokość mające. Cząstki między temi górami i dolinami znajdują się w swych miejscach równowagi, na pierwotnym poziomie; cząstki

te musiały dotychczas pozostawać w równowadze, gdyż o ile zostały obniżone przez dolinę jednej fali, o tyle zostały podniesione przez górę drugiej fali. To samo powtarza się i w następnej ćwiartce czasu drgania; po upływie trzeciej ćwiartki czasu drgania, dwie góry przypadną we środku między obu początkami fali i utworzą tam wyższą górę, po obu zaś stronach tej góry znajdują się połówki głębszych dolin i cząstki oddalone na  $\frac{1}{4}$  długość fali od obu początków fal pozostały na poziomie; po upływie czasu drugiego drgania, wszystkie cząstki wracają do położenia równowagi. Łatwo widzieć, że opisane zjawisko składa się z jednej całości i dwóch połówek stojących fal, oddzielonych od siebie punktami pozostającymi w spoczynku, w odległości  $\frac{1}{4}$  i  $\frac{3}{4}$  długości fale, licząc od początku. Te punkty nazywają się *węzłami drgania* punkty zaś najbardziej się oddalające od położenia równowagi nazywają się *brzuszkami drgań*. Węzłów drgań nie należy uważać za punkty, których ruch falowy wcale nie dotyka, gdyż one są punktami przecinania się dwóch ruchów, które w tych miejscach są równe i wprost przeciwne; węzły w każdej

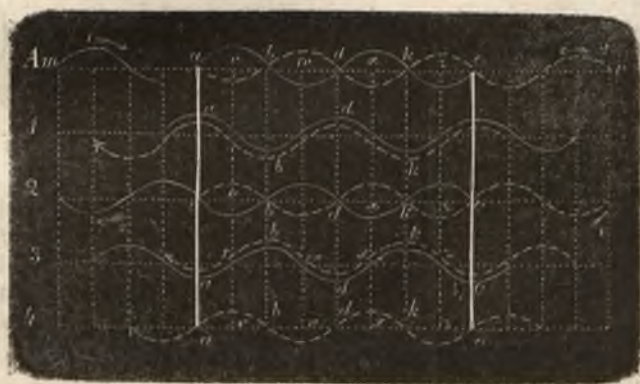


Fig. 108.

chwili otrzymują dwa ruchy, które natychmiast udzielają cząstkom po obu ich stronach będącym same zaś pozostają w spoczynku, albo co najwyżej wykonywają po obu stronach położenia równowagi nieskończenie małe ruchy, gdyż prędkości jakie one otrzymują, natychmiast zostają zniesione prędkościami w przeciwnym kierunku skierowanymi. Węzeł drgania oddzielony jest od brzuszka o połowę stojącej fali, albo o jedną czwartą fal postępujących, z interferencji których powstały fale stojące. Przez interferencję zatem fal postępujących w kierunkach przeciwnych powstają fale stojące, których długość równa się połowie długości fal postępujących, dwie obok siebie przypadające fale stojące są w przeciwnych fazach i oddzielone są od siebie węzłami.



Figura 108 daje dokładny obraz powstawania fal stojących. Punkty  $o$  i  $d$  oznaczają początki fal, punkty  $n$  i  $x$  — węzły.

Rachunek doprowadza do tych samych rezultatów.

Z wzoru (31) wiemy, że wychylenie każdej cząstki dane jest równaniem:

$$S = r \sin 2\pi \left( \frac{t}{T} - \frac{x}{l} \right).$$

Jeśli odległość obu początków fal równa się  $a$ , to odległość cząsteczki drgającej od drugiego początku =  $a - x$ , więc wychylenie tej cząsteczki wywołane drugą falą będzie

$$S_1 = r \sin 2\pi \left( \frac{t}{T} - \frac{a - x}{l} \right),$$

wychylenie wypadkowe będzie zatem

$$S = r \sin 2\pi \left( \frac{t}{T} - \frac{x}{l} \right) + r \sin 2\pi \left( \frac{t}{T} - \frac{a - x}{l} \right).$$

Stosując do tego wyrażenia, znany wzór

$$\sin a + \sin b = 2 \sin \frac{1}{2}(a + b) \cos \frac{1}{2}(a - b),$$

otrzymamy

$$S = 2r \sin 2\pi \left( \frac{t}{T} - \frac{a}{2l} \right) \cos \pi \left( \frac{a - 2x}{l} \right) = 2r \cos \pi \frac{2x - a}{l} \sin 2\pi \left( \frac{t}{T} - \frac{a}{2l} \right)$$

Wzór ten ma ogólny kształt wzoru na wychylenie, w nim  $2r \cos \pi \frac{2x - a}{l}$  oznacza amplitudę. Amplituda ta równa się zeru, gdy  $\cos \pi \frac{2x - a}{l} = 0$ , to jest gdy przy  $a = l$  będzie  $x = \frac{1}{4}l, \frac{3}{4}l, \frac{5}{4}l$ , i t. d.; w tych miejscach cząsteczki znajdują się w spoczynku, czyli tam przypadają węzły. Gdy  $x < \frac{3}{4}l$ , dostawa jest dodatnią, wtedy amplituda jest także dodatnią; jeżeli  $x > \frac{3}{4}l$ , dostawa jest ujemną, amplituda jest ujemną; po obu stronach węzła znajdują się cząsteczki w przeciwnych fazach drgania. Ponieważ drugi czynnik  $\left\{ \sin 2\pi \left( \frac{t}{T} - \frac{a}{2l} \right) \right\}$  wyrażenia dającego wychylenie wypadkowe jest niezależne od  $x$ , więc odległość cząsteczek od położenia równowagi nie zależy od ich miejsca, przechodzą one wszystkie jednocześnie przez położenie równowagi, osiągają jednocześnie największego i najmniejszego odchylenia, jednym słowem powstają fale stojące.

Powyższe zjawiska dadzą się też wywołać za pomocą maszyny falowej *Fessel'a*; a przy pewnej wprawie także za pomocą sznura lub rury kauczukowej napełnionej piaskiem, której jeden koniec jest przytwierdzony, drugim zaś poruszamy wolno ręką. Powstające fale postępowe zostają odbite przy końcu przytwierdzonym; przecinając się z utworzonymi w ten sposób falami odbitymi, dają początek węzłom i falom stojącym. Również przez interferencję fal wodnych postępowych z falami odbitymi można wywołać powstawanie fal stojących. Jednakże w tym razie jak przy wszystkich przez odbicie utworzonych falach, ostatnie węzły nie są oddalone od końców na połowę odległości węzłów między sobą, lecz znajdują się w takiej samej odległości; pochodzi to ztąd, że fala odbita jest względem fali padającej, przesunięta na połowę długość fali, jak to

później zobaczymy przy przy teorii odbicia się fal (231) wskutek tego węzły są przesunięte o  $\frac{1}{4}$  tej długości.

Najwyraźniej i najróżnorodniej można te zjawiska wywoływać za pomocą widełek strojowych Meld'ego (1860) Fig. 109. Nitka połączona z widełkami strojowymi przytwierdzona jest do sztyfcika deszczułki przesuwalnej wzdłuż linijału; za pomocą takiego urządzenia można nitkę dowolnie skracać lub przedłużyć. Jeśli widełki zostaną wprawione w drgania, to one udziela się nitce, zostaną następnie odbite przez sztyfcik i z nowonadchodzącymi falami tworzą fale stojące. Fale te powstają jednak tylko wtedy, gdy długość nitki równa się połowie lub wielokrotności połowy fali, wywołanej przez widełki w nitce; warunkami temi możemy uczynić zadość, naprężając i zmieniając długość nitki. Jeśli nitka połączona będzie z dwoma widełkami, otrzymamy fale stojące i bez odbicia. Przytwierdzając (według *Matthiessena* 1868) do gałęzi widełek strojowych cienkie sztyfciki i zanurzając końce tych ostatnich, podczas gdy widełki drgają, w cieczy otrzymujemy fale, które między końcami sztyftów przecinają się i tworzą fale stojące; przyczyną tworzenia się ich jest sprężystość błonki cieczy, dla tego też ulegają one prawom sprężystości błonek cieczy, a nie prawom fal, wywołanych siłą ciężkości.

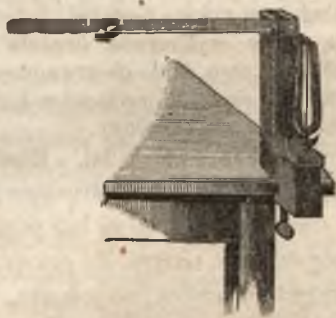


Fig. 109.

3. *Interferencya fal o różnych kierunkach drgań.* Zupełnie tak samo, **228.** jak w szeregu cząsteczek mogą się rozchodzić w jedną lub w przeciwnie strony drgania odbywające się w jednym kierunku, tak też może nastąpić, że i same drgania cząsteczek tworzą ze sobą kąt. W tym przypadku każda cząsteczka doznaje działania dwóch sił, skierowanych w różne strony i wskutek tego, opisuje drogę, którą obliczyć można na zasadzie równoległoboku sił. Wykonując ten rachunek, otrzymamy, że drogą cząsteczki w ogólności jest elipsa, która zamienia się na linię prostą, jeśli różnica fal obu drgań = 0, a na koło jeśli kierunki drgań są prostopadłe do siebie, a amplitudy ich są sobie równe.

Połączenie dwóch kierunków drgań można obserwować na kaleidofonie (*καλός* = piękny, *εἶδος* = kształt, *φωνή* = ton) uniwersalnym *Meldego* (1862). Składa się ono z blaszki przymocowanej do śruby i opatrzonej drugą śrubą, przeznaczoną do przytwierdzania drugiej blaszki z błyszczącą główką. Wprawiając obie blaszki w jednoczesne drgania, otrzymujemy najróżnorodniejsze świetlne krzywe drgania (obacz niżej).

Zupełnie tak samo jak dwa kierunki drgań łącząc się ze sobą, dają początek nowemu kierunkowi drgania, tak też i większa liczba drgań może się ze sobą kombinować; składanie tych ruchów odbywa się zawsze według zasady równoległoboku. W tym razie drogi cząsteczek jeszcze bardziej się będą oddalały od linii prostej, aniżeli drogi kołowe lub eliptyczne, gdyż w tym przypadku mogą po-

wstać najróżnorodniejsze linje krzywe zamknięte, z licznymi zagięciami, zębami i innymi zmianami. Foremne jednak drganie wtedy tylko może powstać z połączenia ruchów drgających, jeżeli czasy drgań są te same dla wszystkich, lub też jeżeli się różnią całą wielokrotnością tego czasu. Z drugiej znowu strony zupełnie tak samo jak na zasadzie równoległoboku sił można każdy z nich rozłożyć na jej składowe, tak też *każdy ruch drgający cząstek, chociażby najbardziej skomplikowany, można rozłożyć na ruchy drgające, pojedyncze, prostolinijne i wahadłowe*; oprócz tego, zupełnie tak samo, jak z połączenia kilku fal prostych powstaje zupełnie oznaczona fala interferencyjna, tak też *każdy dany i oznaczony ruch drgający możemy tylko w jeden sposób rozłożyć na ruchy pojedyncze wahadłowe, których czasy drgania różnią się tylko wielokrotnością tego czasu* (Fourier 1827). Taki rozkład musi zawsze nastąpić, ilekroć ruch drgający natrafi na przedmioty, które, mogą tylko wykonywać drgania wahadłowe, zachodzi w tym razie zjawisko podobne do tego, jakie obserwujemy gdy siła pochyła działając na powierzchnię, która może się tylko poruszać w kierunku do siły prostopadłym, rozkłada się sama na swoje siły składowe.

**229.** **Rozchodzenie się fal.** Rozchodzenie się fal zależy oczywiście od natury ciała, w którym ruch drgający się odbywa; ciało w tym razie przybiera nazwę *środką rozchodzenia się* lub poprostu *środką* (medium); kierunek rozchodzenia się drgania, nazywa się *promieniem*. Jeśli wzdłuż całego promienia gęstość i sprężystość środka jest jednaka, to środek nazywa się *jednorodnym*, w przeciwnym razie nazywa *różnorodnym*; jeśli gęstość i sprężystość środka jest jednaka dla wszystkich możliwych kierunków promieni, wtedy środek nazywa *równozwrotnym* (isotrop); w przeciwnym razie—*różnozwrotnym* (anisotrop) \*).

Z jakiegokolwiek punktu środka równozwrotnego ruch falowy rozchodzi się we wszystkich kierunkach; gdyż punkt ten jest początkiem nieskończonej wielkiej liczby szeregów cząsteczek, które w skutek ruchu pierwszego punktu, doznały przeszkody w swoim stanie równowagi. We wszystkich tych kierunkach prędkość rozchodzenia się ruchu jest jednaka, gdyż wielkość  $\sqrt{\frac{e}{d}}$  od której prędkość zależy jest jedna i ta sama dla wszystkich kierunków. Ruch falowy rozchodzi się w kształcie coraz bardziej się powiększających kul, gdyż np. po upływie jednego czasu drgania, we wszystkich szeregach cząstek ruch przeniósł się na jednakową drogę, a mianowicie o długość jednej fali;

\*) W rozprawie H. Gosiewskiego umieszczonej w pierwszym tomie Pamiętnika Towarzystwa nauk ścisłych znajdujemy następujące określenie jednorodności, które zawdzięczamy profes. Babczyńskiemu:

• Wyobraźmy sobie wewnątrz ciała ograniczoną i zamkniętą powierzchnię i nadajmy jej ruch postępowy, to jest taki, ażeby każde jej nowe położenie było podobne do pierwotnego. Jeśli części ciała ograniczane przez nią w rozmaitych epokach ruchu będą toż samo pod względem wszystkich własności chemicznych i fizycznych, to ciało nazywa się jednorodnem.



wszystkie zatem cząstki znajdujące się na powierzchni kuli, której promień równa się długości fali, rozpoczynają jednocześnie swoje drgania, jednocześnie je kończą i znajdują się zawsze w jednakowej fazie drgania. Jeśli siła wzbudzająca nie przestanie działać, cząstki te po upływie dwóch drgań rozpoczynają nowe drgania; to ma też miejsce i dla cząstek leżących na powierzchni kuli współśrodkowej z pierwszą, oddalonej od niej na długość fali, gdyż podczas drugiego drgania ruch cząstek powierzchni pierwszej kuli przeniósł się wszędzie jednakowo, a mianowicie na długość jednej fali; cząstki znajdujące się na powierzchni tej drugiej fali, będą także w jednakowych fazach drgania. Powtarzając powyższe rozumowanie przekonamy się, że cząstki powierzchni współśrodkowych lub oddalonych od siebie na parzystą liczbę połówek fal znajdują się w jednakich fazach drgania; cząstki zaś znajdujące się na powierzchni kul oddalonych od siebie na nieparzystą liczbę połówek fal, mają fazy wprost przeciwne. Kierunki rozchodzenia się ruchu falistego, jako promienie kuli są prostopadłe do powierzchni fal.

Jeśli weźmiemy pod uwagę same tylko elementy powierzchni, to możemy falę uważać za płaską, a przecięcia zrobione w niej płaszczyzną, za linje proste; taki sposób zapatrywania się jest jeszcze dozwolonym i wtedy, gdy początek ruchu drgających jest bardzo oddalonym, jak np. to ma miejsce dla słońca i gwiazd stałych. Kierunki rozchodzenia się ruchu są linie proste, wychodzące z początku; gdyż każdy kierunek idący wzdłuż promieni dowolnej kuli falowej jest przedłużeniem kierunku promienia kuli falowej, nieco mniejszej; sprowadzając zatem kierunki promieniste do coraz mniejszych kul falowych, dojdziemy ostatecznie w prostym kierunku do początku fal.

*Siła czyli natężenie ruchu drgającego jest w stosunku odwrotnym do kwadratów odległości od początku.* Jakoż fale kuliste, po których początkowy ruch się rozchodzi, stają się coraz większe, a powierzchnie ich, według znanego twierdzenia geometrycznego, rosną w stosunku kwadratów promieni. Ponieważ zaś siła żywa ruchu punktu początkowego, przenosi się bez zmiany z jednej kuli na drugą, więc powierzchnia tej samej wielkości na dwóch takich kulach leżąca, nie może otrzymać tej siły żywej, lecz tyle razy mniejszą, im powierzchnia kuli, na której leży, jest większą. Od siły zaś żywej ruchu zależy jego natężenie, a zatem natężenie ruchu jest w stosunku odwrotnym do kwadratów z promieni kul falowych.

**Zasada Huyghensa (1690).** Zamiast wyobrażać sobie, że ruch drgający przeniósł się wzdłuż szeregu cząstek, zaczynającego się w początku ruchu, możemy jeszcze, według Huyghensa, inaczej tłumaczyć rozchodzenie się fal, a mianowicie można sobie wyobrazić, że każda cząstka w ruchu będąca, staje się środkiem nowej fali kulistej, a tem samem, że ruch każdej cząstki jest wynikiem interferencji nieskończenie wielu fal. Ten sposób zapatrywania się doprowadza do tych

samych co poprzednio wniosków, i uzasadnia się tem, że każda cząstka drgająca staje się środkiem kul współśrodkowych. Z tego sposobu zapatrywania się wypada przedewszystkiem, że każda fala kulista w ciągu czasu jednego drgania daje początek nowej fali kulistej, współśrodkowej z nią i mającej tę własność, że wszystkie cząstki na niej leżące, mają tę samą fazę drgania, gdyż jeśli wszystkie cząstki pierwszej powierzchni są środkami nowych fal kulistych, to naokoło powierzchni pierwszej kuli tworzy się nieskończenie wiele nowych kul, o równych promieniach, gdyż gęstość i sprężystość środka są wszędzie te same. Cząstki na powierzchni tych kul leżące mają tę samą fazę co i powierzchnia pierwotnej fali, więc i krańcowe cząstki ich nieskończenie blisko siebie leżące, są w jednakowej



Fig. 110.

odległości od powierzchni pierwotnej fali i mają z nią jednakową fazę, a zatem tworzą powierzchnię drugiej kuli współśrodkowej z pierwszą i równej z nią fazy (kula powłócząca). Fig. 110 uwydatnia to, cośmy powiedzieli. Zrzut jakoby z takiego sposobu zapatrywania się wypadał, że każda cząstka doznając impulsu, nadanego przez nieskończenie wiele cząstek powinna mieć ruch nieskończenie wielki, upada, gdyż łatwo dowieść, że każdej cząstce powierzchni pierwszej kuli odpowiada druga cząstka, mająca wprost przeciwną fazę tak, że ruch cząstek powierzchni kuli współśrodkowej odbywa się tak, jak gdyby każda z nich doznała impulsu z pojedynczych tylko cząstek. Sposób

Huyghensa ułatwia nam zrozumienie wielu rozumowań i dla tego też zwróciliśmy na niego uwagę. Doświadczalnie można okazać zasadę Huyghensa za pomocą przyrządu *Macha* (1868). Na powłoce walca *abcd* (Fig. 111) nakreślone są

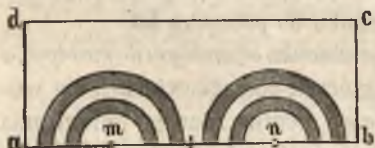


Fig. 111.

koła *m* i *n*, które mają wyobrażać fale elementarne. Obracając walec, widzimy powstające jasne i ciemne pasy, które dowodzą, że przecinanie się fal elementarnych utworzyło w tym razie fale prostolinijne.

**Odbijanie się fal.** Gdy fale rozchodzące się w jednym środku dochodzą do powierzchni drugiejgo środka, to one wracają do

pierwszego. Zjawisko to znane jest pod nazwą *odbijania się fal*. Według zasady bowiem Huyghensa, każda drgająca cząstka nietylko działa naprzód, w kierunku rozchodzenia się fal, lecz jeszcze i w kierunku wstecznym, gdyż każda cząstka staje się środkiem elementarnej fali kulistej; w środku równozwrotnym nie może przez to powstać ruch falowy wsteczny, gdyż każdej cząstce odpowiada druga oddalona od pierwszej na odległość półfali, a zatem mająca wprost przeciwną fazę, przez co działanie wsteczne tych dwóch cząstek znosi się. Inaczej rzecz się ma, gdy środek, w którym ruch się rozchodzi, ulega zmianie, to jest jeżeli staje się gęstszym lub rzadszym; wtedy bowiem

ruch cząstek pierwszej warstwy nowego środka będzie innym, aniżeli ruch cząstek warstwy za nią będącej i należącej do dawnego środka. W tym ostatnim razie działanie wracających części elementarnych fal nie może być zniesionem większą lub mniejszą część ruchu drgającego, który dotarł do nowego środka musi wrócić do dawnego, gdy tymczasem pozostałe części przenoszą się dalej, ulegając przytem pewnej modyfikacyi. Ztąd wypada, że gdy ruch falowy napotyka nowy środek, to on w części zostaje odbitym, w części zaś przenosi się dalej, w sposób zmieniony. Każda z tych części może stosownie do natury środka, raz być bardzo znaczną, drugi raz niezmiernie małą, czyli innemi słowy ruch falowy może niekiedy prawie w zupełności zostać odbity, niekiedy znowu w zupełności przeniesiony do drugiego środka; ten ostatni przypadek ma miejsce wtedy, gdy różnica gęstości obu środków jest bardzo małą.

Jeśli nowy środek jest gęstszy od drugiego, to odbita fala jest przesuniętą względem wpadającej o połowę długości fal. Gdyż cząstki uderzające o ścianę zostają odbite, cząstka np. poruszająca się ku górze, wskutek silniejszego przyciągania cząstek gęstszego środka, zostaje pociągniętą ku dołowi, jednym słowem każda cząstka otrzymuje wprost przeciwną fazę. Jeśli zatem fala dochodzi do granicy obu środków jako góra, to zostaje odbitą jako dolina i naodwrot, czyli że fala odbita zostaje przesuniętą względem fali padającej o połowę długości fali. Szczególnie ważnym jest kierunek fali odbitej; zwykle bierzemy pod uwagę kierunek promienia prostopadłego do powierzchni fali; zamiast kąta utworzonego przez falę i ścianę odbijającą uważamy równy mu kąt, jaki czyni promień prostopadły do powierzchni fal, z prostopadłą do powierzchni odbijającej wystawioną, w punkcie ich zetknięcia się. Kąt ten nazywa się *kątem padania*, kąt zaś jaki czyni promień odbitej fali z prostopadłą do powierzchni, odgraniczającej oba środki w punkcie zetknięcia nazywa się *kątem odbicia*. Związek między tymi dwoma kątami wyraża się niezmiernie ważnym prawem: *kąt padania równa się kątowi odbicia*.

**Dowód.** Niech *ab* (Fig. 112) oznacza tak małą część fali, żeby można ją było uważać za prostolinijną a oba promienie *db* i *ca* jako linie równoległe; ta część fali spotyka powierzchnię nowego środka pod kątem padania  $abn = dbh$ . Według zasady Huyghensa, punkt *b* staje się środkiem nowej fali kulistej, która rozchodzi się w obu środkach z tą tylko różnicą, że prędkość rozchodzenia się w pierwszym środku jest taka sama, jaka była i jest prędkość fali *ab*. W tym samym więc czasie, w którym fala postępująca porusza się naprzód od *a* do *f*, utworzy się naokoło *b* fala elementarna, której promień  $bi = af$ , a mianowicie fala *ghi*. W tym czasie ruch kolejno doszedł do wszystkich punktów leżących, między *b* i *f* i każdy z nich stała się środkiem nowej fali kulistej; ponieważ zaś każdy z tych punktów coraz później staje się środkiem wzniczającym fale elementarne, więc promienie tych fal muszą się coraz bardziej zmniejszać, w granicach od *bi* do *p*, ostatnia

fala zera ma za środek punkt  $f$ . Wszystkie te fale, z powodu że się jednostajnie zmniejszają i przecinają, dają początek fali płaskiej, która jest styczną do wszystkich fal kulistych. Położenie tej fali płaskiej da się już wyznaczyć z dwóch fal elementarnych, z fali  $ghi$ , fali  $o$ , około punktu  $f$  powstającej, a mianowicie dla jej wyznaczenia dość będzie z punktu  $f$  poprowadzić styczną do fali  $ghi$ . Zatem  $fk$  będzie falą odbitą, a linja  $bk$  jej promieniem. Kąt odbicia tej fali jest  $bfk = kbh$ . Z równości trójkątów  $abf$  i  $kbf$  wypada, że kąt  $abf = kfb$  a tem samym, że  $dbh = kbh$ , *c. b. d. o.* Jeśli wyobrazimy sobie, że przez falę padającą przed i za płaszczyzną papieru poprowadziliśmy płaszczyzny równoległe do koła  $ghi$ , tobyśmy otrzymali

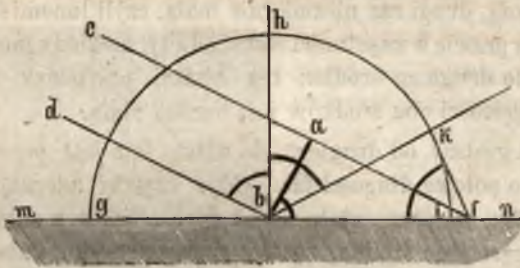


Fig. 112.

małe koła równoleżnikowe; płaszczyzna  $fk$  nie jest styczną do tych kół, lecz tylko do koła  $ghi$ ; zatem promień odbity leży na płaszczyźnie tego koła, to jest na tej samej płaszczyźnie, co promień padający i prostopadła wyprowadzona w punkcie padania; ztąd otrzymujemy prawo, że promień padający, promień odbi-

ty i prostopadła do płaszczyzny odbijającej w punkcie zetknięcia leżą na jednej płaszczyźnie. Również łatwo widzieć, że fala odbita nie tylko ma tę samą pochyłość względem płaszczyzny odbijającej ją, co i fala padająca, lecz że prócz tego ma jeszcze ten sam kształt i tę samą wielkość; różnica między temi falami jest tylko taka, że kierunki rozchodzenia się ich i położenia są wprost przeciwne. Ztąd wypada, że fala kulista zostaje odbitą jako druga fala kulista, o tym samym promieniu, a tylko środek fali padającej, na takiej znajduje się odległości przed ścianą odbijającą, na jakiej środek fali odbitej znajduje się za tą ścianą. Fale, utworzone w jednym ognisku naczynia elipsoidalnego napełnionego rtęcią, (przez puszczenie np. kroplek rtęci) łączą się w drugim ognisku, gdyż elipsa ma tę własność, że promienie wodzące, poprowadzone od jej ognisk do jakiegokolwiek elementu krzywej, tworzą z tym elementem równe kąty. Jeśli podobne fale utworzymy w ognisku naczynia paraboloidalnego, to one po odbiciu rozejdą się prostopadliniwnie w kierunku prostopadłym do osi, gdyż w paraboli promień wodzący i linia równoległa do osi tworzą równe kąty z elementem krzywej.

**252. Załamanie się fal.** Przez załamanie się fal rozumiemy zmianę, jakiej doznaje kierunek fali, przy przejściu z jednego środka do drugiego. Drugi środek ma inną gęstość, więc w nim prędkość rozchodzenia się fal zmieni się, wskutek zmiany wielkości czynnika  $\sqrt{\frac{e}{d}}$ , mianowicie nowa prędkość  $c'$  musi być większą od pierwotnej  $c$ , gdy gęstość środka zmniejszyła się, przeciwnie nowa prędkość się zmniejsza, gdy gęstość środka się powiększa. Ztąd wypada, że fale wchodzące do nowego środka, opiszą w tym samym czasie koło

o większym lub mniejszym promieniu, aniżeli fale wracające do pierwszego środka i powstałe wskutek drgania tych samych cząstek. Koniecznym wynikiem tego będzie, że fala powstająca z interferencyi fal elementarnych i rozchodząca się w nowym środku musi mieć inny kierunek aniżeli fala pierwotna. Kąt jaki fala odchyłona od pierwotnego swego kierunku, czyli załamana czyni z powierzchnią nowego środka, czyli, co na jedno wychodzi, kąt utworzony przez promień fali odbitej a prostopadłą—nazywa się kątem załamania. Kąt ten dany jest przez następujące prawo: *Dla tych samych dwóch środków stosunek wstaw kąta padania i kąta załamania jest niezmienny i równa się stownikowi prędkości ( $c: c'$ ) rozchodzenia się fal w obu środkach.*

*Dowód.* W tym samym czasie, w którym fala  $ab$  (Fig. 113) dochodzi w środku dawnym do punktu  $f$ , tworzy się naokoło cząstki  $b$  nowa fala elementarna, tak w jednym jak i w drugim środku. Promień  $bh$  tej fali w pierwszym środku równa się  $af$ . Jeśli nowy środek jest gęstszy, aniżeli dawny, to promień rozchodzącej się w nim fali  $poq$  musi być mniejszym aniżeli  $bh$ , a mianowicie musi w tym razie zachodzić proporcja  $bh:bo = c:c'$ . W ten sam sposób

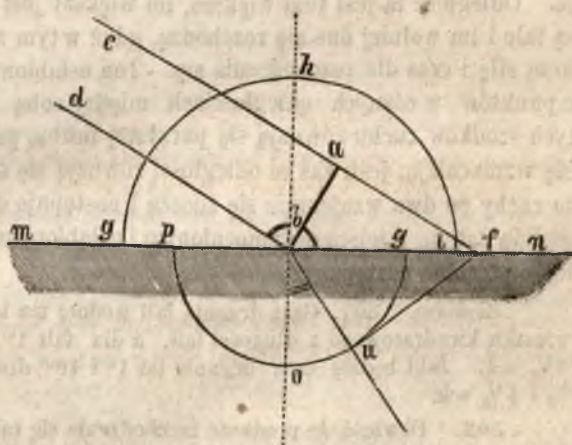


Fig. 113.

tworzą się w nowym środku na około wszystkich cząstek między  $b$  i  $f$  zawartych, nowe fale elementarne, coraz bardziej się zmniejszające, gdyż cząstki te później zaczynają drgać, aniżeli  $b$ ; gdy ruch dotarł do punktu  $f$ , to fala elementarna przezeń utworzona będzie miała promień  $= o$ . Przez interferencyę wszystkich tych fal elementarnych, powstaje jedna fala postępująca, która jest styczną do wszystkich fal elementarnych. Kierunek tej fali łatwo otrzymamy, prowadząc z punktu  $f$  styczną  $fu$  do koła  $poq$ ;  $fu$  zatem jest falą załamaną w nowym środku,  $bh$  jej promień,  $bfu = obu$  — kąt załamania,  $abf = dbh$  zaś — kąt padania. Lecz

$$\sin abf = \frac{af}{bf}, \quad \sin bfu = \frac{bu}{bf}, \quad \text{więc} \quad \frac{\sin abf}{\sin bfu} = \frac{af}{bu} = \frac{bh}{bo} = \frac{c}{c'}, \quad \dots \quad (32)$$

W ten sam sposób jak przy odbijaniu można dowieść, że promień padania, promień załamany i prostopadła leżą na jednej płaszczyźnie.

**Uginanie się fal.** Przez uginanie się fal rozumiemy zjawisko rozchodzenia się ruchu falowego naokoło krawędzi, w przestrzeni za brzegiem ścia-

ny, np. za dwoma brzegami szpary; zrobionej w cienkiej ścianie. Przestrzeń, która znajduje się wprost za szparami nie przedstawia żadnej osobliwości, gdyż w niej ruch falowy może bez żadnej przeszkody rozchodzić się, lecz za to w przestrzeni za krawędziami ruch falowy doznaje zmian, które najlepiej wytłomaczyć się dadzą według zasady Huyghensa. W tej przestrzeni bowiem ruch falowy nie rozchodzi się bezpośrednio, zatem nie wszystkie elementarne fale zostają zniesione przez działanie przeciwne, lecz fale utworzone wskutek drgania cząstek na krawędzi leżących, rozchodzą się kulisto za tą krawędzią. Liczba tych fal elementarnych jest ograniczona, dla tego też ruch falowy za krawędzią jest osłabiony i w pewnej od niej odległości zupełnie ustaje. Odległość ta jest tem większa, im większy jest ruch falowy, im dłuższe są fale i im wolniej one się rozchodzą, gdyż w tym razie ruch boczny ma większą siłę i czas dla rozchodzenia się. Ten osłabiony ruch boczny wychodzi z punktów w różnych odległościach między sobą będących; jeśli odległości tych środków ruchu równają się parzystej liczbie półfal, to ruchy wzajemnie się wzmacniają; jeśli zaś te odległości równają się nieparzystej liczbie półfal, to ruchy po dwa wzajemnie się znoszą i następuje osłabienie ruchu. Za krawędzią zatem, miejsca o wzmocnionym i osłabionym ruchu falowym muszą kolejno po sobie następować.

*Zadania.* 301. Czas drgania fali wodnej ma być proporcjonalny do pierwiastku kwadratowego z długości fali, a dla fali  $1^m$  długości mającej, wynosi  $1\frac{1}{2}$  sek. Jaki będzie czas drgania fal  $1^d$  i  $10^m$  długości mających? Rozwiąz.  $\frac{1}{2}$  i  $4\frac{1}{2}$  sek.

302. Dowieść, że prędkość rozchodzenia się takich fal jest proporcjonalną do pierwiastku kwadr. z długości fali.

303. Jakie jest wychylenie i prędkość fazy po upływie  $\frac{1}{12}$  i  $\frac{1}{6}$  czasu drgania? Rozw. Według wzoru (25)  $S = \frac{r}{2}$  i  $\frac{r}{2} \sqrt{3}$ , a następnie  $v = \frac{u}{2} \sqrt{3}$  i  $v = \frac{u}{2}$ .

304. Jeśli najpowszejsze drganie głosowe trwa  $\frac{1}{8}$  sek., a głos przebiega na sek.  $336^m$ , jaka będzie długość fali tego głosu? Rozw. według wzoru (25),  $l = 42^m$ .

305. Jaka jest długość fal tonu a, jeśli liczba jego drgań = 440? Roz.  $l = 71^c$ .

306. Ile drgań wykonywa światło fioletowe, jeśli długość jego fali =  $0,0004^{mm}$  i jeśli prędkość światła wynosi  $42000$  mil? Rozw. 800 bilionów.

307. Jaka jest długość fali promienia ciepła ciemnego o 200 bilionach drganiach na sek? Rozw.  $0,0016$ .

308. Dowieść, że głos ma jednakową prędkość w zgęszczonym i rozrzedzonym powietrzu? Rozw. Zastosować wzór (30) i twierdzenie Mariote'a.

309. Jaka jest prędkość głosu w wodzie? Rozw.  $\frac{336}{\sqrt{0,0688}} = 1270^m$ .

310. Co można w tem miejscu zarzucać hipotezie, według której eter jest rozrzedzonym wodorem? Wskaz. For. (30), prawo Mariote'a, prędkość głosu w wodrze =  $1270^m$ , prędkość światła =  $42000$  mil.

311. Co musiałyby nastąpić, gdyby powyższa hipoteza była prawdziwą? Wskaz. Gęstość wodoru musiałyby daleko więcej się zmniejszać aniżeli jego sprężystość.

312. W jakim stosunku mają się do siebie sprężystość i gęstość eteru w wszechświecie, jeśli prędkość światła =  $42000$  mil? Wskaz.  $\sqrt{\frac{e}{d}} = 42000$ .

313. W jakim czasie ruch falowy przebiega drogę w? Rozwiązanie:  
Czas =  $\frac{w}{\sqrt{\frac{e}{d}}}$ .

314. Po jakim czasie cząstka oddalona od początkowej na  $\frac{1}{4}$  fali przychodzi do spoczynku? Rozw. Według wzoru (31)  $t = \frac{1}{2}T, \frac{2}{2}T, \frac{3}{2}T$  . . .

315. Po jakim czasie cząstka ta wraca do pierwotnego swego położenia? Rozw.  $t = \frac{3}{4}T, \frac{5}{4}T$  . . . . . (31).

316. W jakiej odległości powinny być dwa środki rozchodzenia się promieni fioletowych, by światło ich wzajemnie się zniósło? Rozwiąz.  $0,0002^{mm}, 0,0006^{mm}, 0,001^{mm}$  . . . . .

317. W jakiej od siebie odległości powinny być źródła dwóch tonów a, by one wzajemnie się wzmacniały? Rozw.  $76^\circ, 152^\circ, 228^\circ$  . . . . .

318. Jaka zachodzi różnica między odległościami węzłów od punktów wzniesienia dwóch fal l, rozchodzących się w kierunkach wprost sobie przeciwnych? Rozw.  $\frac{1}{2}l, \frac{3}{2}l, \frac{5}{2}l, \dots, \frac{1}{2}(2n-1)l$ .

319. Punkt wzniesienia znajduje się w odległości d od ściany, oznaczyć punkty gdzie przypadają węzły i brzuski? Rozw.  $(2d-x) - x = \frac{1}{2}(2n-1)l + \frac{1}{2}l = \frac{1}{2}2nl$ ; zkad  $x = d - \frac{1}{2}nl = d - \frac{1}{4}2nl$ ; dla brzuszków  $d - \frac{1}{4}(2n+1)l$ .

320. Gdzie przypadają węzły i brzuski dla tonu a, rozlegającego się w odległości  $300^\circ$  od ściany? Rozwiąz. Węzły:  $262^\circ, 224^\circ, 182^\circ, 148^\circ$  . . . ; brzuski:  $281^\circ, 243^\circ, 201^\circ, 167^\circ$  . . . . .

## ODDZIAŁ PIĄTY.

# Nauka o głosie czyli Akustyka.

### 1. Określenie akustyki.

**234.** **Pojęcie i rodzaje głosu.** Przez głos rozumiemy działanie ruchu drgającego na przyrząd słuchowy.

Że w istocie głos jest skutkiem szybkich drgań, łatwo się przekonać, obserwując ciało drgające, jakoteż zwracając uwagę na to, że ton wydany przez drgające ciała, natychmiast ustaje, jeśli jakimkolwiek sposobem wstrzymamy ich ruch. Inne jeszcze doświadczenia przekonywają nas o prawdzie powyższej. Brzęczące struny zrzucają kawałki papieru na nich umieszczone. Posypawszy utwierdzone brzęczące płyty, drobnym piaskiem, spostrzeżemy, że ziarnka piasku podskakują w górę i opadają napowrót. Wprowadzając do wnętrza brzęczącej piszczałki szklanej błonę, przytwierdzoną do nitki posypaną piaskiem, spostrzeżemy, że ziarnka piasku zostają wprawione w gwałtowny ruch; podobnież proszek lykopodium wprowadzony do rurki szklanej drga, jeśli ją przez potarcie doprowadzimy do brzęczenia (Kundt, 1866). Najpiękniej można uczynić widzialnemi drgania brzęczących ciał, za pomocą figur świetlnych *Lissajous'a* (1855), metoda ta daje się zastosować do takich ciał, których drgania zwykłe są niewidzialne, jak np. drgania brzęczących widełek strojowych. Do jednej gałęzi widełek strojowych jest przytwierdzone zwierciadełko, na które w ciemnym pokoju rzucamy promień światła, promień ten odbity od zwierciadełka pada na zasłonę, na której utworzy punkt świecący, gdy widełki strojowe są w spoczynku; jeśli zaś widełki drgają, to punkt świecący kołysząc się w jedną i drugą stronę, tworzy pas świetlny; jeśli nakoniec podczas gdy widełki strojowe brzęczą, będziemy obracali drugie zwierciadło, na zasłonie utworzy się regularna fala. Drgania ciała brzęczącego, podobnie jak wybuchający pęcherz mieszaniny piorunującej, udzielają uderzenia powietrzu, które się przenosi do naszego ucha. Aby te uderzenia sprawiały w uchu wrażenie głosu, trzeba aby amplitudy czyli wielkości wychyleń i prędkości drgań przechodziły pewne granice, a liczba drgań musi się zawierać między oznaczonemi granicami wyższą i niższą. Jedno lub kilka pojedynczych drgań wtedy tylko słyszymy, jeśli podobnie jak w eksplozji wychylenie i prędkości drgania są bardzo wielkie. Drgania wahadła, pomimo wielkiego wychylenia nie wywierają wrażenia na ucho, gdyż prędkości



ich są bardzo małe; tymczasem drgania struny, których najbystrzejsze oko nie widzi, doskonale słyszymy, albowiem z powodu wielkiej swej prędkości zawierają wielką siłę żywą; przez co udzielają powietrzu większe uderzenia. Przy pewnej liczbie drgań głos przechodzi w ciepło. Drgania głosowe różnią się od drgań ciepła i światła nie tylko liczbą, lecz jeszcze daleko większym wychyleniem i tem, że w każdym z nich bierze udział kilka złączonych cząstek.

Stosownie do liczby i natury drgań rozróżniamy następujące rodzaje **235.** głosu: *hukiem* nazywamy głos powstający przy jednym lub kilku wielkich drganiach, wielką prędkość mających; jeśli wychylenie takich drgań jest małe, huk przechodzi w *trzask*. Jeśli kilka mocnych, prawie równych huków następuje po sobie, wtedy powstaje *turkot*; słabsze lecz szybciej po sobie następujące huki tworzą *huczenie*, *świs*t i t. p.

*Ton* (dźwięk) powstaje z większej liczby zupełnie równych szybkich drgań, których wychylenia nie są zbyt wielkie; gdy wychylenie drgań staje się za wielkiem a równość ich zostaje naruszoną, wtedy ton przechodzi w *krzyk*. Każde inne następstwo nierównych i nieregularnych drgań tworzy *szmer*, którego jest kilka rodzajów.

Różnice te można wykazać na zasadzie prostych obserwacji lub wniosków; jednakże można je uwydatnić za pomocą fonautografu (*φωνή* = ton, *αὐτός* = sam, *γράφω* = pisać), zbudowanego przez *Scott'a* (1859), a ulepszonemu przez *Königa*. Składa się on z dużej wydrążonej paraboloidy z blachy cynkowej, która przy końcu wierzchołkowym obok ogniska jest otwartą i opatrzona błoną (Fig. 108).



Fig. 114.

Błona ta opatrzona jest lekkim pręcikiem, którego koniec dotyka się powierzchni walca. Walec ten obraca się około osi za pomocą korby, a ponieważ oś jest zarazem śrubą, to za każdym obrotem walec zostaje nieco posuniętym. Walec obwinięty jest papierem okopconym. Gdy głos zostaje wznieconym, to drgania przez niego wywołane jednoczą się na powierzchni błony, a pręcik je wy-

kreśla na okopconym papierze. Huk daje jedną wielką i kilka małych fal, ton wielką liczbę zupełnie równych fal i t. d.

Jeśli głos powstaje przez drganie ciała ograniczonego, to drgania te, jak wiadomo, ulegają odbiciu na jego powierzchni i przez interferencje z drganiami pierwiastkowemi tworzą fale stojące. Największa liczba rodzajów głosu powstaje ze stojących drgań ciał sprężystych, jak to np. widzimy przy drganiu strun.

**236.** **Rozchodzenie się głosu** (*Newton 1687*). Zwykłym środkiem, w którym głos się rozchodzi, jest powietrze, a mianowicie dla tej prostej przyczyny, że największa liczba ciał drgających jak również i organ słuchowy znajdują się w powietrzu. W próżni głos się nie rozchodzi; można się o tem przekonać za pomocą dzwonka zegarowego umieszczonego pod dzwonem maszyny pneumatycznej; w miarę rozrzedzania powietrza głos coraz bardziej słabnie. Doświadczenie to jednakże wtedy tylko dobrze się udaje, gdy dzwonek zawieszimy na sznurkach lub postawimy na wacie. Jeśli dzwonek stoi na talerzu maszyny, wtedy głos jego przy najsilniejszym nawet rozrzedzeniu powietrza nie jest bardzo słabym, gdyż ciała stałe i płynne tak samo, a nawet lepiej, przeprowadzają głos, aniżeli gazy, gdyż ich siła sprężystości jest większą.

Dowody na to są następujące: umieszczając zegarek na jednym końcu długiej belki, doskonale słyszymy jego uderzenia na drugim. *Wheatstone* z piwnicy swego domu przeprowadził przez sklepienie i sufity cztery sosnowe słupy do górnych pięter; słupy te w piwnicy były w zetknięciu z fortepianem, skrzypcami i wiolonczelą, urządził tym sposobem dla swych gości niewidzialny koncert. Przy zakładaniu telegrafów często na przestrzeni kilkamilowej druty leżą na ziemi; otóż pilując jeden koniec takiego drutu, powstający ztąd głos możemy słyszeć na drugim końcu, szczególnie jeśli ten koniec przybliżymy do ucha, lub weźmiemy między zęby. Grzmoty zaledwie słyszeć się dają na odległości 4 mil, grzmoty zaś armat słyszeć można na setki mil. Wstawiając widełki strojowe nóżkami do wody znajdującej się w rurze, której podstawą jest duża, sprężysta deska, usłyszymy, jak ton wydawany przez widełki nagle się podniesie. Syrena, przyrząd którego opis później podamy, wydaje też głos pod wodą.

Rozchodzenie się głosu w jakimkolwiek środku odbywa się za pomocą postępujących fal podłużnych. Każde bowiem dźwięczące, a tem samem drgające ciało, wyprowadzone z położenia równowagi udziela uderzenie otaczającemu środkowi. Najbliższe więc cząstki tego środka zostają popchnięte naprzód, one znowu uderzając w kierunku swego ruchu o następne cząstki, wprawiają je także w ruch skierowany w tę samą stronę. Tak dalej rozumując łatwo się przekonamy, że kolejno wszystkie cząstki zostają wprawione w ruch, którego kierunek jest ten sam co kierunek ogólnego ruchu, ponieważ zaś wszystkie cząstki muszą wrócić do pierwotnego swego położenia, to one utworzą ruch falowy podłużny, nad którego własnościami musimy się nieco bliżej zastanowić. Pierwsze uderzenie ciała drgającego przenosi się na cząstki środka na odległość, której wielkość zależy od sprężystości tego

środką. Gdy ciało drgające dosięgło największego odchylenia, to cząstki środka najbliżej niego będące, wykonały prawie ten sam ruch, następne przebiegły drogę mniejszą, a jeszcze dalsze zaczynają dopiero swój ruch; ztąd wypada, że cząstki musiały się do siebie zbliżać czyli że środek musiał doznać zgęszczenia. Jeśli ruch drgający odbywa się wahadłowo, to pierwsze i ostatnie cząstki muszą mieć najmniejszą prędkość, środkowe zaś,—największą; w tem zatem miejscu musi nastąpić największe zgęszczenie. Ponieważ zaś wszystkie cząstki kolejno nabywają największą prędkość, to też i miejsce największego zgęszczenia musi się posuwać naprzód, ustępując miejsca największemu rozrzedzeniu. Gdyż pierwsze cząstki środka tuż obok ciała drgającego będące wracają do spoczynku prawie jednocześnie z ciałem i prawie razem z niem wracają do pierwotnego położenia. Podczas tego powrotu cząstki średnie kolejno wracały do spoczynku, krańcowe zaś cząstki dosięgły największej swej prędkości postępowej i wróciły następnie do spoczynku. Wskutek tego cząstki te oddaliły się od siebie; w miejscu, gdzie poprzednio były zgęszczone, będzie teraz rozrzedzenie; największe rozrzedzenie jest w miejscu największej prędkości, a zatem znowu we środku, gdyż pierwsze cząstki znajdują się przy końcu wahadłowego powrotu, ostatnie zaś w początku tego ruchu powrotowego, a zatem tak jedne jak drugie mają najmniejszą prędkość. Zupełnie więc tak samo, jak wszystkie cząstki miejsca rozrzedzonego znajdują się w powrocie, tak samo znowu wszystkie cząstki powstałego tymczasem zgęszczenia, poruszają się naprzód; między miejscami zgęszczenia i rozrzedzenia cząstki są w spoczynku. Zgęszczanie więc i rozrzedzenie razem wzięte tworzą falę, która podlega wyżej wyłożonym prawom.

Te postępowe i podłużne fale dają się uwydatnić za pomocą przyrządu falowego *Wheatstone'a*, lub też za pomocą tarczy falowej Müllera.

Prędkość rozchodzenia się głosu w powietrzu wynosi przeciętnie 333<sup>m</sup>.

**Ton.** Najważniejszym głosem jest ton, czyli dźwięk. Ton powstaje z drgań, które mają jednakowy czas trwania, równe amplitudy i równe kształty. Z powodu równości drgań tworzących ton, można na nim najlepiej badać ruchy głosowe. Tony różnią się pomiędzy sobą pod trojakim względem: pod względem *wysokości*, pod względem *natężenia* i pod względem *jakości* czyli *barwy* (dźwięczności). Wysokość tonu jest to wrażenie zależne od czasu drgania; ton jest tym wyższy, im mniejszy jest czas trwania jego wahanień, czyli im większą jest liczba tych drgań (w 1 sek.). Natężenie głosu jest wrażeniem zależnym od siły żywej drgań; jest ona zatem zależną od amplitudy i prędkości drgań. Barwa tonu czyli jego dźwięczność, jest wrażeniem zależnym od kształtu drgań, gdyż różne formy drgań przy tej samej nawet wysokości i tem samym natężeniu muszą nadawać tonowi różny charakter,

wycisnąć na nim właściwe piętno, które właśnie barwą tonu zwiemy. Trzy te określenia wyjaśnimy bliżej, za pomocą doświadczeń.

*Wysokość tonu wzrasta wraz z liczbą jego drgań.*

Trzymając kartę w bliskości obracającego się koła zębatego, słyszymy ton, którego wysokość jest tem większą, im szybciej obracamy koło. Wtykając drut do deski i wprawiając w ruch jego koniec wolny, widzimy, że drgania drutu będą tym szybsze i ton przez niego wydawany będzie tem wyższy, im krótszą jest część drutu wystająca nad deskę. Ogrzany przyrząd *Trevelyan'a* (kołoska) (1829), składający się z płyty metalowej, opatrzonej podwójnymi brzegami, położony na kłoc ołowiany, ogrzewa olów, który rozszerzając się, porusza przyrząd to w jedną, to w drugą stronę, powstający przy tem ton jest tem wyższy, im te kołysania odbywają się szybciej \*). Najlepiej jednak określenie wysokości tonu objaśnia się za pomocą *syreny*. Syrena tekturowa *Seebeck'a* (1837) składa z krążka tekturowego lub metalowego, który zostaje wprawiony w szybki ruch, za pomocą maszyny odśrodkowej i który opatrzony jest jednym lub wieloma kołowami szeregami otworów. Jeśli za pomocą ruchu puszczamy silny prąd powietrza na krążek, to za każdą razą, gdy otwór przechodzi po nad rurką, powietrze z drugiej strony krążka będące otrzymuje uderzenie; więc przy każdym obrocie krążka powstaje tyle drgań, ile syrena ma otworów. Otóż doświadczenie uczy, że im szybciej krążek obracamy, tem wyższy otrzymujemy ton. Jeśli drgania dwóch tonów będziemy badali za pomocą sposobu *Tissajous*, zobaczymy, że wyższemu tonowi na tem samem miejscu zastony, odpowiada więcej fal świetlnych, aniżeli tonowi niższemu.

258.



Fig. 115.

**Oznaczenie liczby drgań tonu.** Syrena *Cagniard-Latour'a* (1825), jest bardzo przydatną do obliczenia liczby drgań tonu. W przyrządzie tym przedziurawione koło wprawione zostaje przez sam strumień powietrza. Do tego służy pudło walcowe B (Fig. 115), które za pomocą rury R osadzone jest na skrzyni miechów organowych, przesyłających stały prąd powietrza do pudła walcowego. W denku pudła, znajduje się szereg kołowy otworów, ukośnie wyciętych. Bezpośrednio nad denkiem znajduje się koło syreny C, opatrzone równym szeregiem otworów, wyciętych ukośnie i w kierunku przeciwnym aniżeli otwory denka. Prądy powietrzne wychodząc z otworów denka, uderzają o ściany otworów koła, przez co wprawiają je w ruch. Puszczając silniejszy prąd powietrza zobaczymy, że koło coraz szybciej obracać się będzie i wydaje coraz wyższy ton, który też z powodu większej liczby prądów powietrznych, staje się dość silnym. Koło syreny osadzone jest na osi AF, któ-

\*) Patrz Ciepło Tyndala, tłum. Bib. Um. przyrod. str. 98.

re za pomocą śruby bez końca zaczepia o koła zębate przyrządu, służącego do znaczenia liczby obrotów. Gdy przez uregulowanie strumienia powietrza nadamy tonowi stałą wysokość, przyciskamy sprężynę *f*, przez co przyrząd do liczenia zostaje wprawiony w ruch, który po upływie pewnego czasu (np. 1 minuty) wstrzymujemy przyciskając guzik *a*. Skazówki przyrządu do liczenia dają nam liczbę obrotów koła syreny, liczba ta, pomnożona przez liczbę otworów koła i podzielona następnie przez 60, daje nam liczbę drgań tonu.

Dla oznaczenia liczby drgań tonu wydanego przez inny przyrząd wprawiamy przedewszystkiem syreną w ruch; gdy jej ton pod względem wysokości zbliża się do tonu badanego, wtedy jak później zobaczymy powstają uderzenia, których liczba coraz bardziej się zmniejsza w miarę tego, jak oba tony zbliżają się do zgodności. Jeśli np. ton syreny zgadza się z tonem *a* kreskowanym, (piszemy *a*, albo też według propozycji *Sondhausa a'*), a zatem z tonem, który kobieta łatwo brać może, tenor z pewną tylko trudnością, i jeśli wtedy syrena mająca 15 otworów wykonywa 1750 obrotów na minutę, to liczba drgań tonu  $a' = 1750 \times 15 : 60 = 437\frac{1}{2}$ . Liczbę drgań tonu można też wyznaczyć za pomocą fonauto-

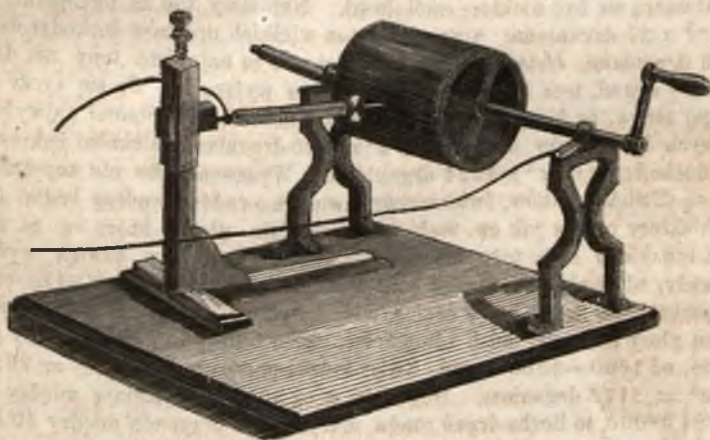


Fig. 116.

grafu Scott'a lub też za pomocą każdego innego wibrografu, na którym początek i koniec czasu oznaczony zostaje na linii falowej. Pomysł wibrografu należy się *Wilhelmowi Weber* (1830). Przyrząd jego składał się jednak z poczernionej tylko tafli szklanej, nad którą ręką jednostajnie przeprowadzała dźwięczące widełki strojowe, sprężyną opatrzone.. Wibrograf *Duhamela* (1859) Fig. 116, składa się z walca *T*, któremu można nadać ruch obrotowy i postępowy za pomocą śruby osiowej. Walec ten opatrzone jest poczernioną powłoką, której dotyka się sprężynka połączona z dźwięczącym ciałem. Sprężynka ta kreśli na powłoce linię falową tonu; jeśli więc aparat zegarowy oznaczy jeszcze na tej linii falistej po-

czątek i koniec sekundy, to liczba fal między znaczkami zawartych da nam liczbę drgań. Liczba drgań da się jeszcze wyznaczyć za pomocą dźwiękomierza *Appun- n'ego* (1865) patrz (266).

Nie każdą liczbę drgań ucho ludzkie odróżnia jako ton; według *Helmholtza* poczucie tonu rozpoczyna się przy 30 drganiach na sekundę, lecz dopiero przy 40 dosięga pewnej wysokości muzycznej. Kiedy liczba drgań jest mniejszą od 30, to słyszymy tylko pojedyncze uderzenia; *Savart* jednak utrzymuje, że już ośm silnych uderzeń wywołuje ton. Jeszcze mniejszą pewność mamy co do granicy wyższej tonów, jakie ucho nasze jeszcze słyszy, a to, głównie dla tego, że zdolność słyszenia różnych tonów jest bardzo różną dla rozmaitych indywidualów. Bardzo zabawną wydaje się scena w towarzystwie, kiedy jedna osoba skarży się na świszczący ton małej fujarki, inne tymczasem twierdzą, że ona wcale głosu nie wydaje (*John Herschel*). *Brewster* jednym tylko uchem mógł słyszeć ćwierkanie świerszcza. Gdy *Tyndall* zachwycał się w Alpach muzyką różnych owadów, przyjaciel jego tej muzyki wcale nie słyszał. *Savart* i inni naznaczają 38,000 drgań jako granicę wyższą tonu.

W orkiestrze najniższy ton jest kontra—E ( $e^{-2}$ ) kontrabas dający 41 drgań na sekundę, najwyższy d fletu z ( $d^5$ ) 4752 drganiami. Wysokość głosu ludzkiego przy śpiewie zawiera się w granicach między 64 i 1500 drganiami, wyższymi zdają się być niektóre spółgłoski. Najniższy ton na fortepianie dochodzi do  $a^{-5}$  z 27 drganiami; a najniższy ton wielkich organów dochodzi nawet do  $e^{-3}$  z 16 drganiami; *Helmholtz* jednak sądzi, że te najniższe tony nie dają tak małej liczby drgań, lecz że są mieszaniną tonów wyższych. Co się tyczy granicy wyższej tonów, to fortepian nie dorównywa fletowi; wogólności najwyższy ton zwyczajnych fortepianów dochodzi do  $a^4$  z 3520 drganiami, niektóre jednak wydają tony dochodzące do  $c^5$  z 4224 drganiami. Wyższymi lubo nie zupełnie określonymi są dźwięki ptaków, świerszczów i innych owadów; według badań *Landois* (1869) niektóre owady jak np. małe muchy wydają głosy, które są za wysokie dla ucha ludzkiego i dla tego ich nie słyszymy. Najwyższy dźwięk wydawany przez owady, zdaje się być dźwięk lotu trzmieli mechowych  $a^0 = 217$ ; ton lotu much i pszczoł po największej części jest o oktawę wyższy  $= 400$ ; o niewiele wyższe są głosy trzmieli, much i komarów, około 500—600 drgań; głosy pszczoł są wyższe, od 1000—1500 drgań. Świst ludzki przypada między  $c^1 = 262$  drganiami i  $c^4 = 2112$  drganiom. Gdy tony w ogólności przypadają między liczbami drań 8 i 38000, to liczba drgań tonów muzycznych przypada między 40 i 5000 drganiami.

**239.** **Przestanek.** Przez *przestanek* między dwoma tonami rozumiemy odstęp, jaki między nimi zachodzi co do ich wysokości i który odstęp wyraża się stosunkiem liczb ich drgań. Za pomocą syreny nie tylko można okazać, że jednemu i temu samemu tonowi, wydawanemu przez najrozmaitsze przyrządy muzyczne, odpowiada ta sama liczba drgań, lecz można jeszcze za pomocą niej przekonać się, że tony różniące się małą tylko liczbą drgań, nie mogą być odróżniane przez ucho ludzkie. Ponieważ zaś oprócz tego, jak o tem za pomocą dwóch syren łatwo się przekonać, takie dwa tony przez współbrzmienie wywołują uderzenia niezmiernie ciężkie dla ucha, to w mu-

zyce unikają tonów małą tylko liczbą drgań się różniących. Podobnie i tony więcej od siebie odstające pod względem liczby drgań, lecz których stosunek tylko wielkimi liczbami wyrazić się da, nie mogą mieć zastosowania w muzyce, gdyż one jak później zobaczymy, przy współbrzmieniu są nieprzyjemne dla ucha. W muzyce zatem tylko takie tony znajdują zastosowanie, których liczby drgań są do siebie w stosunku bardzo prostym, nie bardzo się zbliżającym do jedności; stosunek ten wyraża odstęp między tonami, pod względem ich wysokości i tak samo jak ten ostatni, nazywa się *przestankiem*. Najprostsze przestanki dają tony, którym odpowiada 2, 3, 4, 5... razy tyle drgań aniżeli innemu tonowi, który dla ustalenia uwagi, nazywa się *tonem zasadniczym*; tony zaś te nazywają się *harmonicznymi tonami wyższymi* tonu zasadniczego. Ton, któremu odpowiada liczba drgań dwa razy większa, aniżeli tonowi zasadniczemu, którego zatem przestanek jest 2 : 1 nazywa się *oktawą*. Ponieważ stosunek ten do tonu zasadniczego jest możebnie najprostszymi, więc słuchowi naszemu ton ten wydaje się najbardziej spowinowacony z tonem zasadniczym do tego stopnia, że oba tony oznaczamy jedną nawet literą, nazywając wyższy *oktawą* tonu niższego. Ponieważ zaś jest dużo stosunków mniejszych od 2 : 1, a jednak bardzo prostych, to między tonem zasadniczym a jego oktawą, przypada jeszcze pewna liczba przestanków. Najbliższe proste stosunki są  $1\frac{1}{2} : 1$ , albo 3 : 2 i  $1\frac{1}{4} : 1$ , albo 5 : 4; otóż tony, którym odpowiada  $\frac{3}{2}$  lub  $\frac{5}{4}$  razy tyle drgań, aniżeli tonowi zasadniczemu nazywają się jego *kwintą* i *tercją*. Przestanek  $1\frac{3}{4} : 1$  albo 7 : 4 nie znajduje zastosowania w muzyce; przestanek ten według Helmholtza sam przez się uważany, wywiera jeszcze przyjemne wrażenie, lecz ponieważ przestanek pozostaje do oktawy 2 w stosunku skomplikowanym 8 : 7, nie pozwala zatem na połączenie z oktawą, a tem samem i na odwrócenie. Również nieużywane są przestanki, wyrażające się większymi jeszcze liczbami pierwszymi 11, 13, 17... Za wyżej przytoczonymi przestankami idą tony, którym odpowiada  $\frac{4}{3}$  i  $\frac{5}{3}$  tyle drgań, ile tonowi zasadniczemu, które to tony nazywają się *kwartą* i *sektą*, współbrzmienie ich z tonem zasadniczym wyraża jeszcze dość przyjemne wrażenie. TONY sprawiające w organie słuchu przyjemne wrażenie nazywają się *zgodnymi*, a współbrzmienie samo—*zgodnością* (współdźwiękiem); jeśli zaś one wywierają nieprzyjemne wrażenie na ucho, to się nazywają *niezgodnymi*, a ich współbrzmienie *dysonansem* (rozdźwiękiem). Pięć tonów wyżej przytoczonych są zgodne z tonem zasadniczym; inne pomyśleć się dające tony albo są mniej zgodnymi, albo też nawet zupełnie niezgodnymi z tonem zasadniczym, gdyż stosunki liczby ich drgań do liczby drgań tonu zasadniczego, przestają być prostymi. Z powodu podzielności liczby 8 przez inne liczby, stosunki z mianownikiem 8 najbardziej się zbliżają do zgodności;  $\frac{11}{8}$  i  $\frac{13}{8}$  są wyłączone,

a zatem pozostają tylko  $\frac{9}{8}$  i  $\frac{15}{8}$ . Stosunki te nie dają wprawdzie zgodnych tonów, lecz za to  $\frac{9}{8}$  wypełnia za duży odstęp między 1 i  $\frac{5}{4}$ , podobnie jak  $\frac{15}{8}$  zapełnia przedział między  $\frac{5}{3}$  i 2. Z tego to i z innych jeszcze powodów (które później poznamy) w szereg sześciu wyżej wspomnianych tonów, wstawiono jeszcze takie, których liczba drgań jest  $\frac{9}{8}$  i  $\frac{15}{8}$  razy większą od tonu zasadniczego. Przedział  $\frac{9}{8}$  który jest najbliższy tonowi zasadniczemu, (prima) nazywa się *sekundą*, i z tego to powodu przedział  $\frac{15}{8}$  nazywa się *septymą*. I nazwa pozostałych tonów tłumaczy się miejscem, jakie zajmują w szeregu najprostszych przedziałów, który to szereg nazywa się *gamą diatoniczną*.

Prima, Secunda, Tercya, Kwarta, Kwinta, Sexta, Septyma, Oktawa.  
 $\frac{1}{4}$        $\frac{9}{8}$        $\frac{5}{4}$        $\frac{4}{3}$        $\frac{3}{2}$        $\frac{5}{3}$        $\frac{15}{8}$        $\frac{2}{1}$ .

Stosunki te dadzą się sprawdzić za pomocą syreny o 8 kołowych szeregach otworów, z których najmniejszy ma 24 otworów; otóż jeśli pozostałe kręgi mają otworów  $\frac{9}{8} \cdot 24 = 27$ ,  $\frac{5}{4} \cdot 24 = 30$ ,  $\frac{4}{3} \cdot 24 = 32$ ,  $\frac{3}{2} \cdot 24 = 36$ ,  $\frac{5}{3} \cdot 24 = 45$ ,  $2 \cdot 24 = 48$ , to dmuchając przy jednostajnym obrocie kolejno przez te szeregi otworów, usłyszymy tony gamy diatonicznej.

Dla lepszego nazwania przedziałów i dla lepszego odróżniania ich w rozmaitych oktavach, wprowadzono dla nich nazwy składające się z liter lub zgłosek, a mianowicie w krajach północnych litery: c, d, e, f, g, a, h, c, w krajach zaś południowych zgłoski; ut (do), re, mi, fa, sol, la, si. Te ostatnie benedyktyn *Guido de Arezzo* (1026) wziął z następujących wierszy:

*Ut* queant laxis resonare fibris  
*Mira* gestorum *fumuli* tuorum,  
*Solve* pollubi *labii* reatum  
*Sancte* *Iohannes*.

Ten sam muzyk wprowadził też sposób pisania nut na pięciu liniach z rozmaitemi kluczami. Sposób nazwania przedziałów literami jest dawniejszy; prawdopodobnie pochodzi od Grzegorza Wielkiego (511—604), a może nawet od *S-go Ambrożego* (ur. 353). Początkowo pisano litery w porządku alfabetycznym: a, b, c, d, e, f, g, gdzie b oznaczało nasze h =  $\frac{15}{8}$ . Później między a i b wstawiono jeszcze jeden ton, który również b nazwano, a dla odróżnienia od używanego wtedy b gotyckiego (b quadratum), z którego później zrobiło się h, wstawiony ton oznaczono przez b łacińskie (b rotundum). Te raz wprowadzone nazwy najdawniejszej gammy zatrzymano i nadal, gdy się przekonano, że gama z tonem zasadniczym c stanowi właściwą normalną gamę, gdy w niej nuty: d, e, f, g, a, h, c bez żadnych nowych zmian dają cały szereg wyżej przytoczonych przestanków: tem się tłumaczy, dla czego nasza zwyczajna skala muzyczna utraciła porządek alfabetyczny.

Gamy diatoniczne nie budują się na samym tylko tonie zasadniczym c, lecz i na jego wyższych i niższych oktavach, tony tych nowych gam są również oktavami pierwszych, i dla tego też oznaczają się temi samemi literami. Dla odróżnienia jednak różnych tonów jednoimiennych nadano tu oktawom nazwy. Tak np. oktavę przypadającą we środku głosu męskiego nazwano oktavą małą, odpowiednio oznaczono małemi literami (od c do h), według *Sondhausa* przez  $c^0$  aż do  $h^0$ ; oktawa bezpośrednio wyższa, przypadająca w środku głosu kobie-



tego, nazywa się raz przekreśloną, następna—dwa razy przekreśloną i t. d., piszą się z 1, 2, 3, . . . kreskami poprzecznymi nad małymi literami, a według *Sandhaussa* z dodatnimi wykładnikami 1, 2, 3, . . . Oktawa bezpośrednio niższa od małej nazywa się oktawą wielką i oznacza się dużymi literami, oktawy za nimi idące otrzymują 1, 2, 3, . . . kreski poprzecznych pod dużymi literami, i nazywają się kontraoktawą, subkontraoktawą, trzy razy podkreśloną oktawą. *Sandhauss* zamiast kresek używa małych liter z wykładnikami odjemnymi; to ostatnie znakowanie jest najprostsze, i dla tego też zastosujemy je w książce niniejszej. Dla porównania może służyć następująca tabliczka:

$$\text{Trzy razy podkreślone C} = \left\{ \begin{array}{l} \text{C, } c^{-4}, \text{ C}_3, \text{ C}''', \text{ ut}^{-2} \\ \text{---} \\ \text{---} \\ \text{---} \end{array} \right.$$

$$\text{Subkontra C . . . . .} = \left\{ \begin{array}{l} \text{C, } c^{-3}, \text{ C}_2, \text{ C}'', \text{ ut}^{-1} \\ \text{---} \\ \text{---} \\ \text{---} \end{array} \right.$$

$$\text{Kontra C . . . . .} = \left\{ \begin{array}{l} \text{C, } c^{-2}, \text{ C}_1, \text{ C}', \text{ ut}_0 \\ \text{---} \\ \text{---} \\ \text{---} \end{array} \right.$$

$$\text{Wielkie C . . . . .} = \left\{ \begin{array}{l} \text{C, } c^{-1}, \text{ C, C, ut}_1 \\ \text{---} \\ \text{---} \\ \text{---} \end{array} \right.$$

$$\text{Małe c . . . . .} = \left\{ \begin{array}{l} \text{c, } c^0, \text{ c, c, ut}_2 \\ \text{---} \\ \text{---} \\ \text{---} \end{array} \right.$$

$$\text{Raz kreślone c . . . . .} = \left\{ \begin{array}{l} \text{c, } c^1, \text{ c}_1, \text{ c}^1, \text{ ut}_3 \\ \text{---} \\ \text{---} \\ \text{---} \end{array} \right.$$

$$\text{Dwa razy kreślone c . . . . .} = \left\{ \begin{array}{l} \text{c, } c^2, \text{ c}_2, \text{ c}'', \text{ ut}_4 \\ \text{---} \\ \text{---} \\ \text{---} \end{array} \right.$$

$$\text{Trzy razy kreślone c . . . . .} = \left\{ \begin{array}{l} \text{c, } c^3, \text{ c}_3, \text{ c}''', \text{ ut}_5 \text{ i t. d.} \\ \text{---} \\ \text{---} \\ \text{---} \end{array} \right.$$

**Całe i pół tony.** Porównując przestanki między dwoma obok siebie stojącymi tonami gamy diatonicznej, a mianowicie dzieląc każdy stosunek przez stosunek poprzedzający go, znajdziemy, że przestanki te nie są równe. Pomędzy prymą i sekundą leży przestanek  $\frac{9}{8}$ , między sekundą i tercją przestanek  $\frac{5}{4} : \frac{9}{8} = \frac{10}{9}$ , między tercją i kwartą  $\frac{4}{3} : \frac{9}{8} = \frac{16}{15}$ , między kwartą i kwintą  $\frac{3}{2} : \frac{4}{3} = \frac{9}{8}$ , między kwintą i sextą  $\frac{5}{3} : \frac{3}{2} = \frac{10}{9}$ , między sextą i septymą  $\frac{7}{6} : \frac{5}{3} = \frac{7}{8}$ , między septymą i oktawą  $\frac{8}{7} : \frac{7}{6} = \frac{16}{15}$ . Wielki przestanek  $\frac{9}{8}$  i prawie równy mu  $\frac{10}{9}$  powtarzają się pięć razy, przestanek ten nazywamy *całym tonem* i stosownie do dwóch wartości przestanku rozróżniamy wielki cały ton =  $\frac{9}{8}$  i mały cały ton =  $\frac{10}{9}$ . Przestanek pomiędzy wielkim całym tonem i małym całym tonem wynosi  $\frac{1}{180}$  i nazywa się *przecinkiem* (komą). Mały przestanek  $\frac{10}{15}$  w całej gamie powtarza się tylko dwa razy, nazywa się on *półtonem*, gdyż jest prawie dwa razy mniejszy od całego tonu. Przestanki całych tonów są bardzo wielkie i półtony łatwo jeszcze odróżnić można, dla tego też pomiędzy temi wielkimi przestankami wstawiają się jeszcze półtony, które służą już to dla podwyższenia tonów poprzedzających, już też dla obniżenia następujących. W pierwszym razie oznaczamy je krzyżykiem przed nutą i dodatkiem sylaby *is* (we Francyi przez słowo *dièse*), w drugim razie literą *b* przed nutą, i dodatkiem sylaby *es* (we Francyi słowem *bémol*). Tym sposobem między tonem zasadniczym a jego oktawą przypada 12 półtonów, między tonem zasadniczym a kwintą

7 półtonów. Wprowadzenie tych półtonów jest jeszcze dla tego potrzebnem, że w muzyce zachodzi potrzeba każdego tonu używać jako tonu zasadniczego. Jeśli np. za ton zasadniczy chcemy uważać oktawę  $c^1$  tonu  $c^0$ , to wtedy do utworzenia tonów gamy diatonicznej potrzebne tylko są oktawy tonów pierwotnej gamy; tony te jednak nie wystarczają, jeśli byśmy za ton zasadniczy chcieli użyć kwinty  $g^0$ .

Wtedy bowiem mamy sekundę  $a^0$ ; gdyż  $a^0:g^0 = \frac{5}{3} : \frac{3}{2} = \frac{10}{6} = \frac{5}{3} \times \frac{80}{81}$

" tercyę  $h^0$ ; "  $h^0:g^0 = \frac{4}{3} : \frac{3}{2} = \frac{8}{6} = \frac{4}{3}$

" kwartę  $c^1$ ; "  $c^1:g^0 = 2 : \frac{3}{2} = \frac{4}{3}$

" kwintę  $d^1$ ; "  $d^1:g^0 = 2 : \frac{9}{8} : \frac{3}{2} = \frac{3}{2}$

" sextę  $e^1$ ; "  $e^1:g^0 = 2 : \frac{5}{4} : \frac{3}{2} = \frac{5}{3}$

lecz brakuje septymy; gdyż  $f^1 : g^0 = 2 : \frac{4}{3} \cdot \frac{3}{2} = \frac{16}{9}$  lecz nie  $= \frac{15}{8}$ . Należy zatem pomiędzy  $f^1$  i  $g^1$  wstawić ton, któryby równał się  $\frac{15}{8}$  tonu  $g^0$ , a więc  $\frac{15}{8} : \frac{5}{3} = \frac{9}{8}$  tonu  $e^1$ , któryby zatem od  $e^1$  oddalony był na cały ton, a więc od  $f^1$  na półton. Ton zatem ten może być uważany jako podwyższenie tonu  $f^1$  o pół tonu, czyli może być uważany jako  $fis^1$ ; jednakże może on też być uważany jako obniżenie tonu  $g^1$  o półton, czyli jako  $ges^1$ , gdyż  $2 : \frac{16}{15} = \frac{15}{8}$ .

Ta gama utworzona z tonu  $g^0$  wymaga sekundy  $d$  i septymy  $h$  i  $c$ , gdyż bez tych dwóch tonów nie byłoby kwinty i tercji z  $g^0$ . Zupewnić tak samo jak w tym razie wynikła potrzeba wprowadzenia  $fis$  lub  $ges$ , tak też, biorąc za tony zasadnicze inne niż  $c$  i  $g$ , zobaczymy, że zajdzie potrzeba wprowadzania innych jeszcze półtonów; dla następnej kwinty (licząc od  $g^0$ )  $d$  potrzebny jest drugi półton między  $c$  i  $d$ ,  $cis$  lub  $des$ ; dla dalszej kwinty  $a$ —trzeci półton  $gis$  lub  $as$  między  $g$  i  $a$  i t. d.; w ten sam sposób wykaże się, że dla każdej następnej kwinty, uważanej jako ton zasadniczy, potrzebny jest nowy półton. Zdawało by się więc, że takich półtonów może być nieskończenie wiele, lecz po bliższem zbadaniu wykaże się, że rzecz ma się inaczej, gdyż postępując kwintami od  $c$ , musimy wrócić do  $c$ , albowiem kwinty tworzą krąg zamknięty w oktawach, co już wypada z tego, że 7 oktaw zawiera  $7 \times 12 = 84$  półtonów i 12 kwint również zawierają  $12 \times 7 = 84$  półtonów, przyczem przypuszcza się jednak, że półtony wszędzie są te same. Taki krąg kwint stanowi następujący szereg nut

$c^{-2}, g^{-2}, d^{-1}, a^{-1}, e^0, h^0, fis^1, cis^2, gis^2, dis^3, ais^3, eis^4, his^4 = c^5$ .

Ponieważ w tym szeregu znajdują się wszystkie tony gamy diatonicznej, to też potrzeba tylko 11 podwyższeń, z których jednak 7 tonów są już podwyższeniami, a zatem przez drugie podwyższenie zamieniają się na istniejący już ton, a zatem właściwie należy wstawić pięć tylko półtonów, a mianowicie między  $c$  i  $d$ ,  $d$  i  $e$ ,  $f$  i  $g$ ,  $g$  i  $a$ ,  $a$  i  $h$ . Jednakże trzeba niekiedy wprowadzić więcej jak pięć podwyższeń, tak np. dla gamy poczynającej się od  $dis$  potrzeba 9 podwyższeń; dla obejścia potrzebnych przy tem pięciu krzyżyków, 5 lub 6 ostatnich nut, uważamy jako obniżenia,  $eis$  jako  $f$ ,  $ais$  jako  $b$ ,  $dis$  jako  $es$ ,  $gis$  jako  $as$ ,  $cis$  jako  $des$ ,  $fis$  jako  $ges$ , i nuty gamy wyprowadzamy też jako obniżenia, przez to znosimy poprzednie podwyższenia tonów i potrzeba nam tylko jako znaków przed nutami małej liczby  $b$ . Tak np. gama:

na  $dis$  jako podwyższenie =  $dis, eis, fisis, gis, ais, his, cisis, dis,$

na  $es$  " obniżenie =  $es, f, g, as, b, c, d, es;$

zatem zamiast 9 krzyżyków, potrzeba tylko 3  $b$ ; podobnie dla gamy z  $f$  albo

rządzie king Chińczyków i gambang Jawańczyków, które składają się z 16 kamiennych, metalowych lub drewnianych płyt.

Błony po największej części drgają jako całość; rozrzucony po błonie bębna piasek zostaje w całkowitości odrzucony ku brzegom, lecz mogą one też przy drganiu rozdzielić się na części, dają jednak przytem po największej części poboczne tony nieharmoniczne. Ton błony jest tem wyższy, im bardziej jest ona napięta i im jest grubsza. Dwa bębny orkiestry stroją się od  $f^{-1}$  do  $b^{-1}$  i od  $c^0$  do  $f^0$ , tak iż zawsze różnią się o kwintę.

**Drgania podłużne sztab i strun** (Chladni 1796, Poisson 1816). Struny 249.  
można wprawić w drgania podłużne pocierając je bardzo ukośnie smyczkiem, albo też trąc je w kierunku długości palcami pocieranemi żywicą, lub też sukniem albo skórą posypaną żywicą; sztaby i rury szklane pocierają się mokrą chustką; inne sztaby palcami lub skórą żywicą pokrytą. Powstawające przytem tony są bardzo wysokie i nieznośnie mocne i przenikliwe, pomimo że tylko powierzchnie końcowe (według Kundla 1865) udzielają powietrzu drgania podłużne. Ruchy takich strun i sztab składają się ze stojących fal podłużnych; różnią się one od postępujących fal podłużnych tem, że w tych ostatnich miejsca największego zgęszczenia i rozrzedzenia (236) przypadają tam, gdzie cząstki mają największą prędkość drgania, gdy tymczasem w falach stojących podłużnych miejsca największego zgęszczenia i rozrzedzenia przypadają w węzłach, gęstość zaś naturalna przypada w brzuszkach; gdyż po obu stronach węzła (według 227) cząstki poruszają się w kierunkach wprost przeciwnych, a zatem albo z obu stron ku węzłowi, przez co powstaje zgęszczenie, lub też z obu stron oddalają się od węzła, przez co powstaje rozrzedzenie. — W chwili, gdy w jednym węźle powstaje największe zgęszczenie, to w sąsiednim wspólnie powstaje największe rozrzedzenie, gdyż cząstki, które płyną ku jednemu węzłowi, oddalają się od drugiego. W środku między węzłami, a zatem w brzuszku z jednej strony, cząstki do węzła dopływają, z drugiej zaś strony płyną ku drugiemu węzłowi czyli oddalają się od brzuszka; tym sposobem w brzuskach pozostaje gęstość naturalna. *Liczba drgań, a zatem i wysokość tonu podłużnego jest niezależną ani od napięcia struny lub sztaby, ani też od jej grubości, jest zaś w stosunku odwrotnym do długości struny i pierwiastku kwadratowego z ciężaru właściwego, w stosunku zaś prostym do pierwiastku kwadratowego ze sprężystości.*

**Dowodzenie.** Niech sztaba będzie jak struna przymocowaną w obu jej końcach i niechaj drga w całej swojej długości  $l$ , jako jedna stojąca fala; fala ta powstaje z interferencji fali postępującej długości  $2l$ ; w tym więc przypadku da się zastosować wzór (29), w którym zamiast  $l$  należy podstawić  $2l$ ; będzie zatem

$$T = 2l \sqrt{\frac{d}{e}};$$
 ponieważ cząsteczki sztaby wyprowadzone ze swego położenia równowagi siłą tarcia lub wydłużenia, wracają do niego działaniem sprężystości,

to w tym wzorze  $e$  pozostaje niezmiennym;  $d$  zaś to jest masa jednostki objętości równa się ciężarowi jednostki objętości podzielonemu przez  $g$ , a zatem  $= \frac{s}{g}$ ,

gdzie  $s$  oznacza c.g; będzie zatem  $T = 2l \sqrt{\frac{s}{eg}}$ , lecz ponieważ  $n = \frac{l}{T}$ , to

$$n = \frac{l}{2l \sqrt{\frac{eg}{s}}} \dots \dots \dots (35);$$

wzór wyrażający wyżej podane prawa.

Prawa powyższe łatwo też sprawdzić możemy; silniej lub słabiej napięte struny jednakowej długości dają ten sam ton podłużny; podobnie się zachowują grube i cienkie sztaby. Sztaby i struny z jednego materiału lecz 2, 3, 4, . . . razy większej długości dają tony górne dźwięków, jakie wydawają sztaby pojedynczej długości. Sztaby jednakowej długości lecz z rozmaitych materiałów

dają tony różne, których wysokość jest proporcjonalną do czynnika  $\sqrt{\frac{eg}{s}}$  lub

co na jedno wychodzi do czynnika  $\sqrt{\frac{e}{d}}$ . Czynniki ten wyraża, jak wiadomo, (wzór 30) prędkość rozchodzenia się  $c$  podłużnych fal tonu wydawanego przez sztabę; podstawiając zatem we wzorze (35)  $c$  zamiast  $\sqrt{\frac{eg}{s}}$ , otrzyma-

my  $n = \frac{c}{2l}$ , albo  $c = 2ln$ . Ważny ten wzór da się jeszcze wprowadzić

z wzoru (25); we wzorze bowiem tym  $l = \frac{c}{n}$ ,  $l$  oznacza długość fali postępowej, która, jak wiadomo, jest dwa razy większą od powstającej z niej fali stojącej, a tem tem samym dwa razy większą od długości  $l$ , jako całość drgającej sztaby; podstawiając zatem w powyższym wzorze  $2l$  zamiast  $l$ , otrzymamy  $2l = \frac{c}{n}$ , gdzie  $l$  oznacza długość sztaby; ztąd zaś

$$c = 2ln \dots \dots \dots (36).$$

Za pomocą tego wzoru można obliczyć prędkość rozchodzenia się głosu w sztabie, znając wysokość tonu podłużnego tej sztaby; z wzoru tego wypada jeszcze, że prędkość głosu w sztabach dających jednakowej wysokości tony jest proporcjonalną do ich długości. Z obu stron przymocowane sztaby i struny mogą też przy podłużnym drganiu rozdzielać się na równe części czyli drgać z 1, 2, 3, . . . węzłami, przez co liczba drgań według znanych praw musi się 2, 3, 4, . . . razy powiększyć; przez to dają górne tony harmoniczne; jest jednak trudno je wywołać. Sztaby na obu końcach wolne nie mogą drgać jako całość, gdyż należy przeciwieństwo w jakimś punkcie je trzymać, a punkty takie stają się węzłami. Przez węzeł zaś, zupełnie tak samo jak to ma miejsce i w innych przypadkach, ruch drgający się rozchodzi, gdyż węzeł nie jest bezwzględnie nieruchomym punktem lecz tylko punktem przecięcia się dwóch wprost przeciwnych

ruchów. Przymocowując poziomą sztabę w jej środku i trąc jedną jej połowę, póki ona nie wyda tonu, przekonamy się, że kulka przy drugim końcu zawieszona silnie odskakuje. Rurki szklane, które przymocowujemy w środku, możemy przez pocieranie jednej z jej połówek doprowadzić do tak silnego drgania, że druga jej połowa rozpada się na obrączkowe kawały. Przez drganie sztaby szklanej zmienia się też i jej budowa wewnętrzna, tak że sztaba inaczej się zachowuje względem przechodzącego przez nią światła. Dla sztab swobodnych na obu końcach służą wzory (35) i (36), gdyż sztaby te mają brzuski na swobodnych końcach, a zatem obie połówki drgają jako połówki sztaby z obu stron przytwierdzonej.— Mogą one też drgać z 2, 3, 4, . . . węzłami; dają wtedy również tony górne. Sztaba na jednym końcu swobodna nie może na swobodnym końcu przedstawiać węzła, gdyż w tym końcu z powodu braku przeciwdziałania nie może mieć miejsca zgęszczenie; swobodny koniec jest brzuskiem, sztaba drga jako połówka stojącej fali, jako połówka sztaby dwa razy większej lecz swobodna na obu końcach, lub też na obu końcach przytwierdzona; dla tego też w tym przypadku wzór (35)

przechodzi w  $n = \frac{1}{4l\sqrt{\frac{eg}{s}}}$ ; wzór zaś (36) staje się:  $c = 4ln$ . Liczba drgań jest

połową liczby drgań wydawanych przez sztabę tej samej długości, lecz w obu końcach przymocowaną; ton zaś zasadniczy jest o oktawę niższy. Jeśli taka sztaba drga z węzłami, to koniec swobodny zawsze musi pozostać brzuskiem; zatem ostatnia swobodnie drgająca część sztaby stanowi tylko pół fali, połówkę pozostałych części; ostatni zatem węzeł przypada w odległości  $\frac{1}{3}, \frac{1}{5}, \frac{1}{7}, \dots$  długości sztaby, od swobodnego końca jej licząc; fale są 3, 5, 7, . . . razy krótsze niż dla całej sztaby, tony zatem—3, 5, 7, . . . razy wyższymi. Obliczając ton zasadniczy podłużny i poprzeczny jednego i tego samego tonu (patrz zad. 361 i 365), znajdziemy, że ton podłużny jest daleko wyższy, niż ton poprzeczny; z porównania wzorów (34) i (35) wypada, że liczba drgań podłużnych ma się do liczby drgań poprzecznych jak długość sztaby do  $3\frac{1}{2}$  razy wziętej grubości, jeśli sztaba w jednym końcu będzie przymocowaną, jak to łatwo widzieć z dwóch wyżej przytoczonych zadań. Łatwo jednak przewidzieć, że można zbudować takie sztaby, w których tony podłużne i poprzeczne są jednakowej wysokości; o takich sztabach *Terquem* (1858) dowiódł, że w nich oba tony jednocześnie występują.

**Drgania podłużne słupa powietrznego.** By słupy powietrzne doprowadzić do drgania, należy je zamknąć w rurach z jednej lub nawet obu stron otwartych. Takie rury w akustyce nazywamy piszczałkami; odróżniamy piszczałki otwarte i kryte. Słup powietrza zostaje wprawiony w drganie, jeśli strumień przechodzi około jednego końca, trąc się o niego, albo też jeśli cienka elastyczna sztabka, w piszczałce osadzona i języczkiem nazwana, drga i drgania te słupowi powietrza udziela. Pierwszy przypadek ma miejsce w piszczałkach wargowych, drugi w piszczałkach języczkowych. Ponieważ słup powietrza, podobnie jak sztaba sprężysta, drga wskutek swej sprężystości, to prawo § 249 znajduje tu zastosowanie. Kryty koniec słupa

powietrznego odpowiada przymocowanemu końcowi sztaby; musi on utworzyć węzeł, gdyż cząstki dotykające się dna w żaden sposób podłużnie drgać nie mogą, dla krytej zatem piszczałki mają miejsce te same prawa, co dla sztaby w jednym końcu przymocowanej. Otwarty koniec słupa powietrznego odpowiada swobodnemu końcowi sztaby, lecz niezupełnie, gdyż wolny koniec sztaby z powodu wielkiej siły sprężystości jaką ma, nie doznaje prawie wpływu od powietrza zewnętrznego; powietrze zaś otworu rurki przy każdym zgęszczeniu i rozrzedzeniu działać będzie na powietrze zewnętrzne i dozna od

niego oddziaływania; otwarta zatem piszczałka nie w zupełności podlega prawom sztaby z obu stron swobodnej.

#### Piszczałki wargowe kryte (Daniel Bernouilli 1762).

Jako typ tych piszczałek obierzemy krytą czworoboczną piszczałkę organową (fig. 118). Przez przewód b powietrze wdmuchuje się do nóżki a. Przez szparę c powietrze wypływa za wargą dolną d i uderza o wargę górną e; przez to prąd powietrza rozdziela się na dwie części, z których jedna zagęszcza powietrze w rurce zawarte. To zgęszczenie zmusza prąd powietrzny do pozostawiania zewnątrz rurki i pozwala mu tylko przepływać koło powietrza rurki lecz zewnątrz niej, przez co powstaje teraz rozrzedzenie.— Zgęszczenie i rozrzedzenie tworzą falę, która zostaje odbita od końca zamkniętego, i przecinając się z nową falą, daje początek fali stojącej. Liczba drgań według wzoru (35) dla sztaby z jednej strony przymocowanej będzie

$$n = \frac{l}{4l\sqrt{\frac{eg}{s}}}, \text{ w którym } e \text{ oznacza ciśnienie powietrza,}$$

a zatem równa się wysokości barometrycznej  $h$  pomnożonej przez gęstość  $s'$  rtęci. Jednakże do tego wzoru należy jeszcze wprowadzić współczynnik oznaczający wpływ ciepła.

Przy każdym bowiem zgęszczeniu powietrza z powodu zużywającej się roboty, zostaje wytworzone ciepło, a przy każdym rozrzedzeniu ciepło zostaje pochłonięte; przez podniesienie się zaś temperatury prężność powietrza się powiększa; w zgęszczonych zatem miejscach prężność powietrza się powiększa, w rozrzedzonych zaś się zmniejsza. Z pierwszego powodu zgęszczenie prędzej się rozchodzi, a tem samem czas drgania staje się mniejszym; to samo ma też miejsce i dla drugiego powodu, gdyż powtórne wnikiwanie prądu powietrza w próżnię zostaje przez to przyśpieszone. W nauce o ciepłe przekonujemy się, że z tych to powodów liczba drgań staje się  $\sqrt{1,42}$  razy większą.



Fig. 118.

a zatem

$$n = \frac{l}{4l \sqrt{\frac{1,42 \text{ hs}' g}{s}}} \dots \dots \dots (37).$$

Ponieważ zaś  $n = \frac{c}{4l}$ , to

$$c = \sqrt{\frac{1,42 \text{ hs}' g}{s}} \dots \dots \dots (38).$$

Jeśli wskutek silniejszego zadęcia w krytym słupie powietrza tworzą się węzły, to one znajdują się w odległości  $\frac{1}{3}$ ,  $\frac{1}{5}$ ,  $\frac{1}{7}$ , . . . długości piszczałki od swobodnego końca; tony wykonywają 3, 5, 7, . . . razy więcej drgań niż ton zasadniczy.

Możemy to łatwo sprawdzić przez silniejsze zadęcie piszczałki, gdyż daje ona wtedy drugą kwintę, trzecią tercyę, trzecią małą septimę i t. d. Węzły i brzuski słupa powietrza możemy uczynić widocznymi za pomocą: 1. tambury-na *Hopkinsa* (1838); jest to mały tamburyn piaskiem posypany; wprowadza się go do drgającej rury szklanej; w węzłach piasek leży spokojnie, na innych miejscach podskakuje. 2. Za pomocą przyrządu płomykowego *Königa*. Ściany piszczałek czworobocznych opatrzone są w węzłach i brzuszkach otworami, które zamykają się błonami. Nad temi błonami znajdują się rurki, któremi wchodzi gaz oświetlający wypływający z gazometru. Jeżeli podczas drgania piszczałki, zapalimy gaz wypływający z rurek, to zobaczymy, że płomyki przy węzłach silnie drgają, przy brzuszkach zaś dość spokojnie się zachowują; z kąd wnosimy, że w brzuszkach błona nie doznaje zmiany w ciśnieniu, że zatem w nich gęstość powietrza pozostaje niezmienną, gdy tymczasem w węzłach szybko się zmieniającą gęstość powietrza i wywołane przez to falowanie błony poznajemy po drganiu płomyka. 3. Za pomocą figur pyłowych *Kundta* (1866). Długa korkiem zatka-na rurka za pomocą tarcia zostaje wprawioną w drgania podłużne; drgania te przez korek udzielają się powietrzu i wywołują w niem większą liczbę fal stojących; gdyż z wzoru  $l = \frac{c}{n}$  widzimy, że dla powietrza  $l$  jest daleko mniejszem,

niż dla szkła, albowiem  $c$  dla powietrza jest znacznie mniejszem, niż dla szkła. — Liczne te fale możemy uczynić widocznymi, zawieszając poprzednio w rurce proszek lycopodium; pyłek ten grupuje się w zupełnie równe ozdobne figury; w przypadku, gdy długość słupa powietrza jest wielokrotnością długości fali stojącej tonu, proszek przenosi się w zupełności z brzuszków ku węzłom; jeśli zaś ten stosunek nie ma miejsca, wtedy proszek pozostaje ugrupowany w ozdobne warstwy i między węzłami, które odznaczają się figurami gwiazdzistymi, albo też większemi kupkami pyłu. Prawdę, że długość krytej piszczałki dającej ton zasadniczy stanowi  $\frac{1}{4}$  część długości fali postępowej tonu, możemy dowieść albo rachunkiem za pomocą wzoru (37), albo też doświadczalnie za pomocą widełek strojowych i walca szklanego; trzymając nad walcem drgające widełki strojowe i wlewając jednocześnie wodę, przekonamy się, że w pewnym momencie naczynie z wodą zabrzmi; rachunek wykazuje, że w tej chwili długość słupa powietrznego w naczyniu stanowi  $\frac{1}{4}$  część długości fali tonu wydawanego przez widełki. W tym

bowiem tylko przypadku widełki strojowe mogą ton swój udzielić słupowi powietrza (analogia z przyrządem *Meldego*). Podczas bowiem gdy widełki wykonywają połowę drgania, zgęszczenie przenosi się o  $\frac{1}{2}$  fali aż do dna piszczałki i napowrót; teraz zaś następuje fala zgęszczona widełek przy ich powrocie ku pierwotkowemu położeniu; tak że powstające przy tem rozrzedzenie, podczas powrotu widełek, przenosi się aż do dna piszczałki i ztamtąd napowrót, i jednocześnie z widełkami dochodzi do krańcowej granicy ruchu powrotowego. Jeśliby zaś rura była dłuższa niż  $\frac{1}{4}$  długości fali, wtedy zgęszczenie byłoby jeszcze w drodze ku powrotowi, gdy rozrzedzenie już się zaczęło rozchodzić, wskutek czego oba tony by się zniósły.

Że liczba drgań jest odwrotnie proporcjonalną do długości, widzimy na piszczałkach, które są 2, 3, 4, . . . razy dłuższe niż inne, i które dają tony górne harmoniczne, albo też na piszczałkach, które są  $\frac{9}{8}$ ,  $\frac{5}{4}$ ,  $\frac{4}{3}$ , . . . razy dłuższe od innych i dają tony gamy-dur. Łatwo też wykazać niezależność liczby drgań od średnicy rury. Jednakże dwa prawa o długości i średnicy rury nie są zupełnie ściśle dla krytych piszczałek wargowych, gdyż koniec słupa powietrza przylegający do ust nie zostaje jednocześnie w całym swem przecięciu wprawiony w ruch i oprócz tego z powodu, że i mundsztuk odbija falę głosową; skutkiem tego brzusek nie przypada zupełnie ściśle przy końcu rurki do ust przylegającym, węzeł zaś niezupełnie ściśle przy końcu zamkniętym; długość fali staje się nieco większą, ton zaś nieco niższym. Obniżenie głosu jest tem większe, im szerszą jest rurka i im węższy jest otwór przy ustach; z tego to korzystają dla strojenia piszczałek organowych za pomocą tak nazwanych bród. Piszczałki zamknięte znajdują zastosowanie w organach; najniższą oktawę  $c^{-2}$  do  $h^{-3}$  w zwyczajnych organach otrzymuje się za pomocą krytych piszczałek, gdyż, jak później zobaczymy, one dla wywołania tego samego tonu potrzebują tylko połowy tej długości, jaką mieć winny piszczałki otwarte; jednakże w największych organach i tę najniższą oktawę otrzymuje się za pomocą otwartych piszczałek, które wtedy mają długości przeszło 31 stóp. I wyższe registry organów, jak register fletowy, składają się z piszczałek krytych, gdyż one dają przyjemniejsze i miłsze tony, niż piszczałki otwarte. Klarinet jest piszczałką krytą przy otworze ust, lecz piszczałką językową. Tak nazwana piszczałka Pana (*Syrinx*) jest piszczałką krytą bez warg; piszczałka przeciwnie wierzbowa dzieci jest piszczałką krytą wargową.

**251.** Piszczałka wargowa otwarta (Daniel Bernouilli 1762). Ton w tej piszczałce w ten sam sposób się wzbudza jak w piszczałce otwartej; ponieważ zaś w otwartym końcu słupa powietrza nie może się utworzyć węzeł, lecz tak samo jak w miejscu wzbudzenia głosu tylko brzusek, to najprostszy sposób drgania takich piszczałek jest ten, że we środku ich tworzy się węzeł, czyli, że one drgają jak piszczałka kryta o połowie długości; ztąd wypada, że liczba drgań piszczałki otwartej dana jest przez wzór

$$n = \frac{1}{2l \sqrt{\frac{1.42 h s' g}{s}}} \dots \dots \dots (38),$$

a ponieważ  $n = \frac{c}{2l}$ , to i w tym razie



$$c = \sqrt{\frac{1.42 \text{ h s}^2 \text{ g}}{s}} \dots \dots \dots (39).$$

Zresztą wzory powyższe wypadają jeszcze ze zgodności sposobu drgania otwartych piszczałek ze sposobem drgania sztab z obu stron wolnych.— Z wzoru (38) wypada przedewszystkiem to samo prawo długości i średnic, któreśmy otrzymali dla piszczałek krytych i dla sztab; dalej pokazuje on, że ton zasadniczy piszczałki otwartej jest o oktawę wyższy, niż ton zasadniczy piszczałki krytej tej samej długości. W końcu piszczałka otwarta może, zupełnie tak samo jak sztaba z obu stron wolna, drgać z 2, 3, 4, . . . węzłami; daje ona wtedy 2, 3, 4, . . . razy większą liczbę drgań, niż ton zasadniczy; tony zatem górne piszczałki otwartej tworzą nieprzerwany szereg harmoniczných tonów górnych.

Wszystko, cośmy wyżej powiedzieli, można sprawdzić za pomocą jakiegokolwiek otwartej piszczałki, która przy silniejszym zadęciu daje oktawę, drugą kwintę, drugą oktawę, trzecią tercyę, kwintę, małą septimę i t. d. tonu zasadniczego. Węzły możemy uwidocznic dwoma sposobami podanemi dla piszczałek krytych. Prawo długości tylokrotnie znajduje zastosowanie, że bardzo często możemy się o jego prawdziwości przekonać; do niskich tonów organowych potrzebne są długie piszczałki, np. dla  $c^{-2}$  — piszczałka, której długość, według (39)

$$= \frac{c}{2n} = \frac{333}{64} = 5,17^m = 16 \text{ stóp}; \text{ dla tego to } c \text{ nazywa się jeszcze } c \text{ 16-sto}$$

stopowe,  $c$  zaś o oktawę niższe  $c^{-3}$  nazywa się  $c$  32-u stopowem, chociaż takowe otrzymuje się za pomocą piszczałki krytej tej samej długości. Najwyższy zaś ton organowy  $c^5$  potrzebuje piszczałki mającej zaledwie  $1\frac{1}{2}$  cala paryzkiego długości. Trąby otrzymują większą długość przez wysuwanie części, inne przyrządy skracają się i wydłużają za pomocą klap i otworów; gdyż dostatecznie wielki otwór w piszczałce zamienia to miejsce w koniec otwarty, czyli skrac piszczałkę, jeśli usuniemy zamykającą ją klapę lub palec. Chociaż piszczałki otwarte ulegają prawu długości, to jednak nie w taki sposób ścisły, by z wzoru (39) można było przy wszelkich okolicznościach obliczyć długość piszczałki dla danego tonu. Przedewszystkiem bowiem szerokość i wysokość końca do ust przylegającego jako też i nóżka mają ten sam wpływ, co i przy piszczałkach krytych; oprócz zaś tego i koniec otwarty ma tu wpływ, gdyż przez ten otwór drgania udzielają się powietrzu, które je odbija, a to dla tego, że ono jest swobodniejsze, przez to rzadsze niż powietrze wewnętrzne rurki. To udzielanie się ruchu można obserwować na piasku, którym posypano błonę rozpiętą nad otwartym końcem dźwięczącej piszczałki. Przez takie udzielenie się ruchu długość fali staje się dłuższą, ton zaś niższym. Tony piszczałek jeszcze bardziej odstępują od wzoru (39), jeśli przecięcie poprzeczne w stosunku do długości jest bardzo znaczne, szczególnie zaś jeśli głębokość piszczałki, to jest odległość ust od ściany tylnej, jest znaczną. Zamiast wzoru (39) dla praktycznego obliczenia długości piszczałek, posługujemy się twierdzeniem *Cavaillé-Cill'a* (1860), że długość piszczałki równa się długości falitonu bez podwójnej głębokości piszczałki; jest to prawo, którego zgodność z teorią wykazał *Wertheim*. Prawo związku zachodzącego między pi-

szczałkami krytymi i otwartymi można sprawdzić na każdej piszczałce otwartej, która daje niższą oktawę, jeśli ją u dołu zakryjemy. Częstkowe zakrywanie piszczałki otwartej wywołuje słabe obniżenie tonu zasadniczego; tą własnością posługujemy się przy strojeniu otwartych piszczałek za pomocą tak nazwanych bród, albo też blaszek ołowianych przy otworze umieszczonych, a mianowicie, gnąc je na wewnątrz lub zewnątrz. Tak samo jak łatwiej jest rozłożyć sztabę cienką i długą na większą liczbę fal stojących aniżeli sztabę krótką i grubą, tak też coś podobnego ma miejsce w słupach powietrznych; przy długich i cienkich słupach powietrza tony górne łatwiej wzbudzić aniżeli ton zasadniczy, przy słupach zaś o większym przecięciu—ton zasadniczy łatwiej niż tony górne. Z tego to powodu



Fig. 119.

piszczałki organowe, w których głównie uwzględniamy tony zasadnicze, muszą mieć znaczną średnicę, również i przy instrumentach drewnianych przecięcie nie powinno być zbyt małe w stosunku do długości, ponieważ i w nich głównie używamy niższych tonów, wyższe zaś wzbudzamy za pomocą klap. Szeroko zbudowane przyrządy blaszane (Bombardon, Serpent, Ophicleide) pozwalają jeszcze na użycie tonu zasadniczego; lecz w wielu narzędziach blaszanych szerokość rurki jest bardzo mała, długość zaś bardzo długa, tak że w nich tylko wyższe tony górne wywołać możemy; luki w gamie wypełniają się za pomocą klap, w trąbach zaś za pomocą wysuwania. Najlepszy dowód, że materiał ściany piszczałek nie ma wpływu na ton, jest to, że przytrzymanie przyrządu ręką (co koniecznie wstrzymuje silniejsze drgania ścian) nie wpływa na ton; prawo to jednak jest tylko prawdziwym, jeśli materiał ścian jest ciałem stałym, materiał giętki, jak np. pergamin ma wpływ na wysokość tonu. Z przyrządów muzycznych otwartymi piszczałkami są: flet i wiele piszczałek organowych.

**Piszczałki językowe** (W. Weber 1827). Ton zostaje w tym przyrządzie wzbudzonym za pomocą przerywanego strumienia powietrza, oraz przez uderzenia powietrza, podobnie jak się rzecz ma w syrenie (fig. 119 przedstawia nam piszczałkę używaną w organach).

Przerywanie strumienia powietrznego skutecznia się tu za pomocą sprężystej blaszki metalowej, nazwanej języczkiem, przylegającej do prawie równej jej szpary bocznej (rowku bocznego) rurki, przytwierdzonej w jednym końcu, lecz swobodnej w większej części swej długości i odstającej nieco od brzegów. Jeśli przez rurkę r wdmuchniemy powietrze do nóżki F, to ono przez rowek wpływa do czary głosowej czyli piszczałki R i wywołuje tam zgęszczenie; ponieważ zaś w nóżce powietrze przez ciągle dopływanie jeszcze jest gęstsze, to języczek zostaje przyciśniętym do rowka, który przez to się zamyka i przerywa strumień powietrza. Języczek następnie wskutek swej sprężystości,

jak również pod wpływem ciśnienia powietrza wraca do dawnego swego położenia, odmyka rowek, przez co nowy strumień powietrza dopływa, wywołując drugie uderzenie. W ten to sposób wskutek peryodycznych uderzeń powietrza powstaje ton, który jest silniejszym aniżeli wtedy, gdyby albo sam języczek, albo samo powietrze w zbiorniku drgało. Liczba drgań uwarunkowaną zostaje zjednoczonym działaniem sprężystości, wymiarów języczka i strumienia powietrza w zbiorniku R. Języczek sam drgając wydałby pewną liczbę drgań, ton sobie właściwy, podobnie i strumień powietrza sam dałby pewną liczbę drgań, odpowiadającą pewnemu tonowi zasadniczemu i jego tonom górnym. Jeżeli ton właściwy języczka jest zgodny z jednym z tonów rurki, to oba te elementy piszczałki języczkowej nie wywierają na siebie działania, któreby je zmodyfikowało. Jeśli zaś tej zgodności nie ma, wtedy ton języczka zostaje obniżonym, gdy wdmuchujemy powietrze ze strony nóżki, zostaje przeciwnie podwyższonym, gdy powietrze wyciągamy (wsysamy).— Przy wdmuchiwananiu powietrza obniżenie tonu jest tem znaczniejsze, im różnica w wysokości między jednym z tonów zasadniczych rurki R i tonem języczka jest mniejszą; największe obniżenie ma miejsce wtedy, gdy różnica ta jest prawie równą zeru, wynosi ono wtedy prawie całą oktawę. Jeśli ton języczka jest prawie równy pierwszemu lub drugiemu tonowi górnemu rurki, to obniżenie wynosi tylko kwartę; jeszcze mniejsze jest obniżenie, gdy ton języczka zbliża się do wyższych jeszcze tonów górnych rurki. Gdy zaś ton języczka staje się równym jednemu z tonów właściwych rurki, wtedy obniżenie natychmiast ustaje i ton języczka nagle przeskakuje na właściwą swoją wysokość, który to skok w pierwszym z wymienionych wyżej przypadków wynosi prawie całą oktawę. Wszystko, cośmy tu mówili, stosuje się tylko do języczków łatwo ruchomych, ciężkie i sztywne języczki od drgań powietrza w rurce albo wcale nie doznają zmian w wysokości tonu, albo bardzo nieznacznych, ale za to ton więcej się wzmacnia.

**Wyjaśnienia i sprawdzenia.** \*) Jeśli ton języczka i piszczałki są ze sobą w zgodności, to języczek drga zgodnie z drganiami cząstek powietrza piszczałki. W tych zatem warunkach nie może mieć miejsca wzajemny zmieniający wpływ, piszczałka dźwięczy jako piszczałka otwarta, ma ona przy języczku i przy drugim końcu brzuszki i (przy wydawaniu tonu zasadniczego) we środku węzeł. Jeśli zaś ton języczka i ton piszczałki nie są ze sobą zgodne, to wskutek odmiennego ruchu języczka i powietrza, w okolicach języczka zgęszczenia i rozrzedzenia powietrza muszą kolejno za sobą następować, węzeł musi się posunąć ku językowi, piszczałka zbliża się bardziej do krytej. Przy zadęciu języczek musi się

\*) Bliższe objaśnienia znajdzie czytelnik w rozprawie W. Webera. Poggendorffs Annalen XVI.

tylko poruszać ku wnętrzu piszczałki, jeśli ma miejsce rozrzedzenie, przy którym cząsteczki powietrza także ku wnętrzu drgają, czyli, jeśli się tak wyrazimy, gdy węzeł znajduje się zewnątrz piszczałki w nóżce; powietrze zewnętrzne nowo wchodzące wywiera pewne ciśnienie na rozrzedzone powietrze wewnątrz piszczałki, lecz jednocześnie przeciwdziała ruchowi wstecznemu języzka, to jest jego sprężystości; przez to według wzoru (29) powiększa czas drgania. Przy powrocie języzka na zewnątrz, znajduje się on w zgęszczonej powietrza, które je popycha naprzód lecz jednocześnie zmniejsza jego sprężystość, a tem samem powiększa czas jego drgań. Tym sposobem tłumaczy się obniżenie tonu języzka przez piszczałkę nie będącą z nim w zgodności. To obniżenie jest tem większe, im większe są kolejne zgęszczania i rozrzedzania powietrza. Porównyując mogące tu zachodzić przypadki, łatwo się przekonamy, że obniżenia stają się tem większe im o mniejszą liczbę drgań ton zasadniczy piszczałki przewyższa ton języzka; gdyż w tym przypadku języzek może w całej prawie swej długości jednostajnie działać na powietrze, nie doznając przeciwdziałania od przeciwnego ruchu cząstek powietrza. Jeśli zatem ton języzka znajduje się bardzo blisko pod tonem piszczałki, wtedy zmiana w gęstości jest największą; węzeł, który wyobrazić sobie należy w nóżce, przypada prawie w języzku, piszczałka staje się krytą przy języzku i daje oktawę niższą tonu piszczałki otwartej; jest to największe obniżenie. Jeżeli ton języzkowy znacznie jest niższy od tonu piszczałki, to drgający języzek działa już to na cząsteczki powietrza wychylające się naprzód, już też na cząsteczki wracające, skutkiem czego zgęszczania i rozrzedzania będą mniej silne, węzeł, który należy sobie wyobrazić jako przypadający w nóżce, oddala się od języzka, ton języzka mniej się obniża; obniżenie jest prawie równem zeru, gdy piszczałka ma  $\frac{1}{4}$  długości takiej piszczałki otwartej, któraby była w zgodności z tonem właściwym języzka. Jeśli zatem ton piszczałki jest znacznie wyższym od tonu języzka, to ten ostatni doznaje tylko małego obniżenia. Ten zmienny wpływ piszczałek różnych długości na ton języzka, można wykazać na zdźble pszenicy, z którego wycięto wązki paseczek kształtu języka; ton, jaki ten języzek daje, jest tem wyższy im bardziej zdźbło skrócimy; podobnie się zachowuje zielone zdźbło żyta, które rozszczepiono przez przyciśnięcie i przez to opatrzone podwójnym językiem.

Jeśli ton języzka jest wyższy od tonu zasadniczego piszczałki, to języzek przy swoim powrocie znosi w części wywołane poprzednio zgęszczenie; z tego powodu obniżenie tonu na początku będzie tylko małe, stanie się zaś ono tem większe, im bardziej ton języzka się podwyższy, gdyż właśnie wskutek zniesienia zgęszczenia sprężystość języzka się osłabia; jednakże obniżenie to nie dosięga oktawy, a dochodzi tylko kwarty; gdy ton języzka stanie się dwa razy wyższym od tonu zasadniczego piszczałki, to on zgadza się z jej pierwszym tonem górnym i przeskakuje wtedy nagle na swoją pełną wysokość. W podobny sposób tłumaczą się i inne zjawiska piszczałek języzkowych, szczególnie zaś te, które zachodzą przy wyciąganiu powietrza przez górną część piszczałki.

Ponieważ z tego, cośmy widzieli wynika, że piszczałki wargowe należy uważać za piszczałki, które przy języzku są mniej lub więcej kryte, to dają one daleko niższe tony aniżeli piszczałki otwarte równą z nimi wysokość mające; z tego obniżającego działania języzka na piszczałki korzystają przy budowie organów; registry trąb, rogów i organów dają tony 33-u, 16-o i 8-mio stopowe pomi-

mo to, że one takich piszczałek nie mają; jednakże piszczałki te są dłuższe aniżeli połowa powyższych długości, gdyż najprzód krycie przy końcu języczkowym nie jest zupełne i powtórnie piszczałki te przy końcu otwartym rozszerzają się ostrokągowo, by ton uczynić pełniejszym i silniejszym, i tym sposobem uniknąć przytłumionego tonu piszczałek krytych. Przez takie zaś rozszerzenie, krycie piszczałek staje się jeszcze niedokładniejszym, zbliżają się one coraz więcej do piszczałek otwartych i dla tego też muszą być nieco dłuższe od piszczałek krytych. Różnica ta występuje też w klarncie z jednej strony, w oboju zaś i fagocie z drugiej strony. Wszystkie te instrumenty, podobnie jak trąbka dziecienna, są piszczałkami języczkowymi: klarnet z powodu jednostajnej szerokości rurki zachowuje się jak piszczałka kryta, daje on tony o oktawę niższe od tonów fletu i daje tylko nieparzyste tony górne; obój i fagot przeciwnie z powodu ostrokągowego rozszerzenia, jakie posiadają, zbliżają się do piszczałek otwartych. Klarnet ma języczek pojedynczy wycięty z trzciny włoskiej, który mocno się przywiązuje do dziobu i który przy dęciu prawie zamyka otwór ustny; obój i fagot mają podwójną języczek podobnie jak fujarka wierzbową; języczek fujarki jest rurą wierzbową przy końcu przeciętą, która przymocowywa się do rogu uplecionego z kory wierzbowej; daje ona bardzo głośne tony i może być uważana jako pierwowzór oboju i fagotu. Również i instrumenty blaszane, jako to róg, trąba, bombardon, afikleida i t. p. są piszczałkami języczkowymi, chociaż języczków nie mają; te bowiem są zastąpione wargami grającego na nich; wargi zostają mocno do siebie i do mundsztuka przyciśnięte i wprawiane w drgania przez strumień powietrza przenikający przez wąską szparę warg; jak to obserwować można, gdy mundsztuk tych przyrządów jest kryształowy; w podobny sposób tłómaczy się i świstanie wargami, językiem i zębami. Jeśli przy właściwych piszczałkach języczkowych język jest szerszy, niż szpara powietrza, wtedy języczek uderza o brzożgi szpary i przydaje tonowi dźwięk chrapliwy, jak to ma miejsce w chrapliwych piszczałkach organów; jeśli zaś języczek jest węższy od szpary, wtedy albo wchodzi w szparę, albo przechodzi przez nią i wtedy chrapliwy przydźwięk odpada i ton jest miękki i pełny, jak to ma miejsce w rejestrze *vox humana* organów. Jeżeli języczek robi zbyt szerokie wychylenia, wtedy nie podlega już on prawu jednoczasowości (izochronizmu), zupełnie tak samo, jak to ma miejsce dla wahadła, gdy ono robi wielkie wahnięcia, drgania stają się wtedy nieco powolniejsze. Ta wada szczególnie występuje w instrumentach opatrzonych języczkami bez piszczałek, jak w harmonice, harmonium, akordeonie, eoldikonie, fisharmonice i t. p., które wszystkie przy silnem zadęciu dają tony niższe. Ponieważ podłużne drgania powietrza przez silne zadęcie zostają przyspieszone, to wada powyższa mniej się wydatnia w piszczałkach języczkowych; co więcej, przez stosowny wybór wymiarów przyrządów da się nawet zupełnie usunąć; (*Webera* piszczałka języczkowa kompensacyjna (1827)).

**Organ głosowy** ludzi (*Johannes Müller* 1837) i wielu zwierząt jest również piszczałką języczkową; płuca tworzą miech, tchawica — rurę powietrzną, krtań — nóżkę, której górna część zawiera języczek, gardziel i jama ustna — czarcę głosową. Krtań utworzona jest z górnych najsilniejszych pierścieni tchawicy nazywanych chrząstką pierścieniową, z chrząstki tarczowej (jabłka adamowego) i z dwóch chrząstek konewkowych, które za pomocą kilku mięśni uzdolnione są do różnych ruchów. Błona śluzowa zamienia się w krtani w bardzo sprężystą tkankę, któ-

ra przed przednią krawędzią chrząstki tarczowej zostaje rozdzieloną na dwa półkule oddziały, nazwane *wiązadłami*, ciągnące się ku tyłowi do chrząstek kowekowych. Przy zwykłym oddychaniu te dwie błony leżą obok siebie obwisłe, tworząc przedział, tak że oddychanie skutecznia się przez wąskie przedłużenie tego przedziału ciągnącego się między dwiema chrząstkami nalewkowemi, przez tak nazwaną szparę oddechową. Przy wydawaniu tonu przeciwnie, szpara oddechowa się zamyka, wiazadła głosowe zostają silnie napięte, a brzegi ich ściśle do siebie przylegają, tak że pozostaje tylko cienka prosta szpara, szparą głosową zwana; przez szparę tę wnika strumień powietrza i wprawia w drgania wiazadła głosowe, które to drganie udziela się powietrzu w jamie ust i gardzieli.— Wysokość tonu zależy od napięcia i długości wiazadeł głosowych, jako też od długości współbrzmiających brzegów innych części i siły strumienia powietrznego; nie zależy zaś od szerokości szpary głosowej, która tylko ułatwia wymawianie tonów. U mężczyzn długość wiazadeł głosowych wynosi 18<sup>mm</sup>, u kobiet tylko 12<sup>mm</sup>; do wydania niższych tonów przyczyniają się też i brzegi nagłośni, do wydania zaś bardzo wysokich tonów drgają same tylko proste brzegi wiazadeł.

**253.** **Płomień śpiewający czyli harmonika chemiczna** (Higgins 1777, Chludni 1800). Jeśli nad płomieniem gazu lub pary trzymać będziemy rurkę tak, by płomień palił się we wnętrzu rurki, to powstaje wtedy ton, który harmoniką chemiczną nazywamy; najłatwiej tony takie powstają, gdy trzymamy rurkę nad płomieniem wodoru albo gazu oświetlającego. Wysokość tonu podlega tym samym prawom, co i wysokość tonu otwartych piszczałek; jest ona odwrotnie proporcjonalną do długości rurki, lecz nie zależy ani od jej szerokości, ani od materyjału, z którego rurka jest zbudowaną; słaby wpływ wywierają temperatura i wielkość płomieni, jako też i inne jeszcze okoliczności. Oprócz tonu zasadniczego odpowiadającego danej rurce, płomień mogą jeszcze dać i tony górne wyższe, jeśli płomień coraz bardziej będziemy skracali. *Tyndall* otrzymał z rurki cztery pierwsze tony górne. Milczący płomień zaczyna drgać i śpiewać, jeśli w sąsiedztwie rozlega się ton, który jest w zgodności z tonem rurki. Śpiewający płomień drga, gaśnie i milknie, jeśli w sąsiedztwie rozlega się ton, który niezupełnie jest w zgodności z tonem płomienia. (Doświadczenia hr. *Schaffjotsch* i *Tyndalla*). Posłuszeństwo płomienia w dźwięczeniu i milczeniu jest najzupełniejszą, gdy płomień w małej tylko odległości znajduje się *od najlepszego miejsca*, to jest od miejsca, w którym najsilniej śpiewa. Płomień tem łatwiej zgaśnie, im mniejszy jest płomyk, i im bliżej i silniej rozlega się ton zewnętrzny.

Dla lepszego zbadania tych ciekawych zjawisk urządzano optyczne analizy śpiewających płomieni, według metody *Wheatstone'a* (1834). Drgania bowiem śpiewających płomieni naprowadziły na domysł, że one są przerywane; sądzono, że prąd powietrzny przyspieszony działaniem ciepła w rurce, gasi płomień, miesza się zaś natychmiast z wypływającym gazem i tworzy tym sposobem bardzo łatwo zapalny gaz piorunujący, do którego zapalenia wystarczy ciepło pozostałe

jeszcze, powstają więc tym sposobem małe wybuchy. Według tego poglądu ton w rurach śpiewających miał być wytworzony przez kolejne wybuchy, a same płomienie miały co chwila gasnąć i na nowo się zapalać. Ze tego gaśnięcia nie widzimy, tłumaczono trwałością wrażenia świetlnego na siatkówce, która miała być większą od przedziału między gaśnieniem i zapaleniem płomienia. Mniemanie powyższe zostało stwierdzone analizą optyczną płomieni śpiewających, w której staramy się obraz oczny płomienia co chwilę na inny punkt siatkówki odrzucić. Możemy to skutecznie, gdy podczas przypatrywania się płomieniowi gołem okiem lub też przez lornetę, odchylamy głowę lub też sam płomień szybko na bok odsuwamy. Najwyraźniej skuteczniamy to za pomocą zwierciadła osadzonego na walecu i szybko z nim się obracającego; w zwierciadle takim obraz co chwilę przyjmuje inne położenie, gdyż i sam walec co chwila położenie swe zmienia, a ponieważ ta zmiana położenia skutecznia się kołowo, to nieskończenie wiele obrazów zwierciadlanych płomienia musi także być rozmieszczonych po kole. Jeśli płomień jest ciągły i nieprzerwany, to w każdym punkcie tego koła musi być obraz płomienia i wszystkie te obrazy muszą tworzyć nieprzerwany krąg ognisty, gdyż wrażenia pierwszych obrazów jeszcze tkwią w oku, gdy już ostatnie obrazy się tworzą. Jeśli zaś płomień nie jest ciągły, lecz raz płonie, drugi raz gaśnie, to nie we wszystkich punktach kręgu obrazu mogą powstać obrazy ogniste; koło ogniste nie jest ciągłe, lecz składa się z pojedynczych, wyraźnie oddzielonych iskier. Otóż takie koło ognistych pereł tworzy się wtedy, gdy w obracającym się zwierciadle tworzą się obrazy śpiewającego płomienia, zatem płomień taki nie jest ciągły, gaśnie on co chwila, by na nowo się zapalić. Ten rozbiór optyczny płomienia śpiewającego bardzo silnie przemawia za tem, że ton powstaje z szeregu małych wybuchów; pogląd ten jest bardzo upowszechniony i opiera się on na powadze Faraday'a. Jednakże pogląd ten nie tłumaczy, w jaki sposób czas między dwoma wybuchami tak ściśle się zgadza z czasem fali podłużnej słupa powietrznego w rurce. Z tego to powodu i dla wielu innych przyczyn podawano rozmaite inne tłumaczenia. Tak np. *Tyndall* sądzi, że z tarcia prądu powietrznego o płomień (254) powstaje mieszanina ruchów, z których jeden bardzo łatwo posiadać może rytm, odpowiadający rurce i mogący zatem sprawić w słupie powietrznym fale stojące, które znowu mogą tak samo oddziaływać na płomień, jak fale w piszczałce językowej na język. *Schrötter* jako przyczynę tonu podaje obserwowane przez siebie obniżenie i podwyższenie się płomienia, które wywołane zostało kolejnem rozrzedzeniem i zgęszczeniem strumienia gazowego. *Grailich* i *Weiss* (1858) przyczyny tonu płomienia szukają w zmianie materji, która powstaje wskutek spalania się ciał. *Sandhauss* (1860) przyczyny tonu szuka w rurce wpływowej, która udzielając powietrzu pewnych uderzeń, musi powietrze w rurce będące wprawić w drganie. Według *Terquema* (1868) strumień powietrza wywołuje zmiany w płomieniu, które pociągają za sobą niejednostajny wpływ; przez co powstają drgania, które odbijając się na końcu rurki, dają z nowo przybyłemi falami fale stojące; te stojące fale mają też być przyczyną drgania płomienia. Przedmiot zatem ten nie jest jeszcze zupełnie wyjaśnionym.

**Mniej ważne źródła głosu.** 1. *Drgania obrotowe sztab.* Jeśli gładkie 254.  
sztaby szklane, drewniane lub metalowe chustką moką lub żywicą pokrytą trzeć będziemy po liniach kołowych, to powstanie wtedy ton, którego liczba drgań różna się 0,6 liozby drgań tonu podłużnego, który zatem jest blisko o 1-ą sextę niż-

szy od tego ostatniego. 2. *Tony pochodzące z tarcia.* Tarcie polega na uderzeniu wyniosłości lub też cząstek jednego ciała o wystające cząsteczki drugiego ciała, bardzo blisko przechodzącego około pierwszego; po największej części wyniosłości te nie są równe, a zatem i uderzenia są różne, powstaje skutkiem tego zbiór ruchów, wywołujących szmer towarzyszący tarcia; szmer ten wtedy tylko przechodzi w wyraźny ton, jeśli ciała bardzo blisko do siebie przyciśniemy, gdyż wtedy już nie wyniosłości ciał, lecz ich jednakowe cząsteczki na siebie działają. Powstaje wtedy ton przenikliwy, jak to np. ma miejsce, gdy zwilżony palec silnie przesuwamy po szybie, albo też paznokciem rysujemy po twardej płycie, albo też przy ruchach niesmarowanych machin, pomp, drzwi, lub hamowaniu biegu pociągów. Lecz i ta mieszanina szmerów powstających przy tarcia zawiera niektóre pojedyncze oznaczone tony, które przy nateżonej uwadze lub uzbrojonym uchem możemy słyszeć, jadąc koleją żelazną; gdy ucho jest uzbrojone, wtedy tony te można słyszeć i w dzień. Kula karabinowa przez tarcie o powietrze, wiatr przez tarcie o drzewa, szybko poruszana świeca przez tarcie o powietrze wywołują tony; tak samo też prąd powietrza trąc się o ostrze noża, o krawędzie wąskiej szpary, o otwór klucza albo też o wargę piszczałki, gdyż strumień taki wywołuje tony lub mieszaninę tonów. Jeśli ta mieszanina tonów zawiera ton odpowiadający blizkiej rurce, to ta ostatnia zaczyna dźwięczyć, gdyż ton ten sprawia w powietrzu rurki fale stojące, inny zaś ton tego uczynić nie może, bo wywołane przezeń zgęszczenie zostaje przy swoim powrocie zniesione rozrzedzeniem. W ten sposób Tyndall objaśnia powstawanie tonów w piszczałkach wargowych i w harmonice chemicznej. Frankfurcki most klatkowy dźwięczy, gdy w jego blizkości strzelają; druty telegraficzne dźwięczą przy najmniejszym wietrze na podobieństwo harfy eolskiej; harfa ta składa się ze skrzynekki, nad którą są słabo napięte 6—10 równych strun; jeśli wiatr uderzy w te struny, to wskutek drgania jako całych strun lub ich części powstają tony zasadnicze i tony górne harmoniczne, które łącząc się ze sobą dają miękkie akordy. 3. *Tony cieczy.* Syrena wydaje głos i w wodzie. *Cagniard-Latour* wprowadził w drganie słupy cieczy w rurce zawartych, trąc rury w kierunku podłużnym. *Wertheim* za pomocą silnego strumienia wodnego doprowadził do dźwięczenia otwartą piszczałkę wargową w wodzie leżącą i otrzymał obok tonu zasadniczego pięć pierwszych harmonicznych tonów górnych; \*) liczba drgań tonu zasadniczego odpowiadała wzorowi  $n = \frac{c}{2l}$ ,

gdzie jednak  $c$  nie oznacza całej prędkości rozchodzenia się głosu w wodzie równej  $1424^m$ , lecz tylko  $= 1424\sqrt{\frac{2}{3}}$ . To zmniejszenie się prędkości powstaje ztąd, że przez ciśnienie na słup cieczy jakoteż i na sztabę, zachodzi zmiana objętości, a tem samem i gęstości, skutkiem czego  $c$  zmienia się według wzoru

$c = \sqrt{\frac{e}{d}}$ , która to zmiana według doświadczeń *Wertheima* wyraża się czynnikiem  $\sqrt{\frac{2}{3}}$ . Z wzoru na  $n$  wypada, że ton zasadniczy piszczałki wodnej wykonywa trzy razy tyle drgań, ile ton zasadniczy piszczałki powietrznej tej samej długości. Odwrotnie się zachowują tony wpływających strumieni *Savarta* i *Sand-*

\*) Patrz *Wällner. Experimentalphysik T. I, str. 537.*



*haussa*. Pierwszy zauważył szczególne, miękkie tony przy wypływie wody przez krótkie rurki z pełnych naczyń, i znalazł, że liczba drgań jest proporcjonalną do pierwiastku kwadratowego z wysokości ciśnienia hydrostatycznego i odwrotnie proporcjonalną do długości rurek wypływu. Coś podobnego zauważył też *Sandhauss*, wypuszczając wodę lub powietrze przez otwór w cienkiej ścianie i przepuszczając strumień w pewnej odległości przez otwór równy pierwszemu; strumień wodny lub powietrzny został tym sposobem wprawiony w drgania, lecz w tym przypadku tony wodne wypadły niższe lub słabsze, niż tony powietrzne.—

4. *Tony wywołane ciepłem*. Kołyska *Trevelijana*, patrz 237. Zarząca się sieć drucziana umieszczona w rurce wprawia ją w drzwienie. Jeśli bardzo cienką rurkę zakończoną kulą ogrzejemy, to powstanie ton, gdyż ogrzane powietrze nie znajdując łatwego odpływu, trze o przylegającą warstwę powietrza. Bańki powietrzne unoszące się przy ogrzewaniu płynów, wytwarzają ton. Słup Memnona.(?).

5. *Tony elektromagnetyczne*. Jeśli naokoło sztaby miękkiego żelaza nawiniemy liczne zwoje drutu, to sztaba wyda ton, gdy strumień elektryczny przez drut przebiegający puścimy lub przerwiemy. I w rurach z blachy żelaznej otaczających drut powstają tony; rury z innych metali dźwięczą, jeśli opatrzone są przecięciem podłużnym, którego brzegi dotykają się wzajemnie.

6. *Ton bąka* powstaje ztąd, że powietrze bąka wraz z nim się obraca i wskutek siły odśrodkowej wypływa po tej stronie otworu, do którego wpływa, lecz jednocześnie z drugiej strony dopływa powietrze, które wprawia w drganie powietrze wewnętrzne. Ton jest tem niższy, im większą jest objętość powietrza, im mniejszy jest otwór i im grubsza jest ściana bąka.

7. *Ton piszczałek parowych*. Jeśli parę za pomocą kranu a (fig. 120) wpuścimy do wnętrza rurki pustej b, to ona wypływa przez wąską pierścieniową szparę utworzoną między brzegiem c kuli pustej i brzegiem d krążka kołowego, pokrywającego prawie półkulę, ztąd wychodząc para spotyka ostry kant dzwonu g; drgania dzwonu dają właśnie przenikliwy ostry ton.

8. *Tony owadów*. Tylko mała liczba owadów wydaje głosy; chrabąszcze opatrzone są jęczyczkiem przy swoich przetchlinkach, pszczoły i muchy błonką, cykady dwiema błonkami, które przez prądy powietrzne zostają wprawione w drgania. Częściej tony u owadów powstają wskutek tarcia; tak np. szarańcza polna trze swe ząbkowane golenie o listwę skrzydeł. Muchy, komary, pszczoły i inne owady wytwarzają też ton pochodzący z lotu.



Fig. 120.

mogą z nadchodzącymi falami utworzyć fale stojące, przez co powstają samodzielne tony. *Mieszanie tonów wtedy tylko wywołać może w danym ciele współbrzmienie, jeśli jeden z tonów mieszaniny pod względem wysokości lub pod względem drgania jest w zgodności z jednym z tonów, któreby ciało samodzielnie drgając wydało ze względu na swoje wymiary i sprężystość.*

**Dowodzenie.** Jeśli drgania głosowe cząsteczki, które, jak wiadomo, są daleko większe i poruszają większe masy niż drgania wytwarzające światło i ciepło, nie mogą w innych cząsteczkach wywołać drgań równoczesnych, to wtedy nie może mieć miejsca przenoszenie się tonu: ruch po największej części zamienia się w ciepło. Gdyż jeśliby druga cząsteczka szybciej drgała niż pierwsza, to będzie już wracała wtedy, gdy pierwsza jeszcze poruszać się będzie naprzód; wskutek uderzenia się cząstek wielkie drgania głosowe zostałyby wtedy zamienione w małe drgania; jeśliby ruch drugiej cząsteczki był powolniejszy, to ona jeszcze wracać będzie, gdy już pierwsza porusza się naprzód i skutek byłby ten sam. Jeśli zaś peryody obu cząstek się zgadzają, to pierwsza cząsteczka przy każdym drganiu jednocześnie może oddziaływać na drugą cząsteczkę i tym sposobem nadać jej silniejszy ruch; wskutek tego drgania powietrzne mogą doprowadzić do dźwięczenia ciała stałe, a drgania eteru mogą rozgrzać ciała wałkie. Jeśli zaś cząsteczka ciała została przez drgania głosowe wprawioną w równe drgania, to ona, jak wiadomo, musi wywołać fale postępowe, które zostają odbite od powierzchni granicznej ciała.— Te odbite fale wtedy tylko mogą z nowo nadchodzącymi falami postępowymi utworzyć fale dźwięczące, to jest fale stojące, jeśli długości ich są w stosunku prostym do dróg, jakie one przebiegają od jednej granicy ciała do drugiej, gdyż wtedy tylko punkta rozchodzenia się fal odbitych są oddalone od punktów rozchodzenia się fal postępowych na 1, 2, 3, . . . długości fal, a jak nam wiadomo (227), tylko w tym przypadku mogą powstać fale stojące. Te same stosunki co do zupełnej równości drgań mają też miejsce i dla ciał dźwięczących; więc względem przeniesić się mającego tonu muszą być jednakowo nastrojone. Jednakże nie jest rzeczą konieczną, by wzbudzające ciało wydawało tylko ten jeden ton, owszem, ruch drgający ciała może być jak najrozmaiciej skombinowany; gdyż według prawa *Fourier'a* (228), każdy taki złożony ruch może być rozłożonym na swoje elementarne ruchy składowe, a rozkład podobny następuje mianowicie wtedy, gdy ruch drgający napotyka ciała, które wykonać mogą jeden tylko z ruchów składowych. Ztąd wypada, że jakikolwiek ton mieszaniny tonów wtedy tylko pobudza ciała do współbrzmienia, jeśli on jest w zgodności z jakimkolwiek właściwym tonem ciała, bez względu na to, czy ton jest zasadniczym górnym, czy pobocznym.

**Sprawdzenie.** Jeśli przytwierdzimy dwie widełki strojowe na pustej a otwartej skrzynce drewnianej, to pociągając smyczkiem jedne z nich, przekonamy się, że drugie zostaną wprawione w drganie, chociażby znajdowały się w dość znacznej od pierwszej odległości; jeśli zaś do jednej z widełek przytwierdzimy kawałek wosku, by tym sposobem wydała ton niższy, to przekonamy się, że wtedy współbrzmienia nie będzie. Jeśli w bliskości fortepianu lub innego instrumentu strunowego zaśpiewamy ton, który może być wydany przez ten instrument, to on znacznie brzmieć; łatwo się przekonać, że ton ten pochodzi z odpowiedniej struny, albowiem siodełka papierowe na niej umieszczone spadają, a dotykając

się jej palcem przytłumiamy głos. Jeśli na monochordzie obok struny drgającej umieścimy drugą strunę jednakowo nastrojoną, natenczas drga ona tak mocno, że siodełka papierowe z niej spadają; przy niejednakowym nastroju obu strun zjawiska podobnego nie spostrzegamy. Jeśli za pomocą podstawki wywołamy w jednej strunie ton górny, to siodełka papierowe umieszczone na drugiej strunie zeskoczą wprawdzie z brzuszków, lecz nie spadną z węzłów. Piszczalki, dzwony i szkła współdźwięczą z silnemi głosami, a bardzo silny dźwięk może nawet wywołać pęknięcie szkła. Szczególniej pouczającym jest doświadczenie z widełkami strojowemi i walcem (250). Jeśli w mieszaninie tonów jeden z nich jest tak słabym, że ucho nie może go bezpośrednio rozróżnić, to przy padaniu tego tonu na słup powietrzny nastrojony według niego, lub na inną jaką objętość powietrza, która bezpośrednio działać może na ucho, on znacznie się wzmacnia. Na tym to polega budowa ważnych przyrządów *Helmholtza* nazwanych *rezonatorami*; składają się one z kul szklanych lub mosiężnych, opatrzonych z jednej strony wydłużeniem lejkwatym, które wprowadzić można do otworu przewodu słuchowego, z drugiej zaś przeciwniejszej — otworem większym. Jeśli taki rezonator nastrojony według pewnego tonu wprowadzimy do ucha, to ten ton rozróżnimy natwet przy gwarze dziennym; jeśli zaś zostanie wywołany właściwy ton rezonatora, to jakkolwiek słabym on by był, możemy go jak najdokładniej rozróżnić w mieszaninie najrozmaitszych tonów.

**Rezonans** (Bracia Weber 1825). Przez rezonans rozumiemy zastosowanie współbrzmienia do wzmocnienia słabych tonów. Tono słabo dźwięczą, jeśli ciało wydające dźwięk ma tylko małą powierzchnię, a tem samem może tylko małą ilość powietrza w ruch wprowadzić, i jeśli ton z ciała dźwięczącego przechodzić musi do drugiego środka, przy czem ruch drgający dużo traci na swej sile. Tak np. widełki strojowe same przez się dają bardzo słaby głos; struny przymocowane do kłoców łożwianych dają tony, które zaledwie słyszeć można; za to instrumenty dęte, w których duży słup powietrza dźwięczy, dają bardzo silne tony. Dla wzmocnienia tonów słabych łączymy ciało dźwięczące z dużemi, suchemi i sprężystemi taflami drewnianemi, albo też ze skrzyniami znaczną ilość powietrza zawierającemi; w tym przypadku drgania ciała dźwięczącego przechodzą na te tablice, które zaczynają drgać, i z powodu wielkiej swej powierzchni wprawiają w ruch znaczne masy powietrza, wzmacniając tym sposobem głos bardzo znacznie. Takie tablice nazywają pudłami rezonansowemi; przy rezonansie skrzyń, które również pudłami rezonansowemi zowią, do wzmocnienia głosu przyczynia się powietrze w nich zawarte, gdyż ono zostaje wprawione w drgania przez wszystkie ściany pudła, które znowu wzbudzone drgania udziela powietrzu zewnętrznemu. Przez współbrzmienie, według praw mechaniki, zmniejsza się wprawdzie czas drgania, wysokość zaś pozostaje niezmienną (według 255), gdyż w przeciwnym razie nie można by było jej użyć do rezonansu. 256.

Rezonans jest bardzo blisko spokrewniony ze współbrzmieniem, nie jest jednak identyczny z nim; o tem przebonywa nas już ta okoliczność, że pudło rezonansowe przestaje dźwięczyć jednocześnie z ciałem wydającym dźwięk, gdy tymczasem ciało współbrzmiące jeszcze dalej drga. Oprócz tego różnica polega jeszcze i na tem, że pudło rezonansowe dźwięczy przy wszystkich tonach, gdy tymczasem ciało współbrzmiące musi być absolutnie ściśle, ale nastrojone według własnych tonów i tylko dla nich drga; jednakże dla płyt ściśle strojenie nie jest koniecznem, gdyż płyty (według 248) mają wiele tonów właściwych i dla tego też w najrozmaitszy sposób mogą współdźwięczyć. Lecz jedna płyta pomimo to nie wystarcza jako pudło rezonansowe, gdyż ona odpowiada tylko na pewną ograniczoną liczbę tonów, gdy tymczasem pudło rezonansowe powinno każdy ton wzmocnić; jednakże dla instrumentów wyższych, jak skrzypiec, pudło rezonansowe robi się małym, dla niższych zaś jak basetli i bębna—większem, podobnie bywa ono większem w bębnie niższym niż w wyższym. Pomimo więc, że pudła rezonansowe zostają w pewnej zależności od wysokości tonu, to wzmacniają one jednakże każdy ton, a zatem rezonans istotnie się różni od współbrzmienia.

Według *Webera* cząsteczki współbrzmiącego ciała dla tego nie przestają drgać po ustaniu drgań ciała dźwięczącego, ponieważ udzielony im ton jest naturalnym ich tonem, gdyż są nastrojone według tego tonu; ciała zaś wydające rezonans i będące w tych samych warunkach, przestają drgać, ponieważ udzielony im ton nie jest ich naturalnym tonem, lecz został im narzuconym, a zatem dźwięczą one tylko dopóty, dopóki trwają drgania ciała dźwięczącego. Wskutek tych bezustannie trwających drgań powstają fale postępowe, które na granicach niedokładnie tylko zostają odbite, i dla tego też zostają wprawdzie zniesione przez nowo przybywające fale postępowe, same zaś nie niszczą fal postępowych, skutkiem czego staje się możebnem powstanie nowych fal odbitych, które doznają tego samego losu co i poprzednie, ustępując miejsca nowym falom tak długo, póki trwają drgania ciała dźwięczącego.

**Sprawdzenie.** Jeśli dwie równe płyty połączymy ze sobą sztabą, to na jednej z nich utworzą się figury rezonansowe, jeśli na drugiej przez pociąganie smyczkiem utworzą się figury *Chladniego*; jeśli te dwie płyty są różnej wielkości i leżą na jednej płaszczyźnie, to przy pociąganiu smyczkiem mniejszej z nich utworzy się figura, której nie można otrzymać na żadnej z nich oddzielnie. Jeśli strunę przymocujemy jako przedłużenie płyty drewnianej, to przy pociąganiu struny otrzymamy na płycie figury rezonansowe, które będą mniej foremne niż figury *Chladniego*; przy pociągnięciu prostopadłym ziarenka piasku podskakują, przy podłużnem ślizgają się tylko. (Koncert niewidzialny *Wheatstone'a*). Bardzo piękne figury rezonansowe otrzymamy na napiętych błonach, jeśli w ich bliskości umieścimy przez dłuższy czas drgające widełki strojowe lub piszczałki organowe. Zaledwie słyszalne widełki strojowe silnie dźwięczą, jeśli osadą umieścimy je na stole, fortepianie lub pudle rezonansowem. Struny fortepianowe za pomocą sztyftów stalowych przenoszą swe drgania na podstawki, a przez nie na pudło rezonansowe; podobnie się zachowują instrumenty smyczkowe; gitara dla tego wydaje słaby głos, że w niej nie ma podstawki.

**257. Organ słuchu.** Organ słuchu odnieść należy do rzędu ciał dźwięczących, albowiem bez niego niemożebnem by było poczucie tonu i oprócz tego

eis zamiast 11 krzyżyków, potrzebujemy tylko 1b, przez co sposób pisania gam znacznie się upraszcza.

Gama powstała z wstawienia 5 półtonów między wyrazami gamy diatonicznej nazywa się gamą chromatyczną. Gama ta widocznie zawiera szereg nowych przestanków, które oznaczamy wyrazami „wielki“ i „mały.“ Na szczególną uwagę zasługują tony, które powstają z podwyższenia sekundy  $\frac{9}{8}$  i kwinty  $\frac{3}{2}$  o półton  $\frac{16}{15}$ ; do tonu zasadniczego są one w stosunku  $\frac{9}{8} \cdot \frac{16}{15} = \frac{6}{5}$  i  $\frac{3}{2} \cdot \frac{16}{15} = \frac{8}{5}$ ; z powodu prostoty tego stosunku są one jeszcze w pewnym stopniu zgodnymi z tonem zasadniczym. Pierwszy z tych tonów jest bardzo bliski tercyi, gdyż stoi tylko w stosunku o  $\frac{5}{4} : \frac{6}{5} = \frac{25}{24}$  niżej tercyi i z tego powodu nazywa się małą tercyą i pokazuje nam, że i między półtonami zachodzi różnorodność. Przystanek  $\frac{16}{15}$  tworzy wielki półton, przystanek  $\frac{25}{24}$  mały półton. I przystanek  $\frac{8}{5}$  leży o  $\frac{25}{24}$  niżej seksty i z tego powodu nazywa się małą tercyą; oba te tony uważane bywają jako obniżenia tercyi i seksty. Gama, w której zamiast tercyi i seksty znajduje się mała tercyą i mała seksta, nie brzmi tak zadawalniająco, jak poprzednia, nie tak jasno i wesoło, bardziej ciemno i ponuro, nazywają ją gamą moll; drugą zaś z wielką tercyą i wielką sextą—gamą dur, które to nazwy pochodzą od znaku b dla dwóch obniżen i znaku  $\natural$  oznaczającego zniesienie obniżen, nie wyrażają one jednak przeciwstawienia odnośnie do twardości lub miękkości samych dźwięków.

**Temperatura.** W gamie normalnej, czyli tak nazwanej gamie c—dur, 244. między tercyą i kwartą, jak również między septymą i oktawą znajduje się półton  $\frac{16}{15}$ . Jeśli wszystkie inne gamy mają mieć ten sam czysty, naturalny nastrój, to wszystkie półtony musiałyby być  $= \frac{16}{15}$ . Temu zaś zasadniczemu warunkowi naturalnie czystego nastroju, nie możemy uczynić zadość, jeśli między 7 tonami gamy diatonicznej umieścimy tylko pięć półtonów, a zatem gdy użyjemy zwyczajnej gamy chromatycznej. Oprócz tego przy takim wstawieniu nie możemy uczynić zadość i drugim zasadniczym warunkom naturalnie czystego nastroju, jak to łatwo widzieć z następujących przykładów.

Dwa półtony chromatycznej gamy dają cały ton, gdy tymczasem dwa czyste półtony po sobie następujące dają przystanek  $\frac{16}{15} \cdot \frac{16}{15} = \frac{2048}{1800}$ , który nie równa się ani wielkiemu całemu tonowi  $\frac{9}{8} = \frac{2025}{1800}$ , ani małemu całemu tonowi  $\frac{10}{9} = \frac{2000}{1800}$ . W gamie chromatycznej półton stanowi podwyższenie dla tonu niższego i jednocześnie obniżenie dla tonu wyższego; podwyższenie jednak tonu c o czysty półton daje  $\frac{16}{15}$ , obniżenie zaś tonu d o czysty półton daje  $\frac{15}{16}$ ; zatem w naturalnym czystym nastroju cis nie przypada ż des, ani też dis z es, fis z ges i t. d.; przyrząd z czystym naturalnym nastrojem musiałyby między dwoma całymi tonami zawierać dwojakie półtony. W gamie chromatycznej jest np. a kwintą d, więc musiałyby być  $a = \frac{3}{2}$  z  $\frac{9}{8}$  czyli  $= \frac{27}{16}$ , jest zaś  $= \frac{5}{3}$ , który to ułamek różni się od  $\frac{27}{16}$  o  $\frac{8}{160}$ ; w naturalnie czystym nastroju musiałyby istnieć inne a dla d-dur, a inne dla c-dur. W chromatycznej gamie trzy wielkie tercyje po 4 półtony dają oktawę z 12 półtonów; jeśli zaś te trzy wielkie tercyje mają być naturalnie-czyste  $= \frac{5}{4}$ , to one powinny dać przystanek  $\frac{5}{4} \cdot \frac{5}{4} \cdot \frac{5}{4} = \frac{125}{64}$ , który jest różnym od oktawy. Jeśli wszystkie trzy tercyje c-e, e-gis, gis-his uczynimy czystymi, to oktawa stanie się nieczystą i na odwrót. W naturalnie czystym nastroju ton c' jako trzecia tercyja c musiałyby

być odmiennym od oktawy tonu c. W chromatycznej gamie 12 kwint prowadzi nas do 7-ej oktawy tonu zasadniczego, postępując zaś przez 12 czystych kwint po  $\frac{3}{2}$  naprzód, otrzymujemy  $(\frac{3}{2})^{12} \approx$ około 130, która to liczba nie równa się 7 oktavom, albowiem z 7 oktav powstaje przestanek  $2^7 = 128$ . Jeśli zatem na fortepianie kwinty zostaną czysto nastrojone, to oktawy staną się nieczystymi i naodwrot. Według tak nazwanego strojenia Pytagoresa następny ton gamy dur otrzymuje się, idąc od poprzedniego tonu o dwie kwinty wyżej, a następnie o jedną oktawę niżej; prawidło to sprawdza się dla sekundy, albowiem  $1 \cdot \frac{3}{2} \cdot \frac{3}{2} = \frac{9}{4} = 2 \cdot \frac{9}{8}$ ; dla tercji zaś prawidło to nie sprawdza się, gdyż  $\frac{9}{8} \cdot \frac{3}{2} \cdot \frac{3}{2} = 2 \cdot \frac{81}{64}$  lecz nie  $\frac{5}{4}$ . Formując zatem gamy według kwint i oktav znajdziemy, że inne przestanki staną się nieczystymi.

Jeśli wszystkie przestanki wszystkich tonów mają być zupełnie czyste, to, według tego cośmy z poprzednich przykładów widzieli, wypadają, że w każdej gamie powinno być więcej niż 12 tonów. Przyrządy, które zawierają te wszystkie tony, dają najdźwięczniejsze akordy, jak to ma miejsce w fis-harmonijce *Helmholtza*, harmonium *Appun'ego* i w organach *Poole'go*. Czyste akordy takich przyrządów mają według *Helmholtza* „bardzo pełny i jakby nasycony dźwięk,“ akordy zwykłych przyrządów wydają dźwięki, które w porównaniu z powyższymi są „surowe, mętne, drżące i niespokojne.“ Ponieważ jednak na zwyczajnych przyrządach muzycznych nie może być więcej jak 12 tonów w jednej oktawie, to musimy pozostać przy gamie chromatycznej, a pojedynczym tonom musimy nadawać taką wysokość, by błędy były jak najmniejsze. Zmiany, jakie porobić należy w 12 tonach, by przestanki uczynić jak najczystszymi, nazywamy *temperaturą*. Jeśli niektóre pojedyncze przestanki uczynimy zupełnie czystymi, a błędy rozdzielimy na pozostałe przestanki, to użyta przy tem temperatura nazywa się *niejednostajną*. Taką temperaturą jest temperatura *Kirnbergera*, w której na 12 kwint jest 9 naturalnie czystych. W dzisiejszej muzyce ogólnie używają temperatury jednostajnej, w której wszystkie oktawy są naturalnie czyste i 12 tonów jednej oktawy mają równe przestanki. Oznaczywszy ten przestanek przez x, znajdziemy, że  $x^{12} = 2$ , ztąd  $x = \sqrt[12]{2} = 1,05946$ . Ten półton jednostajnej temperatury jest mniejszy od wielkiego półtonu  $\frac{4}{15} = 1,06666$ , lecz większy od małego półtonu  $\frac{25}{24} = 1,04166$ . Dwa takie półtony dają jednostajną sekundę  $= \sqrt[12]{2^2} = 1,12246$ , gdy czysta wielka sekunda  $= \frac{9}{8} = 1,125$ . Temperowana wielka tercja jest  $\sqrt[12]{2^4} = 1,25992$ , czysta zaś  $= \frac{5}{4} = 1,25$ ; temperowana kwarta  $= \sqrt[12]{2^5} = 1,33484$ , czysta  $\frac{4}{3} = 1,3333$ ; temperowana kwinta  $= \sqrt[12]{2^7} = 1,49831$ , czysta  $\frac{3}{2} = 1,5$ ; temperowane sexty i septymy są 1,68179 i 1,88775, gdy czyste przestanki są 1,66666 i 1,875; z liczb tych widzimy, że temperowane przestanki mało tylko się różnią od czystych.

Chociaż równomierna temperatura ma tę wyższość, że za pomocą najmniejszej możliwej liczby tonów wywołuje możebnie wielką liczbę tonów jednakowej prawie dźwięczności, to przedstawia jednak tę niedogodność, że żaden akord równomiernie nastrojonych przyrządów nie jest zupełnie czysty. Ponieważ zaś za podstawę nauki muzyki służy fortepian, to śpiewacy i instrumentalisci po największej części wydobywają przestanki równomierne. Tylko grający kwartet smyczkowy, którzy się zupełnie wyzwolili z prawideł szkolnych i posiadają delikatny słuch, jako też śpiewacy kwartetów, którzy dużo bez fortepianu śpiewają, odzyskują napowrót naturalny, czysty nastrój i wywołują przez to największy efekt.

**Liczba drgań tonów muzycznych.** Oznaczywszy stosunki liczby drgań 242. przestanków w rozmaitych temperaturach, łatwo nam będzie obliczyć liczbę drgań tonów muzycznych, jeśli znany nam będzie jeden tylko ton całej gamy. Zwykle za podstawę służy ton  $a^1$ , do którego stosuje się strojenie przyrządów muzycznych, a którego wysokość oznacza się za pomocą widełek strojowych. Jednakże nie wszędzie ton  $a^1$  (widełek strojowych) ma jednakową liczbę drgań; w ciągu czasu, jako też i w rozmaitych miejscowościach wysokość tego tonu była różnaitą. We Francyi postanowiono (1859), ażeby liczba drgań kamertonu  $a^1$  w orkiestrach cesarskich wynosiła 435. Liczbę 440 drgań dla  $a^1$  zaproponował już *Scheibler* w r. 1834 na zjeździe przyrodników w Stutgardzie, która to liczba wielokrotnie została wprowadzoną przy strojeniu przyrządów akustycznych; jednakże jeszcze dziś często napotykamy w tych przyrządach nastrój, w którym ton  $c$  wykonywa liczbę drgań, która jest całą potęgą 2, w których zatem  $c^{-3}=16$  i  $c^1=256$ . Jeśli zaś  $a^1=440$ , to naturalnie czyste  $c^1=440:5/3=264$  i  $c^{-3}=264:2^4=16,5$ . Jeśli zatem  $a^1=435$ , to  $c^1=435:5/3=261$ ,  $c^0=261/2=130,5$ ,  $c^{-1}=65,25$ ,  $c^{-2}=32,6$ ,  $c^{-3}=16,3$ ; podobnie  $c^2=261 \times 2=522$ ,  $c^3=1044$ ,  $c^4=2088$ . Mnożąc przez znane stosunki naturalnie-czystych przestanków, otrzymamy dla gamy  $c$ -dur według francuzkiego nastroju następującą tablicę:

Naturalnie-czysty nastrój.

Nuty	Subkontraoktawa	Kontraoktawa	Wielkaoktawa	Małaoktawa	Raz przekreślonaoktawa	Dwa razy przekreślonaoktawa	Trzy razy przekreślonaoktawa	Cztery razy przekreślonaoktawa
	$c^{-3}-h^{-3}$	$c^{-2}-h^{-2}$	$c^{-1}-h^{-1}$	$c^0-h^0$	$c^1-h^1$	$c^2-h^2$	$c^3-h^3$	$c^4-h^4$
c	16,31	32,62	65,25	130,5	261	522	1044	2088
d	18,35	36,7	73,4	146,8	293,6	587	1174	2349
e	20,4	40,78	81,56	163	326	652,5	1305	2610
f	21,7	43,5	87	174	348	696	1392	2784
g	24,4	48,9	97,9	195,7	391,5	783	1566	3132
a	27,2	54,4	108,7	217,5	435	870	1740	3480
h	30,6	61,2	122,5	245	489	979	1957	3915

Dzielać liczbę 435 przez liczbę temperowanej sexty 1,68179, otrzymamy dla temperowanego  $c^4=258,65$  drgań; mnożąc przez liczby podane powyżej dla temperowanych przestanków, otrzymamy następującą tablicę dla gamy c-dur:

Nastroj temperowany.

	—3	—2	—1	0	1	2	3	4
c	16,16	32,33	64,66	129,32	258,65	517,3	1034,6	2069,2
d	18,15	36,29	72,58	145,16	290,32	580,65	1161,3	2322,6
e	20,37	40,73	81,47	162,94	325,88	651,76	1303,5	2607
f	21,58	43,16	86,32	172,63	345,26	690,52	1381	2762
g	24,22	48,44	96,88	193,77	387,54	775,1	1550	3100
a	27,2	54,4	108,7	217,5	435	870	1740	3480
h	30,5	61	122,1	244,2	488,2	976,4	1953	3906

245. *Zadania.* 321. Syrena o 12 otworach wykonywa 2200 obrotów na minutę, obliczyć ton jaki daje? Rozw.  $a^4=440$ .
322. Jakie są długości fal najniższego (według Helmholtza 40) i najwyższego tonu muzycznego? Rozw.  $8,325^m$  i  $66,6^{mm}$ .
323. Jaka jest długość fali najniższego tonu głosu basowego  $c^1=64$ ?—Rozw.  $5,2^m$ .
324. Jaki jest czas drgania tonu chrabąszcza, jeśli długość fali tego tonu wynosi  $5^{mm}$ ? Rozw.  $\frac{1}{66600}$  sek.
325. Jakie są wyższe tony harmoniczne najniższego tonu muzycznego?—Rozw. 80, 120, 160 200 240 . . . drgań.
326. Jaki jest 20 harmoniczny ton górny najniższego tonu basowego?—Rozw.  $e^2=640$  drgań.
327. Który ton górny jest  $e^4$ ? Rozw. 40-ty.
328. Którym on jest ton górny odnośnie do najwyższego tonu basowego  $e^4$ ? Rozw. 8-my.
329. Które tony są 7-my,  $9^4$  i  $10^4$  tony górne względem  $e^4$ ? Rozw.  $d^4$ ,  $fis^4$ ,  $gis^4$ .
330. Jak te tony działają na siebie? Rozw. Dają silny dysonans.
331. Nazwij 11 tonów górnych tonu  $g^0$ ? Rozw.  $g^1$ ,  $d^2$ ,  $g^2$ ,  $h^2$ ,  $d^3$ ,  $f^3$ ,  $g^3$ ,  $a^3$ ,  $h^3$ ,  $cis^4$ ,  $d^4$ .
332. Nazwij 11 tonów górnych tonów  $a^0$ ,  $es^0$ ,  $d^1$ ,  $as^2$ ,  $b^3$ ?
333. Jakie są liczby drgań gamy-dur tonu  $c^1=256$ ? Row.  $d^1=288$ ,  $e^1=320$ ,  $f^1=341\frac{1}{3}$ ,  $g^1=384$ ,  $a^1=426\frac{2}{3}$ ,  $h^1=480$ . (Porównaj z tablicą w paragrafie 242).
334. Porównaj liczby drgań gam-dur tonów  $a^1=435$  i  $a^1=440$  drgań.
335. Obliczyć liczby drgań tych samych gam dla nastroju temperowanego, a otrzymane wypadki porównać z wypadkami otrzymanymi w zadaniu poprzednim dla nastroju naturalnego.



336. Ile drgań wykonywa naturalna a ile temperowana sekunda tonu  $c^2 = 512$ ? Rozw. 576 i 574,7.
337. Jaka różnica zachodzi między czystą a temperowaną kwintą tonu  $g^1 = 387,54$ ? Rozw. 0,66 drgania.
338. Ułożyć tablicę dla tonów muzycznych (podob. do 242) przy nastroju naturalnym i temperowanym, biorąc za ton zasadniczy  $a^1 = 440$  i nastrój potęgowej  $c^{-3} = 16$ .
339. Ile drgań wykonywa wielki i mały cały ton, jako też wielki i mały półton tonu  $d^0 = 145,16$ ? Rozw. 163,3, 161,3, 154,8, 151,2.
340. Który ton wykonywa 60 razy tyle drgań ile ton  $c^{-2}$ , 20 razy tyle ile  $d^0$ , 24 razy tyle ile  $a^{-1}$ , 18 razy tyle ile  $c^{-2}$ , 10 razy tyle ile  $g^1$ ? Rozw.—  $h^2, fis^4, e^4, d^3, h^4$ .
341. O ile odróżnia się 6-ty ton górny tonu  $c^0 = 256$  od tonu  $b^2$ ? Rozw. 0 28 drgań.
342. Które tony wykonywają 2, 3, 4, 5, 6 razy mniej drgań aniżeli ton  $c^2$ ? Rozw.  $c^1, f^0, c^0, as^{-1}, f^{-1}$ .
343. Ile drgań wykonywa  $cis^2$  jako czysta tercja tonu  $a^4$ , jako mała sekunda tonu  $c$  i jako  $des$ ? Rozw.  $543\frac{3}{4}, 558\frac{4}{5}$  i  $550\frac{5}{16}$ .
344. Ile drgań ma  $as^4$  jako obniżenie tonu  $a^1$  o półton, jako podwyższenie tonu  $g$  o półton, jako wielka tercja tonu  $e^1$ , jako mała tercja tonu  $f^1$ , jako mała sexta tonu  $c^1$ ? Rozw.  $420\frac{5}{16}, 417,6, 407,5, 417,6, 417,6$ .
345. Ile temperowanych półtonów leży między 300 i 500 drganiami?— Rozw.  $300,1, 05946^x = 500$ ; ztąd  $x = 8,8$ .
346. Trzy oktawy z  $3 \times 12 = 36$  półtonami gamy chromatycznej  $= 4$  sextom  $= 4 \times 9 = 36$ ; czy zgadza się to z naturalnie czystymi przestankami? Odpow. Nie, gdyż 3 oktawy  $= 2^3 = 8$ , 4 sexty zaś  $= (\frac{5}{3})^4 = 7\frac{58}{81}$ .
347. Ile czystych kwart przypada między 500 i 3000 drgań? Rozw.—  $500(\frac{4}{3})^x = 3000$ , ztąd  $x = 6,2$ .
348. Któremu tonowi odpowiada długość fali  $1^d$ ? Rozw. Według wzoru (25)  $1 = \frac{3330}{x}$ , ztąd  $x = 3330$  drganiami  $= gis^4$ .
349. Któremu tonowi odpowiada długość fali  $1^m$ ? Rozw. Tonowi zawartemu między  $e^1$  i  $f^1$ .

## 2. Powstawanie głosu.

**Podział źródeł głosu.** Źródłem tonów są takie ciała sprężyste, **244.** które łatwo wprawić można w drgania; ponieważ ciecze pod wpływem siły ciągnącej rozpryskują się, a pod wpływem siły ugniatającej doznają tylko bardzo małych zmian, to ich jako źródeł głosu nie używamy, chociaż za pomocą sztucznych przyrządów możemy je doprowadzić do dźwięczenia. Do wywoływania zatem tonów posługujemy się tylko ciałami stałymi i lotnymi, i to takimi, w których jeden lub dwa wymiary są bardzo małe, jakimi np. są słupy powietrza, sztaby, druty, blaszki, gdyż takie ciała łatwo

mogą być wprowadzone w drganie jako całości. Ciała stałe, stosownie czy w nich przeważa jeden lub dwa wymiary, można jeszcze podzielić na liniowe i powierzchniowe; liniowe rozpadają się na giętkie albo struny, i na sztywne czyli sztaby; podobnie i powierzchniowe dzielą się na giętkie czyli błony i na stałe czyli krążki. Drgania tych ciał mogą być podłużne, poprzeczne, a niekiedy nawet i obrotowe. Drgania poprzeczne powstają wtedy, gdy ciało sprężyste uderzamy lub pociągamy w kierunku prostopadłym do głównego jego wymiaru, przez to bowiem wyprowadzamy je z położenia równowagi, do którego następnie wracając, odbywają drgania poprzeczne. Drgania podłużne powstają wtedy, gdy ciało sprężyste pociągamy lub uderzamy w kierunku głównego jego wymiaru. Drgania obrotowe powstają wskutek tarcia obrotowego. Każdy ruch drgający wywołany w jakimkolwiek punkcie ciała sprężystego rozchodzi się po całym ciełe, odbija się o jego powierzchnię, a przecinając się z pierwotnymi drganiami, daje początek falam stojącym.— Dźwięki zatem zostają wywołane przez stojące drgania ciał sprężystych.

245.

**Drgania poprzeczne strun** (Mersenne 1630, Euler 1748). Ażeby struna mogła drgać, musi być napięta; dla napięcia struny jeden jej koniec stale się przytwierdza, a drugi nawija się za pomocą kregu, albo też napięcie uskuteczniamy zawieszając ciężary na jej końcach. W ostatnim przypadku wielkość ciężarów (według pewnika 5) daje nam zarazem wielkość napięcia. Najważniejsze zadanie odnoszące się do drgań strun jest wyznaczenie związku zachodzącego między czasem drgania lub liczbą drgań, wymiarami strun i ich naprężeniem. Pod tym względem znamy następujące prawo: *Liczba drgań strun jest odwrotnie proporcjonalną do ich długości i grubości, i pierwiastku kwadratowego z ich ciężaru właściwego, wprost zaś proporcjonalną do pierwiastku kwadratowego z naprężenia.*

**Dowodzenie.** Jeśli struna drga jako całość, jako jedna stojąca fala, to może być uważaną jako wynik fali postępowej o podwójnej długości  $2l$ , a zatem według wzoru (29), który daje dla czasu  $T$  wyrażenie  $T = 2l\sqrt{\frac{d}{e}}$ , w której zamiast  $e$  należy podstawić napięcie struny  $p$ , a zamiast  $d$  — masę jednostki jej długości, którą obliczyć można z długości  $l$ , przecięcia poprzecznego  $q$  i ciężaru gatunkowego  $s$ . Ciężar bowiem całej struny  $= lgs$ , ciężar jednostki długości  $= gs$ , zatem jej masa  $d = \frac{qs}{g}$ . Podstawiając te wartości we wzorze dającym  $T$ , i pamiętając, że  $n = \frac{1}{T}$ , otrzymamy

$$T = 2l\sqrt{\frac{qs}{pg}} \quad \text{i} \quad n = \sqrt{\frac{pg}{qs}} \dots \dots \dots (33)$$

Wzór ten wyraża wyżej podane prawo, gdyż pierwiastek kwadratowy z przecięcia jest proporcjonalny do grubości (na zasadzie, że prom. kół są propor. do pierwiastków kwadrat. z ich pow.).

**Sprawdzenie.** Najlepiej prawo powyższe sprawdzić można za pomocą przyrządu nazwanego *monochordem*. Składa się on ze skrzynki zrobionej z drzewa suchego, na której nawinięta jest jedna lub więcej strun, a którą za pomocą przesuwalnych podstawek przedłużać i skracać można. Na skali umieszczonej na skrzynce pod struną odczytać można długość struny. Skracając strunę tak ażeby ona miała długość 2, 3, 4, 5 . . . razy mniejszą aniżeli poprzednio, otrzymamy oktawę, kwintę oktawy, podwójną oktawę, tercję podwójnej oktawy i t. d., jednym słowem harmoniczne tony górne, które, jak wiadomo, wykonywają 2, 3, 4, 5 . . . razy więcej drgań, aniżeli ton zasadniczy. Zakładając strunę 2 lub 3 razy grubszą lecz z tego samego materiału i obciążając ją temi samemi ciężarami, otrzymamy niższą oktawę lub tercję niższej podwójnej oktawy. Porównywając strunę stalową ze struną kisiwkową równej z nią grubości, długości i jednakowo napiętą, przekonamy się, że pierwsza w tym samym czasie wykonywa mniej drgań niż druga, i że liczby drgań są proporcjonalne do pierwiastku kwadratowego z ciężaru właściwego.

Wszystkie te stosunki znajdują zastosowanie w muzyce. W skrzypcach ( $g^0, d^1, a^1, e^2$ ), w altówce (viola) ( $c^0, g^0, d^1, a^1$ ), w wiolonczelli ( $c^{-1}, g^{-1}, d^0, a^0$ ), w kontrabasie ( $c^{-2}, a^{-2}, d^{-1}, g^{-1}$ ), w gitarze ( $g^{-1}, a^{-1}, d^0, g^0, h^0, e^1$ ), w cytrze, harfie, lutni, brzękadle (Hackbrett) i fortepianie, struny dla tonów wyższych stają się krótkimi, cienkimi i lekkimi, dla niskich zaś—dłuższymi, grubszymi, a oprzędzając je drutem stalowym robimy je cięższymi; przez silne napięcie strun tony przez nie wydawane stają się wyższymi. Ostatnie z wymienionych wyżej przyrządów mają dla każdego tonu jedną lub więcej strun; w pierwszych zaś mających małą tylko liczbę strun, podwyższamy ton, przyciskając struny do deski, do której są przytwierdzone, przez co skracamy ich części drgające.

Wyprowadziwszy prawo o długości strun, możemy za pomocą niego dowieść prawdziwości liczb wyrażających stosunki liczby drgań przestanków, uczyniwszy na monochordzie, przez przesuwanie podstawki, struny  $\frac{9}{8}, \frac{5}{4}, \frac{4}{3}, \frac{3}{2}, \frac{5}{3}, \frac{15}{8}, 2$  razy krótsze, otrzymujemy tony diatonicznej, rozumie się czystej gamy; podobnież możemy usłyszeć wielki cały ton  $\frac{40}{9}$ , półtony  $\frac{16}{15}$  i  $\frac{25}{24}$ , małą tercję  $\frac{6}{5}$ , małą sextę  $\frac{8}{5}$  i wiele innych przestanków.

Struna przy drganiu może się też rozdzielić na 2, 3, 5 . . . części, to jest może przedstawić 1, 2, 3 . . . węzłów. Ma to miejsce wtedy, gdy wprawimy w ruch drgający  $\frac{1}{2}, \frac{1}{3}, \frac{1}{4}$  . . . część tej struny, gdyż wtedy wywołujemy fale postępujące, których długość równa się  $\frac{2}{2}, \frac{2}{3}, \frac{2}{4}$  . . . długości struny i te fale przecinając się z falami odbitemi (227), dają początek falom stojącym, których długość równa się  $\frac{1}{2}, \frac{1}{3}, \frac{1}{4}$  . . . długości fali; tworzą się zatem na strunie 2, 3, 4, . . . fale stojące, z których dwie obok siebie będące są w fazach przeciwnych. Ponieważ te fale 2, 3, 4, . . . razy są krótsze aniżeli fale stojące całej struny, to one muszą dawać 2, 3, 4, . . . razy więcej drgań na sekundę czyli oktawę, kwintę oktawową, podwójną oktawę i t. d., jednym słowem harmoniczne tony górne. 246.

I te zjawiska łatwo sprawdzić na monochordzie. Przytwardza się podstawkę od  $\frac{1}{2}$ ,  $\frac{1}{3}$ ,  $\frac{1}{4}$ , . . . długości struny i uderza się jedną taką część, słyszemy wtedy tony górne harmoniczne; że przy tem i inne części struny drgają, łatwo się przekonać za pomocą koników papierowych lub z cienkiego drutu. — Utwierdziwszy np. podstawkę pod  $\frac{1}{5}$  struny, przekonamy się, że przy uderzeniu jednej części struny koniki pozostają nieruchome w odległościach  $\frac{2}{5}$ ,  $\frac{3}{5}$ ,  $\frac{4}{5}$ , . . . w przedziałkach zaś między temi punktami zawartych odskakują. Daleko jednak więcej pouczającym jest doświadczenie, w którym podstawkę zupełnie pomijamy; a jeden z punktów struny dotykamy zlekką palcem, chorągiewką od pióra lub pędzelkiem, wtedy bowiem tony górne są daleko miększe jakby metaliczne, dla którego to powodu tony takie nazywają się flazeoletowymi.

Bardzo piękne zjawiska te można wywołać na aparacie *Meldego*, który również może być zastosowany do sprawdzenia prawa głównego i wzoru (33). Jak wiadomo, nitka tego przyrządu wtedy tylko drga jako całość, jeśli ona wskutek swej długości, grubości, natężenia i gęstości tyle drgań wykonywa co i widełki (albo połowę tej liczby, jeśli widełki drgają w kierunku długości nitki). Znając liczbę drgań widełek, jak również grubość, napięcie i ciężar nitki, możemy obliczyć jej długość; jeżeli nadamy nitce przez przesuwanie podstawki obliczoną długość, to wykonywa ona regularne drgania na dół i ku górze, przy nieodpowiedniej zaś długości, struna drży tylko. Tym sposobem sprawdziliśmy wzór (33), a tem samem i główne twierdzenie; choć można też każdej z jego czterech części oddzielnie dowieść. W trzech widełkach, których liczby drgań mają się w stosunku 1 : 2 : 3, długości nitek muszą być w stosunku 3 : 2 : 1. Jeśli jedna para widełek strojowych wykonywa dwa razy tyle drgań, co druga, to przy jednej i tej samej długości nitek, należy w drugiej parze przyczepić cztery nitki, jeśli w pierwszej napięta jest jedna nitka; tym sposobem sprawdza się prawo odnośnie do wpływu pierwiastku kwadratowego z przecięcia poprzecznego. Jeśli zaś do powolniej drgających widełek przyczepimy jedną tylko nitkę, to dla nitki szybciej drgających widełek należy zawiesić cztery razy większy ciężar, aniżeli do nitki wolniej drgających widełek, tym sposobem ujawnia się wpływ napięcia nitki. Przyczepiając do tych samych widełek druty różnych metali, przekonamy się, że przy tej samej długości i grubości zawiesić się mające ciężary muszą być w stosunku ciężarów właściwych drutów i nici. Jeśli w nitce drgającej jako całość zmniejszymy naprężające ciężary 4, 9, 16 . . . razy, to nitka ta wtedy tylko może dalej drgać jako całość, jeśli długość jej zmniejszymy 2, 3, 4 . . . razy, gdyż wtedy wpływ długości znosi wpływ zmniejszonego napięcia; jeżeli zaś nie zmieniamy długości nitki, wtedy rozdziela się ona na 2, 3, 4 . . . oddzielnie drgających części z 1, 2, 3 . . . węzłami. Szczególniej pięknie zjawisko to się przedstawia, gdy zamiast nitki użyjemy według metody *Younga* płaskiego wypolerowanego drutu srebrnego i takowy oświetlimy światłem elektrycznym, albo też jeśli, jak to zrobił *Tyndall*, użyjemy rozpalonego przez strumień elektryczny drutu platynowego.

Uwidocznili się później, że struna (jak również i inne wzbudzacze dźwięków) nigdy wyłącznie jako całość nie drga, lecz że jednocześnie rozdziela się na równe części współbrzmiące, że zatem zasadniczy ton nigdy sam nie występuje, lecz zawsze z domieszką tonów górnych, których jednakże z powodu słabego natężenia zwyczajne ucho nie rozróżnia.

**Drgania poprzeczne sztab** (Daniel Bernouilli 1753, Chladni 1796).— 247.

Sztaby drgają, nie będąc ani naprężone ani obciążone, a li tylko wskutek swej sprężystości; do tego potrzebują tylko stałej podstawy. Drgania te skuteczniają się na zasadzie następujących praw: *liczba drgań sztaby jest niezależną od jej szerokości, lecz jest wprost proporcjonalną do grubości i pierwiastku kwadratowego z modułu sprężystości; odwrotnie zaś proporcjonalną do kwadratu z długości i pierwiastku kwadratowego z ciężaru właściwego.*

**Dowodzenie.** Długość, szerokość i grubość oznaczamy kolejno przez  $l$ ,  $b$  i  $h$ , moduł sprężystości przez  $e$ , siłę zaś uginającą sztabę przez  $p$ ; według 67 wielkość gięcia  $= \frac{pl^3}{ebh^3}$ , jeśli więc gięcie  $= 1$ , to siła do tego potrzebna  $p = \frac{ebh^3}{l^3}$ . Siła ta działa na całą masę  $m = \frac{bhls}{g}$  sztaby, zatem siła działająca na jednostkę masy daną będzie wzorem  $k = \frac{ebh^3}{l^3} : \frac{bhls}{g} = \frac{geh^2}{l^4s}$ . Podstawiając tę wartość we wzorze (27) wyrażającym czas drgania  $T = \frac{2\pi}{\sqrt{k}}$ , a następnie obliczając liczbę drgań z wzoru  $n = \frac{1}{T}$ , otrzymamy

$$T = C \cdot \frac{l^2}{h} \sqrt{\frac{s}{eg}} \quad \text{i} \quad n = A \cdot \frac{h}{l^2} \sqrt{\frac{eg}{s}} \quad \dots \quad (34)$$

Wzory te dowodzące nam prawa drgań sztab zawierają współczynniki stałe  $C$  i  $A$  zależne od wielkości  $2\pi$  i które otrzymują różne wartości stosownie do sposobu przytwierdzenia sztab. Tak np. dla sztaby walcowej w jednym końcu przytwierdzonej  $A=0,28$ ; jeśli jest przymocowaną obu końcami lub gdy oba jej końce są wolne  $A=1,78$ ; jeśli jeden koniec spoczywa na podstawce  $A=1,23$ ; jeśli oba końce spoczywają na podstawkach  $A=0,785$ . Ztąd wypada, że jedna i ta sama sztaba stosownie do sposobu jej przytwierdzenia daje najrozmaitszą liczbę drgań a tem samem i najrozmaitsze tony.

Ponieważ liczba drgań w tym przypadku maleje w stosunku kwadratów do długości, to wysokość wydawanych przez sztaby tonów znacznie się zmniejsza, gdy długość sztaby o małą tylko długość się powiększy. Przyrządy jak np. tabakierki grające i cymbałki słomiane, w których tony zostają wywołane za pomocą prętów, mogą być krótsze w stosunku do instrumentów strunowych. Sztaby drgają nie tylko jako całość lecz jeszcze częściami rozdzielonemi węzłami, które jednak części nie są równe. Tylko w przypadku, gdy sztaba opiera się obu swemi końcami, jej części drgające są sobie równe; dla tego też liczby drgań takiej sztaby mają się w stosunku  $1:4:9:16 \dots$  jeśli drga z  $1, 2, 3, 4, \dots$  węzłami. Dla pierwszego sposobu przytwierdzenia przeciwnie, część końcowa swobodnie z węzłami drgającej sztaby jest mniejsza od części zewnętrznych, które również i między sobą nie są równe; liczby drgań takiej sztaby drgającej z  $0, 1, 2, 3, \dots$  węzłami mają się w przybliżeniu w stosunku  $1:9:25:49:81: \dots$ . Kształty drgania takiej sztaby są bardzo rozliczne i można je łatwo obserwować

na kaleidofonie *Wheatstone'a* (1827), w którym drgająca sztaba opatrzona jest na końcu posrebrzoną kulą, na którą rzucamy jasne światło. Na takiej swobodnie drgającej sztabie np. na drucie do robienia pończoch możemy prawo długości wzrokiem sprawdzić, jeśli np. sztaba przy pewnej długości wykonywa 1 drganie w sekundę, to przy długości 2, 3, 4, . . . mniejszej wykonywa 4, 9, 16, . . . razy więcej drgań; zmniejszając ją jeszcze bardziej, liczbę drgań powstających przytem tonów możemy łatwo obliczyć (za pomocą sposobu Chladniego 1787).—Sztaby o jednym wolnym końcu znajdują zastosowanie w piszczałkach języczkowych, w tabakierce drgającej i t. p. Jeśli sztaba ma oba swe końce wolne lub oba przytwierdzone, to ona drga z 2, 3, 4, . . . węzłami, a liczby jej drgań mają się do siebie w stosunku 9 : 25 : 49 : . . . dają zatem tony nieharmoniczne; w pierwszym przypadku dwa węzły są oddalone od obu końców na mniej niż na  $\frac{1}{4}$  długości sztaby. Z tego to powodu w cymbałce słomkowej, w instrumencie drewnianym, w cymbałce o pręcikach szklanych i w metalofonie, sztaby drewniane, szklane lub metalowe temi mianowicie punktami kładą się na wiążkach słomy, przywiązują się do sznurków lub w ogóle opierają się na miękkich podstawkach. Węzły takich sztab możemy uczynić widocznymi, posypując sztaby piaskiem, ten bowiem przy drganiu sztab stacza się z gwałtownie poruszanych brzuszków ku węzłom i tam się zatrzymuje. Jeśli sztabę mającą oba końce wolne zegniemy, to oba jej węzły coraz bardziej do siebie się zbliżają; jeśli zegniemy ją w kształcie widełek, to węzły przypadną bardzo blisko obu kolanek. Oba zęby widełek drgają więc jednocześnie ku wnętrzu wtedy, gdy zgięcie drga ku dołowi i naodwrot. Zresztą i widełki strojowe drgają z więcej niż z 2-ma węzłami; najniższy z powstających przy tem tonów wykonywa jeszcze 5—6 razy więcej drgań niż ton właściwy widełek; liczby drgań tonów górnych mają się do tego tonu w stosunku 9 : 25 : 49 : 81 : . . . , tak że wysokość tych tonów szybko wzrasta. Ponieważ jednak te górne tony prędko przebrzmiewają, to widełki strojowe przy dłuższem dźwięczeniu wydają tylko swój ton zasadniczy (Chladni 1802).

**248. Drgania poprzeczne płyt i błon, figury Chladniego (1787).** Płyty wprawiają się w drganie, przymocowując je w jakimkolwiek miejscu ich powierzchni i pociągając smyczkiem brzeg.

W tym przypadku nigdy nie drgają jako całość lecz jako części odgraniczone miejscami w spoczynku będącemi i nazwanemi *linijami węzłowych*, i które to części znajdują się w przeciwnych fazach. Ponieważ płyty uważać można jako połączenie sztab, to dla nich otrzymamy następujące prawo: *Liczba drgań jest wprost proporcjonalną do grubości płyt i odwrotnie proporcjonalną do kwadratu z ich średnicy*; oprócz tego liczba ta jest tem większą, im na więcej części płyta się rozdziela, czyli im więcej jest linii węzłowych. Liczba linii węzłowych zależy od sposobu przytwierdzenia płyt i od położenia miejsc przytwierdzonych względem miejsc smyczkiem pociągniętych. Ponieważ zależność ta w najrozmaitszy sposób może być modyfikowaną, to płyta drgająca może dać najrozmaitszą liczbę drgań, a tem samem i najrozmaitsze tony.—Z tych tonów przy pociąganiu smyczkiem lub uderzeniu jakiegokolwiek miej-

scą płyty odzywają się wszystkie, dla których pociągnięte miejsce nie jest węzłem; jeden ton odzywa się głośno, jako ton zasadniczy, inne zaś słabo tylko jako tony poboczne. Tony poboczne, podobnie jak i tony płyty w ogólności, są nieharmoniczne między sobą.

Ostatnią część prawa możemy sprawdzić na zasadzie figur *Chladniego*: Można przytwierdzić płytę szklaną, metalową lub drewnianą, kształtu kwadrato-

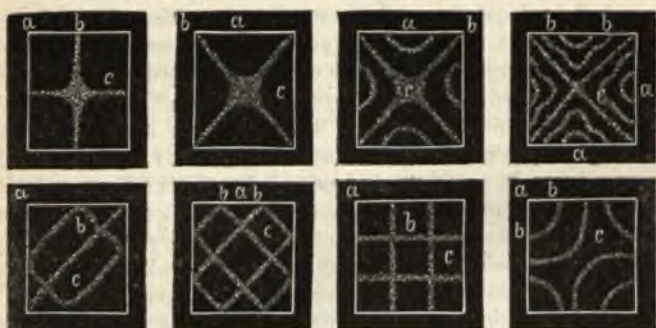


Fig. 117.

wego lub kołowego posypuje się suchym i delikatnym piaskiem; pociąga się płytę smyczkiem, dotykając się jednocześnie palcem jakiegokolwiek miejsca płyty.— Z miejsc silnie drgających (brzuszków) piasek zostaje zrzucony tocząc się po lekkiej równi pochyłej utworzonej linijami węzłów i tam się zbierając daje początek tak nazwanym figurom Chladniego. W dołączonych figurach (fig. 117) punkt dotknięcia oznaczony jest przez b, punkt pociągnięcia przez a, punkt zaś przytwierdzenia płyty przez c. Według *Strehlkiego* wszystkie figury Chladniego

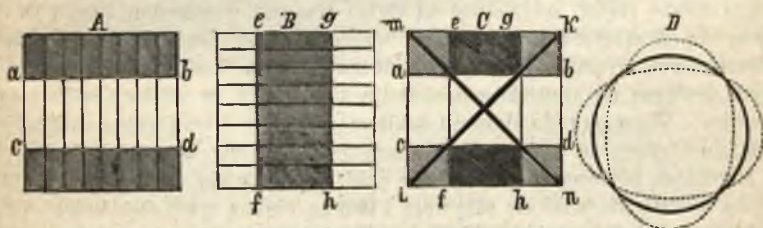


Fig. 118.

składają się z linii krzywych przeważnie hyperbol; jeden ton stosownie do miejsca przytwierdzenia płyty może dać najrozmaitsze figury; różnym zatem tonom nigdy nie odpowiadają równe figury, lecz figury te są tem bardziej skomplikowane im wyższy jest ton.

Powstawanie figur Chladniego Wheatstone (1833) objaśnia w sposób następujący: Wyobraźmy sobie płytę A (fig. 118) składającą się z licznych równole-

głych sztab, o wolnych końcach; takie zaś sztaby drgają z węzłami oddalonymi od końców prawie na  $\frac{1}{4}$  ich długości; wszystkie te węzły razem tworzą dwie linie węzłowe ab i cd ograniczające ruchy o wprost przeciwnych fazach. Tę samą płytę można jeszcze uważać jako składającą się z wolno drgających sztab mających kierunek prostopadły do pierwszego, zatem jak na fig. B; przez to płyta otrzymuje linie węzłowe ef i gh, po obu stronach których znowu mają miejsce ruchy wprost przeciwne będące z ruchami płyty A w tej samej lub przeciwnej fazie, jak to wskazane jest na figurze jednakowem cieniowaniem. Dana płyta musi drgać tak jak A i tak jak B, gdyż nie ma powodu, dla któregoby płyta miała drgać wyłącznie jak jedna z nich. W płycie więc drgającej należy sobie wyobrazić dwa (w niektórych przypadkach nawet cztery) tony jednakowej wysokości jednocześnie istniejące (współistnienie równych drgań). Według tego w każdej drgającej płycie znajdują się wszystkie cztery linie węzłowe ab, cd, ef i gh. Tam, gdzie te linie węzłów się przecinają, a zatem (fig 118 C) punkta x, y, v i z są punktami spoczynku. W przestrzeniach acxz, bdvy, egyx i fhzv, w których spotykają się równe fazy, nie może się znajdować żaden węzeł; w przestrzeniach przeciwnie axem, bygk, dvhn, czif jakoteż xyvz, w których spotykają się fazy wprost przeciwne, mogą się przytrafić punkty w spoczynku będące; a te miejsca w spoczynku będące muszą przechodzić przez punkty spoczynku x, y, z, v; a zatem przekątnie mn i ik muszą być linijami węzłów. Ten sposób tłumaczenia powstawania figur Chladniego uogólniony przez *Wheatstone'a* do wielu przypadków był wprawdzie uważany jako wątpliwy, nowsze jednak badania *Königa* w Paryżu (1862) stwierdzają go w zupełności.

Jeśli do piasku dodamy nasiona lycopodium, to w punktach największego ruchu tworzą się wirujące obłoczki pyłowe, *figury pyłowe Savarta* (1829); pochodzą one ztąd, że w nich powietrze zostaje odepchniętem, a zatem w nich tworzą się próżnie, do których powietrze z węzłów spływa, unosząc ze sobą lekkie cząsteczki kurzu (Faraday 1831).

Dzwony, które uważać należy jako zakrzywione płyty, także nigdy nie drgają jako jedna całość, lecz, gdy wydawają swój ton zasadniczy, rozdzielają się na cztery równe części, oddzielone od siebie linijami węzłowymi (fig. 118 D).—Linije te idą od czterech diametralnie naprzeciw siebie leżących punktów brzegu ku wierzchołkowi i można je uczynić widocznymi za pomocą czterech kulek dotykających dzwonu; od brzuszków odskakują one żywiej, w węzłach spokojniej się zachowują. Wlewając do dzwonu szklanego wodę i pocierając brzegi smyczkiem, zobaczymy, że woda w brzuszkach przybiera wirujący ruch, który powoli się zmniejsza, postępując ku węzłom; jeśli zamiast wody użyjemy alkoholu lub eteru, to kuliste kropelki się odrywają i tworzą piękną gwiazdę, której promienie skierowane są ku węzłom. Dzwony drgając mogą się też rozdzielić na 6, 8, 10, 12 części i dają wtedy tony, które do tonu zasadniczego mają się w stosunku 4 : 9 : 16 : 25 : 36. Ton zasadniczy dzwonu jest tem wyższy, im mniejsza jest powierzchnia dzwonu, a im większa jego grubość. Dzwony oprócz do dzwonienia i wybijania godzin znajdują jeszcze zastosowanie w cymbałach zegarowych (kuranty) i w harmonice szklanej (wynalezionej przez Franklina 1763 r.); składa się ona z pewnej liczby dzwonów szklanych osadzonych na wspólnym wale, obracających się wraz z nim i wydawających miękkie i czyste tony przy naciskaniu zwilżonym palcem. Płaskie płyty znajdują podobne zastosowanie w miednicy, w przy-



działanie jego polega na prawach współdrżania. Ludzki organ słuchu składa się z ucha zewnętrznego, środkowego i wewnętrznego. Ucho zewnętrzne zbiera i przeprowadza drgania dźwięku za pośrednictwem licznych zwojów muszli słuchowej, przedstawiającej znaczną powierzchnię, w przewod słuchowy czyli w kanał kości skroniowej, długi na 1". Przewód słuchowy jest z tyłu zamknięty bębenkiem słuchowym, od którego zaczyna się ucho średnie albo jama kotłowa, łącząca się kanałem Eustachjusza z jamą ustną, a więc z powietrzem zewnętrznym. W jamie kotłowej znajdują się cztery kostki słuchowe i młoteczek przytwierdzony do błonki bębenkowej; do nich przyłącza się kowadełko, łączące się stawowo ze strzemionkiem, za pomocą kosteczki kształtu soczewki. Drgania powietrza udzielone za pośrednictwem błonki bębenkowej tym kosteczkom, nabierają, według praw rezonansu, większej siły; utrata błonki bębenkowej i kosteczek nie sprowadza głuchoty, lecz osłabienie słuchu. Jama bębenkowa jest oddzielona od ucha wewnętrznego, tak zwanego labiryntu, tworzącego wydrążenie w kości skalistej, ścianką kostną, która łączy się z jamą kotłową za pomocą dwóch pokrytych błonami otworów czyli okienek: okrągłego i owalnego. Strzemionko, łączące się z okienkiem owalnym, udziela drgań głosowych jemu i wodzie, wypełniającej cały labirynt i mogącej poruszać się naprzód i w tył, gdyż okienko okrągłe, zakończające labirynt, może usuwać się. Labirynt składa się z przedworza, trzech przewodów łukowych i ślimaka; w dwóch pierwszych częściach pływa takież formy lecz mniejszych wymiarów labirynt błonowy, również wypełniony wodą; przedworze błonowe rozdziela się na dwa woreczki, okrągły i owalny, a błonowe przewody łukowe przedstawiają na swych początkach pewne nabrzmienia, zwane ampułkami. Ślimak rozpada się na dwie części, oddzielone od siebie wewnątrz kanału przez całą jego długość: na schodki przedworne i na schodki kotłowe, z których pierwsze zaczynają się przy przedworzu, a drugie kończą się przy okienku okrągłym. Ściana przedziałowa schodków w jednej połowie szerokości jest kościstym kopytkiem, a w drugiej, zewnętrznej połowie szerokości — błoną. Nerw słuchowy idący od mózgu rozchodzi się w labiryncie licznymi ramionami, których gałęzie wnikają w ampułki i w woreczki; włókna pierwszej gałęzi wchodzi w błonę ampułek i rozchodzą się na wewnętrznej jej powierzchni między korzeniami twardych, sprężystych włosów (Max Schultze), których liczby drgań łatwo wskutek tego podrażniać mogą końce nerwów. Włókna gałęzi woreczkowej, rozdzielające się również na wewnętrznej powierzchni błony woreczkowej, są pokryte w części delikatnie osadzonemi kamiuszczkami słuchowymi czyli *otolitami*; gdy ostatnie, z powodu swej masy, zdają się być przeznaczonemi do przesyłania najlżejszych i najdelikatniejszych szmerów, to włoski Schultze'go

wydają się właściwymi pośrednikami odczuwań silniejszych i trwalszych rodzajów brzmień. Do odczuwania tonów służy, według Helmholtz'a, organ Corti'ego; znajduje się on w ścianie przedziałowej ślimaka. Ta błona bowiem jest podwójna i zajmuje dosyć znaczną stosunkowo przestrzeń, tak zwane schodki środkowe; w nich to wznoszą się ze środka dolnej błony włókna ukośne różnej długości, których liczba, według Kölliker'a, wynosi około 3000, i których górne końce są pochylone wolnemi małemi kawałeczkami z płatkami zniżającemi się i dochodzącemi aż do brzegu kopytek kostnych.— W organ Corti'ego wchodzą włókna gałęzi nerwu słuchowego, przeznaczonej dla ślimaka.

Według praw współdrżania, tego rodzaju ustroje jak organa Corti'ego wchodzą w drżania wtenczas, gdy trafiająca na też organa mieszanina tonów zawiera ton właściwy tych ustrojów, lub ton bardzo mu bliski. Gdy zatem mieszanina tonów, za pośrednictwem drgań strzemiionka, wprawia w drżania i dolną błonę ściany przedziałowej ślimaka, to z włókien Corti'ego nabierają współdrżań te tylko, których ton właściwy zawiera się w mieszaninie tonów dokładnie lub prawie dokładnie; skutkiem tego, z pomiędzy włókien słuchowego nerwu zostaną podrażnione tylko te włókna, które występują na odpowiednich łukach Corti'ego; podrażnienie to rozchodzi się w mózgu i obudza wrażenie, które nazywamy tonem i wysokością tonu. Ztąd wypada prawo, wykryte już przez G. S. Ohm'a (1840) doświadczalnie: ucho ludzkie może odczuwać tylko wachadłowe drżania powietrza, a każdy inny peryodyczny ruch powietrza rozkłada na szereg drgań wachadłowych i odczuwa odpowiadający im szereg tonów. Jeżeli tony te zaczynają się i kończą współcześnie, nie zmieniając swego natężenia, i jeżeli ich liczby drgań są w prostym do siebie stosunku, tak że nie wytwarzają uderzeń, to w przeświadczeniu naszym tego rodzaju tony zlewają się w jedną całość; szczególniej zachodzi to wtedy, gdy mieszanina tonów wychodzi z pojedynczego wzbudzacza, gdyż w tym razie przyzwyczajeni jesteśmy uważać je za ton pojedynczy; przy natężonej uwadze można jednak rozróżnić pojedyncze tony cząstkowe, gdyż uczucie tonu dozwala właśnie na taki rozkład.

**258. Tony wyższe i oboczne** (Helmholtz 1863). Przez tony oboczne rozumiemy takie tony, które wzbudzacze rozwinać może oprócz swego tonu głównego; jeżeli tony te są wyższe od zasadniczego, jak to zazwyczaj ma miejsce, to nazywają się tonami wyższymi (Obertöne). Gdy tony wyższe wykonywają 2, 3, 4 . . . razy więcej drgań niż ton główny, to przybierają nazwę tonów harmonicznych. Przy zastanawianiu się nad wzbudzaczami tonów, okazano, że oprócz swych najprostszych rodzajów drgań, któremi drgają jako całość, mogą one drgać jeszcze w pojedynczych swych częściach; te rodza-

je drgań są przyczyną tonów obocznych. Tu dodać należy, że najprostszy rodzaj drgań powstaje nader rzadko sam jeden, lecz że współcześnie z nim wywiązują się najczęściej i inne rodzaje drgań; *tony główne występują w połączeniu ze swemi tonami obocznymi.*

Przyczyna tego ważnego zjawiska leży w sposobie wzbudzania tonów, które bywa najczęściej gwałtownem. Targamy trąc, bijemy w struny, wdmuchujemy silne strumienie powietrza w spokojne jego kolumny, uderzamy w strojnik (kammer-ton), bijemy w platki, dzwonki i błony, lub pocieramy je silnie. Ponieważ różne ich części zostają temi wpływami jak najrozmaiciej dotknięte, ponieważ oprócz tego przeciwstawiają się one działaniom zewnętrznym w różny sposób, przeto muszą nabierać rozmaitych ruchów,—drgań o najrozmaitszych peryodach. Każde drgnięcie wytwarza w czasie drgnięcia całą postępującą falę; drgania o dłuższem trwaniu wzbudzają fale długie, drgania o krótkiem trwaniu dają fale krótkie. Te fale, które są w stosunku zawikłanym lub niewymiernym do wymiarów ciała, zostają zniesione przez własne fale odbite; te zaś fale, które są w stosunku prostym do wymiarów ciała, które np. posiadają długość 2, 1,  $\frac{1}{2}$ ,  $\frac{1}{3}$ ,  $\frac{1}{4}$  . . . razy wielokrotną względem długości struny, tworzą przez interferencyę z falami odbitemi, drgania stojące, t. j. tonowe. Ztąd widać, że prawdopodobieństwo powstawania mniejszych fal stojących nie jest mniejszem od prawdopodobieństwa tworzenia się większych fal tonu zasadniczego, że zatem tony wyższe najczęściej występują współcześnie z tonami zasadniczymi. Właściwości ciała i sposób wzbudzania tonów rozstrzygają o powstawaniu znacznej lub małej liczby tonów obocznych, o przewadze wyższych lub niższych co do liczby i natężenia, o współbrzmieniu tonów podłużnych i poprzecznych i t. d. Tony muzyczne nie są więc tonami pojedynczymi, nie powstają skutkiem pojedynczych wachadłowych ruchów ciała, skutkiem jednej liczby drgań, lecz przeciwnie drgania ich wielolicznie skomplikowane, zawierają bardzo różne liczby i składają się właściwie z wielu zlewających się z sobą tonów; z tej przyczyny Helmholtz zaleca nadanie tonom muzycznym nazwy „brzmień,” a przez ton rozumie teoretyczne działania pojedynczych wachadłowych drgań.

**Stwierdzenie.** Jeżeli butelka z dnem błoniastem jest nastrojona na fis<sup>1</sup>, to kulka na niej zawieszona odbiega; podobnież piasek rozsypany na dnie butelki układa się zawsze w jedną i tę samą figurę resonansową, jeżeli brzmia w bliskości tony fis<sup>1</sup>, fis<sup>0</sup>, h<sup>-1</sup>, fis<sup>-1</sup>, d<sup>-1</sup>, zkąd wypada, że ton fis<sup>1</sup> butelki jest zawarty w brzmieniu fis<sup>0</sup>, h<sup>-1</sup>, fis<sup>-1</sup>, d<sup>-1</sup>, względnie których jest on 1-ym, 2-im, 3-im, 4-ym tonem wyższym. Zawiesiwszy lekkie ciało kształtu przewróconej litery U na strunie fortepianu, ciało zostanie odrzuconem przy uderzeniu w którąkolwiek strunę, do wyższych tonów której należy ton struny pierwszej; np. c<sup>1</sup> będzie pobudzone przez c<sup>0</sup>, f<sup>-1</sup>, c<sup>-1</sup>, as<sup>-2</sup>, f<sup>-2</sup>, d<sup>-2</sup>, c<sup>-2</sup>: okazuje się ztąd, że c<sup>1</sup> zawiera się w tych wszystkich tonach; ciało zostanie w spoczynku przy potrącaniu innych strun. Tylko wtenczas gdy brzmieć będą tony wyższe względem c<sup>1</sup>, a zatem c<sup>2</sup>, g<sup>2</sup>, c<sup>3</sup>, lub tony zawierające w sobie te tony wyższe, części struny c<sup>1</sup> zostaną wprawione we współdrgania, ciało wtedy wzrusza się również i tylko wtenczas zostaje w zupełnym spoczynku, gdy jest zawieszona w węźle. Najlepiej stwierdza się prawo powyższe za pomocą szeregu rezonatorów nastrojonych na 19 pierwszych tonów wyższych tonu zasadniczego; po umieszczeniu rezonatora

w uchu, wywołane brzmienie sprawi wrażenie silnego tonu wtenczas, gdy ton resonatora należy do wyższych tonów tego brzmienia; w przeciwnym razie nie zmienia się szmer resonatora pochodzący od wrzawy dziennej; resonator wyda  $c^2$  za wzbudzeniem tonów  $c^1, f^0, c^0, as^{-1}, f^{-1}, d^{-1}, c^{-2}$ . Ucho nieuzbrojone może także słyszeć tony wyższe, przy pewnej naturalnie wprawie. Wydobywszy z fortepianu np.  $g^1$  i dozwoliwszy mu przebrzmieć, w chwili ustawiania brzmienia, uderzmy silnie  $c^0$  i zwróćmy uwagę na  $g^1$ , to usłyszymy je w  $c^0$ . Z innego instrumentu strunowego wydajmy ton flażoletowy i uderzmy w tę samą strunę w chwili jej przebrzmiewania; w tonie struny będziemy słyszeć ton flażoletowy. Jako zarzut przeciw temu, możnaby zrobić przypuszczenie, że słyszenie tych tonów jest dziełem wyobraźni, lub że tony wyższe są skutkiem wpływu tonu głównego na ucho. Zarzut ten najlepiej obala się tym mianowicie faktem, że oznaczonego tonu wyższego nie możemy ocenić słuchem ani wzrokiem, jeżeli ton ten zostanie w brzmieniu zniszczony. Osiąga się to łatwo, udzielając drgań wzbudzacze tonów w punkcie węzłowym owego tonu wyższego; gdyż według Young'a (1800), nie powstają wtedy te wszystkie tony, które mają węzeł we wzmiankowanym punkcie. Targnijmy strunę np. w jej środku, to brakować będzie wszystkich parzysto-liczbowych tonów wyższych; nie będzie też można ich słyszeć ani gołem, ani uzbrojonym uchem, ani stwierdzić ich istnienia za pomocą ciałek lekkich lub butelki. Uderzmy w strunę i dotknijmy jej w  $\frac{1}{2}$ , albo w  $\frac{1}{3}$ , albo w  $\frac{1}{4}$ ; wtedy ton jako całość umilknie, lecz odpowiednie tony wyższe brzmieć będą jako tony flażoletowe, gdyż stłumić ich nie może dotknięcie w miejscach węzłowych; gdyby te tony nie istniały, to wzmiankowane dotknięcie sprowadzałoby zupełną ciszę. Można robić także stwierdzenia odwrotne, dołączając do tonu zasadniczego, jego tony wyższe; mieszają się one z pierwszym w brzmienie będące dla ucha całością. Dmuchaając współcześnie w dwie butelki (tony butelek nie zawierają prawie wcale tonów wyższych) nastrojone na  $b^0$  i  $b^1$ , nie będzie można już rozróżnić obu tonów. Appunn w Hanau robił przyrządy dla tonów wyższych; przyrządy te mogły dawać, za pomocą języczków, 32, 64 albo 128 pierwszych tonów wyższych względem tonów głównych  $c^{-1} = 64$ ,  $c^{-2} = 32$ ,  $c^{-3} = 16$ ; pozwalając brzmieć wszystkim lub znacznej liczbie tonów wyższych razem z tonem zasadniczym, mieszanina tonów sprawi zawsze wrażenie tonu zasadniczego. Za pomocą resonatorów słyszy się wtedy bardzo wyraźnie tony częściowe i dla tego przyrząd przytoczony jest nader stosownym do wprawiania się w słyszenie za pomocą resonatorów.

**259.** **Tony kombinacyjne** (Sorge 1740, Helmholtz 1856). Przez tony kombinacyjne rozumiemy tony nowo utworzone wskutek brzmienia dwóch tonów. TONY kombinacyjne nie są zachodzącymi już w dwóch tonach, wyższymi lub obocznymi tonami, wzmacniającymi się wzajem przy brzmieniu jednoczesnym; nie dają się bowiem żadnym sposobem ocenić w obu oddzielnych tonach, choćby bardzo silnych; lecz przy współbrzmieniu ich występują wyraźnie, szczególnie wtedy, gdy dwa tony są zbliżone ku sobie odpowiednio do swych napięć, jak np. w fisharmonijce lub w wielostroikowej syrenie. TONY kombinacyjne są albo obiektywne albo tylko subiektywne, t. j. mają w pierwszym razie samodzielną egzystencję zewnątrz ucha, a w drugim razie powstają

dopiero w uchu; pierwsze tworzą się w tej samej przestrzeni powietrza, np. w syrenie wielostroikowej, oddziaływając odmiennie na tę samą ilość powietrza zewnętrznego; drugie zachodzą wtedy, gdy miejsca wzbudzeń obu tonów są całkiem od siebie oddzielone i niemające z sobą żadnego mechanicznego związku. Tony kombinacyjne obiektywne mogą być słyszane za pomocą resonatorów lub uwidoczniane na błonach; do subiektywnych trzeba wprawiać ucho; *liczba drgań tonów różnicowych jest równą różnicy, a liczba drgań tonów summowych jest równą summie liczb drgań obu tonów pierwotnych.*

**Stwierdzenie.** Tonomiar Appunna zawiera 32 języczki, z których każdy następujący daje o 4 więcej drgań na sekundę od poprzedniego; można już ztąd wnieść, że przy dmuchaniu w każde 2 sąsiednie tony (226) powstają 4 uderzenia. Wydając 2 tony odległe od siebie o 8 języczków, słyszymy za pomocą resonatora zawsze jeden ton różnicowy  $c^{-2} = 32$ ; ton najniższy  $c^0 = 128$  i kwinta  $g^0 = 192$ , wyżej od niego o 16 języczków położona, dają na ton różnicowy oktawę niższą  $c^{-4} = 64$ , a na ton summowy  $e^1 = 320$ ; lecz ton summowy jest o wiele słabszy od tonów różnicowych. Wydobywając z przyrządu Appunna współcześnie 2 tony, których stosunek  $= 2:3, 3:4, 4:5$  i t. d., słyszymy zawsze ton najniższy 1; tony o stosunkach 16:18 lub 18:20 . . . wydają ton różnicowy 2; tony 16:20, 20:24 . . . dają ton różnicowy 4 i t. d. Przyrząd ten pozwała także słyszeć tony summowe.

Ponieważ liczba drgań tonów różnicowych równa się liczbie uderzeń, przeto takie tony uważano dawniej za skutek uderzeń, niesłyszalnych pojedynczo, lecz z powodu swej wielkiej ilości zlewających się w jeden ton; gdy jednak uderzenia te powstają także przy summowaniu się dwóch tonów, więc tony kombinacyjne powinny być słyszalnymi nawet przy słabych tonach pierwotnych, co nie ma miejsca; według tego pojęcia ton summowy byłby niewyjaśnionym. Z tej i z innych przyczyn porzucił Helmholtz dawne tłumaczenia, a za przyczynę tonów kombinacyjnych uważa wyjątek od prawa Fourier'a; wyjątek ten zachodzi wtenczas, gdy ruchy drgające mają znaczne obszerności (amplitudy). Jak prawo równotrwaniania drgań wachadłowych służy tylko dla małych łuków, tak też prawo nakładań się ruchów drgających, wyrażające, iż każdy ruch złożony daje się rozłożyć tylko na te ruchy wachadłowe elementarne, z których powstał, ma miejsce jedynie dla drgań nieskończenie małych; gdy drgania posiadają większe obszerności, wskutek ścierania się cząsteczek drgających powstają ruchy drgające drugorzędne; liczba drgań tych ostatnich jest równa różnicy albo summie liczb drgań tonów pierwotnych. Są także tony kombinacyjne tonów wyższych; również tony kombinacyjne wyższych z pierwotnymi; te tony jednak są bardzo słabe; posiadając pewną wprawę można je rozpoznawać w przyrządzie tonów wyższych.

**Zadania.** 350. Jaki ton wydaje struna długa na  $1^m$ , gruba na  $1^{mm}$ , 260. której c. w.  $= 1$ , napięta jednym kilogramem? Rozwiąz. Według wzoru (33),  $n = 56 = a^{-2}$ .

351. Jak ta struna ma być wyjęzona, aby dała  $e^0$ ? Rozw. 9-ciu kil.

352. Jaki ona ton wydaje przy 25 kil? Rozw. cis<sup>4</sup>.

353. Co zrobić należy, aby przy tem napięciu wydała  $e^1$ ? Rozw. Podstawek w  $\frac{5}{6}$ .

354. Jakie tony otrzymuje się z obu stron, odcinając podstawkiem  $10^\circ$ ,  $20^\circ$ ,  $30^\circ$ ,  $40^\circ$ ,  $50^\circ$ ? Rozw. 2800 i 311, więc  $f^4$  i  $dis^4$ ; podobnie  $f^3$  i  $f^1$ ,  $b^2$  i  $g^1$ ,  $f^2$  i  $b^1$ ,  $cis^2$  i  $cis^2$ .

355. Gdzie trzeba przesunąć podstawek, chcąc otrzymać tony skali cis—dur? Rozw. 889, 800, 750, 667, 600, 533,  $500^{mm}$ .

356. Jeżeli struna długa na  $60^\circ$  a gruba na  $0,6^{mm}$  wydaje ton  $c^1$ , jaki ton, przy tych samych zresztą innych okolicznościach, wyda struna o  $40^\circ$  długości i  $0,8^{mm}$  grubości? Rozw.  $d^1$ .

357. Pewna struna daje  $g^1$ ; jaki ton wyda struna 3 razy cieńsza przy 4 razy mniejszem napięciu? Rozw.  $d^2$ .

358. Długości dwóch strun wynoszą 90 i  $70^\circ$ , grubości 0,8 i  $1,2^{mm}$ , napięcia 16 i 9 kil.; jak mają się do siebie liczby drgań? Rozw. 14 : 9.

359. Z 4-ch jednakich sztabek metalowych pierwsza jest długa na  $20^\circ$ , a inne na  $30^\circ$ ,  $40^\circ$ ,  $50^\circ$ ; jakie tony wydają 3 ostatnie, gdy pierwsza wytwarza  $c^4$ ? Rozw.  $b^3$ ,  $c^2$ ,  $f^1$ .

360. Ile drgań wykonywa sztabka żelazna, walcowa, umocowana w jednym końcu, długa na  $10^\circ$  a gruba  $1^\circ$ ? Rozw. Według wzoru (34),  $n = 1240$ .

361. Ileby wykonywała drgań takąż sztabka o grubości  $1^{mm}$ ? Rozwiązanie. 124.

362. Jaki ton wyda ostatnia sztabka przy  $5^\circ$  długości? Rozwiąz. 496, prawie  $h^1$ ; (doświadczenie z igliczką).

363. Jeżeli sztabka zadania 361 drga przy 0, 1, 2, 3 węzłach, jakie tony odpowiednio wydaje? Rozw.  $124 = h^{-1}$ ,  $c^3$ ,  $g^4$ ,  $fis^5$ .

364. Jaki jest zasadniczy ton podłużny sztabki zadania 360? Rozwiąz. Według wzoru (35),  $n = 11058$ .

365. Jaka jest prędkość rozchodzenia się dźwięku w tej sztabce? Rozw. Według wzoru (36),  $c = 41n = 4443^m$ .

366. Jaki ton wydaje zakryta piszczałka ustna, której długość  $= 2^m$ ?—Rozw. Według wzoru (37),  $n = 42$ .

367. Jaka wypadnie obrachowana ztąd prędkość dźwięku w powietrzu? Rozw. Według wzoru (37) lub (38),  $c = 336^m$ .

368. Jakie są tony wyższe tej piszczałki? Rozw.  $h^{-1}$ ,  $a^0$ ,  $d^1$ ,  $g^1$ ,  $c \dots$

369. Jakie tony wydają piszczałki zakryte o długościach  $5^d$ ,  $2^d$ ,  $1^d$ ?—Rozw.  $e^0$ — $f^0$ ,  $gis^1$ ,  $gis^2$ .

370. Jaka jest najmniejsza długość piszczałki zakrytej, wydającej  $c^4$ ? Rozw.  $4^\circ$ .

371. Jak długą jest piszczałka otwarta, wydająca ten sam ton? Rozwiązanie.  $8^\circ$ .

372. Jaki ton daje piszczałka otwarta, długa na  $1^m$ ? Rozwiąz. Według (39),  $n = 166$ , więc prawie  $e^0$ .

373. Jaka długość jest potrzebną dla tonu  $c^2$ ? Rozw.  $32^\circ$ .

374. Jakie są tony różnicowe, pierwszy, drugi i trzeci z  $c^1$  i  $a^1$ ; jaki jest ton summowy? Rozw.  $f^0$ ,  $f^{-1}$ ,  $f^1$   $f^2$ .

375. Znaleźć 3 pierwsze tony różnicowe dla  $h^2$  i  $c^2$ , również ton summowy. Rozw.  $b^1$ ,  $c^{-1}$ ,  $b^2$ ,  $fis^3$ .

### 3. Brzmienie (Helmholtz 1863).

#### a. Koloryt muzyczny.

**Pojęcie o kolorycie muzycznym.** Przez koloryt muzyczny rozumiemy **261.** właściwość, mocą której brzmienia różnych instrumentów, posiadające równą wysokość i siłę, różnią się od siebie. Ponieważ wysokość tonów jest zawarunkowana liczbą drgań, a siła tonów dalekością drgań, przeto mniemano już oddawna, że koloryt muzyczny zależy od kształtu drgań albo od kształtu fali, który to kształt rozpoznać można albo za pomocą naniesienia wydłużeń po obu stronach osi przedstawiającej czas drgnięcia (według 224), albo według metody Lissajous (235). Pojedyncze wachadłowe drgania dają zawsze też samą, prostą, prawidłową formę fali (fig. 107, str. 9), która zmienia się wtedy tylko, gdy ruch drgający jest złożonym. Jeżeli zatem koloryt muzyczny pochodzi z odmienności form drgań, to głębszą jego przyczyną musi być różnorodna złożoność fali brzmienia. Lecz według prawa brzmień, Ohm'a, fale złożone zostają rozłożone przez ucho na pewną liczbę wachadłowych drgań, którym odpowiada tyleż tonów prostych, mianowicie ton zasadniczy i jego oboczne, najczęściej zaś ton zasadniczy i jego harmonijne tony wyższe. Ztąd by wypadło, że koloryt zależy od sposobu mieszania się tonu zasadniczego z tonami obocznymi lub wyższymi. Poparciem tego hypotetycznego wyniku jest fakt, że według 258, istotnie największa liczba brzmień jest połączeniem tonu zasadniczego z obocznymi. Bliższe poszukiwania Helmholtz'a (1863) ustaliły niewątpliwie, że: *Koloryt muzyczny zależy tylko od liczby, wysokości i siły tonów obocznych, przymieszanych do tonu zasadniczego, i które w brzmieniach muzycznych są tonami harmonijnymi.*

Nie chcemy tu wcale mówić o szmerach, towarzyszących często powstawaniu tonów, o syczeniach instrumentów dętych, o szmerach drapiących—instrumentów strunowych, o właściwościach przemówień i przebrzmiewań, przedstawiających przy każdym brzmieniu coś charakterystycznego, używanego bezwiednie przez pospolite ucho do rozpoznania brzmienia; twierdzenie Helmholtz'a odnosi się tylko do brzmienia tonu czystego, doskonałego, oswobodzonego od wszystkich swych nieistotnych elementów obocznych. Twierdzenie to nie jest prawem, lecz ustaleniem pojęcia; zamiast więc udowadniać je matematycznie, należy je sprawdzić doświadczeniem. Należy okazać za pomocą resonatorów i innych sposobów rozkładu brzmień, że brzmienia różnych wzbudaczy tonów zawierają rozmaite liczby odmiennie wysokich i silnych tonów obocznych, również zbadać trzeba, jakie koloryty powstają przy różnych kombinacjach tonów zasadniczych z tonami obocznymi; silniejsze jeszcze poparcie otrzyma twierdzenie Helmholtz'a, jeżeli sztucznie wytworzone mieszaniny zdołają naśladować odpowiadające koloryty.

Fig. 121 pokazuje jak zmieniają się formy fali wskutek nakładania się ruchów drgających. A i B przedstawiają fale prostego, zasadniczego tonu i jego

oktawy. Rzędne trzeciej linii C są sumą lub różnicą odpowiadających im rzędnych linii A i B; sumą wtedy, gdy rzędne te leżą po jednej stronie osi poziomej, różnicą zaś, gdy te rzędne przypadają po stronach przeciwnych osi poziomej; wskutek tego powstaje zupełnie nowa forma fali, C. Łącząc takim samym sposobem falę B w położeniu D, w którym fazy są przesunięte o  $\frac{1}{4}$  długości fali, z A, tworzy się fala E całkiem różna od E. Jakkolwiek przeto części składowe fal C i E są te same, to jednak tworzą połączenia odmienne, gdyż kombinują się z sobą w różnych fazach. Ztąd wnosićby można, że różnica fal dwóch tonów wywiera wpływ na brzmienie; lecz to być nie może, gdyż ucho, według praw współdrżania, rozkłada obie formy C i E w jednaki sposób na oba elementa A i B, w obu więc razach uciwa ton zasadniczy i oktawę. Koloryt muzyczny brzmienia jest przeto niezależny od różnicy faz tonów obocznych związanych z tonem zasadniczym; twierdzenie to zostało również przez Helmholtz'a uzasadnionem doświadczalnie. Okazuje się więc, że poprzednie mniemanie, iż brzmienie zależy od formy drgań, nie sprawdza się, gdyż różne formy fal mogą należeć do tego samego brzmienia. Niezależność brzmienia od różnicy faz służy jednak tylko dla brzmień muzycznych, a nie dla szmerów.

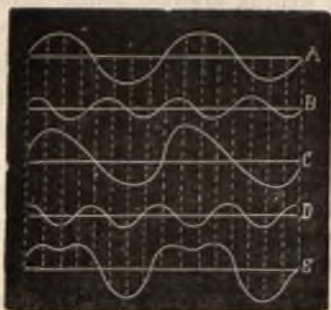


Fig. 121.

sile (według 258) z tonem zasadniczym butelki, ten ostatni staje się pełny, głośny, harmonijny jak tony zwyczajnych piszczałek organowych, fletów, fortepianu lub średnio silnego głosu ludzkiego. Gdy jednak zostaną dodane inne tony wyższe, szczególnie te, które wykonywają 7, 11, 13... razy więcej drgań niż ton główny, wtedy ucho dozna bardzo różnych, po większej części nieharmonijnych wrażeń, a ton przedstawi się ostro i ochryple. Można się o tem przekonać wyraźniej, za pomocą przyrządu tonów wyższych Appunn'a, wydając z niego na raz wszystkie 64 tony cząstkowe; w regestrach organów klawisz otwiera nie pojedynczą piszczałkę, lecz cały ich szereg dający harmonijne tony wyższe, względem tonu oznaczonego klawiszem: brzmienie tak wywołane jest przenikliwe, potężne, lecz ostre i ochryple. *Brzmienia bez tonów wyższych są miękkie i głuche, brzmienia z 5-cią pierwszemi tonami wyższymi są pełne i harmonijne, brzmienia z wielu, szczególnie dalszemi wyższymi tonami są ochryple i ostre.*

2. **Brzmienia z tonami wyższymi nieharmonijnymi.** Brzmienia poprzedzające widełek strojowych (kamertonu) i innych sztabek są związane z bardzo

### 1. Brzmienia bez tonów wyższych.

Nie ma takiego wzbudacza, któryby wydawał ton pojedynczy; brzmienia bez tonów wyższych trzeba wytwarzać sztucznie. Umieścimy uderzony kamerton nad butelką rezonansową nastrojoną na ten sam ton; tony wyższe kamertonu jako nieharmonijne względem tonu zasadniczego nie będą zgadzać się z tonami wyższymi butelki, które według 251, przemawiając z trudnością, nie zostaną wprowadzone we współbrzmienie; tylko ton zasadniczy butelki zostanie pobudzony przez kamerton; brzmieni bardzo miękkie i głuche; mieszając jednak pierwsze (około 5-u) harmonijne tony wyższe o słabej



wysokimi i nieharmonijnymi tonami obocznymi, często z tonami podłużnymi, wzbudzonemi współcześnie. Za uderzeniem w widełki ledwo że słyszemy ton zasadniczy, z powodu bardzo silnego brzmienia tych tonów wyższych; ponieważ jednak ostatnie prędko przebrzmiewają, przeto wkrótce słychać tylko sam ton zasadniczy. Tony wyższe sztab szklanych i drewnianych przebrzmiewają bardzo szybko, a z niemi i ton zasadniczy, gdyż sprężystość i masa takich sztab jest mniejsza niż sztab metalowych; dają więc one w porównaniu z metalowemi, ton bardzo krótki; *brzmienie metaliczne polega na długotrwałem górowaniu tonów wyższych*. Ponieważ ostatnie są dla sztab bardzo wysokie, przeto nieharmonijność ich mniej razi ucho. Przy oszczędnem ich użyciu, owszem nadaje w niektórych razach pewnym ustępom muzycznym cechą jasności i ożywienia; na tej zasadzie polega użycie triangułu; lecz dłuższa wyłącznie sztabkowa muzyka staje się wkrótce nieznośną. Jeszcze więcej odnosi się to do krązków, dzwonek i błon, gdyż ich nieharmonijne tony oboczne są bardzo bliskie tonu zasadniczego. Dzwonki o brzegach zwężonych dają tony więcej harmonijne; dzwonięcie, gra na dzwonekach i harmonijce szklanej są znośniejsze, lubo dłuższy ich wpływ wstrząsa nerwy.

3. **Brzmienia strun.** a. Struny targnięte lub uderzone. Ponieważ tony wyższe w tym razie powstają wskutek współdrgania wielokrotnych części struny są przeto harmonijne z tonem zasadniczym; liczba i siła tonów wyższych bywa rozmaita, stosownie do sposobu uderzenia, do miejsca uderzenia i materyalnych właściwości strun. Im ostrzejszy jest kąt, który struna przedstawia po uderzeniu jej lub targnięciu, tem fale są krótsze i szersze, tem więc silniejsze są tony wyższe, tem brzmienie jest bardziej brzęczące; struny szarpane lub potrącane sztyftem metalowym dają tony wyższe silniejsze nawet od tonu zasadniczego; nie słychać wtedy prawie tonu zasadniczego, a powstające brzmienie jest próżne i brzęczące. *Brzmienie jest próżnem wtedy, gdy tony wyższe są zbyt silne względem tonu zasadniczego*. Najpełniejszy ton powstaje przez targnięcie struny miękkim palcem; mniej pełny przy uderzaniu miękkim młoteczką, jak to ma miejsce w fortepianie; bardzo silnemi są tu szczególnie niskie tony wyższe, często silniejszymi od tonu zasadniczego, przez co ton traci na potędze, lecz zyskuje na harmonijnej pełni. Wpływ miejsca uderzenia jest ten (według Young'a), że w tonie wytworzonym nie ma tych wszystkich tonów, których węzły przypadają w miejscu uderzenia. Przy uderzaniu struny w jej środek brak wszystkich parzystych tonów wyższych, a także wszystkich oktaw tonu zasadniczego; ton jest nosowy i czczy. *Brzmienie, któremu brak tonów wyższych blizkich i spokrewnionych z tonem zasadniczym, jest czczem*. Gdy miejsce uderzenia jest blisko końca struny, wtedy powstają fale małe, wysokie tony wyższe, brzmienie jest brzęczące. W fortepianach naznacza się miejsce uderzenia prawie w  $\frac{1}{7}$  długości struny; skutkiem tego zostają stłumione tony wyższe siódmy i dziewiąty, nieharmonijne i nadające brzmieniom charakter ostry; przeważają natomiast niskie tony wyższe i oktawy, kwinty, tercje, przez co ton staje się pełnym i harmonijnym. W wyższych strunach fortepianowych tylko, w których z powodu niegiętkości strun krótkich, tony wyższe przemawiają z trudnością, miejsce uderzenia naznacza się bliżej końca struny; trudno przemawiają takie tony wyższe ze strun grubych, o tyle łatwiej ze strun metalowych cienkich; z jednej z ostatnich otrzymał Helmholtz 18-ty ton wyższy. Tony wyższe strun kiszkowych prędzej przebrzmiewają;

gitara i harfa zatem brzęczą mniej, niż cytra. b. Struny potarte dają silniejszy ton zasadniczy, gdyż wzbudzenie nie jest tak ograniczonem; pierwsze tony wyższe są słabe, 4,9,16 razy słabsze od zasadniczego; dalsze tony wyższe od szóstego do dwunastego są znacznie wyraźniejsze i powodują ostrość brzmienia strun pociętych. (Poszukiwania Helmholtz'a przy pomocy mikroskopu wibrycyjnego).

263.

**Brzmienia piszczałek.** a. *Piszczałki otwarte.* Gdy piszczałki są bardzo długie jak np. w głównych głosach organów, to wyższe tony przemawiają z trudnością; przytem tylko pierwszy ton wyższy jest silny, drugi już jest słaby: brzmienie jest mocne miękkie i pełne. Z tej samej przyczyny, wyższe fletowe rejestra organów i flety zwyczajne dają przy słabem zadęciu, tony słabe. Przeciwnie, wężkie walcowe skrzypcowe rejestra organów pozwalają łatwo brzmieć dalszym tonom wyższym, aż do szóstego włącznie; oprócz tego, przy silniejszym zadęciu, powstaje tu szmer zadęcia, tony częściowe którego przykładają się znacznie do wzmocnienia dalszych tonów wyższych; brzmienia tych rejestrów otrzymują z tej przyczyny coś skrzypcowego, ostrego. Piszczałki śpiczaste dają brzmienie jasne, próżne, dla tego, że tony wyższe, czwarty, piąty i szósty, przeważają nad innymi. b. *Piszczałki zakryte.* W piszczałkach zakrytych możliwymi są tylko, według 250., tony wyższe nieparzyste, oktaw zaś nie ma; obszernie piszczałki tego rodzaju wydają zatem prawie proste tony, tak jak butelki; w węższych brzmi najsilniej drugi ton wyższy, kwinta oktawy, wskutek czego takie piszczałki organowe noszą nazwę kwintat. Piszczałki zakryte brzmią w ogóle delikatniej i ciszej od otwartych, z powodu małej liczby tonów wyższych. W piszczałkach drewnianych dalsze tony wyższe zostają zniesione silnem tarcieniem, dla tego też takie piszczałki dźwięczą mniej jasno i delikatniej niż metalowe. c. *Piszczałki języczkowe.* W piszczałkach bez kubka brzącego, o języczkach wolnych, ton zostaje wywołany wyłącznie przez języczki, których otwieranie i zamykanie sprawia wstrząśnienia kolumny powietrza. Cząstecki powietrza wskutek tych wstrząśnień przyjmują najrozmaitsze ruchy; dla tego też tworzą się liczne tony wyższe, aż do dwudziestu i więcej; brzmienia języczkowe są ostre i grzechotliwe. Kubek brzący wywiera, według 252, najczęściej wielki wpływ na ton zasadniczy; jeszcze większym jest ten wpływ na tony wyższe, które zostają wzmocnione wtenczas, gdy odpowiadają własnym tonom wyższym języczka, w przeciwnym razie zostają prawie zupełnie stłumione. Obszerna kula rezonansowa, zgodna z zasadniczym tonem języczka, niszczy wszystkie jego tony wyższe. Oprócz tego piszczałka języczkowa, która może być uważaną jako zakryta przy języczku, daje tylko nieparzyste tony wyższe; w piszczałce języczkowej Appunn'a występują szczególnie silnie tony wyższe: dziewiąty, jedenasty i trzynasty. Dla tejszy przyczyny klarinet wydaje brzmienie trochę próżne, nosowe.

W innych instrumentach dętych, zbliżających się swem przedłużeniem stożkowym do piszczałek otwartych (252), zachodzą i parzyste tony wyższe; brzmienie takich instrumentów jest pełniejsze.

264.

**Brzmienia wokali.** Liczba tonów wyższych w głosie ludzkim, jako języzkowym, jest wielka; w silnych głosach basowych można rozpoznać, przy jasnym wokalach, szesnasty jeszcze ton wyższy; wysokie tony wyższe są silniejsze w głosach dobitnych, niż w słabych i stłumionych. Brzmienie mowy jest dobitniejsze i ostrzejsze niż śpiewu, prawdopodobnie dla tego, według Helmholtz'a,

że wiązadła językowe podczas mówienia uderzają cokolwiek o siebie, że działają zatem jako języczki uderzające. Przy wydawaniu wokali (samogłosek) jama ustna działa jako kubek brzącający, stłumia ona niektóre tony wyższe, innym zaś zostawia ich siłę, a jednemu lub dwóm z nich o zupełnie oznaczonej wysokości w układzie nut (nie w stosunku do tonu zasadniczego) udziela szczególne natężenie. Złączenie się tych dwóch tonów, o całkiem oznaczonej wysokości, z innym dowolnym tonem zasadniczym zmieszany jeszcze z innymi tonami wyższymi, słabszymi, nadaje temuż tonowi zasadniczemu brzmienie posiadające pewną właściwość, sprawiającą w uchu wrażenie samogłoski. Owe tony oznaczone zmieniają się według kolorytu wokalnego w różnych dialektach i mowach, lecz nie zależą od wieku i płci. Samogłoska U zawiera  $f^1$ , samogłoska O charakteryzuje się tonem  $b^1$ , samogłoska A — tonem  $b^2$ , który w ostrym A anglików i włochów podnosi się aż do  $d^3$ . Pozostające samogłoski zawierają dwa tony: w Ae znajdują się  $g^3$  i  $d^2$ , w E są  $b^3$  i  $f^1$ ; wysoki ton  $d^4$  i niski ton  $f^0$  tworzą brzmienie I, gdy tymczasem Ue zawiera wprawdzie ton  $f^0$ , ale także i mniej wysokie  $g^3$ , Oe zaś, podobnie do E, ma tony  $f^1$  i  $cis^3$ . W celu przymieszania tych tonów do zasadniczego, jama ustna przybiera, dla wymówienia U, kształt butelki, bez szyjki, z wązkim otworem ust; otwór ten cokolwiek się rozszerza dla O, a współcześnie ściąga się jama ustna; przy wymawianiu A otwór ust przybiera kształt lejka. Dla Ae próżna przestrzeń butelki znnowu się rozszerza i leży cała w krtani, a niędzy językiem i podniebieniem tworzy się wązka szyjka; wskutek tego powstają 2 tony, ton szyjkowy—wyższy i butelkowy—niższy; przy wymawianiu Ae szyjka jest długa, a przestrzeń próżna, wązka; przy wymawianiu zaś E i I szyjka staje się kolejno węższą, a przestrzeń próżna—obszerniejszą. Dla Oe i Ue szyjka przedłuża się aż do warg, wysoki ton wyższy przechodzi w niski. Gdy głosy ludzkie, szczególnie basowe, są natężone zbyt mocno, to zachodzą w nich tony od  $d^4$  do  $g^4$ ; ponieważ przejście słuchowe jest właśnie dostrojone do tych tonów, przeto ucho, wpływem ich dyssonansu, zostaje dotkliwie pobudzone i słyszy nieprzyjemne chrzęszczenie w krzykliwych chórach męzkich. Przyrząd samogłoskowy Helmholtz'a umożliwia doświadczalne uzasadnienie poprzedzających twierdzeń i zjawisk. Składa się on z licznych widełek strojowych, nastrojonych na pewien ton zasadniczy, jego tony wyższe i na oznaczone tony wyższe samogłosek. Widełki zostają wprawione w trwałe wachania, za pomocą dwóch biegunów elektromagnesu, strumień elektryczny którego może być według potrzeby przerywany za pośrednictwem drugiego przyrządu widełkowego; rura rezonansowa, umieszczona naprzeciw, służy do wzmocnienia drgań. Przyrząd König'a przeznaczony do tego samego celu, składa się z bardzo dobrych widełek strojowych, przytwierdzonych do rezonansowych skrzynek; widełki tego przyrządu dźwięczą bardzo długo. Chcąc wytworzyć oznaczone brzmienie lub sprawdzić jedno z przytoczonych twierdzeń, wywołuje się współcześnie ton zasadniczy i odpowiadające mu tony wyższe.

### b. Współbrzmienie.

**Interferencja dźwięku.** Gdy dwa tony rozchodzą się w tym samym kierunku i gdy ich fale zgrzeszczenia, równie jak fale rozrzedzenia padają na siebie, co ma miejsce wtenczas jeżeli tony posiadają jednakową wysokość,

i jeżeli miejsca ich wzbudzeń są od siebie oddalone o parzystą liczbę długości półfal, wtedy fale (według 226) wzmacniają się wzajem, ton staje się silniejszym. Lecz skoro zagęszczenie jednego tonu przypada zawsze na rozrzedzenie drugiego, co zachodzi wtenczas, gdy miejsca wzbudzeń tonów równej wysokości są oddalone od siebie o nieparzystą liczbę długości półfal, w takim razie tony osłabiają się, a przy równej sile znoszą się zupełnie. Przypuszczamy tu, że tony są pojedyncze; gdy z niemi łączą się tony wyższe, to w ostatnim razie brzmienie nie znika całkowicie, ginie ton zasadniczy, lecz tony wyższe pozostają; jeżeli np. odległość miejsc wzbudzeń =  $\frac{1}{2}$  długości fali tonu zasadniczego, to odległość ta = 1 długości fali oktawy, pierwszego tonu wyższego; zatem, gdy zniknie ton zasadniczy, to pierwszy ton wyższy zostanie wzmacniony; z tej to przyczyny w niektórych interferencyach, miejsce znikającego tonu zasadniczego zastępuje silna oktawa.

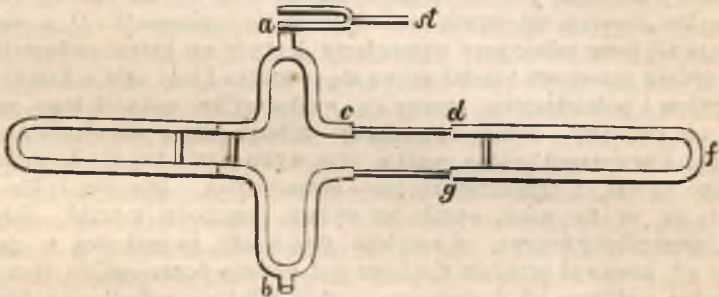


Fig. 122.

**Stwierdzenia.** Część dfg przyrządu rurkowego (fig. 122) jest wysuwalną; przy wysunięciu jej na długość  $cd = 0, \frac{1}{2}, \frac{2}{2}, \frac{3}{2} \dots$  długości fali tonu widełek  $st$ , usłyszymy w  $b$  ton wyraźniejszy. Lecz gdy  $cd = \frac{1}{4}, \frac{3}{4}, \frac{5}{4} \dots$  długości fal widełek, wtedy ton w  $b$  znika zupełnie. Trzymając rurkę kształtu widełek, której przedłużenie górne jest zamknięte błoną posypaną piaskiem, tak, aby dwa dolne jej otwory znajdowały się po obu stronach linii węzłowej, nad sąsiednią częścią krążka dzwiczącego, piasek nie skacze; lecz gdy między otworami przypadają dwie linie węzłowe, to piasek porusza się żywo. Dmuchiwanie w podwójną syrenę Helmholtz'a wtedy, gdy otwory górnego koła komunikują się z otworami koła dolnego, wywołuje wzmacnienie tonu; gdy zaś otwory jednego koła odpowiadają przedziałom drugiego, wtenczas niknie ton zasadniczy, a zjawia się oktawa. Dwie piszczałki zakryte, obok siebie umieszczone, działają na siebie tak, że powietrze wchodzi w jedną, gdy wychodzi z drugiej; tony ich zatem, jako będące w fazach odwrotnych, nie wzmacniają się, lecz wydają tylko huczenie; piszczałki otwarte wydają oktawę. Dwa zęby widełek strojowych tworzą interferencje; ton jest bardzo słaby na hiperboli przechodzącej przez 4 zewnętrzne ostrza zębów; można to zauważyć, obracając przed uchem widełki

dźwięczące; dobitniej jednak występuje ten fakt, przy obrocie dźwięczących widełek nad odpowiedniej wielkości rurką rezonansową. Przesuwając nad jednym z zębów rurkę w chwili znikania tonu, takowy da się słyszeć na nowo, gdyż wtedy interferencja jest niemożliwą; podobnież wzmacnia się ton krążka przy trzymania ręki, stłumiającej interferencją, nad zmieniającymi się wycinkami. Kundt użył przyrządu, przedstawionego na fig. 122, do widomego okazania interferencji tonów podłużnych; w oba otwory wkłada on rurki szklane, zawierające lekki pył korkowy lub coś podobnego, a zamknięte korkowymi zatyczkami. W jedną z rurek wchodzi przez zatyczkę sztabka szklana, jako drag tłoka korkowego, który może być przesuwany. Przy pocieraniu sztabki powstają znane figury falowe w rurce korkowej; tworzą się one także i w drugiej rurce, gdy  $cd = \frac{1}{2}$ ,  $\frac{1}{2}$ ,  $\frac{3}{2}$  . . . długości fali tonu; przeciwnie, pył drugiej rurki zostaje w spoczynku, gdy  $cd = \frac{1}{4}$ ,  $\frac{3}{4}$ ,  $\frac{5}{4}$  . . . długości fali.

**Kołysania** (Schejbler 1814). Jeżeli dwa tony dźwięczące współcześnie **266.** nie są jednakowo wysokie, lecz przedstawiają małą różnicę wysokości, to wzajemny ich wpływ na siebie powoduje przyrosty i ubytki siły tonu, zwane *kołysaniami*; przyrosty nazywają się uderzeniami, ubytki—pauzami, często bowiem są niesłyszalne. *Liczba kołysań jest równa różnicy liczb drgań obu tonów.*

**Dowód.** Gdy dwa tony zaczynają brzmieć współcześnie, to góra fali jednego tonu przypada z początku na górę fali tonu drugiego; podobnie zachowują się względem siebie i doliny fal; lecz ponieważ fala jednego tonu jest dłuższa od fali drugiego, przeto już po utworzeniu się drugiej fali, druga góra fali krótszej będzie przed drugą górą fali dłuższej o pewną długość; to uprzedzanie będzie przy falach następnych coraz większe, nakoniec góra fali krótszej przypadnie na dolinę dłuższej, a ton, przy równej sile obu tonów, zniknie. Następnie, podczas ciągłego rozwijania się fal, góra fali krótszej musi zawsze biedz przed doliną fali dłuższej, ubytek ruchu musi się stawać coraz mniejszym dotąd, aż góry obu fal padną znów na siebie i wywołają wzmocnienie ruchu czyli tonu. Tak zmieniają się na tem samym miejscu ubytek i przyrost tonu; zachodzi to tak często, jak często drgania w tych samych kierunkach trafiają na siebie. Gdy się to zdarzyło np. na początku sekundy, to drgania przybywające do pewnego miejsca będą coraz mniej trafiać na siebie w następnych cząsteczkach czasu; drgania te przejdą w też same kierunki po takim dopiero ułamku sekundy, w którym jeden ton wykonał o jedno drgnięcie więcej niż drugi; w pośrednich chwilach czasu między temi zejściami, drgania, jako przeciwne względem siebie, znoszą się. Prawo więc jest dowiedzione.

**Stwierdzenia.** Tonomiar Appunn'a ma 30 języczków, z których każdy następujący wykonywa o 4 drgania więcej, niż poprzedzający; przy dmuchaniu na każde 2 sąsiednie języczki, powstają 4 uderzenia, a 8, 12, 16 . . . wtenczas, gdy między języczkami brzmiącemi znajdują się 1, 2, 3 . . . spokojne. W pauzach jednak nie ma spoczynku. Pauzy milczące otrzymać można z dwóch widełek, zupełnie sobie równych, z których jedno są oblepione woskiem, albo z 2-ch równych sobie zakrytych piszczałek, z których jedna przestrasza się przez trzymanie ręki przed otworem ust, lub przez zgięcie warg, lub też przez przesu-

nięcie zakrywki. Tony fortepianowe kołyszą się wtedy, gdy struna jednego tonu względem drugiej jest źle dostrojona. Prawo Schejbler'a daje się najłatwiej okazać za pomocą syreny podwójnej Helmholtz'a, pozwalającej na obrót skrzynki wietrznej; za każdym obrotem powstaje tyle kołysań, ile zachodzi uderzeń powietrza jednej syreny o przedziały między otworami koła drugiego. Kołysania dają się uwidocznnić rozmaitemi sposobami; za pomocą fonautografu otrzymujemy z dwóch kołyszących się tonów, linię falową o kolejno wysokich i prawie niedostrzegalnych górach. W doświadczeniu świetlnem Lissajous (235) przytwierdzając drugie zwierciadło również do widełek strojowych, które są cokolwiek przestrojone względem pierwszych, otrzymujemy na tafli falę świetlną kolejno wznoszącą się i opadającą. Jednak najpiękniej dają się kołysania współcześnie słyszeć i widzieć za pomocą wskaźnika płomieniowego König'a, (figura 123). Dwie równe piszczałki A, umieszczone obok siebie, są opatrzone pokryciami błonowymi B i C, połączonymi ze wspólnym palnikiem i rezerwarem gazu. Płomień kołysze się podług taktu uderzeń, które łatwo wytwarzać można przesuwaniem zasuwki górnej. Przy obrocie zwierciadła F, pojawia się w niem obraz płomienia, bądź roz-

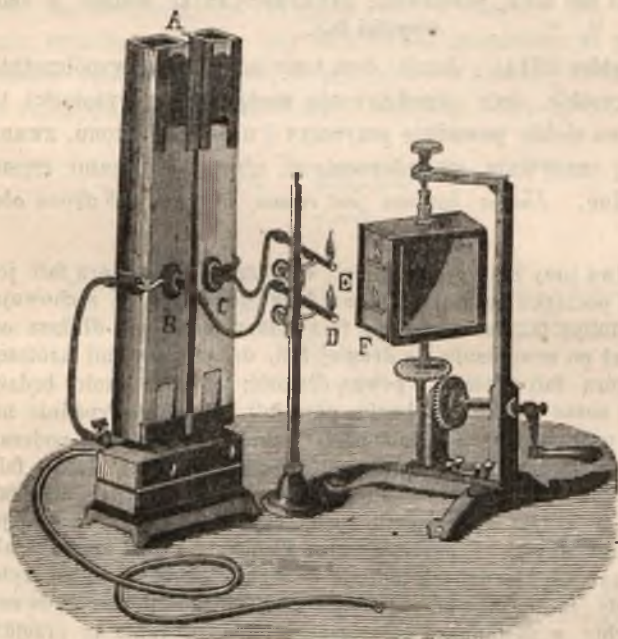


Fig. 123.

dzielony na pojedyncze płomienie, bądź złączony. Dwa palniki D i E dają także bardzo ciekawe zjawiska; okazują one, że podczas zgodności dźwięku piszczałek, ruch powietrza jest przemiennym. Z uderzeniami temi złączy się być w związku: schyłanie i naginanie się, zmniejszanie i rozszerzanie się, drżenie i miganie płomieni gazowych, cienkich słupów dymu, nawet cienkich strumieni wody. Tu należy także milczenie i przemawianie płomieni grających.

Schejbler proponował używać uderzeń do strojenia. Trzeba mieć do każdego nastrajanego tonu dwoje widełek, z których jedno wykonywają o 4 drgania więcej a drugie o 4 drgania mniej, niż ton nastrajany; ton ostatni posiada żądaną wysokość wtedy, gdy z obiema widełkami daje 4 uderzenia. Używał

także Schejbler uderzeń do oznaczenia liczby drgań  $a^0$ ; przygotował on 56 widełek postępujących tak od  $a^0$  do  $a^1$ , że każde następujące dawały z poprzedzającymi 4 uderzenia; ztąd wypadło, że  $a^1 - a^0 = 2a^0 - a^0 = 55 \cdot 4 = 220$  drgań. Podobne urządzenie posiada tonomiar Appunn'a i ono właśnie pozwala na oznaczenie bezwzględnej liczby drgań pewnego tonu; liczą się kołysania zachodzące między tonem badanym i jednym z języczkowych tonów przyrządu; szukana liczba drgań jest równa liczbie drgań tonu języczkowego, pomnożonej przez liczbę uderzeń. Myśl Schejbler'a została wybornie urzeczywistnioną w tonomiarze König'a (1867), składającym się z 331 widełek i 86 sztabek dla wszystkich tonów od  $c^3$  do  $c^6$ . Wzmiankowano już poprzednio (238) w jaki sposób kołysania ułatwiają oznaczenie liczb drgań za pomocą syreny.

**Ochrypłość współbrzmienia.** Liczba kołysań słyszalnych jako takie, **267.** jest podług badań Helmholtz'a większą, niż dotąd przyjmowano; 4, 8, 12 w sekundzie mogą być liczone dosyć wyraźnie; większej liczby kołysań nie można już rozróżnić pojedynczo, lecz doświadcza się natomiast niby trwałego zrywania przepływu tonu, niejako wrażenia ochrypłości, szorstkości, która, według Helmholtz'a, przy 30—40 kołysaniach działa najnieprzyjemniej na słuch; można jednak rozpoznać i większą jeszcze liczbę kołysań w pewnym przedziale czasu, lecz przy pewnym tylko stopniu wprawy, której nie posiada ucho niewzwyczajone. Kołysania stają się tem mniej uczuwalnemi, im większą jest ich liczba, zapewne dla tego, że nasze czucie znieczula się na zbyt wielką liczbę jednakowych wpływów, wywartych w bardzo krótkim czasie; liczba graniczna uczuwalnych kołysań ma wynosić 132 na sek., według Helmholtz'a. To właśnie jest jedną z przyczyn, dla których tony zasadnicze wielkiego interwalleu nie przesyłają słuchowi żadnych kołysań; w tonach tych bowiem, różnica między liczbami ich drgań jest bardzo wielka. Drugą przyczyną jest sposób, w jaki ucho przyjmuje kołysania. Jak kołysania uwidoczniają się na błonie, tak też występują one na skórcie bębnekowej, na kosteczkach słuchowych, na włóknach Corti'ego; organa te bowiem nie są nastrojone wyłącznie na jeden ton, lecz przyjmują także działanie dwóch tonów. Na każde włókno Corti'ego działa tylko mała liczba, blizkich sobie tonów o siłach przybliżenie równych; tony odleglejsze pobudzają te włókno bardzo słabo; więc kołysania małych tylko interwalleu mogą niezmodyfikowane odzwierciedlać się we włóknach Corti'ego; ton wielkiego interwalleu może wpływać bardzo silnie, lecz drugi ton za to, wstępując słabo w odpowiednie włókna, może powodować tylko słabe kołysania. Gdy zatem wielki interwalleu  $c^{-1} g^{-1}$  daje tak samo 33 kołysania jak mały  $h c^2$ , to pierwsze są o wiele słabsze od drugich. Ochrypłość współbrzmienia zależy zatem w pewien sposób złożony od wielkości interwalleu i od liczby kołysań.

Interwalle małe, bardzo wysokie, z powodu zbyt wielkiej liczby kołysań,— i bardzo niskie, z powodu zbyt małej liczby tychże, brzmią mniej ochryple, niż

średnie; niskie, większe interwalle dają wprawdzie więcej kołysań, lecz te są niewyraźne z przyczyny wielkości interwalle; jeszcze więcej kołysań dają interwalle równe, średniego położenia, przedstawiające wskutek tego delikatniejszą i ostrzejszą szorstkość, a nadto większą wrażliwość dla przestrojeń, aniżeli tony niższe, których ochrypłość zbliża się więcej do skrzywienia. Tony bardzo niskie brzmią same przez się ochryple, raz dla tego, że pojedyncze ich drgania są często odczuwane jako uderzenia, drugi raz dla tego, że tony te z własnymi tonami wyższymi wytwarzają kołysania. Wysokie, silne tony basowe głosu ludzkiego posiadają oprócz tego wysokie i nader bliskie tony wyższe od  $d^4$  do  $g^4$ , do których dostrojona jest długość przejścia słuchowego, i które skutkiem tego wydają kołysania bardzo silne, a nieprzyjemne; przeciwnie, wyższe głosy ludzkie dają najodleglejsze tony wyższe, wytwarzające kołysania liczne, a zatem ginące; z tej przyczyny wyższe głosy ludzkie brzmią przecięciowo przyjemniej, niż niskie. Kołysania użyte oszczędnie nadają utworom muzycznym wyraz przemijalności i smutny melancholijny nastrój. Tremolady śpiewu, skrzypców i cytr, trzęsienie organowego brzmienia, gdy mu towarzyszy ton sąsiedni, sprawiają ten wpływ, który wreszcie trwając długo i powtarzając się często, przestaje być przyjemnym.

### c. Konsonans i dyssonans.

268.

Ochrypłość współbrzmienia jest przyczyną dyssonansu; składa się ona bowiem z wielkiej liczby kołysań, z bardzo szybkiej zmiany przyrostów i maleń tonu, z szybko pośredniczącego wpływu na nerw słuchowy. Każdy wielokrotnie wywierany wpływ na nerwy staje wkrótce nieznośnym; gdy pojedyncze uderzenie elektryczne nie wiele nam sprawia przykrości, to szybkie następstwo jednakowych uderzeń jest prawie nie do wytrzymania; łechtanie, drapanie może pobudzić aż do szaleństwa; nic nie działa nieprzyjemniej i szkodliwiej na oko jak szybkie gaszenie i zapalanie, jak migotanie światła; jedną z najcięższych tortur miało być całymi godzinami trwające spadanie z pewnej wysokości kropel wody na głowę. Tak samo działa średnia liczba kołysań na organ słuchu; wpływ 30—40 na sek. jest najnieprzyjemniejszy. Kołysania jednak powstają nie tylko ze współbrzmienia dwóch bliskich sobie tonów zasadniczych, lecz także ze wspólnego na siebie działania tonów wyższych i tonów głównych, jak również tonów kombinacyjnych. Dyssonans zatem polega na ochrypłości współbrzmienia wytwarzanej w interwallech o zwickanem stosunku liczb drgań, przez szybkie kołysania tonów zasadniczych, tonów wyższych i tonów kombinacyjnych. Przeciwnie konsonans interwalle o prostym stosunku liczb drgań polega na tem, że tony wyższe tych interwalle przypadają na siebie bądź w całości, bądź częściowo, nie wywołując wcale lub bardzo nieliczne kołysania.

**Dowód.** Wszystkie zjawiska konsonansu i dyssonansu wyjaśniają się najlepiej, porządkując dwa tony zasadnicze prostego interwalle razem z ich tonami wyższymi tak, aby jednakowe tony stały zawsze pod sobą.



1. Jednodźwięk albo pryma	c <sup>0</sup>	c <sup>1</sup>	g <sup>1</sup>	c <sup>2</sup>	e <sup>2</sup>	g <sup>2</sup>	b <sup>2</sup>	c <sup>3</sup>	d <sup>3</sup>	e <sup>3</sup>	fis <sup>3</sup>	g <sup>3</sup>
	c <sup>0</sup>	c <sup>1</sup>	g <sup>1</sup>	c <sup>2</sup>	e <sup>2</sup>	g <sup>2</sup>	b <sup>2</sup>	c <sup>3</sup>	d <sup>3</sup>	e <sup>3</sup>	fis <sup>3</sup>	g <sup>3</sup>
2. Oktawa	c <sup>0</sup>	c <sup>1</sup>	g <sup>1</sup>	c <sup>2</sup>	e <sup>2</sup>	g <sup>2</sup>	b <sup>2</sup>	c <sup>3</sup>	d <sup>3</sup>	e <sup>3</sup>	fis <sup>3</sup>	g <sup>3</sup>
	c <sup>1</sup>	c <sup>1</sup>		c <sup>2</sup>		g <sup>2</sup>		c <sup>3</sup>		e <sup>3</sup>		g <sup>3</sup>
3. Kwinta			2									
	c <sup>0</sup>	c <sup>1</sup>	g <sup>1</sup>	c <sup>2</sup>	e <sup>2</sup>	g <sup>2</sup>	b <sup>2</sup>	c <sup>3</sup>	d <sup>3</sup>	e <sup>3</sup>	fis <sup>3</sup>	g <sup>3</sup>
	g <sup>0</sup>		g <sup>1</sup>	d <sup>2</sup>		g <sup>2</sup>	h <sup>2</sup>		d <sup>3</sup>		f <sup>3</sup>	g <sup>3</sup>
4. Kwarta				3								
	c <sup>0</sup>	c <sup>1</sup>	g <sup>1</sup>	c <sup>2</sup>	e <sup>2</sup>	g <sup>2</sup>	b <sup>2</sup>	c <sup>3</sup>	d <sup>3</sup>	e <sup>3</sup>	fis <sup>3</sup>	g <sup>3</sup>
	f <sup>0</sup>	f <sup>1</sup>		c <sup>2</sup>	f <sup>2</sup>	a <sup>2</sup>		c <sup>3</sup>	es <sup>3</sup>	f <sup>3</sup>		g <sup>3</sup>
				3								
5. Tercya					4							
	c <sup>0</sup>	c <sup>1</sup>	g <sup>1</sup>	c <sup>2</sup>	e <sup>2</sup>	g <sup>2</sup>	b <sup>2</sup>	c <sup>3</sup>	d <sup>3</sup>	e <sup>3</sup>	fis <sup>3</sup>	g <sup>3</sup>
	e <sup>0</sup>	e <sup>1</sup>	h <sup>1</sup>	e <sup>2</sup>		gis <sup>2</sup>	h <sup>2</sup>		d <sup>3</sup>	e <sup>3</sup>	fis <sup>3</sup>	g <sup>3</sup>
				4								

Nazwijmy ton zasadniczy i jego tony wyższe, częściowymi tonami brzmienia; ton zasadniczy—pierwszym tonem częściowym, pierwszy ton wyższy — drugim tonem częściowym i t. d., to własności przedstawionych interwałów dadzą się łatwiej wyśłowić. W jednodźwięku wszystkie tony częściowe padają na siebie; w oktawie podobnie, każdy ton częściowy wyższego brzmienia pada na ton częściowy niższego; toż samo ma miejsce także dla kwinty oktawy i wogóle dla wszystkich interwałów, których jedno brzmienie jest tonem wyższym drugiego; w większych interwałach tylko zawiera się różnica między konsonansem a dyssonansem, i w oktawach brzmienie zaostrza się cokolwiek skutkiem przymieszki odleglejszych tonów wyższych. Interwalle nazwane są konsonansami bezwzględniemi. W kwincie przypada wewnątrz podanych granic 4 tony wyższe, w kwarcie—3, w tercyi także 3; w kwincie jednak są one niższe niż w kwarcie, a w tercyi są znakomicie wyższe niż w kwarcie. Kwinta i kwarta zatem są lepszymi konsonansami od tercyi. Szczególniej ważnemi są pierwsze zgadzające się z sobą tony częściowe, których liczby porządkowe można rozpoznać po cyfrach umieszczonych nad niemi; dla jednodźwięku jest 1—1, dla oktawy 2—1, dla kwinty 3—2, dla kwarty 4—3, dla tercyi 5—4; są to te same liczby, które zachodzą w stosunkach liczb drgań. Im niższymi są te pierwsze padające na siebie tony częściowe, tem są silniejsze, tem więcej wspierają konsonans; lecz też tem wyraźniejszymi stają się kołysania powolne, powstające z nieczystości interwału, tem łatwiej rozpoznać tę nieczystość, tem ostrzej ogranicza się konsonans interwału; i tu także kwinta i kwarta zasługują na pierwszeństwo przed tercyą, a kwarta szczególnie dla tego, że z oktawą tworzy kwintę, zatem lepszy konsonans, gdy tymczasem tercyja z oktawą daje małą sextę, gorszy konsonans. Na koniec wypada nam zwrócić uwagę na tony nietrafiające na siebie; w kwincie leżą one przed pierwszym tonem zgodnym w znacznej od siebie odległości,

w kwarcie  $f^1$  i  $g^1$  tworzą cały ton, w tercyi  $h^1$  i  $c^2$  półton; w tercyi zatem dwa tony częściowe przedstawiają ostry dyssonans, mniejszy w kwarcie, a nieistniejący wcale w kwincie; dyssonanse te są jeszcze większe w wyższych tonach częściowych, lecz z powodu zbytnej słabości tych ostatnich i zbyt wielkiej liczby kołysań, są niesłyszalne. Godnym uwagi jest związek między tonami częściowym pewnego interwalle a tonami częściowymi interwalle sąsiedniego, niższego prawie o półton brzmienia. Jeżeli np. w jednodźwięku jedno brzmienie zostanie niższe, to o tyleż niższe się wszystkie częściowe jego tony i będąc w tym nowym stanie mało różnymi od tonów częściej drugiego brzmienia, wydadzą z niemi szybkie kołysania, a zatem najostrzejsze dyssonanse; naodwrot jeżeli te dyssonanse podwyższymy o półton, to wszystkie tony częściowe, dyssonansowe przedtem, przypadną na siebie. Takież rozbiór pozostałych interwalle prowadzi do ogólnego twierdzenia: W każdym interwalle dyssonują te tony wyższe, które w sąsiednim interwalle przypadały razem. „W tem rozumieniu można powiedzieć, że każdy konsonans zostaje zepsuty bliskością konsonansów sąsiednich w skali muzycznej, i zepsuty tem znacznie, im niższymi i silniejszymi są tony wyższe, charakteryzujące swą zbieżnością interwalle psujący, albo innymi słowy, im stosunek liczb dźwięków tego interwalle wyraża się mniejszymi liczbami.“ Kwinta ma obok siebie interwalle 7:5 i 8:5; te mogą wcale nie przeszkadzać, gdyż siódmy i ósmy ton częściowy wychodzą bardzo słabo, jeżeli nie giną zupełnie. Kwarta zostaje zepsuta przez kwintę i tercyę; pierwsze zepsucie jest nieznaczne, gdyż odległość jest wielkim całym tonem; drugie zepsucie może być znacznie przy odpowiednich okolicznościach, i dla tego, co do konsonansu kwarty, muzycy przez długi czas nie byli w zgodności. Blisko kwarty 4:3 stoi wielka sexta 5:3; ta zaś traci przez zepsucie kwinty, odległej tylko o 10:9, na wartości jako konsonans, lecz szczególnie przez to, że przez odwrócenie staje się ona małą tercyą. Wielka tercyę doznaje silnego uszkodzenia od bardzo blizkiej kwarty i od małej tercyi; z tego powodu i z innych już przytoczonych, stoi ona daleko za kwartą; w starożytności była uważaną za dyssonans i dopiero za czasów Franco'na z Kolonii (1200) uznana została za konsonans niedoskonały. Helmholtz nazywa kwintę i kwartę doskonałymi konsonansami, a wielką tercyę i wielką sextę średnimi konsonansami. Mała tercyę 6:5 i mała sexta 8:5 przedstawiają, według powyższej reguły, przy pierwszej zbieżności, tony częściowe 6 i 8, których dosyć często brakuje; przestrojenia ich wywołują zatem zaledwie uczuwalne kołysania i obchodzą się bez ostrych ograniczeń; mała tercyę i mała sexta zostają znacznie uszkodzonymi przez interwalle sąsiednie: mała tercyę — przez wielką i przez ton zasadniczy, mała sexta — przez kwintę i przez wielką sextę; mała tercyę i mała sexta są niedoskonałymi konsonansami. Pod względem prostoty stosunku liczbowego, septima naturalna 7:4 i zmniejszona decyma 7:3 powinnyby znajdować się przed małą sextą, lecz ostatnia ma tę przewagę, że jej odwrócenie jest tercyą wielką, gdy tymczasem interwalle przytoczone dają interwalle gorsze od siebie samych. Zresztą nie odpowiadają one skali muzycznej i w muzyce nie są przyjęte. Opuszczenie ich tworzy przeskok oddzielający konsonanse od dyssonansów. Najostrzejszymi dyssonansami są: mała sekunda i wielka septyma, są one bowiem psute przez bezwzględne konsonanse; mniej odnosi się to do wielkiej sekundy i małej septymy, które zatem są mniej ostre, ale zawsze dosyć silnymi dyssonansami; mała septyma nawet jest najłagodniejszym z dyssonansów, oprócz

bowiem łagodzącego wielkiego oddalenia, ma ona za przyczynę dyssonansu pierwszy, często nie silny ton wyższy. Silnym dyssonansem jest jeszcze nadmierna kwarta, jako psuta przez oba doskonałe konsonanse. Gdy według powyższego różnica między konsonansami a dyssonansami została sprowadzoną do kołysań tonów niższych, wypadalby więc wniosek naturalny, że wszystkie interwalle o pojedynczych tonach muszą być konsonantnemi, jeżeli nie wytwarzają kołysań między sobą. Tu jednak występują tony kombinacyjne zamiast tonów wyższych. Szczegółowsze badanie pokazuje, że przy brzmieniach złożonych pierwsze tony różnicowe w kołysaniach swych zgadzają się z tonami wyższemi; kołysania tonów kombinacyjnych wzmacniają zatem dyssonanse i konsonanse i wytwarzają je tam, gdzie ich nie ma z przyczyny prostoty tonów interwalle, jak np. w piszczałkach zakrytych; są one nawet powodem ostrych ograniczeń interwalle. Np. jeżeli kwinta nieczysta zawiera liczby 200 i 301, to wydaje ton różnicowy 101, tworzący z tonem zasadniczym drugi ton różnicowy 99, a z nim dwa kołysania; podobnie dzieje się z oktawą i kwartą; dla otrzymania kołysań z tercyj i sext trzeba dojść aż do czwartego tonu różnicowego; ponieważ te trzy tony różnicowe są prawie niedosłyszalne, przeto Helmholtz utrzymuje i stwierdza doświadczeniami, że nieczyste, pojedyncze tercyje i sexty (same w sobie) brzmią tak dobrze jak czyste, co naturalnie zaraz się zmienia, przy zachodzeniu innych tonów, tworzących inne interwalle.

**Akkordy.** Ponieważ tony wyższe w różnych kolorytach zależą od liczby, wysokości i siły, przeto konsonanse i dyssonanse różnych instrumentów muszą brzmieć odmiennie; w instrumentach dających pojedyncze tony i brzmienia o małej liczbie tonów wyższych, dyssonanse brzmią miękko i niewydatnie, prawie tak jak konsonanse; dla tego to w nowszej muzyce, zawierającej nadmierne bogactwa dyssonansów, owe instrumenta nie są używane same; koncert wydany na piszczałkach zakrytych uspiłby nas wkrótce, „straszniejszym od koncertu na jednym flecie jest koncert na dwóch fletach.“ Naodwrot, akkordy instrumentów bogatych w tony wyższe stają się łatwo chropawemi i ostremi, używają się też zwykle przejściowo.

Akkordy są takimi połączeniami trzech lub więcej brzmień, z których każde harmonizuje z pozostałemi; liczba tych połączeń jest niewielka: 1. Ton zasadniczy, tercyja i kwinta; 2. Tercyja, kwinta i oktawa; 3. Kwinta, oktawa i decyma. Jeżeli wszędzie zamiast wielkiej tercyj zostanie umieszczoną mała, to powstaną trzy trójdźwięki moll, gdy tymczasem trzy poprzednie nazywają się

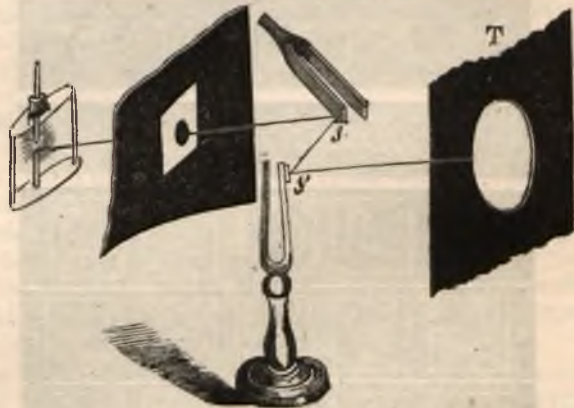


Fig. 124.

trójdźwiękami dur. Różnica między nimi leży w tonach kombinacyjnych. Poszukując tonów kombinacyjnych trójdźwięków dur, znajdziemy, że tony pierwszego porządku, a nawet silniejsze drugiego porządku, wytwarzają tylko wzmocnienia tonów pojedynczych akkordu; przeciwnie, tony kombinacyjne akkordu moll, nawet pierwszego, lecz przeważnie drugiego porządku, wydają tony akkordowi zupełnie obce, udzielają mu coś niejasnego, zamglonego, słowem właściwość akkordów moll; tony kombinacyjne wyższe tworzą oprócz tego ostre lecz słabe dyssonanse.

270.

**Optyczne przedstawienie konsonansów.** Sposobem Lissajous konsonanse dają się przedstawić optycznie. Jeżeli tak przytwardzono dwoje widełek

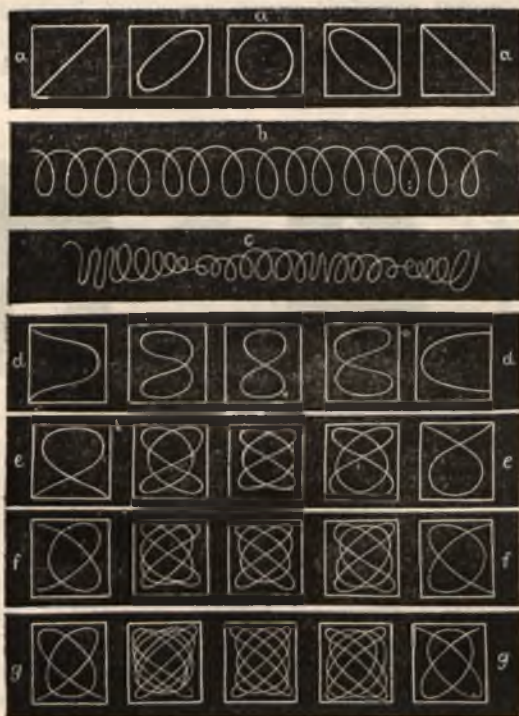


Fig. 125.

strojowych o równej wysokości tonów (Fig. 124), że drgania ich odbywają się wzajem do siebie prostopadle, to promień światła, odbity od zwierciadełek  $s$  i  $s'$ , tworzy na tablicy  $T$  wogóle elipsę, przechodzącą w linię prostą wtedy, gdy widełki współcześnie zaczynają i kończą swe wachnięcia, a w koło wtedy, gdy jedno z widełek rozpoczynają swe drgania stale w połowie czasu drgnięcia drugich. Powstawanie tych figur daje się łatwo wyjaśnić.— Gdy jedno z widełek zostanie cokolwiek przestrojone przez przyklepienie kawałeczka wosku, wtedy figura ulega ustawicznej zmianie, koło przechodzi przez coraz węższą elipsę w prostą, a ta znów w koło za pośrednictwem elips ciągle rozszerzających się i t. d.

(Fig. 125 a), gdyż odmiennosc czasów drgań prowadzi za sobą kolejno trzy wyżej przytoczone przypadki. Gdy dwoje widełek różni się od siebie jednym drgnięciem na sek., i rozpoczyna drgania o jednakowych fazach, to po upływie 1 sek., fazy będą znów jednakie, po upływie  $\frac{1}{2}$  sek. przeciwne, a po upływie  $\frac{1}{4}$  i  $\frac{3}{4}$  sek., drgania będą się różnić w fazie o  $\frac{1}{4}$  i  $\frac{3}{4}$ . Obrót zwierciadła dokonywany wtedy, gdy tablica przedstawia koło stałe, daje figurę jednobrzmienia b (Figura 125); przestrojenie zaś jednych widełek tworzy figurę przestrojenia c. Gdy jedno

widelki są oktawą drugich, to przy wspólnym początku liczb drgań, powstaje nie linia prosta, lecz parabola, która skutkiem przestrojenia jednych widełek przechodzi przez figury ósemkowe  $d$  w inną parabolę;  $e$ ,  $f$  i  $g$  przedstawiają podobne przejścia figur przestrojenia dla kwinty, kwarty i tercyi. Łatwo pojąć, że za pomocą tych figur człowiek nawet głuchy może nastrojać widelki do jednobrzmienia lub do innego dowolnego interwalu z taką dokładnością, jakiejby nie mógł osiągnąć człowiek z najdelikatniejszym nawet słuchem.

**Zadania.** 376. Ile kołysań na sek. daje interwał  $cd$  w 4 oktawach średnich? Rozw.  $d^{-4}-c^{-4} = 8$ ,  $d^0-c^0 = 16$ ,  $d^1-c^1 = 32$ ,  $d^2-c^2 = 65$ .

377. W trzy razy zakreślonej oktawie jest  $f^3-e^3 = 77$ ; gdzie powstaje też sama liczba w oddaleniu = 2 oktawom? Rozw.  $4x-x = 77$ ;  $z\text{tąd } x = 26$ ; przeto  $as^{-4}-as^{-3}$ .

378. Jaki ton wydaje tyle kołysań ze swą małą sekundą, ile ich wykonywa ze swą oktawą? Rozw. Niech liczba drgań pierwszego tonu będzie  $x$ , a drugi niech będzie oddalony o  $y$  oktaw; zatem  ${}^{16}/_{15}x-x = x \cdot 2^{y+4}-x \cdot 2^y$ ,  $z\text{tąd } c^{-2}-c^{-3} = cis^1-c^1 = 16$ .

379. Która mała sekunda daje 10 kołysań? Rozwiąz.  ${}^{16}/_{15}x-x = 10$ ,  $z\text{tąd } x = 150$ ;  $dis^0-d^0$ .

380. Która wielka kwarta daje największą ochrypłość o 33 kołysaniach? Rozw.  ${}^{16}/_{15} \cdot \frac{4}{3}x-x = 33$ ;  $z\text{tąd } x = 71$ ;  $gis^{-4}-d^{-1}$ .

381. Pewien ton daje z widelkami nastrojonemi na  $a^{-4}$ , 11 kołysań, jaka jest wysokość tego tonu? Rozw.  $97,7 = g^{-4}$ .

382. Struna długa na  $1^m$  zgadza się z widelkami; inna struna o długości  $1,01^m$  daje z temiż widelkami 5 kołysań; jaki ton wydają widelki? Rozwiązanie.  $x : x-5 = 1,01 : 1$ ;  $z\text{tąd } x = 505 = c^2$  przybliżenie.

383. W tonomiarze Appunn'a są 32 jęczyczki, z których każdy następujący z poprzedzającym daje 4 kołysania; jaki jest ton najniższy, gdy najwyższy jest jego oktawą? Rozw.  $x+4 \cdot 32 = 2x$ ;  $x = 128$ .

384. Ile kołysań dają tony zasadnicze  $c^{-4}$  i  $d^{-4}$  i ich tony wyższe? Rozw.  $d^{-4}-c^{-4} = 8$ ;  $d^0-c^0 = 16$ ;  $a^0-g^0 = 22$ ;  $d^1-c^1 = 32$ ;  $fis^1-e^1 = 40$ ;  $a^1-g^1 = 44$ ; i t. d.

#### 4. Siła dźwięku.

Siła uczuwania dźwięku zależy od wielu okoliczności: 1. Od siły powstawania dźwięku; ta jest proporcjonalną do kwadratu z amplitudy i do kwadratu ze średniej prędkości drgań. 2. Od własności ośrodka, w którym dźwięk powstaje, i w którym dźwięk rozchodzi się; im ośrodek jest jednorodniejszy i gęstszy, tem silniejszym jest dźwięk. 3. Od ilości cząstek ośrodka rozprawdzającego, którym dźwięk udzielony został przez źródło dźwięku; im większą jest liczba współcześnie poruszonych cząstek ośrodka, tem dźwięk jest silniejszy. 4. Od liczby kierunków, w których dźwięk rozchodzi się; im ta liczba jest większą, tem mniejszą jest siła dźwięku w każdym pojedyńczym

kierunku. 5. Od odległości ucha od źródła dźwięku; natężenie dźwięku jest odwrotnie proporcjonalne do kwadratu z odległości od źródła dźwięku. 6. Od czułości ucha; słuch jest tem czulszy, im mniej jest przytępiony działaniem innych odgłosów; ucho jest wrażliwsze na tony wysokie niż na niskie.

**Dowody i stwierdzenia:** 1. Siła powstawania dźwięku jest tem większą, im większą jest praca mechaniczna użyta do wytworzenia dźwięku, zamieniająca się przy tem wzbudzeniu w drgania; praca ta równa się sile żywotnej cząstek drgających, wymierzonej kwadratem z prędkości drgań i kwadratem z amplitudy. Tony wysokie, o równej amplitudzie, brzmią znacznie silniej od niskich, często z siłą nie do zniesienia. Doświadczenia z syreną okazują, że ton jest tem silniejszy, im w większą liczbę otworów powietrze jest wdmuchiwane, czyli im praca jest większą. 2. Im gęstszy jest ośrodek źródła dźwięku, tem dźwięk jest silniejszy, gdyż tem większa masa zostaje wprawiona w drgania. Wypełnienie płuc wodorem czyni głos słabym i pustym; wystrzały na wysokich górach grzmia słabo, w bardzo zimnem powietrzu nad powierzchnią morza dźwięk brzmi silnie, a najsilniej w gęstem powietrzu dzwonów podwodnych. Godnym uwagi jest silny huk niektórych rozpryskujących się kul ognistych, pomimo nieznacznej masy ośrodka, w którym ten huk powstaje. Ośrodek rozprawdzający dźwięk wywiera także podobny wpływ na jego siłę; dźwięk rozchodzi najlepiej w ciałach stałych (236), mniej dobrze w ciekłych, jeszcze gorzej w gazowych, a w próżni wcale się nie rozchodzi. Z ciał stałych drzewo zdaje się najlepiej przeprowadzać dźwięk; na tej własności zasadza się steroskop (Laennec 1819). Lecz i ziemia jest dobrym przewodnikiem; huk armat przy oblężeniu Moguncyi (1793) słyszano w Eimbeck (o 33 mile), kanonadę w Antwerpii (1832) słyszano w górach kruszcowych (o 80 mil). Chód zegarka kieszonkowego w wodzie słyhać na 7<sup>m</sup>, w oleju na 5<sup>m</sup>, w spirytusie na 4<sup>m</sup>, w powietrzu tylko na 3<sup>m</sup>. Gdy dźwięk przechodzi z ośrodka gęstszego w rzadszy, to mniej zostaje osłabionym, niż wtenczas, gdy rozchodzi się w odwrotny sposób, np. gdy z powietrza przechodzi w ciało stałe; dźwięk rozchodzi się bardzo słabo przez mury i ściany; jeszcze więcej osłabia się przejściem przez watę, trociny i t. p. gdyż wtedy musi często przechodzić z powietrza w ciało stałe. Dźwięk dostaje się łatwiej od podnóża góry do wierzchołka, niż z wierzchołka na dół; pochodzi to jednak więcej od słabości dźwięku w górze, niż od przejścia w ośrodek gęstszy. W dzień, powietrze ulega ustawicznej zmianie, prądy wszelkiego rodzaju sprawiają zmiany w gęstości; w nocy, jest więcej jednostajne i wskutek tego dźwięki dzienne są słabsze od nocnych. Podczas zwrotnikowych nocy Humboldt słyszał hałas wodospadu Orinoco, odległego na godzinę drogi, pomimo wycia zwierząt, trzy razy silniej, niż podczas dnia. Podobna różnica ma miejsce między okolicami biegunowemi a innymi; powietrze spokojne, zimne, gęste wzmacnia dźwięki; Forster mógł rozmawiać ze swym towarzyszem odległym odeń na  $\frac{1}{4}$  mili (w Port—Bowen przy 28° zimna); w takich jednak zdarzeniach trzeba uwzględniać i wpływ 6. Wiatr osłabia dźwięki; najczęściej w kierunku przeciwnym kierunkowi wiatru. 3. Struna może udzielić ruch nieznacznej tylko ilości powietrza, brzmi więc słabo sama przez się; lecz gdy ruch jej zostanie przeniesiony na ciało o wielkich powierzchniach, natenczas wprawi w drgania wielką ilość powietrza i dźwięk będzie silnym; na tem polega użycie rezonansów. 4. Gdy dźwięk może się rozchodzić w jednym lub w małej

liczbie kierunków, to zostaje prawie nieosłabionym. Biot badał rozchodzenie się dźwięku przez próżne rury wodociągowe Paryża; mógł on szepcząc rozmawiać z przyjacielem przez rurę 1000<sup>m</sup> długą; na tem polegają rury komunikacyjne służące do porozumiewania się z lokalami odległymi lub niedostępnymi, rura do głośnego mówienia (Morland 1870) i trąbka akustyczna. Według Hassenfratz'a, rura do mówienia działa nie przez wewnętrzne odbicie i równoległe skierowanie promieni dźwięku, lecz przez to, że dźwięk przed rozejściem się, udziela współdrgań większej ilości powietrza. W podobny sposób możnaby wyjaśnić, że dźwięk rozchodzi się najsilniej w kierunku głównym ciała brzmiącego, jak huk wystrzału, ton instrumentu dętego w kierunku rury, głos mówiącego w kierunku ust i t. d. (Ucho Dyonizjusza). Podług najnowszych poszukiwań Regnault'a (1868) siła dźwięku maleje w rurach bardzo wązkich i to tem szybciej, im rurą jest węższa. 5. Działaniom w odległościach służy prawo wspólne wszystkim ruchom falowym (229). Siła dźwięku zatem jest w stosunku odwrotnym do kwadratu z długości; stwierdzenia matematycznie dokładne są tu niemożliwe, gdyż nie mamy skali dla siły dźwięku; można się jednak przekonać o tem przybliżenie, za pomocą zwyczajnych obserwacyj. 6. Jak w dzień nie widzimy gwiazd, tak też i ucho stępione hałasem dziennym nie odczuwa cichych tonów, które wyraźnie słyszy podczas spokojnej nocy; zresztą spoczynek innych zmysłów, zaostrza słuch; z zamkniętymi oczyma, lub po utracie wzroku, słyszy się lepiej. Ucho jest czulsze na tony wysokie, niż na niskie; gdy Helmholtz równosilnymi zadęciami w syrenę wytwarzał tony wysokie i niskie, pierwsze brzmiały znacznie silniej od drugich. Odgłosy nieprzyjemne jak skrobanie, brzęczenie, syczenie zawierają w sobie prawdopodobnie tony bardzo wysokie, nieharmonijne.

## 5. Rozchodzenie się dźwięku.

Dźwięk rozchodzi się najczęściej falami podłużnymi, w rzadkich tylko **273.** razach falami poprzecznymi (236); dla tego to twierdzenia o rozszerzaniu się fal służą także dla rozchodzenia się dźwięku: 1. Ze swego źródła dźwięk rozchodzi się we wszystkich kierunkach, zwanych promieniami dźwięku. 2. Promienie dźwięku w ośrodkach jednostajnych są linjami prostymi, których kierunki zmieniają się przy przejściu w inne ośrodki. 3. Tony wysokie i niskie, brzmienia silne i słabe rozchodzą się z jednakową szybkością.

**Stwierdzenie.** Ton daje się słyszeć naokoło źródła tonu, przeto dźwięk rozchodzi się we wszystkich kierunkach. O prostolinijnym kierunku promienia dźwięku przekonywamy się ze słabnięcia dźwięku wtenczas, gdy na kierunku prostej łączącej ucho ze źródłem dźwięku zostanie umieszczony ekran; cień dźwiękowy jest o wiele słabszy od świetlnego, gdyż ruch dźwięczny jest od świetlnego wolniejszy, a przeto według zasady Huyghens'a (230), rozchodzenie się boczne może zachodzić silniej. Słyszenie utworu muzycznego wielobrzmiennego przekonywa o równej prędkości tonów silnych i słabych, wysokich i niskich. Biot, na jednym końcu rury 1000<sup>m</sup> długiej kazał grać takie ustępy i słyszał je, na drugim końcu rury w należytej harmonii. Mimo to, najnowsze poszukiwania Regnault'a i Kundt'a okazały, że twierdzenie 3 ma miejsce nie bez pewnych ogra-

niczeń; Regnault bowiem znalazł, że tony bardzo silne rozchodzą się cokolwiek prędzej od słabych, co zgadza się z obserwacją Rarry'ego, który słyszał odległe wystrzały armatnie przed zakomenderowaniem; doświadczenia Regnault'a jednak odnoszą się do rur, a nie do wolnego powietrza. I wysokość tonu ma powodować pewną różnicę w prędkości; prace Kundt'a wykazały, że tony niskie rozchodzą się w rurach wolniej, niż wysokie i że różnica jest tem większa, im rury są węższe.

**274. Prędkość dźwięku.** Wszystkim ruchom falowym służy wzór (30), według którego  $c = \sqrt{(e : d)}$ ; wartość ta dla rozchodzenia się dźwięku w powietrzu wyraża się wzorem (38), mianowicie  $c = \sqrt{(1,42 \text{ hs}^2 : s)}$ .—s oznacza tu ciężar właściwy powietrza = 0,001293 przy 0°C. Działaniem ciepła powietrze rozszerza się za każdym stopniem o  $\alpha = 0,003665$ ; przy wyższej temperaturze gęstość s będzie mniejszą i to w stosunku zwiększonej objętości V. Gdy ciało przy 0° ma objętość V, to przy t° zajmuje objętość  $V + \alpha t$  czyli  $V(1 + \alpha t)$ ; stało się zatem  $1 + \alpha t$  razy większem; tyle razy zmniejszy się jego gęstość, będzie więc wynosić  $s : (1 + \alpha t)$ . Wstawiając za s tę wartość w równanie na e, otrzymamy:

$$c = \sqrt{[(1,42 \text{ hs}^2 : s)(1 + \alpha t)]} \dots \dots \dots (40)$$

Wstawienie znanych wartości liczebnych w to ostatnie równanie, da na prędkość dźwięku, przy 0° Celsyusza  $c = 333^m$ , do których na każdy stopień Celsyusza należy dodać prawie  $\frac{1}{2}^m$ . Wzór (30) wskazuje oprócz tego, że ta prędkość nie zależy od ciśnienia powietrza, gdyż według prawa Mariotte'a, sprężystość i gęstość w jednakowym stopniu rosną i maleją.

Liczne i nader dokładne doświadczenia służą za potwierdzenia dla tych wyników. Członkowie akademii paryskiej (1738), potem Arago, Mathieu, Prony, Humboldt, Gay-Lussac i Bouvar (1822), hollenderscy fizycy Noll, v. Beck i Kuitenbrower (1822) kazali dawać wystrzały z dwóch punktów wzajemnie widzialnych i rachowali dokładnie czas upływający między dostrzeżeniem błyskawicy świetlnej a hukem wystrzału; dzielili odległość przez liczbę sekund i otrzymali: pierwsi  $c = 337^m$ , drudzy  $331,2^m$ , a ostatnia grupa dostrzegaczy  $332,26^m$ . Obserwacje Bravais'go i Marten'a (1844) dokonane między Faulhorn a jeziorem Brien, ustaliły przekonanie o niezależności prędkości dźwięku od ciśnienia powietrza.

Prawa te mogą także być stwierdzone za pomocą innej metody, pozwalającej obserwować także prędkość dźwięku w innych gazach. Ponieważ długość fali  $\lambda$ , jest tą drogą, którą przebywa ruch dźwięczy w  $\frac{1}{n}$  sekundy, przeto droga w 1 sek, czyli prędkość  $c = n \lambda$ , jak to daje znany wzór (25); skoro długość l piszczałki otwartej równa się połowie długości fali, a  $\frac{1}{4}$  długości fali w piszczałkach zakrytych, zatem dla piszczałek otwartych  $c = 2 l n$ , a dla zakrytych  $c = 4 l n$ , co już zawiera się we wzorach (37) i (39). Znając przeto liczbę drgań tonu i długość piszczałki, wydającej ten ton, można obliczyć c. Wertheim znalazł



tym sposobem średnią wartość na  $c = 331,7$ , a oprócz tego stwierdził wpływ temperatury. Ponieważ według wzoru (30) prędkość w różnych gazach, zostających pod jednakiem ciśnieniem, posiadających zatem jednakową sprężystość, jest w stosunku odwrotnym do gęstości, przeto prędkość dźwięku w innych gazach daje się łatwo obliczyć; dla wodoru  $c = 333 : \sqrt{0,0688} = 1280$ ; wartość ta nie może być zupełnie dokładną, gdyż liczba 1,42 (p. 250), uwzględniająca wywiązania się ciepła przy zagęszczeniu i stratę ciepła przy rozrzedzeniu ma odmienną wartość w różnych gazach. Chladni, Dulong i Wertheim wdmuchiwali w piszczałki strumienie różnych gazów i otrzymywali za pomocą tej metody wartości cokolwiek odmiennie od tej, jaką daje powyższy rachunek; teoretyczne jednak wartości zbliżają się bardzo do obserwowanych, po podstawieniu zamiast 1,42, wartości służących dla każdego badanego gazu, a dających się otrzymywać z nauki o ciepłe. Dulong znalazł dla wodoru 1269<sup>m</sup>, dla tlenu 317<sup>m</sup>, dla kwasu węglowego 262<sup>m</sup>.

Z najnowszych metod podawanych na oznaczenie prędkości dźwięku, na obszerniejszą wzmiankę zasługuje metoda Kundt'a (1866), której zasada już kilkakrotnie (250 i 265) była przytaczana. Odległości między węzłami figur pyłu dają długość fal powietrznych, stojących, która to długość fal jak wiadomo równa jest połowie długości fal rozchodzących się, zkaąd według wzoru  $c = n \lambda$ , można obliczyć prędkość dźwięku. Gdy prędkość w powietrzu = 332, 8<sup>m</sup> to Kundt znalazł prędkość w wodzie 1284<sup>m</sup>, w kwasie węglowym 266<sup>m</sup>, w gazie oświetlającym 533<sup>m</sup>. Oprócz tego, przy 100° prędkość okazała się o 56<sup>m</sup> większą, niż przy 0°; w rurach szerokich niezależną od ciśnienia powietrza, w wąskich rosnącą z ciśnieniem, a pod stałym ciśnieniem, w rurach węższych mniejszą niż w szerokich. Wpływy ścian rur polegają według Kundt'a na tarcu i wymianie ciepła zachodzącej między powietrzem a ścianami rur. Kundt wzbudzał fale sztabą pocieraną (jak w 265) i z porównania długości fal tonu sztaby z falami pyłu wnioskował o stosunku prędkości dźwięku w sztabie do prędkości w powietrzu; prędkość ta wypadła dla mosiądzu 10,87, dla miedzi 11,9, dla szkła 15,2 dla stali 15,3 razy większą niż dla powietrza. Zresztą prędkość dźwięku w ciałach stałych, kształtu sztaby została już znaleziona wcześniej przez Chladni'ego (1800), Biot'a (1829), Wertheim'a (1851). Chladni używał wzorów  $c = 2ln$  dla piszczałek otwartych i  $c^1 = 2ln^1$  dla sztaby stałej, takiejże długości, z obu stron swobodnej (wzór 36). Z tych dwóch równań wypada:  $c^1 = (n^1 : n)c$ ; zatem aby znaleźć prędkość dźwięku w sztabie należy pomnożyć stosunek liczb drgań sztaby brzmiącej podłużnie i piszczałki otwartej takiejże długości, przez prędkość dźwięku w powietrzu. Chladni i Wertheim znaleźli, że prędkość w ołowiu jest 4, w złocie 6, w cynie 7<sup>1/2</sup>, w srebrze 8—9, w miedzi 11—12, w żelazie 15—17, w szkłe 17, w drzewie 11—17 razy większą, niż w powietrzu. Otrzymuje się prawie te same liczby, obliczając prędkość dźwięku ze wzoru (30)  $c = \sqrt{(e : d)}$  lub  $c = \sqrt{(eg : s)}$ ; d masa jednostki objętości równa się ciężarowi właściwemu s, ciężarowi jednostki objętości, podzielonemu przez przyśpieszenie g. Przytoczone wartości służą tylko dla ciał sztabowych; do ciał stałych innego kształtu odnosi się, według Wertheim'a, wzór  $c = \sqrt{(\frac{3}{2} eg : s)}$ , gdyż na mocy licznych doświadczeń, przy każdym przedłużeniu się lub skurczeniu ciała, zachodzi zmiana w objętości zużywająca część siły sprężystej; zmiana objętości wynosi  $\frac{1}{2}$  przedłużenia, zużywa zatem  $\frac{1}{2}$  sprężystości tak, że ta dla ciał znacznych wymiarów

wynosi  $\frac{3}{2}e$ . Pożądanymi są jeszcze doświadczenia w tym kierunku, Stefan (1868) według metody Chladni'ego oznaczył prędkość dźwięku w ciałach miękkich, pulchnych; sztaby z takich ciał dawał on za przedłużenia sztabom szklanym i wprawiał je w drgania przez pocieranie sztab szklanych; w wosku przy  $20^{\circ}$ , prędkość okazała się  $= 730^m$ , rosnąc o  $40^m$  na każdy stopień; dla łoju  $360^m$ , dla kauczuku  $30-60^m$ . Prędkość w cieczach daje się również obliczyć ze wzoru (30)  $c = \sqrt{e : d}$ ; i tu także  $d = s : g$ ; sprężystość  $e$  oblicza się ze ściśliwości wody (pięćdziesiąt milionowych pod działaniem 1 atm.) Gdy przytem potrzebną jest 1 atm.  $= hs'$ , gdzie  $h$  oznacza stan barometru a  $s'$  cięż. wł. merkurjuszu, przeto do ściśnienia na połowę długości potrzeba siły  $e = hs' : 0,000050$  (według 65). Wypada ztąd na prędkość dźwięku w wodzie  $c = \sqrt{(hs'g : 0,000050s)}$   $= 1425^m$ . Doświadczenia Colladon'a i Strum'a (1817) nad jeziorem Genewskim, stwierdziły tę liczbę. Przeciwnie, Wertheim za pomocą doświadczeń z piszczałkami znalazł tylko  $1173^m$ ; zwracając jednak uwagę na to, że woda w formie sztaby doznaje takiej samej zmiany objętości, jak ciało stałe sztabowe, należy także wprowadzić w rachunek współczynnik  $\sqrt{\frac{3}{2}}$ , a wtedy wypadnie liczba  $1137^m$ .

**275. Odbicie się dźwięku.** Dźwięk, jako ruch falowy, odbija się podług prawa (231): kąt odbicia jest równy kątowi podania. Gdy zatem promienie dźwięku padają prostopadle do ściany, to zostają odbite także prostopadle; interferują one z nowo wzbudzonymi promieniami dźwięku na fale stojące, oddzielone od siebie węzłami. Kūlp (1858) badał prostą, spuszczoną prostopadle do sąsiedniej ściany z brzęczącej piszczałki organowej i znalazł węzły, jako słabsze punkta dźwięku na takich miejscach, które zadosyć czynią prawu, że fala odbita zdaje się być przesuniętą o połowę długości fali względem fali padającej. Wynika także z prawa odbicia, że promienie dźwięku wychodzące z ogniska zwierciadła wklęsłego parabolicznego, zostają odeń odbite równoległe do osi zwierciadła, a gdy padają następnie na zwierciadło paraboliczne ustawione równoległe do pierwszego, to spotykają się w ognisku tego drugiego zwierciadła. Chód zegarka kieszonkowego umieszczonego w ognisku jednego zwierciadła słycać w ognisku drugiego. Promienie dźwięku wychodzące z jednego ogniska budynku eliptycznego również spotykają się w drugim ognisku; zjawisko to może być wywołane ułamkami form eliptycznych lub ciałami, które przypadkowo lub umyślnie znajdują się w linii eliptycznej; na tem zjawisku polegają galerie szepczące.— Dźwięk powstający w bliskości ściany pada razem z dźwiękiem odbitym i zostaje wzmocniony; gdy źródło dźwięku jest od ściany lecz bliżej niż na  $17^m$ , wtedy powstaje *adgłos*; gdy zaś źródło dźwięku jest więcej niż na  $17^m$  oddalone od ściany, wtedy tworzy się *echo*, przypuszczając naturalnie, że dźwięk odbity może dochodzić do ucha; te warunki jednak nie zdają się być dostatecznymi do wytwarzania echa, gdyż w takim razie zjawisko to musiałoby być częstszem; prawdopodobnie niezbędnym tu warunkiem jest także roz-

mieszczanie przedmiotów odbijających, aby te tworzyły rodzaj parabolicznego lub eliptycznego zwierciadła; odbite promienie dźwięku spotykają się w ognisku tego zwierciadła i wytwarzają nowe źródło dźwięku.

Ucho bowiem może uczuwać osobno co najwięcej 10 artykułowanych dźwięków w sekundzie. Gdy ściana odbijająca jest bardzo bliską, oddaloną od ucha na małą liczbę metrów, to dźwięk odbity dochodzi ucha w czasie znacznie krótszym od 0,1 sek.; łączy się więc z dźwiękiem pierwotnym i wzmacnia go; tem się tłumaczy mocniejsze brzmienie tego samego dźwięku w przestrzeniach zamkniętych, niż w niezamkniętych. Lecz gdy ściana, będąc odleglejszą, jest bliżej niż na 17<sup>m</sup>, to dźwięk odbity przebywa do ucha, później od bezpośredniego, ale jeszcze mniej jak po upływie 0,1 sek.; powstaje wtedy niby przedłużenie dźwięku, odgłos, który podczas mówienia, śpiewania i t. d. zaciera następne sylaby i czyni je niewyraźnymi. Zadaniem budownictwa akustycznego jest nadawanie salom zebrań, teatrom i t. d. form usuwających odgłosy; prawideł ustalonych w tym kierunku dotąd nie ma. Im odbicie zachodzi mniej prawidłowo, tem sala zdaje się być więcej akustyczną; należy unikać wielkich, gładkich i równych powierzchni, form prawidłowych jak ostrokągu walca i w ogólności członkować ściany o ile można. Gdy ściana jest oddaloną więcej niż na 17<sup>m</sup>, to dźwięki bezpośredni i odbity mają do przebieżenia razem drogę większą od 34<sup>m</sup>, na co potrzeba więcej niż 333 : 34, zatem więcej niż 0,1 sek. czasu; dźwięk odbity dochodzi do ucha później od dźwięku bezpośredniego, a spóźnienie to wynosi więcej niż 0,1 sek.; zostaje więc usłyszonym wyraźnie i oddzielnie od bezpośredniego. Przedmioty więcej oddalone mogą wytwarzać echo dwu lub trzy sylabowe; wielokrotne odbicia mogą mieć za skutek wielokrotne echa. Sławne są echa: przy Adersbach w Czechach (7 sylab 3 razy), w zamku Simonetta obok Medjolanu (wystrzał z pistoletu 50 razy), na skale Lurley (17 razy), między dwiema wieżami pod Verdan (13 razy), w Genetay (słyszalne nie na miejscu powstawania dźwięku, lecz na innym miejscu). Sławne galerie szepczące są: w kopule Ś-go Pawła, w kościele Glocesterskim, w jednym z pokojów paryzkiego obserwatorium astronomicznego. Chmury także odbijają dźwięk i przyczyniają się do zwiększania huku grzmotów i wystrzałów; na pełnym morzu wytwarzają nawet echo.

### **Załamowanie i uginanie się dźwięku. Przez załamanie dźwięku roz-** 276.

mie się zjawisko polegające na tem, że promienie dźwięku, przy przejściu w inny ośrodek, doznają pewnego odchylenia od posiadanego kierunku. Słuchamy tu prawo (232): wstawa kąta padania i wstawa kąta załamania są do siebie w stosunku stałym i równym stosunkowi prędkości dźwięku w obu ośrodkach ( $c : c'$ ).

Złamanie się dźwięku i stosowanie się doń przytoczonego prawa zostały okazane przez Hajech'a (1857). Użył on w tym celu błonami zamkniętych rur wypełnionych rozmaitemi gazami i cieczami; jedna z błon była prostopadłą do osi rury, druga pochyłą. Rury te wkładane były w kanał ściany odgraniczającej dwa pokoje: dźwięk wydany w jednym pokoju był słyszany w drugim na różnych miejscach rozmaicie stosownie do materiału ciała zawartego w rurze; dokładne pomiary kątów wykazały stosowanie się powyższego prawa. Według Sondhauss'a

trzymając za balonikiem z kolloidum, wypełnionym kwasem węglowym, zegarek, na pewnym oznaczonym miejscu balonika słychać chód zegarka bardzo wyraźnie dla tego, że w tym punkcie schodzą się promienie dźwięku, załamane przez balonik. Uginanie się dźwięku polega na tem, że dźwięk rozchodzi się także za ciałem którego krańców dotyka, że zatem promienie dźwięku na granicach ciał zginają się; stojąc za krawędzią, można słyszeć; jednak zachodzi znakomite osłabienie dźwięku tak, że w nieznacznej odległości od krawędzi nie słychać już dźwięku wcale. Jeszcze mniejsze jest uginanie się światła i ciepła z powodów przytoczonych w 233. Kolejne następstwo miejsc dźwięczących silnie i słabo w przestrzeni uginania, nie daje się zazwyczaj rozpoznać na rogach ulic, za ścianami komunikacyjnymi i t. d., gdyż dźwięki postronne zacierają wytworzone osłabienia między sąsiedniemi wzmocnieniami.

**277.** **Zasada Doppler'a (1842).** Gdy źródło brzmiące i ucho zbliżają się do siebie, ton podnosi się; gdy źródło brzmiące i ucho oddalają się od siebie, ton się zniża.

**Przykłady i stwierdzenia.** Gdy źródło tonu i ucho zostają w spoczynku, to do ucha dochodzi w sekundzie  $n$  fal zgęszczenia, przypuszczając, że ton wykonywa  $n$  drgań na sekundę; lecz jeżeli ucho zbliża się do źródła tonu, to przejmuje więcej zgęszczeń, tak samo jak okręt przerzyna więcej gór falowych wtedy, gdy płynie przeciw falom, niż wtedy gdy spoczywa. Naodwrot słuch uchyla się od pewnej liczby zgęszczeń oddalając się do źródła tonu. W pierwszym razie skutek jest ten, jakby ucho przejmowało w sekundzie więcej drgań, w drugim zaś, jakby ich doznawało mniej; w pierwszym razie ton wydaje się wyższym, w drugim niższym od tego, jakim jest istotnie. Jeżeli np. w pierwszym przypadku droga, o którą ucho zbliża się w 1 sek. =  $s$ , a długość fal =  $l$ , to na tej drodze leży  $s : l$  fal, albo  $ns : c$  fal, gdy  $l = c : n$ . Ucho zatem przejmuje liczbę drgań  $n' = n + ns : c = n(1 + s : c)$ ; dla ucha oddalającego się wypada  $n' = n(1 - s : c)$ . Dla zbliżania lub oddalania się źródła tonu otrzymują się bardzo łatwo podobne wyniki. Przy zbliżaniu się lokomotywy gwizdzącej słychać wyraźnie podwyższenie się tonu. Buys-Ballot ustawił (1845) na drodze żelaznej Utrecht = Maarsen trębaczy posiadających trąbki takie same jakie mieli trębacze znajdujący się na lokomotywie i zalecił muzykom mającym delikatny słuch porównywać wysokość zbliżających lub oddalających się tonów z wysokością tonu stałego; w ten sposób przekonał się o prawdziwości zasady i wzoru. Mach (1861) kazał obracać rurę bardzo długą, około osi przechodzącej przez środek długości rury; na jednym końcu rury znajdowała się piszczałka; przy zbliżaniu się i oddalaniu zauważył on kołysania tonu.

**278.** **Zadania.** 385. Studnia jest głęboka na  $100^m$ , po ilu sek. usłyszymy kamień w nią spadły? Rozw.  $\frac{1}{2} \cdot 9,808 x^2 = 100$ ; ztąd czas spadania  $x = 4,5$ ; czas potrzebny do przejścia dźwięku =  $100 : 333 = 0,3$ , więc czas szukany =  $4,8$  sek.

386. Jaka jest głębokość kopalni, w którą wrzucony kamień uderza o dno dopiero po 6 sek.? Rozwiąz. Niech czas spadku będzie  $x$ ; wtedy  $\frac{1}{2} \cdot 9,808 x^2 = 333(6-x)$ ; ztąd  $x = 5,6$  sek., zatem wysokość spadku =  $153^m$ .

387. W jakiej odległości powstaje piorun, gdy grzmot zaczyna się we 20 sekund po błyskawicy? Rozw. 6660<sup>m</sup>.

388. Przyjmując, że trwanie grzmotu zależy od długości promienia, oznaczyć długość błyskawicy, której grzmot słychać przez 1 min.? Rozw. 19980<sup>m</sup>.

389. Jaka jest prędkość dźwięku w gazie oświetlającym; c. w. = 0,5?—Rozw. 477<sup>m</sup>.

390. Jaka jest też prędkość w merkuryuszu? Rozw. Podług 274, równa się 1576<sup>m</sup>.

391. Jaka jest prędkość dźwięku w drucie stalowym lanym, którego c. w. = 7,7, a moduł sprężystości = 20000 kil.? Rozw. Wzór  $c = \sqrt{(eg : s)}$  daje 5000<sup>m</sup>.

392. Sztabka srebrna, długa na 0,4<sup>m</sup>, przytwierdzona w jednym końcu i potarta wydaje ton a<sup>3</sup>; jaka jest prędkość dźwięku w tej sztabce? Rozwiąz. 2784<sup>m</sup>.

393. Jaka jest prędkość dźwięku w powietrzu przy 3000° C.? Rozw. Według wzoru (40),  $c = 3994^m$ .

394. Jak prędko musi się zbliżać ucho do tonu a<sup>1</sup>, aby usłyszało h<sup>1</sup>; jak prędko, aby usłyszało oktawę; jak, aby nie słyszało? Rozw. 41<sup>5/8</sup><sup>m</sup>, zbliżyć się na 333<sup>m</sup> w sek., oddalać się na 333<sup>m</sup> w sek.

395. Źródło dźwięku daje n drgań na sekundę; wyprowadzić liczbę drgań przejmowanych przez ucho przy zbliżaniu lub oddalaniu się tego źródła o drogę s w sekundzie? Rozw.  $n' = nc (c \mp s)$ .

## ODDZIAŁ SZÓSTY.

# Nauka o Świetle czyli Optyka.

### 1. Definicje optyki.

**279.**      **Pojęcie o świetle i istota światła.** Światło jest siłą, dozwalającą nam widzieć ciała; wytwarzaniem jest ono bądź przez same ciała, bądź też pada na nie, i zostaje przez nie odbitem. Ciała, które same wytwarzają światło, nazywają się źródłami światła; te zaś, które stają się widzialnymi, świecącymi, dopiero przy pomocy obcego światła, nazywają się ciałami ciemnymi.— Światło jest wynikiem poprzecznych drgań eteru, drgań, których liczba w jednej sekundzie wynosi od 400 — 800 biljonów. Każda z tych rozmaitych liczb drgań powoduje wrażenie oznaczonej barwy; mało różne od siebie liczby drgań wytwarzają zblizzone do siebie barwy; najmniejsza liczba drgań, 400 biljonów, odpowiada kolorowi czerwonemu; dalej idą: pomarańczowy, żółty, zielony, niebieski, błękitny i fioletowy, powstający z największej liczby drgań eteru. W świetle zwyczajnem, drgania eteru, w każdym kierunku, są prostopadłe do promienia; jeżeli drgania są równoległymi do siebie, to światło przedstawia wtedy własności niezwykcyjne i nazywa się spolaryzowanym.

Pogląd ten na istotę światła jest tylko hipotezą, zwaną teorią undulacji światła, której pierwsze zasady podał Huyghens (1690); wielki Euler, w przeszłym stuleciu, sam tylko był jej obrońcą; inni badacze trzymali się teorii emanacji Newton'a (1692), poczytującej światło za nader delikatny, materjalny element, wypływający z ciał świecących. Najsilniejszy cios zadały tej drugiej teorii zjawiska interferencyi, będące zarazem główną podporą teorii undulacji. W nowszych czasach (1854) Foucault wykrył fakt, zaprzeczający bezpośrednio teorii wpływu; według tej bowiem teorii prawo załamania jest możliwem tylko wtedy, gdy światło rozchodzi się prędzej w ośrodku gęstszym, niż w rzadszym; Foucault zaś znalazł, ze swych bardzo starannych doświadczeń, że prędkość światła

w wodzie jest tylko  $\frac{3}{4}$  jego prędkości w powietrzu, fakt, nietylko zgadzający się z teorią falowań, lecz dawno w niej już przyjęty, a nawet wykryty teoretycznie. Wiedzano bowiem już od dawna, że przy przejściu światła z powietrza w wodę, wstawa kąta padania odnosi się do wstawy kąta załamania, jak 4 : 3; według teorii falowań, stosunek ten musi być równym stosunkowi prędkości rozchodzenia się. Teoria falowań zatem wypowiedziała już dawniej odkrycie Foucault'a; może ona również przepowiedzieć wiele i teraz: np., że prędkość światła w szkłe, znaleziona doświadczalnie, wyniesie  $\frac{2}{3}$  prędkości światła w powietrzu. Fresnel wykrył (1817), za pomocą rachunku, na zasadzie teorii falowań, kołową polaryzację światła, ze wszystkimi jej wynikami, jakkolwiek nikt do jego czasu nie zauważył śladu tych zjawisk, gdy tymczasem stały się one, po teoretycznym ich odkryciu, doświadczalnie widocznymi dla każdego i mają teraz praktyczne zastosowanie w fabrykach cukru. Jeżeli bowiem wachadło, w swem najwyższym położeniu, otrzyma uderzenie prostopadłe do płaszczyzny wachadła, to musi opisać koło lub elipsę; z tej samej przyczyny, spotykające się pod kątem prostym 2 drgania eteru, z których jedno w fazie, wyprzedza drugie o  $\frac{1}{4}$  trwania pojedynczego drgnięcia, wywołują drgania kołowe lub eliptyczne, przedstawiając światło spolaryzowane. Światło to wybitnie różniące się od zwyczajnego i spolaryzowanego prostolinijsnie i którego własności żadnym sposobem objaśnić nie można za pomocą teorii wypływu, jest prostym wynikiem teorii falowań; niektóre zjawiska analizy spektralnej zostały również naprzód wyprowadzonymi z teorii, a dopiero potem stwierdzonymi doświadczeniem. Fakta te przemawiają za teorią falowań, która pozwoliła wywieść, bez naciągania, wszystkie zjawiska świetlne dotąd zaobserwowane, co do rodzaju i wielkości; obecnie żaden fizyk o prawdziwości tej teorii nie wątpi.

Światło zatem odróżnia się od dźwięku: materiałem drgań (tu eter, tam materiał ciała), kierunkiem rozchodzących się drgań (tu poprzeczny, tam podłużny), liczbą drgań (tu 400—800 bilj., tam 16—38000) i amplitudą (obszernością) drgań (tu nieskończenie małe, tam mogące być zmierzonymi). Oprócz tego, światło rozchodzi się bez porównania prędzej niż dźwięk (42000 mil, tam 333<sup>m</sup> w powietrzu). Oba te działacze mają to wspólnego, że powyżej i poniżej podanych liczb drgań, wrażenia ich na oko i ucho ustają, jak również to, że rozmaite liczby drgań wywołują odmienne wrażenia (tu różne barwy, tam tony różnej wysokości).

## 2. Powstawanie światła.

**Źródła światła.** Źródłem wszelkiego światła, z wyjątkiem światła **280.** gwiazd stałych, jest słońce; gdyż i ziemskie źródła światła zawdzięczają swe światło słońcu. Według Bouguer'a (1725), światło słoneczne wyrównywa światłu 11664 świec woskowych w 16'' par. odległości. Światło księżyca, będące tylko odbitem światłem słonecznym, jest, według Zöllner'a, od słonecznego 600000 razy słabszem; jeszcze słabszem jest światło gwiazd stałych i planet. Według Herszla, światło pełni księżycowej jest 27408 razy silniejszym od światła  $\alpha$  Centauri; natężenie światła słonecznego, podług

Wollaston'a, jest 20000 milj. razy większem, niż natężenie światła Syryusza, który jest najjaśniejszym ze wszystkich, widzialnych dla nas, gwiazd stałych. Nowe poszukiwania Zöllner'a, dokonane za pomocą jego astrofotometru, wykazały, że światło Jowisza jest 5472 milj. razy, a Neptuna 80 bilj. razy słabszem od światła słońca. Ciała ziemskie, rozgrzane do pewnej, oznaczonej temperatury, stają się źródłami światła; wszystkie ciała, według Draper'a (1847), zaczynają żarzyć się przy 525° światłem czerwonym, a przy 1170° dochodzą do białości. Zwyczajne ziemskie źródła światła pochodzą od gorąca, będącego skutkiem spalenia; cząsteczki bowiem ciał stałych w płomieniu żarzą się. Strumień elektryczny i uderzenie elektryczne (iskry i strumienie iskier) mogą także wytwarzać tak wysokie temperatury i tak silne wstrząśnienia, że sprawiają światło. Najsilniejszymi ziemskimi źródłami światła są: światło Drummond'a powstające przy paleniu się kredy lub magnezy w płomieniu mieszaniny piorunującej, światło węglowo-elektryczne, powstające przy przejściu strumienia elektrycznego przez dwa ostrza z węgla, światło fosforu palącego się w czystym tlenie, światło magnezium.

Przyczyną światła słonecznego jest wysoka temperatura tego ciała; według nowszych badań, na słońcu panuje gorąco na wiele tysięcy stopni, gorąco zdające się pochodzić bądź z kurczenia się słońca, bądź z uderzeń o słońce mniejszych ciał niebieskich, meteorytów i komet, bądź też ze wspólnego działania obu tych przyczyn, w czasach niepamiętnych. Cząstki słońca wykonywają na sek. przeszło 1000 bilj. drgań; drgania te przenoszą się na eter słońca i rozchodzą się, według praw ruchu falowego, w eterze przestrzeni, we wszystkich kierunkach. Przyczyna światła ciał ziemskich leży również w ich ciepłe; gdyż jak wiadomo, ciepło w ciałach stałych i ciekłych pochodzi z drgań cząsteczek; drgania te przy wzrastającej temperaturze powiększają się nie tylko w długości, lecz i w liczbie. Przy 525° liczba drgań dochodzi do 400 bilj., przy 655° przybývają rozplómiennienia pomarańczowe, żółte i zielone, przy 800° powstaje żar niebieski, a przy 1170° występują wszystkie możliwe odcienia fioletowe, dające, w połączeniu z poprzednimi, żar białości. Spalenie jest połączeniem chemicznem, t. j. wzajemnem zbliżaniem się atomów, stosunkowo bardzo od siebie odległych, zachodzącym na mocy przyciągania; ponieważ przyciąganie to, przy rosnącym zbliżaniu się, staje się coraz większem, przeto prędkość wzrasta w stosunku uwielokrotnionym; przy możliwie największem zbliżeniu ruch postępowy nagle ustaje, a cała wytworzona praca zamienia się w drgania, w ciepło, którego podwyższenie łączy się z wytworzeniem światła.

**281. Fosforescencya.** Przez fosforescencyę rozumiemy świecenie ciał przy zwyczajnej temperaturze; świecenie to daje się widzieć tylko w ciemności, w niej bowiem oko uwolnione od silniejszych podrażnień, zaczyna dopiero oceniać słabe światło fosforescencyi. Nazwa tego zjawiska pochodzi od świecenia fosforu w ciemności, jakkolwiek przed odkryciem fosforu znane było świecenie dyamentu (Albertus Magnus, wiek XII) i ciężkiego spatu bolońskiego.



go (Vincenzio Cascariolo 1602). Ciała fosforyzują z rozmaitych przyczyn:

1. *Powolne palenie się*; tu należą: świecenie gnijącego drzewa, gnijących ryb, gnijącego mięsa; wielu uważa także świecenie fosforu za skutek powolnego utleniania się, a świecenie jego w próżni, w azocie czystym i t. d., przypisuje niemożebności zupełnego usunięcia tlenu.
2. *Insolacya*, to jest wpływ promieni słońca lub silnego sztucznego światła. Według Becquerel'a (1840—60), wszystkie ciała świecą po insolacyi, niektóre długo, największa ich liczba bardzo krótko, najkrócej ciecze i gazy. Najlepiej fosforyzują kamienie świecące sztuczne: połączenia siarki z metalami alkalicznymi lub z metalami ziem alkalicznych; boloński kamień świecący, proszek spatu ciężkiego, pozbawiony żelaza, wypalony z dragantem; fosfor Balduin'a (1777), kreda kamienna rozbita na proszek, napojona kwasem saletrzanym i wypalona z białkiem jajka; fosfor Cantona (1768), powstający ze zmieszania muszli od ostryg z proszkiem siarki. Minerale świecące naturalne są najczęściej połączeniami wapienia i bariumu.
3. *Działania mechaniczne*. Krzemień, cukier, kreda, mika, błyszczą przy rozbijaniu ich lub rozłupywaniu.
4. *Ciepła*. Ciała fosforyzujące przez insolację, świecą także skutkiem ogrzania; niektóre metale po ogrzaniu świecą dosyć silnie, a po insolacyi zaledwie dostrzegalnie.
5. *Elektryczność*. Strumień iskier elektrycznych podwyższa zdolność fosforyzacyjną ciał, lub ją na nowo obudza; świecenie wielu rurek Gejssler'a, po doświadczeniu, bywa przypisywane śladom bezwodnego kwasu siarczanego; niektórzy objaśniają także świecenie się morza, wpływami elektrycznymi ze zwierząt morskich.
6. *Proces życiowy wielu zwierząt i roślin*: robaczek świętojański i chrząszcz świecący, wiele zwierzokrzewów, wymoczków i skorupiaków, równie jak rzerzucha kapucyńska, nogietek, złotokwiat i inne rośliny świecą w ciemności.

Fosforescencya przez insolację może być objaśniona podobnie jak oddźwięk. Drgające atomy eteru przenoszą powoli swe ruchy na atomy ciała, przyczem liczba drgań zazwyczaj się zmniejsza; po ustaniu insolacyi, atomy ciała, wskutek większej swej siły życiowej, odbywają dalej swe drgania i przesyłają je atomom eteru. Zagadką jest dotąd, dla czego ciała, po insolacyi, nie świecą jednakowo długo; Emsmann (1857) przyjmuje, że pewna siła spójności utrzymuje atomy w ich stanie, i że ona jest rozmaita dla różnych ciał; przy małej sile tej wzajemnej zależności atomów, przyswajają one sobie łatwo drgania eteru, lecz równie łatwo je tracą, gdy tymczasem przy większej sile zależności, atomy trudniej przystosowują się do szybszego ruchu, lecz nabyty zachowują dłużej, a ztąd dłużej fosforyzują. Badania Becquerel'a z fosforoskopem zdają się potwierdzać to wyjaśnienie; w jego przyrządzie ciało fosforyzujące znajduje się między dwoma krążkami opatrzonymi wycinkami nie odpowiadającymi sobie, tak, że z jednej strony ciało może być opromienionem, a z drugiej strony obserwowanem, bez wystawienia obserwatora na bezpośrednie działanie światła; krążki mogą być obracane szybko lub

powoli, wskutek czego opromienianie i obserwacja fosforescencji mogą być dokonane, według woli, ciągle lub chwilowo. Za pomocą tego przyrządu można obliczyć czas trwania fosforescencji; dla różnych ciał trwanie to zawiera się między 35 godzinami i 0,0001 sek. Fosforescencja jest wytwarzaną przeważnie przez promienie wykonywujące więcej niż 800 bilj. drgań, czyli przez tak zwane zafioletowe promienie; powstaje więc ona działaniem światła elektrycznego i światła magnezyum; nie wytwarza jej światło gazowe lub świec, jako nie zawierające promieni zafioletowych.

### 3. Rozchodzenie się światła.

**282.** **Promienie światła.** Przez promienie światła rozumiemy linije, po których światło rozchodzi się. Światło rozchodzi się w przestrzeniach świata, również jak w ciałach, gdyż eter znajduje się wszędzie; ciała stosownie do ilości przepuszczanego światła, nazywane są: przezroczystymi, półprzezroczystymi i przeświecającymi; ciała wcale nieprzepuszczające światła nazywają się nieprzezroczystymi. Promienie światła idą od punktu świecącego we wszystkich kierunkach; w ośrodku jednorodnym promienie światła są linijami prostymi.

Dowód tych dwóch twierdzeń polega na tem, że światło jest ruchem falowym; te dwa twierdzenia bowiem mają zawsze miejsce przy ruchu falowym w ośrodku jednorodnym. Punkt świecący jest widzialnym ze wszystkich stron; własność ta jest doświadczalnym dowodem twierdzenia pierwszego. Jeżeli na linii łączącej punkt świecący z okiem umieszczone zostanie ciało nieprzezroczyste, punkt świecący zniknie dla oka; fakt ten jest doświadczalnym uzasadnieniem drugiego twierdzenia.

**283.** **Skutki prostoliniowego rozchodzenia się światła.** 1. Cieniem na ciele nieprzezroczystym nazywamy to miejsce, które nie otrzymuje żadnego światła. Rozróżniamy cień właściwy i przestrzeń cienia; cień właściwy jest tą częścią ciała nieprzezroczystego, która nie jest oświetlona; przestrzeń cienia jest przestrzenią za ciałem, w którą albo wcale promienie nie wchodzi, albo też do której dostaje się mniej światła, niż do pozostałej przestrzeni naokoło ciała. Jeżeli źródłem światła jest nie punkt, lecz ciało, to w przestrzeni cienia odróżnia się cień główny od półcienia; cień główny jest tą przestrzenią, która nie otrzymuje światła od żadnego punktu ciała świecącego; półcień zaś jest przestrzenią oświetloną tylko przez pewną część tegoż ciała. Gdy źródłem światła jest punkt, to przestrzeń cienia jest stożkiem ściętym, albo ostrosłupem ściętym, którego podstawą mniejszą jest granica ciała, a którego drugi koniec powoli ginie; jeżeli źródło światła jest bardzo od ciała odległym, jak np. słońce od przedmiotów ziemskich, to przestrzeń cienia jest pryzmatyczną lub walcową o kierownicy oznaczonej granicą ciała. Cień padający na powierzchnię jest przecięciem się tej powierzchni z walcem cienia, albo z ostrokągiem cienia. Jeżeli źródło światła nie jest punktem, to forma cienia właściwego jest z warunkowaną kształtem i wielkością źródła światła i ciała. Jeżeli źródło światła i ciało są kuliste i pierwsze

większe od drugiego, jak to ma miejsce dla słońca, jego planet i satelitów, to cień główny ma postać ostrokągu, którego powierzchnia dotyka obu ciał (fig. 126); półcień jest ostrokągiem ściętym, którego linie boczne dotykają obu ciał, a którego podstawa mniejsza jest cieniem ciała, i który, ku podstawie większej, powoli się rozprasza. Ponieważ przecięcie ostrokągu prostopadłe do jego osi jest kołem, przeto smuga cienia padając na powierzchnię doń prostopadłą, tworzy wpół ciemne koło rozjaśniające się ku zewnątrz i zamykające w sokie koło zupełnie ciemne, jeżeli cień główny także pada na powierzchnię. Geometria pozwala obliczyć łatwo wymiary cienia. Twierdzenia o cieniach mają ważne zastosowanie przy zaćmieniach słońca i księżyca. Przy zaćmieniu księżyca, pełnia wchodzi w bardzo silny cień ziemi, a przy zaćmieniu słońca nów zagradza nam widok słońca i rzuca swój cień na ziemię; te punkta ziemi, których dotyka cień główny księżyca, mają całkowite zaćmienie słońca; te zaś które są dotknięte tylko półcieniem, doznają cząstkowego zaćmienia słońca; obrączkowe zaćmienie jest widzialne z tych punktów, które leżą na przedłużeniu głównego cienia księżyca. Bliższe szczegóły w fizyce nieba.

2. *Kamera optyczna* (Leonardo da Vinci 1500). Jeżeli przez otwór zrobiony w ścianie wpadają promienie światła w przestrzeń ciemną, to na ścianie przeciwnej tworzą się obrazy odwrotne przedmiotów, od których idą promienie światła. Z każdego bowiem punktu tych przedmiotów, gdy te są widzialne, czyli oświetlone, wychodzą promienie światła we wszystkich kierunkach, a więc i przez otwór; od punktu fizycznego idzie cała wiązka promieni świetlnych, zawierająca dużo promieni, gdy punkt jest jasny, a mało tychże promieni, gdy jest słabo oświetlony; jeżeli punkt fizyczny jest ciemny, to wiązka odeń myśla przez otwór przeprowadzona, nie zawiera wcale promieni świetlnych. Położenie prostych przechodzących przez jeden punkt, na przecięciu jest



Fig. 126.

odwrotne względem linii przedmiotu; wiązka więc promieni świetlnych, wchodząca przez otwór w przestrzeń ciemną musi mieć położenie odwrotne względem położenia swego przed kamerą. Wiązka bogata w promienie tworzy na przeciwległej ścianie miejsce jasne, uboga w promienie—miejsce słabo oświetlone, a pomyślana, ciemna wiązka—odpowiadające jej miejsce ciemne; na ścianie zatem zachodzą też same stopniowania miejsc jasnych, półjasnych i ciemnych co i na samych przedmiotach, lecz w położeniu odwrotnem; tworzy się przeto obraz odwrócony. Obraz jest tem większy, im mniejszą jest odległość przedmiotów od otworu; na zwiększenie jego wpływa także zwiększenie odległości otworu od powierzchni obrazu; obraz jest tem wyraźniejszy, im otwór jest mniejszym, lecz przy zwiększaniu się

wydatności maleje jego jasność, wskutek czego i wyraźność się zmniejsza. Otwór zawięty jest przyczyną obrazu niby zatartego; taki bowiem obraz można uważać za złożony z wielu mniejszych, nałożonych na siebie, wskutek czego na każdym miejscu powierzchni obrazu schodzi się wiele obrazów mających położenia różne, które to obrazy zacierają się wzajemnie. Całkowita rozwartość okna nie tworzy więc na ścianie przeciwległej żadnego obrazu, lecz daje tylko ogólne wyobrażenie o większej lub mniejszej jasności przedmiotów zewnętrznych. Przeciwnie, małe otworki w zamkniętych okiennicach, lub przedziałki między liśćmi altany dają obrazy słońca kołowe lub eliptyczne, jakkolwiek same posiadają najróżnorodniejsze kształty. W czasie cząstkowego zaćmienia słońca, tworzą się obrazy słońca sierpowate. Przez rurę tekturową, zamkniętą szkłem matowem, przesuwalną w drugiej rurce mającej w dnie mały otwór można widzieć na tafelce szklanej obrazy przedmiotów; taka rurka jest kamerą optyczną na małą skalę.

*3. Perspektywa.* Wystawmy sobie, że od pojedynczych wydatnych punktów przedmiotu idą linie proste do oka, i że pojedyncze punkta przecięć się tych prostych z pionową płaszczyzną obrazu, umieszczoną między okiem a przedmiotem, zostały połączone takimi linijami, jakie istnieją na ciele uważanem; wyobraźmy sobie nadto, że pojedyncze tak otrzymane figury zostają opatrzone światłem, cieniem i barwami w taki sam sposób, jak i przedmiot; widoczną jest rzeczą, że powstały obraz wywrze na oko toż samo co przedmiot wrażenie. Obraz taki nazywa się perspektywą, albo obrazem perspektywicznym przedmiotu. Nauka perspektywy jest podstawą nauki rysunku i malarstwa.

*4. Wytykanie linii prostych w miernictwie.* W celu wytknięcia z pewnego punktu linii prostej na gruncie ustawia się tykę w tym punkcie, a inne tyki w ten sposób, aby były zakryte dla oka przez tykę pierwszą; dokładniej wykonywa się to za pomocą dioptry, albo lunety z krzyżem nicianym. Pierwsza składa się z linijału poziomego opatrzonego na końcach pionowymi ramionami; w jednym z ramion jest szpara pionowa, w drugim duży otwór z pionowo nastawionym włosem końskim. Oko znajduje się na linii prostej z włosem i z przedmiotem, gdy te ostatnie padają na siebie. Krzyż niciany w lunecie składa się z dwóch nitek, jednej poziomej, drugiej pionowej, krzyżujących się w osi lunety; prosta jest wytkniętą, gdyż krzyż niciany pokrywa przedmiot.

284.

**Natężenie światła.** Siła działania świetlnego pewnego źródła światła, czyli natężenie światła na pewnym miejscu zależy: 1. Od siły powstającego światła; jest do niej wprost proporcjonalne. 2. Od odległości od źródła światła; natężenie światła jest odwrotnie proporcjonalne do kwadratu z odległości. 3. Od ośrodka, w którym światło rozchodzi się; natężenie jest tem mniejsze, im ośrodek silniej pochłania. Jeżeli światło pada na powierzchnię, to siła oświetlenia zależy jeszcze: 4. Od kąta pochylenia promienia światła do powierzchni; siła oświetlenia jest proporcjonalną wstawy kąta nachylenia promienia światła do powierzchni. 5. Od zdolności odbijającej tej powierzchni; jeżeli powierzchnia nie odbija, to nie jest oświetloną; jeżeli odbija całe padające nań światło, to jest silnie oświetloną; jeżeli zaś odbija tylko

pewną część lub też pojedynczą składową barwę światła, to jest oświetlona słabiej.

1. Siła źródła światła zależy od jego natury i wielkości rozżarzenia się ciał lub cząstek w płomieniu; gdyż przy rosnącej temperaturze, zwiększa się nie tylko liczba drgań pewnej części atomów, lecz także i obszerność drgań innej ich części; najsilniejszym jest światło przy rozżarzeniu do białości. Działanie światła jednak nie jest proporcjonalnem do liczby drgań, gdyż maximum tego działania otrzymuje się z promieni żółtych, a nie z fioletowych; żółte więc promienie muszą mieć albo największą obszerność albo też oko jest na nie najbardziej uwrażliwionem. 2. Zależność natężenia światła od odległości, wyrażona odwrotnym stosunkiem kwadratów wypływa z pojęcia światła, uważanego za ruch falowy. W 299 twierdzenie to ogólnie udowodnionem zostało. Łatwo jednak okazać je geometrycznie: wystawmy sobie wierzchołek ostrosłupa za źródło światła, a światło rozchodzącem się we wnętrzu tego ostrosłupa; według jednego z twierdzeń geometrycznych, światło w podwójnej odległości względem uważanej, trafi na powierzchnię 4 razy większą, na odległości potrójnej, padnie na powierzchnię 9 razy większą a na odległości  $n$  razy większej, na powierzchnię  $n^2$  razy większą; równe części tej ostatniej powierzchni otrzymają światło  $n^2$  razy słabsze od światła na jednostce odległości. Ważne to twierdzenie można okazać doświadczalnie za pomocą jakiegokolwiek fotometru, np. Ritchie'go (1825); fotometr ten składa się z poczernionej skrzynekki, w środku której znajdują się 2 równe zwierciadła, nachylone pod kątem  $45^\circ$  do poziomu; w górną część skrzynki wchodzi rurka ciemna, przez którą można patrzeć na zwierciadła. Ustawwszy, w jakiegokolwiek odległości od jednego otwartego końca świecę, trzeba w podwójnej odległości od drugiego końca otwartego postawić 4 takież świece, aby otrzymać jednakie oświetlenie obu zwierciadeł. 3. Pochłanianie światła, to jest zużycie światła przez ośrodek, będzie rozważane później. 4. Puszczając wiązkę promieni światła, której grubość równa się bokowi trójkąta prostokątnego, na tenże bok trójkąta, a następnie na przeciwprostokątną tegoż samego trójkąta, wiązka oświetli całą przeciwprostokątną i rozdzieli na niej swe światło: równe długości przeciwprostokątnej, jako linii większej od boku, otrzymają mniej światła niż takież długości boku, i mniej w takim stosunku, w jakim bok jest mniejszy od przeciwprostokątnej; stosunek ten jest wstawą kąta przeciwległego uważanemu bokowi, t. j. kąta pochylenia promieni do przeciwprostokątnej; przeto siła oświetlająca jest proporcjonalną do wstawy kąta nachylenia. I to twierdzenie można okazać doświadczeniem na fotometrze Ritchie'go. Biała powierzchnia rozmaicie nachylona względem światła lampy, dozwala łatwo dostrzedz przyrost lub ubytek oświetlenia. 5. Zależności odbicia będą później rozbiegane.

**Fotometrya.** Fotometry ( $\rho_{\text{fot}}$ , światło) są przyrządami do porównawczych pomiarów natężeń światła. Opierają się one na twierdzeniu o odwrotnym stosunku natężenia źródła światła do kwadratu z odległości. Najważniejszymi są: 1. Fotometr cieniowy Lambert'a (1760); 2. Fotometr zwierciadlany Ritchie'go (p. 284); 3. Fotometr Bunzen'a (1857); mniej odpowiedniemi do ogólnego zastosowania zdają się być: fotometr Wheatstone'a, fotograficzny fotometr Doves'a i fotometr polaryzacyjny Wilda. Za jednostkę

siły świetlnej, przy zwyczajnych poszukiwaniach fotometrycznych, przyjmuje się światło świecy woskowej 6-cio funtowej (6 na funt); płomień badany umieszcza się w takiej odległości od fotometru, aby nań wywierał tenże sam wpływ co świeca normalna; natężenie światła płomienia i natężenie światła świecy, mają się do siebie w stosunku prostym kwadratów z tych odległości.

Fotometr Lambert'a składa się ze sztabki umieszczonej przed tablicą, na którą padają cienie sztaby rzucane przez porównywane źródła światła. Cień światła silniejszego jest oświetlony światłem słabem, a cień słabszego światła, silniejszym; pierwszy cień przeto wydaje się ciemniejszym od drugiego. Odsuwając od tablicy źródło silniejsze dotąd, dopóki oba cienie nie będą jednakiej mocy, otrzymamy jednakie działania obu źródeł światła. Fotometr Bunzen'a składa się z ćwiartki papieru, splamionej w jednym miejscu tłuszczem. Plama tłuszczowa przepuszcza więcej światła, niż czysty papier; przeto, po stronie źródła silniejszego, plama musi się wydawać ciemniejszą od papieru, a po stronie słabszego źródła, jaśniejszą od papieru. Lecz jeżeli z obu stron siły światła są sobie równe, to z drugiej strony przechodzi przez plamę na pierwszą tyleż światła, ile przechodzi z pierwszej na drugą; strata więc światła spowodowana przez plamę, zostaje nagrodzona; plama wydaje się tak jasną jak papier. Aby więc porównać za pomocą fotometru Bunzen'a płomień badany ze świecą normalną, stawia się świecę po jednej stronie papieru, a z drugiej przesuwa się płomień tam i napowrót dotąd, dopóki plama i papier nie wydadzą się jednakowemi; natężenia światła będą wtedy wykazane kwadratami z odległości. W rozumowaniu powyższem nie zwracaliśmy uwagi na pochłanianie światła przez papier, które uwzględni się przy pomiarach dokładnych, gdyż według Bohn'a, plama pochłania więcej światła niż papier. Skutkiem tego plama dla jednakich źródeł, w równych odległościach wydaje się ciemniejszą od papieru. Objaśnienie tego znajdziemy najprościej przyjmując, że papier wcale nie pochłania, plama zaś bardzo mało. Uważajmy krążek z jednej strony: do oka dochodzi światło przeszłe z drugiej strony i światło odbite do strony pierwszej. Gdy przez papier przebywa tyle właśnie światła, ile go zeń wyszło, przez plamę wskutek pochłaniania, dostaje się cokolwiek mniej niż przechodzi, a plama skutkiem pochłaniania odbija cokolwiek mniej; z tych przyczyn plama musi się wydawać ciemniejszą od papieru. Światło po stronie obserwatora musi być cokolwiek więcej przysunięte do krążka, aniżeli światło po drugiej stronie, aby plama i papier wydawały się jednakowo oświetlonemi. Po dokonaniu tego usuwa się światło świecy, a w jego miejsce ustawia się płomień badany w takiej odległości od fotometru, aby nastąpiła powyżej opisana równowaga; wtedy można powiedzieć z całą dokładnością, że stosunek płomienia do usuniętej świecy normalnej wyraża się stosunkiem kwadratów z ich odległości.

**286. Prędkość światła.** Ponieważ prędkość ruchu falowego ( $c = \sqrt{\frac{e}{d}}$ )

zależy tylko od sprężystości i gęstości ośrodka, nie zaś od liczby i wielkości drgań, przeto i prędkość światła jest niezależną od barwy i natężenia światła i w ogóle od własności źródła światła, co zostało stwierdzonem doświadczal-

nie. Ze wzoru przytoczonego nie można obliczyć prędkości światła, gdyż sprężystość i gęstość eteru są nieznanne. Starano się oznaczyć prędkość światła przez obserwację i doświadczeniem, i znaleziono średnią prędkość 42000 mil. Użyto metod: 1. Za pomocą zaćmienia satelitów Jowiszowych (Olaf Römer 1676); 2. Za pomocą aberracji światła gwiazd stałych (Bradley 1727); 3. Metody 2-ch lunet i koła zębatego (Fizeau 1849); 4. Metody siedmiu zwierciadeł, z mikroskopem (Foucault 1862).

1. Pierwszy satelit Jowiszowy, którego czas obiegu wynosi 42 god. 28' 35'', wchodzi za każdym obiegiem w cień Jowisza, przedstawia więc jedno zaćmienie przy każdym obiegu. Satelit ten wychodzi z zaćmienia zawsze po oznaczonym czasie, jeżeli ziemia obiega te okolice swej drogi, które są prostopadłe do linii łączącej ją z Jowiszem, czyli takie, w których ziemia albo zbliża się do Jowisza, albo się odeń oddala. Gdy ziemia oddala się od Jowisza, satelit wychodzi później z zaćmienia, gdyż wynurzające się światło, musi w tym przypadku zdążyć za ziemią o całą drogę, którą ona w czasie zaćmienia przebyła. Satelit wychodzi pozornie cokolwiek wcześniej z zaćmienia, jeżeli ziemia zbliża się do Jowisza, gdyż ziemia idzie w tym razie przeciw światłu, a wskutek tego spotyka je wcześniej. Wszystkie opóźnienia w połowie roku, po jednej stronie drogi, wynoszą razem 16 m. 26,38 sek.; tyleż wynoszą i przyspieszenia po drugiej stronie drogi; w tym czasie zatem ziemia oddaliła się lub zbliżyła do Jowisza o całą średnicę przebieganej drogi; w 986,38 sek. światło przebyło średnicę drogi ziemskiej równą 41364658 mil., z kąd na prędkość światła wypada 41935 mil. 2. Jeżeli kula wypuszczona z działa skierowanego prostopadłe do długości *spokojnie stojącego* statku, ma przejść przez rurę na tym statku będącą bez uderzenia, to rura sama musi mieć położenie prostopadłe, do długości statku. Lecz jeżeli kula ma przejść, również bez uderzenia, przez statek płynący, rura musi być pochyłą względem statku. Kąt jaki ta rura pochyła czyniłaby z pionową, byłby widocznie niezależny od odległości działa, lecz zależny od prędkości statku i od prędkości kuli. Podobnie i luneta służąca do obserwacji gwiazd, musi mieć kierunek odmienny od linii łączącej gwiazdę z okiem; gwiazda wydaje się przesunięta ze swego miejsca o pewien kąt, zwany aberracją światła; aberracja roczna wynosi 40,5''. Jeżeli zastosujemy tę wartość do trójkąta prostokątnego, który tworzy na statku rura pochyła i prostopadła, i jeżeli uwzględnimy, że ziemia w jednym półroczu biegnie przeciwnie niż w drugim, że zatem zamiast trójkąta prostokątnego powstaje trójkąt równoramienny, to do trójkąta prostokątnego użyjemy kąta równego połowie 40,5'', czyli 20,25''. Bok mu przyległy jest w naszym przypadku prędkością światła  $c$ , bok przeciwległy—prędkością ziemi  $= 4,15$  mil; ma więc miejsce równanie:  $c = 4,15 : \operatorname{tg} 20,25' = 4,15 : 0,0001 = 41500$  mil.

3. Fizeau puścił, na zwierciadło ukośnie przymocowane w lunecie, boczną wiązkę świetlną; wiązka ta po odbiciu się i przejściu między dwoma zębami koła zębatego udawała się do drugiej lunety, w odległości 8633<sup>m</sup>, odbijała się od zwierciadła tej drugiej lunety, wracała przez miejsce próżne między zębami, do oka obserwatora stojącego na drugim końcu pierwszej lunety. Oko więc widziało punkt, z którego wychodziła wiązka promieni, miało to miejsce przy wolnym obrocie koła, gdyż promień wracał wcześniej niż ząb zdołał przy-

być na miejsce poprzednio próżne; lecz przy obrocie tak szybkim, że czas przebiegu promienia tam i napowrót, był równym czasowi, potrzebnemu do przejścia zęba na miejsce poprzednio próżne, punkt świetlny znikał dla oka. — Dla koła o 720 zębach i 720 przedziałach następowało to zniknięcie przy 12,6 obrotach na sek.; w czasie więc wynoszącym  $1 : (1440 \cdot 12,6) = \frac{1}{18144}$  sek., światło przebyło przestrzeń 2.8633<sup>m</sup>, więc prędkość światła wynosi 17266 · 18144<sup>m</sup> = 42200 mil. Podobnym sposobem znalazł Fizeau, że prędkość światła w wodzie wynosi  $\frac{3}{4}$  prędkości światła w powietrzu. 4. Foucault odbił wiązkę promieni słonecznych od zwierciadła srebrnego opatrzonego podziałami w odległości, jeden od drugiego, równej 0,1<sup>mm</sup>; puścił następnie tę wiązkę na zwierciadło równe, ruchome, a następnie na 5 zwierciadeł wklęsłych. Gdy zwierciadło ruchome było w spoczynku, to obraz podziałów padał na same podziały; mikroskop pokazywał podziały w tej samej liczbie i w tem samym położeniu. Lecz gdy zwierciadło ruchome było obracane tak szybko, że przy powrocie wiązki świetlnej od 5-ciu zwierciadeł wklęsłych, miało już inny kierunek, niż przy wyjściu wiązki, obraz podziałów padał na zwierciadło srebrne, lecz nie pokrywał samych podziałów. Z odległości obrazu od podziałów i z wielkości obrotu zwierciadła ruchomego, łatwo znaleźć czas zużyty przez światło na przebycie drogi między 5-ciu zwierciadłami, tam i napowrót; wielkość tej drogi łatwo obliczyć z odległości zwierciadeł od siebie. Foucault znalazł ztąd prędkość światła = 40145 mil, a więc mniejszą niż z 3-ch poprzednich metod. Z tą mniejszą liczbą zgadza się okoliczność, że cały szereg faktów astronomicznych skłania do przyjęcia, iż odległość ziemi od słońca jest mniejszą, niż wypadająca z dawniejszych rachunków. Jeżeli tak jest rzeczywiście, to w pierwszej metodzie trzeba zmniejszyć średnicę drogi ziemskiej, a w drugiej prędkość ziemi, wskutek czego i prędkość światła okaże się mniejszą. Stanowczego rozstrzygnięcia pytania, czy odległ. ziemi od słońca wynosi 21 czy też 20 milj. mil. a prędkość światła 42000 mil, czy 40000 mil, spodziewamy się od przejść Wenusy w 1874 i 1882 roku, do obserwacyi których robią się już teraz przygotowania.

287.

*Zadania.* 396. Liczba drgań najpowolniejszych promieni fioletowych wynosi 790, a najszybszych czerwonych promieni 472 biljony; jaka jest długość fal tych promieni? Rozw. 0,0003928<sup>mm</sup>, 0,0006564<sup>mm</sup>.

397. Długość fali najciemniejszych promieni ciepła wynosi 0,0048<sup>mm</sup>, a najbardziej krańcowych zafioletowych promieni 0,0003<sup>mm</sup>; jakie są liczby drgań tych promieni i ile oktaw zawierają drgania eteru? Rozw. 65 bilj., 1040 bilj., 4 oktawy.

398. Czem powinny odróżniać się drgania żółte od czerwonych i fioletowych, gdyby miały 2 i 3 razy większe natężenie światła niż te ostatnie? Rozw.  $\sqrt{2}$  i  $\sqrt{3}$  razy większą obszernością.

399. Przedstawić tabelę porównawczą istoty światła z istotą dźwięku; materiał dostateczny zawiera się w 279.

400. Porównać natężenie światła Syryusza z natężeniem światła  $\alpha$  Centauri? Rozw. Podług liczb podanych w 280, 20000 i 16445.

401. Jeżeli Venus w największym blasku świeci 623 milj. razy słabiej niż słońce, w jakim stosunku jest jej blask do blasku Jowisza, który według



tych samych (amerykańskich) danych, 3028 milj. razy słabiej świeci niż słońce?  
Rozw. 5 : 1.

402. Jak znajduje się cień punktu, linii, powierzchni, ciała, na płaszczyźnie, jeżeli źródło światła jest punktem blizkim, i nieskończenie oddalonym?  
Rozw. Dla punktu: prowadzi się przez ten punkt promień światła i oznacza się punkt przecięcia tego promienia z płaszczyzną; ten ostatni punkt jest cieniem.

403. Jak wysoka jest wieża, której cień jest długi na  $40^m$ , jeżeli laska obok niej stojąca, wysoka na  $1^m$ , rzuca cień długości  $60^c$ ? Rozw.  $66\frac{2}{3}^{11}$ .

404. Jak długi jest cień wieży wysokiej na  $100^m$ , jeżeli słońce wznosi się nad horyzontem na  $45^0$ ? Rozw.  $100 : \operatorname{tg} 45^0 = 100^m$ .

405. Oznaczyć wysokość wieży, która przy wzniesieniu się słońca na  $30^0$  rzuca cień  $50^m$  długi? Rozw.  $28,83^m$ .

406. Jak długi jest cień wieży  $h^m$  wysokiej, 21 marca w południe, w Moguncyi? Rozw.  $h \cdot \operatorname{cotg}(90-50) = h \cdot \operatorname{cotg} 40^0$ .

407. Oznaczyć wysokość sztaby, która 21 czerwca w Moguncyi, rzuca cień w południe, długości  $s$ ? Rozw.  $s \cdot \operatorname{tg} 63\frac{1}{2}^0$ .

408. Jak długą jest przestrzeń cienia kuli o promieniu  $r$  od słońca o promieniu  $R$ , jeżeli odległość środków wynosi  $s$ ? Rozw.  $rs : (R-r)$ .

409. Wskazać długość ostrokregów cienia ziemi i księżycy. Rozwiązanie: 180180, 50000 mil.

410. Jak wielki jest promień ostrokregu cienia (zad. 408) w odległości  $e$ ?  
Rozw.  $r = e(R-r) : s$ .

411. Jaka jest grubość cienia ziemi, w miejscu gdzie księżyc przezeń przechodzi? Rozw. 1240 mil.

412. Jaki jest promień półcienia w zadaniu 410? Rozw.  $[rs + e(R+r)] : \sqrt{[s^2 - (R+r)^2]}$ .

413. Jak wielkim wydaje się obraz słońca w kamerze optycznej, na tablicy oddalonej na  $1^m$ , przez otwór mający  $1^c$  średnicy? Rozw. Słońce ukazuje się nam pod kątem  $32'$ , przeto średnica obrazu słonecznego  $= 1 + 2 \cdot 100 \operatorname{tang} . 16' = 1,93^c$ .

414. Rozwiązać to zadanie ogólnie, gdy  $d$  jest średnicą otworu, a  $s$  odległością tablicy? Rozw.  $d' = d + 2s \cdot \operatorname{tg} 16'$ .

415. Jaką powinna być odległość tablicy, aby obraz słońca był  $n$  razy większym od otworu? Rozw.  $s = \frac{d}{2}(n-1) \operatorname{cotg} 16'$ .

416. Jak mierzą się linije proste na gruncie? Rozw. Za pomocą łańcuchów lub sztab mierniczych, opatrzonych dwiema wizami; objaśnienie.

417. Jak prowadzi się na gruncie linije prostopadłe? Rozw. Za pomocą 2-ch dioptr, krzyżujących się pod kątem prostym; objaśnienie.

418. Jeżeli za jednostkę przyjmujemy siłę oświetlenia jednostki powierzchni, przez świecę normalną, pod kątem prostym między padającymi promieniami a powierzchnią, jak się wyrazi oświetlenie  $n$  świecami w odległości  $s$  i pod kątem  $\alpha$ ?  
Rozw.  $i = n \cdot \sin \alpha : s^2$ .

419. Nad płaszczyzną znajduje się w odległości  $s$  świeca normalna; jak jest oświetloną cząstka  $f$  powierzchni, oddalona o  $d$  od spodka prostopadłej?—  
Rozw.  $fs : \sqrt{[s^2 + d^2]^3}$ .

420. Lampa z olejem skalnym, lampa olejna Argandzka i lampa zegarowa musiały być oddalone kolejno na  $23^\circ$ ,  $18^\circ$ ,  $33^\circ$ , od krążka Bunzen'a, aby działać tak, jak świeca normalna w odległości  $8^\circ$ ; jakie są ich natężenia? Rozw.  $8\frac{1}{3}$ ,  $5\frac{1}{6}$ , 17.

421. Ile czasu potrzebuje światło dla przybycia do nas z księżycą, słońca i Neptuna (600 milj. mil)? Rozw.  $1\frac{1}{5}$  sek.; 8 min. 13 sek.; 4 godziny.

422. Jak odległym jest od nas Alcyon, jeżeli światło potrzebuje na doście do ziemi 573 lat? Rozw.  $758945376000000 = 759$  bilj. mil prawie.

423. Wymienić zjawiska z życia codziennego, wykazujące różne prędkości światła i dźwięku. Rozw. Uderzenia odległe; dym przy wystrzale i huk; błyskawica i grzmot i t. d.

424. Jak powinny być ustawione 2-ie płaszczyzny, aby były jednakowo oświetlone od słońca? Rozw. Równoległe obok siebie, za sobą, lub też nachylnone tak aby linija łącząca słońce z krawędzią ich kąta, dzieliła ten kąt na dwie części równe; objaśnienie.

#### 4. Nauka o odbijaniu się światła.

##### KATOPTRYKA.

288. Fale świetlne trafiające na nowy ośrodek mogą: 1) wracać się w ośrodek poprzedni, czyli zostać *odbitemi*; 2) wejść w nowy ośrodek i jako fale

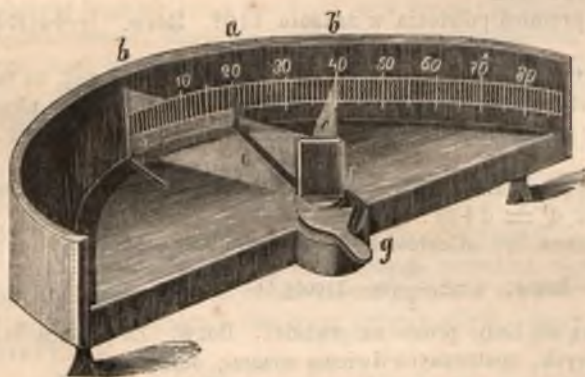


Fig. 127.

eteru rozchodzić się w nim, czyli mogą być *przepuszczeni*; 3) zostać *zniszczonymi* jako fale eteru, w nowym ośrodku, wtedy mianowicie gdy oddadzą swój ruch cząsteczkom ciała, i zmniejszając wskutek tego liczbę  $s$  w  $y$   $c$   $h$  drgań, przejdą na fale ciemne; mówi

się wtedy, że promienie światła zostały *pochłonięte*. Często zachodzą wspólnie wszystkie trzy wzmiankowane zjawiska, najczęściej przynajmniej dwa z nich towarzyszą sobie, nader rzadko lub może nigdy nie trafia się jedno z nich, samo. Rozważać je będziemy jednak osobno. Zastanowimy się najprzód nad odbijaniem się światła od elementu powierzchni, gdyż takie

elementa istnieją na każdej powierzchni, gładkiej czy chropowatej, prostej czy krzywej; posiłkować się będziemy prawami odbicia dla ruchu falowego od płaszczyzn, znanymi już z 231.

- 1. Odbicie od elementu powierzchni.** Według 231 mamy: 1. Promień **289.** padający i odbity leży w jednej płaszczyźnie z prostopadłą do elementu.— 2. Kąt odbicia jest równy kątowi padania.

Udowodnienie tych praw podano już w 231. Doświadczalnie można je sprawdzić różnemi sposobami; najprościej za pomocą przyrządu, przedstawionego na fig. 127. Przez szparę *s* pada promień na gładką powierzchnię *f*, której można nadawać różne położenia względem promienia padającego, za pomocą rękojeści *g*; przedłużenie tej ostatniej *e*, służy za prostopadłą do zwierciadła; na kole podziałowym zauważyć łatwo, że zawsze kąt odbicia *b'ca* jest równy kątowi padania *bca*; przy  $90^\circ$  oba promienie padają na siebie; promień odbity wraca do źródła światła.

**2. Odbicie od powierzchni gładkich.** Obrazy powstają przez odbicie **290.** się światła od powierzchni gładkich. Dzieje się to w przypuszczeniu, że promienie w nieznacznej tylko części przechodzą przez gładkie powierzchnie i ciała niemi ograniczone, i że przeważnie zostają od nich odbite; powierzchnie gładkie są zwierciadłami, odtwarzającymi obrazy tych punktów, które na nie rzucają światło.

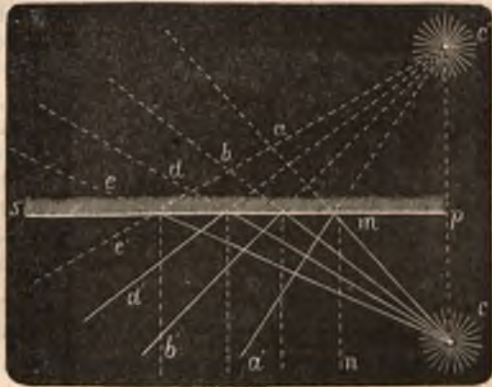


Fig. 128.

Powierzchniami gładkimi nazywamy takie, w których elementa blisko siebie leżące mają jeden kierunek; promienie padające na małe cząstki powierzchni zostają więc w tem samym położeniu odbite, w jakim padły na zwierciadło; promienie równoległe zostaną po odbiciu równoległymi, promienie nierównoległe utworzą po odbiciu ten sam kąt między sobą, jaki czyniły przed odbiciem. (Fig. 128). Promienie wychodzące z punktu świetlnego *c*, przyjąłby, bez zwierciadła, położenia *a*, *b*, *d*, *e*, gdy po odbiciu nabędą położen *a'*, *b'*, *d'*, *e'*, takich samych względem siebie. Promienie odbite zatem muszą na oko wywierać toż samo wrażenie, co i promienie wprost idące, muszą wytwarzać obraz punktu świetlnego *c*. Naturalnie, że po odbiciu, położenie całej grupy promieni zostaje zmienionem, obraz w ogóle przyjmuje położenie odmienne względem punktu świetlnego. Ponieważ powierzchnie gładkie tworzą obrazy pojedynczych punktów świetlnych, muszą więc odzwierciedlać w sobie także obrazy ciał oświetlonych, t. j. wydających światło.

Równe powierzchnie gładkie dają obrazy wielkości równej przedmiotom; powierzchnie krzywe wydają obrazy podobne, t. j. tylko powiększone albo zmniejszone, jeżeli krzywizna jest jednakową we wszystkich kierunkach; jeżeli zaś powierzchnie gładkie przedstawiają krzywizny odmienne w różnych kierunkach, lub krzywizny nieprawidłowe, to wytwarzają obrazy przekształcone.

Odległe od siebie elementa równych powierzchni gładkich posiadają ten sam kierunek; promienie więc, nawet znacznie od siebie oddalone, po odbiciu się od takiej powierzchni, zachowują toż samo względem siebie położenie, które miały przed odbiciem, utworzą przeto obraz równy przedmiotowi. Lecz krzywe powierzchnie gładkie przedstawiają odmienne kierunki elementów dosyć od siebie odległych; przeto promienie nie blizkie sobie, przyjmują po odbiciu się od tych powierzchni, położenia odmienne; obraz przedmiotu jest zmieniony. Jeżeli krzywizna jest we wszystkich kierunkach jednakową, to i obraz zostaje zmodyfikowanym jednostajnie we wszystkie strony, może więc przedstawiać tylko przedmiot powiększony lub pomniejszony; jeżeli zaś krzywizna jest rozmaita w różnych kierunkach, to modyfikacja w pewnym kierunku zachodzi odmiennie niż w innym i wydaje obraz przekształcony. Udowodnienie tych twierdzeń znajdujemy na każdym kroku w życiu codziennem; w zwierciadłach płaskich widzimy zawsze przedmioty równej wielkości i kształtu; w zwierciadłach kulistych widzimy obrazy powiększone lub zmniejszone, lecz podobne do przedmiotów; przekształcenie następuje dopiero wtedy, gdy jedna część przedmiotu jest o wiele bliżej zwierciadła kulistego, niż inne części, gdyż zwierciadła krzywe, jak to okaże się później, różnie odległe przedmioty odzwierciedlają w rozmaity sposób. Przekształcenie twarzy w kulistem zwierciadle ogrodowym, jest tem większe, im bliżej jesteśmy zwierciadła. Istotne przekształcenia zachodzą w zwierciadłach walcowych, stożkowych i piramidalnych. Podług praw odbicia, można oznaczyć geometrycznie formę przekształcenia i naodwrot, można wyznaczać takie przekształcenia, aby te we wzmiankowanych powyżej zwierciadłach tworzyły kształty prawidłowe. (Anamorfozy katoptryczne).

**291. 3. Odbicie od powierzchni chropowatych.** Powierzchnie chropowate nie tworzą obrazów, lecz rozpraszają światło we wszystkich kierunkach, wskutek czego stają się widzialnymi. Zwierciadła przeciwnie, przeważnie odbijają światło w jednym lub więcej kierunkach, a rozpraszają mało i skutkiem tego są mniej widocznymi

Powierzchnie chropowate przedstawiają w najmniejszych swych elementach wzniesienia i zagłębienia, których kierunek jest jak najrozmaitszy; promienie od nich odbite rozchodzą się także w najrozmaitszych kierunkach, czyli rozpraszają się. Powietrze rozprasza światło we wszystkich kierunkach, wskutek czego zachodzi oświetlenie tych miejsc, których słońce bezpośrednio nie oświetla; górne warstwy powietrza rozpraszają światło otrzymane przed wschodem i po zachodzie słońca i sprawiają świt i zmierzch. Bliższe szczegóły w fizyce powietrza.

**292. Położenie obrazów w zwierciadłach płaskich.** W zwierciadło płaskiem obraz punktu świetlnego leży za zwierciadłem, w odległości równej odległości punktu świetlnego od zwierciadła.

Słuszność tego twierdzenia wynika z prawa podanego w 231 mianowicie, że punkt środkowy fali odbitej leży po za płaszczyzną odbijającą w takiej odległości, w jakiej punkt wzbudzający fale znajduje się przed płaszczyzną. Można to jednak udowodnić i wprost. Ponieważ (fig. 128) promienie odbite  $a'$ ,  $b'$ ,  $d'$  i  $e'$ , mają toż samo położenie względem zwierciadła, co i promienie wprost idące  $a$ ,  $b$ ,  $d$  i  $e$ , więc przedłużone w myśli dostatecznie, przetną się w punkcie  $c'$ ; punkt ten jest obrazem punktu  $c$ , gdyż promienie  $a'$ ,  $b'$ ,  $d'$  i  $e'$  zdają się zeń wychodzić. Położenie tego punktu oznacza się z równości trójkątów  $c m p$  i  $c' m p$ , gdyż ponieważ kąt  $a' m n = c m n$ , według twierdzenia zasadniczego, przeto  $s m a = p m c$ ; a ponieważ  $s m a$  także  $= p m c'$ , przeto  $p m c' = p m c$ ; oprócz tego trójkąty są prostokątne, gdyż promień prostopadły  $c p$  zostaje odbity prostopadle i musi także wychodzić z  $c'$ . Z okazanej równości trójkątów wypada, że  $c p = c' p$ , czego dowieść należało.

Podobnie jak pojedynczy punkt świetlny, tak samo i przedmiot cały odtwarza swój obraz w zwierciadle, w takiej po za niem odległości, w jakiej znajduje się przed zwierciadłem. Ponieważ przodowa powierzchnia przedmiotu jest najbliższej zwierciadła, przeto w obrazie części tej powierzchni leżą za, lecz najbliższej zwierciadła. Części przedmiotu: przodowa i zwrócona ku tyłowi wydają się przemienionemi w zwierciadle; obrazy w wodzie są odwrócone. Powierzchnie boczne zmieniają także porządek na obrazie; prawa strona jest lewą w zwierciadle i odwrotnie; obraz druku i pisma nie jest czytelnym. Z powyższego twierdzenia wypada także, że zwierciadło płaskie przepoławia kąt między przedmiotem wydłużonym, a jego obrazem; w zwierciadle pochylonem pod  $45^\circ$ , przedmiot poziomy wydaje się pionowym i odwrotnie; własność ta znalazła zastosowanie przy czynieniu, bez patrzenia w okno, spostrzeżeń na zewnątrz pokoju, i w różnych porządkach fizycznych, np. w fotometrze Ritchie'go, w przyrządzie do prędkości Fizeau, w teleskopie zwierciadłowym Newtona, i t. d. Wynika z tegoż twierdzenia, że obraz w zwierciadle, 2 razy przedziej oddala się przedmiotu aniżeli zwierciadło, i że w zwierciadle obrotowem opisuje kąt 2 razy większy od kąta obrotu zwierciadła; własność ta znalazła także ważne zastosowania w przyrządzie do prędkości Foucault'a, w przyrządzie Wheatstone'a do mierzenia prędkości elektryczności, w telegrafie zaatlantyckim, w sextansie zwierciadłowym i t. d. Nakoniec wypada jeszcze z tego twierdzenia, że 2 równoległe do siebie zwierciadła, tworzą nieskończenie wiele obrazów przedmiotu umieszczonego między niemi, obrazów, które z powodu powtarzającego się pochłaniania coraz słabszemi się stają; że 2 zwierciadła pochylone do siebie dają tyle obrazów przedmiotu, ile razy kąt pochylenia tych zwierciadeł zawiera się w  $360^\circ$ ; na tem polega kalejdoskop Brewster'a (1817), (*καλός* piękny, *είδος* kształt, *σχησέω* widzę) i Debuskop (od Debus 1860), służące do wytwarzania widoków.

**Położenie i wielkość obrazów w zwierciadłach wklęsłych.** Zwierciadła 293.  
krzywe są albo wklęsłe albo wypukłe. Położenie obrazów w obu tych rodzajach zwierciadeł jest odmiennem; rozważymy naprzód zwierciadła wklęsłe, kuliste, gdyż one mają najliczniejsze zastosowania i dla tego, że wyniki będą się odnosić, z pewnemi zmianami, i do innych form zwierciadeł. Środek krzywizny kulistej nazywa się środkiem geometrycznym zwierciadła, a śro-

dek powierzchni zwierciadła — środkiem optycznym; linija łącząca te dwa punkta nazywa się osią optyczną, a każdy promień, przechodzący przez środek geometryczny, promieniem głównym. Wszystkie promienie główne są prostopadłe do zwierciadła, i jako takie, po odbiciu, nakładają się na siebie. Własność ta ułatwia rysunek obrazów punktów świetlnych; obraz bowiem



Fig. 129.

punktu leży koniecznie na promieniu głównym przez ten punkt przechodzącym; przyjmując, że wszystkie promienie odbite schodzą się w obrazie punktu, należy tylko poprowadzić jeszcze jeden promień odbity, a z przecięcia się jego z promieniem głównym, otrzymamy obraz punktu. Poprowadźmy np. (fig. 129) promień  $io$ , i odłóżmy kąt jego padania  $\alpha$  po drugiej stronie prostopadłej  $co$ ; to w przecięciu  $i'$  promienia odbitego  $i'o$  z promieniem głównym  $icm$ , otrzymamy obraz punktu  $i$ . Odległość przedmiotu od zwierciadła oznacza się przez  $d$ . Aby jak najprościej wykryć związek między wymienionymi wielkościami, trzeba zrobić przypuszczenie, o którym nie należy zapominać w następstwie, że promienie padają na zwierciadło co najwyżej na  $5^\circ$  odległości od środka optycznego. W tem przypuszczeniu można napisać  $io=d$  i  $i'o=b$ . Według znanego twierdzenia z geometrii jest:  $oi:oi' = ci:ci'$ ; kładąc promień  $mc=r$  i wstawiając powyższe wartości, otrzymamy proporcją:  $d:b = d-r:r-b$ ; zkąd wypada równanie:  $dr-bd = bd-br$ , albo  $dr+br = 2bd$ ; dzieląc obie strony tego równania przez  $bdr$ , otrzymamy wzór zasadniczy dla zwierciadeł wklęsłych:

$$\frac{1}{d} + \frac{1}{b} = \frac{2}{r} \quad (41)$$

**Rozbiór wzoru zasadniczego.** 1. Jeżeli przedmiot znajduje się w odległości nieskończenie wielkiej, czyli, jeżeli promienie padają na zwierciadło równoległe do

osi, to  $d = \infty$ , więc  $\frac{1}{d} = \frac{2}{r}$ , czyli  $b = \frac{1}{2}r$ ; promienie zbierają się w jednym punkcie, mianowicie w środku linii łączącej środek geometryczny z optycznym. Jeżeli przedmiot jest stosunkowo niezmiernie odległym i silnym źródłem światła, jak np. słońce, to wskutek schodzenia się wszystkich

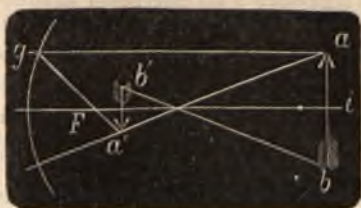


Fig. 130.

promieni w jednym punkcie, powstaje w takowym wielkie ciepło i silne światło; punkt ten nazywa się ogniskiem, a jego odległość od zwierciadła, odległością ogniskową. Oznaczając tę odległość ( $\frac{1}{2}r$ ) przez  $f$ , wzór zasadniczy przyjmie następującą postać:

$$\frac{1}{b} + \frac{1}{d} = \frac{1}{f}$$

Wzór ten wyraża, że *summa odwrotności odległości przedmiotu i odległości obrazu, jest równą odwrotności odległości ogniskowej*. Ponieważ każdy promień równoległy do osi przechodzi przez ognisko, czy idzie z niekończonej, czy ze skończonej odległości, własności tej przeto można użyć do wynalezienia obrazu punktu dowolnego  $a$  (fig. 130); prowadzi się naprzód promień główny  $ac$ , na którym, jak wiadomo, musi się znajdować obraz punktu  $a$ ; następnie prowadzi się promień równoległy  $ag$ , którego koniec  $g$  łączy się z ogniskiem  $F$  (focus), linią prostą; przecięcie się tego promienia odbitego z promieniem głównym, wydaje obraz punktu  $a$ . Znajdując w ten sposób obrazy wielu punktów  $ab$ , okaże się, że obrazy te będą miały toż samo względem siebie położenie, co i punkta linii  $ab$ : że zatem obraz przedmiotu będzie podobnym lub równym przedmiotowi, co także spostrzedz łatwo z wzoru (41). Do znalezienia obrazu nie potrzeba obrazów wszystkich punktów; znalazłszy np. obraz punktu  $a$  lub punktu  $i$ , mamy już położenie całego obrazu; co najwyżej należy

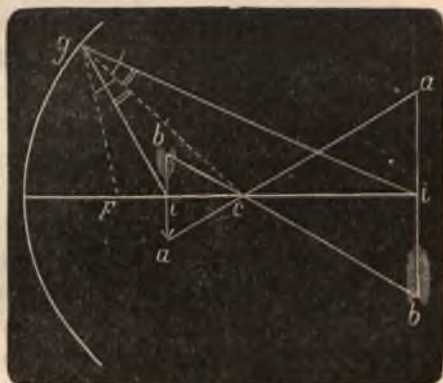


Fig. 131.

oznaczyć jeszcze obrazy punktów końcowych, które otrzymują się bardzo prosto, za pomocą promieni głównych punktów końcowych, promienie te bowiem muszą ograniczać i obraz; do znalezienia obrazu  $b'$  punktu  $b$ , potrzebnym jest tylko promień główny  $bc$ ; punkt, w którym promień ten spotyka prostopadłą poprowadzoną z  $a'$ , jest szukanym obrazem  $b'$  punktu  $b$ ; po tem wykreśleniu obraz przedmiotu jest wykończonym. Obraz przedmiotu nieskończenie odległego jest nieskończenie małym. *Przedmiot nieskończenie odległy ma obraz w ognisku; obraz ten jest nieskończenie mały*. Dla przedmiotów niezmiernie odległych, to twierdzenie jest bardzo blizkiem prawdy; obraz słońca np. wynosi  $\frac{1}{2}^\circ$  koła, którego promień  $= \frac{1}{2}r$ . Schodzenie się promieni równoległych, w zwierciadle kulistym, w jednym punkcie, ma miejsce

tylko przy powyższem przypuszczeniu; jeżeli to ostatnie nie jest spełnionem, to tworzy się nie punkt ogniskowy, lecz linija ogniskowa (katakaustika), albo przestrzeń ogniskowa; zmiana obrazu, której przyczyną jest kulistość zwierciadła i która zachodzi we wszystkich następujących przypadkach, nazywa się *aberracją kulistości*; nie ma jej w zwierciadłach czysto parabolicznych (231).

2. Jeżeli przedmiot z odległości nieskończenie wielkiej przechodzi do odległości skończonej (fig. 131), to promień  $ig$ , wychodzący z punktu przedmiotu na osi optycznej, z prostopadłą  $cg$  czyni kąt mniejszy, aniżeli promień równoległy; zatem, promień odbity  $gi'$  jest bliżej prostopadłej, niż promień  $gF$ ; obraz  $i'$  leży bliżej środka geometrycznego, niż  $F$ . Wzór (41) pozwala oznaczyć dokładnie to położenie. Jeżeli uczynimy w tym wzorze  $d > r$ , to  $b < r$ ; obraz więc pada między ogniskiem a środkiem geometrycznym; dla  $d = 2r$  np.,  $b = \frac{2}{3}r$ . Gdy przedmiot z nieskończoności przechodzi do odległości  $2r$ , obraz posuwa się tylko o  $\frac{1}{6}r$  od ogniska ku środkowi; droga przebyta przez obraz jest niezmiernie małą w porównaniu z drogą przedmiotu: obraz leży bliżej środka niż przedmiot; z tej przyczyny oba promienie krańcowe główne, wychodzące z punktów  $a$  i  $b$ , są w większej od siebie odległości na przedmiocie, niż na obrazie: obraz jest pomniejszony. Oprócz tego, promienie krańcowe krzyżują się z sobą między przedmiotem a obrazem, mają więc po obu stronach położenia przeciwne: obraz jest odwrócony. Nakoniec, jak w przypadku poprzednim tak i tu, zachodzi istotne spotkanie się odbitych promieni, wytwarzających świecące obrazy pojedynczych punktów przedmiotu; powstaje więc istotny, cielesny rzec można, obraz, zawieszony w powietrzu. *Gdy przedmiot znajduje się między nieskończonością a środkiem, to między tym punktem a ogniskiem tworzy się obraz odwrócony, zmniejszony, rzeczywisty, tem bliżej ogniska i tem mniejszy, im przedmiot jest dalej od zwierciadła.*

3. Jeżeli punkt  $i$  pada na punkt  $c$ , to  $d = r$ , a wzór (41) daje także  $b = r$ , czyli obraz jest także w środku. *Gdy przedmiot znajduje się w środku geometrycznym, to obraz jego pada nań.*

4. Jeżeli punkt  $i$  pada w przestrzeni między środkiem a ogniskiem, czyli, jeżeli  $d < r$  lecz  $> \frac{1}{2}r$ , to z wzoru (41) wypada  $b > r$  lecz  $< \infty$ ; gdyż dopiero przy  $d = \frac{1}{2}r$ ,  $b = \infty$ . Gdy więc przedmiot przebywa małą drogę od środka do ogniska, obraz przebiega ogromną przestrzeń od środka do nieskończoności; obraz oddala się od środka prędzej niż przedmiot, jest więc bardziej niż przedmiot od środka odległym. Promienie krańcowe główne są na obrazie więcej od siebie oddalone, niż na przedmiocie: obraz jest powiększonym. Oprócz tego promienie krańcowe krzyżują się między obrazem



i przedmiotem: obraz jest odwróconym. Jeżeli przedmiot jest umieszczony między środkiem a ogniskiem, tworzy się po drugiej stronie środka obraz rzeczywisty, powiększony, odwrótny, tem większy i tem odleglejszy, im przedmiot jest bliżej ogniska.

5. Jeżeli  $d = \frac{1}{2}r$ , to  $b = \infty$ . Gdy więc przedmiot jest umieszczony w ognisku, to obraz jego znajduje się w odległości nieskończenie wielkiej. Promienie wychodzące z ogniska są odbijane przez zwierciadło wklęsłe równoległe do osi; dla zwierciadeł większych zachodzi to tylko wtenczas, gdy zwierciadła te mają formę paraboliczną.

6. Gdy  $d < \frac{1}{2}r$ , to podług wzoru (41) wartość dla  $b$  jest ujemną; obraz punktu znajdującego się między ogniskiem głównym a środkiem optycznym leży za zwierciadłem; promienie więc odbite od zwierciadła nie zbiegają się w jednym punkcie, lecz rozbiegają się we wszystkich kierunkach, tak jednak, jakby wychodziły z jednego punktu ze zwierciadłem. Jakkolwiek nie zachodzi w tym razie istotne zbieganie się promieni, to jednak wrażenie na oko jest takie, jakby obraz punktu świetlnego istotnie znajdował się za zwierciadłem; tworzy się więc obraz geometryczny, urojony, tak jak w zwierciadle płaskim. Wynik ten odnosi się i do przedmiotu; ponieważ

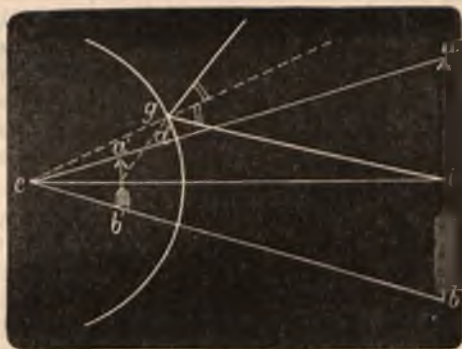


Fig. 132.

obraz jest bardziej odalony od środka niż przedmiot, i nadto, ponieważ obraz i przedmiot znajdują się po jednej stronie skrzyżowanych promieni granicznych, przeto obraz wydaje się powiększonym i w położeniu takim samym, jak przedmiot. Jeżeli przedmiot jest umieszczony wewnątrz odległości ogniskowej, to za zwierciadłem powstaje obraz urojony, powiększony, prosty, tem większy i tem bardziej oddalony, im przedmiot jest bliżej ogniska głównego.

**Położenie i wielkość obrazów w zwierciadłach wypukłych.** W zwierciadłach tego rodzaju środek leży na kierunku przeciwnym od zwierciadła, niż przedmiot; należy więc we wzorze (41) promieniowi  $r$  dać znak ujemny; wzór zasadniczy przechodzi wtedy na:

$$\frac{1}{b} + \frac{1}{d} = -\frac{2}{r}$$

zkąd wypada, że  $\frac{1}{b} = -\frac{2}{r} - \frac{1}{d}$ , to jest, że odległość obrazu jest również odjemną, czyli, że obraz pada zawsze za zwierciadłem. Wypada stąd także, że obraz jest bliżej środka niż przedmiot; promienie główne graniczne są bliżej siebie na obrazie, niż na przedmiocie: obraz jest zmniejszony. — Obraz i przedmiot znajdują się po tej samej stronie punktu skrzyżowania: obraz jest prosty. Za pomocą zwierciadeł wypukłych otrzymujemy więc zawsze obrazy urojone, zmniejszone i proste. Znajdują one zastosowanie w ogrodach, jako ozdoby, i w przyrządach fizycznych.

296.

**Użycie i przyrządzanie zwierciadeł.** Zwierciadła płaskie, albo o krzywiznie bardzo małej, służące do domowego użytku, są zazwyczaj taflami szkła, pokrytymi z jednej strony amalgamatem cyny. Szkło samo ma wprawdzie zdolność odbijania światła, lecz tak wiele go przepuszcza, że słabe światło odbite znika przy silnie przepuszczanem. Dla zwiększenia w szkłe własności odbijania, jedną stronę szkła pokrywa się nieprzezroczystą podlewą zwierciadlaną; szkło wtedy wcale światła nie przepuszcza, lecz odbija wszystkie padające nań promienie i staje się zwierciadłem. W celu otrzymania podlewy zwierciadlanej, rozkłada się na poziomej tablicy cienką warstwę cynfolii, którą skrapia się merkurjuzem; następnie wsuwa się ostrożnie taflę szkła na cynfolię, do której się ją przyciska, w ciągu jednego dnia. W nowszych czasach używają zwykle jako podlewy, cienkiej warstwy srebra, osadzającej się sposobem chemicznym na odwrotnej stronie tafli szklanej. Metoda Liebig'a (1856) jest następująca: Tafle szklane wkładają się w kąpiel ciepłą na 25°, zawierającą w sobie wodę, ciecz do posrebrzania i ciecz redukującą; ciecz pierwsza składa się z roztworów: saletranu srebra, siarczanu amonijaku i sody gryzącej; druga z roztworów: cukru kandyzowanego, kwasu winnego, winjanu miedzi i sody gryzącej. Zwierciadłom o podlewie srebrnej przypisują większą siłę odbijania, jaśniejszy blask i żywszy ogień, niż zwierciadłom merkurjalnym; fabrykacya pierwszych oprócz tego, nie jest szkodliwą dla zdrowia robotników. Dla ochronienia cienkiej warstewki srebra od zrysozań, powleka się ją werniksem lub miedzią galwanicznie. Wszystkie zwierciadła o powierzchni odwrotnej odzwierciadlającej, przedstawiają tę niedogodność, że wytwarzają wiele obrazów, wskutek czego obraz główny staje się niewyraźnym. Obraz główny pochodzi od obłożenia; lecz i przodowa powierzchnia szkła daje także obraz, który wprawdzie, przy prostopadłym padaniu promieni, pada na obraz utworzony przez stronę odwrotną, a który przy ukośnym kierunku promieni, z przyczyny małej nader wydatności, nie zwraca na siebie uwagi w życiu codziennem; jednak gdy punkt jasny odbija się w zwierciadle, jak to zdarza się często w doświadczeniach optycznych, to widzieć można z boku, dwa i więcej obrazów, jeden pochodzący od strony przodowej, drugi od strony odwrotnej, trzeci tworzący się wskutek odbicia od stron przodowej i odwrotnej, czwarty powstający wskutek tegoż samego dwukrotnego odbicia i t. d.; obrazy te są tem więcej od siebie odległe, i tem wyraźniejsze im większą jest grubość zwierciadła, o której prawie dokładnie przekonać się można dotykając powierzchni przodowej zwierciadła, przedmiotem zaostrozonym. Ponieważ sąsiednie obrazy, nakładające się, czynią niewyraźnym obraz główny strony odwrotnej,

przeto do doświadczeń dokładnych lub pomiarowych, zwierciadła szklane nie dają się użyć wyjąwszy wtedy, gdy strona ich odwrotna jest poczernioną; w tym przypadku czarna powłoka pochłania całe światło przepuszczone i powstaje wtedy tylko jeden obraz powierzchni przodowej, lecz bardzo słabo oświetlony. O wiele lepszymi są zwierciadła srebrne albo platynowe, powstające przez powleczenie przodowej powierzchni tafli szklanej warstwą srebra lub platyny; dają one bowiem tylko jeden, bardzo jasny obraz i nie wymagają oszlifowania strony odwrotnej; można ich używać przy obserwacjach słońca i przy spostrzeżeniach potajemnych. Metoda przyrządzania zwierciadeł platynowych Dode'go, jest następująca: suchy chlornik platyny miesza się z olejem lawendowym, a następnie rozciera się z glejną ołowianą i boranem ołowiu; pędzlem umoczonym w tej mieszaninie pociąga się wypolerowaną powierzchnię szkła, a całą tafle, w odpowiednim tyglu z żelaza lanego ogrzewa się we właściwym piecu, wskutek czego platyna zostaje zredukowaną i przypaloną do tafli. Już Foucault (1858) przyrządzał do teleskopów wielkie zwierciadła wklęsłe z posrebrzonego szkła. Wybornymi byłyby zwierciadła stalowe, jako dające się doskonale wypolerować, gdyby nie rdzewiały łatwo. Zwyczajny metal używany do zwierciadeł składa się z 64 cz. miedzi i 20 cz. cyny, albo z 1 cz. dobrego mosiądzu i 1 cz. arszeniku.

Oprócz użytku domowego, zwierciadła płaskie mają liczne zastosowania w przyrządach fizycznych, astronomicznych i geodezyjnych; najważniejsze z tych przyrządów są: 1. *Zwierciadło kątowe*, używane do spuszczenia prostopadłych na gruncie; składa się ono z dwóch małych zwierciadeł, nachylonych do siebie pod kątem  $45^\circ$  i osadzonych w oprawie tak, że można widzieć nad jednym z nich, pewien przedmiot, a współcześnie w tem samym zwierciadle, i drugi przedmiot, przez podwójne odbicie; gdy 2 przedmioty wydają się bezpośrednio jeden nad drugim, to linije poprowadzone od obu tych przedmiotów do oka są prostopadłe do siebie. (p. Zada. 434). 2. *Sextans zwierciadłowy* (Newton 1680 ?), (Godfroy 1730), używany do mierzenia kątów na gruncie i na niebie. Składa się ze stalugi mającej formę wycinka o  $60^\circ$ , około środka której może się obracać szeroki linijał (alidada), opatrzony na obwodzie nonijuszem odpowiadającym podziałom sextansu, a w środku prostopadłem doń zwierciadłem obracającym się razem z alidadą. Na jednym ramieniu wycinka znajduje się drugie zwierciadło prostopadłe, które jest do pierwszego równoległe wtedy, gdy alidada stoi na zerze podziału sextansu. Naprzeciw tego zwierciadła jest umocowana luneta, przez którą można widzieć pewien przedmiot w zwierciadle i inny odległy przedmiot, ponad zwierciadłem. Obracając alidadę dotąd dopóki nie będzie widać przez lunetę w drugim zwierciadle, drugiego przedmiotu pod pierwszym, wielkość obrotu alidady od zera wyrazi połowę wielkości kąta, zawartego między promieniami ocznymi dwóch przedmiotów (p. Zada. 435). 3. *Goniometr Wollastona* (1809) służy do mierzenia kątów pochylenia dwóch ścian kryształu do siebie i polega na tem, że kryształ należy obrócić o ten właśnie kąt, aby w drugiej powierzchni zobaczyć dowolny przedmiot na tem samym miejscu, na którym widziano go w powierzchni pierwszej kryształu. 4. *Heljostat* (s'Gravesande 1742) służy do wprowadzenia promieni słonecznych przez otwór w okiennicy, do pokoju ciemnego. Składa się on ze zwierciadła pochylonego, które w przyrządach mniej dokładnych, przystosowywanem jest ciągle do położenia promieni słonecznych, z zewnątrz pokoju, w dokładnych zaś przyrządach przystosowywanie to odbywa się za pomocą me-

chanizmu zegarowego; promienie odbite od zwierciadła, przy przejściu przez otwór, zachowują stale ten sam kierunek. 5. *Heljotrop* (Gauss 1821) składa się z prostopadłych do siebie zwierciadeł, umieszczonych na lunecie tak, że w jednym z nich widać obraz słońca, który jak sygnał dla miejsca odległego, zostaje odbitym od drugiego zwierciadła. Za pomocą tego przyrządu Gauss dawał sygnały miejscom na 10 mil odległym. 6. *Szklą czarodziejskie*.

Zwierciadła wklęsłe mają zastosowanie w teleskopach zwierciadłowych, które należą do największych instrumentów optycznych. Używają się także jako szklą pałace, do wytworzenia wielkiego gorąca. Akademia florencka, pierwsza szklą dyjament w ognisku wielkiego zwierciadła wklęsłego. Zagęszczenie promieni słonecznych w takim zwierciadle jest wprost proporcjonalne do kwadratu ze średnicy zwierciadła, a odwrotnie proporcjonalne do kwadratu z odległości ogniskowej (p. Zada. 452). (Rewerbery). Naodwrot, używa się zwierciadeł wklęsłych do zagęszczenia przeprowadzenia promieni bardzo żywego światła umieszczonego w ognisku, np. w latarniach morskich, w teatrach i t. d.; zwierciadła wklęsłe są wtedy paraboliczne, gdyż takie tylko odbijają wszystkie promienie równoległe; w latarniach morskich światło wiruje w tym celu, aby przez kolejne gaśnięcia i rozbłyski, łatwiej mogło być odróżnionem od światła gwiazd i t. p.

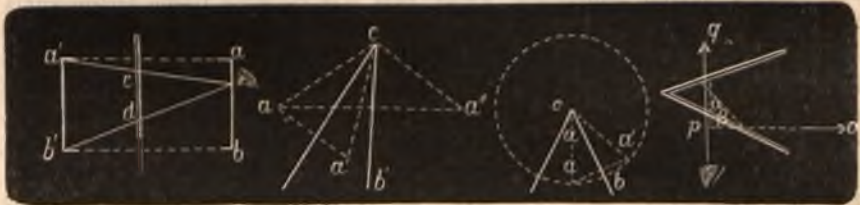


Fig. 133.

Fig. 134.

Fig. 135.

Fig. 136.

297.

*Zadania.* 425. Stałem na  $p^m$  przed ścianą i patrzyłem ukośnie w zwierciadło zawieszona na ścianie; w pewnym punkcie, odległym odemnie na  $g^m$  ujrzałem obraz pewnego przedmiotu; obraz i przedmiot przedstawiały się pod kątem  $\alpha^0$ ; jak daleko był odemnie przedmiot i w jakiej odległości od ściany? Rozw. Kąt padania  $x$  znajduje się z równania:  $\sin x = p:q$ ; pierwsza odległość  $= q \cdot \sin 2x : \sin(2x - \alpha)$ ; druga  $= q \cdot \sin \alpha \sin x : \sin(2x - \alpha)$ .

426. Ktoś widzi obraz słońca, wzniesionego nad poziom na  $45^0$ , w strumyku odległym od patrzącego na  $100^m$ ; na jakiej wysokości stoi patrzący? Rozw.  $70^m$ .

427. Z latarni morskiej wysokiej  $h^m$  widać chmurę pod kątem  $\beta$ , a obraz jej odbity pod kątem  $\alpha$ , względem linii poziomej przechodzącej przez oko; jak odległą jest chmura od patrzącego i jak wysoko nad wodą? Rozwiąz.  $2h \cdot \cos \alpha : \sin(\alpha - \beta)$ , i  $h \sin(\alpha + \beta) : \sin(\alpha - \beta)$ .

428. W zwierciadle wodnem, oddalonym od nas na  $b^m$ , a pod nami na  $a^m$ , widać obraz wierzchołka wieży, odległej od nas na  $c^m$ ; jak wysoka jest wieża? Rozw.  $a(c - b) : b$ .

429. Dla czego zwierciadło musi mieć przynajmniej połowę wysokości patrzącego, aby ten mógł przejrzeć się cały? Rozwiązanie. Fig. 133 pokazuje, że  $cd = \frac{1}{2}a'b'$ , więc także  $= \frac{1}{2}ab$ .

430. Okazać, że obraz opisuje kąt 2 razy większy niż zwierciadło—  
Rozw. Fig. 134 pokazuje, że  $a'c a'' = 2bc b'$ .

431. Okazać, że wszystkie obrazy w dwóch pochyłonych do siebie zwierciadłach leżą na okręgu koła. Rozw. Z równości  $ab = a'b$  wypada także  $ac = a'c$  i t. d. (Fig. 135).

432. Okazać, że liczba obrazów  $= (360:a) - 1$ , gdy  $a$  mieści się całkowicie w 360, i że, gdy  $a$  nie mieści się w 360, liczba obrazów równa się liczbie całkowitej będącej ilorazem z podzielenia 360 przez  $a$ . Rozw. Można się o tem przekonać prowadząc dalej rysunek figury 135, każdy bowiem wycinek o kącie  $a$  zawiera 1 obraz.

433. Okazać, że zwierciadło przepoławia kąt między przedmiotem a jego obrazem. Twierdzenie zasadnicze w 292.

434. Okazać, że dwie linie wiz, w zwierciadle kątowym, do przedmiotów widzianych jeden nad drugim, są do siebie prostopadłe. Rozw. Należy okazać na fig. 136, że  $\alpha + \beta = 90$ , wtedy  $op$  będzie prostopadłe do  $pq$ .

435. Okazać, że w sextansie zwierciadłowym, kąt między linijami wiz do obu przedmiotów, które widać nad zwierciadłem i w tem zwierciadle, prostopadłe pod sobą, jest 2 razy większym od kąta obrotu alidady. Rozwiąz. Kąt widzenia obu przedmiotów  $q$  i  $p$  (fig. 137) jest  $qap$ ; kąt o który od zera alidada została obróconą wynosi  $\alpha$ ; należy więc okazać, że  $qap = 2\alpha$ , co spostrzedz łatwo na figurze, z równości kątów zaznaczonych.— Równości te polegają w części na prawach odbicia, w części na tem, że zwierciadło stałe jest równoległe do przeciwnej strony sextansu  $ho$ .

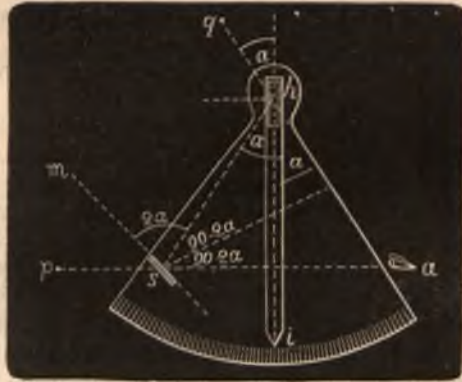


Fig. 137.

436. Kiedy zwierciadło płaskie, nawet przy prostopadłym kierunku promieni, pokazuje 2 obrazy? Rozw. Gdy powierzchnia przodowa nie jest równoległą do odwrotnej (objaśnienie).

437. Jak poznać czy znajdujące się przed nami zwierciadło jest metalowym czy szklanem? Rozw. Przez dotknięcie sztyftem.

438. Jaka jest grubość zwierciadła szklanego, którego dotykamy sztyftem? Rozw. Równa się połowie odległości ostrza od jego obrazu.

439. Dla czego takim sposobem możemy oznaczyć tylko przybliżenie grubość tafli szklanej? Rozw. Pochyliły kierunku widzenia.

440. Dla czego szyby tylko w nocy odzwierciadlają przedmioty w pokoju? Rozw. Porównaj światło odbite z przepuszczonem dla obu pór dnia.

441. Niech studyjający wprawia się w wykreślanie obrazów: punktów i przedmiotów, w zwierciadłach wklęsłych i wypukłych, dla wszystkich przypad-

ków podanych w 294 i dla innych jeszcze, jakie pomyśleć można, według obu metod wskazanych w 294; patrz fig. 129.

442. Jaka jest odległość obrazu w zwierciadle wklęsłym, jeżeli odległość przedmiotu  $= 10r, 7r, 3r, 1\frac{1}{2}r, r, \frac{2}{3}r, \frac{1}{2}r, \frac{1}{4}r, 0, 1r$ ? Rozw. Według wzoru (41),  $b = dr : (2d - r)$ , więc tu  $= \frac{10}{13}r, \frac{7}{13}r, \frac{1}{7}r, \frac{3}{5}r, \frac{3}{4}r, r, 2r, \infty, -\frac{1}{2}r, -\frac{1}{6}r$ .

443. Gdzie leżą obrazy w zwierciadle wypukłym, jeżeli  $d = 10r, 2r, r, \frac{1}{2}r$ ? Rozw.  $b = -dr : (2d + r)$ ; przeto  $b = -\frac{10}{21}r, -\frac{2}{5}r, -\frac{1}{3}r, -\frac{1}{4}r$ .

444. Wyrazić odległość obrazu za pomocą odległości ogniskowej dla obu rodzajów zwierciadeł. Rozw.  $b = df : (d - f)$ , i  $b = -df : (d + f)$ .

445. Wyrazić odległość ogniskową za pomocą innych wymiarów. Rozw.  $f = \pm bd : (b \pm d)$ .

446. Przedmiot na  $100^\circ$  odległy ma obraz w odległości  $5^\circ$ ; jaka jest odległość ogniskowa? Rozw.  $4\frac{16}{21}^\circ$ .

447. Jak wielki jest obraz  $l'$  w zwierciadle wklęsłym, w porównaniu z przedmiotem, którego rozciągłość liniowa  $= l$ ? Rozw. Podług fig. 131  $l' : l = ci' : ci$ , albo  $l' : l = 2f - b : d - 2f$ ; ztąd  $l' = l(2f - b) : (d - 2f)$ .

448. Znaleźć z tego wzoru kiedy wielkość obrazu o będzie  $\frac{1}{2}l, l, 2l, 10l, \infty$ ? Rozw. Gdy  $d = \infty, 3f, 2f, \frac{3}{2}f, l, \frac{1}{2}f, f$ .

449. Podać wielkość obrazu dla zwierciadła wypukłego. Rozw.  $l' = lf : (d + f)$ .

450. Czy w zwierciadłach wypukłych właściwą jest dla  $f$  nazwa odległości ogniskowej? Rozw. W zwierciadłach wypukłych promienie wogóle nie zbiegają się z sobą, lecz są rozpraszane przez zwierciadło (zwierciadła rozpraszające); promienie padające równoległe do osi, zostają rozproszone tak, jakby wychodziły z punktu za zwierciadłem; odległość tego punktu od zwierciadła wynosi  $f$ ; przeto  $f$  nazywa się odległością *rozpraszającą*.

451. Jak wielkiem wydaje się słońce w zwierciadle palącym? Rozwiąz. Średnica wynosi  $2f \cdot \operatorname{tg} 16^\circ = \frac{1}{108}f$ .

452. Jakie jest zagęszczenie promieni słonecznych w zwierciadle, którego średnica  $= d$ ? Rozw. Wszystkie promienie padające na zwierciadło zagęszczają się w kole, którego średnica  $= \frac{1}{108}f$ ; przeto zagęszczenie wynosi  $d^2 : (\frac{1}{108}f)^2 = (108d)^2 : f^2$ .

453. Jak się wyrazi zagęszczenie, jeżeli zamiast średnicy daną będzie liczba stopni łuku zwierciadła? Rozw. Średnica zwierciadła  $= 4f \cdot \sin \alpha$ ; przeto zagęszczenie  $= 16f^2 \sin^2 \alpha : (\frac{1}{108}f)^2 = (432 \sin \alpha)^2$ .

454. Jakie jest zagęszczenie dla zwierciadła o  $60^\circ$  łuku? Rozw. 46656.

455. Jaka jest temperatura ogniska, gdy na wolnym powietrzu promienie słoneczne ogrzewają termometr do  $200^\circ$ ? Rozw.  $933120^\circ$ .

## 5. Nauka o załamaniu światła.

### DIOPTRYKA.

298. **Pojęcie o załamaniu i prawa załamania (Snellius 1620).** Przez załamanie się światła rozumiemy odchylenie, którego doznają promienie światła,

przy przejściu ze środka przezroczystego w inny. W różnych bowiem ciałach eter przedstawia rozmaitą gęstość, np. w ciałach gęstszych zazwyczaj gęstość większą, gdyż wskutek przyciągania międzycząsteczkowego ciał gęstszych, większa ilość eteru zostaje zatrzymana we wnętrzu ciała; sprężystość eteru musi być jednakową we wszystkich ciałach, gdyż inaczej, eter z jednego ciała przechodziłby w inne; łatwo się na to zgodzić, uwzględniając, że większe odpychanie eteru gęstszego jest równoważone większym przyciąganiem atomów ciała. Podług tego, dla gęstszego ciała, znany iloraz  $\sqrt{\frac{e \cdot d}{e \cdot d}}$  staje się mniejszym, przez co zmniejsza się prędkość rozchodzenia się światła. Toż samo wypada także z zasady zachowania siły; gdyż, aby w środku posiadającym eter gęstszy, siła żywotna rozchodzącego się drgającego ruchu pozostała taż sama, prędkość tego ruchu musi być mniejszą.— Rzeczywiście, Fizeau i Foucault znaleźli prędkość światła dla wody równą tylko  $\frac{2}{3}$  prędkości światła w powietrzu. Jeżeli ruch falowy zmienia prędkość swego rozchodzenia się, to według 232, promienie jego przyjmują inny kierunek; więc i promienie światła muszą zbaczać od swego kierunku, muszą załamać się, według praw podanych dla wszystkich ruchów falowych w 232:

1. *Promienie padający i załamany leżą z prostopadłą na jednej płaszczyźnie.* 2. *Stosunek wstawy kąta padania do wstawy kąta załamania jest stałym.* Stosunek ten, według 232, równy ilorazowi prędkości światła w obu środkach, nazywa się wykładnikiem załamania i oznacza się przez  $n$ ; podług tego  $n = \sin \alpha : \sin \beta$ . Przy przejściu ze środka rzadszego w gęstszy,  $n$  jest zwykle większe od 1, gdyż prędkość światła w ciałach rzadszych jest najczęściej większą, niż w gęstszych; przy przejściu ze środka gęstszego w rzadszy,  $n$  jest zazwyczaj mniejsze od 1.

Udowodnienie praw załamania wykonywa się najprościej za pomocą naczynia, którego powierzchnia krzywa jest opatrzona podziałem na stopnie; płaszczyzna przechodząca przez średnicę ma w środku ciało przezroczyste, pozwalające przejścia promieniom światła. Na podziale można odczytać kąt padania. Po nalanu w naczynie wody do połowy (lub innej cieczy), górna połowa paska świetlnego zachowa położenie poprzednie, a dolna, przechodząca przez wodę zostanie odchyloną; odczytując na skali kąt załamania i znalazłszy stosunek wstaw, otrzymamy w naszym przypadku  $\frac{4}{3}$ . Doświadczenie to powtarzane dla jakiegokolwiek kąta padania daje zawsze ten sam wypadek, wskutek czego drugie prawo zostaje stwierdzonem. Ponieważ dolna połowa paska świetlnego, ani w górnej ani w dolnej części nie przedstawia żadnej zmiany, więc i pierwsze prawo znajduje tu swe potwierdzenie.

Z dwóch praw zasadniczych wypływa także szereg innych praw; 3. Jeżeli promienie są prostopadłe do powierzchni nowego środka, to idą w nim dalej nie załamane. Gdyż dla  $\alpha = 0$  wypada (wzór 32) także  $\beta = 0$ ; udo-

wodnienie doświadczalne wykonywa się za pomocą tegoż samego przyrządu. 4. Im większy jest kąt padania, czyli im promienie padają ukośniej, tem większe jest załamanie. Dowód:  $\sin \alpha : \sin \beta = n$  daje, według twierdzenia o proporcjonalności:

$$\frac{\sin \alpha - \sin \beta}{\sin \beta} = \frac{n-1}{1}$$

czyli  $\sin \alpha - \sin \beta = (n-1) \sin \beta$ .

Wprowadzając tu znany wzór na różnicę dwóch wstaw, wypadnie:

$$2 \cdot \sin \frac{1}{2}(\alpha-\beta) \cdot \cos \frac{1}{2}(\alpha+\beta) = (n-1) \sin \beta$$

zskąd  $\sin \frac{1}{2}(\alpha-\beta) = \frac{(n-1) \cdot \sin \beta}{2 \cdot \cos \frac{1}{2}(\alpha+\beta)}$

Ztąd widać, że różnica  $\alpha-\beta$  rośnie, gdy  $\beta$ , a więc i  $\alpha$  maleją, gdyż wtedy licznik ułamku wzrasta, a mianownik maleje. Powyższy przyrząd może być użyty do potwierdzenia tego wniosku. 5. Gdy promień wchodzi ze środka rzadszego w gęstszy, to zwykle zostaje załamany ku prostopadłej; gdyż w tym razie  $\sin \alpha : \sin \beta > 1$ , czyli kąt załamania jest mniejszy od kąta padania, promień załamania jest bliżej prostopadłej, niż padający. Do stwierdzenia tego na wodzie i innych cieczach może służyć wzmiankowany przyrząd. Wpuszczając do ciemnego pokoju promień światła pochyło do podłogi i stawiając na drodze promienia sześcian szklany, spodek promienia padnie dalej, niż poprzednio. 6. Jeżeli promień przechodzi ze środka gęstszego w rzadszy, to zwykle zostaje załamany, od prostopadłej; gdyż w tym razie  $\sin \alpha : \sin \beta < 1$ , przeto kąt załamania jest większy od kąta padania, promień załamany oddala się bardziej, niż padający, od prostopadłej. Za stwierdzenie może służyć doświadczenie następujące: Kładzie się w naczynie nieprzezroczyste pieniądz i staje się przy brzegu naczynia tak aby go nie można było widzieć. Po nalaniu wody w naczynie, pieniądz staje się widzialnym; promienie więc idące w górę, przy wyjściu z wody, nachyliły się do oka, zbliżyły się do powierzchni wody, czyli oddaliły się od prostopadłej. Ponieważ oko widzi przedmiot zawsze w tym kierunku, w którym promienie dostają się do oka, i ponieważ w tym razie promienie są więcej pochyłe, niż wtedy, gdy wody nie było w naczyniu, przeto oko widzi pieniądz wyżej, niż on jest rzeczywiście; dla tej samej przyczyny część zanurzona sztabki trzymanej pochyło, zdaje się być podniesioną ku powierzchni wody. 7. Gdy promień przechodzi przez środek, którego powierzchni: wejścia i wyjścia, są do siebie równoległe, to nie zostaje odchyłonym ze swego kierunku, lecz tylko usuniętym na stronę; gdyż przy wejściu zostaje za-



łamanym ku prostopadłej tak, jak przy wyjściu, od prostopadłej. Udowodnia się to doświadczalnie na taflach szklanych grubych, albo na naczyniach szklanych ze ścianami równoległymi, napełnionych wodą. Odsunięcie jest tem większe, im ciało jest grubsze; przez szyby widzimy przedmioty cokolwiek usuniętymi. 8. Jeżeli powierzchnie wejścia promienia i wyjścia, nie są od siebie równoległe, czyli gdy ciało jest pryzmatem, to kierunek promienia zostaje mocno zmienionym, a oprócz tego promień rozkłada się wtedy na barwy składowe. Dwa te ważne zjawiska wymagają szczegółowego rozbioru.

Znając wykładnik załamania pewnego ciała, można nie tylko obliczyć położenie promienia załamanego, lecz także znaleźć je geometrycznie. Opiszmy ze spodka a promienia padającego ba (Fig. 138) koło o promieniu 1, i z punktu przecięcia b spuśćmy prostopadłą bc na normalną do powierzchni; prostopadła ta jest wstawą kąta padania. Przy przejściu z powietrza w wodę, wstawa kąta załamania musi być 3, jeżeli wstawa kąta padania jest 4; podzielmy więc bc na 4 równe części i odetnijmy 3 z nich na powierzchni nowego środka, od a; ad będzie promieniem załamanym. Od praw 5 i 6 tworzą wyjątek ciała palne, jak diament, siarek węgla, olejek terpentynowy, spirytus. Załamują one światło silniej ku prostopadłej, niż inne ciała o takiej samej albo większej gęstości; zagęszczają przeto światło więcej i świecą silniej, niż inne ciała. Przez szkło wielościenne przedmiot wydaje się uwielokrotnionym, gdyż z każdej powierzchni promienie wychodzą w innym kierunku; anamorfozy dioptryczne.—



Fig. 138.

Ciała niebieskie i przedmioty odległe wysokie, wydają się, wskutek załamania, podwyższonemi; to zjawisko nazywa się *astronomicznem i ziemskiem załamaniem promieni*. Promienie ciał niebieskich bowiem wchodzą z przestrzeni próżnej, w rzadkie, a następnie coraz-gęstsze warstwy powietrza; są więc stale załamywane ku prostopadłej. Jeżeli są prostopadłe do kierunku warstw, to załamanie jest niemożliwe; załamanie przeto w zenicie jest równe zeru; lecz promienie, wchodzące w powietrze blisko poziomu, spotykają warstwy powietrza pod bardzo rozwartymi kątami, doznają więc silnego załamania i znacznie zbliżają się do prostopadłej. Dostają się one do oka tak, jakby pochodziły z okolic wyższych; ciała niebieskie przedstawiają się nam wyżej, niż są rzeczywistość. Na horyzoncie załamanie to wynosi  $\frac{1}{2}^{\circ}$ ; słońce i księżyc przeto wydają się nam już weszłemi, lub jeszcze niezaszłemi, gdy istotnie znajdują się pod poziomem; skutkiem tego jest przedłużenie dnia, bardzo znaczne w okolicach biegunowych. Od poziomu załamanie promieni szybko maleje; gdy na poziomie wynosi ono dokładnie  $35'$ , to na wysokości  $\frac{1}{2}^{\circ}$  wynosi już tylko  $28'$ ; dolne brzegi słońca i księżyca są więc podniesione niż górne; ponieważ średnice poziome zachowują swą wielkość, przeto

słońce i księżyc przy poziomie wydają się spłaszczonymi. Na wysokości  $1^{\circ}$  refrakcja astronomiczna wynosi tylko  $24'$ , na  $10^{\circ}$  wysokości  $5'$ , na  $45^{\circ}$  wysokości  $1'$ ; jest ona nieprawidłową w bliskości poziomu, gdyż masy powietrza między okiem i ciałem niebieskim, bywają nader zmienne; wskazania tabell i obliczenia refrakcyi przy poziomie są z tego powodu niedokładne. Dla tej przyczyny nie daje się już obserwatoryom kształtu wysokich wież, a okoliczność ta pozwala dać instrumentom trwalsze fundamenta i lepiej je ochronić od wstrząśnień zewnętrznych. Ponieważ warstwy powietrza, przy normalnym stanie atmosfery, powoli zwiększają swą gęstość, przeto i odchylenie się promienia światła jest wolno stopniowanem; promień w powietrzu przebiega linię krzywą; styczna do ostatniego jej elementu przedstawia kierunek, w którym ciało niebieskie jest widzialnem dla oka. Odległe wysokie przedmioty, wskutek ziemskiego załamania promieni, zdają się być wyższemi; okoliczność ta uwzględnia się przy geometrycznych pomiarach wysokości; jest możliwym taki szczególny stan powietrza, przy którym stają się widzialnymi przedmioty, będące pod poziomem; tak np. w Hastings widzieć można niekiedy odnogę francuzką na 12 mil odległą, w Reggio odnogę sycylijską z częścią Messyny; ponieważ jednak te anormalne stany powietrza trwają krótko, przeto i zjawiska te mogą być obserwowane przez krótki czas; wywoływanie ich przypisywano bogini *Fata Morgana*, które to nazwisko używa się i teraz na oznaczenie tego rodzaju zjawisk. Wskutek łamania się promieni, widzimy z miejsc wzniesionych, horyzont rozszerzony o  $\frac{1}{12}$  część. *Iskrzenie się i migotanie gwiazd stałych* podobnie jak drganie przedmiotów w rozgrzanem powietrzu, zdają się za przyczynę mieć załamanie. Powietrze bowiem na przestrzeni między okiem i punktami linii granicznych atmosfery, podlega wielu ruchom i zmianom sprowadzającym zmiany w gęstości; promień więc przechodzący przez poziome warstwy powietrzne doznaje częstych zmian kierunku. Ponieważ gwiazdy stałe, które w lunecie jak wiadomo wydają się punktami, przesyłają bardzo wąską wiązkę światła, prawie jeden promień do oka, przeto punkt świecący wskutek ciągłych zmian kierunku promienia, zmienia w każdej chwili swe położenie: światło gwiazd stałych migocze. W planetach zaś, które przez lunetę wydają się krążkami świetlnymi, znaczna średnia czyni prawie niewidocznymi drgania pojedynczych miejsc, wywołane załamaniem; planety mają światło spokojne. Iskrzenie się gwiazd jest największem przy horyzoncie, a coraz bardziej zmniejsza się ku zenitowi. Rzadko obserwowane chwieanie się gwiazd przypisuje się także anormalnemu załamaniu światła.

299.

**Całkowite odbicie.** Przez całkowite odbicie rozumiemy zjawisko, w którym promienie światła padające bardzo pochyło na powierzchnię odgraniczającą środek rzadszy, nie wchodzą wewnątrz, lecz odbijają się i pozostają w środku gęstszym. Aby to zjawisko miało miejsce, kąt padania musi osiągnąć pewnej granicy, [zależącej od własności obu środków, zwanej kątem granicznym całkowitego odbicia. Dla kąta tego służy następujące prawo: Wstawa kąta granicznego całkowitego odbicia jest równa wykładnikowi załamania.

**Dowód.** Przy przejściu promieni światła ze środka gęstszego w rzadszy, promienie zostają odchylone od prostopadłej, kąt załamania jest większy od kąta padania. Jeżeli więc w myśli zwiększać będziemy ciągle kąt padania (Fig. 13 9),

to promienie załamane, wchodzące w środek rzadszy, będą coraz więcej oddalać się od prostopadłej, czyli coraz bardziej zbliżać się do powierzchni odgraniczającej. Przy pewnej oznaczonej wielkości kąta padania, promień załamany padnie na powierzchnię odgraniczającą; nastąpi to wtedy, gdy kąt załamania  $\beta = 90^\circ$ . Odpowiadający mu kąt padania znajdzie się ze wzoru:  $\sin \alpha : 1 = n$ , albo  $\sin \alpha = n$ . Jeżeli więc wstawa kąta padania  $= n$ , to promień załamany pójdzie po powierzchni granicznej; jeżeli kąt padania będzie jeszcze większy, to wstawa kąta załamania będzie większa od 1, co jest niemożliwym; t. j. promienie nie wejdą wtedy w środek rzadszy, lecz zostaną odbite od powierzchni granicznej, w ośrodek gęstszy; kąt padania więc, którego wstawa  $= n$ , jest kątem granicznym całkowitego odbicia. Przy przejściu z wody w powietrze  $n = \frac{3}{4}$ , więc kąt graniczny  $= 48^\circ 35'$ ; dla alkoholu, kąt graniczny wynosi  $47^\circ$ , dla benzolu  $42^\circ$ , dla krownnglasu  $41^\circ$ ; dla flintglasu  $38^\circ$ , dla siarku węgla  $37^\circ$ , dla dyjamentu  $24^\circ$ .

Ponieważ przy całkowitem odbiciu nie ma strat przez pochłonięcie albo przy przejściu światła, przeto ciała, w których zachodzi to całkowite odbicie posiadają blask najwyższy. Szklaneczka próbna do połowy nalana wodą i wstawiona w wodę, błyszczy w części nie-napełnionej, jak srebro; pęcherzyki powietrza w wodzie świecą się jak perły, przerwy w ciałach przezroczystych jak paski srebrne, gdyż ukośne promienie przy przejściu w powietrze pęcherzyków lub przerw, zostają całkowicie odbite. Nawet blask ciał przezroczystych o powierzchniach płaskich, np. blask kawałków szkła jest także skutkiem całkowitego odbicia; odblask ten łatwiej zachodzi i tem jest częstszy, im mniejszy jest kąt graniczny; dyament więc błyszczy najsilniej. Pasek papieru, przyklejony do powierzchni bocznej naczynia szklanego napełnionego wodą, blisko lecz niżej zwierciadła wody, z niektórych miejsc z góry jest niewidzialnym; lecz patrząc nań z dołu, naprzeciw zwierciadła wody, wydaje się nam powyżej poziomu wody. Jeżeli czworokątną skrzyneczkę blaszaną zamkniemy do połowy u góry, to trójkątne okienko szklane, umieszczone zaraz pod przykryciem, będzie zupełnie niewidzialnym, dla oka patrzącego z góry, wtedy gdy skrzynka zostanie napełniona wodą; okienko to zostanie jednak dostrzeżone, gdy patrzeć nań będziemy przez inne okienko, zrobione niżej, w ścianie przeciwległej; to pierwsze okienko wyda się wtedy znacznie wzniesionem nad zwierciadło wody. Benzol na wodzie tworzy powierzchnię graniczną bardzo wyraźną, woda na siarku węgla powierzchnię zaledwie dostrzedz się dającą. Małe cząstki ciał przezroczystych dają masę nieprzezroczystą, jeżeli są pomieszane z ciałem, względem którego posiadają całkowite odbicie. Kryształ górny sproszkowany daje proszek biały, pianka składa się z samych przezroczystych błonek, a jest nieprzezroczystą, szkło potłuczone daje proszek biały, śnieg i chmury wydają się białymi, pomimo bezbarwnej przezroczystości ich cząstek i t. d.; we wszystkich tych przypadkach, światło



Fig. 139.

musi często przechodzić z gęstszego środka w rzadszy, a mianowicie w powietrze wypełniające przestrzenie między cząstkami, przy czem zostaje całkowicie odbitem. Jeżeli przestrzenie próżne zostają wypełnione cieczą równie silnie łamiącą światło, np. jasnym olejem, to przyczyna nieprzezroczystości zniknie; proszek szkła, biały piasek, kamień drogi nieprzezroczysty z powodu chropowatości powierzchni, staną się przezroczystymi; tem też objaśnia się przezroczystość hydrofanu w wodzie. Niektórzy uważają nieprzezroczystość wogóle, jako skutek całkowitego odbicia. Oko znajdujące się pod wodą widzi przedmioty zewnątrz wody, tylko wewnątrz koła, którego średnica przedstawia się oku pod kątem granicznym  $48^\circ$ .

*Camera lucida* Wollaston'a (1812) jest zastosowaniem całkowitego odbicia. Składa się ona z czworobocznego pryzmatu, którego 2-ie ściany są do siebie prostopadłe, dwie drugie zaś czynią z sobą kąt  $135^\circ$ . Jedna ze ścian prostopadłych jest zwrócona do przedmiotów odzwierciedlanych, druga do oka, widzącego pod pryzmatem białą powierzchnię papieru i ołówek poruszany ręką. Promienie od przedmiotów wchodzą niezłamane przez pierwszą ścianę prostopadłą i trafiają na 2-ie ściany pochyłe, bardzo ukośnie, zostają więc całkowicie odbite i niezłamane przez drugą ścianę prostopadłą dostają się do oka. Oko więc widzi obrazy przedmiotów na papierze, a ręka zaznacza je ołówkiem. W magii naturalnej, całkowite odbicie od tępokątowych pryzmatów ma zastosowanie przy optycznych przekształceniach i czarodziejskich znikaniach; takie pryzmaty odzwierciedlające używają się także do matematycznych i fizycznych instrumentów dokładności, zamiast łatwo psujących się zwierciadeł metalowych. Całkowite odbicie pozwala także objaśnić zjawisko zachodzące w gorących okolicach piaszczystych, mianowicie tworzenie się obrazów przedmiotów wysoko położonych, niby nad powierzchnią wody, jak również pojawienie się niekiedy na morzu obrazu odwróconego, a nad nim znów prostego obrazu, okrętu. W czasie wielkiego spokoju powietrza w gorących piaszczystych okolicach, może się bowiem zdarzyć, że głębiej położone, gorące warstwy powietrza, przez czas krótki, są lżejszemi i rzadszemi, niż wyższe; promienie więc idące od odległego, wysokiego przedmiotu mogą trafiać na te rzadsze warstwy powietrza pod kątem większym od granicznego i zostać całkowicie odbite; ponieważ promienie trafiające były zstępującemi, przeto promienie odbite muszą być wstępujące i muszą wywołać wrażenie przy dostaniu się do oka, obrazu nisko położonego. (Monge, wyprawa Napoleona do Egiptu 1798). Naodwrot, szczególnie na morzach zimnych, niskie warstwy powietrza mogą być o wiele gęstszemi od sąsiednich wyższych; promienie wstępujące przedmiotów niżej położonych mogą trafiać ukośnie na wyższe, rzadsze warstwy i zostać od nich całkowicie odbitemi, zstępująco, wywołując przez to w oku wrażenie obrazu wysoko położonego. Scoresby obserwował często tego rodzaju zjawiska na morzach biegunowych. Niektóre fata morgana mogą należeć także do rzędu opisanych dopiero zjawisk.

**300.** **Złamanie światła w pryzmatach.** Przez pryzmat rozumie się w optyce każde urządzenie pozwalające promieniowi światła przejść przez dwie, pochylone do siebie powierzchnie ciała. Najpospolitsze są pryzmaty oszlifowane, trójsienne, szklane; używa się także pryzmatów złożonych ze ścian przezroczystych i z cieczy, powstających przez napełnienie cieczą, naczynia składa-

jącego się z tafel szklanych o ścianach równoległych. Prosta, podług której przecinają się z sobą powierzchnie wejścia promienia i wyjścia, jest krawędzią łamiącą, kąt o tej krawędzi, kątem łamiącym. Płaszczyzna prostopadła do krawędzi łamiącej przecina pryzmat podług figury, zwanej przecięciem głównym; dla trójściennego, równobocznego pryzmatu, przecięcie główne jest trójkątem równobocznym ABC (fig. 140), w którym punkt A przedstawia krawędź łamiącą, a kąt A — kąt łamiący. Promień  $st$ , przy przejściu przez taki pryzmat, doznaje silnego odchylenia; gdyż już przy wejściu zostaje załamany do prostopadłej  $et$ , dochodzi następnie do powierzchni wyjścia, której prostopadła  $e't'$  czyni z pierwszą prostopadłą  $et$ , kąt  $m$  równy spełnieniu kąta łamiącego; promień przy wyjściu załamuje się znowu do drugiej prostopadłej tak, że promień wychodzący  $t's'$  ma kierunek bardzo odmienny od wchodzącego. Przedmiot widziany przez pryzmat pojawia się na innym miejscu, a przesunięcie odbywa się zawsze

w tę stronę, w której znajduje się krawędź łamiąca, jak to widać z figury. Kąt  $\alpha$ , przedstawiający różnicę kierunków promienia wchodzącego i wychodzącego, jest odchyleniem. Przy odchyleniu spełniają się zawsze dwa następujące prawa: 1). Odchylenie równa się summie kątów: padania i wyjścia, zmniejszonej o kąt łamiący, czyli  $= i+i'-A$ . 2). Odchylenie jest najmniejsze wtedy, gdy kąty: padania i wyjścia, są sobie równe (przejście symetryczne).

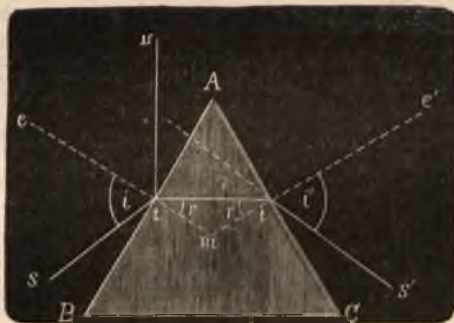


Fig. 140.

**Dowód.** Jeżeli przez  $r$  oznaczymy kąt załamania przy powierzchni wejścia, a przez  $r'$  kąt padania na powierzchnię wyjścia, to wypadnie, że  $\alpha$ , jako kąt zewnętrzny w trójkącie,  $= i-r+i'-r' = i+i'-(r+r')$ . Ponieważ  $r+r'$ , również jak  $A$ , jest spełnieniem kąta  $m$ , przeto  $r+r' = A$ , ztąd  $\alpha = i+i'-A$ , czyli dowiedzionem jest prawo pierwsze. Według prawa załamania,  $\sin i + \sin i' = n \cdot \sin r$  i  $\sin i' = n \cdot \sin r'$ , ztąd:  $\sin i + \sin i' = n(\sin r + \sin r')$ . Stosując tu znany wzór na summę dwóch wstaw, wypadnie:

$$\sin \frac{1}{2}(i+i') \cdot \cos \frac{1}{2}(i-i') = n \cdot \sin \frac{1}{2}(r+r') \cdot \cos \frac{1}{2}(r-r'),$$

$$\text{zktąd} \quad \sin \frac{1}{2}(i+i') = n \cdot \sin \frac{1}{2}A \frac{\cos \frac{1}{2}(r-r')}{\cos \frac{1}{2}(i-i')}$$

Wartość ta dla jednego i tego samego pryzmatu, czyli dla tegoż samego  $A$ , rozstrzyga o wielkości  $\alpha$  równej  $i+i'-A$ ; gdyż  $\alpha$  rośnie lub maleje wspólnie z  $i+i'$ . Załóżmy, że  $i$  jest większe od  $i'$ , to podług 298. 4, odchylenie  $i-r$  będzie większe od odchylenia  $i'-r'$ , gdyż odchylenie jest tem większe, im większy jest kąt padania; byłoby więc  $i-r > i'-r'$ , albo  $i-i' > r-r'$ , a ztąd  $\cos \frac{1}{2}(i-i') < \cos \frac{1}{2}(r-r')$ . Mianownik więc ułamku w wartości na  $\sin \frac{1}{2}(i+i')$  byłby mniejszy od licznika, wskutek czego byłoby:  $\sin \frac{1}{2}(i+i') > n \cdot \sin \frac{1}{2}A$ . Toż samo wypadłoby w przypuszczeniu, że  $i < i'$ . Więc zawsze  $\sin \frac{1}{2}(i+i') > n \cdot \sin \frac{1}{2}A$ , czy  $i >$ , czy  $i < i'$ . Jeżeli więc  $i=i'$ , czyli gdy  $r=r'$ , ułamek dostaw przechodzi na 1, a wtedy  $\sin \frac{1}{2}(i+i') = n \cdot \sin \frac{1}{2}A$ . Ponieważ w każdym innym razie, czy  $i$  jest większe, czy mniejsze od  $i'$ ,  $\sin \frac{1}{2}(i+i')$  jest większe od  $n \cdot \sin \frac{1}{2}A$ , przeto  $i+i'$  ma najmniejszą wartość wtedy, gdy  $i=i'$ ; wtedy też ma najmniejszą wartość  $\alpha$  równa  $i+i'$ , drugie przeto twierdzenie zostało dowiedzionem.

Przejście promienia przez pryzmat zachodzi jednak nie zawsze, mianowicie wtedy, gdy kąt padania promienia na powierzchnię wyjścia przewyższa kąt graniczny całkowitego załamania, jak tego przykładem jest camera lucida. Niech będzie kąt graniczny  $= g$ , to może być co najwyżej  $r+g = A$ , czyli  $r = A-g$ . Gdyby było  $A = 2g$ , to musiałoby być  $r = g$ ; lecz kąt załamania przy wejściu promienia w środek gęstszy, nie jest nigdy tak wielkim jak kąt graniczny przy wyjściu z tego środka; przeto zawsze  $r < g$ , więc  $A < 2g$ . Wyjście promieni z pryzmatu nie ma miejsca wtenczas, gdy kąt łamiący jest równy lub większy od podwójnego kąta granicznego, całkowitego odbicia. Te całkowicie odbite promienie, po przejściu przez 3-cią ścianę, dają obraz odwrotny przedmiotów; obraz ten jest bezbarwny gdy promienie wychodzące są prostopadłe do 3-ciej ściany czyli gdy pryzmat jest prostokątnym i równoramiennym; dla otrzymania tego obrazu jasnym, wolnym od obrazów nań nałożonych, pokrywa się sadzami powierzchnię odpowiadającą przeciwprostokątnej. Zdarza się, że kąt łamiący musi być mniejszy nawet od pojedynczego kąta granicznego. Jeżeli np. promień wchodzi w pryzmat prostopadłe do ściany wejścia, to kąt padania tegoż promienia na drugą ścianę pryzmatu jest równy właśnie kątowi łamiącemu; więc kąt łamiący musi być mniejszy od kąta granicznego, aby dozwolił przejścia przez pryzmat promieniom padającym prostopadłe. Podobna zależność musi zachodzić, gdy promień padający ma kierunek między prostopadłą a krawędzią łamiącą, jak np. promień  $ut$  (fig. 140). Patrząc przez pryzmat na przedmiot wązki, pewnej długości, obraz tego przedmiotu, wydaje się zgiętym; pochodzi to ztąd, że płaszczyzny padań wielu promieni nie są prostopadłe do osi, nie padają zatem na przecięcie główne, lecz na inne przecięcia pryzmatu. Dla tych ostatnich kąt łamiący  $A$  jest mniejszy, a więc odchylenie  $\alpha$  jest większe, gdyż  $\alpha = i+i'-A$ .

**301.** Oznaczenie wykładnika załamania (Fraunhofer 1814), Załamanie światła przez pryzmat czyni możebnem dokładne oznaczenie wykładnika załamania; gdyż w razie najmniejszego odchylenia, w którym  $i=i'$  równie na w 300 przybiera postać:  $\sin i = n \cdot \sin \frac{1}{2}A$ ; najmniejsze odchylenie wynosi wtedy  $\alpha = 2i - A$ , zkad  $i = \frac{1}{2}(\alpha + A)$ . Ponieważ łatwiej jest zmierzyć najmniejsze odchylenie  $\alpha$ , niż odpowiadający mu kąt padania  $i$ , przeto wpro-

wadźmy w równanie wartość na  $i$ ; przybierze ono wtedy kształt:  $\sin \frac{1}{2}(\alpha + A)$   
 $= n \cdot \sin \frac{1}{2}A$ , z kąd

$$n = \sin \frac{1}{2}(\alpha + A) : \sin \frac{1}{2}A.$$

Za pomocą tego wzoru można oznaczyć wykładnik załamania  $n$  dla każdego ciała, któremu można nadać formę pryzmatyczną, zmierzyć kąt  $A$  pryzmatu i minimum odchylenia  $\alpha$ , promienia światła.

Ciałom ciekłym łatwo nadać formę pryzmatyczną, wlewając je w naczynia pryzmatyczne, złożone z tafel szklanych o płaszczyznach równoległych. Ciała stałe mają często same przez się kształt pryzmatyczny, lub też dają się łatwo doprowadzić do tego kształtu. Jeżeli ciała te są bardzo drogie, jak np. drogie kamienie, wtedy wkłada się je w ciekły pryzmat, do którego dodaje się tyle innej cieczy, aż mieszanina nabędzie tegoż samego wykładnika załamania, jaki ma ciało stałe, co poznać łatwo po tem, że ciało ginie wtedy w cieczy; do drogiech kamieni używa się np. oleju oliwnego, do którego powoli dodaje się olejku kassyi lub sassafrasu, gdyż olejki te mają bardzo wysoki wykładnik załamania; tym sposobem można także, mówiąc nawiasem, odróżnić fałszywe dyamenty od prawdziwych. Ciałami gazowymi napełniają się również naczynia szklane, pryzmatyczne, lub szerokie rury, o końcach względem siebie pochyłych, zamkniętych płatkami szklanymi. Kąt łamiący pryzmatu mierzy się za pomocą goniometru nakładanego lub refleksogoniometru Wollaston'a. Minimum odchylenia mierzył Fraunhofer za pomocą teodolitu, przed lunetą którego był umieszczony ruchomy krążek do ustawienia i obrotu pryzmatu. Naprzód, luneta była tak ustawioną, że promień trafiał na krzyż niciany; następnie pryzmat został umieszczony na krążku, który, współcześnie z lunetą, był obracany dotąd, aż promień padł znów na krzyż z nici i był jak najmniej odchylnym od pierwotnego położenia. — Ponieważ przy przejściu przez pryzmat, promień rozkłada się na barwy i wskutek tego rozszerza się w pasek barwny, w widmo, przeto luneta musi być kierowaną na oznaczone miejsce widma; zwyczajne średnie wskazania odnoszą się do części żółtych widma, dokładniejsze — do jego linii ciemnych, które później rozważać będziemy. Ścisłejsze i wygodniejsze pomiary można wykonywać za pomocą goniometru Babinet'a i spektrometru Meyerstejn'a, gdyż w tych przyrządach, pryzmat jest ustawiony ruchomo, niezależnie od lunety, w środku koła podziałowego. Metoda ta służy głównie do oznaczania wykładników załamania, przy przejściu światła z powietrza w inne ciała; gdyby było potrzeba znaleźć ten wykładnik dla przejścia promieni z ciała dowolnego w inne, należałoby użyć łatwo dającego się udowodnić twierdzenia, że wykładnik załamania dwóch ciał względem siebie jest równy ilorazowi wykładników załamania obu tych ciał względem tegoż samego, trzeciego; tak np. wykładnik załamania z wody w szkło,  $= \frac{4}{3} : \frac{3}{2} = \frac{8}{9}$ , gdyż  $\frac{4}{3}$  i  $\frac{3}{2}$  są wykładnikami załamania z wody i szkła w powietrze. — Tego twierdzenia używa się także do oznaczenia wykładników załamania z ciał w próżnię, czyli do oznaczenia tak zwanych wykładników bezwzględnych; należy poprostu wykładnik ciała względem powietrza, pomnożyć przez wykładnik powietrza względem próżni. Ważną więc jest rzeczą, oznaczenie wykładnika powietrza względem próżni, czyli bezwzględnego wykładnika załamania, dla powietrza. Wynosi on przy  $0^\circ$  i  $70^\circ$  ciśnienia, 1,000294; liczba ta znalezioną została z obra-

chowań fizycznych Arago i Biot'a (1806) i z refrakcyi astronomicznej, przez Delambre'a. Następująca tablica przedstawia wykładniki załamania, znalezione za pomocą podanych metod, dla ciał stałych i ciekłych względem powietrza i bezwzględne wykładniki załamania gazów:

Chromian ołowiu . . . . .	2,926	Olej skalny . . . . .	1,544
Anataz . . . . .	2,508	Olejek z sasafrasu. . . . .	1,536
Dyament . . . . .	2,487	Olej lniany . . . . .	1,485
Blenda cynkowa . . . . .	2,260	Nafta . . . . .	1,475
Fosfor . . . . .	2,224	Olej oliwny . . . . .	1,468
Siarka . . . . .	2,040	Kwas siarczany . . . . .	1,440
Flintglas . . . . .	2, 1,6	Kwas saletrzany . . . . .	1,410
Kalomel . . . . .	1,970	Kwas solny . . . . .	1,401
Saletran bizmutu . . . . .	1,890	Roztwór salmjaku . . . . .	1,393
Granat . . . . .	1,815	Ług potażowy . . . . .	1,390
Rubin . . . . .	1,779	Roztwór soli kuchennej . . . . .	1,375
Safir . . . . .	1,768	Wyskok . . . . .	1,370
Turmalin . . . . .	1,668	Arak . . . . .	1,360
Spat wapienny . . . . .	1,654	Eter . . . . .	1,358
Spat barytowy . . . . .	1,647	Ammonijak . . . . .	1,349
Topaz . . . . .	1,638	Ocet . . . . .	1,347
Kryształ górny . . . . .	1,562	Woda studzienna . . . . .	1,337
Kopal . . . . .	1,549	Woda . . . . .	1,336
Cukier . . . . .	1,545		
Crownglas . . . . .	1,540		
Szkle zwyczajne . . . . .	1,530		
Saletra . . . . .	1,514	Cyan . . . . .	1,000834
Atun . . . . .	1,457	Chlor . . . . .	1,000772
Soczewki oczne. . . . .	1,384	Elail . . . . .	1,000678
Lód . . . . .	1,310	Siarkowódór . . . . .	1,000644
		Tlenek azotu . . . . .	1,000503
		Kwas węglowy . . . . .	1,000449
Siarek węgla . . . . .	1,680	Gaz błotny . . . . .	1,000443
Olejek z kassyi . . . . .	1,640	Tlenek węgla . . . . .	1,000340
Olejek anyżowy . . . . .	1,601	Tlennik azotu. . . . .	1,000303
Balsam tolu . . . . .	1,628	Azot . . . . .	1,000300
Balsam kanadyjski . . . . .	1,532	Powietrze atmosferyczne . . . . .	1,000204
Balsam kopajwy . . . . .	1,528	Tlen . . . . .	1,000272
		Wódór . . . . .	1,000138

Z tej tablicy widać o ile sprawdzają się prawa załamania 5 i 6. Gazy mają mniejsze wykładniki załamania, niż ciecze, a ciecze przecięciowo mniejsze, niż ciała stałe; te ostatnie zatem łamią światło silniej niż ciecze, i razem z cieczami przewyższają pod tym względem ciała gazowe. Najlżejszy gaz ma najmniejszy wykładnik załamania, ciężkie i gęste ciała stałe, jak drogic kamienie, posiadają największe wykładniki załamania. Gdybyśmy, zapatrując się powierzchownie, wyciągnęli wniosek, że wykładnik załamania rośnie z gęstością, to uderzyłyby



nas zaraz liczne wyjątki od tego prawa; gdyż cały szereg cieczy palnych, które przecięciowo są lżejsze od niepalnych, ma większe wykładniki załamania, niż te ostatnie, a nawet spirytus i eter przewyższają w tym względzie, cięższą wodę; te oleje palne łamią nawet silniej od o wiele gęstszych ciał stałych. I w ciałach niepalnych wykładnik załamania nie jest w stałym stosunku do gęstości; spat wapienny łamie silniej niż barytowy, azot silniej niż tlen. Wykładnik załamania zachowuje się więc względem gęstości bardzo nieprawidłowo. Ma to miejsce nie tylko dla ciał różnych, lecz także dla jednego i tegoż samego ciała. Skoro ciało zostanie ogrzanem, a wskutek tego mniej gęstem, jego wykładnik załamania maleje wprawdzie; w ogóle jednak, przy wzrastającej temperaturze, wykładnik załamania zmniejsza się prędzej niż gęstość; są jednak zdarzenia, w których ubytki wykładników załamania są proporcjonalne do ubytków gęstości, lub że wykładniki załamania maleją wolniej niż gęstości.

W roztworach solnych wykładnik załamania rośnie wprawdzie ze stopniem stężenia, lecz nie proporcjonalnie do gęstości. Jeżeli więc wykładnik załamania nie jest w stosunku prostym do gęstości, to przypuścić trzeba, że zależy on od materialnych różnic między ciałami, od wzajemnych działań na siebie eteru i materjału ciała; i dawniej i w nowszych czasach starano się za pomocą wykładnika załamania wnikać w tajemnicę odmienności materji i poddano w tym celu bliższym badaniom różne funkcje wykładnika załamania; nad ciekawymi wynikami tych badań chcemy się cokolwiek rozszerzyć.

**Siła łamiąca. Równoważnik refrakcji.** Przez siłę łamiącą rozumiemy kwadrat z wykładnika załamania zmniejszony jednością, czyli  $n^2 - 1$ . Jakkolwiek wyrażenie to pochodzi jeszcze z hipotezy wypływu, przeniesionem jednak zostało do teoryi falowań w tem samym znaczeniu, gdyż wyraża stosunek straty siły żywotnej przy wejściu w nowy środek do pozostającej jeszcze siły żywotnej i może służyć za miarę działania nowego środka na ruch światła, za miarę siły łamiącej; bowiem  $n^2 - 1 = (c : c')^2 - 1 = (c^2 - c'^2) : c'^2 = (mc^2 - mc'^2) : mc'^2$ . Wreszcie, robi się tu przypuszczenie, że w nowym środku, masa drgająca  $m$  jest taka sama jak w dawnym, przypuszczenie nie mające uzasadnienia; nadto przyjmuje się, że zachodzi strata siły żywotnej, co sprzeciwia się prawu zachowania siły, jeżeli nie chcemy wprowadzić nieusprawiedliwionej zależności między pochłanianiem światła i załamaniem. Nazywanie więc wyrażenia  $n^2 - 1$  siłą łamiącą nie odpowiada już postępowi nauki, a wyrażenie to może być co najwięcej uważane za miarę większej gęstości lub masy eteru; gdyż według prawa zachowania siły, siła żywotna ruchu światła w nowym środku równa się takiejże sile w dawnym, masa więc musi wzrastać w stosunku zmniejszenia się kwadratu z prędkości, czyli w stosunku  $c^2 : c'^2$ ; masa eteru w nowym środku musi być według tego  $mc^2 : c'^2$ ; zwiększyła się więc o  $(mc^2 : c'^2) - m = (mc^2 - mc'^2) : c'^2 = (n^2 - 1) m$ . Podług teoryi falowań siła łamiąca pokazuje tylko przyrost gęstości eteru w środku łamiącym. Te uwagi zdają się wykazywać bezowocność badań nad siłą łamiącą. I rzeczywiście rachunki i obserwacje przekonały, że w ciałach stałych i ciekłych siła łamiąca nie zostaje w stosunku prostym ani do gęstości, ani do temperatury, ani do składu mechanicznego lub chemicznego. Dla gazów znaleźli wprawdzie Arago i Biot (1806), że siła łamiąca jednego i tego samego gazu jest proporcjonalną do jego gęstości, że zatem iloraz  $(n^2 - 1) : d$ , zwany wtedy *właściwą siłą łamiącą*, dla jednego i tego samego gazu jest stały, i że siła łamiąca

302.

mieszaniny gazów równa się summie sił łamiących części składowych; lecz Dulong niedługo potem okazał, że siły łamiące różnych gazów nie mają żadnego związku z gęstością, i że siła łamiąca połączenia chemicznego nie jest równą summie sił łamiących części składowych. Ponieważ więc dawniejsze pojęcie o sile łamiącej nie prowadziło do pożądaných wyników, przeto zgodnie z projektem Beer'a nowsi fizycy, Landolt (1864) i Gladstone (1864) próbowali użyć za punkt wyjścia, zamiast siły łamiącej, wyrażenia  $(n-1) : d$  Landolt nazywa to wyrażenie *właściwą zdolnością załamania*. Rzeczywiście, wyrażenie to pozwala sądzić o wpływie łamiącym środka; gdyż  $n-1 = (c:c') : c'$  wyraża stratę prędkości światła w stosunku do pozostającej prędkości w nowym środku. Dla właściwej zdolności załamania wyprowadzonymi zostały bardzo ciekawe twierdzenia, mianowicie, że ta zdolność jest niezależną od temperatury i stanu skupienia, że zatem dla jednego i tego samego ciała pozostaje stałą we wszystkich okolicznościach, a nawet zatrzymuje swą wartość w najrozmaitszych mieszaninach i połączeniach chemicznych tak, że związki izomeryczne posiadają tę samą właściwą zdolność załamania. Wskutek tego wytworzyło się pojęcie o równoważniku refrakcyi. *Równoważnik refrakcyi* jest właściwą zdolnością załamania równoważnika chemicznego pewnego ciała, więc  $= p(n-1) : d$ , gdzie  $p$  oznacza równoważnik chemiczny. Do tego nowego pojęcia odnosi się twierdzenie: równoważnik refrakcyi połączenia chemicznego jest równy summie równoważników refrakcyi części składowych. Za pomocą tego twierdzenia można znaleźć równoważnik refrakcyi i wykładnik załamania pewnego połączenia z wykładników jego części składowych; naodwrot, można znaleźć równoważnik refrakcyi i wykładnik załamania jednej części składowej znając równoważniki refrakcyi: połączenia i pozostałych części składowych. Na tej zasadzie udało się oznaczyć nie tylko równoważniki refrakcyi elementów, ale nawet wykładniki załamania metalów nieprzezroczystych. Landolt i Haagen znaleźli zgodnie równoważnik refrakcyi wodoru  $= 1,3$ , tlenu  $= 3$ ; węgla  $= 5$ . Schrauf, który wychodzi z zasady, że światło nie jest skutkiem drgań eteru, lecz atomów ciał, znalazł prawie też same liczby. Gladstone obliczył równoważniki załamania pewnego szeregu metalów i znalazł np. dla potassu 8, dla wapnia 5,2, dla cynku 4,8, dla ołowiu 12,1 dla merkurjuszu 9,8, z kąd można obliczyć zdolności załamania i wykładniki załamania tych pierwiastków. Schrauf pozostał przy dawnem określeniu właściwej siły łamiącej  $(n^2-1) : d$ , wyprowadził dla niej twierdzenie podobne do mających miejsce dla właściwej zdolności załamania i na swej zasadzie obliczył równoważniki refrakcyi. Oprócz tego znalazł on równanie, w którym równoważnik refrakcyi jest wyrażony za pomocą iloczynu z liczby i wielkości atomów w jednostce masy i zdołał oznaczyć ten iloczyn, który nazwał *optyczną liczbą atomową*, za pośrednictwem obrachowanych równoważników refrakcyi. Wyniki Schrauf'a z przyczyny niepewności jego założenia, znalazły mało uznania dotąd; wyznać jednak trzeba, że w rozbieżną dziedzinę nauki zapuścił się on najdalej.

303.

**Załamanie światła w soczewkach.** Pryzmat przechodzi w soczewkę wtedy, gdy kierunek jednej lub 2-eh jego ścian bocznych zmienia się stale i ciągle. Powstają ztąd ciała przezroczyste, posiadające jedną lub dwie krzywe powierzchnie boczne, i ciała takie nazywają się soczewkami. Rozróżniamy 6 rodzajów soczewek, przedstawionych na figurze 141: 1) So-

czewka dwu-wypukła; 2) soczewka płasko-wypukła; 3) soczewka wklęsło-wypukła; te 3 rodzaje soczewek nazywają się także soczewkami zbierającymi albo szklami palącymi; są one w środku grubsze, niż na obwodzie; 4) soczewka dwu-wklęsła; 5) soczewka płasko-wklęsła; 6) soczewka wypukło-wklęsła; te trzy rodzaje nazywane są także soczewkami rozpraszającymi; są one cieńsze w środku, niż przy brzegach. Krzywizna soczewki może być przedstawiona jakąkolwiek krzywą; jednak przygotowanie soczewek o powierzchniach kulistych i wykrycie odnoszących się do nich praw jest najprostszym. Linija prosta, łącząca z sobą środki geometryczne powierzchni ograniczających, nazywa się osią soczewki. Jeżeli osie wielu soczewek padają na siebie, to soczewki nazywają się ześrodkowanymi; pojedyncza soczewka jest ześrodkowaną, gdy oś jej jest prostopadłą do jednego z kół granicznych. Punkt środkowy M w soczewkach dwu-wypukłych i dwu-wklęsłych, o równych obu powierzchniach, nazywa się środkiem optycznym; w takich soczewkach, wszystkie promienie poprowadzone przez ten punkt, przechodzą przez nie niezłamane, gdyż elementa powierzchni, będące wejściem i wyjściem pro-



Fig. 141.

mieni, są do siebie równoległe; takie promienie nazywają się głównymi;— promień główny idący po osi przechodzi przez wszystkie soczewki, niezłamanym. Inne promienie zostają załamane i to tem więcej, im większy jest ich kąt padania. Promienie wychodzące z jednego punktu, w ogóle nie schodzą się znów w innym punkcie; tylko promienie jednakowo rozmieszczone naokoło osi, i takie promienie, które padają na soczewkę bardzo blisko osi, schodzą się w jednym punkcie i wytwarzają obraz punktu świetlnego, z którego wychodzą. Odległość d punktu świecącego od soczewki nazywa się odległością przedmiotu, a odległość b, odległością obrazu. Odległości te są związane z sobą następującym prawem:

$$\frac{1}{b} + \frac{1}{d} = (n-1) \left( \frac{1}{r} + \frac{1}{r'} \right) \dots \dots \dots (42)$$

n w tym wzorze oznacza wykładnik załamania, r i r' promienie obu po-

wierzchni kulistych. Prawo to wyraża się zwykle w formie wzoru matematycznego; można jednak wyrazić je słowami: *summa odwrotności: odległości obrazu i przedmiotu, jest równą summie odwrotności promieni pomnożonej przez współczynnik załamania zmniejszony jednością.*

**Dowód.** Rozważmy naprzód załamanie promieni wchodzących w środek gęstszy, przezroczysty, o powierzchni kulistej (fig. 142). Jeżeli  $c$  jest środkiem, a  $a$  punktem świetlnym, to  $ac$  jest osią i jednym promieniem głównym; promień  $as$ , padający w płaszczyźnie papieru na powierzchnię kuli, zostanie załamany w tej samej płaszczyźnie, do prostopadłej, może więc przeciąć oś w punkcie  $a'$ . Położenie tego punktu łatwo oznaczyć z uwag następujących: oba kąty  $\alpha$  i  $\beta$

są, jak wiadomo, w zależności od siebie, wyrażającej się równaniem  $n = \frac{\sin \alpha}{\sin \beta}$  z trójkątów  $asc$  i  $a'sc$  można znaleźć jeszcze inne równanie między temi kątami; gdyż  $ac : sc = \sin (180^\circ - \alpha) : \sin sac$ , ząd  $\sin \alpha = (ac : sc) \sin sac$ , i również  $a'c : sc = \sin \beta : \sin sa'c$ , ząd  $\sin \beta = (a'c : sc) \sin sa'c$ . Podzielenie obu tych wartości przez siebie i uwzględnienie pierwszego równania da:  $n = (ac : a'c) \cdot (\sin sac : \sin sa'c)$ . Ponieważ  $\sin sac : \sin sa'c = a's : as$ , przeto  $n = (ac : a'c) (a's : as)$ . Zróbmy założenie, o którym zapominam nie należy w dalszym ciągu, że promienie padają blisko osi, że zatem przez soczewkę przechodzą tylko promienie centralne, to ostatni stosunek  $a's : as$  będzie prawie równym  $a'o : ao = u : d$ , jeżeli



Fig. 142.

przez  $u$  oznaczmy odległość  $a'o$  punktu zejścia się promieni załamanych, od powierzchni; pierwszy stosunek da się także wtedy inaczej wyrazić, a mianowicie:  $ac : a'c = (d+r) : (u-r)$ . Wstawmy te wartości w wyrażenie na  $n$ , to otrzymamy  $n = [(d+r) : (u-r)] \cdot (u:d)$ . Znosząc mianownik i dzieląc otrzymane równanie przez  $bd r$ , będzie:

$$\frac{n}{r} - \frac{n}{u} = \frac{1}{r} + \frac{1}{d}, \text{ albo } \frac{n}{u} + \frac{1}{d} = \frac{n}{r} - \frac{1}{r}$$

To równanie wyraża, że wszystkie promienie centralne, wychodzące z jednego punktu, schodzą się także w jednym punkcie; gdyż dla wszystkich tych promieni  $d$ ,  $r$  i  $n$  mają tę samą wartość; dla wszystkich tych promieni wypada przeto też sama wartość na  $u$ ; przeciwnie. promienie brzeżne mają inne i mniejsze wartości na  $u$ , gdyż dla nich  $d$  jest coraz większem; te więc promienie mają bliższe punkta zjednoczenia. Dla promieni padających równolegle  $d = \infty$ ; oznaczmy odległość punktu ich zejścia się, czyli odległość ogniskową przez  $f$ , to równanie

powyższe przybierze kształt  $\frac{n}{f} = \frac{1}{r} (n-1)$ .

Jeżeli od środka ograniczonego z jednej strony powierzchnią kuli, przejść zechcemy do soczewki, t. j. do ciała ograniczonego z obu stron powierzchniami kulistymi, to musimy uwzględnić, że przy wyjściu promieni zachodzi powtórne załamanie, że zatem znalezione równanie na  $n$  może być zastosowane po raz drugi, lecz z pewnemi zmianami: 1. Przejście promieni następuje z środka gęstsze- 102  
go w rzadszy; zamiast  $n$  trzeba podstawić  $\frac{1}{n}$ . 2. Krzywizna powierzchni wyjścia może być inną, a promień jej ma położenie przeciwne; trzeba więc użyć zamiast  $r$ ,  $-r'$ . 3. Punkt zejścia się promieni wychodzących z tej drugiej powierzchni jest obrazem punktu świetlnego; więc  $u$  przejdzie na  $b$ . 4. Promienie padające na tę powierzchnię, nie wychodzą z  $a$ , lecz padają tak, jakby wychodziły z  $a'$ , którego odległość od powierzchni wyjścia  $= u - b$ , gdzie  $b$  oznacza grubość soczewki; ponieważ ta odległość jest przeciwna kierunkowi  $d$ , przeto wstawić należy  $-(u - b)$  za  $d$ , a pomijając grubość soczewki, podstawić trzeba  $-u$  za  $d$ . Wykonawszy te podstawienia, otrzymamy dla wyjścia promieni równanie:

$$\frac{1}{bn} - \frac{1}{u} = -\frac{1}{r'n} + \frac{1}{r'}$$

Znajdźmy z tego równania wartość na  $\frac{1}{u}$  i wstawmy ją w równanie dla wejścia promieni; wypadnie:

$$\frac{n}{bn} + \frac{n}{r'n} - \frac{n}{r'} + \frac{1}{d} = \frac{n}{r} - \frac{1}{r}$$

zskąd 
$$\frac{1}{b} + \frac{1}{d} = \frac{n}{r} + \frac{n}{r'} - \frac{1}{r} - \frac{1}{r'}$$

czyli 
$$\frac{1}{b} + \frac{1}{d} = (n-1) \left( \frac{1}{r} + \frac{1}{r'} \right)$$

co było do okazania.

Dla promieni równoległych,  $d = \infty$ , a  $b = f$ , przeto

$$\frac{1}{f} = (n-1) \left( \frac{1}{r} + \frac{1}{r'} \right)$$

Wstawiając w znaleziony wzór przedostatni wartość na  $\frac{1}{f}$  z ostatniego wzoru, otrzymamy prawo tej samej formy, co prawo odbicia dla zwierciadeł kulistych, mianowicie

$$\frac{1}{b} + \frac{1}{d} = \frac{1}{f}$$

W soczewkach wklęsłych, oba promienie mają kierunki przeciwne niż w soczewkach wypukłych; prawo dla tych soczewek jest więc:

$$\frac{1}{b} + \frac{1}{d} = -(n-1) \left( \frac{1}{r} + \frac{1}{r'} \right)$$

Wzór ten łatwo już przystosowywać do pozostałych rodzajów soczewek.

**304. - Obrazy przedmiotów wytworzone przez soczewki.** Soczewki mogą wytwarzać obrazy przedmiotów, gdyż zagęszczają w jeden punkt promienie wychodzące z punktu świetlnego. Ponieważ obrazy wszystkich punktów świetlnych ciała tworzą się podług jednego prawa i ponieważ położenie tych obrazów zawarunkowane jest tylko odległością przedmiotu i kierunkiem promienia głównego, ponieważ nadto oba te elementa zależą tylko od przedmiotu, przeto położenie tych obrazów musi być takie samo jak rozmieszczenie punktów na przedmiocie; powstaje więc obraz podobny do przedmiotu. Miejsce pojawienia się obrazu łatwo obliczyć za pomocą prawa dla soczewek; dla znalezienia wielkości obrazu porównywa się go geometrycznie z przedmiotem. Przy wykreśleniach geometrycznych należy uwzględnić: 1. Że obraz każdego punktu leży na promieniu głównym, że zatem może być znalezionym łatwo, jeżeli, na mocy wzmiankowanego podobieństwa obrazu z przedmiotem, znamy już pewne miejsce geometryczne, płaszczyznę lub linię obrazu. 2. Jeżeli zaś nie znamy tego miejsca geometrycznego, to promień równoległy do osi dostarczy drugiej linii, na której musi znajdować się obraz; gdyż każdy z promieni równoległych, po załamaniu przechodzi przez ognisko. Jeżeli więc ognisko soczewki jest dane, to dla każdego punktu świetlnego można wykreślić drugi promień pomocniczy. Położenie ogniska można otrzymać z równania  $\frac{1}{f} = (n-1) \left( \frac{1}{r} + \frac{1}{r'} \right)$ , albo praktycznie, przez puszczenie promieni słonecznych na soczewkę; miejsce, w którym promienie zagęszczają się w obraz najmniejszy, jest ogniskiem. Z pomocą tych danych i wzoru dla soczewek otrzymują się *prawa odnoszące się do obrazów wytworzonych przez soczewki wypukłe czyli zbierające*:

1. Jeżeli przedmiot znajduje się w odległości nieskończonej, to za soczewką w ognisku powstaje obraz jego nieskończenie mały.

Dla punktu świetlnego w odległości nieskończenie wielkiej zbieranie się promieni w ognisku już zostało dowiedzionem. Gdy nieskończenie oddalonym jest przedmiot, to promienie zeń padają także równoległe do siebie na soczewkę i schodzą się, jak poprzednio, w ognisku, dając obraz nieskończenie mały. Gdy przedmiot jest w odległości skończonej, lecz stosunkowo do wielkości soczewki niezmiernie odległy, jak np. słońce lub gwiazdy, to obraz jego pada blisko ogniska i jest niezmiernie mały; promienie słoneczne zatem zbiegają się prawie w ognisku i wytwarzają w niem bardzo jasny i bardzo gorący obraz słońca, mogący zapalać łatwo ciała palne; ztąd pochodzi nazwa szkieł palących. Ta własność ciał przezroczystych, o powierzchniach krzywych, była już znaną śpiewako-

wi Orfeuszowi i mądremu Sokratesowi, lecz ani starożytność, ani ostatnie stulecia nie używały jej do innych celów, jak do zabawy i widowisk. Tschirnhausen (1691) przyrządził szkła pałace o odległości ogniskowej od 6 do 12', na 9" grube, a Vernier (1774) olbrzymie, próżne soczewki, wypełnione wysokim lub olejkim terpentynowym. W Paryżu, armata zapalana przez soczewkę zwiastuje codziennie południe prawdziwe. Napelnione wodą butelki kształtu kulistego spowodować mogą pożar. W mikroskopach słonecznych małe przedmioty zostają silnie oświetlonemi przez schodzące się promienie.

2. Jeżeli przedmiot znajduje się od soczewki w odległości większej, niż podwójna odległość ogniskowa, to za soczewką tworzy się obraz rzeczywisty, zmniejszony, odwrócony, którego odległość od soczewki jest większa niż pojedyncza, a mniejsza niż podwójna odległość ogniskowa.

Gdyż podstawiając we wzór zasadniczy  $\left(\frac{1}{b} = \frac{1}{f} - \frac{1}{d}\right)$ , za  $d$  wartość większą od  $2f$  wypada, po takiej przeróbce, że  $b < 2f$ . Stosunek linijnej wielkości obrazu do wielkości przedmiotu daje się wyprowadzić z Fig. 143, na której obraz  $a'b'$  przedmiotu  $ab$  wykreślić można według metody wskazanej. Z podobieństwa trójkątów  $abM$  i  $a'b'M$  wypada:  $a'b' : ab = M' : M = d : b$ ; podstawiając w ostatni stosunek wartość na  $b$ , ze wzoru zasadniczego, równą  $df : (d-f)$ , wypadnie:  $a'b' : ab = f : (d-f)$ . Dopóki  $d > 2f$ , dotąd  $f < d-f$ , czyli  $a'b'$  jest mniejsze od  $ab$ ; obraz co do wielkości jest tem bliższy przedmiotu, im bliżej jest przedmiot podwójnej odległości ogniskowej. Gdy przedmiot zatem z odległości nieskończonej coraz bardziej zbliża się do soczewki, to obraz jego, pierwotnie nieskończenie mały, oddala się od ogniska do podwójnej odległości ogniskowej, i wzrasta co do wielkości. Obraz jest odwrócony, gdyż znajduje się po drugiej stronie soczewki, w której środku  $M$  promienie główne krzyżują się. Własność soczewek wypukłych wytwarzania w ognisku, obrazu rzeczywistego zmniejszonego i odwróconego względem przedmiotu znajdującego się w bardzo znacznej odległości, ma najrozleglejsze zastosowanie w lunetach i w camera obscura.

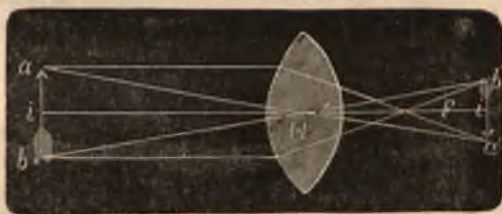


Fig. 143.

3. Gdy przedmiot znajduje się dokładnie w podwójnej odległości ogniskowej, to obraz jego rzeczywisty, odwrócony i równy przedmiotowi, pada za soczewką także w podwójnej odległości ogniskowej.

Gdyż w tym przypadku  $d=2f$ , a z wzoru zasadniczego  $\left(\frac{1}{b} = \frac{1}{f} - \frac{1}{d}\right)$  wypada wtedy i  $b = 2f$ . Powiększenia  $f : (d-f)$  staje się wtedy  $= f : f$  czyli  $1 : 1$ , a więc nie ma żadnego powiększenia.

4. Jeżeli przedmiot znajduje się między pojedynczą i podwójną odległością ogniskową, to za soczewką tworzy się obraz rzeczywisty, odwrócony i powiększony, którego oddalenie od soczewki jest większe niż podwójna odległość ogniskowa i które staje się tem większe, im przedmiot jest bliżej ogniska.

Wstawmy bowiem we wzór zasadniczy  $\left(\frac{1}{b} = \frac{1}{f} - \frac{1}{d}\right)$  za  $d$  wartość mniejszą od  $2f$ , to otrzymamy  $b > 2f$ . Powiększenie liniowe  $f:(d-f)$  jest wtedy większe od 1-ci; obraz przeto jest większy od przedmiotu. Oddalenie obrazu i jego powiększenie są tem znaczniejsze, im mniejszą jest odległość  $d$  przedmiotu; oba te elementa są tem bliższymi nieskończoności, im przedmiot jest bliżej ogniska. Zatem, gdy przedmiot z podwójnej odległości ogniskowej zbliża się ku ognisku, obraz przedmiotu po drugiej stronie soczewki oddala się od podwójnej odległości ogniskowej do nieskończoności i powiększa się coraz bardziej. I ta własność soczewek wypukłych ma bardzo rozległe zastosowanie w lunetach, mikroskopach, w mikroskopie słonecznym, w latarni magicznej, kulach szewckich i t. d.

5. Gdy przedmiot jest umieszczony w ognisku, to w odległości nieskończonej tworzy się obraz nieskończenie wielki, czyli promienie wychodzące z ogniska, po załamaniu się w soczewce, przyjmują kierunki wzajemnie równoległe.

Wstawmy we wzór zasadniczy za  $d$  wartość  $f$ , to wypadnie  $b = \infty$ ; powiększenie liniowe  $f:(d-f) = \infty$ . Ponieważ promienie po drugiej stronie wychodzą równoległe do siebie, przeto soczewka po drugiej stronie wydaje się oświetloną i błyszczącą; stosuje się tę własność soczewek wypukłych do latarni ślepych i latarni morskich. Ponieważ soczewki takiej wielkości, jaka jest wymagana w latarniach morskich, są trudnymi do wykonania, przeto Fresnel użył do tego celu soczewek wielopierścieniowych: soczewka taka składa się z soczewki środkowej, otoczonej pierścieniami szklanymi, którym nadano takie wymiary, aby wszystkie posiadały ognisko wspólne. W tem ostatnim znajduje się światło węglowe elektryczne, lub inne silne światło, z którego w górę i na dół wychodzące promienie zostają powrócone od całkowicie odbijających przyzmatów, a będąc zamknięte w przestrzeni świetlnej opatrzonej ciemnymi soczewkami wielopierścieniowymi, zostają zmuszone do wychodzenia z tychże soczewek w kierunkach równoległych.

6. Gdy przedmiot znajduje się między ogniskiem a soczewką, to po tej samej stronie soczewki tworzy się obraz urojony, prosty i powiększony, oddalony od soczewki więcej niż przedmiot i tem większy od przedmiotu, im przedmiot jest bliżej ogniska soczewki.

Gdyż w tym razie  $d < f$ , a wzór zasadniczy daje wartość ujemną na  $b$  liczebnie większą od  $d$ ; znak ujemny wyraża, że promienie pewnego punktu nie spotykają się w kierunku ich biegu, lecz w kierunku przeciwnym, a więc na zwrotnem przedłużeniu tych promieni. Promienie postępujące naprzód, nie schodzą się więc, lecz rozbiegają po wyjściu z soczewki; na oku jednak znajdującym



się po drugiej stronie soczewki sprawiają wrażenie, jakby wychodziły z punktów świetlnych: wytwarzają obraz urojony. Obraz jest w większej od soczewki niż przedmiot odległości, gdyż  $b > d$ ; jest on prosty, gdyż obraz i przedmiot znajdują się po tej samej stronie soczewki; jest większy od przedmiotu, gdyż przestrzeń między krańcowymi promieniami głównymi, w odległości większej, jest większą od takiejże przestrzeni odpowiadającej mniejszej odległości od soczewki; powiększenie  $\frac{f}{d-f}$  jest większe od 1; im  $d$  bliższe  $f$ , tem obraz przedmiotu jest większy.

To działanie soczewki zbierającej na przedmiot umieszczony wewnątrz odległości ogniskowej staje się jasnym przy uwzględnieniu wykreślenia geometrycznego, obrazu  $a'b'$  przedmiotu  $ab$  (fig. 144). Własność ta soczewek zbierających ma zastosowanie w lunetach, lupach, mikroskopach, panoramach i t. d.

Jak w przypadku 5-tym promienie rozchodzące się nabrały kierunków równoległych po przejściu przez soczewkę dwuwypukłą, a w 6-tym rozpraszalność ich została zmniejszona, tak też w przypadkach poprzednich widzieliśmy, że promienie równoległe lub rozchodzące się ulegały pewnemu zagęszczeniu, zbieżności; własność ta wspólna trzem pierwszym rodzajom soczewek, była przyczyną nadania im nazwy zbierających. Widocznym jest, że zagęszczenie już zbiegających się promieni, zostaje zwiększone działaniem soczewki zbierającej, i że punkt ich zbiegu zostaje ku soczewce zbliżonym.

**Prawa dla obrazów wytwarzanych przez soczewki wklęsłe czyli rozpraszające** wypadają ze wzoru  $\frac{1}{b} + \frac{1}{d}$

$= -(n-1) \left( \frac{1}{r} + \frac{1}{r'} \right)$ , albo, oznaczając iloczyn po prawej ułamkiem  $\frac{1}{f}$ , ze wzoru  $\frac{1}{b} + \frac{1}{d} = -\frac{1}{f}$ ; otrzymujemy ztąd  $\frac{1}{b} = -\left( \frac{1}{d} + \frac{1}{f} \right)$ , czyli,

że odwrotność odległości obrazu jest ujemną i większą od odwrotności odległości przedmiotu; sama więc odległość obrazu jest również ujemną i mniejszą od odległości przedmiotu, czyli promienie nie spotykają się z sobą w kierunku ich rozchodzenia się, lecz dopiero przy przedłużeniu ich wstecznym; rzeczywiście więc nie przecinają się one, lecz zdają się wychodzić z jednego punktu, znajdującego się po stronie przedmiotu i bliżej soczewki niż przedmiot. Obraz przeto jest urojony, bliższy soczewki niż przedmiot; ponieważ wraz z ostatnim leży po tej samej stronie soczewki, więc jest prosty, a jako ograniczony krańcowymi promieniami głównymi bliższymi niż na przedmiocie, jest zmniejszony. *Soczewki wklęsłe wytwarzają obrazy przedmiotów urojone, proste, zmniejszone i bliższe soczewek, niż przedmioty same.*

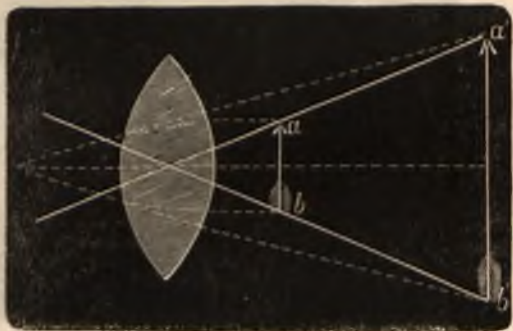


Fig. 144.

Blizsze położenie obrazu punktu jest przyczyną, że rozchodzące się promienie, po przejściu przez soczewkę, rozchodzą się jeszcze silniej; soczewki takie sprawiają rozbieżność promieni równoległych, wzmacniają rozbieżność rozchodzących się, a promienie zbiegające się czynią mniej zbieżnymi, słowem, rozpraszają promienie i wskutek tej własności otrzymały nazwę szkieł rozpraszających. Jeżeli promienie są pierwotnie zbiegającymi się w punkcie położonym za soczewką w odległości  $f$ , to po przejściu przez soczewkę wychodzą równolegle do siebie; gdyż w tym przypadku  $d = -f$ , więc  $\frac{1}{b} = -\left(-\frac{1}{f} + \frac{1}{f}\right) = 0$ , przeto

$b = \infty$ . Obraz znajduje się w odległości nieskończonej, więc promienie wychodzą równolegle. Naodwrot, promienie równoległe padające na soczewkę zostają rozproszone tak, jakby wychodziły z punktu leżącego za soczewką w odległości  $f$ . W punkcie tym jednak promienie nigdy nie zbierają się rzeczywiście; dla tego też nazywa się on nie ogniskiem, lecz *punktem rozpraszania*, a  $f$  *odległością rozpraszania*. Skoro promienie dążące do zbiegu w punkcie rozpraszania po za soczewką, po przejściu przez soczewkę wklęsłą, stają się równoległymi, więc działanie soczewki na promienie o słabszej zbieżności musi być rozpraszającym. Promienie zatem, dążące do zejścia się za soczewką w punkcie, którego oddalenie od soczewki jest większe niż odległość rozpraszania, rozchodzą się po załamaniu i zdają się wychodzić z punktu przed soczewką; wytwarzają one przed soczewką obraz

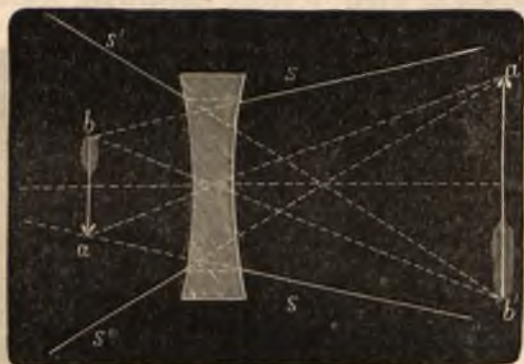


Fig. 145

urojony. To ważne dla optyki zachowanie się soczewek wklęsłych jest przedstawione na fig. 145. Promienie zbieżne  $s$  padające na soczewkę, gdyby na nią nie trafiły, wytworzyłyby obraz  $ab$ , lecz pod wpływem soczewki zostają załamane, tak, że przyjmują kierunki  $s'$  i zdają się wychodzić z  $a'$  i  $b'$ , wytwarzając obraz urojony  $a'b'$ . Obraz ten jest wyjątkowo odwrótnym i, w tych okolicznościach, powiększonym. Gdyż powiększenie wynosi tu  $-f : (d+f) = f : (d-f)$ ; dopóki  $f > d-f$ , czyli dopóki  $2f > d$ , albo  $d < 2f$ , dotąd ta wartość jest większa od 1. Jeżeli zatem odległość soczewki od nieutworzonego obrazu jest większą niż pojedyncza, ale mniejszą niż podwójna odległość rozpraszania, powstaje obraz odwrócony i powiększony tem znacznie, im ta odległość jest bliższą pojedynczej odległości rozpraszania.

Prawa dla soczewek stwierdzić można doświadczalnie za pomocą ławki optycznej, czyli długiego linijału, stale ustawionego i opatrzonego przesuwkami. Jedna z przesuwek podtrzymuje źródło światła, na drugiej mogą być umieszczone

soczewki, a na trzeciej tablicy pokryte papierem białym lub niebieskim; obrazy rzeczywiste mogą być widziane i bez tablicy; przy soczewkach jednak wykonanie doświadczeń przedstawia więcej trudności, niż przy zwierciadłach, gdzie do doświadczeń używa się tego samego przyrządu.

**Zboczenie kulistości** (aberracja kulistości). Przez zboczenie kulistości 306. rozumiemy własność soczewek ograniczonych powierzchniami kulistymi, niesprowadzania do jednego punktu wszystkich promieni wychodzących z innego punktu, własność, która powoduje nie obraz punktu (ognisko), lecz linię ogniskową (diacaustica), lub przestrzeń ogniskową. Obrazy wytworzone przez soczewki przedstawiają wskutek tego pewną niewyraźność, bez usunięcia której, soczewki nie mogłyby znaleźć rozleglejszych zastosowań; usunięcia tego dokonywa się zwykle za pomocą zakryć lub zasłon, czyli nieprzezroczystych pierścieni, pokrywających brzegi soczewki; przy takich urządzeniach, promienie brzeżne mają zatamowane przejście przez soczewkę, dostają się więc do niej tylko promienie środkowe. Do tego założenia stosują się prawa soczewek, pod tym tylko bowiem warunkiem, promienie jednego punktu

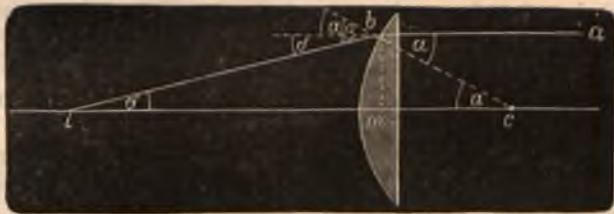


Fig. 146.

schodzą się znów w jednym punkcie. Zboczenie kuliste jest tem silniejsze, im większa jest rozwartość soczewki i jej krzywizna, czyli im mniejszy jest promień krzywizny a z nim i odległość ogniskowa.

Dowód ogólny byłby tu zaobszernym; okażemy powyższe twierdzenie tylko dla promieni równoległych, padających na szewkę płasko-wypukłą (fig. 146). Wynajdźmy odległość  $m$ , w której promień  $ab$  równoległy do osi, załamany następnie przez soczewkę, spotyka oś po załamaniu; widocznem jest, że  $im = bm$  :  $\operatorname{tg} \beta$ . Z trójkąta  $bmc$  wypada:  $bm = bc \cdot \sin \alpha = r \cdot \sin \alpha$ , więc  $im = r \cdot \sin \alpha$  :  $\operatorname{tg} \beta$ . Ponieważ dla każdego kąta  $\alpha$  ma zawsze miejsce równanie:  $\sin \alpha : \sin \beta = \frac{3}{2}$ , więc można znaleźć żeń wartość na  $\beta$ , a następnie na  $\beta = \beta - \alpha$ . Dla soczewki płasko-wypukłej łatwo obliczyć jaką wartość mieć będzie  $im$  dla różnych kątów padania; np. dla  $\alpha = 1^\circ$ , odległość ta wynosi prawie  $2r$ , dla  $\alpha = 30^\circ$ , jest ona tylko  $1,5r$ ; ztąd widać, że promienie padające pod rozmaitemi kątami zbiegają się w różnych odległościach od soczewki. Odległości te są tem znaczniejsze, im większą jest różnica między największym i najmniejszym kątem padania; a ta różnica znów jest tem mniejszą, im większą jest rozwartość soczewki i im mniejszy jest promień. Z wartości na  $i$  i  $m$  wypada także, że promienie o równych kątach padania, czyli promienie trafiające na koło opisane na powierzchni soczewki z jej środka, schodzą się w jednym punkcie. Szczegółowsze

rachunki pokazują, że soczewki wklęsło-wypukłe, przy pewnym stosunku promieni, są wolne od zboczenia kulistości, równie jak i pewne połączenia dwóch soczewek; soczewki takie nazywają się *aplanatycznymi*.

**Stwierdzenia.** Wpływ zboczenia kulistości, niewyraźność obrazów, objawia się najlepiej na dawnych, wielkich, o znacznej krzywiznie soczewkach; obraz staje się o wiele wyraźniejszym po zakryciu brzegów. Stawiając między soczewką i światłem kołowy ekran, zasłaniający całkowicie soczewkę, mający tylko dwa otworki kołowe, z których jeden znacznie mniejszy od drugiego, otrzymamy dwa obrazy, dające się uwidocznic na papierze; przez zakrywanie otworków można łatwo rozpoznać który obraz pochodzi od promieni środkowych, a który od brzeżnych. Przy małym oddaleniu tafli papierowej od soczewki, promienie brzeżne dają obraz punktu, a środkowe obraz pierścienia; pierwsze złączyły się w jednym punkcie, drugie — nie; przy większej odległości tafli, tworzy się pierścien z promieni brzeżnych, a z centralnych — punkt. Z tego doświadczenia okazuje się także, że punkt zbiegu promieni brzeżnych przypada bliżej soczewki, aniżeli takiż punkt dla promieni środkowych.

**307.** *Zadania.* 456. Jaki jest kąt załamania promienia, który pada pod  $40^\circ$  z powietrza na szkło, pod  $65^\circ$  z powietrza na wodę, pod  $90^\circ$  z powietrza na alkohol, pod  $80^\circ$  z powietrza na dyament? Rozwiąz.  $25^\circ 22'$ ,  $42^\circ 43'$ ,  $46^\circ 53'$ ,  $23^\circ 42'$ .

457. Jaki jest kąt załamania dla promienia, który wchodzi w powietrze pod kątem  $20^\circ$  ze szkła, z wody, z siarku węgla, z chromianu ołowiu? Rozw.  $30^\circ 52'$ ,  $27^\circ 11'$ ,  $35^\circ 4'$ ,  $90^\circ$ .

458. Pod jakim kątem ma padać promień z powietrza na spat wapienny, olej skalny i eter, aby wchodził w nie pod kątem  $80^\circ$ ? Rozw.  $36^\circ 33'$ ,  $39^\circ 38'$ ,  $46^\circ 29'$ .

459. Jaki jest wykładnik załamania ze szkła w powietrze, jeżeli promień nachylony pod kątem  $30^\circ$  rozchodzi się w szkło pod kątem  $19^\circ 29'$ ? Rozw.  $\frac{3}{2}$ .

460. Okazać, że promień po przejściu wielu środków, o ścianach równoległych, wyjdzie w kierunku do pierwotnego równoległym, jeżeli ostatni środek jest tożsamy z pierwszym. Rozw. Trzeba użyć w pomoc znanego faktu, że  $\sin \alpha : \sin \beta = c : c'$ ,  $\sin \beta' : \sin \beta'' = c' : c''$  i t. d.

461. Dowieść, że wykładnik załamania dwóch środków względem siebie równa się ilorazowi wykł. zał. obu tych środków względem tegoż samego trzeciego. Rozw. Trzeba wypisać stosunki wstaw dla dwóch środków względem trzeciego i uważać, że podług zad. 460, pierwszy kąt padania jest równy drugiemu kątowi załamania.

462. Jaki jest wykładnik załamania z dyamentu w szkło, wodę i siarek węgla? Rozw. Podług zad. 461 otrzymamy 1,658, 1,865, 1,48.

463. Znaleźć przez wykreślenie kierunek sztabki pogrążonej w wodzie pod kątem  $20^\circ$ . Rozw. Należy stosować do każdego punktu zanurzonego wykreślenie podobne do fig. 138.

464. Okazać za pomocą wykreślenia, że pieniądz, o którym wzmianka w 298. 6, wydaje się większym w wodzie. Rozw. Należy wykreślić dwa załamane, krańcowe promienie średnicy.

465. Jak się zmienia zbieżność promieni zbieżnych i rozbieżność rozbieżnych, przy przejściu ich z rzadszego środka w gęstszy i odwrotnie? Rozw. Należy użyć we wszystkich 4-ch przypadkach, praw 4, 5 i 6 z 298.

466. Wykazać, dla czego podczas zaćmienia księżycy, z niektórych miejsc widać słońce i księżyc naprzeciw siebie nad horyzontem, skoro te dwa ciała niebieskie powinny znajdować się na jednej linii prostej z ziemią? Rozw. Obacz stronę 121.

467. Okazać, że gęstość eteru w ciele przezroczystem jest  $n^2$  razy większą, niż w próżni. Rozw. Trzeba użyć znanych wzorów:  $n = c : c'$  i  $c = \sqrt{e \cdot d}$ , a także i tego co powiedziano we wstępie do 298 o sprężystości eteru.

468. Okazać, że bezwzględny wykładnik załamania powietrza równa się  $\sqrt{[1:(2-n^2)]}$ , jeżeli  $n$  oznacza zwyczajny w. z. powietrza względem powietrza 2 razy gęstszego. Rozw. Trzeba uwzględnić twierdzenie Arago i Biot (302) o sile łamiącej ( $u^2 - 1$ ):  $d$ .

469. Jaki jest kąt graniczny całkowitego odbicia dla chromianu ołowiu, dla najsilniej łamiącego flintglasu, dla siarku węgla? Rozwiąz.  $19^\circ 59'$ ,  $30^\circ$ ,  $36^\circ 32'$ .

470. Ile wynosi średnica koła, wewnątrz którego ryba, znajdująca się na  $10^m$  pod wodą, widzieć może z wody, jeżeli taż ryba na zewnątrz tego koła, widzi zwierciadłose dno? Rozw.  $2 \cdot 10 \text{ tg } 48^\circ 35' = 22,673^m$ .

471. Dla czego papier stłuszczony olejem prześwieca? Rozw. Olej i papier są bliżej siebie pod względem gęstości optycznej, niż powietrze i papier; dla tego kąt graniczny całkowitego odbicia jest większy, a ono samo — mniejsze (299).

472. Dla czego powietrze przed deszczem i po deszczu jest przezroczystsze? Rozw. Oprócz dopiero wzmiankowanej zasady, należy także wziąć pod uwagę usunięcie cząstek kurzu.

473. Pod jakim co najmniej kątem musi padać promień na powierzchnię odpowiadającą ramieniowi kąta prostego, pryzmatu prostokątnego i równoramiennego, aby został odbity całkowicie od powierzchni, odpowiadającej przeciwprostokątnej, czyli tak, aby ta powierzchnia, zwrócona ku niebu, wydawała się silnie oświetloną? Rozw. Według 300, kąt załamania  $r = A - g = 45 - 38 = 7^\circ$ , ztąd kąt padania  $\alpha = 10^\circ$ .

474. Jaki jest w. z. ciała, dla którego ten kąt wynosi  $15^\circ$ ? Rozwiązanie: Równanie  $r = A - g$  daje  $\frac{1}{n} \sin 15 = \sin(45 - g) = \sin 45 \cdot \cos g - \cos 45 \cdot \sin g = \sin 45 \sqrt{1 - \left(\frac{1}{n}\right)^2} - \left(\frac{1}{n}\right) \cdot \cos 45$ ; ztąd  $\sin 15 = \sin 45 \sqrt{n^2 - 1} - \cos 45$ , i  $n = 1,69$ .

475. Wollaston jedno miejsce powierzchni przeciwprostokątnej wspomnianego pryzmatu (w. z. = 1,6) smarował masłem (lub innemi nieprzezroczystymi ciałami) i musiał wtedy obracać dalej pryzmat ku jasnemu niebu, aby miejsce to nabrało srebrzystego odblasku; kąt padania promieni był dla masła  $24^\circ 12'$ ; obliczał on ztąd w. z. ciał nieprzezroczystych; jaki jest wykł. zał.  $n'$  dla masła? Rozw. Używa się ostatniego równania, lecz wstawia się w nie  $n:n'$  zamiast  $n$ , gdyż teraz  $\sin g \neq n$ , lecz  $= n:n'$ ; otrzymamy wtedy  $n' = 1,474$ .

476. Rachunkiem i wykreśleniem oznaczyć drogę promienia, padającego na pryzmat równoramienny pod  $30^\circ$ . Rozwiązanie. (fig 140).  $\sin i = \frac{3}{2} \sin r$ ,  $r' = A - r$ ,  $\sin r' = \frac{3}{2} \sin i$ ; ztąd  $i = 77^\circ 7'$ .

477. Pod jakim kątem promień padać winien, aby był równoległy w pryzmacie, do jego podstawy? Rozw.  $r = 90^\circ - 60^\circ$ ;  $\sin i = \frac{3}{2} \sin 30^\circ = 0,75$ ; ztąd  $i = 18^\circ 35'$ .

478. W równobocznym pryzmacie z soli kamiennej kąt najmniejszego odchylenia  $= 42^\circ 10'$ ; jaki jest w. z. soli kamiennej? Rozw. 1,55.

479. Zrobić tabelę zdolności załamania i równoważników refrakcyj dla ciał podanych na str. 128.

480. Wykreślić przebieg ukośnie padającego promienia, przez soczewkę dwu-wypukłą, o nierównych krzywiznach (w. z.  $= \frac{3}{2}$ ). Rozwiąz. a b (fig 147) niech będzie promieniem, c i c' środkami obu krzywizn soczewki; przy małych kątach padania,  $n = \frac{3}{2}$  znany stosunek wstaw, może przedstawiać stosunek ką-

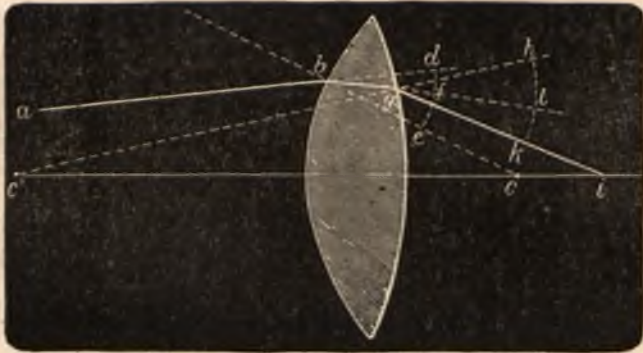


Fig. 147.

tów, lub łuków im odpowiadających; ta uwaga pozwoli oznaczyć, wprawdzie przybliżony tylko, przebieg promienia abgi.

481. Określenie środka optycznego, przytoczone na str. 131, ma miejsce nie dla wszystkich soczewek; środek optyczny jest tym punktem soczewki, przez który wszystkie promienie przechodzą niezalmane, w zwyczajnej więc soczewce leży w środku wewnętrznej części jej osi, w środku jej grubości  $d$ ; gdzie on przypadnie w ogóle, jeżeli  $r$  i  $r'$  są promieniami krzywizn? Rozw. Dla promienia przechodzącego przez ten punkt, drugi kąt załamania musi być równy pierwszemu kątowi padania, przeto także i drugi kąt padania musi się równać pierwszemu kątowi załamania; więc obie prostopadłe muszą być równoległe względem siebie; ztąd wypada odległość środka optycznego od jednej powierzchni soczewki  $= dr : (r+r')$ , a od drugiej powierzchni  $= dr' : (r+r')$ .

482. Wskazać położenie środka optycznego dla pojedynczych rodzajów soczewek.

483. Znaleźć położenie ogniska dla soczewki dwu-wklęsłej o równych krzywiznach z obu stron. Rozw. Przy użyciu wzoru  $\frac{1}{f} = (n-1)\left(\frac{1}{r} + \frac{1}{r'}\right)$  i wykładnika załamania  $= \frac{3}{2}$ , wypada  $f = r$ ; ognisko leży w środku.

484. Wyznaczyć za pomocą prostego wykreślenia bieg promienia oddalającego się i zbliżającego się do osi, dla takiej soczewki. Rozw. Fig. 148. Należy poprowadzić do promienia  $a$  b równoległą oś oboczną  $c' M$  i odciąć na niej  $Mf' = Mf$ , to  $bf'$  i będzie promieniem załamanym; podobnież dla promienia zbliżnego.

485. Znaleźć obraz punktu leżącego na osi. Rozw. Trzeba przez ten punkt poprowadzić promień i szukać jego przebiegu według zad. 484; przecięcie się tego promienia z osią będzie obrazem punktu.

486. Niech uczeń wprawia się w wynajdywanie obrazów punktów osiowych i innych, częścią według zad. 484, częścią według prawideł wyłożonych we wstępie 304.

487. Wprawiać się w wykreślanie obrazów linii prostych i krzywych,

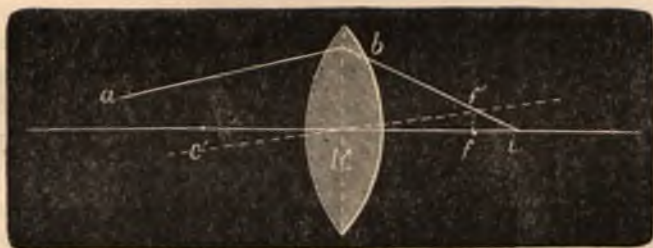


Fig. 148.

powierzchni i ciał dla wszystkich możebnych położzeń, względem różnych rodzajów soczewek.

488. Wyprowadzić wzór ogólny na odległość ogniskową soczewki. Rozw. Wzór 42 w połączeniu z  $\frac{1}{f} = (n-1)\left(\frac{1}{r} + \frac{1}{r'}\right)$  daje  $f = \pm 2rr' : (r \pm r')$ .

489. Znaleźć wielkość  $f$  dla pojedynczych rodzajów soczewek. Rozw. Dla równobocznych dwu-wypukłych jest  $r = r'$ , dla płaskowypukłych  $f = 2r$ , dla wklęsło-wypukłych, gdzie  $r = 2r'$ ,  $f$  jest równe  $4r$ ; dla równobocznych dwu-wklęsłych jest  $f = -r$ , dla płasko-wklęsłych  $f = -2r$ , dla wypukło-wklęsłych ( $r = 2r'$ ) jest  $f = 4r$ ; przytem zakłada się zawsze, że  $n = \frac{3}{2}$ ; dla innego  $n$  jest ogólnie  $f = \pm rr' : (n-1)(r \pm r')$ .

490. Ze wzoru  $\frac{1}{b} + \frac{1}{d} = -(n-1)\left(\frac{1}{r} + \frac{1}{r'}\right)$  dla soczewek wklęsłych, wyprowadzić położenie i wielkość obrazów na wszystkie przypadki, rozważane przy soczewkach wypukłych w 304.

491. Niech promieniami soczewki dwu-wklęsłej będą  $20^\circ$  i  $30^\circ$ ; ile wyniesie odległość ogniskowa; gdzie leży i jak wielki jest w tej soczewce obraz

przedmiotu na  $1^m$  długiego, a oddalonego na  $80^c$ ? Rozw.  $f = 24^c$ ,  $b = 34\frac{2}{7}^c$ ; wielkość  $= 42\frac{6}{7}^c$ .

492. Obraz pewnego przedmiotu wytworzony przez soczewkę ma być 6 razy większy od przedmiotu; jak ma być umieszczony ten przedmiot? Rozwiązanie:  $d = 28^c$ .

493. Ogólnie, jaka ma być odległość przedmiotu, wyrażona w odległości ogniskowej  $f$ , od soczewki zbierającej, aby obraz był  $m$  razy większy od przedmiotu? Rozw.  $d = f(m+1) : m$ .

494. W jakiej odległości od soczewki zbierającej winien być umieszczony przedmiot, aby odległość od jego obrazu rzeczywistego była równa  $m$ ? Rozwiązanie;  $d = \frac{1}{2}m \pm \sqrt{(m^2 - 4fm)}$ .

## 6. Nauka o rozkładaniu się światła na barwy czyli dyspersja światła.

### NAUKA O BARWACH.

**308. Światło i barwa.** Światło jest objawem poprzecznych drgań eteru od 400 do 800 biljonów na sekundę, w ogóle; barwa jest stanem drgań oznaczonym jedną z tych liczb, lub mieszaniną takich oznaczonych stanów drgań. Barwa i światło są zatem toż same; każda liczba drgań między podanymi granicami jest światłem, gdy tymczasem każda z osobna liczba drgań wytwarza wrażenie innej barwy, a wiele liczb drgań łączy się również w pewien oznaczony stan drgań i wywołuje także wrażenie oznaczonej barwy. Światło *pojedyńcze, jednorodne* albo *jednobarwne* jest takim stanem drgań eteru, w którym wszystkie cząstki eteru mają wspólny czas drgania, czyli wykonywają w sekundzie taką samą liczbę drgań (barwa jednorodna); światło *pomieszane, złożone* przeciwnie jest stanem drgań eteru, w którym ruchy cząsteczek eteru są wynikiem drgań o różnych trwaniach, albo są złożone z rozmaitych liczb drgań (barwa różnorodna).

Najpospolitsze źródła światła, słońce, zary i płomień ziemskie, w ogóle wszystkie żarzące się ciała stałe i ciekłe, wypromieniają światło złożone, będące połączeniem niezliczonych liczb drgań czyli barw; prawie jednorodne światło, t. j. takie, które składa się tylko z niewielu liczb drgań wywiązuje się z rozżarzonych par i gazów świecących (pod zwyczajnem ciśnieniem); przy większem ciśnieniu, liczba wypromieniowanych barw z błyszczącego gazu, zdaje się być bardzo wielką.

Jak wiadomo (według przyjęć nowszych fizyków), cząsteczki wszystkich ciał są w nieustającym, nieskończenie delikatnym, lecz bardzo szybkim ruchu, którego siła żywotna stanowi temperaturę ciała; cząsteczki te w ciałach stałych i ciekłych posiadają ruchy drgające, a w ciałach gazowych — ruchy postępowe.



Przy zwyczajnej temperaturze liczba drgań molekułów ciał wynosi 100, 200, 300 biljonów na sek.; gdy temperatura rośnie, zwiększa się także i żywotna siła molekułów, t. j. obszerność drgań. Im temperatura staje się wyższą, tem częściej drgające molekuły uderzają o siebie i zwiększają wskutek tego liczbę swych drgań; nie chcemy jednak powiedzieć przez to, że wszystkie molekuły, wskutek uderzeń się wzajemnych, nabierają wyższej liczby drgań; zdaje się raczej, że przy wysokich nawet temperaturach największa liczba molekułów zatrzymuje swą nieznaną liczbę drgań, a tylko obszerności tych drgań coraz bardziej zwiększają się. Lecz pewna część molekułów drga tem prędzej, im temperatura staje się wyższą, i dosięga przy 500° liczby drgań 400 biljonów; dla tego to przy 500° wszystkie ciała zaczynają świecić światłem czerwonym. Gdy temperatura rośnie jeszcze więcej, powstają jeszcze większe liczby drgań, 600, 800, 1000 i więcej biljonów na sekundę, przy czem nie znikają niższe liczby drgań. Rozpalone do białości ciała, o temperaturze 1000—2000° C., wypromieniają nieskończoną prawie liczbę nader różnorodnych liczb drgań. Różnorodność tych liczb drgań znajduje już swe wyjaśnienie we wzajemnem uderzaniu się o siebie molekułów, lecz staje się jeszcze łatwiej zrozumiałą, gdy zwrócimy uwagę na nieskończoną różnorodność, zachodzącą we wzajemnych położeniach molekułów ciał stałych i ciekłych, wskutek której molekuły zostają sprowadzane do swych pierwotnych położzeń działaniem najrozmaitszych sił i przyjmują pod zewnętrznym wpływem, jakim jest wysoka temperatura, najróżnorodniejsze ruchy. Inaczej zupełnie ma się rzecz z ciałami gazowemi; molekuły ich mają ruch postępowy; jest wiele rodzajów gazów, które z trudnością mogą być doprowadzone do świecenia, czyli do ruchu drgającego. Gazy bezbarwne i przezroczyste, jak tlen, azot i t. d., świecą tylko wtedy, gdy są poddane najsilniejszym wstrząśnieniom: uderzeniu elektrycznemu i strumieniowi elektrycznemu; gazy palne, jak wodór, mają bardzo nieznaną siłę świecenia i tylko rozżarzone pary metaliczne, widocznie blizkie stałego stanu skupienia, wypromieniają silne światło w zwyczajnych okolicznościach. Największa liczba ciał gazowych świecących zawiera tylko nieliczne liczby drgań. Gdyż jak wiadomo, w molekułach ciał gazowych siła żywotna przeważa nad siłą przyciągającą, zdolność rozszerzania się pokonywa siłę utrzymującą molekuły we wzajemnym związku. Molekuły ciał gazowych mogą więc przedstawiać małą różnorodność we względnych do siebie położeniach, muszą zatem doznawać prawie tych samych wstrząśnień i ruchów, pod działaniem zewnętrznego wpływu, jakim jest wyższa temperatura; molekuły ciał gazowych mogą wykonywać tylko mało różne liczby drgań, mogą wypromieniać tylko nieliczne barwy. Pod wyższem jednak ciśnieniem, gdy ciała gazowe zbliżają się do ciekłych lub stałych, może się zwiększyć ilość liczb drgań, ilość wypromionych barw.

**Różna łamliwość różnych liczb drgań (Cauchy 1836).** Za dowód dla 509. poprzedzających twierdzeń użyjemy własności różnych barw, albo liczb drgań; własności, która z początku może kogo zdziwić, jako zdająca się zaprzeczać niektórym, wyżej przytoczonym uwagom. *Promienie światła mają różną łamliwość, wedle różnej liczby drgań; tem silniej promienie zostają załamane, im większą jest liczba drgań; światło czerwone doznaje najmniejszego, fioletowe—największego załamania.*

Twierdzenie to sprzeciwia się na pozór poprzednim wynikom; załamanie bowiem jest skutkiem zmiany prędkości rozchodzenia się, a prędkość ta, tak dla dźwięku 273, jak dla światła 286, jest niezależną od wielkości i trwania drgań; znany wzór  $c = \sqrt{(e:d)}$  wykazuje wprawdzie zależność prędkości światła od gęstości i sprężystości eteru, lecz nie uwzględnia wcale natężenia i barwy światła, na co właśnie w tym rozdziale zwracać będziemy uwagę. Wzór ten jest zupełnie dokładny dla wolnego eteru próżni; w niej bowiem rozchodzi się każda siła światła i każda barwa świetlna, z równą szybkością; jest on także prawie dokładnym dla wolnego niemal eteru ciał gazowych. Gdyby wzór ten miał także miejsce dla eteru ciał, zmodyfikowanego przyciąganiem molekuł, czyli gdyby rozmaite barwy rozchodziły się w ciałach z równą szybkością, a zatem, gdyby przy wejściu w ciała doznawały tego samego zmniejszenia prędkości, to i skutek tego zmniejszenia, mianowicie załamanie, byłby jednakim dla wszystkich liczb drgań. Lecz tak nie jest. Eter w ciałach ma tę samą wprawdzie sprężystość, lecz gęstość większą, niż w próżni; jest on zamknięty między molekułami ciał, nie może zatem tak jak w próżni swobodnie odchyłać się; za każdym drgnięciem, eter znajdujący się przed atomem drgającym zostaje jeszcze więcej zagęszczony; wnikaający w ciało ruch światła ma więc do pokonania pewien opór, który widocznie zwiększa się z liczbą drgań. Ponieważ zmiana prędkości światła jest skutkiem tego oporu, przeto światło o wielkiej liczbie drgań musi w ciałach rozchodzić się cokolwiek wolniej od światła o mniejszej liczbie drgań. Załamanie jest objawem zmienionej prędkości; skutkiem tego, wysokie liczby drgań zostają załamane silniej, niż niskie.

**310.** Rozkład światła przez załamanie w pryzmatach (Newton 1666). Na rozmaitej łamliwości różnych liczb drgań czyli barw polegają sławne doświadczenia Newton'a nad rozkładem światła przez pryzmy; doświadczenia te wyprzedziły znacznie teoryę, albo raczej zbyt późno ją wytworzyły.

1. Wpuszczając przez otwór w okienicy, za pomocą heljostatu, światło słoneczne do pokoju ciemnego, na ekranie otrzymamy mały, kołowy obraz słońca. Umieściwszy na kierunku wiązki świetlnej pryzmat szklany, jasne koło zniknie; zamiast niego spostrzeżemy na miejscu, przeciwległym krawędzi łamiącej, podłużną smugę szerokości koła, prostoliniową po bokach, a na końcach zamkniętą łukami, nie jasnobiałą, lecz siedmiobarwną, o pałkach: czerwonym, pomarańczowym, żółtym, zielonym, niebieskim, błękitnym i fioletowym; czerwony koniec jest najbliższym pierwotnego położenia obrazu słońca, fioletowy najdalej. Barwy przechodzą bez żadnej widocznej przerwy powoli jedna w drugą. Smuga barwna nazywa się *widmem*. Podobne widma zostają wytworzone przez sztuczne źródła światła: przez światło mieszaniny piorunującej, przez metale rozpalone do białości, światło węglowe elektryczne, przez płomień świecy, płomień gazowy, przez światło magnetyczne i. t. d.

2. Jeżeli w ekranie zrobimy otwór, w jednym z miejsc czerwonego paska widma, i puścimy przechodzące światło czerwone na drugi ekran, to

i na nim otrzymamy także pasek czerwony; umieściwszy jednak na kierunku czerwonej wiązki drugi pryzmat, pasek czerwony zmieni swe miejsce na inne przeciwległe względem krawędzi łamiącej drugiego pryzmatu; to drugie widmo nie rozłoży się już na barwy, lecz zostanie czerwonym. Odbijając to doświadczenie z inaczej barwnym paskiem widma, otrzymamy ten sam wynik, z tą tylko różnicą, że drugie położenie paska będzie tem dalej od pierwszego, im pasek sam jest bliższy barwy fioletowej.

Doświadczenia te są dowodem dla powyżej przytoczonych twierdzeń, że różne barwy albo liczby drgań posiadają rozmaitą łamliwość, i że białe światło słoneczne, równie jak światła źródeł sztucznych są złożone. Przeciwnko ostatniemu twierdzeniu możnaby zrobić zarzut, że barwy widma powstać mogły działaniem materiału pryzmatu na światło, lecz że nie istniały w świetle samem. Zarzut ten upada zważając, iż pryzmaty z rozmaitych ciał mogą wprawdzie zmodyfikować długość całego widma, i stosunek wielkości pojedynczych jego części, lecz że zawsze dostarczają tych samych barw; oprócz tego, drugi pryzmat do pierwszego równoległy lub pochylony nie wywołuje już żadnej zmiany w widmie, lecz wpływa tylko na większe rozsuniecie barw. Powyższy zarzut zostaje całkowicie obalonym za pomocą doświadczenia, w którym promienie barwne, wychodzące z pryzmatu, zjednoczone, wydają napowrót pierwotne światło białe.

3. Umieszczając między pryzmatem a ekranem soczewkę zbierającą, widmo zmieni się w jasne koło. Umieszczając za pierwszym pryzmatem drugi, równy mu, lecz w położeniu przeciwnem, lub patrząc na widmo barwne przez drugi pryzmat stosownie umieszczony, pierwotne jasne światło słoneczne pojawi się znowu. Pryzmat wprawiony w szybkie wachania wywoła wachania widma, które w środku okaże się białem. Krążek, pokryty siedmiu barwnymi wycinkami, których stosunek wielkości jest taki sam jak w widmie, obracany szybko, wydaje się białym. Puszczając 7 barw na 7 różnych zwierciadeł sprowadzających te barwy odbite w jeden punkt tablicy, punkt ten będzie biało oświetlony.

O tem, że promienie wychodzące z pryzmatu mają kierunki różne, można się łatwo przekonać, obserwując kurz unoszący się w ciemnym pokoju, oświetlony temi promieniami barwnymi. Ekran blisko otworu przedstawi widmo białe z brzegiem fioletowym na jednym, a czerwonym na drugim końcu, gdyż barwy pośrednie nakładają się wzajem, wytworzą kolor biały. Szpara lub inna jasna przestrzeń widziana przez pryzmat, wydaje się jasną, opatrzoną brzegami: niebiesko-fioletowym i czerwono-żółtym; gdyż widma niezliczonych punktów świetlnych przestrzeni jasnej przykrywają się wzajem i łączą w białość; pozostają tylko niepokrytymi: na jednym brzegu najmniej załamane, a na drugim brzegu najwięcej załamane barwy. Właściwa forma otrzymanego w ten sposób widma

słonecznego wyjaśnia się tem, że różnobarwne promienie słoneczne, pierwotnie równoległe, po pryzmatycznym załamaniu, rozbiegają się, i że równoległemi do siebie pozostają tylko promienie jednej barwy; każda barwna wiązka promieni wytwarza na ekranie, takiejże barwy obraz słońca; powstaje więc tyle różnobarwnych obrazów słońca, ile różnych liczb drgań zawiera się w pierwotnej wiązce promieni. Środki tych kół barwnych leżą w jednej linii prostej, gdyż załamanie różnych promieni zachodzi w jednym kierunku; dla tego też koła mają z boków ograniczenia prostolinijne i tylko na końcach zostawiają dwa półkołowe zakrzywienia. Że widmo składa się rzeczywiście z pojedynczych kół barwnych, przekonać się łatwo, patrząc na nie przez szkło zafarbowane czerwono tlenikiem miedzi, lub przez wązkie naczynie, utworzone z płatek szklanych, o ścianach równoległych, i napełnione siarczanem miedzi i amonijaku; w pierwszym przypadku widać tylko czerwone, w drugim — niebieskie koło, gdyż szkło czerwone pochłania wszystkie promienie, oprócz czerwonych, a ciecz niebieska przepuszcza tylko promienie niebieskie. Ile znajduje się w widmie takich obrazów słońca, tego ująć nie można bezpośrednio spostrzeżeniem; Newton rozróżnił 7 barw dla ustanowienia podobieństwa między światłem słonecznym a 7-ma tonami oktawy. Helmholtz rozróżnia 10 barw, mianowicie, oprócz 7-miu wzmiankowanych, jeszcze żółto-żółtą między pomarańczową a żółtą, żółto-zieloną między żółtą a zieloną, niebiesko-zieloną między zieloną i niebieską, a przy użyciu pryzmatu z kwarcu, w barwie po za fioletowej, w tak zwanej ultrafioletowej, widzi jeszcze słabą barwę lawendowo-szarą. Ścisłe biorąc, powstaje tyle obrazów słońca, ile zawiera się w świetle słonecznym liczb drgań działających na oko; bliskie siebie liczby drgań wytwarzają wrażenia sąsiednie, które się częściowo pokrywają. W tak więc otrzymanem widmie słonecznym, pojedyncze barwy mogą nie być ściśle jednorodnymi; dla otrzymania zupełnie jednorodnego światła i dowiedzenia się, czy w świetle słonecznym nie brakuje jakich liczb drgań między podanemi granicami, potrzeba użyć innej metody otrzymywania widma.

**311.** **Czyste widmo słoneczne i linie Fraunhofer'a** (Fraunhofer 1814, Kirchhoff 1860). Czyste widmo można uczynić albo obiektywnem, widzialnem przez wiele na raz osób, albo subiektywnem, czyli widzialnem tylko dla obserwatora. Ostatnia metoda daje największą dokładność. Fraunhofer ustawił przed lunetą pryzmat i skierował lunetę tak, że promienie wpadające przez wązkę szczelinę w okienicy, na pryzmat i przezeń załamane wchodziły w oś lunety. Jeszcze dokładniejszą jest metoda Kirchhoff'a (Fig. 149).

Rura A jest opatrzona w tylnym końcu urządzeniem szczelinowem, za pomocą którego światło wchodzące w rozszczepienie może się stawać szerszem lub węższem. Soczewka zbierająca na przednim, widzialnym końcu rury ma taką odległość ogniskową, że szpara przypada dokładnie w ognisku, a więc taką, że z soczewki wychodzące promienie każdego punktu szpary i promienie wszystkich jej punktów, stają się równoległemi. Wiazka równoległych promieni otrzymuje wskutek tego ostrą, wązką, liniową formę szpary. Wiazka ta przechodzi następnie przez 4 pryzmaty z flintglasu (u Gassiot'a w Kew przez 9, u Merz'a przez 11 pryzmatów z flintglasu, u Cook'a przez 9 pryzmatów z siarku węgla) i zostaje przez to rozłożoną na tyle barwnych wiązek jednorodnych, kształtu

i wielkości szpary, ile w świetle wiązki znajduje się skombinowanych barw jednorodnych, albo liczb drgań. Im więcej liczby drgań różnią się od siebie, tem bardziej odpowiadające im barwne wiązki promieni, będą od siebie odległe; dwie nader blizkie sobie liczby drgań wytworzą dwie przy sobie leżące wiązki promieni; jeżeli brak jakiej liczby drgań między dwiema takimi liczbami sąsiednimi, to i między wiązkami promieni, odpowiadającymi tym dwom liczbom, znajdzie się miejsce ciemne, przedstawiające również kształt szpary. Wpuszczając więc z ostatniego pryzmatu rozbiegającą się masę światła, w lunetę B, zobaczymy powiększonymi zarówno ciemne przedziały, jeżeli takowe będą zachodzić, jak i szczelinowe powierzchnie pojedynczych wiązek promieni; każda pojedyncza wiązka promieni musi się przedstawić w formie barwnego paska, podobnego do szpary. Gdy liczby drgań następują po sobie ciągiem, to każdy z pasków musi

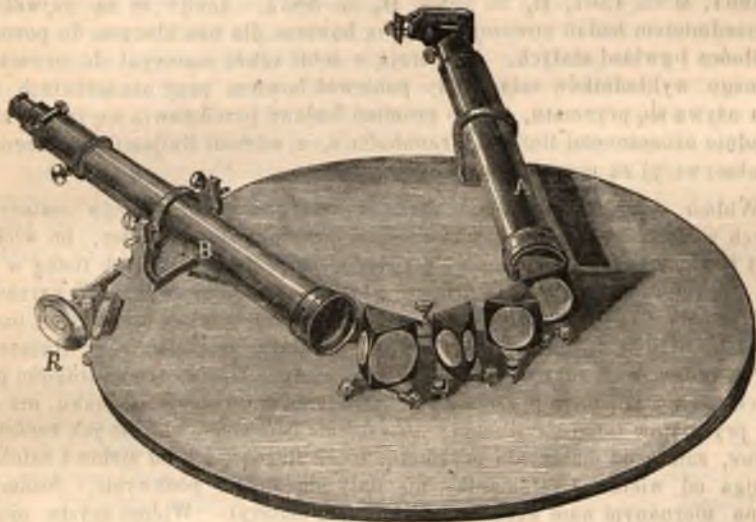


Fig. 149.

bezpośrednio stykać się z drugim, barwy muszą przechodzić nieznacznie jedna w drugą, słowem, musi się tworzyć *widmo ciągle* przedstawiające się jako wstęga, szeroka na długość szpary; jeżeli zaś brak niektórych liczb drgań, to smuga barwna musi być poprzerzywaną linijami ciemnymi.

Zwracając wzrok otwór takiego lub podobnego doń przyrządu ku ci- 312.  
łom stałym lub ciekłym rozżarzonym do białości, otrzymywać będziemy widma ciągłe: rozpalone do białości ciała stałe lub ciekłe zawierają przeto wszystkie liczby drgań między 400 i 800 bilj. Otwór szparowy zwrócony ku słońcu lub gwiazdom stałym daje widmo poprzerzynane linijami ciemnymi (Fig. 150): światło słońca i gwiazd stałych zawiera wprawdzie bardzo wiele liczb drgań, lecz wewnątrz podanych granic, brak mu dosyć znacznej ich

liczby. Dla czego niektóre liczby drgań zupełnie wygasły, a inne osłabły aż do ciemności, zastanowimy się nad tem później.

Linije ciemne (zaobserwowane w małej liczbie po raz pierwszy przez Wollaston'a 1802) widma słonecznego są nazywane linijami Fraunhofer'a, gdyż Fraunhofer pierwszy (niezależnie od Wollaston'a) zauważył większą ich liczbę, oznaczył ich siłę i położenie względem siebie i względem barw widma, a najważniejsze nazwał wielkimi i małemi literami alfabetu łacińskiego. Fraunhofer rozróżnił blisko 500 takich linij, Kirchhof powiększył tę liczbę do 3000 i podał sposób bardzo dokładnego mierzenia ich odległości w milimetrach od dowolnie obranego początku; Angström podał w 1869 dla wielu linij długości fal odpowiedniego światła, wyrażone w dziesięciomilijonowych milimetra; tak np. długość fali linji A = 7601, B = 6869, C = 6716, D<sub>1</sub> = 5899, D<sub>2</sub> = 5895, E = 5269, F = 4861, G = 4307, H<sub>1</sub> = 3968, H<sub>2</sub> = 3933. Linije te są najważniejszym przedmiotem badań nowszej fizyki; są bowiem dla nas kluczem do poznania istoty słońca i gwiazd stałych. Zawierają w sobie także materyał do oznaczenia dokładnego wykładników załamania; ponieważ bowiem przy oznaczeniach tego rodzaju używa się pryzmatu, przeto promień badany przedstawia się jako widmo, z dokładnie oznaczonemi linijami Fraunhofer'a, z ostremi linijami wiz, dogodni do obserwacyj za pomocą lunety (301).

343.

Widmo czyste, wytwarzane przez pryzmaty z tegoż samego materyału, przy tych samych zresztą innych okolicznościach, jest tem dłuższe, im większy jest kąt łamiący pryzmatu; długości pojedynczych pasków barwnych rosą w tym samym stosunku jak całkowita długość widma. Długości widm wytwarzanych przez pryzmaty z różnych materyałów są, przy tych samych wszystkich innych warunkach, bardzo rozmaite; np. widmo flintglasu jest dwa razy dłuższe od crownglasowego, a 3 razy dłuższe od widma wody. Oprócz tego, długości pojedynczych barw z pewnego pryzmatu są w odmiennym do siebie stosunku, niż długości z pryzmatów innej substancyi. *Rozłożenie całkowite*, równie jak *rozłożenia cząstkowe*, zależą od materyału pryzmatu; lecz zależność ich od siebie i zależność ich obojga od wielkości załamania, nie dały się dotąd pochwyć. Stoimy tu znów na nieznanym nam gruncie odmienności materyi. Widmo czyste nie ma swych granic tam, gdzie nasze oko zaczyna je widzieć, mianowicie na barwach krańcowych czerwonej i fioletowej; są promienie *pozaczzerwone* i *pozafioletowe*; pierwsze zawierają mniej niż 400, ostatnie więcej niż 800 biljonów drgań, pierwsze są ciemnymi promieniami ciepła, ostatnie ciemnymi chemicznymi promieniami. Przyczyną niesprawiania żadnych wrażeń świetlnych przez pozaczzerwone promienie szukano, według doświadczeń Brücke'go (1845), w pochłanianiu tych promieni przez błony i ciecze oka; nowsze doświadczenia Janssen'a (1860) i Franz'a (1862) czynią to objaśnienie wątpliwem, pozostawiając chyba to tylko przypuszczenie, że siatkówka jest niewrażliwą na promienie pozaczzerwone i pozafioletowe. Jakkolwiek oko przy olśniewającym blasku świecącego widma, nie doznaje żadnego wrażenia światła od pozaczzerwonych i pozafioletowych promieni, to jednak za usunięciem olśniewającej jasności, zaczyna być na nie cokolwiek czułem; część pozafioletowa wydaje się wtedy lawendowo szarą, w części zaś pozaczzerwonej oko dostrzega jeszcze mały pasek słabo czerwony, tegoż samego koloru co i sąsiedni mu czerwony, pozbawiony blasku. O działaniu ciepłikowem

części pozaczerwonej przekonać się można za pomocą czułego termometru, a najlepiej za pomocą ciepłostosu (p. oddział 9); lecz widmo wtedy wytwarzać trzeba przyzmatem z soli kamiennej, gdyż szkło pochłania ciemne promienie ciepła.— Tym sposobem przekonamy się, że działanie cieplikowe w pozaczerwonej części widma jest o wiele większem niż w części świecącej, a w części pozafioletowej prawie żadnem. Nie można jednak (według Helmholtz'a) wnioskować ztąd, że w świetle słonecznem ciemne promienie ciepła znajdują się w większej ilości, niż w innym jakim rodzaju promieni świetlnych; większe działanie cieplikowe pozaczerwonej części może pochodzić ztąd, że według matematycznej teorii załamania, promienie zostają w widmie tem mocniej zagęszczane, im większa jest długość ich fal. Nie zbadano jeszcze dokładnie do jakich liczb drgań schodzą ciemne, cieplikowe promienie słońca. Fizeau podaje dla najkrótszych pozaczerwonych promieni długość fali =  $0,0019^{mm}$ , I. Muller  $0,0048^{mm}$ ; podług ostatniej danej liczba drgań tych promieni wynosiłaby około 60 biljonów; ponieważ barwa czerwona krańcowa ma 400 biljonów drgań, przeto w świetle słonecznem przypadłyby prawie 3 oktawy ciemnych promieni ciepła na jedną oktawę promieni świecących. Dla zbadania wpływów części widma pozafioletowej, należy użyć przyzmatu z kwarcu, gdyż szkło pochłania te promienie; wpływ ich chemiczny ujawnia się na mieszaninie chloru z wodorem, które w pojedynczych miejscach widma łączą się na kwas solny; papier fotograficzny pod działaniem tych promieni zostaje zczernionym. Działanie chemiczne zaczyna się już od linii E, wzrasta szybko aż do H, a następnie maleje powoli do końca widma. Jeszcze lepiej uwidoczniają się te promienie za pomocą fluorescencyi, t. j. własności niektórych ciał stawania się świecącemi same przez się i wypromieniania światła odmiennej barwy, przy wystawieniu tych ciał na wpływ bardzo żywego światła. Własność tę posiadają w wysokim stopniu roztwory siarczanu chinu i eskulinu, tynktura gwajaku, olej skalny, szkło uranowe, cyanek platyny i barium; fluorescencya działa przeważnie na promienie pozafioletowe, zmieniające się pod jej wpływem na jasno-niebieskie. Umieszczając jedno z wymienionych ciał w części widma pozafioletowej, część ta wypromieniać zacznie natychmiast żywe, barwne światło, mające natężenie 1200 razy większe od natężenia barwy lawendowo-szarej w pozafioletecie. Ponieważ według zasady zachowania siły, żywotna siła drgań eteru nie mogła zostać zwiększona przez fluorescencyę, ponieważ nadto promienie pozafioletowe, według Donder'a i Rees'a (1853), mogą przechodzić przez ośrodki oka, więc przyczyna nadzwyczaj słabej widzialności barwy lawendowo-szarej, musi być niewrażliwość siatkówki na promienie pozafioletowe. Helmholtz mniema zresztą, że barwa lawendowo-szara jest wrażeniem powstającym ze zmieszania słabego fioleto, wytworzonego wprost przez zafioletowe promienie, z barwą zielono-białą, wywołaną na siatkówce przez fluorescencyę. Do jakich liczb drgań rozciąga się pozafiolet widma słonecznego, dziś jeszcze nie można dokładnie oznaczyć; starano się oznaczyć długość fal pojedynczych linii od L do S, które analogicznie z linijami Fraunhofer'a, nie wydają żadnego chemicznego działania; długość fali linii S znaleziono równą  $0,0003^{mm}$ , która odpowiadałaby 1000 biljonom drgań; rozległość promieni chemicznych nie wynosiłaby przeto  $\frac{1}{2}$  oktawy. Widmo jednak pozafioletowe jest zazwyczaj bardzo długie, prawie takie jak pozaczerwone, obejmujące trzy oktawy; pochodzi to ztąd, że według teorii załamania, promienie najbardziej łamliwe zostają najsilniej rozproszonemi po załamaniu,

z kąd wypada także, że niższe barwy widma zajmują mniejszą przestrzeń, niż wyższe. Część widma pozafioletowa z iskry elektrycznej jest jeszcze dłuższa, również i ze światła węglowego elektrycznego i z rurek Gejssler'a; według Mascart'a, widmo pozafioletowe światła kadmiu jest 6 razy dłuższe od takiegoż widma światła słonecznego.

Pozaczerwone (termiczne, ciepłikowe) promienie światła słonecznego zostały odkryte przez Herszla (1800), a pozafioletowe (chemiczne) promienie przez Ritter'a (1801). Jednak ciepłikowe działanie nie przypada wyłącznie na promienie pozaczerwone, a działanie chemiczne nie rozciąga się jedynie na pozafioletowe; pierwsze działanie ma miejsce raczej na całej przestrzeni widma świecącego, lecz z napięciem coraz mniejszem, a drugie daje się już dostrzedz, lubo bardzo słabe, w barwie pomarańczowej. Na fig. 150 linija abc przedstawia krzywą termiczną, a defg krzywą działań chemicznych; maximum działania ciepłikowego b przypada w widmie pozaczerwonym; działanie chemiczne ma dwa maxima: jedno w fiolecie przy e, i jedno w pozafiolecie przy f. Krzywa termiczna ma miejsce tylko dla pryzmatu z soli kamiennej, a chemiczna dla pryzmatu

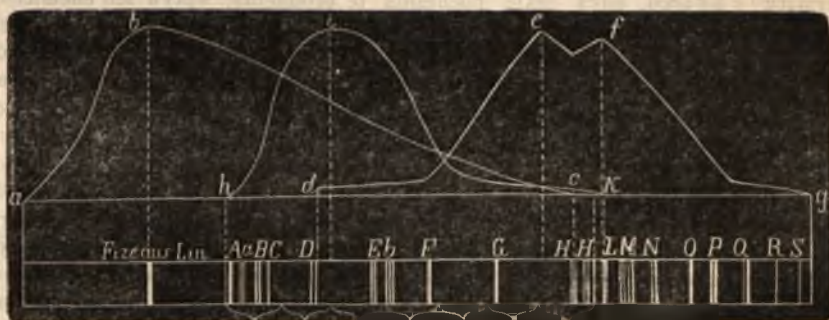


Fig. 150.

z kwarcu; przy innych pryzmatach krzywe mają wcale inny przebieg, mogą nawet zniknąć, gdy promienie zostają pochłaniane; krzywa chemiczna zmienia się nawet z materiałem poddanym wpływowi chemicznemu. Działanie świetlne przedstawia krzywa hik; maximum działania świetlnego przypada na barwę żółtą, co tłumaczy świecący blask pól z rzepakami. Na fig. 150 oprócz głównych linii Fraunhofer'a w widmie świetlnym, są zaznaczone analogiczne linie w pozafiolecie, linie, w których nie ma żadnego chemicznego działania; linie te zostały podane według fotografijnego widma Müllera; w widmie pozaczerwonym wskazaną jest również zimna linia Fizeau nie objawiająca żadnego działania ciepłikowego i nie gasząca fosforescencji, według Becquerel'a, zatem zachowująca się odmiennie od innych miejsc widma pozaczerwonego. Nakoniec na fig. 150 widać jeszcze, które z podanych linii Fraunhofer'a, z paskami widmowymi ciał ziemskich padają na te same miejsca; C i F przypadają razem z dwiema głównymi liniami widma wodoru  $H_{\alpha}$  i  $H_{\beta}$ ; D z żółtą linią sodu, b z trzema liniami magnezyum.



Jakkolwiek Newton uważał światło nie jako objaw drgań, doszedł jednak do idei 7-miu barw, lecz tylko dla tego, że chciał ustanowić analogję między barwami widma a skalą frygijską:  $1:\frac{9}{8}:\frac{6}{5}:\frac{4}{3}:\frac{3}{2}:\frac{5}{3}:\frac{16}{4}$ ; oko bowiem rozróżnia w widmie równie jak w tęczy tylko 5 barw: czerwoną, żółtą, zieloną, niebieską i fioletową; Helmholtz uważa, że barwy żółto-żółta, żółto-zielona i niebiesko-zielona miałyby toż samo prawo co pomarańczowa i indygo; nadto, że dwie barwy końcowe: czerwona i fioletowa co do kolorytu są bardzo bliskie siebie, i że gdyby między czerwoną i fioletową wprowadzić jeszcze purpurową barwę, szereg barw tworzyłby koło, w którym, zaczynając od dowolnego początku i trafiając na przejścia stopniowe, wracalibyśmy do tegoż samego punktu. Unger (1852) użył tej purpury do skali barw, z której na zasadzie harmonji tonów wyprowadził harmoniję barw, mającą służyć za podstawę estetyki barw; według jego, naciągniętej trochę skali, barwy: czerwona, zielona i fioletowa tworzą trójdźwięk dur, objaśniający częste współczesne używanie tych trzech barw przez starych włoskich mistrzów; objaśnieniu temu zaprzecza Helmholtz, gdyż według niego ten trójdźwięk starej szkoły włoskiej stanowią barwy: czerwona, zielona i indygo. Listing (1867) ustanowił oktawę barw: brunatnej (pozaczerwonej), czerwonej, pomarańczowej, żółtej, zielonej, cyanowej, indygowej i lawendowej, i okazał, że ostatnia barwa zawiera dwa razy tyle drgań co pierwsza, i że różnica każdych dwóch po sobie idących liczb drgań jest zawsze taż sama i równa 48 bilj. Skala barw tworzyłaby więc szereg arytmetyczny, gdy skala tonów jest bliską geometrycznego. Długości fal dla barw maleją według postępu harmonijnego, długości fal tonów — według postępu geometrycznego. Różnice między barwami wyrażone za pomocą różnic między liczbami drgań, nie mogą być tu jeszcze obliczone; wystarczyć musi nateraz wzmianka, że barwa czerwona rozciąga się od 400—470, pomarańczowa 470—520, żółta od 520—590, zielona od 590—650, niebieska od 650—700, indygo od 700—760, fioletowa od 760—800 biljonów drgań. Dla czego promienie wewnątrz podanych granic wywołują w oku prawie jednakowe wrażenia, pytanie to pozostaje dotąd bez odpowiedzi (p. teoria barw 329). Powstający skutek załamania rozkład światła na barwy objaśnia tęczę.

**Achromatyzm** (Euler 1747, Dollond 1757). Obrazy wytworzone przez **344.** soczewki mają brzegi zabarwione dla tego, że różnobarwne części składowe promienia posiadają różne wykładniki załamania, nie schodzą się przeto dokładnie w jednym punkcie; powstaje ztąd nieczystość i niedokładność obrazów soczewkowych, zwana zboczeniem chromatycznym. Zależy ono od kąta łamiącego i od materyalnej różności ciał. Jakkolwiek od tej ostatniej zależy także siła łamiąca i średni wykładnik załamania, to jednak zboczenie chromatyczne nie zdaje się być w żadnym związku z temi dwoma elementami. Wpływ materyału na zboczenie chromatyczne wyraża się różnicą między wykładnikami załamania promieni czerwonego i fioletowego; zboczenie to nazywa się wtedy rozproszeniem całkowitem, tak jak różnica między wykładnikami pojedynczych części składowych jednej barwy, rozproszeniem cząstkowym. Średnie wykładniki załamania dla olejku terpentynowego i pewnego gatunku krownoglasu są: 1,40 i 1,53, a całkowite rozproszenie dla

pierwszego wynosi 0,023, dla drugiego 0,020; olejek terpentynowy łamie przeto słabiej niż crown-glas, lecz silniej od niego rozprasza. Gdy w widmie flintglasowem pasek czerwony jest  $2\frac{1}{2}$  razy dłuższy niż w widmie wodnem, to dla fioletu różnica ta jest 4 razy większą, a dla całych widm 3 razy większą. Ta okoliczność, że rozproszenie całkowite nie jest proporcjonalne do załamania umożliwia przybliżone usunięcie zbieżności chromatycznego, nie pozbawiając korzyści z załamania pochodzących; nie można zniszczyć zupełnie zbieżności chromatycznego, z tej przyczyny, że rozproszenia cząstkowe nie są proporcjonalne do całkowitego.

Jeżeli 2 różne pryzmaty np. z flintglasu i crownglasu, których w. z. są 1, 6 i 1, 5, mają równe kąty łamiące, to widmo flintglasu jest 2 razy dłuższe od crownglasowego. Zwiększając stopniowo kąt łamiący crownglasu, w przypuszczeniu tegoż samego kąta padania, długość widma wzrastać będzie jednakowo, lecz wykładnik załamania nie zmieni się; średnie odchylenie zmieniać się będzie lecz nie w tym samym stosunku. Można więc łatwo nadać takie urządzenie, którego pryzmat crownglasowy wytworzy widmo takiej długości, jak widmo flintglasu; nastąpi to wtedy, *gdy kąty łamiące będą do siebie w stosunku odwrotnym całkowitych rozprożeń*. Lecz odchylenie w tym razie sprawione przez jeden pryzmat nie będzie całkiem równe odchyleniu wywołanemu przez pryzmat drugi. Jeżeli jeden pryzmat umieścimy na drugim tak, aby krawędzie łamiące miały położenia przeciwne, to pierwotnie równoległe do siebie części składowe białego promienia rozproszone w pewnym kierunku przez pryzmat pierwszy, zostaną działaniem drugiego pryzmatu o tyleż, lecz w odwrotny sposób skoncentrowane; odchylenie jednak sprawione przez pryzmat pierwszy nie zostanie zniesionem przez wpływ pryzmatu drugiego. Z takiego więc podwójnego pryzmatu, promień wyjdzie wprawdzie odchylnym, lecz jego barwne części składowe dostaną się do oka w kierunkach równoległych i wywołają wrażenie białości. W ten sposób rozwiązaniem zostało zadanie o achromatyzmie pryzmatów; rozwiązanie to stosuje się także do soczewek achromatycznych, będących połączeniem dwóch soczewek: dwuwypukłej i dwuwklęsłej o nierównych odległościach ogniskowych.

Nie można otrzymać achromatyzmu bezwzględnego, gdyż przy równym rozszczeniu promieni czerwonych i fioletowych, inne promienie nie posiadają równych rozszczeń, z przyczyny odmienności rozprożeń cząstkowych; pryzmat achromatyczny wytwarza brzegi zabarwione i widmo drugorzędne, lecz te są tak słabe, że nie przeszkadzają zastosowaniu soczewek do przyrządów optycznych. Nieprawidłowa odmiennosc rozprożeń cząstkowych nazywa się niewymiernością (irrationalität) widma.

O zbieżności achromatycznym przekonywa spojrzenie przez pryzmat lub soczewkę. Zbierając wiązkę promieni przeszłą przez soczewkę wypukłą, na ekranie

nie wewnątrz odległości ogniskowej, ujrzymy jasne koło z brzegiem czerwonym; nazewnątrz odległości ogniskowej utworzy się obwódka fioletowa. Podobne wyrażenie jak dla zdolności łamiącej i siły łamiącej, wprowadzone zostało i dla zdolności rozpraszania albo siły rozpraszającej; jest to iloraz  $(n_0 - r_r) : (n' - 1)$ , gdzie  $n_0$ ,  $n_r$  i  $n'$  oznaczają porządkiem w. z. promieni fioletowych, czerwonych i średnich; zamiast  $n'$  podstawia się także  $\frac{1}{2}(n_0 + n_r)$ .

**Analiza spektralna** (Bunzen i Kirchhoff). Żarzące się ciała stałe **345.** i ciekłe dają widmo ciągłe, w którym, stosownie do jasności i barwy żaru, może brakować niektórych barw, inne zaś mogą przeważać. Tak np. drut platynowy rozżarzony do czerwoności daje widmo bez niebiesko fioletowego zakończenia, a rozpalony do białości, widmo całkowite; lampa Argandzka wydaje wszystkie barwy, nad którymi przeważa jaśniejszy żółty pasek, płomień świecy zwyczajnej, daje wszystkie barwy, z których wydatniejsze są żółta i zielona. Słońce i gwiazdy stałe mają widmo ciągłe z linijami ciemnymi; widmo to z przyczyn poniżej wyjaśnionych, nazywa się *widmem pochłonięcia*. Rozżarzone pary i gazy świecące zawierają małą tylko liczbę drgań, małą ilość barw; wiązka wypromieniowana z takiego źródła i przepuszczona przez wązki prostokątny otwór, zostaje rozłożoną działaniem pryzmatu na małą liczbę wiązek barwnych; światło takie wychodzące z pryzmatu, obserwowane przez lunetę przedstawia małą tylko liczbę pasków barwnych, mających formę otworu prostokątnego; takie widmo nazywa się *widmem paskowem*, rozżarzone pary i gazy błyszczące dają widmo paskowe. Rozżarzona para sodium wypromienia tylko jedną liczbę drgań, jednorodne światło żółte o 520 bilj. drgań; widmo pary sodium jest paskiem żółtym, zajmującym miejsce linii D widma słonecznego; błyszczący wodór pod małym ciśnieniem (3—6<sup>mm</sup>) wypromienia 3 liczby drgań, czerwoną o 470, niebiesko-zieloną o 640 i niebieską o 720 bilj. drgań; widmo wodoru zatem składa się z 3-ch pasków: czerwonego, niebiesko-zielonego i niebieskiego, których położenia, przypadają na linije Fraunhofer'a C, F i G. Widmo pary litium przedstawia pasek brzo-skwiniowo-czerwony, para tallium-zielony, para potassu dwa, czerwony i fioletowy, para stroncium — wiele pasków czerwonych, jeden pomarańczowy i jeden niebieski, para żelaza — więcej niż 400 linij, i t. d. Liczba tych linij lub pasków zmienia się wprawdzie przy wysokich temperaturach i ciśnieniach, lecz pozostaje stałą w najrozmaitszych połączeniach chemicznych. Można przeto z liczby i barwy linij, słowem z widma pary, poznać metal lub element, z którego ta para pochodzi. Jeżeli np. widmo pary zawiera liniję żółtą na miejscu linii ciemnej D Fraunhofer'a, to można utrzymywać, że para zawiera sodium. Metodę rozpoznającą w ten sposób naturę ciał, nazywamy analizą spektralną (rozbiorem widmowym). Jest ona niezmierniej wagi, gdyż pozwala odkryć tak małe ilości ciał, że te nie mogłyby być rozpoznane za-

dnym innym środkiem chemicznym; już  $\frac{1}{4000000000}$  gr. soli kuchennej daje linię żółtą. Ponieważ poszukiwania widmowe nad światłem ciał niebieskich, pozwalają wnioskować o istocie tychże ciał, przeto przyrządy widmowe czyli spektroskopy otrzymały najróżnorodniejsze urządzenia.

Opiszemy jeden taki przyrząd Kirchhoff'a i Bunzen'a (fig. 151) używany do dokładniejszych poszukiwań chemicznych. Do wytworzenia par służy palnik gazowy. Rurka jego przewodząca gaz kończy się cienkim trzysparowym otworem; koniec ten jest zamknięty w czworobocznej skrzyneczce, posiadającej w każdej ścianie większy otwór do przepływu powietrza; w górny jej otwór jest wszrubowana rurka. W tej rurce mieszają się razem gaz i powietrze tak, że każda cząstka węgla znajduje obok siebie dostateczną ilość tlenu, aby natychmiast spłonąć na kwas węglowy; z tej przyczyny płomień gazowy Bunzen'a ma wysoką

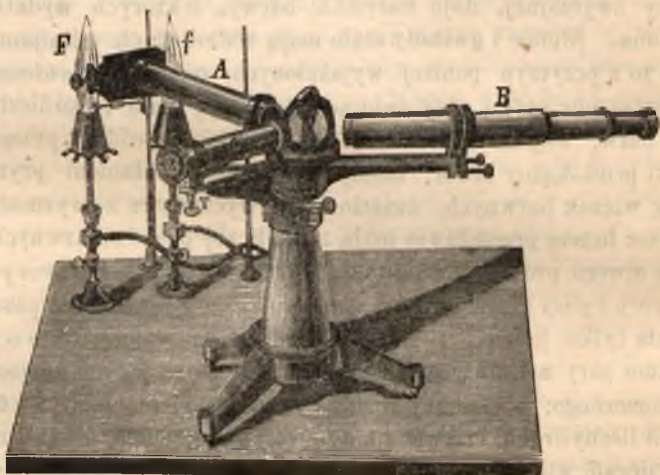


Fig. 151.

temperaturę, lecz nadzwyczaj słabą siłą świetlną. Widmo tego płomienia, jakkolwiek dostrzegalne, jest niezmiernie słabem. Trzymając na brzegu tego płomienia kawałek soli, za pomocą druta platynowego, powstająca natychmiast para palić się będzie w płomieniu i udzieli mu barw charakterystycznych, używanych niekiedy za niepewny sposób rozpoznawczy. Na taki płomień F kieruje się rurka szparowa A, opatrzona na końcu do płomienia zwróconym, urządzeniem szparowym (p. fig. 152), pozwalającym nadawać otworowi szparowemu większą lub mniejszą szerokość; drugi koniec jest opatrzony soczewką, w ognisku której znajduje się szpara. Wiązka promieni, po przejściu przez otwór, i po skoncentrowaniu się w soczewce, pada na pryzmat P, rozkłada się wskutek tego na barwy i załamując się, wchodzi w lunetę B; oko patrzące w tę lunetę, spostrzeżga widmo powiększone. Trzecia rura C ma na końcu S skalę w milimetrach na tafelce szklanej, pokrytej cynfolją tak, że pozostaje wolnym tylko wązki pasek,

który jest oświetlony z zewnątrz. Skala ta znajduje się w ognisku soczewki umieszczonej na drugim końcu rury C; ostatnia ma takie położenie względem powierzchni przodowej pryzmatu P, że przez lunetę B widzieć można skalę powiększoną, współcześnie z widmem. Tym sposobem można rozpoznawać dokładniej linie widmowe. Figura 152 przedstawia urządzenie szparowe. Widać na niej pryzmat porównawczy a b, niedozwalający przejścia płomienia F przez dolną część szpary, gdy w górną wchodzi one bez przeszkody; natomiast promienie z płomienia f dostają się przez pryzmat porównawczy do rury, za pomocą całkowitego odbicia. Jeżeli zachodzi wątpliwość czy pewne linie pochodzące od płomienia F są wywołane przez pewne ciało, w płomień f wprowadza się kawałeczek tegoż ciała, a porównanie obu widm usuwa wątpliwość. Za pomocą pryzmatu porównawczego można porównać widmo każdego płomienia z widmem słonecznym, przepuszczając przez górną część szpary światło słoneczne, a przez dolną—światło płomienia f.

**Rodzaje widm.** Znany dotąd 3 rodzaje widm: widmo ciągłe, właściwe **316.** ciałom rozżarzonym, stałym lub ciekłym, widmo paskowe albo linijowe wydawane przez gazy świecące i pary rozżarzone, i widmo pochłonięcia wydawane dotąd tylko przez światło słońca i gwiazd stałych. Rozważyć mamy przyczynę powstawania ostatniego rodzaju widm; różnicę i przyczynę dwóch pierwszych rodzajów znaleźliśmy już w ruchu molekularnym ciał. Zapewne ruch ten jest także jedną z przyczyn różniących od siebie widma pojedynczych gazów i par. Może rozbiór widmowy pozwoli nam kiedyś zbadać



Fig. 152.

różnice między ruchami molekularnymi, a przez to umożliwi nam poznanie wewnętrznych odmienności materii. Dotąd jednak przyczyny różnic widmowych, dla pojedynczych ciał, są nam nieznane. Nietylko widma różnych ciał, lecz i widma jednego i tegoż samego ciała zmieniają się przy znacznych modyfikacjach temperatury i ciśnienia; zachodzą nawet niekiedy takie zmiany w widmie, że temperatura i ciśnienie do ich wyjaśnienia nie wystarczają, lecz przyjętą być musi chyba zmiana materiału uważanego elementu, pewna allotropijna modyfikacja, albo też rozkład tego elementu na pierwiastki zasadnicze. Trafiają się także wyjątki w zakresie dwóch pierwszych rodzajów, mianowicie: widma linijne rozżarzonych ciał stałych i widma ciągłe par i gazów. Przy użyciu przyrządów o wielu pryzmach widmo rozciąga się na długość i niektóre, poprzednio pojedyncze paski, rozkładają się na wiele linii. Za pomocą dobrych przyrządów można stwierdzić również istnienie ciemnych i barwnych pasków w pozafiolecie i w widmie pozaczerwonym. Najróżnorodniejsze sole jednego metalu wytwarzają też same linie w gazowym płomie-

niu Bunzena i w innych okolicznościach; objaśnia się to w ten sposób, że sole zostają rozłożone, a zachodzące ciepło wystarcza do rozżarzenia par metalu, nie będąc dostatecznym do rozżarzenia innych części składowych. Według poszukiwań A. Mitscherlich'a (1864) każde połączenie chemiczne ma swe własne widmo wtedy, gdy uda się toż połączenie doprowadzić do stanu błyszczenia.

**317.** a. *Zarzące się ciała stałe i ciekłe.* Ciała rozpalone do czerwoności mają widmo bardzo małe, rozciągające się najwyżej do barwy pomarańczowej; dopiero przy wyższej temperaturze powstają kolejno barwy: żółta, zielona, niebieska i na koniec fioletowa; w ciągu przybywania tych barw, natężenie barw niższych rośnie. Robaczek świętojański i fosfor błyszczący w ciemności przedstawiają małe natężenie w części niebieskiej i fioletowej; widmo żuka świecącego leży całkowicie między linijami C i F, nie zawiera więc ani ciemnego ciepła, ani czerwoności, ani promieni błękitno-fioletowych, ani chemicznych (Young 1869). Tlenik didymu napojony kwasem fosforowym i rozżarzony erbin są wyjątkami nadzwyczaj ciekawymi z tego względu, że mają widmo paskowe (Bahr i Bunzen 1866).

**318.** b. *Widma płomieni.* Zwykłe płomienie dają widma ciągłe, w których często przeważa jedna barwa; niekiedy występują także jaśniejsze paski. Płomień siarki i światło magnezowe przedstawiają wielkie natężenie w błękitcie i fiolecie, gdy tymczasem barwy żółtej, prawie zupełnie brak w widmie światła siarki. Płomień fosforu i palący się cynk jaśnieją najsilniej w części zielonej. Widmo ciągłe tych płomieni objaśnia się za pomocą unoszących się w nich rozżarzonych cząstek ciał stałych. Lecz zwyczajny płomień wodoru (Dibbits 1864), równie jak górna część płomienia Bunzen'a, dają, acz słabe, widmo ciągłe, jakkolwiek nie można tu przypuszczać stałych cząstek; fakt ten zachwiał powyższem objaśnieniem ciągłości widm płomieni. Siła świecenia wodoru palącego się z tlenem, pod ciśnieniem większem od atmosferycznego, zwiększa się przy wzrastającym ciśnieniu; widmo w tym razie jest także ciągłe (Frankland 1868). Niebieski płomień tlenku węgla ma także widmo ciągłe z przeważającami: zielenią, błękitem i fioletem (Dibbits 1864). Widma płomieni węglowodorów były przez długi czas zagadką, która i dziś jeszcze nie została całkowicie rozwiązana. Swan bowiem zauważył już w 1857 r., że dolny niebieski ostrokrąg płomienia Bunzena przedstawia w widmie, oddzielone od siebie ciemnymi przedziałami, grupy pasków barwnych: żółto-zielonych, zielonych, niebiesko-zielonych i niebiesko-fioletowych; nazwał on to widmem węglowodoru. Aufield, Plücker i Hittorf, Morren i A., którzy po roku 1860 badali płomienie licznych węglowodorów i innych połączeń węgla, znajdując zawsze też same albo podobne grupy pasków pomieszane z ciemnymi lub ciągłymi potami, albo z linijami ciemnymi, oświadczyli, że te grupy pasków są widmem hipotetycznej pary węgla. Plücker i Hittorf uważali natrafione 4 odmienności, za objawy 4-ch różnych stanów fizycznych czyli allotropijnych modyfikacyj węgla. Lecz gdy poszukiwania Dibbits'a i A. Mitscherlich'a (1864) ustaliły, że połączenia chemiczne mają także swe własne widma, odmienne od widm ich części składowych, skoro bez dokonania rozkładu zostaną wprowadzone w stan błyszczenia, Lielegg (1868) wyjaśnił wzmiankowa-

ne odmienności, przyjmując je za widma różnych połączeń węgla. Watts znów przeciwnie, ze zgodności między płomieniami: tlenku węgla, cyanu, gazu oświetlającego, siarku węgla, naftaliny, gazu błotnego, chlorku węgla i t. d., doszedł do wniosku, że węgiel ma 4 odmienne widma, z których jedno, według Lichtenfels'a (1868), wskazuje na mangan. Odmienności tych widm objaśnia Watts różnicą temperatur; tak zwane drugie widmo powstaje poniżej 1500<sup>0</sup>, pierwsze między 1500<sup>0</sup> i 2500<sup>0</sup>, trzecie powyżej 10000<sup>0</sup>.

c. *Widma par i gazów.* Do wytwarzania widm rozżarzonych par metalowych służyć mogą następujące metody: 1. Wprowadza się kawałek soli, albo samego metalu w płomień gazowy Bunzen'a. 2. Takiż kawałek w płomień mieszaniny piorunującej. 3. Jeden drut biegunowy strumienia elektrycznego zanurza się w roztworze soli metalu, a drugi umieszcza się blisko powierzchni tegoż roztworu (Becquerel 1868). 4. Wydobywa się iskrę el.; przeskakującą między dwoma drutami zrobionemi z metalu, płomień pary którego poddać chcemy rozbirowi widmowemu (van der Willigen 1859). 5. Osadza się kawałki węgla na końcach drutów biegunowych i w dołek jednego kawałka kładzie się kulka metalu. 6. Nad rozgrzanem ciałem przeprowadza się wodór, który następnie zostaje zapalonym (Mitscherlich 1864). Na mocy powyższego możnaby sądzić, że parze każdego metalu odpowiada widmo oznaczone, niezmiennie. Tak jednak nie jest; zauważono nawet wpływ przyrządów widmowych; gdy przyrząd o jednym pryzmacie pozwala rozpoznać w płomieniu sodium jeden żółty pasek, lepsze przyrządy, o kilku pryzmatach, rozkładają ten pasek na 2-ie lub 3 linije. Wpływ temperatury ujawnił się wybitnie. Widmo litium w płomieniu gazowym Bunzena przedstawia jak wiadomo liniję brzoskwińowo-czerwoną, w płomieniu wodoru przybywa jeszcze linija pomarańczowa, a w płomieniu mieszaniny piorunującej, do tych dwóch linii dołącza się jeszcze niebieska. Widmo sodium jest paskiem żółtym w gazowym płomieniu Bunzen'a; w miarę wzrastającej temperatury wskutek przyływu tlenu, tworzy się coraz więcej linii jasnych, a przy użyciu mieszaniny piorunującej widmo staje się ciągłym. Nader ważnem i godnem uwagi jest spostrzeżenie, że przybywanie nowych linii w czasie wzrostu temperatury, odbywa się temi samymi gruppami, jakie miały miejsce przy najniższej temperaturze; tak np. widmo sodium zwiększa się coraz o liniję podwójną, w widmie magnezium przybywają ciągle grupy z trzech linii; Lecocq de Boisbaudran (1869) okazał, że długości fal pojedynczych wstęg są do siebie w oznaczonym stosunku geometrycznym, powracającym stale i w innych elementach; oparł on na tem nową teorię obrotowych ruchów molekułów. Dla gazów błyszczących zachodzą podobne lecz więcej zwickłane stosunki. Chcąc gazowi nadać stan świecenia, zamyka się go w cienkich, kapillarnych rurkach, przez które przeprowadza się strumień iskier elektrycznych (Plücker 1862) za pomocą iskro-wzbudacza Rhumkorff'a, albo maszyny elektrycznej Holtz'a; iskry te mogą być jeszcze wzmocnione przez wprowadzenie butelki elektrycznej. Początkowo używano rurek dostarczanych przez sławnego hutnika Dr. Gejssler'a; zawierały one gazy bardzo rozrzedzone. Znalezione wtedy widmo H złożone z 3-ch wzmiankowanych linii, dla tlenu 9 linii jasnych, a dla azotu widmo bardzo od poprzednich odmienne; wydawało się ono rozciągniętem, bogatem w barwy i poprzecinanem linijami ciemnymi w barwach czarwonej, żółtej i zielonej, a paskami barwnymi w błękitcie

i fiolecie. Bliższe poszukiwania Plücker'a i Hittorf'a (1863) wykazały, że para siarki może mieć dwa, azot zaś trzy różne widma, a w następnym już roku oznajmili obadwa ci badacze, że znaczna liczba gazów i par zachowuje się podobnie. Odróżnili oni widmo klasy pierwszej, t. j. widmo ciągłe, poprzerywane polami ciemnymi złożonymi z delikatnych, czarnych linii, okazujące się przy niskiej temperaturze, od widma drugiej klasy, t. j. od widma paskowego, pojawiającego się przy temperaturze wyższej, a przy wzrocie jej, zwiększającego liczbę i szerokość swych linii, i przechodzącego powoli w widmo ciągłe. Zauważono dla azotu 2 widma pierwszej klasy, dla wodoru dwa widma klasy drugiej. Dokładniejsze poszukiwania nad trzema gazami H N i O przeprowadził Wüllner 1868 i 1869. Używał on rurek z zamkniętymi w nich gazami, którym nadawał rozmaite temperatury za pomocą sposobów elektrycznych; zmieniał także ciśnienie w ciągu szeregu doświadczeń odbywanych przy użyciu małego wzbudzacza; ciśnienie wynosiło pierwotnie więcej niż  $100^{\text{mm}}$ ; za pośrednictwem wciągacza powietrza Sprengla zmniejszonom zostało tak, że przy ostatnim doświadczeniu wspomnianego szeregu wynosiło tylko mały ułamek milimetra; w drugim szeregu doświadczeń odbywanych z pomocą większego przyrządu ciśnienie zwiększało się stopniowo aż pod  $2000^{\text{mm}}$ . Frankland i Lockyer zauważyli, przy niskiej temperaturze i małym ciśnieniu, w widmie wodoru jedną linię zieloną (F); podobnież i Wüllner, przy ciśnieniu mniejszem od  $1^{\text{mm}}$  znalazł to widmo zielonem i złożonem z 6-ciu wspaniałych grup linii, które pod cokolwiek większem ciśnieniem  $1^{\text{mm}}$ , stawały się polami ciągłemi. Przy  $2\text{—}3^{\text{mm}}$  ciśnienia widmo składało się z 3-ch często wzmiankowanych przez nas linii, które pod wyższem ciśnieniem nie znikwały, lecz powoli zyskiwały na rozciągłości i blasku aż do  $30^{\text{mm}}$ . Od tej granicy światło i widmo słabły. Przy użyciu większego przyrządu i przy większem jeszcze ciśnieniu występowało widmo paskowe, ustępujące znowuż ciągłemu, przy ciśnieniu  $2000^{\text{mm}}$ ; linije jasne widma paskowego, przed dojściem do tej granicy, rozszerzały się coraz więcej i nakoniec pod  $2000^{\text{mm}}$  ciśnienia zły się z sobą. Widmo tlenu zawiera, przy niskiem ciśnieniu piękne grupy linii zielonych i niebieskich, zastępowanych przy ciśnieniu cokolwiek wyższem polami ciągłemi, zielonemi i niebieskiemi, utrzymującemi się aż do  $6^{\text{mm}}$ ; tu właśnie widmo liniowe rozciągało się najdalej w fiolet i najbardziej obfitowało w paski; przy  $18\text{—}20^{\text{mm}}$  zawierało ono 2 czerwone, 2 pomarańczowe, 2 żółto-zielone, 5 zielonych, 3 niebieskie i 2 fioletowe linije. Znikały one stopniowo w miarę wzrastającego jeszcze ciśnienia, a światło stawało się coraz słabsze. Przy użyciu wielkiego przyrządu linije te znów występować zaczęły i okazały się przy  $520^{\text{mm}}$  takimi, jakimi były przy  $10^{\text{mm}}$ ; podwyższenie ciśnienia miało teraz za skutek powolne powstawanie widma ciągłego. Zupełnie inaczej zachowywało się widmo azotu. Okazywało ono przy najniższych ciśnieniach też same pola cieniste pierwszej klasy, co przy wyższem ciśnieniu, tylko pola barwne, ciągłe, stawały się węższemi, a na słabszych miejscach wygasaly zupełnie; przy  $5^{\text{mm}}$  pojawiło się toż samo widmo najwydatniej i traciło ze swej piękności do  $46^{\text{mm}}$ . Przy użyciu większego przyrządu wspomniona utrata miała miejsce aż do  $260^{\text{mm}}$ ; odtąd dopiero wynurzać się zaczęły powoli linije jasne, których liczba coraz bardziej wzrastała, gdy tymczasem pierwsze widmo, to znikalo, to znów się pojawiało. Powyżej  $500^{\text{mm}}$  znikło ono zupełnie, a na jego miejsce wystąpiło widmo drugiej klasy, które Plücker otrzymał używając płomienia elektrycznego; widmo to na tle świetlnem, cią-



głęb, przedstawiało liczne linije barwne i utrzymywało się aż do najwyższego ciśnienia 780<sup>mm</sup>.

d. *Widma światel niebieskich.* Słońce i gwiazdy stałe (Huggins i Secchi) 320. mają widma pochłonięcia; Kirchhoff wniósł ztąd, że one są ciałami rozżarzonymi, stałemi lub ciekłemi, otoczonymi powłoką par; niektórzy zaprzeczyli później temu wnioskowi, gdyż i gazy, jak dopiero widzieliśmy, mogą przedstawiać widmo ciągłe. Różowe wysoki na brzegu słońca, podczas całkowitego jego zaćmienia, tak zwane protuberancye, równie jak i korona, przedstawiają widmo paskowe; są one więc rozpalonemi massami gazów, składającemi się przeważnie z wodoru. Linije wodoru przedstawiają się z nadzwyczajną jasnością w widmie światel niektórych gwiazd zmieniających się podczas ich największego blasku; miało to np. miejsce dla gwiazdy, która pojawiła się 15 maja 1866 r. w koronie północnej; wnosić ztąd należy, że na innych gwiazdach zachodzą jeszcze gwałtowniejsze wybuchy rozżarzonego wodoru, niż na naszym słońcu. Księżyc i badane dotąd planety, z wyjątkiem uranu, przedstawiają widmo słoneczne; widmo księżyca nie ma linij ciemnych, co oznacza brak atmosfery; uran ma właściwe sobie widmo; może on jest jeszcze w stanie samodzielnego błyszczenia. Obłoczki, w których dają się rozróżnić gwiazdy, posiadają widma ciągłe tak samo jak gromady gwiazd; z obłoczków, w których nie można rozpoznać gwiazd, jedne przedstawiają widma ciągłe, drugie — paskowe; te ostatnie przeważają szczególnie w obłoczkach planetarnych, o których wskutek tego sądzić należy, że są massami gazów. Kometa Templ'a 1866 dawała widmo ciągłe o 3-ch linijach jasných, kometa Winnecke'a 1868 II, równie jak kometa Bronzen'a 1868 I, widmo o trzech jasných wstęgach, przedstawiające wielkie podobieństwo z widmem węgla w oleju z oliwek, lub w gazie oświetlającym. Gwiazdy spadające mają, według Browning'a, widmo ciągłe; ogony meteorów sierpniowych przedstawiają jasną liniję sodium, zaś listopadowych — nie dają żadnego widma.

e. *Widmo światła elektrycznego i błyskawicy.* Światło elektryczne przedstawia się trojako: 1) jako iskra czyli punkt przeskakujący, mniej lub więcej biały; 2) jako światło pęczkowe, w postaci rozpryskujących się promieni, począwszy od czerwonych aż do fioletowych, i 3) jako światło tlejące, barwy fioletowo-błękitnawej. Widmo iskry elektrycznej jest widmem linijowem, zmieniającem się z naturą ośrodka, przez który iskra przechodzi i z materiałem ciała, z którego iskra wyskakuje; w powietrzu iskra elektryczna przedstawia linije azotu. Widmo światła pęczkowego i tlejącego składa się z wstęg niebieskich i fioletowych takich samych, jakie przedstawia widmo azotu, pierwszej klasy (Schimkow 1866). Podobnie się dzieje z widmami błyskawicy; białe, gzygawkate błyskawice, towarzyszące uderzeniu piorunu, dają widmo linijowe: trzeszczące, powierzchniowe błyski czerwone i fioletowe dają widmo ze wstęgami; wnosi się ztąd, że błyskawice gzygawkowe pochodzą od iskiei przebiegających do ziemi, błyski powierzchniowe zaś pochodzą od światła pęczkowego chmur. Co do liczby, drugie trafiają się częściej od pierwszych w stosunku 11:6 (Kundt 1868).— Porucznik Herszel dostrzegł oprócz wielu linij w widmie błyskawicy, widmo ciągłe po za liniją D, nagle nikaące.

f. *Widmo zorzy północnej i zodyakalne.* Angström (1868) rozpoznał w widmie zorzy północnej tylko jedną liniję zieloną, przypadającą na linije

mniej znane; Winlock w New-Yorku zaobserwował w 1869 r. pięć linii jasných; Förster widział w 1870 r. tylko jedną linię zieloną, Zollner zaś zauważył w niektórych miejscach jedną linię czerwoną i jedną linię niebieską; nakoniec w 1871 ustalił Fogel, że pojawiający się zawsze pasek zielony składa się z pięciu linii, które, razem z czerwonymi i niebieskimi, zgadzają się z linijami azotu bardzo rozrzedzonego. Angström znalazł też same linije jasne w widmie światła zodyakalnego.

**322**      **Rozkład światła przez pochłanianie** (Kirchhoff 1860, Lommel 1871). Gdy świetlne fale eteru dostają się do nowego ośrodka, może się zdarzyć, że drgania atomów eteru przejdą na molekuly ciał, w podobny sposób np. jak drgania dźwięku w powietrzu przenosiły się na strunę wprawiając ją we współbrzmienie. Jeżeli drgania eteru zostaną przytem zamienione w ruchy molekularne o mniejszej liczbie tak, że w miejscu znikłych promieni świecących powstaje ciemne ciepło ciała, to takie zjawisko nazywa się pochłanianiem, w mniej rozległym jego znaczeniu. Lecz jeżeli molekuly ciał zostają pobudzone do tak wysokich i tak silnych liczb drgań, że ciała stają się samodzielnie świecącymi, to takie zjawisko, gdy jest analogiczne z resonansem, czyli gdy się zaczyna i kończy wraz z opromienieniem, nazywa się fluorescencyą; gdy zaś przeciwnie, zjawisko to powstaje powoli przez opromienienie i dopiero po niem ustaje, czyli gdy przedstawia analogije ze współbrzmieniem, wtedy nazywa się fosforescencyą. Jeżeli świecenie ciał powstaje skutkiem promieni ciepła ciemnych, to zjawisko takie nazywa się kalcescencyą. Promienie niepochłonięte, albo przechodzą przez ciało albo zostają odbite i udzielają wskutek tego ciału właściwą im barwę; ponieważ ta ostatnia zawiera tylko część światła padającego, przeto z pochłanianiem łączy się rozkład na barwy. Jakość promieni czyli liczba drgań pochłanianych przez ciało, zależy od jakości liczb drgań, które w ciele tem już się znajdują; pochłania ono te promienie, które posiadają liczby drgań takie same jak liczby drgań molekułów ciała. Jest to szczególny przypadek prawa pochłaniania, wykrytego przez Kirchhoff'a, które Lommel wyraził ogólniej: Każde ciało może pochłaniać nietylko swe własne liczby drgań, lecz także ich wyższe i niższe oktawy. Pierwsze pochłanianie nazywa Lommel bezpośredniem, drugie pośredniem.

Jak dźwiękowe drgania powietrza pobudzają strunę do współbrzmienia wtedy tylko, gdy ta jest dostrojona do odpowiedniego tonu, tak też i drgania eteru przechodzą na molekuly tylko wtenczas, gdy te są przysposobione do odpowiednich liczb drgań, albo, właściwiej mówiąc, ponieważ molekuly ciał już ulegają drganiom, gdy molekuly zawierają odpowiednie liczby drgań. W tym bowiem przypadku drgania eteru mogą wzmocnić drgania molekułów i uczynić obszerności tych drgań, przedtem nieskończenie małe i nie objawiające działania, dostatecznie wielkimi do ich uwidocznienia; mała żywotna siła atomu eteru mo-

że tylko wtedy działać na molekuł, jeżeli mu przy każdym wachnięciu udziela uderzenie, czyli gdy peryody drgań molekułu zgadzają się z peryodami drgań atomu eteru. Lecz jeżeli czas trwania wachnięcia eteru jest cokolwiek mniejszy od takiegoż czasu molekułu, może nastąpić w pewnej oznaczonej chwili wspólne uderzenie o molekuł w spoczynku będący; po jednym drgnięciu eteru, molekuł ten zostanie uderzony cokolwiek przed ukończeniem swego wachnięcia, a więc zostanie uderzony przy swym powrocie, również jak i w wielu następujących peryodach; ruch jego zatem albo się zmniejszy, albo zostanie całkowicie zniesiony. Przeciwnie, gdy peryody zgadzają się z sobą, to molekuł będzie zawsze potrącanym np. w położeniu spoczynku, otrzyma za każdym drgnięciem przyrost siły żywotnej, i wzmocni wskutek tego swój ruch. Ten szczególny przypadek prawa Kirchhoff'a został rozszerzonym przez Lommel'a, który zauważył, że atom eteru trafia także i wtedy na molekuł, gdy peryod drgań pierwszego jest połową peryodu drgania molekułu; jakkolwiek w tym razie połowa uderzeń eteru zostaje straconą dla siły życiowej molekułów, zachodzi jednak wzmocnienie, równie jak i w tym przypadku, gdy peryod eteru jest podwójny względem peryodu molekułu. Takie pochłanianie, nazwane przez Lommel'a pośrednim, daje także wzmocnienia, lecz nie tak wielkie, jak przy pochłanianiu całkowitem.

Jakość liczb drgań zawartych w ciele, jakość barw zatem, które ono pochłaniać może, zależy od właściwości jego materji i od jego temperatury; już wyjaśniono, że przy wyższej temperaturze, wzrasta ilość rozmaitych liczb drgań, gdyż przy zwiększających się obszernościach, molekuły częściej o siebie uderzają. Lecz i przy niskiej temperaturze, ciało posiada nie jedną, lecz wiele różnych liczb drgań gdyż molekuły jego utrzymują się w tych położeniach nie z jednaka siłą, a liczby drgań pozostają z sobą w ścisłym związku, bo molekuły, skutkiem przyciągania się tworzą jedną całość. Gdy jedna z liczb drgań zostanie wzmocniona, czyli gdy otrzyma większą obszerność, to wzmocnienie udzieli się i pozostałym, gdyż molekuły pierwszej liczby uderzają o drugie, zwiększonymi obszernościami. Jak w instrumencie muzycznym tony zasadnicze i wyższe zostają wzbudzone współcześnie, tak też współcześnie zostają wzmocnione i liczby drgań ciała.

**Pochłanianie światła**, w mniej rozległym znaczeniu, jest zniesieniem pojedynczych promieni barwnych przy wejściu światła we wnętrze ciała, lub przynajmniej w zewnętrzne jego warstwy. Odbywa się ono najczęściej przez oktawy niższe, jest więc pochłanianiem pośrednim; promienie światła zamieniają się w ciemne ciepło ciała. Pozostałe promienie zostają odbite lub przepuszczone. Można zatem przekonać się łatwo, jakie promienie zostały pochłonięte; kieruje się przyrządem widmowym tak, aby przyjmował promienie odbite lub przepuszczone, które po natychmiastowem rozłożeniu się na barwy, utworzą widmo pochłonięcia; w widmie tem ukażą się ciemne paski, w miejscach odpowiadających promieniom pochłoniętym. Puszczając widmo słoneczne na ciała kształtu wydłużonego, można i bezpośrednio dostrzedz, które promienie zostały pochłonięte, które odbite, a które przepuszczone.

Ciecze poddawane tym doświadczeniom wlewają się w cienkie naczynia, o ścianach z płaszczyznami równoległymi. Umieszczając np. za otworem, przez który wchodzi światło słoneczne, takie naczynie napełnione siarczanem miedzi i amonijaku, otrzymane widmo ciągle zawierać będzie tylko barwy: niebieską, indigo, i fioletową; owa ciecz pochłania zatem barwy: czerwoną, pomarańczową, żółtą i zieloną. Roztwór siarczanu indigo przepuszcza indigo, niebieską i czerwoną, więc pochłania pozostałe barwy. Sól Brewster'a wytwarza widmo o barwach: niebieskiej, zielonej i czerwonej z ciemnym paskiem; pochłania zatem: fioletową, indigo, żółtą, pomarańczową, i pewną oznaczoną liczbę drgań z przestrzni czerwonej. Roztwór chlorofilu w eterze przedstawia pięć szerokich ciemnych pasków w średnio załamanej części widma, a pochłania całkowicie promienie najsilniej łamliwe; naodwrot w widmie szkła kobaltowego, oprócz barwy niebieskiej i zielonej, widać jasne paski w barwie żółtej, pomarańczowej i czerwonej. Roztwór chlorku miedzi przepuszcza tylko barwę zieloną i mało niebieskiej, szkło zafarbowane na czerwono tlenkiem miedzi—tylko barwę czerwoną; światło więc wychodzące z tych ciał, jest jeśli nie zupełnie, to prawie jednorodne. Światło osłabione przez pochłonięcie warstw powierzchniowych ciała, a widoczne skutkiem odbicia, bada się za pomocą pryzmatu, umieszczając wązki pasek tegoż ciała na tle ciemnym; biały pasek daje widmo całkowite, pasek czerwony—tylko czerwone, a czarny nie daje żadnego widma. Pochłanianie gazów bada się najdogodniej używając matowych kul szklanych, od lamp; oba otwory takiej kuli zamykają się taflami szkła, a gaz wprowadza się otworem bocznym. Gazy i pary bezbarwne badane za pomocą tej metody, nie przedstawiają wprawdzie żadnego pochłaniania, lecz nie wypada ztąd, aby wielkie ich masy wcale nie pochłaniały światła. Para jodu daje liczne linie ciemne we wszystkich barwach, oprócz błękitu i fioleto, pary kwasu podsaetrzanego przedstawiają również wszędzie linie ciemne, fiolet zaś—zupełnie wygasły. Jak pary te, przy wzrastającej temperaturze stają się coraz ciemniejsze, a w końcu czarne i nieprzezroczyste, tak też i paski pochłonięcia, wraz z temperaturą, rosą w liczbę i szerokość, aż w końcu, wskutek zlania się, widmo znika. Zgadza się z tem znany fakt, że kwas podsaetrzany przechodzi przy  $-20^{\circ}$  w kryształy bezbarwne, a przy  $0^{\circ}$  w płyn żółty. Własność tę, zwiększania pochłaniania z temperaturą, przedstawiają inne jeszcze ciała, nierozkładające się w gorącu; wiele tlenków metalów ciemnieje w gorącu, gdyż pochłania więcej promieni, zatem mniej ich odbija; biały tlenek cynku staje się żółtym, żółty tlenek ołowiu—brunatnym, jasnoczerwony tlenek rtęci—brunatnym, nawet czarnym. Wolność pochłaniania więc ciał rośnie z temperaturą; ponieważ ciała przy wyższej temperaturze zawierają coraz różnorodniejsze promienie barwne czyli liczby drgań, które także i wysyłają, ponieważ zatem zdolność wysyłania wzrasta również z temperaturą, przeto nastęrcza się samo przez się porównanie zdolności pochłaniania ze zdolnością wysyłania; jakkolwiek to porównanie było studjowanem oddawna, to jednak Kirchhoff dopiero wykrył i udowodnił zasadnicze prawa tego związku.

**324.** **Prawo pochłaniania Kirchhoff'a i linie Fraunhofer'a (1869).** Kirchhoff wysławia to prawo w następującej formie: stosunkach między zdolnością wysyłania a zdolnością pochłaniania, dla promieni o jednakiej długości fal i jednakiej temperatury, jest ten sam we wszystkich ciałach.

Jeżeli ruch molekularny ciała tak we wnętrzu jego, jak i na wszystkich punktach krańcowych ma tę samą siłę żywotną, jaką posiadają ciała otaczające, to w każdej chwili otrzymuje tyle ruchu od granic, ile go im udziela; lecz gdy siła żywotna ruchu molekularnego jest większą od takiejże siły otoczenia, to ciało swój większy ruch udziela ośrodkowi, wypromienia ciepło i światło. Zdolność wysyłania ciała jest tem większą, im większą jest różnica między wewnętrzną a zewnętrzną siłą życiową; zdolność ta zatem jest proporcjonalną do jakiejś funkcji tej różnicy. Gdy przeciwnie siła żywotna molekularnego ruchu ciała jest mniejsza od takiejże siły otoczenia, ciało otrzymywać będzie ruch, będzie pochłaniać ciepło i światło dotąd, dopóki obustronne siły życiowe nie zrównają się. Ponieważ działanie to jest udzielaniem siły żywotnej, tak samo jak i poprzednie, przeto zdolność pochłaniania musi być proporcjonalną do tejże samej funkcji różnicy sił żywotnych. Różnica jest ta sama, skoro temperatura w obu razach przedstawia jednakową odmiennosć, gdyż temperatura jest miarą siły żywotnej ruchu molekularnego. Można by jednak wystawić sobie, że przy równości różnic temperatur w obu razach, zachodzi jeszcze jakaś odmiennosć w wymianie ruchów, mianowicie, gdy liczby drgań lub długości fal są w obu razach odmienne; można sobie wyobrazić np. że dwie siły żywotne dwóch graniczących ze sobą ruchów molekularnych zgadzają się z sobą, lecz nie rodzaje tych ruchów; wtedy ruchy te musiałby wpływać na siebie i wzajemnie się modyfikować; mogłyby więc zachodzić w przytoczonych dwóch przypadkach, przejścia odmiennie, gdyby ta sama odmiennosć miała miejsce tylko dla sił żywotnych, bez takiegoż warunku odnośnie do liczb drgań. Materya ciała nie wywiera tu wpływu. W założeniu tej samej liczby drgań, zdolności wysyłania i zdolności pochłaniania dla wszystkich ciał, są zatem proporcjonalne do jednej i tej samej różnicy, t. j. mają się do siebie w tym samym stosunku.

Z tego prawa wynika, że zdolność pochłaniania i zdolność wysyłania każdego ciała dla promieni o tej samej długości fal, albo dla światła tej samej barwy, są sobie równe. Są one bowiem w tym samym do siebie stosunku, jak w ciele zupełnie czarnem, t. j. w ciele pochłaniającem całkowicie wszystkie promienie; takie ciało wysyła także wszystkie promienie w równej ilości, gdy posiada w sobie odpowiednie liczby drgań. Węgiel w zwyczajnej temperaturze jest czarny, to znaczy, że wciąga w siebie wszystkie promienie barwne, lecz je także wszystkie wysyła w temperaturze czerwoności. Podług tego, wzmiankowany stosunek dwóch zdolności, przy tej samej długości fal,  $= 1$ ; i dla innych ciał stosunek ten musi być także  $= 1$ , czyli zdolność wysyłania musi być równą zdolności pochłaniania. Dla lepszego jeszcze wyjaśnienia tego ważnego prawa, przypomnijmy sobie, że pochłanianie jest przyjmowaniem takich liczb drgań, które ciało już zawiera, i że toż ciało może wypromieniać te tylko liczby drgań, które się w niem znajdują; i z tego względu pochłanianie musi być równe wysyłaniu. Kreda jest biała, to znaczy, że odbija wszystkie promienie światła białego w równych stosunkach, tak samo też w jednakowych stosunkach je pochłania; w temperaturze białości wypromienia je także w równej mierze; światło potassu jest czerwono-fioletowem; też same promienie pochłania para potassu, a pozostałe sprawiają razem wrażenie zieloności, dla tego też para potassu wydaje się zieloną. Światło sodu zawiera tylko jedną liczbę drgań, znaną barwę pomarańczowo-żółtą; dla tego też para sodu przyjmuje w siebie ze światła słonecznego tylko jedną liczbę drgań,

wszystkie pozostałe przechodzą przez nią, wskutek czego para wydaje się bezbarwną.

Twierdzenie o pochłanianiu i wysyłaniu zawiera w sobie oprócz tego ważny wniosek, że *ciało niebłyszczące lub świecące słabo, pochłania też samą barwę, którą wysyła podczas silnego oświetlenia, lub też w stanie samodzielnego błyszczenia*. Rozżarzona para sodu wypromienia jedną liczbę drgań 526 biljonów; odwrotnie, gdy światło złożone przechodzi przez parę sodu, to ona pochłania właśnie drgania o 526 biljonach. Światło wychodzące z pary sodu, nie zawiera zatem promienia o takiej liczbie drgań. Przy badaniu widma tego światła, powinno brakować paska odpowiadającego tej liczbie, czyli na miejscu jego powinna być smuga ciemna. Wogóle, gdy światło jasne białe przechodzi przez warstwę pary lub gazu, to warstwa ta pochłonie wszystkie promienie, które wysyłałaby przy żarzeniu się; widmo światła przeszłego przez warstwę pary lub gazu, zawiera przeto na tych samych miejscach linie ciemne, na których widmo pary rozżarzonej przedstawiliby linie jasne. Do stwierdzenia tego nader zajmującego wyniku używa się światła elektrycznego albo światła Drummond'a, przepuszczanego przez obszerne rury napełnione parą, na końcach których ustawia się, przyrządy widmowe. Dla pary litium można wykonać to stwierdzenie i na świetle słonecznym, gdyż widmo słoneczne na miejscu brzoskwinjowo-czerwonego paska nie przedstawia żadnej linii, gdy tymczasem na miejscu paska sodu tworzy się w widmie słonecznym linia ciemna. Przy użyciu światła elektrycznego można okazać linie ciemne nawet objektywnie; przed lampą elektryczną pali się lampa gazowa Bunzen'a z perłą sodu; dalej umieszcza się soczewka, pryzmat i ekran; na ostatnim okazuje się widmo ciągłe z linią ciemną. Pojawia się ona już wtenczas gdy sodium zostanie umieszczone w świetle elektrycznym, gdyż światło otacza się zaraz obłoczkiem sodu. Wüllner otrzymał też samą linię ciemną przy żarzeniu wodoru w rurce szklanej, aż do widma ciągłego (str. 160). Linie ciemne są tem ciemniejsze, im silniejszym jest pochłanianie, im niższą jest przeto temperatura pary pochłaniającej; są one tem szersze, nie zwracając uwagi na szerokość szpary, im para jest gęstsza. Za nowe stwierdzenie również pochłaniania i wysyłania, można uważać fakt, że roztwory erbinu i tlenniku didymu, w widmie przeszłego przez nie światła, okazują linie ciemne na tych samych miejscach, na których ciała, w czasie rozpalenia, przedstawiają linie jasne.

Skoro linie ciemne widma pochłonięcia dają się objaśnić przejściem światła, pochodzącego od ciała rozpalonego do białości, przez warstwę pary, więc i linie Fraunhoferowe widma słonecznego i ciemne linie widmowe gwiazd stałych, można wytłumaczyć przyjęciem, że ciała te znajdują się w temperaturze białości, i że są otoczone powłokami par. Gdy nadto wiemy, że linie ciemne znajdują się na tych samych miejscach, na których okazałyby się linie jasne, gdyby pary pochłaniające były doprowadzone do stanu rozżarzenia, — to odwrotnie, z położenia ciemnych linii widmowych, można rozpoznać materyały tych powłok par, wytwarzających linie ciemne. Jeżeli np. w widmie pochłonięcia na miejscu linii sodu spostrzeżemy pasek ciemny, będzie to znakiem, że światło przeszło przez parę sodu. Z położenia linii Fraunhofer'a wniesiono w ten sposób, że atmosfera słońca składa się głównie z wodoru i pary żelaza, lecz że oprócz nich znajdują się także: sod, potas, wapień, magnezjum i inne pierwiastki. Po-

dobny wypadek dały gwiazdy stałe. Niektóre linije Fraunhofer'a pojawiają się tylko wtedy, gdy słońce znajduje się na poziomie, inne zaś stają się widoczniejszemi w tem położeniu słońca; bliższe poszukiwania okazały (Secchi 1864), że też same linije pojawiają się i wzmacniają skutkiem pochłaniania pary wodnej, zawartej w atmosferze ziemskiej; Secchi wyprowadza ztąd wniosek, że i na słońcu, szczególnie w pobliżu plam, musi się znajdować para wodna.

**Zastosowania rozbioru widmowego.** Oprócz zastosowań chemicznych, 325. rozbiór widmowy przyniósł wielki pożytek w dziedzinie czysto naukowej, równie jak i w życiu codziennem, przyobiecując jeszcze bogate plony na przyszłość.— Użyty został: a). W astronomji, do rozpoznania składu i materiałów ciał niebieskich; do rozstrzygnięcia pytania, czy ciało niebieskie jest otoczone atmosferą; do poszukiwań ruchów własnych gwiazd stałych, według zasady Doppler'a. Jak według 277 ton podwyższa się przez zbliżenie źródła tonu, a zniża się skutkiem oddalania się tegoż źródła, tak też i barwa źródła świetlnego musi się podnosić lub zniżać, gdy źródło światła zbliża się lub oddala od nas z prędkością nie zbyt małą stosunkowo do prędkości światła; Doppler nawet wywnioskował ztąd, że gwiazdy fioletowe zbliżają się do nas, a czerwone i żółte—oddalają się. Nie było jednak żadnego sposobu sprawdzenia słuszności tego poglądu, równie jak i całej zasady. Poszukiwania widmowe uczyniły to możliwem. Jeżeli np. wybuch wodoru na słońcu jest ku nam skierowany, czy wybuch ten zachodzi w kierunku promienia słońca, czy też poziomo względem powierzchni słońca, to liczba falowa, przybywająca do nas, zostanie podwyższoną, zielono-niebieska linija F wodoru zostanie przesuniętą ku fioletowi; naodwrot, zbliży się ku barwie czerwonej, gdy wodór będzie się oddalać. Lockyer robił (1868) takie spostrzeżenia i okazał nie tylko, że protuberancey są wybuchami wodoru, trafiającemi się bądź pionowo, bądź poziomo, względem powierzchni słońca, lecz nawet wykrył rachunkiem prędkość tych wybuchów, wynoszącą 32 mil. Gdy przeciwnie gwiazda stała zbliża się ku nam, to wszystkie jej barwy widmowe doznają przesunięcia ku fioletowi; to przesunięcie jednak nie daje się dostrzedz, gdyż skutkiem podwyższenia znikająca czerwoność tworzy się na nowo z pozaczerwoności; natomiast linije ciemne z ich barwami zostają wzmocnione i przesunięte w stronę fioletu. Przesunięcie takie zauważył Huggins (1868) dla Syryusza i z wielkości przesunięcia obliczył prędkość oddalania się tej gwiazdy od ziemi, wynoszącą 6 mil. Jakkolwiek metoda opisana jest bardzo ważną, gdyż przedstawia jedyny sposób dowiedzenia się o zbliżaniu lub oddalaniu się ciał niebieskich od ziemi, to jednak, z powodu nadzwyczajnej małości wspomnianych przesunięć, wyniki jej muszą być przyjmowane z wielką ostrożnością; wątpliwości tu zachodzić mogące usuwa w części spektroskop rewersyjny Zollner'a (1869), pozwalający obserwować przesunięcia dwa razy większe. b). W fizyologii do dokładnego oznaczenia pierwiastku barwnego krwi (Freyer 1866); do zbadania szybkości rozejścia się w ciele pewnego pierwiastku spożytego w pokarmie; Bence Jones znalazł (1866), że litium po 2-ch dniach dostaje się już do soczewki ocznej; do odróżnienia krwi arteryjalnej od żyłnej, za pomocą pasków pochłonięcia. c). W medycynie do rozpoznania krwi, za pośrednictwem pasków pochłonięcia (Hoppe-Seyler 1864), do stwierdzeń otrucia tlenkiem węgla (Hoppe-Seyler 1864), kwasem pruskim i t. d.; do diagnozy żółtaczki (Fudakowski 1869); do przekonania się o obecności białka

w moczu (Hoppe-Seyler 1866) i t. d. d). W technice, do przeświadczenia się o końcu postępowania Bessemer'a. Przyrządzenie stali z żelaza lanego polega, według Bessemer'a, na tem, że powietrze atmosferyczne zostaje wdmuchiwane cienkimi strumieniami w roztopione żelazo lane dotąd, aż z 5% węgla zawartego w żelazie lanem, pozostanie tylko 2%. Tę chwilę można rozpoznać (Roscoe 1864, Lielegg 1867) z pojawienia się i szybkiego zniknięcia 4-ch linii niebieskich i jednej fioletowej w widmie płomienia, unoszącego się nad roztopionem żelazem, tak zwanego płomienia Bessemer'a. e). W życiu codziennem, do rozpoznania zafarbowań przedmiotów żywności, za pomocą ciemnych pasków pochłonięcia, okazywanych przez roztwory tych przedmiotów (Sorby 1869). Wino podrabiane, sfałszowane piwo, zabarwiane sery, masło, musztardę, szafran, można odróżnić za pomocą tych pasków od niepodrabianych.

**326.** Barwy ciał powstają przez pochłanianie pojedynczych części składowych barw światła wchodzącego w ciała, lub w powierzchniowe ich warstwy. Jeżeli nie pochłonięte części składowe przechodzą przez ciało, to ono wydaje się barwnie przezroczystem; jeżeli zaś zostaną odbite, ciało wydaje się barwnem nieprzezroczystem; w obu razach barwa ciała pochodzi od pozostałych nie pochłoniętych części składowych. Ciało przezroczyste zazwyczaj odbija także światło; ponieważ w świetle odbitem brak tych samych części składowych, co i w przepuszczonem, mianowicie barw, pochłoniętych przez warstwy powierzchniowe, przeto ciało barwne przezroczyste, musi przedstawiać w świetle przepuszczonem też same barwy, jakie okazuje w świetle odbitem. Odbicie tych barw, nawet od ciał najgładszych, jest nieprawidłowem, gdyż zachodzi nie tylko na najbardziej zewnętrznych elementach powierzchni, lecz także na różnie skierowanych powierzchniach cząstek głębiej leżących. Metale tylko przedstawiają barwne odbicie na swych zewnętrznych powierzchniach (Jamin 1848).

Następujące fakty przekonywają, że pochłanianie zachodzi już w warstwach najbliższych powierzchni ciał: Światło, po przejściu nieznacznej warstwy ciała barwnego, może przebyć jeszcze wiele warstw tegoż ciała, bez widocznego osłabienia; portwein w wązkim naczyniu szklanem wydaje się równie ciemnym jak i w najgrubszej flaszy. Puszczając widmo słoneczne na papier zabarwiony, zawdzięczający, jak wiadomo, swój kolor cienkiej warstewce powierzchni, okaże się jasną tylko ta część widma, która odpowiada barwie papieru, lub jest doń podobną, pozostałe zaś części będą ciemne, lub bardzo niewyraźne. Gdy światło pada prostopadłe na jedną tafłę szkła, to zostaje odbitem w  $\frac{1}{2}$  części; dwie tafle odbijają  $\frac{1}{13}$ , a większa ich liczba — wszystko padające światło. Od zewnętrznej powierzchni ciała barwnego odbija się mała część padającego nań światła, bez zmiany barwy; większa część wchodzi w ciało, zostając w części pochłoniętą, a w części odbitą nieprawidłowo; części odbite mieszają się z sobą na powierzchni zewnętrznej i tworzą barwę ciała.

Ciało przezroczyste jest bezbarwnie przezroczystem, gdy przepuszcza wszystkie części składowe padającego nań światła w tym samym stosunku, w którym



one są ze sobą zmieszane w świetle. Ciało jest niebiesko-przezroczystem, gdy pochłania część promieni, a przepuszcza tylko takie, które w oku wywołują wrażenie niebieskości. Tak np. roztwory soli tlenniku miedzi pochłaniają przeważnie promienie czerwone i żółte, a przepuszczają przeważnie niebieskie; zielone zaś i fioletowe — słabiej; dla tego ciecze te wydają się niebieskimi. Ciało żółte przepuszczają promienie żółte njeosłabionemi, promienie czerwone i zielone — osłabionemi, pochłaniają zaś niebieskie i fioletowe. Mieszanina cieczy: niebieskiej i żółtej pochłania zatem promienie czerwone, żółte, niebieskie i fioletowe, przepuszcza tylko zielone i wydaje się przeto w przepuszczonym świetle, zieloną. Światło po przejściu przez wiele ośrodków różnobarwnych, zostaje znacznie osłabionem, wskutek pochłonięcia wielu promieni. Połączenie szkła zielonego i czerwonego wydaje się prawie nieprzezroczystem, gdyż pierwsze pochłania prawie wszystkie promienie z wyjątkiem zielonych, a drugie niemal wszystkie z wyjątkiem czerwonych tak, że promienie wychodzące ze szkła zielonego zostają zniesione szkłem czerwonym; podobnie zachowują się połączenia szkła niebieskiego i pomarańczowego albo żółtego i fioletowego. Połączenia takie nie są zupełnie nieprzezroczyste, gdyż pochłanianie nie jest całkowitem, gdyż z pierwszego szkła nie wychodzi nigdy barwa całkiem jednorodna. Proszek utluczonego ciała bezbarwnic przezroczystego wydaje się białym dla tego, że wszystkie promienie składowe światła białego, padające na powierzchnie drobnych cząstek proszku zostają odbite w rozmaitych kierunkach i najczęściej całkowicie. Sproszkowane ciało przezroczyste barwne staje się również nieprzezroczystem z powodu całkowitego odbicia, i w proszku posiada tę samą co przedtem barwę tylko jaśniejszą, wskutek domieszki odbitego całkowicie światła białego. Proszek barwny jest ciemniejszy i tem więcej nasycony, im jest grubszy; jest ciemniejszy, gdyż ilość całkowicie odbitego białego światła rośnie z liczbą cząstek, jest więcej nasycony, to jest czystszy i bogatszy w swą barwę, gdyż ilość pochłanianych, zanieczyszczających barw wzrasta z grubością cząstek.

Ciało nieprzezroczyste jest białem, gdy wszystkie części składowe padającego nań światła słonecznego odrzuca w znacznej ilości i w takim stosunku, w jakim one znajdują się świetle słońca, gdy zatem tylko małe ilości pochłania; nie ma ciała bezwzględnie białego, t. j. takiego, któreby wcale nie pochłaniało światła. Ciało jest czarnem, gdy pochłania wszystkie części składowe padającego nań światła białego, gdy zatem nie odbija światła wcale. Oko i przyrządy optyczne mają ściany wewnętrzne, czarne, pozwalające uniknąć wpływów światła odbitego. Nie ma jednak ciało bezwzględnie czarnych; gładkie, zwierciadlane miejsca ciał czarnych odbijają światło białe są więc białe, lub co najwyżej szare. Szarość jest osłabioną białością; ciało jest szarem, gdy odbija wszystkie części składowe światła białego w odpowiednim wprawdzie stosunku, lecz w małej ilości. Ciało wydaje się barwnem, gdy pochłania część padających nań części składowych światła białego, a pozostałą część odbija. Jedna i taż sama barwa mogłaby więc powstawać dwojakim sposobem: np. ciało mogłoby być żółtem dla tego, że pochłania wszystkie barwy z wyjątkiem żółtej, którą odbija, lub też dla tego, że pochłania fiolet a odbija wszystkie inne, które razem sprawiają wrażenie żółtości. Oba te idealne przypuszczenia prawie nie trafiają się w naturze; barwy naturalne i sztuczne nie są jednorodne, nie składają się też z jednakowo połączonych barw

widmowych, z wyjątkiem jednej; raczej zawierają one najczęściej jedną barwę widmową w większej ilości pomieszaną z mniejszą ilością podobnych i jeszcze mniejszą — niepodobnych barw, co okazuje się z widmowego rozbioru dowolnego, wąskiego paska barwnego. Ośrodki mętne, jak szkło mleczne, cieniutka warstwa złota, błyszczak (iris) i t. p. okazują w świetle przepuszczonym barwę odmienną, niż w świetle padającym; w świetle przepuszczonym wydają się najczęściej żółtawemi, w padającym — niebieskawemi; przyczyną tego zjawiska jest (według Brücke'go 1852) interferencya światła spowodowana niezmiernie małemi cząstkami ośrodka mętnego.

Z poprzedzającego wypada, że barwa ciał zależy przedewszystkiem od światła padającego; bez światła nie ma barw, a z barwą światła padającego zmienia się i barwa ciał; ztąd wynika, że barwy nie mają istotnego bytu, lecz są wytworami światła padającego. Ciało oświetlone jednorodnym światłem, nie pochłanianem przez ciało, wydaje się jasnym w barwie tego światła, a czarnym wtedy, gdy pochłanianie toż światło; w świetle spirytusu zawierającego rozpuszczoną sól kuchenną, wszystko białe i żółte wydaje się jasnym, większość pozostałych barw — czarną. W świetle lamp i świec, wydającym się z powodu braku promieni niebieskich, żółtem, żółte tak się przedstawia jak białe, a niebieskie jak zielone. Wpuszczając światło słoneczne do ciemnego pokoju przez szkło zafarbowane tlenkiem miedzi, lub przez niebieskie szkło kobaltowe, tylko ciała czerwone wydadzą się jasno barwnymi przy pierwszym świetle, przy drugim zaś, tylko ciała niebieskie i czerwone; inne ciała okażą się czarnymi. Białe i czerwone obserwowane przez szkło czerwone przedstawia się jasnym, barwy pokrewne — mniej jasnymi. Teoria mieszanin barwnych pozwala przewidzieć tego rodzaju zjawiska.

**327.** **Barwy zmieszane** (Helmholtz, optyka fizyologiczna 1867). Przez barwę zmieszaną rozumiemy wrażenie barwne wywołane przez zejście się kilku barw pojedynczych, na pewnym miejscu siatkówki oka. Nowe to wrażenie jest pojedynczem i nie pozwala rozpoznać części składowych, Metody mieszanin barwnych są następujące: 1. Nakładanie różnych widm, lub różnych części jednego widma na siebie. 2. Patrzenie ukośne przez równą tafłę szkła na pewną powierzchnię barwną, gdy strona tafli zwrócona do obserwatora przesyła mu współcześnie przez odbicie, światło odmiennie barwnego przedmiotu (Doświadczenie Lambert'a 1772). 3. Wprawia się w szybki obrót, krążek opatrzony wycinkami różnobarwnymi; przy dosyć szybkim obrocie, wrażenie pierwszej barwy pozostaje jeszcze w oku, gdy dochodzi doń wrażenie następnej. Metoda mieszania pierwiastków barwnych nie jest właściwą; nie następuje bowiem wtedy dodawanie lecz odejmowanie barw, gdyż jeden pierwiastek barwny pochłania część barw widma, pozostających wolnymi od pochłonięcia drugiego barwnego pierwiastku. Barwy widmowe: żółta i indigo, pomieszanane dają białość nie zieloność, jak to ma miejsce przy zmieszaniu farby żółtej z niebieską; pierwsza farba pochłania promienie niebieskie

i fioletowe, druga zaś czerwone i żółte, tak, że pozostają się tylko zielone. Użycie właściwych metod pozwala z barw widmowych wytworzyć nowy szereg barw, mianowicie purpurową, białą i stopnie przejścia od białości do purpury i do barw widmowych.

Purpura jest mieszaniną dwóch krańcowych barw widmowych, czerwonej i fioletowej; mieszając zamiast ostatnich przedostatnie, otrzymujemy barwę różowo-czerwoną, biało-purpurową. Purpura tworzy dla oka przejście między widocznie pokrewnymi sobie barwami: czerwoną i fioletową, tak, że po wprowadzeniu purpury, barwy widmowe tworzą koło ciągłe. Białość powstaje tylko ze zmieszania wszystkich barw widmowych, lecz także jest wrażeniem każdej pojedynczej barwy, w najwyższym jej natężeniu; białość tworzy się także przy zmieszaniu z sobą dwóch lub trzech barw widmowych. Pozbawiając widmo barwy czerwonej i mieszając barwy pozostałe, powstaje barwa zielonowo-niebieska, która zmieszana z ową czerwoną wywołuje naturalnie białość. Mieszając tę barwę czerwoną nie z zielonawo-niebieską różnorodną, lecz z barwą widmową, jednorodną, zielonawo-niebieską, otrzymamy również barwę białą. Dwie barwy, wydające białość przez zmieszanie się, nazywami *barwami dopełniającymi*. Takimi są oprócz wzmiankowanych, czerwonej i zielonawo-niebieskiej: pomarańczowa i cyano-niebieska, żółta i indigo, zielonawo-żółta i fioletowa. Zieloność widmowa nie ma barwy dopełniającej jednorodnej, lecz złożoną, mianowicie purpurę, białość więc powstaje także z połączenia zieloności i fioletu. Długości fal barw dopełniających są w również zwiłkanym do siebie stosunku, jak i natężenia tych barw; gdy natężenie barwy dopełniającej cyano-niebieskiej jest prawie równe natężeniu barwy pomarańczowej, barwy żółta i zielona potrzebują większego natężenia niż fioletowa i indigo, aby mogły być ich barwami dopełniającymi.

Zmieszanie z sobą dwóch barw widmowych, niedopełniających się, wytwarza stopnie pośrednie, osłabione białością, czyli jak mówią, mniej nasycone od czystych barw widmowych. Mieszając dwie barwy, bliższe sobie w widmie, niż barwy dopełniające, otrzymujemy barwę pośrednią tem bliższą białej, im większy jest przedział między barwami, a tem więcej nasyconą, im ten przedział jest mniejszy. Mieszając zaś dwie barwy więcej w widmie od siebie odległe, niż barwy dopełniające, otrzymamy purpurę lub takie barwy, które przypadają między jedną ze zmieszanych, a odpowiadającym końcem widma; barwa wypadkowa jest tem więcej nasycona, im większy zachodzi przedział między barwami zmieszanymi. Widać to z tablicy barw zmieszanych Helmholtz'a.

	Fioletowa	Indygo	Cyano-niebieska	Niebiesko-zielona	Zielona	Zielono-żółta	Żółta
Czerwona	Purpura	Ciemno-różowa	Biało-różowa	Biała	Biało-żółta	Złoto-żółta	Pomarańczowa
Pomarańczowa	Ciemno-różowa	Biało-różowa	Biała	Biało-żółta	Żółta	Żółta	
Żółta	Biało-różowa	Biała	Biało-zielona	Biało-zielona	Zielono-żółta		
Zielono-żółta	Biała	Biało-zielona	Biało-zielona	Zielona			
Zielona	Biało-niebieska	Wodno-niebieska	Niebiesko-zielona				
Niebiesko-zielona	Wodno-niebieska	Wodno-niebieska					
Cyano-niebieska	Indygo						

Każda z podanych barw powstaje ze zmieszania barwy będącej na początku poziomego jej wiersza z barwą umieszczoną na wierzchu odpowiedniej kolumny pionowej. Mieszanie więcej niż dwóch barw widmowych, lub barw zmieszanych; nie wydaje nowych barw, lecz tylko mniej nasycone stopnie przytoczonych.

Niektórym ze wzmiankowanych barw i ich stopniowaniom mniej lub więcej nasyconym, o mniejszem lub większem natężeniu, nadajemy nazwy określone w życiu codziennem; tak np. niejasną barwą białą nazywamy szarą, niejasną barwą żółtą — brunatną, niebogatą w światło czerwoność — czerwono-brunatnością, białawą barwą niebieską — błękitem, białawą czerwoność — kolorem mięsny i t. d.; łatwo się przekonać, że każde wrażenie barwne daje się wytworzyć z pewnej ilości nasyconej barwy widmowej i z pewnej ilości światła białego, że zatem każde wrażenie barwne zależy od trzech wielkości; 1. Od długości fali kolorytu, 2. od ilości nasyconego światła tegoż kolorytu i 3. od ilości domieszanego światła białego. Inaczej mówiąc, w każdej barwie rozróżnić należy: 1. koloryt, 2. nasycenie i 3. natężenie światła. Zgodnie z tem, można wszystkim barwom nadać systematyczne ugrupowanie, uwydatniające się najlepiej graficznie na ostrokągu barw Lambert'a. Na obwodzie podstawy są rozmieszczone barwy widmowe i purpura, w środku białość; na promieniach grupują się, ku brzegowi — barwy coraz bliższe nasycenia, a ku środkowi — barwy coraz bliższe białości. Wierzchołek ostrokągu przedstawia barwę czarną, a jego tworzące — słaboświetlne stopniowania barw widmowych; na liniach łączących wewnętrzne punkta podstawy ostrokągu z wierzchołkiem są rozmieszczone słaboświetlne stopniowania barw zmieszanych. Fig. 153 przedstawia próbę szkicu takiego ostrokągu barwnego. Inne przedstawienie graficzne mieszanin barwnych (Newton'a) polega na zasadzie wynajdywania środka ciężkości. Jeżeli przytem ilości różnobarwnego światła mają wydawać się równoważnemi, czyli sprawiać w oku wrażenie jednakiej jasności, przy pewnem natężeniu światła, to krzywa przybiera kształt przedstawiony na fig. 154. Purpura przypada wtedy na cięciwie łączącej

czzerwoność z fioletem, jako ich barwa zmieszana, białość na każdej z linii prostych łączących barwy dopełniające, i dalej od barw więcej nasyconych, niż od innych. Mieszana każdych dwóch barw daje barwę umieszczoną między nimi, w środku małego łuku, z tem silniejszą domieszką białości, im więcej mieszane barwy są od siebie oddalone. Niebieska i żółta z białą dają blado-fioletową i blado-pomarańczową, czerwona i zielona zaś — blado - czerwoną i blado-zieloną; ztąd wynika, że światło dzienne nie jest bezwzględnie białem, lecz czerwawem (Aubert 1865).

**Teorya barw** (Young 1807, Goethe 1791).— Wszystkie zjawiska barwne, w szczególności zaś fizyologiczne, które jeszcze rozważyć mamy, objaśniają się za pomocą teoryi barw Young'a. Young przyjął, że wszystkie wrażenia barwne są złożone z trzech wrażeń, z przyczyny, że każde włókno wzrokowe składa się z trzech części; pobudzenie jednego włókna sprawia wrażenie czzerwoności, drugiego — zieleności, trzeciego—fioletu, zamiast którego Maxwell proponuje podstawić błękit. Każde światło, według Young'a, pobudza wszystkie 3 włókna, lecz

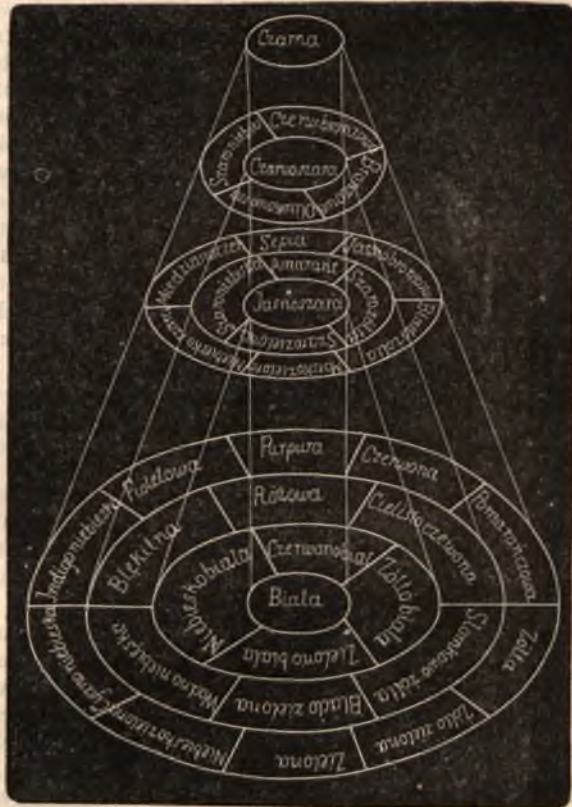


Fig. 153.

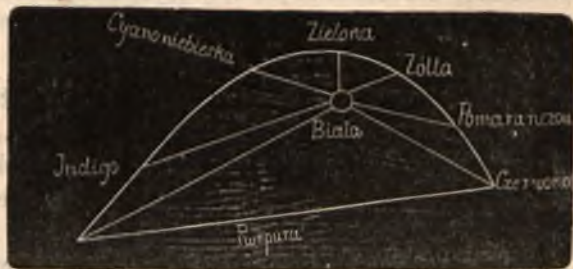


Fig. 154.

nie z jednaką siłą; jednorodne światło czerwone podrażnia silnie włókno czerwono-czułe, słabo zaś dwa drugie; światło żółte pojedyncze pobudza dosyć silnie

włókna: czerwono-czułe i zielono-czułe, słabo zaś fioletowo-czułe, wskutek czego powstaje wrażenie żółtości (p. tablicę barw zmieszanych) i t. d. Podrażnienie wszystkich trzech włókien z jednakową siłą wytwarza wrażenie białości. Tem także objaśnia się, dla czego też same wrażenia barwne mogą być wywołane rozmaitemi sposobami. Jednorodna żółtość pobudza włókno czerwono-czułe i włókno zielono-czułe, czerwoność i zieloność działają na te same włókna, powodując więc też samo wrażenie. Odejmując czerwoność światłu słonecznemu, mieszanina barw pozostałych podrażni przeważnie dwa inne włókna i sprawi uczucie barwy niebiesko-zielonej. Białość powstaje ze zmieszania wszystkich barw, gdyż wtedy wszystkie włókna zostają podrażnione; powstaje ona także skutkiem wielkiego natężenia pojedynczej barwy, gdyż za silnem podrażnieniem jednego włókna idzie także słabe pobudzenie dwóch pozostałych; doznajemy uczucia białości przy nałożeniu się trzech barw: czerwonej, zielonej i fioletowej, gdyż wszystkie 3 włókna podlegają wtedy jednakowemu wpływowi; barwy dopełniające wytwarzają białość, gdyż jedna z nich działa zazwyczaj na jedno z 3-ch włókien, a druga na dwa włókna pozostałe; tak np. czerwoność działa na włókno czerwono-czułe, barwa zaś zielonawo-niebieska na włókna: zielono-czułe i fioletowo-czułe. Nowy postęp w fizjologii oka (333) zastępujący trzy włókna trzema różnymi grupkami zewnętrznych rozczłonkowań czopków, nie zmienia w niczem istoty teorii Young'a.

Goethe, nie mogący pozbyć się przeświadczenia o rzeczywistości barw, pojął naukę Newton'a o barwach, na zasadzie znanego faktu, że powierzchnia biała obserwowana przez pryzmat, nie przedstawia się całkowicie pokrytą barwami tęczowemi, lecz obwiedziona niemi tylko, i oparł nową naukę o barwach na swoim „Urfenomenie.“ Ostatni jest zjawiskiem już przywiedzionem, mianowicie, że niektóre ośrodki mętne wyglądają żółto przed jaśniejszymi przedmiotami, przed ciemnymi zaś—niebiesko; zjawisko to objaśnia się za pomocą interferencji. Dla Goethe'go istniały tylko dwie barwy: żółta, t. j. światło widziane przez ośrodek mętny, i niebieska, t. j. ciemność widziana przez ośrodek mętny oświetlony; przy większej gęstości ośrodka obie te barwy przechodziły w czerwona, niebieska przez fiolet, żółta przez pomarańczową; zielona i purpurowa były barwami zmieszanemi. W podobny sposób objaśnia Goethe, za pomocą przesunięcia jasnego pryzmowego obrazu, paska białego, barwne jego brzegi. Poeta był mocno przekonany o ważności swych optycznych studyów i nie godzi się pomijać milczeniem jego poglądów, jakkolwiek niesłuszność ich jest widoczną. (Bliższe szczegóły, Dove, nauka o barwach).

**329.** **Fluorescencya** (Brewster 1833 Lommel 1871). Przez fluorescencyę rozumiemy własność pewnych ciał, mocą której, od początku do końca ich oświetlenia, wypromieniają one światło samodzielne, o barwie zazwyczaj odmiennej od barwy światła padającego, jak również od barwy właściwej tych ciał. Puszczając np. światło niebieskie na żółte same przez się litery, wypisane cyankiem barium i platyny, litery te wydadzą się wspaniale zielonemi. Gdy zwyczajne barwy ciał (podług 326) pochodzą od promieni pozostałych po pochłonięciu, to barwy fluorescencyi powstają właśnie skutkiem tych pochłoniętych promieni.

Według prawa pochłaniania Kirchhoff'a, pochłoniętami zostają te promienie, które posiadają też same liczby drgań co i molekuly ciał, lub niższe albo wyższe oktawy tych liczb drgań (rozszerzenie Lommel'a). Molekuly największej liczby ciał wykonywają przy zwyczajnej temperaturze tylko liczby drgań niższe od 400 biljonów; zgodnie z tem, promienie padające zostają pochłoniętami przez oktawy niższe, zamienionemi w ciepło ciemne. Niektóre ciała jednak posiadają molekuly o drganiach wyższych od 400 biljonów; pochłonięcie wchodzących, jednakowo z temi cząstkami drgających promieni, wzmacnia drgania molekułów i czyni je świecącemi samodzielnie. Gdy to samodzielne świecenie zaczyna się i ustaje z opromienieniem, wtedy przybiera nazwę fluorescencyi. Barwa fluorescencyi jest odmienna od barwy światła padającego, gdyż molekuly ciał przedstawiają rozmaite liczby drgań, przy pobudzeniu zaś jednej z takich liczb, powstają wspólnie nowe, jednoczące się z pierwszą w nową barwę. Jest ona odmienną od właściwej barwy ciała dla tego, że ta ostatnia pochodzi od promieni niepochłoniętych, a pierwszą wytwarzają barwy pochłonięte. Jeżeli barwa fluorescencyi powstaje tylko wskutek barw pochłoniętych i świetlnych liczb drgań wspólnie pobudzonych, to nazywa się, według Lommel'a fluorescencyą przez *resonans*. Jeżeli zaś mieszają się barwy połączenia, powstające wskutek wzajemnego na siebie działania świetlnych liczb drgań i takichże oktaw pozaczzerwonych, na zasadzie tonów różnicowych, to następuje przeciwnie zmniejszenie liczby drgań, łamliwości, i tworzą się barwy niższe; Lommel nazywa to zjawisko fluorescencyą przez *tony różnicowe*.

Nazwa fluorescencyi została wprowadzona przez Stokes'a od fluspatu czyli fluorku wapnia, na którego zielonych odmianach z Derbyshire zauważono najpierw ową niebieską jaskrawość, którą teraz każdy może obserwować na oleju skalnym. Z ciał stałych odznaczają się jeszcze piękną fluorescencyą: szkło uranowe i cyanek barium i platyny; z cieczy zaś: roztwory siarczanu chinu, eskulin (wyciąg z kory kasztanów), chlorofil (etarowa nalewka szpinaku, pokrzyw i t. p.), tynktura lakmusa, tynktura kurkumy, wyciąg z bieluniu, petroleum i t. d. Fluorescencya tych ciał jest widzialną już przy świetle dziennem; okazuje się jednak wybitniej po skierowaniu na każde z tych ciał wiązki promieni słonecznych skoncentrowanych w soczewce; ostrokątek takich promieni w miejscu padania okazuje żywą barwę, której natężenie szybko maleje ku wierzchołkowi ostrokątku; ostrokątek jest niebieskim dla barwnego siarczanu chinu, fluspatu, eskulinu i oleju skalnego; dla żółtego szkła uranu, tynktury kurkumy, wyciągu z bieluniu jest zielonym; dla zielonego chlorofilu — czerwonym. Fluorescencya jest wywoływana najczęściej wysokimi liczbami drgań. Przepuściwszy wiązkę światła przed wejściem jej w roztwór eskulinu, przez szkło czerwone, nie zobaczymy niebieskiego ostrokątku. Też fluorescencyjna składa się z dwóch krążków, szklanych, czerwonego i niebieskiego, złączonych ze sobą nakształt teki; między niemi umieszcza się papier zapisany atramentem z cyanku barium i platyny; gdy

światło pada na pismo przez szkło czerwone, to nie widać nic; gdy zaś światło pada przez szkło niebieskie, to litery błyszczą zielono. Ostrokrąg nie pojawia się wtedy, gdy wiązka padająca na szkło uranu, przechodzi poprzednio przez roztwór chlorku miedzi. Puszczając na tafłę szkła uranu lub na pasek papieru kurkumowego albo na podłużne, prostokątne naczynie szklane napełnione roztworem chinu, widmo słoneczne wytworzone przez pryzmat kwarcowy, barwa fluorescencyi pokaże się dopiero na miejscu najwyższych barw widmowych i rozciągając się będzie daleko w pozafiolet; fakt ten pozwala łatwiej rozpoznać linie Fraunhofer'a L i S. Ponieważ we wszystkich tych wypadkach, barwa fluorescencyi posiada niższe liczby drgań niż barwy wzbudzające, przeto Stokes uważał fluorescencyę za skutek zmniejszonej liczby drgań, za skutek zmniejszonej łamliwości. Takiemu pojmowaniu zaprzeczał już chlorofil; jego bowiem krwawo-czerwona fluorescencya jest wytwarzaną wprawdzie przez wszystkie wyższe barwy widmowe, najsilniej jednak przez barwę widmową taką samą. Czerwień Magdala (Magdalaroth) zaś przedstawia wprost przeciwne zjawisko pogładowi Stokes'a; napełniając roztworem tego ciała, prostokątne naczynie szklane i puszczając na jedną z jego powierzchni widmo słoneczne, tworzy się fluorescencya żółto-pomarańczowa już w czerwonej części widma; fluorescencya ta zmusza do uznania podwyżki liczby drgań. Charakterystyczna cecha fluorescencyi nie leży zatem w znizeniu liczby drgań jak dotąd przyjmowano. Wystarczającą jej teorię podał Lommel, przyjąwszy za zasadę prawa pochłaniania. Z fluorescencyą bowiem łączy się zawsze pochłanianie. Szybkie słabnięcie barwy ostrokręgu świetlnego wskazuje już na zużycie promieni wzbudzających. Objawia się to wybitniej na doświadczeniu widmowem: Barwy widmowe nie wzbudzające wcale fluorescencyi wychodzą nieosłabionemi z prostokątnego naczynia szklanego, znikają zaś promienie działające. Porównyując widmo pochłonięcia jakiegokolwiek cieczy z widmem fluorescencyi na naczyniu prostokątnem, powstawanie fluorescencyi, skutkiem pochłoniętych promieni, uwidoczni się do niezaprzeczenia; gdzie wynurza się pierwszy odbłysek fluorescencyi, tam także zaczyna się pochłanianie; każdej największości pochłaniania odpowiada największość fluorescencyi, a gdzie w widmie pochłonięcia kończą się miejsca ciemne, tam też i fluorescencya ustaje. Lommel zgodnie z tem, za podstawę dla swej teorii fluorescencyi używa pochłaniania światła, które to pochłanianie, jak wiadomo, polega na przechodzeniu drgań eteru na molekuly ciał. Jak ton przechodzi tylko na jednakowo z nim nastrojone ciało rezonansowe, tak też i drgania eteru przechodzą tylko na te molekuly, które są dostrojone do tej liczby drgań, czyli ponieważ molekuly ciał stałych i ciekłych już drgają, na te molekuly, które wykonywają też samą liczbę drgań, lecz o tak małych obszernościach, że nie wywołują żadnego świetlnego wrażenia. Według poszukiwań matematycznych Lommel'a, to prawo pochłaniania Kirchhoff'a doznaje tu uogólnienia, takiego mianowicie, że promienie światła wzmacniają nie tylko równe im liczby drgań molekuloń, lecz także liczby drgań dwa razy mniejsze i dwa razy większe, że zatem w ciele powstają także niższe i wyższe oktawy barw pochłoniętych. Przejście na takie same liczby drgań nazywa Lommel pochłanianiem bezpośredniem, przejście zaś na oktawy—pośredniem. Oprócz tego Lommel stawia hipotezę, że przy każdym wzbudzeniu, zostają wzbudzone lub wytworzone nie tylko także same liczby i ich oktawy, lecz wszystkie liczby drgań, które ciało wykonywać może; jako analogię przytacza on płatki dzwiczą-



ce, które również za każdym wzbudzeniem wydają współcześnie wszystkie tony główne i oboczne. Wykazaliśmy już nie raz, że molekuly ciał stałych i ciekłych utrzymują się w swych położeniach z rozmaitą siłą, że zatem nabierać muszą różnych liczb drgań, i to współcześnie, z przyczyny ich ściślego wewnętrznego z sobą związku. Ciało rozpalone do białości zawiera wszystkie jakie tylko pomyśleć można liczby drgań; przy niższej temperaturze ilość zachodzących liczb drgań jest naturalnie mniejszą, lecz przyjąć można, że wszystkie one zostają pobudzane współcześnie. Po tych premissach, objaśnienie fluorescencji staje się prostem.

Rozważmy naprzód fluorescencję przez rezonans, na którą dotąd natrafiliśmy głównie w czerwieni Magdala i w chlorofilu. Czerwień Magdala przepuszcza tylko najciemniejsze promienie czerwone, pochłania zaś wszystkie inne widmowe barwy; jednak molekuly jej drgają tylko w liczbach drgań wyższej czerwoności, barwy pomarańczowej i żółtej, jak również w niższych oktavach barw wyższych. Jeżeli zatem na prostokątne naczynie napełnione roztworem tego ciała pada widmo słoneczne, to najkrańcowsza czerwoność przechodzi nieosłabioną; wyższa czerwoność przeciwnie, zostaje pochłoniętą i wzmacnia bezpośrednio równe liczby drgań roztworu, również pomarańczowe i żółte; promienie pomarańczowe i żółte zachowują się zupełnie tak samo. Wyższe promienie nie mogą wprawdzie wzbudzić w roztworze równych sobie liczb drgań, gdyż molekuly roztworu nie są dostrojone do tych liczb drgań, za to wzbudzają ich oktawy niższe, które wtedy wydają również czerwone, pomarańczowe i żółte liczby drgań, łączące się razem na pomarańczowe. Ta pomarańczowo-żółta fluorescencja rozciąga się w ten sposób prawie przez całe widmo słoneczne, od najwyższej czerwoności aż w pozafiolet, wszędzie ona daje się rozłożyć za pomocą spektroskopu na barwy: czerwoną, pomarańczową i żółtą. Fluorescencja czerwieni Magdala jest przeto fluorescencją przez jednodźwięczność dla promieni czerwonych, pomarańczowych i żółtych, dla pozostałych zaś jest fluorescencją przez oktawy

Częstszą jest fluorescencja przez tony różnicowe, albo lepiej, przez barwy różnicowe; weźmy za przykład fluorescencję bezbarwnego prawie eskulinu. Ten ostatni przepuszcza wszystkie barwy z wyjątkiem ciemno-niebieskich, fioletowych i pozafioletowych promieni, które też pochłania, zawiera w swych molekułach tylko ich liczby drgań i niższe oktawy tychże liczb. Gdy zatem na powierzchnię roztworu eskulinu pada widmo słoneczne, to wszystkie niższe barwy przechodzą przez roztwór bez osłabienia, fioletowe i pozafioletowe zaś pobudzają molekuly do równych lub dwa razy mniejszych, silniejszych drgań tak, że ciecz błyszczą niebiesko i fioletowo. Drgania te równie jak drgania pozafioletowe tworzą oprócz tego z niższymi oktavami barwy połączenia, których liczba drgań równa się różnicy liczb drgań obu skombinowanych barw i wydaje wskutek tego niższą liczbę drgań, niższą barwę. Tak np. pozafiolet o 900 bilj. drgań z pozaczerwonością o 400 bilj. wytwarza barwę różnicową pomarańczową o 500 bilj. drgań; dla tego to fluorescencja eskulinu zawiera liczne barwy, aż do fioletowej; pierwsze jako barwy różnicowe są bardzo słabe; ostatnie o wiele silniejsze łączą się w jasny błękit, w którym za pomocą spektroskopu można rozpoznać wszystkie barwy.

**330.** **Fosforescencya** (281) odróżnia się od fluorescencyi głównie uwzględnieniem czasu; pojawia się ono dopiero po rozpoczętem opromienianiu, a gaśnie dopiero po jego ustaniu; jeżeli zatem fluorescencya przyrównaną być może do rezonansu, to fosforescencya przedstawia analogię ze współbrzmieniem. Są jednak i inne jeszcze między nimi różnice. Fluorescencya powstaje tylko przez opromienianie, fosforescencya zaś także skutkiem ogrzania, działań mechanicznych i t. d.; barwa fluorescencyjna ciała jest zawsze ta sama, barwa fosforescencyi zmienia się często z temperaturą, często z fizyczną własnością, ze sposobem przedstawienia ciała, z barwą światła wzbudzającego; fluorescencya okazuje się, odrywając uwagę od linii Fraunhofer'a, na wszystkich miejscach widma słonecznego, gdy tymczasem fosforescencya bywa niekiedy wzbudzana pojedynczemi miejscami widma, niekiedy gaszona poza-fioletem. Obie mają to wspólnego, że najczynniejszym jest opromienianie barwami fioletowemi i pozafioletowami, i że liczba drgań przy tych zjawiskach często zmniejsza się. Gdyby dwa te zjawiska przedstawiały różnicę tylko w czasie, to możnaby sądzić, że molekuly ciał fluoryzujących mogą przyjmować łatwiej drgania eteru, a zatem, że muszą też łatwiej je oddawać; gdy tymczasem molekuly ciał fosforyzujących powoli nabywając drgań eteru, oddawałyby je także powoli. Ztąd możnaby zawnioskować, że ciała fluoryzujące nie fosforyzują i naodwrot, co trafia się tylko wyjątkowo.

Siarek strontu fosforyzuje fioletowo przy zwyczajnej temperaturze, niebiesko przy  $40^{\circ}$ , zielono przy  $70^{\circ}$ , żółto przy  $100^{\circ}$ , czerwono-żółto przy  $200^{\circ}$ . Spat islandzki wyprażony z siarką daje fosfór żółto świecący, arragonit zaś — fosfór błyszczący zielono. Jeden siarek strontu fosforyzuje tylko w całym pozafiolecie, inny w barwie niebieskiej, fioletowej i najkrańcowszej pozafioletowej, lecz nie w tej części, która graniczy z fioletem. Umieściwszy pasek papieru, pokryty fosforyzującym proszkiem blendy, w pozafiolecie, światło zagaśnie, z wyjątkiem pasków odpowiadających w pozafiolecie liniom Fraunhofer'a. Siarek strontu fluoryzuje w tem samym świetle, w którym fosforyzuje; china fluoryzuje niebiesko, fosforyzuje zaś żółto, lecz przez czas bardzo krótki.

**331.** **Kalcescencya.** Emsmann wpadł na domysł (1859), że podobnie jak fosforescencya powstaje wskutek ogrzania, tak też zachodzić może odjemna fluorescencya, t. j. powstawanie światła skutkiem podwyższenia się liczby drgań ciemnych ciepłikowych promieni, padających na ciało. Tyndall i Akin sądzili (1864), że stwierdzili istnienie takich zjawisk. W następującem doświadczeniu światło powstaje rzeczywiście skutkiem ciemnych promieni ciepła. Puszczając wiązkę promieni węglowego światła elektrycznego na zwierciadło wklęsłe i umieszczając między zwierciadłem a ogniskiem naczynie z roztworem jodu, do ogniska dochodzić będą tylko promienie pozaczerwone; cienka blaszka platynowa, kawałeczki węgla, paski cyny — umieszczane wtedy w ognisku, błyszczą. Tyndall nazwał zjawisko to kalorescencyą, jako skutek ciepła, Akin zaś kalcescencyą, zapewne dla tego, że powstawanie światła Drummond'a i wogóle każdego żaru

w płomieniach niebłyszcących musi być uważane jako skutek podwyższenia się liczby drgań. Jakkolwiek przy takich zjawiskach zachodzi zwiększenie się liczby drgań, to jednak (Bohn 1867) zjawiska te nie są wcale fluorescencją odjemną; gdyż fluorescencya zaczyna się i kończy z opromienianiem, gdy tymczasem zjawiska te zaczynają się później i później też ustają, będąc oprócz tego skutkiem podwyżki temperatury sprawionej przez ciepło ciemne. Nadać wspólną nazwę takim zjawiskom jest rzeczą stosowną, lecz wyznać należy, że fluorescencya odjemna w prawdziwym tego słowa znaczeniu jeszcze nie została odkrytą, jeżeli za taką nie chcemy uważać pobudzenia promieni żółtych i zielonych przez pomarańczowe we fluorescencyi czerwieni Magdala.

**Działania chemiczne światła.** Jak przy zwyczajnem pochłanianiu światła zachodzi zamiana światła w ciepło, tak też można sobie wystawić zamianę światła w pracę, t. j. wyobrazić sobie, że drgania eteru przechodząc na atomy ciał, mogą spowodować większe oddalenie się tych atomów od siebie, innemi słowy, rozkład chemiczny. Atomy ciał, a w szczególności dążące do rozejścia się atomy gazów, mogą także pod wpływem drgań eteru, zwiększać jeszcze swe ruchy drgające; skutkiem takiego wpływu może być zbliżenie do siebie atomów, i zachowanie tego położenia, szczególnie w mieszaninach różnych gazów. Światło więc może dokonywać połączeń chemicznych. Okoliczności, przy których te zjawiska zachodzą, zależą od materialnej odmienności, której istota nie jest nam znana. 332.

Rozkłady chemiczne dokonywane przez światło są następujące: biały chlorek srebra pod działaniem światła czernieje; chlor uchodzi, a srebro osadza się w postaci nader delikatnego proszku; jeżeli światło działało przez czas bardzo krótki na chlorek srebra, to ostatni łatwiej się rozkłada pod wpływem ciał redukujących, niż sól srebra nietknięta przez światło; podobnie zachowuje się jodek srebra; na tej zasadzie polega fotografia. Kwas saletrzany w świetle staje się żółtym, po dłuższym czasie—czerwonym, gdyż rozkłada się na kwas podsaletrzany i tlen. Materye organiczne rozkładają się pod wpływem światła; ich węgiel i wodór łączą się z tlenem atmosfery; na tem polega bielenie (blichowanie) i niektóre inne zmiany barwy w świetle. Najważniejszym działaniem rozkładowem jest rozkład kwasu węglowego powietrza na powierzchni roślin; tlen powraca w powietrze, węgiel zaś wchodzi w rośliny jako ich główny środek pożywczy.

Światło dokonywa następujących połączeń chemicznych: chlor i wodór pomieszane w ciemności, przy wystawieniu na światło łączą się z sobą wydając eksplozję. Woda chlorowa zamienia się powoli w kwas solny; chlor bowiem łączy się z wodorem wody, wydzielając tlen w postaci podnoszących się pęcherzyków. W świetle powstaje chlorofil roślin, solanin rozkłada się i t. d. Promienie światła działające chemicznie składają się z wyższych liczb drgań, niebieskich, fioletowych i pozafioletowych. I. Muller na mocy własności chemicznej tych promieni, odfotografował widmo; widmo fotografowane zaczyna się dopiero od linii G i przedstawia wyraźnie linije Fraunhofer'a w pozafiolecie (p. fig. 150).

## 7. Oko i przyrządy optyczne.

### OPTYKA FIZYOLOGICZNA I PRAKTYCZNA.

**333.** **Budowa oka.** U najniższych zwierząt, które najczęściej nie doznają żadnego innego wrażenia światła, oprócz jasności i ciemności, oko jest tylko punktem ocznym, powierzchniowem zakończeniem nerwu czulego na światło, pokrytem przezroczystą zasłonką. Aby oko mogło rozróżniać kształty, musi doznawać wrażeń o oddzielnych, świetlnych punktach, za pomocą oddzielnych włókien nerwowych. U wielu zwierząt bezkręgowych, służy ku temu celowi ciało galaretowate, ostrokątne, przezroczyste, prowadzące do każdego z czułych na światło włókien nerwowych, a oddzielone od innych takichże ciał, których liczba dochodzi do 25000, ścianką nieprzezroczystą, przegródką pigmentową; ciało galaretowate oddzielone w ten sposób od innych, prowadzi do odpowiedniego nerwowego zakończenia tylko promienie punktu leżącego na kierunku tegoż ciała. Ponieważ przegródki pigmentowe rozciągają się aż do podstawy ostrokręgu galaretowatego, tak zwanego ciała szklistego, przeto takie oczy widziane z zewnątrz wydają się jakoby podzielonemi na małe pola, złożonemi z oddzielnych ścianek; z tej przyczyny nazywane są oczami złożonemi. U niektórych zaś zwierząt bezkręgowych, również u kręgowych i człowieka, rozdzielenie się światła odbywa się przez załamanie na krzywych powierzchniach ośrodków przezroczystych; takie oczy nazywają się pojedynczemi.

Oko człowieka ma formę kuli, zwanej jabłkiem ocznym, otoczonej pulchną, tłustą, komórkową tkanką, a umieszczonej w oczodole kostnym, mającym kształt ostrokręgu; jabłko oczne jest poruszane przez sześć mięśni, chronione zaś przez brwi, powieki i rzęsy. Wewnętrzna błonka powiek, błonka łączna (conjunctiva), przylega lekko do jabłka ocznego i jest nadzwyczajnie czułą na najłżejsze dotknięcie, choćby najmniejszego obcego ciała; stara się ona usunąć takowe przez pomimowolne ruchy powiek, przez mrużenie oczami; pomocami do usunięcia ciałek obcych są także płyny wydzielane: z gruczołków śluzowych samej błonki łącznej, z gruczołków Meiboma wydających tłuszcz i z gruczołków łzowych; ciecz te utrzymują stale przednią powierzchnię oka w stanie czystym i błyszczącym.

Okrycie jabłka ocznego składa się z 3-ch systemów głównych: z błony twardej, z systemu uwea i retyny albo siatkówki. Wnętrze oka jest wypełnione trzema płynami: płynem wodnistym, krystaliną i ciałem szklistem.

Fig. 155 przedstawia przecięcie poziome oka, uwidaczniające trzy główne systemy i trzy płyny. 1. Powłoka zewnętrzna w swej większej, tylnej części, jest nieprzezroczystą, twardą, białą błoną S (sclerotica), a w mniejszej, przodowej części jest przezroczystą, chrząstkowatą, bezbarwną rogówką h (cornea). Scleroti-

ca jest przeważającą częścią trzech systemów, chroni główne części oka i jest utworzona z gęstego, sprężystego splotu włókien łącznych; średnica zewnętrzna wynosi przeciętnie 24<sup>mm</sup>, grubość zaś 1/2<sup>mm</sup>. Takiejże grubości rogówka, kształtu mocno wypukłego szkła od zegarka, jest z przodu osadzona w sklerotykę i składa się z trzech warstw, zewnętrznej, epithelium, z warstwy chrząstkowej (pozostawionej białe na figurze) i z błony Descemet'a, będącej cienką, szklistą blaszką (kreskowana). 2. System uvea rozpada się na część tylną a d d a, pokrywającą wewnętrzną powierzchnię sklerotyki, na błonę naczyniową (chorioidea) i na część przodową i r r i, równiejszą, umieszczoną za rogówką, lecz oddaloną od niej prawie na 4<sup>mm</sup>, zwaną tęczęwką (iris); część ta ma w środku otwór kołowy zwany źrenicą r r. Błona naczyniowa jest cienka i złożona z naczyń krwistych i promienistych komórek; wewnętrzna jej powierzchnia jest całkowicie pokryta ciemnymi ciałkami pigmentu, jest zatem czarna. Na przodowym, wewnętrznym brzegu przedstawia ona 70—72 wyraźnych fałdek błonowych, rzęśowych przedłużeń a c, których przodowe wydalenia zwracają się ku tęczęwce, w kierunku południkowym. Przy zewnętrznym, przodowym brzegu błony naczyniowej leży mięsień rzęśowy; w miejscu gdzie on kończy się i gdzie naczyniówka przystępuje do sklerotyki, zaczyna się tęczęwka; będąca ruchomą osłonką soczewki, do przodowej powierzchni której, przylega swą częścią środkową. Zawiera ona, podobnie jak mięsień rzęśowy, włókna mięśniowe organiczne, t. j. niepodległe



Fig. 155.

woli, które tworzą dwa mięśnie: obrączkowy i przedłużacz źrenicy. 3. Siatkówka jest nadzwyczaj cienkim rozszerzeniem przezroczystej masy nerwowej między naczyniówką i ciałem szklistym; w tem rozszerzeniu rozgałęziają się włókna nerwu wzrokowego, który w d d przechodzi przez sklerotykę i naczyniówkę. Pomimo nadzwyczajnej cienkości (1/5—1/40<sup>mm</sup>), siatkówka, według Henle'go, składa się z 10-ciu różnych warstw. Warstwa wewnętrzna i górna, membrana limitans, ma związek z powłoką ciała szklistego, z błoną szklistą; dalej idzie warstwa składająca się z promienistych rozgałęzień nerwu wzrokowego, której włókna są w zależności z koniuszczkami gwiazdzistych komórek, składających warstwę trzecią. Pod nią mieszczą się liczne warstwy ziarniste, a miejsce najniższe, albo najbardziej zewnętrzne, na granicy naczyniówki, zajmuje najważniejsza warstwa sztabkowa. Składa się ona: 1-o ze sztabek obok siebie umieszczonych, w kształcie palisady, prostopadle do powierzchni warstwy; długość każdej sztabki wynosi 0,07<sup>mm</sup>, a grubość 0,002<sup>mm</sup>, i 2-o z czopków pół-walcowych, pół-stożkowych, cokolwiek dłuższych a grubych na 0,003—0,006<sup>mm</sup>. Od zwróconego wewnątrz końca każdego czopka i każdej sztabki, przechodzą nader delikatne nite-

czki, włókna Müller'a, przez środkowe warstwy ziarniste do koniuszczków komórek warstwy nerwowej, skutkiem czego czopki i sztabki zostają w połączeniu z włóknami nerwu wzrokowego. Według najnowszych badań Maxymiljana Schultz'a, każda sztabka i każdy czopek zawiera członek wewnętrzny, utworzony z substancji nerwowej i członek zewnętrzny składający się z licznych przezroczystych blaszek. Sztabki zdają się być przeznaczone do uczuwania wrażeń świetlnych wogóle, czopki zaś do wrażeń barwnych. Pod miejscem wejścia nerwu wzrokowego nie ma naturalnie sztabek ani czopków, dla tego też miejsce to nie odczuwa wrażeń światła i nazywa się *miejscem ciemnym*. O jego istnieniu przekonać się można za pomocą figury 156: zamknijmy lewe oko, a prawem patrząc na biały krzyżyk, umieścmy książkę w odległości 1'; biały krzyżyk zniknie wtedy. Inne miejsce siatkówki, rozciągające się od miejsca ciemnego ku skroni, przedstawia największą wrażliwość na światło; nazywa się ono *miejscem żółtem*, z powodu swego koloru, nie zawiera włókien nerwowych, naczyń i w warstwie sztabkowej ma tylko czopki. Obwód miejsca żółtego jest bardzo bogaty w komórki nerwowe; środek zaś tego miejsca, tak zwany dołek siatkówki, jest w nie



Fig. 156.

bardzo ubogim; jest on tym punktem, na który padają promienie przedmiotu, w który silnie wpatrujemy się. Przodowy brzeg siatkówki jest błoniastym, zrośniętym stale z naczyniówką, a więc i ze sklerotyką, a składa się z zewnętrznej albo rzęsowej części i z wewnętrznej, umieszczonej za przedłużeniami rzęsowemi, zwanej zonulą Zinnii, która rozciąga się w formie kołnierzyka nad przedłużeniami rzęsowemi i łączy się stale z okryciem soczewki, według mocno falowej linii. 4. Soczewka kryształowa (kristallina), najważniejszy płyn oka, leży bezpośrednio za siatkówką, jest ciałem galaretowatym, przezroczystym, bezbarwnym, sprężystym, mającym kształt soczewki dwu-wypukłej, przecięciowo 4<sup>mm</sup> grubej, z przodu mniej wypukłej niż z tyłu, utworzonej cebulowato z warstw współśrodkowych, których materiałem jest ciało proteinowe, globulin. Ciało to jest zamknięte w pokryciu soczewkowem — jasnej, bezstrukturalnej błonie, zrośniętej z błoną szklistą i z zonulą. 5. Płyn wodnisty (humor aqueus), wypełniający przestrzeń przodową między tęczówką a rogówką, jest jasny, bezbarwny, składa się z wody i z 2<sup>0</sup>/<sub>10</sub> soli i ciał ekstraktowych. Dawniej przyjmowano jeszcze przestrzeń w oku między tęczówką a soczewką, lecz okazało się, że takowa nie istnieje. 6. Ciało szkliste (humor vitreus) wypełnia przestrzeń między soczewką a siatkówką, jest

otoczone błoną szklaną, nader delikatną, przyczepioną wszędzie do membrana limitans siatkówki. Ciało szkliste przedstawia masę galaretowatą, mało spójną, pomieszaną ze szlaczem kleistym i ciecżą, która działa alkalicznie, zawierając przecięciowo 2% soli. Wymiary rozmaitych części oka oznaczył Helmholtz za pomocą swego *oftalmometru* (1854). Ten ostatni składa się z lunety przystosowanej do mierzeń małych odległości, przed której szkłem przedmiotowym są umieszczone obok siebie dwie tafelki szklane tak, że jedna połowa szkła przedmiotowego odpowiada jednej, druga zaś, drugiej tafelce. Obie tafelki są cokolwiek do siebie pochylone, wskutek czego powstają 2 obrazy oka mierzonego, na które luneta zostaje skierowana; z odległości dwóch obrazów jednego punktu od siebie i od obrazów innego punktu, można obliczyć odległość między temi dwoma punktami.

**Widzenie** (Kepler 1600). *Zwierciadło oczne* (Helmholtz 1851). **Widzenie 334.** przedmiotu odbywa się w ten sposób, że promienie świetlne, bądź własne, bądź od przedmiotu odbite, dochodzą do oka i po załamaniu się w błonach i płynach, tworzą na siatkówce mały, odwrócony obraz przedmiotu. Najsilniejsze załamanie się promieni światła ma miejsce przy rogówce; promienie oddalonego, świetlnego punktu zgromadziłyby się w odległości 10<sup>mm</sup> za siatkówką, wskutek samego tylko załamania rogówki; lecz na przodowej i tylnej powierzchni krystalliny, jak również na powierzchniach jej warstw, zachodzą załamania, wskutek czego zjednoczenie promieni, wytwarzające obraz, ma miejsce na siatkówce. O tworzeniu się tego obrazu przekonujemy się za pomocą zwierciadła ocznego, które pozwala wejrzeć z przodu we wnętrze oka i zobaczyć siatkówkę z jej naczyńcami, a zarazem powstające na niej obrazy optyczne. Za pośrednictwem tego ważnego przyrządu można się także przekonać, że ten przedmiot, na który jest zwrócone oko patrzącego, ma obraz swój na dołku siatkówki, i że obraz ten przedstawia szczególnie jasny reflex w punkcie, na który skupia się cała uwaga oka; nakoniec zwierciadło oczne pozwala jeszcze dostrzedz, że obrazy na siatkówce, przedmiotów nieobserwowanych, są mniej wydatne, tylko lekko naszkicowane; takie też przedmioty wydają się mniej jasnymi, do czego jeszcze przylączy się mała wrażliwość siatkówki w innych miejscach, pochodząca z małej liczby sztabek i czopków. Całkowity zakres obrazów wytworzonych na siatkówce stanowi *pole widzenia*; oba oczy obejmują razem, przy spokojnem patrzeniu w dal, pole widzenia wynoszące 180°, które może być jeszcze zwiększonym przez ruchy oczów. Światło promieni schodzących się na siatkówce podrażnia ją, przez włókna nerwu wzrokowego podrażnienie to udziela się mózgowi, który, nieznanym nam dotąd sposobem, wytwarza sobie pojęcie widzenia.

Podrażnienie jednak nie działa bezpośrednio na włókna nerwowe rozgałęziające się w siatkówce; widać to już z nieczułości miejsca ciemnego, o której również przekonać się można za pomocą zwierciadła ocznego; oprócz tego można

dostrzedz cienie naczyń rozmieszczonych w wewnętrznych warstwach siatkówki; warstwa więc światło-czuła musi leżeć głębiej, więcej ku zewnątrz; do przyjęcia światła musi służyć warstwa sztabkowa. Stwierdzeniem tego przypuszczenia jest ta okoliczność, że miejsce żółte nie posiada włókien nerwowych, a natomiast wiele czopków, nadto, że najmniejszy obraz, jaki wzrokiem ująć możemy, odpowiada oddaleniu dwóch sąsiednich sztabek. Nie mamy dotąd wcale ustalonych przekonań co do rodzaju percepcyi światła przez sztabki i czopki. Może być, że blaszki Schultz'a w zewnętrznych członkach sztabek odgrywają tu rolę, że mianowicie na granicach tych blaszek, fale eteru zostają odbite, interferując się z nowo przybywającymi falami na fale stojące, i udzielające drgań atomom blaszek. Drgania poprzeczne mogłyby się wtedy przenosić na nerwowe, wewnętrzne członki sztabek, następnie rozchodzić się za pośrednictwem włókien Müller'a na ziarna i komórki nerwowe, i tak wzmocnione dostawać się do włókien nerwowych. Różne barwy, jako różniące się długością fali, mogłyby wytwarzać fale stojące tylko w odmiennie grubych blaszkach; percepcya barw polegałaby zatem na pobudzaniu różnych miejsc stożkowych części czopków. Zwierciadło oczne objaśnia się tak samo, jak *czarnosc źrenicy i świecenie oka*. Źrenice takich oczów, którym nie brakuje czarnego pigmentu, wydają się czarnymi, gdyż przodowa, biała sklerotyka i czarna, pod nią leżąca naczyniówka nie pozwalają wnikać światłu, a nadto dla tego, że światło wchodzące w źrenicę i wytwarzające obraz, może powracać tylko tą samą drogą i odznaczać na miejscu przedmiotu obraz obrazu tegoż miejsca, a wcale nie może dochodzić do oka obserwującego z boku. Źrenica albinosa, białego królika i myszy wydaje się czerwona, gdyż naczyniówce brak pigmentu, wskutek czego światło może wchodzić przez sklerotykę i naczyniówkę i oświetlić całą siatkówkę tak, że widać czerwoną naczyniówkę; zatrzymując ekranem światło boczne ujrzymy źrenicę albinosa także czarną. U albinosów jak również u niektórych blondynów z jasno-niebieskimi oczyma można widzieć z boku świecący obrazek siatkówki przez białą sklerotykę; psy, koty i inne zwierzęta mające w głębi oka tak zwane *tapetum*, czyli miejsce zwierciadłowe, pozbawione pigmentu, przedstawiają również przy słabem świetle, jasne koło świetlne w oku; zjawiskom tym dajemy nazwę świecenia oka. Źrenicę każdego człowieka można uczynić czerwoną. W tym celu ustawia się płomień w pewnej od oka odległości; od oślniewającego wpływu płomienia obserwator zasłania się ekranem. Gdy oko oświetlone patrzy na płomień, to na siatkówce tworzy się mały obrazek płomienia, a promienie tego obrazka wracają znów do płomienia tą samą drogą, którą przyszły do oka; lecz jeżeli oko patrzy w inne miejsce, to na siatkówce powstaje koło większe, błyszczące, tak zwane koło rozproszenia, oświetlające źrenicę czerwono. To sztuczne świecenie oka osiąga się jeszcze łatwiej nie za pomocą bezpośredniego światła płomienia, lecz za pośrednictwem światła odbitego w zwierciadle i wchodzącego w oko dopiero po odbiciu; obserwator wtedy patrzy we wnętrze oka przez zwierciadło. Na tej prostej zasadzie polega zwierciadło oczne. Pierwotne zwierciadło Helmholtz'a składało się z jednej lub z kilku tafli szklanych bez podlew, pozwalających naturalnie na widzenie bezpośrednie; Ructe (1852) pierwszy użył obłożonego zwierciadła wklęsłego, czyniącego oświetlenie silniejszym i opatrzonego w środku otworem. Jakkolwiek z pomocą takiego urządzenia można oświetlić silnie siatkówkę człowieka lub zwierzęcia, to jednak początkujący nie jest w możności rozróżnienia szczegółów siatkówki. Żeby tak być



mogło, obserwator powinienby mieć zdolność jednoczenia promieni wychodzących z tych szczegółów na miejscu żółtem swej własnej siatkówki, co tylko wtedy łatwo się udaje jeżeli już istnieje, obraz siatkówki, jeżeli zatem promienie schodzą się na innym miejscu siatkówki. Lecz tak nie jest, gdyż promienie idące z oka doznają oznaczonych załamań w ośrodkach ocznych, posiadają więc oznaczone punkta zbiegu. Przy usilności udaje się jednak oku normalnemu zbierać promienie obcej siatkówki na własnej siatkówce; odbywa się to mocą akkomodacji oka, własności przystosowywania się oka do odległości, własności, którą później rozważymy. Obserwator niewprawny lub posiadający oczy nienormalne musi sobie pomagać soczewkami bądź wklęsłymi, służącemi do utworzenia obrazu powiększonego, urojonego, bądź wypukłymi, dającemi obrazy rzeczywiste. Fig. 157 przedstawia w przecięciu zwierciadło oczne Helmholtz'a. Światło lampy L pada na tafleszklane a i zostaje odbitem przez nie w oko X. Obserwator umieszcza przed swem okiem miednicę B chromiącą je od olśnienia; przez soczewki wklęsłe c i c' i przez tafle a patrzy on w oko X. W dwóch kołowych krążkach bb i dd, obracalnych około osi ff, znajduje się wiele soczewek, które mogą być obracane lub wyjmowane, według potrzeby oka obserwatora.

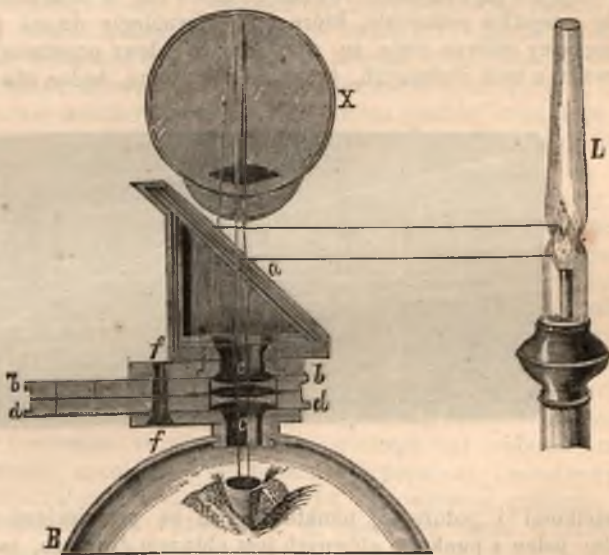


Fig. 157.

Oko szematyczne (Listing 1845). Chcąc dla każdego zewnętrznego punktu oznaczyć łatwo położenie jego obrazu na siatkówce, chcąc poddać oko rozważaniom matematyczno-fizycznym, należy zabstrahować niektóre części oka, ograniczając się, z pewnem przybliżeniem, na tych częściach, które stanowią tak zwane oko szematyczne. W oku rzeczywistem są 4 ośrodki łamiące: rogówka, płyn wodnisty, soczewka i ciało szkliste; umieszczone są one jeden za drugim, graniczne ich powierzchnie nie są wszędzie kulistymi, a osie ich nie padają na jednej prostej; oprócz tego soczewka składa się z ogromnej liczby łuszczynek. Tak zawikłany system jest po za dziedziną spekulacyj matematycznych. Na szczęście, zboczenie od kulistości i różność kierunków osi, są nieznaczne: oprócz tego, można udowodnić, że zamiast każdego ześrodkowanego systemu powierzchni łamiących, można

podstawić system dwóch tylko powierzchni, dający obrazy takie same i tak samo położone. Można więc przybliżenie wykryć prawa odnoszące się do oka, przyjmując części powierzchni łamiących za powierzchnie kul, których środki leżą na jednej linii prostej, łączącej środek rogówki z punktem znajdującym się między miejscem żółtem a ciemnym, zwanej *osią oczną*. Do wyprowadzenia praw dla systemu dwóch powierzchni łamiących, zatem dla 3-ch różnych ośrodków, nie wystarczają dwa ogniska i środek optyczny (według Gauss'a, Dioptrische Untersuchungen 1843); potrzeba raczej trzech par punktów głównych i przechodzących przez nie płaszczyzn głównych, prostopadłych do osi ocznej; potrzeba uwzględnić 2 ogniska, 2 punkta główne i 2 punkta węzłowe, również dwie płaszczyzny ogniskowe, dwie płaszczyzny główne i dwie płaszczyzny węzłowe. Pierwsze ognisko jest tym punktem, przez który, przed załamaniem przechodzące promienie, stają się po załamaniu równoległymi do osi; w drugim zaś ognisku zbierają się wszystkie promienie, które były równoległe do osi przed załamaniem.— Płaszczyzny główne mają tę własność, że obraz przedmiotu umieszczonego na pierwszej z tych płaszczyzn, przypada na drugą, będąc równy przedmiotowi co

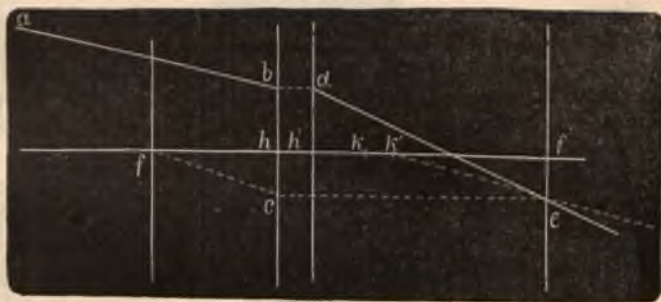


Fig. 158.

do wielkości i położenia; punkta główne są przecięciami płaszczyzn głównych z osią; jeden z punktów głównych jest obrazem drugiego, to znaczy, że promienie, które w pierwszym ośrodku przechodzą przez pierwszy punkt główny, po ostatecznym załamaniu się, przechodzą przez drugi punkt główny. Drugi punkt węzłowy jest także obrazem pierwszego; punkta węzłowe oznaczają się z warunku, że promień, który w pierwszym ośrodku przechodzi przez pierwszy punkt węzłowy, po załamaniu się, na kierunku od pierwotnego równoległym spotyka drugi punkt węzłowy. Przyjmując z Listing'iem w. z. powietrza = 1, w. z. płynu wodnistego i szklonego =  $\frac{103}{77}$ , soczewki =  $\frac{16}{11}$ , promienie krzywizn: rogówki =  $8^{\text{mm}}$ , przodowej powierzchni soczewki =  $10^{\text{mm}}$ , odwrotnej jej powierzchni =  $6^{\text{mm}}$ , odległość przodowej powierzchni rogówki od przodowej powierzchni soczewki =  $4^{\text{mm}}$ , grubość soczewki =  $4^{\text{mm}}$ , które są średnimi pomiarów różnych części oczów rzeczywistych, wypadają dla oka szematycznego zwróconego w nieskończoność następujące położenia punktów głównych: Odległość pierwszego ogniska przed siatkówką =  $12,8^{\text{mm}}$ , drugiego ogniska za tylną powierzchnią soczewki =  $14,6^{\text{mm}}$ ; odległość pierwszego punktu głównego od pro-

dowej powierzchni siatkówki =  $2,17^{\text{mm}}$ , drugiego =  $2,57^{\text{mm}}$ ; odległość obu punktów głównych od siebie =  $0,4^{\text{mm}}$ ; oddalenie pierwszego punktu węzłowego od tylnej powierzchni soczewki =  $0,76^{\text{mm}}$ , drugiego =  $0,36^{\text{mm}}$ ; oddalenie obu punktów węzłowych od siebie =  $0,4^{\text{mm}}$ . Figura 155 przedstawia szereg tych punktów:  $f, f', h, h', k, k'$ . Za pomocą tych punktów i należących do nich płaszczyzn można oznaczyć położenie i wielkość obrazu na siatkówce, rachunkiem i rysunkiem. Przebieg promienia  $ab$  (fig. 158) znajduje się następującym sposobem: Przez punkt przecięcia  $b$  promienia z pierwszą płaszczyzną główną, prowadzi się równoległą od osi aż do drugiej płaszczyzny głównej w  $d$ ; podobnie przez  $f$  prowadzi się równoległą do promienia aż do pierwszej płaszczyzny głównej w  $c$ , a ząd równoległą od osi aż do spotkania się z drugą płaszczyzną ogniskową w  $e$ ;  $de$  będzie promieniem załamanym. Prościej otrzymuje się punkt  $e$  za pomocą węzłów; prowadzi się przez drugi węzeł  $k'$  równoległą do promienia aż do drugiej płaszczyzny ogniskowej. Ponieważ oba punkta główne, równie jak punkta węzłowe, leżą bardzo blisko siebie, przeto każdą parę takich punktów można złączyć w jeden, a zamiast trzech ośrodków przyjąć tylko jeden, którego  $w. z. = \frac{10^8}{77}$  i którego przodowa powierzchnia ma promień =  $5,1248^{\text{m}}$ . Takie oko nazywa się okiem zredukowanym Listing'a; obraz punktu świetlnego na siatkówce znajduje się w takim oku bardzo łatwo, prowadząc przez węzeł linię prostą do spotkania się z siatkówką; linija ta nazywa się liniją kierunkową widzenia; węzeł zatem jest punktem skrzyżowania się linij kierunkowych; leży on na  $0,4764^{\text{m}}$  przed tylną powierzchnią soczewki. Używając oka szematycznego, należy z punktu świetlnego poprowadzić prostą przez pierwszy węzeł, a przez drugi węzeł linię do niej równoległą. Dwie te linije wskazują drogę promienia, lecz tylko o tyle, o ile pierwsza linija leży zewnątrz oka, druga zaś w ciele szklistem. Promień kierunkowy trafiający na miejsce wyraźnego widzenia, na dołek siatkówki, nazywa się liniją widzenia lub osią widzenia; pada on na oś oka.— Kąt utworzony przez linije kierunkowe albo przez promienie kierunkowe wychodzące od dwóch krańcowych punktów przedmiotu, nazywa się *kątem widzenia*.— Z wiadomej wielkości i odległości przedmiotu można obliczyć kąt widzenia; znając ten ostatni i odległość punktów skrzyżowania się promieni kierunkowych można oznaczyć wielkość obrazu na siatkówce. Tak np. włosowi grubemu na  $\frac{1}{60}''$ , widzianemu z odległości  $28'$ , odpowiada na siatkówce obraz o średnicy  $0,0000021''$  i kąt widzenia prawie równy 1 sek.

Nie wszystkie przedmioty, wysyłające promienie do oka, wytwarzają obraz na siatkówce; istnieje bowiem prawidłowy związek, jak w prostych soczewkach, między odległością przedmiotu, odległościami punktów głównych i odległością obrazu tak, że każdej oznaczonej odległości obrazu odpowiada oznaczona odległość przedmiotu. Ponieważ oddalenie siatkówki od przodowej powierzchni oka, ponieważ zatem odległość obrazu dla każdego oka ma oznaczoną wielkość, przeto, przy oznaczonej tylko odległości przedmiotów od oka, mogłyby się tworzyć wyraźne obrazy na siatkówce, jeśliby oko nie posiadało zdolności przystosowywania się, naturalnie w pewnych granicach, do odległości przedmiotów, innymi słowy, jeśliby oko nie posiadało zdolności akkomodacyi.

**Akkomodacya** (Kepler 1611, Helmholtz 1855). *Okulary*. Przez akko- **336.**  
modacyę rozumiemy zdolność oka, pozwalającą wytwarzać na siatkówce wy-

rażne obrazy przedmiotów rozmaicie od oka oddalonych, czyli umóżebniająca wyraźne widzenie przedmiotów, w rozmaitych odległościach. Nie chcemy przez to powiedzieć, że oko widzi współcześnie i jasno przedmioty rozmaicie odległe; raczej rzecz się ma przeciwnie.

Trzymając za woalką rozłożoną książkę i kierując oczy na litery, woalka wyda się zblakłą i odwrotnie; trzymając prostopadle do listwy okna igłę i patrząc na igłę, listwa wyda się niewyraźnym paskiem, patrząc zaś na listwę igła przedstawi się nam niewyraźnie. Nauczającym jest doświadczenie Scheiner'a (1619): Patrzy się na igłę przez dwa bardzo blizkie siebie otworki zrobione w karcie do grania; igła umieszcza się przed oknem prostopadle do linii łączącej dwa otwory; gdy patrzymy na samą igłę, ta wydaje się pojedynczą; patrząc zaś na punkt bliższy lub dalszy od igły, zobaczymy ją podwójną lecz niewyraźną. Podczas patrzenia na punkt bliższy, zamknijmy lewe oko; wtedy lewy obraz igły zniknie; obserwując punkt odleglejszy a zamykając lewe oko, zniknie prawy obraz i odwrotnie. Doświadczenie to wskazuje wyraźnie, że przy patrzeniu na igłę, promienie przechodzące przez oba otwory zbierają się na siatkówce, że przeciwnie, nie ma to miejsca przy patrzeniu na punkt bliższy lub dalszy, i że zatem wiązka promieni każdego otworu wytwarza obraz wykazujący swą niejasnością niezupełne jednocześnie się promieni wiązki. Ponieważ przy obserwowaniu punktu bliższego i przy zamkniętem lewym oku znika lewy obraz igły t. j. ten, który (z powodu odwrotnego położenia obrazów na siatkówce) pochodzi od prawego obrazu siatkówki, więc wypada dalej, że w tym razie promienie skrzyżowały się już zanim doszły do siatkówki, że zatem ich punkt zbiegu leży przed siatkówką, nadto, ponieważ przy obserwowaniu punktu odleglejszego i przy zamknięciu lewego oka, znika prawy obraz siatkówki, t. j. ten, który pochodzi od lewego obrazu na siatkówce, przeto w tym razie promienie idące od igły przed zejściem się padają na siatkówkę, więc punkta ich zbiegu leży za siatkówką. Streszczając wszystkie części doświadczenia wypada, że promienie punktu nieobserwowanego nie zbierają się na siatkówce, lecz przed lub za siatkówką.

Przedmioty nieobserwowane wydają się niewyraźnemi dla tego, że obraz na siatkówce każdego z ich punktów, nie jest punktem, lecz tak zwanem kołem rozproszenia; z przyczyny bowiem kołowej formy źrenicy, wierzchołek załamanego ostrokągu świetlnego nie pada na siatkówkę, lecz przed lub za nią; promienie punktu odleglejszego zbierają się przed siatkówką dla tego, że koło rozproszenia tego punktu przypada za skrzyżowaniem, co także wynika z mniejszej rozbieżności ostrokągu promieni przechodzącego przez źrenicę; przeciwnie, promienie punktu bliższego niż obserwowany, schodzą się dopiero za siatkówką, dla tego, że koło rozproszenia tworzy się przed skrzyżowaniem promieni, co także wynika z większej rozbieżności promieni idących przez źrenicę z punktu blizkiego. Akkomodacja więc musi polegać na tem, że oko dokonywa pewnych modyfikacyj, zmieniających koła rozproszenia w punkta obrazów; przystosowanie się oka do punktu odleglejszego mogłoby się odbywać np. w ten sposób, że promienie tego punktu zostałyby

załamane słabiej, a wskutek tego łączyły się nie przed, lecz na siatkówce; podobnie przystosowanie się oka do punktu bliższego mogłoby się dziać skutkiem silniejszego załamania promieni, jednoczących się wtedy na siatkówce, zamiast za siatkówką. Przy akkomodacji dostrzegamy w oku następujące zmiany: Gdy oko przystosowuje się do przedmiotu blizkiego, to źrenica zwęża się, brzeg źrenicy i przodowa powierzchnia soczewki przesuwa się cokolwiek ku przodowi, a nadto przodowa powierzchnia staje się wypuklejszą. O tej ostatniej najważniejszej zmianie przekonał się Helmholtz ztąd, że z trzech obrazków Sanson'a widzialnych w oku przy jasnym świetle, i pochodzących od rogówki i od obu powierzchni soczewki, drugi obrazek, przy patrzeniu na przedmiot blizki, zmniejsza się, co może być spowodowane tylko większą wypukłością powierzchni odzwierciadlającej. Akkomodacja więc polega na tem, że dla przedmiotów bliższych lub dalszych, soczewka przybiera większą lub mniejszą krzywiznę, wskutek czego promienie zostają więcej lub mniej załamane i to tak, że zbierają się na siatkówce. Nie wiemy dotąd dokładnie, skutkiem czego następują te zmiany. Według Kramer'a (1853), przy patrzeniu w poblizę, tęczówka ściąga się i wywiera przez to łącznie z mięśniem rzęsowym ciśnienie na brzeg soczewki, skutkiem czego brzeg ten zostaje zagięty w tył. Helmholtz (1855) uważa to wyjaśnienie za niedostateczne, gdyż w takim razie tylna powierzchnia soczewki musiałaby się stawać mniej wypukłą, a tymczasem i ona także ulega małemu uwypukleniu. Przyjmuje on, że soczewka spokojna, przy patrzeniu odległym, zostaje rozszerzoną przez zonulę przytwierdzoną do jej brzegu; że podczas patrzenia w poblizę, mięsień rzęsowy ściąga się, zgina skutkiem tego ku przodowi fałdki zonuli ściągające w tył, i tym sposobem zmniejsza napięcie zonuli. Gdy zaś ściąganie przez zonulę brzegu soczewki ustaje, ta ostatnia mocą własnej sprężystości staje się z obu stron wypuklejszą; ciśnienie tęczówki rozpoznane przez Kramer'a, wzmacniałoby wypukłość przodową, drugą zaś osłabiałoby (Mechanizm akkomodacji).

Odległości, do których oko ludzkie może się przystosowywać, są różne dla różnych osób. Najbliższy punkt, do którego oko przystosować się może, nazywa się punktem blizkim akkomodacji, najbardziej oddalony — punktem odległym. Odległość punktu blizkiego od normalnego oka wynosi 4 do 5"; dla punktu odległego jest ona nieskończonością, gdyż oko może jednoczyć promienie równoległe. Oczy krótkowidzące są takie, które nie mogą przystosowywać się do większych odległości, których punkt odległy przypada blisko oka, często na kilka cali tylko; takie oczy mogą najczęściej przystosowywać się lepiej do małych odległości, niż oczy normalne; ich punkt blizki przypada również bliżej. Dalekowidzącymi nazywają się te oczy, które nie

mogą przystosowywać się do małych odległości, których punkt blizki jest w znacznym od oka oddaleniu, często na kilka stóp. Oczy krótkowidzące łamią promienie zbyt silnie, zbierają dobrze zatem na siatkówce mocno rozbieżne promienie blizkich punktów świetlnych, lecz przed siatkówką mało rozbieżne promienie punktów odległych; krótkowidze więc używają okularów wklęsłych dla widzenia przedmiotów odległych; takie bowiem okulary zwiększają rozbieżność promieni. Oczy dalekowidzące łamią światło nie dość silnie, a wystarczając do jednoczenia na siatkówce prawie równoległych promieni idących od odległych punktów świetlnych, nie są zdolne zachować się tak samo względem silnie rozbieżnych promieni, punktów blizkich; dalekowidze, dla widzenia w pobliżu, używają przeto szkielek wypukłych, zmniejszających rozbieżność. Nie wiemy jeszcze dokładnie, na czym polega anormalność tych oczu, uważano dawniej krótkowidzenie za skutek zbyt wielkiej, a dalekowidzenie za skutek zbyt małej wypukłości soczewki i rogówki. Według Donders'a jednak (1864), nie można dostrzedz na żadnej z nich najmniejszych zmian w krzywiźnie; krótkowidzenie i dalekowidzenie zdają się być raczej skutkami różnych stanów chorobliwych. Prawdopodobnym ich początkiem jest zapalenie błonki naczyniowej, sprowadzające powoli zmiany organiczne w tej błonie, a skutkiem sąsiedztwa także w mięśniu rzęsumym, w zonuli i t. d.; następuje wskutek tego osłabienie zdolności akkomodacyjnej, często wydłużenie osi ocznej, zmiana w położeniu punktu obrazu oczów. Donders rozgatkował oczy według tych przeszkód akkomodacji. Oczy mogące jednoczyć promienie rozbieżne i równoległe nazywa on *emmetropijnemi* (od *εμμετρος*, zupełny); mają one punkt odległy w nieskończoności. Oczy, które mogą jednoczyć promienie rozbieżne, lecz nie są w stanie tak zachować się względem promieni równoległych, które zatem mają punkt odległy przed sobą, lecz nie w nieskończoności, zostały nazwane *brachymetropijnemi* (*βραχυς*, krótki); przedstawiają one często osie oczne dłuższe i punkt obrotu oczów umieszczony głębiej, niż w oczach emmetropijnych. Oczy jednoczące nietylko promienie równoległe, lecz i zbieżne, mające punkt odległy za sobą, zostały nazwane *hypermetropijnemi*; mają one często osie oczne krótsze i punkt obrotu więcej na przodzie, niż oczy emmetropijne. Wyrażenie presbyopijny (od *πρόσβυς*, starzec) odnosi się do tych oczów, które w późniejszym wieku przez stwardnienie zewnętrznych warstw soczewki, utraciły w zupełności zdolność akkomodacji. Oczy emmetropijne mają dalekość widzenia od 6" do nieskończoności, brachymetropijne np. od 3—6", hypermetropijne np. od 12 do —12"; dla każdego rodzaju oczów jest taka odległość, w której małe przedmioty są widziane najwyraźniej; nazywa się ona dalekością widzenia wyraźnego, leży zawsze cokolwiek zewnątrz punktu blizkiego, a dla oczu emme-

tropijnych na 8—10'', albo prawie na 25<sup>0</sup>. Do znalezienia dalekości widzenia służy *optometr*.

Oznaczenie odległości, w której czytać można za pomocą okularów lub bez nich nie daje miary dokładnej, gdyż litery są dosyć wielkie i mogą być rozpoznane nawet przy niezupełnej akkomodacyi. Young (1801) proponował używać za optometr doświadczenia Scheiner'a; dalekość widzenia sięga do miejsca, w którym przedmiot obserwowany przez dwa otwory, może być rozpoznany jako pojedynczy. Optometr Ruete'a (1852), składa się z rurki ciemnej rozciąganej, przez którą patrzy człowiek poddany badaniu, w celu przeczytania pisma umieszczonego na drugim końcu rurki; ponieważ on nie zna pisma i nie może sądzić o odległości, przeto przy umyślnej chęci omamienia wikła się zaraz w sprzecznościach.

**Zboczenie oka chromatyczne i sferyczne.** Oko różniąc się własnością **338.** akkomodacyi od soczewek sztucznych, jest wolne od ich niedostatków, mianowicie od zboczenia chromatycznego i sferycznego przynajmniej o tyle, że przy zwyczajnem widzeniu przedmioty nie przedstawiają brzegów zabarwionych, ani zatartych. Zboczenie chromatyczne przy widzeniu zwyczajnem nie zachodzi dla tego, że rozpraszanie wody i cieczy wodnistych jest bardzo nieznaczące, trzy razy mniejsze od rozpraszania szkła, i dla tego, że przy zwyczajnem, słabem oświetleniu, nadzwyczaj wązkie brzegi barwne przedstawiają bardzo małe natężenie światła. Zboczenie sferyczne zostaje usuniętem przez tęczówkę, zatrzymującą promienie brzeżne.

Przy niezwykajnem lub bardzo silnem oświetleniu występują jednak oba zboczenia dosyć wyraźnie. Już Fraunhofer (1814) zauważył, że przy rozpatrywaniu widma przez lunetę był zmuszony bardziej zbliżyć szkło do krzyża z nici wtedy, gdy chciał widzieć tak wyraźnie część fioletową jak część czerwoną widma. Najłatwiej zauważyć można zboczenie chromatyczne za pomocą następującego doświadczenia: Za otworem ekranu, pokrytym szkłem fioletowem, ustawia się światło i obserwuje się wtedy barwny punkt świetlny, w rozmaitych odległościach; gdy oko znajduje się w takiej odległości, że jest przystosowane do promieni czerwonych, to widać czerwony punkt świetlny z fioletowem kołem rozproszenia, a to dla tego, że promienie czerwone tylko, nie zaś fioletowe, jednoczą się na siatkówce; gdy oko jest przystosowane do fioletowych promieni, to widzi punkt świetlny fioletowy otoczony czerwonym kołem rozproszenia; w pośrodku między temi dwiema odległościami, gdzie oko równie mało akkomoduje się do obu barw, światło przedstawia się jednobarwnem. Powierzchnie białe znajdujące się za punktem akkomodacyi, przedstawiają, przy uważnem rozpatrywaniu, brzeg niebieski, przechodzący w czerwono żółty wtedy, gdy powierzchnie te są bliższymi oka niż punkt akkomodacyi. Zboczenie kulistości jest wogóle bardzo nieznaczące; z budowy oka wynikają następujące, podobne zjawiska, oznaczone nazwą astygmatyzmu ( $\alpha$  przeczenie i *astylmu* punkt, znamię). Punkt świetlny jasny wydaje się gwiazdą wtedy, gdy oko nie jest dość przystosowane, dla tego, że soczewka posiada budowę nieprawidłowo promienistą; tem objaśnia się kształt promienisty gwiazd i odległych latarni, z tej też przyczyny jasne linije świetlne wydają się

potrojonemi. Wpatrując się mocno w linie poziome, wydają się nam pionowe, znajdujące się na tem samym miejscu, niewyraźnemi i odwrotnie; zjawisko to wykazuje niesymetrię jabłka ocznego. Zostajemy olśnieni wniknięciem w oko bardzo silnego światła, tworzą się bowiem nagle w oku wielkie i jasne koła rozproszenia, wewnątrz których znikają obrazy innych przedmiotów; powoli oko przystosowywa się, źrenica się ściąga a tęczęwka rozszerza, wskutek czego mniejsza ilość promieni światła, przechodzących przez przystosowaną teraz soczewkę jednoczy się w obraz. Przy nagłym przejściu z przestrzeni jasnej w przestrzeń ciemniejszą przybywa do oka, przez wąską jeszcze źrenicę, za mało światła od pojedynczych przedmiotów; powoli dopiero rozszerza się źrenica, a tęczęwka ściąga się; tymczasem siatkówka przychodzi do siebie po silnych wpływach światła i staje się czulszą na wrażenie słabsze tak, że odczuwa tworzące się obrazy dopiero po zjednoczeniu się większych wiązek promieni. Samodzielne przystosowywanie się tęczęwki przy akkomodacji i do każdej ilości światła nie jest dotąd wyjaśnione. Koty, których źrenica jest wąską szparą, mogącą się znacznie rozszerzać, widzą również dobrze w dzień i w nocy, gdy tymczasem sowy, posiadające wielką nieściągalną źrenicę są olśnione w dzień nadmiarem światła. Atropina, alkaloid belladonny, rozszerza źrenicę; laktuka zwęża ją.

339.

Zjawiska entoptyczne. Odczuwanie obrazów na siatkówce, wywołanych przedmiotami będącymi w samym oku, wkracza w dziedzinę zjawisk tak zwanych entoptycznych. Nabieramy przeświadczenia o przedmiotach, znajdujących się na przodowej części oka, jedynie za pomocą oświetlenia sztucznego; patrzymy mianowicie przez otwór w ekranie, zrobiony w ognisku wielkiej soczewki płaskiej i otrzymujący przez nią światło płomienia świecy. Widać wtedy pole widzenia ograniczone tęczęwką, można rozpoznać w jej brzegu kołowym ząbki, nacięcia i t. p.; widać na rogówce ciecie jako jasne paski lub jasne punkta znikające lub zmieniające się przy mruganiu; jako stałe zjawiska pochodzące od soczewki dają się zauważyć miejsca ciemne i jasne, jasne paski, tworzące rodzaj gwiazdy, i linie ciemne promieniste, których przyczyna tkwi prawdopodobnie w promienistej budowie soczewki. Samem okiem widać przedmioty snujące się w ciele szklistem; komórki zmieniające się w kleistość, wydają się niby odosobnione koła podnoszące się, przy szybkim ruchu oczów, z dołu a następnie opadające powoli; włókna ziareczkowe wydają się sznurkami pereł, małe gromadki ziareczek—grupami kół ciemnych, resztki błonowe, pływające w błonie szklistej, przedstawiają się jak jasne wstążki ograniczone linijami ciemnymi. Wszystkie te zjawiska mają to wspólnego, że przy obserwowaniu pewnego przedmiotu znikają: według Donder'a są one skutkiem zarodkowej budowy ciała szklistego, którego komórki rozplynęły się później w kleistość, gdy tymczasem część ich błon i jąderek pozostała. Można także widzieć cienie (Purkinje 1819), które rzucają naczynia krwionośne, znajdujące się w warstwach najwyższych, na warstwę sztabkową; dochodzi się do tego sprowadzaniem tych cieniów na odmienne od zwyczajnych miejsca i ustawicznym ich zmienianiem. Dokonywa się tego za pomocą ruchu płomienia, znajdującego się pod lub z boku oka przyczem patrzeć należy na tło ciemne; wkrótce tło to wydaje się pokryte zasłoną matową białą, na której rysują się ciemne rozgałęzienia naczyń; w środku pola widzenia tworzy się białawy krążek z cieniem kształtu półksiężyca; według H. Müller'a cień ten jest cieniem dołka siatkówki.



**Uczucie światła** polega na podrażnieniu nerwu wzrokowego. Jak każde pobudzenie nerwu ruchowego ma za skutek kurczenie się mięśni, tak też każde pobudzenie nerwu czuciowego wytwarza pewne wrażenia; każde podrażnienie zatem nerwu wzrokowego powoduje uczucie widzenia. Nerw widzenia jest pobudzany najdelikatniej falami świetlnymi; lecz i mechaniczne działania, jak uderzenie, pchnięcie, ciśnienie, gwałtowny ruch oczu, wywołują szybką akkomodację uczuć; te ostatnie powstają także w chorobliwych stanach oka, nawet wskutek wpływu życiowego samego oka. Szczególniej wydatnem są wrażenia świetlne spowodowane przez uderzenie elektryczne, przez otwieranie i zamykanie strumienia elektrycznego, również i przez sam strumień elektryczny. (Prawo właściwych energii zmysłów).

Wskutek uderzenia lub pchnięcia powstaje światło podobne do błyskawicy, przez całe pole widzenia; światło to równie jak wszystkie wrażenia świetlne jest natury czysto subiektywnej, a nie jaśnieje na zewnątrz, jak przypuszczano dawniej. Lekkie uderzenie, zadane pewnemu miejscu jabłka ocznego, wytwarza miejsce jasne, tak zwany obraz naciśnięcia, na przeciwległym miejscu siatkówki; ciśnienie przeciągłe wywołuje na polu widzenia błyszczące, zmieniające się figury gwiaździste, i rombeodryczne, jasne i ciemne. Przy szybkich ruchach oczu i szybkiej akkomodacji powstają obwódki ogniste, a w chwili przecięcia nerwu wzrokowego całe morze światła zdaje się rozlewać. W chorobach skutkiem zwiększonego ciśnienia krwi lub cieczy oka, działaniem chemicznych podrażnień przy zmianie krwi, przez przenoszenie się podrażnienia mózgowego na nerw wzrokowy, a nawet skutkiem udzielenia się stanu pobudzenia pewnej części mózgu przyrządowi wzrokowemu, w chwili gdy myśl jest bardzo zajęta pewnym wyobrażeniem, — tworzą się rozmaite subiektywne zjawiska świetlne, jak np. oświetlone całe pola widzenia, miejsca jasne, fantazmy o kształtach ludzkich i zwierzęcych i t. d. Samo oko wytwarza skutkiem swego wewnętrznego życia na ciemnym polu widzenia, słabe nieregularne błyszczenie i rozmaite figury, posuwające się paski mgliste (Goethe) a nawet fantazmy. W chwili przejścia przez głowę strumienia elektrycznego, albo przy zamykaniu i otwieraniu strumienia za pomocą głowy, pojawiają się błyskawice świetlne; stale przebiegający strumień el. czyni pole widzenia białawo fioletowem lub ciemnem, czerwono-żółtem, stosownie do tego czy dodatni czy też ujemny strumień przechodzi przez nerw wzrokowy w górę ku mózgowi.

Miejscem przyjmowania wrażeń świetlnych (percepcji świetlnej) jest **344.** warstwa sztabkowa siatkówki.

Normalny środek pobudzania nerwu wzrokowego, ruch falowy eteru, nie działa bezpośrednio na nerw wzrokowy, gdyż jak wiadomo wejściem tego nerwu w oko jest miejsce ciemne; nie działa także bezpośrednio na rozgałęzienia nerwu w siatkówce, gdyż w takim razie wiele nerwów byłoby podrażnianych współcześnie, a skutkiem tego wrażenie świetlne byłoby znacznie rozleglejszem; byłoby wreszcie w takim przypuszczeniu rzeczą niemożliwą widzieć cienie naczyń siatkówki, które znajdują się częścią w rozgałęzieniach nerwów, częścią pod nimi w tak zwanych warstwach jąderkowych i które mogą rzucać swe cienie jedynie

na warstwę głębszą. Głębiej leży tylko warstwa sztabkowa: przeto ona jest organem percepcji światła.

**342.** Rozległość uczucia świetlnego zależy od wielkości obrazu siatkówki, a zatem od kąta widzenia; uczucie świetlne najmniejszych wymiarów ma miejsce wtedy, gdy obraz na siatkówce wypełnia całkowicie lub częściowo podstawę pojedynczego czopka lub sztabki. Ztąd wypada, że przy świetle, kąt widzenia najmniejszego, dającego się dojrzeć przedmiotu wynosi  $\frac{1}{2}$  minuty.

Każdy czopek i każda sztabka może wydać tylko jedno uczucie świetlne; gdy obraz na siatkówce wypełnia podstawę sztabki, której średnica jak wiadomo  $= 0,002^{\text{mm}}$ , to prosty rachunek przeprowadzony na wymiarach podanych przez Listing'a dla oka szematycznego daje odpowiadający kąt widzenia równy około  $30''$ . Jeżeli zaś obraz na siatkówce jest mniejszy od podstawy jednego elementu warstwy sztabkowej, to działanie tego obrazu, rozdzielając się na cały element słabnie; przedmiot zatem może być widziany pod kątem widzenia mniejszym od  $\frac{1}{2}$  minuty tylko wtedy, gdy jest mocniej oświetlony, albo gdy odbija ciemno od tła jasnego. Gwiazdy stałe mają kąt widzenia mniejszy od  $1''$ ; drut srebrny błyszczący na ciemnym tle widać jeszcze przy kącie widzenia  $2''$ ; Volkmann widział włos na tle ciemnym, pod  $1,4''$ , pewien uczeń Bars widział go nawet pod kątem  $1''$ .

**343.** Wyraźność wrażeń świetlnych t. j. zdolność widzenia rozdzielnie przedmiotów rozdzielonych, zależy także w części od wielkości elementów siatkówki. Dwa punkta jasne mogą być rozpoznane we wszystkich położeniach oka jako dwa punkta tylko wtenczas, gdy odległość ich obrazów jest większą od szerokości jednego elementu siatkówki. Zdolność rozróżniania warunkuje się oprócz tego liczbą elementów na oznaczonej części powierzchni, czułością ich, psychiczną doskonałością osoby i fizyczną doskonałością oka.

Według Hooke'a dwie gwiazdy wydają się jedną, gdy odległość między nimi wynosi mniej niż  $30''$ ; nawet gdy oddalenie gwiazd wynosi  $60''$ , to jedna na sto osób zaledwo widzi oddzielnie obie gwiazdy. Równoległe do siebie druty ułożone w kratkę, umieszczone przed tłem jasnym wydają się rozdzielonymi wtedy tylko, gdy odległości między ich osiami odpowiadają kątowi widzenia prawie  $1'$ . Międzyprzestrzenie jasne nie przedstawiają się prostolinijowemi, jak to ma miejsce rzeczywiście, lecz porozszerzanemi i pozwążanemi, a to dla tego, że końce elementów siatkówki nie są paskami prostokątnemi lecz przedstawiają miejsca raz szerokie, raz wąskie, jak wszystkie paski złożone z wielokątów.

**344.** Siła uczucia świetlnego zależy nietylko od czułości siatkówki i doskonałości oka, ale także od jasności światła i od jego barwy t. j. od siły żywej i od liczby drgań eteru. Co się tyczy jasności, to przy zwyczajnem świetle oko jest najczulszem na zmiany jasności o małe ułamki; w granicach zwykłej jasności, liczonej od stopnia, w którym jest najwygodniej czytać, pisać i pracować aż do stopnia oświetlenia białego papieru światłem słone-

cznem, — równym ułamkom jasności odpowiadają także równe ułamki, przyrostów lub ubytków siły uczuwania, z kąd wynika, że siła uczuć świetlnych jest proporcjonalną do logarytmu jasności (Psychofizyczne prawo Fechner'a). Przy małej jasności przeto, siła uczuwania jest prawie proporcjonalną do natężenia światła, lecz przy wielkiem natężeniu światła, nieznaczne przyrosty lub ubytki jasności nie wywierają żadnego wpływu na uczucie. Zresztą prawo Fechner'a nie służy ani dla zbyt wielkiej jasności, gdyż organ zaczyna wtedy cierpieć, ani dla zbyt małej jasności, bo wtenczas występuje własne światło oka; dla średniego stopnia jasności nie jest ono także bezwzględnie ścisłem. Odnosnie do barw, najjaśniejszem jest wrażenie żółtości a najciemniejszym — fioletu. Lecz i tu jasność nie jest bez wpływu; przy jasnem oświetleniu promienie czerwone i żółte wywierają najsilniejsze wrażenie na oko, przy słabem zaś oświetleniu — promienie błękitne i fioletowe.

Malowidła i rysunki, przedstawiające liczne stopniowania cieniów i światła, są równie wyraźne przy słabem świetle świecy jak przy jasnem świetle dnia. Patrząc na chmury przez szkła okopcone widzimy tyleż stopniowań światła, cę patrząc gołem okiem. Na dobrych stereoskopowych fotografiach, widzimy jednak delikatniejsze stopniowania, niż przy świetle dnia albo lamp. Najmniejszy dostrzegalny ułamek jasności wynosi  $\frac{1}{60}$ , do  $\frac{1}{130}$ ; gdy różnica jest mniejsza, to znika dla nas. Cień rzucany przez światło księżycza znika przy jasnem świetle lampy, a cienie tego drugiego światła nikną przy świetle słonecznem. Obrazy tafli szklanej pierzchają przed jasnem światłem dnia, gwiazdy są niewidzialne w dzień i t. d., naodwrot w nocy przedmioty jasne wydają się o wiele jaśniejszemi w stosunku do ich otoczenia, niż w dzień; malarze uwzględniają to w krajobrazach o świetle księżycowem. Według Dobrowolskiego (1872) najmniejszy, dostrzegalny ułamek jasności zmienia się z barwą; dla czerwoności jest on największy ( $\frac{1}{30}$ ), dla błękitu najmniejszy ( $\frac{1}{200}$ ). Zgadza się to z faktami, że kolor niebieski, w półciemny jest jeszcze jasny, gdy tymczasem czerwonego już nie widać, że boczne części retyny są czerwono-nieczułe, że czerwono-nieczułość najczęściej się trafia, że niekiedy katarakta czarna zaczyna się czerwono-nieczułością, i że czas potrzebny do przejścia wrażenia czerwoności, czas pobudzenia, jest trzy razy większy niż dla błękitu.

**Irradyacja** (Kepler 1604) jest zjawiskiem przedstawiającem powierzchnie **345.** jasne większemi od powierzchni ciemnych równej wielkości; skutkiem tego zjawiska, blizkie siebie powierzchnie jasne zlewają się dla oka, a linije proste ciemne przed jasnem światłem wydają się złamanemi. Najwyraźniej występują te zjawiska przy niedokładnej akkomodacyi. Pochodzą one z kąd, że przy niedokładnej akkomodacyi powstają wielkie koła rozproszenia zamiast punktów świetlnych, a nadto z kąd, że przy dokładnej nawet akkomodacyi tworzą się małe koła rozproszenia z powodu chromatycznego i sferycznego zbroczenia oka.

Koła rozproszenia przesuwają brzeg obrazu siatkówki dalej, niż wskazuje wykreślenie geometryczne. Jasny brzeg białej powierzchni zachodzi cokolwiek na brzeg ciemny sąsiedniej powierzchni czarnej; lecz i odwrotność także ma miejsce. Jasność zatem białej powierzchni zostaje już osłabioną przed linią rozgraniczającą, lecz i ciemność czarnej powierzchni zostaje także cokolwiek rozjaśnioną. Każda więc powierzchnia jasna musiałaby przechodzić do ciemnych powierzchni sąsiednich stopniami nieznacznymi, gdyby, według 346, przy wielkiej jasności małe różnice nie stawały się niedostrzegalnymi. Mały ubytek światła brzegu jasnego nie daje się zatem dostrzedz, lecz widać rozszerzenie się tego jasnego brzegu na powierzchnię ciemną i to tem większe, im granica wyższa zwykłej jasności leży bliżej obwodów kół rozproszenia, czyli im powierzchnia biała jest jaśniejsza. Jasność, po drugiej stronie miejsca, w którym osiągnęła swe maximum, przechodzi powoli w ciemność. Brzegi zatarte są najwyraźniejsze przy niedoskonałej akkomodacyi. Następujące doświadczenia należą do zakresu irradycyi: kwadrat biały na czarnym polu wydaje się większym, niż sąsiedni czarny kwadrat na polu białym; takim też wydaje się biały pasek na czarnym tle umieszczony pod równej szerokości czarnym paskiem na białym tle. Cienki drut znika przed płomieniem jasnym; jasne pola szachownicy zlewają się wierzchołkami z sobą. Umieściwszy krawędź linii między okiem a jasnym światłem, krawędź przedstawi przed światłem nacięcie. Kwadraty jasne na ciemnym tle wydają się zwiększonymi na wysokość, ciemne zaś na jasnym tle — w kierunku długości; pochodzi to ztąd, że koła rozproszenia mają wymiar wysokości cokolwiek większy od wymiaru szerokości, bo są właściwie elipsami. Plateau tłumaczy irradycję rozchodzeniem się wrażenia świetlnego na sąsiednie miejsca siatkówki (1838). Z przyczyny irradycyi jasny sierp księżycowy wydaje się tak, jakby należał do większego koła, niż obok niego znajdująca się część ciemna; z tego też powodu, ludzie w ciemnym ubiorze wydają się szczuplejszymi niż w jasnym i. t. d.

**346.** Czas trwania wrażeń świetlnych. Jak mięsień podrażniony uderzeniem elektrycznym, przeszedł przez jego nerw, pozostaje w stanie pobudzenia, w skurczeniu, przez  $\frac{1}{6}$  sek., tak też i wrażenie światła pozostaje jeszcze w oku, chociaż samo światło już zgasło. Czas trwania tej pozostałości jest tem większy, im światło jest silniejsze i im mniej oko jest znużone; pozostałość wpływu świetlnego spowodowana wrażeniem nazywa się poobrazem. Przy silnem świetle poobraz traci na jasności szybciej, niż przy słabem, lecz trwa za to dłużej; trwanie poobrazu słońca może wynosić kilka minut. Barwa wywiera także wpływ na trwanie poobrazu. Jak z 4-ch barw: białej, żółtej, czerwonej i niebieskiej, pierwsza jest widzianą najdalej, a ostatnia najmniej odlegle, tak też pierwsza daje najdłuższe, a ostatnia najkrótsze trwanie poobrazu; przy świetle umiarkowanym te trwania poobrazów (według Kulp'a) wynoszą: 0,1" i 0,09"; 0,08"; 0,066". Skutkiem poobrazu jest to zjawisko, że szybko następujące po sobie wrażenia świetlne wydają się tak samo jak oświetlenie ciągłe. Gdy miejsce siatkówki ulega zmianom światła peryodycznie po sobie następującym, to siła światła równa się średniej arytmety-

cznej pojedynczych natężeń świetlnych. Poobrazy odgrywają główną rolę w krążkach cudownych, bębnach magicznych i bąkach barwnych.

Patrząc przez chwilę na słońce, a następnie zamknąwszy oczy, widzimy jeszcze obraz słońca, blednący powoli i zmieniający barwy. Zamknąwszy oko, po wpatrywaniu się przez czas dłuższy w ciemny rysunek na białym tle, widzimy naprzód słabo toż samo zjawisko, które powoli przybiera odwrotne rozmieszczenie światła i cieniów. Krążek cudowny (1827) jest tabliczką prostokątną, obracalną około pewnej osi; na obu stronach tej tabliczki są narysowane odpowiednie przedmioty, np. klatka i ptak; przy obrocie wydaje się, że ptak znajduje się w klatce. Na tej samej zasadzie polegają krążki stroboskopijne Stampfer'a (1832) i fenakistoskop Plateau (1832) (στροβίλιον, obracam się wkoło, φίνιαξ, kłamec). — Wielki krąg z otworami brzeźnemi i mniejszy z rysunkami przedmiotów w różnych fazach ruchu, obracają się na wspólnej osi; patrząc przez otwory na zwierciadłowy obraz mniejszego krążka, przedmioty zdają się wykonywać ruch. Podobnemi do tego przyrządu są: dädaleum Horner'a i zoetrope (ζωή, życie; τροπή, obrócenie) albo bęben magiczny. Zjawiska świetlne, powtarzające się szybko, sprawiają wrażenie ciągłości. Żarzący się węgiel szybko obracany wkoło, przedstawia pierścień ognisty, błyskawica wydaje się linią, chociaż jest tylko przebiegającą iskrą, szprychy koła znikają przy szybkim pędzie powozu. Każdy przedmiot błyszczący, poruszający się prędko, tworzy linię lub powierzchnię świecąca, w której zaciera się pojedyncze wrażenia. Pojedyncze wrażenie od szybko poruszającego się przedmiotu występuje wtedy, gdy przedmiot zostaje oświetlony na moment tylko, albo wtedy, gdy pojedyncze wrażenia przypadają na odmienne miejsca siatkówki; ptak w locie, toczące się koło, zdają się być w spoczynku podczas oświetlenia błyskawicą. Na tem polega rozbiór optyczny harmonijki chemicznej (253), rozbiór promieni wodnych i t. d.; wogóle poobrazy świetlne mają liczne naukowe zastosowania: krążek falowy Müller'a, figury świetlne Lissajous, kalejdoskop, oznaczenie prędkości el. przez Wheatstone'a, bąk barwny. Rozmieszczeniwszy na powierzchni bąka lub frygi kilka odmienne barwnych wycinków, wrażenia wywołane temi barwami mieszają się w oku, przy szybszym obrocie; dla tego to bąk barwny służy do studyów nad mieszaninami barwnemi. Można także za pomocą bąka barwnego okazać prawo mieszanin natężeń świetlnych: na rozmacie od środka oddalonych pierścieniach umieszcza się w równych lub odmiennych stosunkach kolory: szary, następnie biały i czarny; przy obrocie otrzymuje się jednakowe lub różne odcienia barwy szarej; według tego prawa, krążek barw tęczyowych nie wydaje się doskonale białym. Gdy dwa krążki fenakistoskopu posiadają różne prędkości, wtedy widać figury przekształcone; odwrotnie, figury nieforemnie narysowane mogą się wtedy wydać prawidłowemi; anorthoskop Plateau (1836) (ἀνορθόσιον, przywracam).

**Poobrazy** (Fechner 1838). Pobudzenie siatkówki przez światło trwa **347.** dłużej od wrażenia świetlnego; pobudzenie to zmniejsza czułość podrażnionego miejsca siatkówki i sprowadza pewien stan, zwany znużeniem; w przestrzeni zajmowanej przez obraz siatkówki, miejsca które uległy wpływowi światła silniejszego są więcej znużone od miejsc ciemnych; gdy zatem nowe wrażenie świetlne trafi na tę przestrzeń, to pierwsze jej miejsca odczują to wra-

zenie mniej żywo, niż ostatnie; pierwsze miejsca będą ciemniejsze, drugie — jaśniejsze. Skoro więc po pierwszym wrażeniu świetlnem powstaje poobraz zgodny z przedmiotem pod względem rozmieszczenia jasności i ciemności, to po drugim wrażeniu świetlnem musi występować nowy poobraz, w którym jasność i ciemność są rozmieszczone odwrotnie; pierwszy nazywa się dodatnym drugi odjemnym poobrazem. Poobraz dodatny, składający się tylko z białości i czarności a nieulegający nowym wrażeniom świetlnym, znika powoli, przyczem białość przechodzi przez zielonawą niebieskość w indygo, dalej w fiolet lub w kolor różowy i nakoniec rozplywa się w barwie szaro-pomarańczowej; zjawisko to nazywa się oddźwiękiem barwnym poobrazów. Przedmioty barwne przedstawiają w poobrazach dodatnych te same barwy, w poobrazach odjemnych — barwy dopełniające.

Przystępując do studyów (bardzo szkodliwych dla oczu) nad poobrazami, zamyka się wprzód oczy na pewien czas, w celu zniszczenia wszystkich resztek obrazów poprzednich. Dla otrzymania poobrazu dodatniego patrzy się przez  $\frac{1}{3}$  sekundy na jasną powierzchnię okna, albo na jaką rycinę w ramach czarnych, a następnie znów się oczy zamyka; widać wtedy przedmiot z tem samym rozmieszczeniem światła, w szczegółach dokładniej nawet, niż przy bezpośrednim prześwietleniu. Chcąc otrzymać poobraz odjemny, patrzy się na okno dłużej, przy umiarkowanym oświetleniu, od 5 do 10 sek.; poobraz dodatny jest wtedy bardzo słaby i znika wkrótce, odjemny zaś jest wyraźny i trwa często do 10 minut. Oba obrazy uciekają przed punktem wpatrywania się, lecz pozostają przy obserwowaniu przedmiotu. Poobraz odjemny jest widzialnym wtedy tylko, gdy nowe światło działa na siatkówkę; często wystarcza w tym celu światło, wnikające przez zamknięte powieki lub też własne światło oka; gdy to nie wystarcza, wtedy należy zwrócić otwarte oko na umiarkowanie jasną ścianę, lub wpuścić cokolwiek światła przez lekkie mruganie. W ostatnim razie zachodzi niekiedy kolejne pojawianie się poobrazów dodatnego i odjemnego, dla tego, że każde podrażnienie znużonych nerwów, jakkolwiek słabsze, trwa jednak dłużej, że zatem podrażnienie bezpośrednio zachodzi znów po zniknięciu poobrazu odjemnego. O tem, że działanie świetlne jest słabiej odczuwanem przez podrażnione już miejsca siatkówki, przekonywa następujące doświadczenie: Patrzmy na czarny kawałek papieru, leżący na szarem tle, a następnie usuńmy ten kawałek; zobaczymy wtedy poobraz jasnoszary na ciemno-szarem tle; miejsce siatkówki, na którym znajdował się czarny obraz, nie jest znużone, widzi zatem szarość jaśniej, niż ją widzieć mogą miejsca wokół leżące już dawniej szarością opanowane; tu leży powód, dla którego poobraz dodatny wymaga krótszego wpatrywania się. Można to samo zauważyć i na przedmiotach barwnych. Kładzie się barwny kawałek papieru na tło szare, patrzy się na niego przez chwilę, a następnie odrzuca; widać wtenczas na tem samym miejscu poobraz dodatny, na który rozlewa się wkrótce światło różowo-czerwone, dalej następują tonacje żółtawo-szare, w których poobraz dodatny przechodzi często w bardzo słaby poobraz odjemny. Przez dłuższe wpatrywanie się otrzymujemy poobrazy odjemne, dopełniające, o barwach: czerwono — nie-

biesko-zielonej, żółto-niebieskiej i t. d.; pochodzi to ztąd, że włókna nerwowe czerwone (według Young'a) zostają, przy dłuższem wpatrywaniu się, mocno znuzone przez czerwoność, zielone i fioletowe zaś — bardzo mało; przy zwróceniu więc następnie oka na światło białe, włókna czerwone ulegną, na odpowiadającym miejscu siatkówki, żadnemu lub bardzo małemu podrażnieniu, zielone zaś i fioletowe — silnemu, wskutek czego utworzy się wrażenie niebiesko-zielone.— Zielone okulary wydają poobrazy czerwone, róża zielona z łodygą czerwoną przedstawia naturalne ubarwienie w poobrazie. Przedmiot zielony na żółtem tle daje poobraz czerwono-żółty, na tle niebieskiem — fioletowy; najrozmaitsze tego rodzaju zjawiska wyjaśniają się łatwo według teorii Young'a. Czarny kwadrat na tle barwnem daje poobraz jaśniejszy, więcej nasycony, niż samo tło, dla tego, że czarne miejsce siatkówki nie jest znuzone dla barwy, gdy tymczasem pozostała część siatkówki odczuwa barwy słabiej. Z tej przyczyny każda barwa traci swe nasycenie przy dłuższem na nią patrzeniu, wydaje się nawet szarawą, gdyż skutkiem znuzenia jednego włókna nerwowego, słabe działanie przechodzi na dwa inne włókna; odczucia tych ostatnich włókien łącznie z odczuciem włókna pierwszego wydają szarość. Gdy kwadrat barwny jest koloru dopełniającego względem koloru tła, to w poobrazie tło przedstawia się więcej nasyconem, nawet wtedy gdy jest jednorodnem; bo gdy np. kwadrat jest niebiesko-zielony, to nuży włókna zielone i fioletowe; te więc nie ulegną już podrażnieniu tła czerwonego, w poobrazie przeto utworzy się czerwoność czystsza od widmowej, gdyż ta ostatnia podrażnia współcześnie, chociaż słabo, nieznużone włókna zielone i fioletowe. Oddźwięk barwny poobrazów polega na tem, że pobudzenia trzech włókien barw zasadniczych maleją odmiennie, czerwoność z początku bardzo silnie, a następnie bardzo słabo, fiolet początkowo silnie, dalej słabiej, zieloność prawie jednostajnie; dla tego też zapanowyywa wkrótce zielono-błękit, z którego później zieloność znika, ustępując miejsca powstającym fioletowi i czerwoności, łączącym się w barwę różową. Własne światło oka przyczynia się później do wytworzenia barwy szarawo-pomarańczowej, albo też powstaje przy howo wnikającym świetle, z powodu różnorodności znuzień, cały szereg faz poobrazu odjemnego, które można widzieć najwyraźniej po wpatrywaniu się w słońce. Poobrazy przedmiotów barwnych odbrzmiwiają w takiż sposób, równie jak i błyszczące krążki rotacyjne o wycinkach czarnych i białych, zkad wypada, że przy kolejnych pobudzeniach przez światłość i ciemność, największa jasność trzech różnych barw zasadniczych ma miejsce nie współcześnie, lecz dla czerwoności i zieloności wcześniej, niż dla fioletu. Na tem polegają „serca wietrzne;“ przy przesuwaniu tam i napowrót niebieskiego krążka papieru, serca czerwone wachają się na papierze.

**Kontrast** (Brücke 1850). Przez kontrast rozumie się wzajemne na siebie oddziaływanie, obok siebie umieszczonych barw i jasności. Chevreul oznacza zjawiska tu należące nazwą kontrastu współczesnego i odróżnia odeń kontrast następnny (successif), działanie dwóch barw na siebie, które jedna po drugiej, pojawiają się na tem samym miejscu siatkówki. Barwę wywołaną przez kontrast nazywa Brücke barwą indukcyjną (inducirte), a barwę będącą przyczyną indukcyjnej, indukującą. Zjawiska kontrastu następnego, równie jak jak poobrazy odjemne dopełniające, są skutkami znuzenia. 348.

Oko nuży się patrzeniem na barwę indukującą i gdy następnie zwróci się na pole „oddziaływające,” to nie może zeń przejmować dokładnie tej barwy; gdy pole jest tak samo barwne, to barwa „wypadkowa” jest biaława; gdy pole jest dopełniającem, więcej nasyconem, gdy jest zmieszaniem, to mieszanina wypadkowa nie zawiera już barwy indukcyjnej lub zawiera bardzo słabą. Kontrast następny zachodzi najczęściej w tych razach, które są zaliczane pospolicie do kontrastu współczesnego; przy zwykłym bowiem widzeniu, spojrzenie nie jest zwrócone stale na jeden punkt, lecz zmienia ustawicznie kierunek i sprowadza obraz na coraz nowe, nieznuzone miejsca siatkówki.

Umieściwszy na arkuszu papieru czerwonego, koło białe, szare lub czarne, wyda się ono niebiesko-zielonem dla tego, że siatkówka, znudzona „wędrówką spojrzenia,” staje się nieczułą na czerwoność, może więc odczuwać tylko dwie drugie części składowe białości; koło czarne nie jest mniej wolne od światła białego i właśnie to białe światło wydaje się niebiesko-zielonem. Czarność i szarość, na tle żółtem, zdają się być nawet czystsze w dopełniającym błękitcie, gdyż na tle czysto białem przybywa do błękitu zbyt wiele światła dziennego, czerwonego według Aubert'a, wskutek czego występuje koło białe w kontraście fioletowym; podobnie szarość i czarność wydają się na tle niebieskiem więcej żółtymi, gdy tymczasem białość zbliża się bardziej do barwy pomarańczowej. Jeżeli pole indukujące jest duże i mocno oświetlone, a „oddziaływające”—małe, to nawet żywa jego barwa może przejść w dopełniającą; kawałek minijowo-czerwonego papieru, umieszczony na krążku szklanym, czerwonym, trzymanym naprzeciw światła, może się wydać niebiesko zielonym. Działanie kontrastu ma miejsce i wtedy, gdy oba pola są równej wielkości, lecz jest wzajemne. Dwa paski żółty i czerwony, leżące przy sobie lecz w pewnej odległości od takich samych pasków, zostają tak zmienione, że żółty wydaje się zielonawym, a czerwony—purpurowym, gdy tymczasem paski odleglejsze nie zmieniają swych barw. Pochodzi to stąd, że spojrzenie zwracające się ku tym drugim paskom miało już czas wypocząć. Przy polach szerszych, działanie kontrastu rozciąga się tylko do brzegów rozgraniczających. Umiarkowana jasność wydaje się jaśniejszą obok ciemności, ciemniejszą zaś obok silnej jasności; przy zwracaniu się bowiem spojrzenia na umiarkowaną jasność, trafiają na nią w pierwszym razie mniej znuzone, a w drugim razie więcej znuzone miejsca siatkówki. Barwa, nałożona na inną barwę, zmienia się; model minijowy wydaje się żółtym na purpurze, na zieleności—czerwienią.

349.

Kontrast czysto współczesny, przedstawiający w całości zjawiska podobne do zjawisk kontrastu nastęпно-współczesnego, nie jest według Helmholtz'a zmianą uczuwania, lecz sądzenia. Każde wrażenie silne jest przez nas słusznie ocenianem w pierwszej tylko chwili; wrażenie to maleje dla nas wkrótce do obojętności i gdy później następuje istotnie wrażenie obojętności, to wywiera ono na nas wpływ wprost przeciwny. Linije równoległe, przecięte linijami rozbieżnymi, zdają się zbiegać. Gdy powóz, unoszący nas szybko, na raz się zatrzyma, to zdaje się, że przedmioty, które przedtem oddalały



się od nas, biegną ku nam. Podobnie i barwa, w którą się stale wpatrujemy, wydaje się powoli coraz bielszą, a istotna białość — dopełniająca. Złudzenia w ocenianiu małych różnic są łatwo możliwe, dla tego też kontrast współczesny występuje wyraźniej przy małych różnicach. Dla różnic zbyt wielkich, pewna barwa może się rozproszyć przez cieczę oka tak, że przechodzi na małe pole oddziaływające; toż samo zachodzi także i przy niewielkich różnicach, gdy wpatrywanie się trwa zbyt długo, gdyż wtenczas gasną wszystkie różnice.

Cienie barwne są najciekawszymi z należących tu zjawisk; z dwóch cieniów, które rzuca na białą tablicę sztyft oświetlony światłem dziennem i światłem świecy, cień pierwszy wydaje się czerwono-żółtym, drugi — niebieskim, a tło — białym. Następujące doświadczenie przekonywa, że ta niebieskość jest tylko wynikiem sądu. Patrzy się przez rurkę czarną na miejsce, które w części należy do tła, a w części do cienia rzucanego przez świecę; druga część wydaje się wtedy niebieską; zwraca się następnie rurkę tak, aby widać było tylko cień od świecy, wtenczas całe pole widzenia przedstawia się niebiesko, i pozostaje takim nawet, gdy świeca zgaśnie; niebieskość zniknie dopiero wtedy, gdy odejmiemy rurkę od oka. Przy zabarwieniu jednego lub obu światła szklami kolorowemi, doświadczenia te przedstawiają jeszcze większe zajęcia. Zawsze tło staje się zaraz białem a jeden cień dopełniającym względem drugiego. Patrząc przez szkło barwne, wszystko jasne wydaje się w naszym pojęciu białem, gdy szkło nie jest jednorodne; pochodzi to stąd, że włókno Young'a odpowiadające barwie głównej, nuży się wkrótce i swe słabe podrażnienie łączy z podrażnieniami dwóch drugich włókien, na białość; przeciwnie, szkło jednorodne, np. czerwone, wszystko jasne przedstawia czerwonym, do czego przyłącza się jeszcze własne światło siatkówki, skutkiem bowiem tego światła wszystko ciemne wydaje się zielono. Papier biały przy świetle żółto-czerwonym świecy wydaje nam się białym, a obserwowany przez rurkę ciemną — żółto-czerwonym. Każda więc powierzchnia barwna staje się dla nas powoli białawą, a każde małe na niej pole, zawierające poniekąd białość, — dopełniającem. Położywszy mały kawałek szarego papieru na wielkim arkuszu barwnym, kawałek ten wyda się nam wkrótce dopełniającym; na ćwiartce arkusza nie udaje się to doświadczenie, chyba że ćwiartkę tę razem ze wspomnianym kawałkiem nakryjemy białym, przeświecającym arkusikiem papieru listowego. Kawałek umieszczony na papierze listowym nie ma barwy dopełniającej; nawet dolny kawałek traci swą dopełniającą barwę kontrastową, gdy go obserwujemy porównawczo z górnym, albo gdy kontur jego obwiedziemy kreskami. Doświadczenie to przekonywa wyraźnie o wpływie małych różnic, lecz okazuje zarazem, że różnice te leżą w barwach. Oba te wyniki otrzymać można także z następującego doświadczenia: fryga barwna zawiera 4 wązkie wycinki czerwone, które w środku są przerwane polem czarno-białym; przy obrocie, krążek wydaje się słabo czerwonym i przedstawia pierścień niebiesko-zielony na miejscu pól; pierścień ten jednak traci swą barwę, gdy zostanie obwiedzony linijami, lub gdy wycinki czerwone są zbyt wielkie. Według Burckhardt'a (1865), kontrast współczesny zachodzi nie tylko przy widzeniu bezpośrednim, lecz także i w poobrazie; w drugim razie nawet jest silniejszy niż w pierwszym; kontrast ten występuje

w poobrazie z większą oznaczonością wtedy, gdy go brak zupełnie w obrazie bezpośrednim, albo gdy jest w nim osłabiony. Obserwując np. kwadrat biały, na tle czerwonym, widzimy w poobrazie kwadrat czerwony na tle niebiesko-zielonym. — Patrzymy na krążek o dwóch wycinkach barwnych, wtenczas gdy jest jeszcze w spoczynku, a następnie wprawmy go w szybki obrót; przy trwałem wpatrywaniu się ujrzymy poobraz przedstawiający odwrotne ubarwienie wycinków. Tak barwy poobrazów, jak i barwy kontrastowe, noszą wspólną nazwę barw subiektywnych.

**350. Mechanizm postrzeżeń wzrokowych.** Każde wrażenie otrzymane na siatkówce przez otwarte oko, przypisujemy, nauczeni tysiącem doświadczeń, zewnętrznemu działaniu światła, i odnosimy te wrażenia siatkówki na zewnątrz; ponieważ odczucia współczesne sąsiadują z sobą, przeto i te zewnętrzne odrzucenia tworzą powierzchnią sąsiedniość, która przy patrzeniu jednym okiem przedstawia kształt prawie powierzchni kuli, tak jak sama siatkówka. Powierzchnia kuli odtwarzająca się na siatkówce jednego oka, przy spokojnem, prostem patrzeniu, nazywa się polem patrzenia; należy odróżnić to jednooczowe pole patrzenia od jednooczowego pola spojrzenia i od jednooczowego pola widzenia. Jednooczowe pole widzenia zajmuje całą przestrzeń, która może być widzianą przy pomocy ruchów oka, a jednooczowe pole spojrzenia zawiera tę przestrzeń, której wszystkie punkta mogą być zaobserwowane przez poruszone oko. Oko wypełniając dokładnie jamę oczną i zależąc od mięśni i nerwu wzrokowego, może tylko bardzo nieznacznie wysuwać się lub wsuwać w jamę oczną; zatem ruchy oka mogą się odbywać tylko przez obrót. Obroty odbywają się około punktu, leżącego za rogówką, w odległości  $13,6^m m$ .

Obroty schodzą w górę i nadół, zatem około osi poziomej; mierzą się one kątem wyniesienia; dalej od prawej ku lewej, przeto około osi pionowej; te obroty mierzą się kątem zwrócenia bocznego. Obroty wzmiankowane nazywają się obrotami kołowemi, dla tego, że tęczęwka obraca się, przy dokonywaniu ich, jak koło. Obrót kołowy nie ma miejsca, gdy zachodzi tylko pierwszy, albo tylko drugi rodzaj ruchu; następuje on jedynie przy współczesności obu obrotów. — Obrót kołowy zatem jest funkcją wyniesienia i zwrócenia bocznego (Donders 1846). Prawo obrotu kołowego (Listing 1857) wykazuje rodzaj tej funkcji: obrót kołowy sięga tak daleko, jak gdyby jabłko oczne obróconem zostało około osi stałej, prostopadłej do pierwszego i drugiego kierunku linii wpatrywania się (linji spojrzenia); ztąd wypada wzór, pozwalający obliczyć wielkość kołowego obrotu z kąta wyniesienia i z kąta zwrócenia bocznego; gdy oba wynoszą po  $5^0$ , to obrót kołowy wynosi tylko  $13'$ ; przy wielkości tych kątów równej  $40^0$ , wspomniany obrót równa się  $15^0$ ; rośnie on z temi kątami. Zależność ta jest skutkiem instynktowego usiłowania dążącego do umożliwienia najłatwiejszych orjentowań się; można ją wywieść matematycznie z tej zasady i stwierdzić obserwacyami poobrazów (Helmholtz 1863). Stanowisko oka, bez obrotu, nazywa się pierwotnem; stanowisko po jednym obrocie około pierwszej lub drugiej osi — drugorzę-

dnem, a po obrocie około osi dowolnej, z 3-ch kierunków złożonej—stanowiskiem trzeciorzędnym.

### Porządkowanie i wymierzanie w jednooczowym polu widzenia (Wundt 351.

1862). Według prawa właściwych energij zmysłów, każde podrażnienie siatkówki wywołuje wrażenie świetlne; dla tego też, nawet przy zamkniętych oczach, wewnętrzne życie oka wywiera pewien wpływ świetlny na wszystkie części siatkówki, wpływ, który pojmujemy jako ciemne, kuliste pole widzenia. Ciemni od urodzenia, operowani później pomyślnie, mają z początku ogólne wyobrażenie o świetle, następnie rozróżniają jasności, a później dopiero—przedmioty, wymiary i kierunki. Nasze przeświadczenie wzrokowe składa się także z niezmiernej liczby doświadczeń najpierwszych chwil wieku dziecięcego; tak nabytymi uzdolnieniami posługujemy się później w życiu codziennym nieświadomie, podobnie jak malarz używający również nieświadomie w dojrzałym już wieku, a więc przy zupełnej samowiedzy, swych wyższych zdolności wpatrywania się, nabytych studjami. Według praw załamania, obraz punktu świetlnego zewnętrznego powstaje na siatkówce tam, gdzie promień, poprowadzony z tego punktu przez węzeł, spotyka siatkówkę; doświadczyliśmy tego tysiące razy, odnosimy więc później bezwiednie każdy przedmiot na takie miejsce ciemnego pola widzenia, w którym pole to spotyka się z linią prostą idącą od obrazu na siatkówce, przez węzeł; ztąd wypada taki bardzo prosty wniosek, że wysoko położone obrazy siatkówki wydają się nam przedmiotami zewnętrznymi, nisko umieszczonymi i odwrotnie; dla tego też odwrócone obrazy siatkówki wytwarzają w nas pojęcie o przedmiotach w położeniu prostem. Takim to sposobem przez doświadczenie, dochodzi się do świadomości o uporządkowaniu przedmiotów. Lecz jakim sposobem odbywa się odczuwanie na różnych miejscach siatkówki, czy wskutek sąsiedniości rozmaitych elementów siatkówki, uczuwamy je także jako sąsiednie, albo czy odmienne rozmieszczenie sztabek i czopków w różnych miejscach siatkówki powoduje odmienne odczuwanie tych miejsc i daje nam przez to świadomość o rozległości pola widzenia, lub wreszcie, czy rozmaite natężania mięśni, potrzebne do sprowadzania miejsca żółtego na rozmaite miejsca pola widzenia, wywołują w nas pojęcie o odmienności miejsc siatkówki, to — nie jest jeszcze dokładnie zbadane. W każdym razie, uczucie napięć mięśniowych gra ważną rolę przy wymierzaniach w polu spojrzenia. O odległości między dwoma punktami świetlnymi sądzimy z uczucia pracy mięśniowej, potrzebnej na to, aby obraz jednego punktu na dołku siatkówki, zastąpić obrazem drugiego punktu na tem samym miejscu; przebiegamy wtedy spojrzeniem odległość rozdzielającą oba punkta; lecz i wtedy nawet, gdy tego nie czynimy, gdy jeden punkt odtworzony, pozostaje stale

na dołku siatkówki, a drugi na innym jej miejscu, to także mamy z doświadczenia, uczucie pracy mięśniowej, któraby była potrzebną do przebieżenia tej odległości spojrzeniem, to jest posiadamy, niedokładną wprawdzie, miarę odległości. Tak to doświadczenia składają się na świadomość o wielkości przedmiotów.

Przy widzeniu pośredniem miara oka jest bardzo niedokładną; tylko takie kąty i linije są uznawane za równe, które są do siebie równoległe, które zatem ruchem oka mogą być naprowadzane szybko na swe poobrazy. I przy bezpośredniem widzeniu, t. j. przy przebieganiu wpatrującem się spojrzeniem, pokrywaniem pewnej linii poobrazem innej, równej pierwszej i od niej równoległej, wzmacnia dokładność miary oka; zdarzyć się jednak może chyba przypadkowo, aby dwie odległości albo dwie linije były bezwzględnie sobie równe; błędy wyniosły przecięciowo, u Fehner'a  $\frac{1}{60}$ , a u Folkmanna  $\frac{1}{80}$  —  $\frac{1}{100}$  i to przy najrozmaitszych długościach, czem właśnie stwierdza się prawo psychofizyczne. Porównywanie linij pionowych daje wypadki mniej dokładne, niż linij poziomych, a jeszcze mniej dokładnem jest porównywanie linij różnokierunkowych, gdyż tu pokrycie poobrazu jest niemożliwe, a praca mięśniowa jest odmienna w różnych kierunkach. Szczególniej uderzającą jest wielka różnica między linijami pionowymi a poziomymi; pionowe wydają się o  $\frac{1}{5}$  —  $\frac{1}{30}$  wyższymi od poziomych równej długości, kwadrat przedstawia wymiar wysokości większy od szerokości. — Przy ocenianiu krzywizn zachodzą także złudzenia: linije proste, poziome i pionowe, wydają się nam prostymi tylko w pierwotnem położeniu oka, t. j. w tem położeniu, w którym ani wyniesienie, ani zwrócenie nie sprawia obrotu kołowego; w każdym innym położeniu, pierwsze, podwyższone lub niższe, — drugie, zwrócone na stronę, wydają się nam wklęsłemi ku położeniu średniemu. Objasnić to można, uwzględniając, że oko podczas przebiegania jednej z takich linij, musi wykonywać obrót kołowy. Zjawisko powyższe zachodzi także przy widzeniu pośredniem. Narysowawszy linije wypukłe względem linij środkowej, posiadające krzywizny równe poprzedniej wklęsłości, linije te, przy wpatrywaniu się w liniję środkową, wydadzą się prostymi. Takie tylko linije, które przechodzą przez punkt spojrzenia oka, w położeniu pierwotnem, przez tak zwany główny punkt spojrzenia, które zatem przypadają na południk oka, przedstawiają się, w małych długościach, jako proste; są one więc linijami kierunkowemi oka, gdyż podczas przebiegu spojrzenia, wyglądają prosto i, według prawa obrotów, Listing'a, są przesuwalne same w sobie.

352.

Podobne *złudzenia optyczne* polegają na prawie odnoszajem się do wszelkich przeświadczeń, tem mianowicie, że różnice wyraźnie oceniane wydają się większemi od różnic, równych pierwszym co do obiektywnej wielkości, lecz nie rozpoznawanych wyraźnie. Przestrzeń rozdzielona kreskami przedstawia się większą od przestrzeni niezakreskowanej, rozciągającej się w tym samym kierunku i równej pierwszej co do długości; kwadrat podzielony na części linijami równoległemi do podstawy, zdaje się być wyższym, a poprzecinany linijami prostopadłemi do podstawy — szerszym. Kąty proste podzielone i niepodzielone, umieszczone obok siebie, wydają się nierównymi, pierwsze — rozwartemi, drugie — ostremi; pokój próżny zdaje się być mniejszym, niż umebłowany, suknie damskie o paskach poprzecznych czynią kibić wysmuklejszą; wykonany według

miary oka rysunek, przedstawiający nieregularny brzeg morski, przedstawia linije poziome w odpowiednim stosunku, lecz pionowe—dwa razy większemi. Narysujmy liniję pochyłą i przetnijmy ją paskiem nieprzezroczystym; część tej linji po jednej stronie paska leżąca, nie wyda się przedłużeniem części, będącej po drugiej stronie paska; będzie się zdawać, że pierwsza część jest przedłużeniem linji równoległej do drugiej części. Linije równoległe opatrzone na zewnątrz kreskami, rozbiegającemi się ze środka, zdają się zbiegać, w przeciwnym razie—rozbiegać (Hering). Paski pionowe, przecięte krótkimi, ukośnemi kreskami, odchylają się od prostopadłej w strony przeciwne kierunkom rozchodzenia się kressek. Z dwóch wycinkowych, kongruentnych kawałków pierścienia papierowego, ten kawałek wydaje się zawsze większym, który większym łukiem dotyka łuku mniejszego, drugiego kawałka. Zapełnianie miejsca ciemnego siatkówki jest podobnym złudzeniem optycznym, spowodowanym przez nasz sąd. Gdyby oko było zawsze w ruchu, możnaby przypisywać to nagradzanie braku wrażenia innym miejscom siatkówki; ponieważ jednak brak ten zostaje wypełnionym podczas wpatrywania się, np. w naszą figurę 156, przedstawiającą tło czarne, więc przyjąć trzeba, że, bez względu na widzenie dwuoczowe, nasz sąd dokonywa sam prawdopodobnie tego wypełnienia; uczuwanie ciemności przez wzmiankowane miejsce jest niemożliwym, gdyż miejsce to nie posiada wcale zdolności odczuwania świetlnych.

Postrzeganie ruchu daje także powód do złudzeń optycznych. Nabieramy przeświadczenia o ruchu przez to, że obraz na siatkówce zmienia swe położenie względem innych obrazów; temu warunkowi staje się zadosyć i wtedy, gdy siatkówka z pewną liczbą obrazów porusza się, gdy tymczasem inne obrazy zachowują swe położenia; dla tego też widziny poruszającemi się przedmioty będące w spoczynku, gdy sami poruszamy się bezwiednie, albo też sądzimy, że jesteśmy w ruchu, skoro przedmiot naszej obserwacji porusza się i gdy sami jesteśmy rzeczywiście w spoczynku. Gdy poruszamy się sami, to obrazy przedmiotów bliższych przesuwać się szybko po siatkówce, przedmiotów odleglejszych — wolniej; uważamy więc ostatnie często za spoczywające, a nawet za wykonywające ruch przeciwny. Przy obserwowaniu szybko poruszających się przedmiotów, cały układ mięśniowy oka przyzwyczaja się do tego ruchu i przenosi go na przedmioty w spoczynku, gdy spojrzenie skieruje się zaraz na takowe; przedmioty te zdają się wykonywać wtedy ruch w kierunku przeciwnym. Tem objaśnia się zawrót w oczach; doświadczający takowego stara się instynktowo przystosować swe położenie do przedmiotów napozór dla niego ruchomych i skutkiem tego traci równowagę. Płynącemu pierwszy raz okrętem wydaje się, że lampa Cardan'a wykonywa kołysania, po pewnym dopiero nawyknięciu do orjentowania się według ciężkości, na-



Fig. 159.

biera przekonania, że lampa jest w spoczynku i że kajuta kołysze się. Gdy jedno oko zmienia swój kierunek lub obrót kołowy, to i drugie oko wykonywa toż samo, chociaż pierwsze jest zamknięte; patrząc w nieskończoność, zamknijmy jedno oko, a drugim obserwujmy przedmiot, będący na pierwotnym kierunku drugiego oka; przedmiot wyda się nam wtedy usuniętym na stronę, dla tego, że oko zamknięte przyjmuje udział w obserwacji i zmienia skutkiem tego swój kierunek, do czego znowu przystosowuje się oko otwarte. Hering (1861) wniósł zdąd, że punkta obrazu na siatkówce odrzucamy na zewnątrz tak, jakby ten obraz znajdował się w oku cyklopa, umieszczonem w osadzie nosa.

**353.** **Odległość przedmiotów od oka (Wheatstone 1833).** Przeświadczamy się o odległości przedmiotów od nas 1) uczuciem natężenia potrzebnego do akkomodacji, 2) obserwacjami przy ruchach głowy i ciała i 3) jednoczesnem użyciem obu oczów.

Oprócz tych środków pomocniczych, umożliwiających przeświadczanie się o wymiarach głębokości, są jeszcze inne, ułatwiające ich pojęcie; do tych należy kąt widzenia czyli wielkość, którą przedstawiają nam ciała znane, jak ludzie, zwierzęta swojskie, drzewa, domy; im mniejsze się one wydają, tem dalej są od nas. Ma z tem związek zjawisko, że przedmioty, których odległość jest znana, wydają się nam większe, gdy przedstawiają kontury niewyraźne, zatarte np. skutkiem mgły. U dzieci, związek między odległością a wielkością nie jest jeszcze wyrobiony; poczytują one ludzi oddalonych za lalki, szczególnie przy patrzeniu w górę i nadół, gdy dorosłym patrzącym w tych kierunkach, przedmioty zdają się być mniejsze, niż przy zwykłym widzeniu poziomem. Inny sposób pojmowania odległości polega na tem, że ciała znanego kształtu, zasłonięte innymi, wydają się i są koniecznie za temi ciałami; widok perspektywiczny ciał, szczególnie prostych i ostro ograniczonych, uzdalnia nas do pojmowania wymiarów ich wgłębień; gdy dzieci patrzą na rysunki perspektywiczne sześciątów, ostrokątów, piramid, jako na płaskie formy linijne, bez znaczenia, to nam wtedy przychodzi z trudnością pozbyć się wyobrażenia o ciecie. Często jednak takie rysunki powodują podwójne złudzenie; mogą one przedstawiać tak dobrze przedmiot wklęsły jak wypukły. Cienie rzucone i własne, a szczególnie perspektywa powietrza, dostarczają także sposobu oceniania wymiarów wgłębień; przedmiot wydaje się nam odleglejszym, gdy kontury jego są zatarte przez zamglony ośrodek powietrzny, gdy barwa jego przedstawia się niby owionięta odcieniem błękitnawym; w górach, gdzie powietrze czystsze, znaczne odległości są oceniane jako mniejsze. Niebo wydaje się nam płaskim sklepieniem, raz dla tego, że między nami a widnokregiem znajdują się liczne przedmioty i powietrze zamglone, wskutek czego oddalenie widnokregu przedstawia się większem od oddalenia zenitu, powtóre dla tego, że widocznie płaską formę nieba obłoków przenosimy na niebo niezamglone. Słońce i księżyc przeto wydają się na widnokregu odleglejszemi, a zatem większemi, niż na pewnej wysokości.

Ocena odległości przedmiotu, za pomocą natężenia przy akkomodacji, jest bardzo niedokładna; według Wundt'a można w ten sposób zaobserwować dobrze zbliżanie się przedmiotu; trudniej już oceniać jego oddalenie się a wskazanie odległości jest rzeczą wcale niemożliwą. Najdokładniejszym

sposobem przeświadczenia się o odległości jest porównywanie dwóch obrazów perspektywicznych przedmiotu, z dwóch różnych stanowisk; przy jednoczowym widzeniu wykonywa się to za pomocą ruchów głowy i ciała, przy dwuczowym zaś, ruchy te nie są niezbędne, gdyż każde oko przedstawia inny widok perspektywiczny przedmiotu, inne pole spojrzenia i patrzenia. W pierwszym razie obraz drugi porównywany jest w pamięci z pierwszym obrazem; w drugim razie porównywa się dwa obrazy widziane wspólnie; ocenianie zatem stosunków wgłębień i odległości równie jak odróżnianie brył od płaszczyzn przychodzi jednookim trudniej, niż widzącym na oba oczy. Im przedmioty są więcej oddalone, tem 2 obrazy na siatkówce są podobniejsze do siebie; to znów daje nam możność sądzenia o bezwzględnej odległości przedmiotów, lecz czyni mniej możliwym pojmowanie wymiarów wgłębień; przedmioty bardzo oddalone wydają się nam powierzchniowymi.

Przechodząc około przedmiotów, mamy naturalnie skutkiem ruchu bezpośrednie przeświadczenie o odległości ich od punktu naszego wyjścia i o wymiarach ich wgłębień. Gdy zmieniamy swe położenie względem ciał blizkich, to przez łączenie własnego ruchu z dostrzeganą zmianą obrazu ciała otrzymujemy również pojęcie o odległości; podobny sąd wydajemy, gdy poruszamy tylko głową, lub gdy porównujemy 2 obrazy na siatkówce. Każdy obraz siatkówki wywołuje w nas uczucie kierunku, na którym się znajduje pewien punkt, dwa więc obrazy siatkówki działają tak, że punkt przedstawia się nam na wspólnym przecięciu dwóch różnych kierunków, w których oba oczy widzą ten punkt. I tu także błędy są łatwo możliwe; ścisła ocena odległości należy do najtrudniejszych czynności oka i rzadko dokonywa się bez błędów; odczuwanie grające tu rolę sprawdza się do oceny stopnia zbieżności linii spojrzeń zwracanych na przedmiot.



Fig. 160.

**Stereoskop** (Wheatstone 1833, Brewster 1843). Najpewniejszego dowodu na to, że ocena odległości i wymiarów wgłębień, że widzenie bryłowatości, zachodzi wskutek łączenia obu obrazów siatkówki, dostarcza stereoskop. Składa się on, w swej najprostszej formie, z dwóch obrazów pewnego przedmiotu, narysowanego tak, jak go widać dwoma oczami; fig. 160 przedstawia widoki kostki do grania. Zwróćmy wspólnie do każdego oka należący doń obraz, to przedmiot pojawi się nam jako pojedynczy i cielesny, stereoskopowy (*στερεος*, cielesny); przesyłamy bowiem wtedy każdy punkt do przecięcia się linii spojrzeń obu oczów, t. j. tam, gdzie on istotnie znajduje się na przedmiocie. Dwa obrazy podczas doświadczenia powinny znajdować się w odpowiednich położeniach, względem obu oczów, t. j. w takich położeniach, w których obrazy punktu nieskończenie odległego przedstawiają się obu oczom w jednym kierunku. Osiąga się to, umieszczając oba obrazy obok siebie w odległości równej oddaleniu węzłów ocznych, a następnie patrzy się na te obrazy po równoległe skierowanych już liniach widzenia. Ponieważ takie przystosowanie oczu nie jest łatwe, ponieważ nadto każdym okiem

widać 2 obrazy, przeto najprostsze to doświadczenie udaje się dopiero po wielokrotnych usiłowaniach; cokolwiek prędzej osiąga się cel, umieszczając między każdym okiem a odpowiednim obrazem, rurkę zaczerzcioną, albo też ustawiając między nosem i linią oddzielającą rysunki, ściankę ciemną. Można także i bez przyrządu widzieć stereoskopijnie, mianowicie zmieniając obrazy i patrząc prawem okiem na lewy obraz i odwrotnie; przedmiot występuje wtedy stereoskopijnie w punktach skrzyżowań się linii spojrzeń. Wszystkie te trudności znikają w stereoskopie zwierciadłowym Wheatstone'a i w stereoskopie pryzmowym Brewster'a. W pierwszym, 2 zwierciadła są ustawione do siebie pod kątem  $90^{\circ}$ , a do spodu skrzynki pod kątem  $45^{\circ}$ ; na dwóch ścianach bocznych, prostopadłych do spodu, są umieszczone 2 obrazy. Zbliżywszy nos do krawędzi zwierciadeł, widać każdym okiem obraz w odpowiednim zwierciadle. Więcej upowszechniony stereoskop pryzmowy, przedstawia obu oczom pryzmaty półsoczewkowe, zwrócone ku sobie krawędziami łamiącymi (a i b na fig. 161). Po załamaniu, oba obrazy  $u'$  i  $u''$  zostają zbliżone do krawędzi łamiącej i wydają się zjednoczonymi w  $u$ , gdzie też w istocie oczy widzą przedmiot cielesny. Stereoskop ten jest podręczniejszy od stereoskopu Wheatstone'a, pozwala na jednostajniejsze oświetlenie i daje powię-

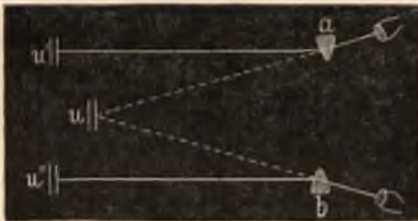


Fig. 161.

kszenia, z powodu formy szkieł; oprócz tego nie wyłącza on użycia fotografii na szkło, skutkiem czego obudza żywe zajęcie w kosmoramaach i t. p. Gdy dwa obrazy są bezwzględnie sobie równe, to w stereoskopie pojawiają się także jako jeden obraz, niecielesny, powierzchniowy. Gdy zaś różnią się od siebie w maleńkich szczegółach, to oczy są zmuszone wykonać pewne ruchy dla zjednoczenia różnych miejsc obrazu, skutkiem czego zmienia się kierunek promieni widzenia, a więc i punkt przecięcia pada raz przed, drugi raz za powierzchnią obrazów; występuje wtedy obraz stereoskopowy. Ma to zastosowanie przy odróżnianiu: prawdziwych pieniędzy papierowych od fałszywych, dwóch wydań tego samego dzieła i t. p. (Dove 1859). Zmieniwszy położenie obrazów stereoskopu, wyniesienia zmieniają się na wgłębienia, hautrelief w basrelief i t. d.; uskutecznia się to za pomocą pseudoskopu Wheatstone'a (1852) (ψευδωσ, łudzę); w przyrządzie tym, promienie jednego przedmiotu zamieniają się wzajem przez odbicie od powierzchni przeciwprostokątnych, dwóch prostokątnych pryzm. Telestereoskop (Helmholtz 1857) służy do widzenia przedmiotów odległych, nie powierzchniowymi, lecz cielesnymi; jest to stereoskop zwierciadłowy, który zamiast obrazów zawiera dwa zwierciadła, zwrócone do widnokregu, a równoległe do zwierciadeł wewnętrznych; wskutek takiego urządzenia tworzą się dwa obrazy widnokregu bardziej od siebie oddalone, które, za pomocą zwierciadeł wewnętrznych, łączą się stereoskopijnie w obu oczach.

355.

**Widzenie dwuoczowe** (Hering 1864, Helmholtz 1864). Widzenie dwoma oczami ma tę wyższość nad widzeniem jednym okiem, że niedokładności jednego oka zostaną poprawione przez drugie oko, że przedmioty nie wydają



się powierzchniowymi lecz cielesnymi, że wreszcie, w pierwszym razie, możliwą jest dokładniejsza ocena wielkości i odległości ciał. Pomimo dwóch obrazów ocznych, widzimy jeden tylko obraz, dla tego, że w ogóle każde postrzeżenie zmysłowe, składające się z licznych wrażeń, lecz pochodzące od jednej przyczyny zewnętrznej, uważamy skutkiem powolnego nawyknięcia, za będące w zgodności z przyczyną, czyli za pojedyncze. Jednak, mimo pojedynczości wrażenia, widzimy dużą część pola widzenia podwójnie; t. j. jeden i ten sam przedmiot widzimy każdym okiem na innym miejscu; można łatwo przekonać się o tem za pomocą kolejnego wpatrywania się, raz jednym, drugi raz drugim okiem, w jeden przedmiot, na tem samym tle. Okaże się wtedy, że widzimy podwójnie te wszystkie punkta, które w polach widzeń obu oczów mają położenia odmienne względem punktu spojrzenia, pojedynczo zaś widzimy te punkta, które pokrywają się wzajemnie na wspólnym polu widzenia, które względem punktu spojrzenia mają położenia jednakowe, zatem takie, których obrazy na siatkówce leżą jednakowo względem plamy żółtej. Do takich nakrywających się albo identycznych punktów należą oba punkta spojrzeń, punkta obu widnokręgów siatkówki, równo oddalone od punktu obrazu, punkta pozornie pionowych południków, równo oddalone od widnokręgu siatkówki, i nakoniec te wszystkie punkta, które przedstawiają równe i jednakowo skierowane odstępy od przytoczonych linii. Punkta te tworzą się na takich miejscach siatkówki, które są identycznie rozmieszczone w obu oczach względem plamy żółtej, i które dla tego nazywają się punktami identycznymi obu siatkówek. Kontur łączący wszystkie punkta przesłonięcia zewnętrznej, które odtwarzają się na identycznych miejscach siatkówek, zatem widziane pojedynczo, nazywa się *horopterem*. Jest on wogóle linią podwójnie krzywą, która może być uważana za linię przecięcia się dwóch powierzchni stopnia drugiego.

Przedmiot na pewnym tle, obserwowany jednym okiem, wydaje się jak cień na powierzchni tła, a sąd o odległości jest niemożliwy; za otwarciem drugiego oka ciało nagle odskakuje od tła. Wpatrując się w jeden z dwóch palców trzymany jeden za drugim, drugi wydaje się podwójnym. Wpatrując się w walec lampy, odbijający się na tle firanki haftowanej, haft zwraca się przy zamknięciu prawego oka na lewo, a przy zamknięciu lewego oka na prawo. Lecz gdy, wpatrując się w haft, zamkniemy prawe oko, to walec zwróci się na prawo, a gdy zamkniemy oko lewe—na lewo; ponieważ po zamknięciu jednego oka, obraz w drugim oku pozostaje na tem samym miejscu siatkówki tego oka, czyli na tem samym miejscu, które zajmował wtedy, gdy oba oczy były otwarte, wypada więc, że przy wpatrywaniu się w walec, powstają dwa odmiennie położone obrazy haftu, a przy wpatrywaniu się w haft — dwa odmiennie obrazy walca, że zatem, pomimo widzenia pojedynczego, widzimy dwoma oczami podwójnie—przedmioty nieobserwowane, pojedynczo zaś — obserwowane. Z podobnych doświadczeń wyprowadzono powyżej

wypowiedziane twierdzenia. Te ostatnie, biorąc ściśle, niezupełnie sprawdzają się, z powodu niezupełnej kulistości oka, i wyżej wzmiankowanych zbieżeń je-go; południki bowiem pionowe nie są zupełnie identyczne, a linie ściśle identyczne odchylają się od tych południków u góry na zewnątrz, i u dołu na wewnątrz tak, że os fizyologiczna wysokości oka jest cokolwiek nachyloną do osi geometrycznej. Konstrukcja i rachunki odnoszące się do horoptery polegają na tej zasadzie, że linie kierunkowe, wychodzące z dwóch identycznych punktów siatkówek, przecinają się w punkcie należącym do horoptery. Wypadają ztąd równania matematyczne horoptery; równanie Helmholtz'a wynika z przyjęcia, że każdy punkt siatkówki może być uważany za przecięcie się południka i równoleżnika, którego biegunem jest plama żółta; inna metoda wskazana przez Helmholtz'a i Hering'a uważa punkt siatkówki za funkcję kąta wyniesienia i kąta zwrócenia bocznego. Prowadząc w obu oczach przez punkta o równym kącie wyniesienia, płaszczyzny i szukając linii przecięcia się tych płaszczyzn, otrzymamy, jako obwód tych linii przecięć, „horopter poziomy;“ w podobny sposób otrzymać można „horopter pionowy,“ którego przecięcie się z horopterem poziomym daje horopter punktu wyjścia; takim sposobem horopter punktu otrzymuje się ze wspólnego przecięcia dwóch horopterów liniowych. Z tych ostatnich wyróżnia się „horopter południkowy“ występujący w metodzie pierwszej; w niej bowiem prowadzi się płaszczyzny pomocnicze przez południki identyczne i przez punkt węzłowy; zawartość linii przecięć każdych dwóch takich płaszczyzn jest horopterem południkowym albo powierzchnią normalną, mającą tę własność, że nie każdy wyprowadzi jej punkt, lecz wszystkie na niej poprowadzić się dające linie proste, wydają się pojedynczemi. Obie metody oznaczania horopterów zasadzają się na matematyce wyższej. W niektórych razach wystarczają uwagi czysto geometryczne; np. w stanowisku pierwotnem i w stanowiskach drugorzędnych o równoległych i poziomo skierowanych osiach widzenia, horopter jest płaszczyzną równoległą do poziomej płaszczyzny widzenia, odpowiadającej podłodze, co jest nader ważne w pospolitem patrzeniu i chodzeniu; ponieważ bowiem osie fizyologiczne przecinają się z sobą prawie w odległości 5' poniżej oczów, a nadto ponieważ w tym razie horopter przechodzi przez ten punkt przecięcia, przeto przypada na podłogę. Horopter południkowy jest płaszczyzną prostopadłą do płaszczyzny widzenia w punkcie spojrzenia, dla zbieżnych stanowisk drugorzędnych, zkad wypada, że każda linija prosta wydaje się pojedynczą, skoro jeden jej punkt jest obserwowany w stanowisku drugorzędnem; linija ta w stanowiskach trzeciorzędnych wydaje się skrzywioną skutkiem zjednoczenia się obrazów podwójnych. Ponieważ w każdym stanowisku oka, horopter obejmuje tylko pewną ograniczoną ilość punktów, przeto liczba punktów pola widzenia, widzianych podwójnie, jest bardzo wielka; oprócz tego, skutkiem tworzenia się obrazów podwójnych, na miejscu identyczne siatkówek przypadają obrazy rozmaitych punktów przedmiotu; ponieważ wrażenia identycznych miejsc siatkówek zdają się łączyć ze sobą, więc musiałaby skutkiem tego zachodzić niejasność obrazów, gdyby nie miało miejsca pewne zlewanie się obrazów podwójnych. To ostatnie spełnia się w ten sposób, że pojedyncze wrażenie dwóch obrazów horopterów, do których zazwyczaj należą obrazy znajdujące się na plamie żółtej, znacznie przeważa wszystkie inne wrażenia poboczne; obrazy bowiem horopterów, jako należące do punktu wpatrywania się, są najdokładniejsze, wywierają najsilniejsze wrażenie, gdyż współdziałają

w nich stale dwa punkta horopterów; nadto oko jest lepiej przystosowane do tych obrazów, niż do punktów obrazów podwójnych, które, szczególnie w większych odległościach od plamy żółtej, są bardzo niedokładne i jako takie nie podlegają uwadze. Wogóle, wpływy psychiczne, skłaniające nas do tworzenia sobie pojęcia o jedności przedmiotu, są także przyczyną pomijania obrazów podwójnych i gdy nawet umyślnie chcemy wpatrywać się w te ostatnie, to łatwa ruchliwość oczu zaraz skłania nas do wpatrywania się, skutkiem czego podwójność znika.

**Współubieganie się pól patrzenia** (Haldat 1806, Dove 1841). Gdy pola **356.** patrzenia obu oczów są wypełnione różnorodnymi kształtami, barwami, jasnościami, nie pozwalającymi na zlanie się w jedno, to widać często oba obrazy współcześnie, jeden pokryty przez drugi, często też zapanowują w pojedynczych częściach pola widzenia jeden obraz, w innych zaś częściach—drugi, a zdarza się także, iż na pewnym miejscu pola widzenia, jeden obraz zostaje wyparty przez drugi. Tym zjawiskom nadano nazwę współubiegania się pól patrzenia.

Dwa obrazy jednooczowe, mogą zlewać się w jeden dwuoczowy wtedy tylko, gdy zgadzają się z sobą pod względem położenia, kształtu, wielkości i barwy lub też gdy przedstawiają małe pod temi względami różnice. Dwa paski ciemne, poziomy i pionowy sprowadzone na siebie przy patrzeniu dwuoczowym, nie pokrywają się wzajemnie, pomimo zupełnej tożsamości ich form i barw; tworzą one krzyż czarny, ciemny na kwadratowym miejscu pokrycia, a na ramionach jaśniejszy; uwidoczniają się przeto kontury obu obrazów i usuwają wrażenie pola próżnego. Fakt ten wskazuje, że podczas postrzegania, przebiegamy spojrzeniem formy konturów, że zatem przy współubieganiu się, gra rolę uwaga. Jeszcze wybitniej przekonujemy się o tem za pomocą mieszania obrazów liniowych o różnych kierunkach; można bowiem dostrzegać wtedy, raz jeden, drugi raz inny rysunek patrząc dwoma oczami, stosownie do zwróconej uwagi, z czego Helmholtz wnosi, że zawartości dwóch pól patrzenia zlewają się z sobą w jeden obraz, nie wskutek organicznego ustroju, lecz wskutek aktu psychicznego. Helmholtz i inni nie dostrzegają nigdy barw zmieszanych wtedy, gdy pola patrzenia posiadają barwy odmienne, i uważają występujące niekiedy zmiany barw za skutki kontrastu dwuoczowego lub za złudzenie, wywołane nałożeniem się barw odmiennych. Dove, Regnault, Brücke i inni znajdują przeciwnie, że dwie różne barwy przedstawiają się obu oczom w dwuoczowym polu patrzenia według prawideł mieszanin barwnych, że np. barwy dopełniające dają białość wtenczas, gdy oko, pozbywszy się niestałości pochodzącej z nawyku, wpatruje się w dwie barwy. Brücke (1853) umieścił przed jednym okiem szkło żółte a przed drugim niebieskie i wpatrywał się wtedy dwoma oczami w pewien przedmiot; takowy przedstawił mu się niebiesko-zielonym. Wielu uważa za rozstrzygające ten spór doświadczenie Dove'go, przy którym dwa odmiennie zabarwione obrazy przyjmują w stereoskopie barwę mieszaną i wydają się białymi gdy przedstawiają barwy dopełniające. Zawnioskowano więc, że w oczach obie barwy istotnie mieszają się, że zlewanie się obrazów oczowych na identycznych miejscach siatekówek jest aktem organicznym a nie psychicznym, że to zlewanie się jest wrodzone i nie na-

bywa się przez wycuczenie (teoria natiwistyczna w przeciwieństwie do empirycznej). To organiczne zlewanie się uważane jest przez niektórych za skutek krzyżowania się nerwów wzrokowych (Chiasma nervorum opticatorum), w którym to miejscu każda połowa jednej gałązki nerwu schodzi się z połową drugiej gałązki w nową gałąź nerwową. Jako zarzut przeciwko temu pojmowaniu identityczności, stawia Helmholtz doświadczenie Wheatstone'a, według którego a w sprzeczności ze stereoskopiją, punkta odpowiadające sobie na dwóch identycznych miejscach siatkówek mogą być także odczuwane rozdzielnie. Trzymaliśmy się powyżej ciągle poglądów Helmholtz'a lecz wyznajemy otwarcie, że żadnej z tych dwóch teoryj nie uważamy za rozstrzygającą.

Dove zauważył (1850), że dwa obrazy odmiennie jasne i barwne przedstawiają połysk w stereoskopie, że przeciwnie przy jednakowej jasności i barwie, obraz stereoskopijny jest matowy. Dwa kawałki papieru, jeden czarny, drugi biały, albo jeden biały kawałek z czarnymi kreskami, a drugi czarny z białymi kreskami dają w stereoskopie obraz z blaskiem grafitu. Oppel (1854) wyjaśnia ten i wogóle każdy połysk jako wynik małej odmienności dwóch obrazów siatkówkowych; przyjmuje on, że ciało błyszczy wtenczas, gdy ma powierzchnię gładką lub też gładkie cząstki powierzchni; lecz takie powierzchnie odbijają światło w jednym tylko kierunku; gdy to ostatnie trafia w jedno oko, to nie pada na drugie, lub też pada w bardzo małej ilości; ta odmienność ma tworzyć właściwość połysku; gdy zatem obraz wypadkowy tworzy się z dwóch odmiennie jasnych obrazów składowych, to również przedstawia połysk. Według Dove'go połysk barwny powstaje z połączenia się światła odbitego przy powierzchni, ze światłem barwnem, odbitem z głębi; gdy zatem patrzy się w stereoskopie na dwie odmiennie barwy w jednakowej odległości, to oko jest zmuszone przedsięwziąć dwie cokolwiek różne akkomodacye, skutkiem czego jedna barwa, wydając się trochę więcej oddaloną niż druga, wytwarza połysk. Metale odbijają już przy powierzchni światło barwne; jednocześnie się tej właściwości z nieprzezroczystością i wysoką zdolnością odbijania jest przyczyną blasku metalicznego. I o tem także przekonywa stereoskop. Patrząc na dwa wyglądowne kawałki papieru, przez szkło czerwone, widzimy odbłask miedziany; kawałki: żółty i niebieski, obserwowane przez szkło fioletowe, błyszczą metalicznie.

- 357.** **Niedostatki oka.** Oprócz wzmiankowanej już niedostatecznej akkomodacyi brachymetropijnej i hypermetropijnej, oczy podlegają jeszcze wielu innym niedostatom: 1) Patrzyenie ukosem (zyz) jest rozbieżnością osi ocznych, wywołaną przez nierówne przyręczenie dwóch odpowiadających sobie mięśniów, przez niedostateczne funkcyonowanie jednego z nich, przez obrażone jego unerwienia i t. d.; wada ta daje się niekiedy usunąć przez nacięcie jednego mięśnia ocznego. 2) Katarakta szara, czyli ściemnienie ośrodków łamiących, w szczególności soczewki kryształowej i wyleczalna w tym razie przez wyjęcie soczewki. Niekiedy także rogówka ściemnia się do nieprzezroczystości, — ślepotą nieuleczalną. 3) Katarakta czarna, zniesienie zdolności percepsyjnej albo w samej siatkówce, albo w nerwie wzrokowym, albo też w tej części mózgu do której są doprowadzane podrażnienia świetlne — ślepotą nie do uleczenia. 4) Niewidzenie niektórych barw, pochodzące ztąd, że z 3-ch włókien Young'a, jedno lub dwa nie odczuwają barw. Zgodnie z tem rozróżnia się czerwono-ślepotę (przypadek najczę-

szszy), zielono-ślepotę i fioleto-ślepotę (przypadek najrzadszy). Niewidzącemu barw czerwonych, czerwoność wydaje się czarnością, a jaśniejsze stopniowania czerwoności — niebiesko-zielonemi. Niebiesko-zieloność i białość są dla niego tożsamością lub co najwyżej różnią się stopniem jasności; właściwie istnieją dlań tylko dwie barwy: zielona i fioletowa i tony ich przejściowe z rozmaitemi stopniowaniami jasności. Żółte wydaje mu się zielonem, odróżnia jednak żółtość od zieloności po stopniu oświetlenia, a nawet mówi wiele o barwie żółtej, gdyż w zieloności spostrzega pewne różnice, obudzające jego zajęcie. Niewidzący barwy zielonej, zieloność i czarność poczytuje za jednakowe, jasne stopnie zieloności nazywa czerwonością, bierze więc jeden kolor za drugi tak, jak niewidzący barwy czerwonej, z tą tylko różnicą, że ostatniemu czerwoność wydaje się zieloną. Nieodczuwający barwy zielonej pojmuje jedynie czerwoność i niebieskość oraz ich stopniowania, kolor żółty wydaje mu się jasno-czerwonym, biały i różowy — jednakim; widmo, dla niego, jest tylko czerwone i niebieskie; w miejscu koloru zielonego widzi pasek szary. Fioleto-ślepotą czyli niewidzenie dwóch barw trafia się bardzo rzadko i nie została należycie zbadaną; można ją wytworzyć sztucznie przez wprowadzenie w organizm santoninu, alkaloidu ekstraktu artemizyi. Niewidzenie pewnych barw jest zwykle wrodzonym i dziedzicznym, i zazwyczaj bywa dostrzegane dopiero późno; może także pochodzić z wycięcia oczów przy zroku.

**Kamery optyczne.** *Kamera obscura* (Porta 1558) i *Fotografija* (Niépce 1824, Daguerre 1838, Talbot 1839). W kamerach optycznych o małym otworze, obrazy są odgraniczone ostro, lecz z przyczyny nieznacznego oświetlenia, są niewyraźne (p. 283); w celu usunięcia tej niedogodności umieścił Porta w otworze soczewkę dwuwypukłą, która podług drugiego prawa dla soczewek, wytwarza, na przeciwległej stronie w bliskości ogniska, obrazy zmniejszone i odwrócone przedmiotów oddalonych. Gdy zatem soczewka taka jest umieszczona w otworze ściany skrzynki, poczernionej wewnątrz, w celu pochłaniania światła rozproszonego, i gdy w pobliżu ogniska znajduje się ekran lub tafła szklana, to na tych ostatnich powstają obrazy przedmiotów zewnętrznych. Ponieważ według prawa dla soczewek, odległość obrazu zmienia się z odległością przedmiotu, przeto wzmiankowana ciemnia jest opatrzona stosownymi przyborami do przesuwania soczewki i tablicy obrazów.

Można więc otrzymywać obrazy na ścianie pionowej; chcąc je otrzymać na górnej poziomej ścianie skrzynki, umieszcza się w kamerze, pod kątem  $45^{\circ}$ , zwierciadło, które odbija promienie w górę i powoduje tworzenie się obrazów, na matowej tafli szklanej, widzialnych z zewnątrz (*camera clara*); dla wytworzenia obrazów na dolnej ścianie, puszcza się promienie poziome, idące od przedmiotu na soczewkę i zwierciadło odbijające ku dołowi; zwierciadło i soczewka mogą być zastąpione pryzmatem, którego przeciwprostokątna jest równa i zwierciadłana, a ramiona o krzywiznach soczewkowych. Zwierciadło i soczewka umieszczone na wierzchu namiotu wytwarzają na stoliku w namiocie, obrazy przedmiotów zewnętrznych.

Pierwsze urządzenie używa się w fotografii, której zadaniem jest utrwalanie obrazów ciemni. Niépce używał w tym celu asfaltu, Daguerre — jodowej platki srebrnej (Daguerreotypija), Talbot — papieru napojonego chlorkiem srebra (Talbotypija), Archer (1851) zgodnie z pomysłem Grejs'a, — tafli szklanej, powleczonej warstwą kolloidum napojonego jodkiem srebra; dwie ostatnie metody, połączone, używają się w obecnym stanie fotografii. Plotka szklana pokrywa się warstwą kolloidum, pomieszanego z alkoholem i zawierającego trochę jodku potasu; platkę tę zanurza się w ciemności, w kąpiel srebra, t. j. w roztwór wodny azotanu srebra, wskutek czego powstaje jodek srebra. Następnie tafła umieszcza się w kamerze, która za pośrednictwem aplanatycznej obiektywy Petzval'a wytwarza obrazy wyraźne; tafła umieszcza się dokładnie w miejscu powstawania obrazu, które to miejsce oznacza się wcześniej. Na jasnych miejscach obrazu jodek srebra rozkłada się pod wpływem światła; srebro oddziela się w postaci nieskończenie delikatnego, czarnego proszku, skutkiem czego miejsca jasne stają się czarnymi, a ciemne pozostają jasnymi. Takim sposobem tworzy się obraz odjemny. Dokładny rozkład wymagałby dużo czasu: używa się więc korzystnie tego faktu, że miejsca na które światło padło, chociaż nie rozłożone jeszcze, ulegają już łatwiej rozkładowi; wstawia się więc tafle szklaną w ciemnię na czas krótki, aby następnie przez oblanie jej kwasem pirogallasowym lub siarczanem tlenku żelaza uzupełnić redukcję i wywołać obraz odjemny. Po dokonaniu tego, należy oddalić jodek srebra z miejsc jasnych, gdyż inaczej, przy świetle dziennem, cała tafła stałaby się czarną; do tego celu służy podsiarczan sodu, który rozpuszcza jodek srebra a sam zostaje usunięty przez obmycie tafli wodą; obraz odjemny jest wtedy utrwalony. Dla otrzymania dodatnego, kładzie się papier na roztwór soli kuchennej, wysusza się cokolwiek między arkuszami bibuły i tą samą stroną rozkłada się go na roztworze kamienia piekielnego, skutkiem czego przesiąka chlorkiem srebra. Papier tak przygotowany kładzie się na obraz odjemny, a na to chustkę czarną i to nałożenie, ujęte w ramy, wystawia się na działanie słońca tak, że światło przejść musi przez obraz odjemny zanim dojdzie do papieru. Ciemne miejsca obrazu odjemnego nie przepuszczają światła, obok nich więc chlorek srebra zostaje rozłożony, a papier poczerniony. Tak otrzymany obraz dodatny utrwała się podsiarczanem sodu i wodą. Ideał fotografii, fotochromija, t. j. wytwarzanie obrazów z barwami naturalnymi, stała się przedmiotem badań. Już Seebeck i J. Herschel zauważyli zabarwienie chlorku srebra przez światło barwne i Becquerel wytworzył po raz pierwszy obraz widma słonecznego na platce srebrnej. Niépce i Poitevin wstąpił w jego ślady i ostatniemu udało się przyrządzać fotochromije na papierze, które jednak nie przedstawiały odpowiedniej ciągłości światła. Zenker okazał na zebraniu przyrodników we Frankfurcie (1867) fotografije barwne. Ducos de Hauron (1869) składa, opierając się na teorii 3-ch barw Young'a, obrazy barwne na gelatynie, z trzech obrazów przezroczystych: czerwonego, niebieskiego i żółtego; do tego celu Husnik (1871) używa fotolitografii. Metoda ta nie jest praktyczną do otrzymywania portretów, gdyż powstawanie obrazów barwnych odjemnych wymaga zbyt wiele czasu. Fotografia ma zastosowanie w meteorografii, do automatycznego oznaczania stanów termometru i barometru, kołysań igły magnesowej i t. d.

**359.** Grimakistiskop Mauvillin'a (1866) służy do wytwarzania z fotografij obrazów potwornych, za pośrednictwem soczewki opatrzonej delikatnymi, nie-

równymi paskami i innymi nieprawidłowościami. *Latarnia magiczna* Kircher'a (1646) posiłkuje się czwartym prawem dla soczewek, mocą którego soczewka zbierająca daje w pewnej odległości obraz rzeczywisty, powiększony, odwrotny względem przedmiotu umieszczonego blisko ogniska soczewki. Światło lampy znajdującej się w kamerze, bezpośrednio lub odbite od zwierciadła wklęsłego, zostaje zebrane przez soczewkę wypukłą i odrzucone na tafłę szklaną lub transparent, na którym odtwarzają się przedmioty mające być przedstawionemi; promienie ztąd wychodzące zostają następnie zjednoczone, przez soczewkę zbierającą, na odległej ścianie (pojawianie się duchów i fantasmagorye przeszłego wieku). Obecnie do scen, w których występują duchy, używa się w teatrach zwierciadła szklanego, równego i czystego, które ustawia się ukośnie na przodzie sceny i ukazuje publiczności subiektywne obrazy przedmiotów, znajdujących się pod sceną i oświetlonych rzęsiście lampą elektryczną. Latarnia magiczna ma także zastosowanie w obrazach mglistych (*Dissolving views*); dwie latarnie magiczne, których otwory są nawpół zakryte, wytwarzają na ekranie przeświecającym, obraz zmieszany, mglisty. Gdy za pomocą zasuwki jeden otwór będzie coraz bardziej zamykany, a drugi coraz szerzej otwierany, to jeden z obrazów zniknie powoli, drugi zaś stawać się będzie coraz wyraźniejszym; jeżeli obrazy takie pochodzą od kilku tafel szklanych, to przesuwania jednej lub kilku tafel, mogą spowodować ruchy pewnych części obrazów. Podobnie urządzone są: polyoramy, dioramy, megaskopy, fantaskopy, kamery cudowne i t. p.

**Mikroskop słoneczny** (Lieberkühn 1738) daje bardzo wielkie, obiektywne obrazy, małych przedmiotów; w tym celu, te małe przedmioty muszą promieniować nader żywe światło, aby każda część obrazu przedstawiała dostateczne oświetlenie. Używa się więc światła słonecznego, którego promienie zostają przeprowadzane, za pomocą heljostatu, do przyrządu przytwierdzonego do okiennicy i zagęszczane na przedmiocie przez soczewkę; można też użyć światła mieszaniny piorunującej (mikroskop wodorowo-tlenowy) lub węglowego światła elektrycznego (mikroskop foto-elektryczny). Mały przedmiot, jak nóżka komara, robaczek w serze, kurz ze skrzydeł motyla, kropla z wymoczkami i t. p., umieszcza się w ciemnej skrzynce, zewnątrz odległości ogniskowej, lecz bardzo blisko ogniska soczewki zbierającej, aby, na mocy prawa czwartego dla soczewek, można było otrzymać, po drugiej stronie soczewki i w znacznej od niej odległości, powiększony obraz przedmiotu. W równaniu:

$$d = \frac{bf}{b-f},$$

które łatwo otrzymać ze wzoru dla soczewek,  $d$  jest bardzo blizkie  $f$ , więc mnożnik  $\frac{b}{b-f}$  musi być blizkim jedności; czyli  $f$  musi być bardzo małe. Soczewka przedmiotowa mikroskopu słonecznego powinna mieć małą odległość ogniskową, zatem powinna być mocno zakrzywioną, a więc bardzo małą. Powiększenie liniyjne oblicza się ze wzoru;

$$\frac{f}{d-f}$$

jest ono tem znaczniejsze, im  $d-f$  jest mniejsze, czyli im przedmiot jest bliżej ogniska. Powiększenie powierzchni jest kwadratem z wielkości liniowej. Zakład optyczny Powell'a i Lealand'a w Anglii przyrządził obiektywę, mającą  $\frac{1}{2}$  mm odległości ogniskowej, dającą więc powiększenie liniowe = 3000, a powierzchniowe = 9000000.

**361.** **Mikroskop** (Hans i Zacharyasz Janssen, w Middelburgu 1590) 1. *Lu-pa* czyli *mikroskop pojedynczy* służy do wyraźnego widzenia bardzo małych przedmiotów, blizkich oka, powiększonymi. Jeżeli przedmiot  $ab$  (Fig. 162) jest bardzo blisko oka, to przedstawia się wprawdzie pod wielkim kątem widzenia czyli wydaje się powiększonym, lecz niewyraźnym, bo znajduje się wewnątrz odległości wyraźnego widzenia,  $20^\circ$ . Soczewka więc zbierająca, umieszczona między okiem a przedmiotem tak, że przedmiot znajduje się wewnątrz odległości ogniskowej, wytworzy na mocy prawa 6-tego dla soczewek, po stronie przedmiotu obraz urojony, odleglejszy, powiększony i prosty,

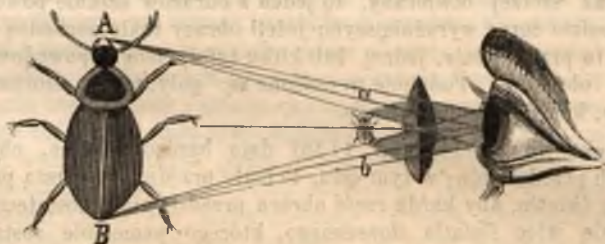


Fig. 162.

dla oka znajdującego się po drugiej stronie soczewki. Oko zatem widzi pozornie przedmiot blizki, przez soczewkę zbierającą, przesuniętym na odległość wyraźnego

widzenia i powiększonym; przeto soczewka zbierająca jest lupą czyli mikroskopem pojedynczym. Powiększenie otrzymuje się ze wzoru:

$$\frac{1}{b} + \frac{1}{d} = \frac{1}{f}$$

w którym  $b$  trzeba uważać za ujemne, gdyż przedmiot i obraz przypadają po tej samej stronie soczewek. Z tak zmienionego równania:

$$\frac{1}{d} - \frac{1}{b} = \frac{1}{f}$$

wypada,  $d = \frac{bf}{b+f}$ . Lecz stosunek wielkości obrazu  $AB$  do wielkości przedmiotu  $ab$  (Fig 162) równa się stosunkowi ich oddaleń od środka optycznego, czyli równa się  $b : d$ ; wartość ta, będąca powiększeniem liniowym, przyjmuje po wstawieniu w nią wartości na  $d$  kształt

$$\frac{b+f}{f}$$



lub przybliżenie  $\left(\frac{b}{f}\right)$ . Za  $b$  trzeba tu wstawić odległość wyraźnego widzenia. Wzór ten wskazuje, że powiększenie jest tem znaczniejsze, im odległość ogniskowa lupy jest mniejszą.

Zmniejszenie odległości ogniskowej w soczewce, prowadzi za sobą zwiększenie zбочenia sferycznego i chromatycznego; wielkie powiększenie zatem odbywa się kosztem wyraźności; oprócz tego, soczewki o małej odległości ogniskowej, t. j. małe soczewki przedstawiają małe pole widzenia i niewyraźne oświetlenie: małe lupy są przyczyną silnych wyteżeń oczu. Zбочenia sferyczne i chromatyczne dają się wprawdzie znacznie zmniejszyć przez połączenie dwóch soczewek, jak to ma miejsce w lupach Fraunhofer'a, Wilson'a i Plössl'a, nie podobna jednak usunąć ich całkowicie. Zбочenie sferyczne jest małe w lupach walcowych i w lupie Coddington'a i Brewster'a; w pierwszych dla tego, że obie krzywizny są odmienne, w drugiej zaś z przyczyny usunięcia promieni brzoźnych za pomocą nacięć i wgłębień, lecz lupy te muszą być zbyt do przedmiotu zbliżane. Lupy z drogich kamieni dają, przy jednakowym powiększeniu, mniejsze zбочenia od zбочeń lup szklanych, dla tego, że załamanie w drogich kamieniach jest większe od załamania w szkłe; kulki szklane i krople wody mogą służyć za lupy o wielkich krzywiznach, nie przedstawiając trudności oszlifowania. Nazwa lupy odnosi się zazwyczaj do soczewki powiększającej około 20 razy, bez podstawy i stoliczka, na którym kładzie się przedmiot; nazywa zaś: mikroskop pojedynczy, służy soczewce powiększającej około 200 razy, opatrzonej podstawą, stoliczkiem przedmiotowym i zwierciadłem do oświetlenia. Jakkolwiek



Fig. 163.

za pomocą lupy porobiono ważne spostrzeżenia nawet w obecnem stuleciu, to jednak teraz najczęściej używa się mikroskopu złożonego.

**2. Mikroskop złożony** składa się z jednej lub kilku soczewek zbierających, **362.** zwróconych do przedmiotu, zwanych obiektywą i z soczewki zbierającej przeznaczonej dla oka, nazwanej szkłem ocznym lub okularem (Fig. 163). Obiektywa  $b$  ma bardzo małą odległość ogniskową, daje zatem obraz rzeczy wisty  $dc$ , powiększony i odrotny względem przedmiotu  $a$ , umieszczonego blisko jej ogniska. Okular  $B$  jest lupą, przez którą patrzy się na obraz, i ma takie położenie, że obraz przedmiotu znajduje się wewnątrz jego odległości ogniskowej; wpływ więc okularu sprowadza się do zastąpienia obrazu  $dc$  przez większy  $DC$ . Powiększenie tego mikroskopu jest iloczynem powiększeń obiektywy i okularu. Przedmiot  $a$  oświetla się za pomocą zwierciadła  $S$ . Wiązka światła idąca

od zwierciadła może być według woli nastawianą i modyfikowaną za pomocą ruchomej zasłonki.

*Czystość* obrazów mikroskopowych wymaga usunięcia zбочenia chromatycznego i sferycznego obu układów soczewek. Achromatyzm obiektywy osiąga się przez znane połączenie soczewki wypukłej, krownklasowej z soczewką wklęsłą, flintklasową; zбочenie kulistości usgwa się przez połączenie kilku takich soczewek achromatycznych (Selligue 1824); te ostatnie nie wymagają tak małej odległości ogniskowej, gdyż dwie soczewki o podwójnej odległości ogniskowej służą tak samo, jak jedna o odległości pojedynczej, przyrządzanie ich więc jest łatwiejsze; nadto każda następująca soczewka nie przepuszcza promieni brzeżnych poprzedzającej, skutkiem czego znika zбочenie kulistości. Achromatyzm okularu otrzymuje się najczęściej przez stosowne połączenie dwóch soczewek płasko-wypukłych, zwanych szkłem ocznem Campani'ego (1655) i ujętych w rurkę. Druga, większa z tych soczewek przejmuje promienie idące od obiektywy przed zejściem się ich, zwiększa ich zbieżność i wytwarza obraz mniejszy i bliższy; nazywa się też ona soczewką zbierającą (kollektywą); pierwsza soczewka, znajdująca się przy oku, właściwy okular, ma takie położenie i wielkość, że sprawia wzajemne nakładanie się różnobarwnych obrazów kollektywy. To podwójne szkło widzenia łącznie z diafragmą oddzielającą obie części składowe, znosi zбочenie kulistości okularu.

*Pole widzenia* mikroskopu złożonego jest znacznie większe od pola widzenia lupy. Ponieważ bowiem obiektywa daje już mocne powiększenie, przeto takowego nie potrzebuje wzmacniać szkło oczne, a nawet byłoby to szkodliwym, gdyż nieuniknione niedokładności obrazu obiektywy zostałyby powiększone; dla tego też używa się dużego okularu, przedstawiającego wielkie pole widzenia; to ostatnie mierzy się kątem, pod którym okular widzimy ze środka obiektywy. Okular Campagni'ego podwaja jeszcze to pole widzenia. Pola widzenia rozmaitych mikroskopów porównywiają się za pomocą pól mikrometrycznych tafli szklanej, wypełniających te pola widzenia.

*Powiększenie* mikroskopu jest tem znaczniejsze, im mniejszymi są odległości ogniskowe obu szkieł; zwiększa się ono kosztem jasności, wyraźności i pola widzenia. Dla tego też do każdego mikroskopu dołącza się kilka szkieł widzenia, aby wedle potrzeby zyskiwać na wyraźności lub na powiększeniu. Jakkolwiek powiększenie daje się obliczyć ze znacznych odległości ogniskowych to jednak potrzebnem i stosownem jest umieć takowe oznaczyć praktycznie. Jako przedmiot kładzie się mikrometr szklany a przy nim arkusz papieru, na którym można za znaczny kreski podziałowe, widziane za pomocą kamery lucidy. Jeżeli takowe są oddalone na platce np. na  $\frac{1}{100}$  mm, a na rysunku na 4 mm, to powiększenie jest wtedy 400. Największe powiększenie (5000) otrzymał Hartnack w Paryżu (1867) za pomocą swego mikroskopu immersyjnego (zanurzanego), w którym spódnia część obiektywy była zmoczona kroplą wody, gliceryny lub olejku makowego.

*Próba* mikroskopu rozciąga się nie tylko do powiększenia i pola widzenia, ale także do jasności i wyrazistości. Dobry mikroskop przy oświetleniu płomieniem świecy, powinien dawać obrazy dostatecznie jasne o 300 krotnem powiększeniu. Pod względem wyrazistości odróżnia się wyrazistość określającą, która odnosi się do dokładności zarysów, do wyrazistości wewnętrznej,

wymagającej wiernego oddania szczegółów wewnętrznych. Do wypróbowania używa się szczególniej łuszczyki ze skrzydeł pewnego motyla (*Hipparchia Janira*); lepiej jest używać tabliczek Norbert'a i drobnopisma Peters'a; na  $\frac{1}{1600}$  do  $\frac{1}{365000}$  " angiel. jest napisany cały „Ojciec nasz.“ Wyraźność jest przeciętno największą przy powiększeniu 300—400 razy, stosownie do właściwości przedmiotu. Mikroskop ma ogromną liczbę *zastosowań* przy badaniach nad wewnętrzną budową człowieka, zwierząt, roślin, używa się do rozpoznania: najmniejszych ustrojów zwierzęcych i roślinnych, kryształów, rodzajów gruntu; nadto, w patologii, technice, medycynie sądowej, w geologii mikroskopijnej i t. d.

**Luneta** (Zacharyasz Janssen 1600). Rozróżnia się lunety soczewkowe czyli refraktory od lunet zwierciadłowych czyli reflektorów. Nazwę teleskopu nadaje się przeważnie ostatnim, pierwszym zaś najczęściej nazwę lunety. 363.

a. *Refraktory.* 1. *Luneta Galileusza albo Hollenderska* składa się z soczewki dwuwypukłej O, mającej wielką odległość ogniskową, służącej za

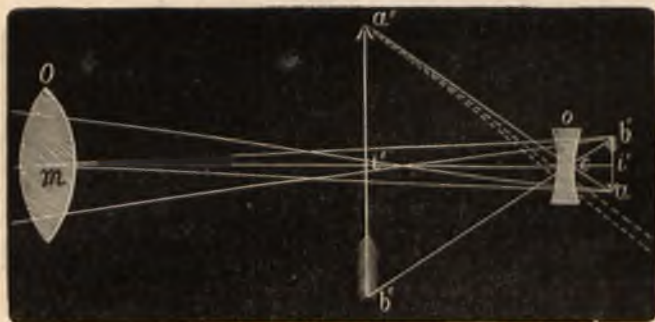


Fig. 164

objektywę i z soczewki dwuwklęsłej o, będącej okularzem, o małej odległości ogniskowej. Powiększenie równa się ilorazowi obu odległości ogniskowych; długość lunety t. j. oddalenie obu soczewek od siebie równa się różnicy odległości ogniskowych; pole widzenia jest rozwartością ostrokągu, którego wierzchołkiem jest środek objektyw, a podstawą — źrenica.

Objektywa wytwarza obraz  $a'b'$ , w bliskości swego ogniska, zmniejszony, rzeczywisty i odwrótny względem przedmiotu  $a b$ . Okular wklęsły ma takie położenie, że promienie padają nań przed zejściem się, a oddalenie okularu od  $a'b'$  jest troszkę większe od odległości rozpraszania (odległości ogniskowej) okularu. Skutkiem tego promienie zbieżne rozbiegają się i krzyżują, a oku przedstawia się obraz jeszcze raz odwrócony, czyli już prosty i większy od przedmiotu. Promień  $a'm$  idzie ku  $a$ ; więc  $i'm a'$  jest połową kąta widzenia przedmiotu  $z m$ , albo z miejsca zajmowanego przez oko, ponieważ długość lunety jest nieznaczającą w porównaniu z odległością przedmiotu. Połowa kąta widzenia obrazu jest  $a''ci''$

$= i'ca'$ . Stosunek tych kątów daje powiększenie. Lecz  $\operatorname{tg} i'ma' = \frac{i'a'}{i'm} = \frac{i'a'}{f}$  dla tego, że  $i'm$  jest prawie równe ogniskowej odległości obiektywy; podobnie  $\operatorname{tg} i'ca' = \frac{i'a'}{i'c} = \frac{i'a'}{f'}$ , gdyż  $i'c$  jest prawie równe odległości ogniskowej  $f'$ , okularu. Przy małych jak tu kątach, stosunek kątów jest bliski stosunku stycznych, zatem powiększenie wynosi  $\frac{i'a'}{f'} : \frac{i'a'}{f} = \frac{f}{f'}$ . Ztąd widać dla czego obiektywa musi mieć wielką odległość ogniskową, a okular — małą, zatem dla czego soczewka pierwsza musi być znacznie większą od drugiej. Ostatnia jednak nie może być nader małą, gdyż wtedy pole widzenia (którego podstawą ogranicza się do źrenicy przy patrzeniu spokojnym z powodu silnej rozbieżności promieni wychodzących z okularu) nie mogłoby być rozszerzonym przez ruchy głowy; nie można więc za pomocą tej lunety osiągnąć znacznych powiększeń; ma ona też zastosowanie tylko w takich razach, w których wymaga się umiarkowa-

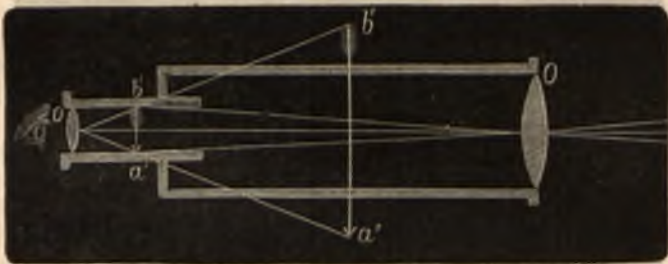


Fig. 165.

nego powiększenia małej długości (lornetka teatralna, luneta polowa i t. p.). — Mimo to Galileusz przy pomocy tej lunety, którą zbudował dowiedziawszy się, że w Hollandyi znają już tego rodzaju przyrząd, odkrył góry i kratery księżycowe, księżyc Jowisza, pierścień Saturna, plamy na Słońcu, fazy świetlne Wenus i w drodze mlecznej zdołał dostrzedz gwiazdy. W astronomji ta luneta już nie ma zastosowania.

- 364.** 2. Luneta Keppler'a albo astronomiczna (Keppler 1611, Scheiner 1617). Za obiektywę ma soczewkę zbierającą o wielkiej odległości ogniskowej, a za okular — soczewkę zbierającą o małej odległości ogniskowej. Obraz jest odwrócony, a jego powiększenie równa się ilorazowi obu odległości ogniskowych; pole widzenia jest rozwartością ostrokągu, którego podstawą jest okular a wierzchołkiem środek obiektywy. Jasność obrazu wzrasta z powierzchnią obiektywy.

Przebieg promienia w tej lunecie widać na fig. 165; obiektywa O wytwarza w bliskości ogniska obraz rzeczywisty  $a'b'$ , zmniejszony i odwrótny względem

przedmiotu bardzo oddalonego  $a$   $b$ ; na obraz ten patrzy się przez okular, jak przez lupę i widzi się go powiększonym lecz nie odwróconym po raz drugi, czyli odwrótnym względem przedmiotu; prawo odnoszące się do powiększenia, udowadnia się tak samo jak dla lunety Galileusza. Ponieważ  $a$ ' $b$ ' przypada w pobliżu ognisk obu soczewek, przeto oddalenie ich od siebie jest równe summie odległości ogniskowych. Promienie przybywające do okularu, krzyżują się w środku obiektywy; z tej przyczyny promienie przypadające zewnątrz tych, które dochodzą do kołowego brzegu okularu, nie należą już do pola widzenia; ztąd właśnie wynika twierdzenie odnoszące się do tego pola. Okular w tej lunecie, równie jak w innych, jest przesuwalny, pozwala zatem sprowadzić obrazy na odległość dokładnego widzenia; im przedmiot jest bliższy obserwatora, tem znacznie obraz oddala się od obiektywy, tem dalej okular musi być wyciągnięty; gdy luneta ma służyć za instrument mierniczy, to powinna być opatrzona krzyżem z nici lub włosków, przesuwalnym razem z okulem. Jakkolwiek odwrotne położenie, nie przeszkadzające nic w astronomji, jest słabą stroną tej lunety, to jednak daje ona dosyć duże pole widzenia i dostateczną jasność, skutkiem czego umożliwia otrzymać najznacześniejszych powiększeń; kilka mniejszych szkieł ocznych, dołączanych zwykle do każdej lunety, pomaga również do osiągnięcia tego celu.— Przed wynalezieniem achromatyzmu nie można było używać małych szkieł ocznych, z powodu ich własności silnego rozpraszania barw; starano się więc radzić sobie dużemi obiektywami, skutkiem czego lunety stawały się zbyt długie, gnące się i niedogodne. Huyghens 1684 przytwierdził obiektywę do końca masztu i patrzył w nią z dołu przez okular, a Newton, zwątpiwszy o achromatyzmie, wymyślił lunety zwierciadłowe. Po wykryciu achromatyzmu i zbadaniu przez Fraunhofer'a tajemnicy przyrządzania dobrego flintglasu, zwrócono się znów do lunet soczewkowych. Fraunhofer dostarczył swych wielkich przyrządów obserwatoryom w Pulkowie i w Bostonie (14" otworu, 21' odległości ogniskowej, 2000-krotne powiększenie). Największy refraktor pochodzi od Vicar'a Craig w Wandsworth (24" otworu, 72' ang. odl. og.); Powell i Lealand przyrządzili niedawno obiektywę o 25" otworu. Według Littrow'a (1832) można także ustawić soczewkę flintglasową w pewnej odległości od krownklasowej, nie psując achromatyzmu, a wtedy wymiary soczewki flintglasowej mogą być mniejsze. Takie dyalityczne lunety mogą mieć duży otwór, znaczne oświetlenie i wielkie pole widzenia; są one bardzo stosowne do obserwowania komet, jako lunety dla marynarzy i t. p. W celu praktycznego wyznaczenia powiększeń, patrzy się jednym okiem przez lunetę a drugim bezpośrednio na oddaloną podziałkę, i rachuje się, ile części skali widzianych gołem okiem przypada na jedną część skali widzianej przez lunetę. Dla przekonania się o wyraźności, używa się gwiazd podwójnych, do sprawdzenia siły przenikania przestrzeni—gwiazd stałych od 8—15 wielkości, a do wymierzenia pola widzenia—czasu, którego potrzebuje gwiazda na przejście przez toż pole. Do mierzeń dokładnych używa się krzyża z nici lub mikrometru szklanego; przy ustawianiu lunety jest bardzo dogodnym wyszukiwacz, czyli mała lunetka, o wielkiem polu widzenia, równoległa do lunety obserwacyjnej. Lunety małe, jak perspektywy czyli lunety polowe, mogą służyć także do mierzenia odległości, gdy są opatrzone mikrometrem. Odwrotne położenie obrazów lunety astronomicznej jest niedogodne do obserwacji na ziemi; dodawano więc, zgodnie z pomysłem Keppler'a, jeszcze trzecią soczewkę zbierającą, która

ndzielała obrazowi położenie proste, lecz zmniejszała znacznie pole widzenia. Dopiero Rheita okazał (1665), że za pomocą okularu, złożonego z 4-ch soczewek płasko-wypukłych można otrzymać obraz prosty o dobrym polu widzenia; oświetlenie obrazu jednak znacznie przez to zmniejsza się (luneta ziemna).

**365.** b. Reflektory. 1. Teleskop gregorjański (1663) (Fig. 166). Składa się z wielkiego zwierciadła parabolicznego wklęsłego MM, przerwanej

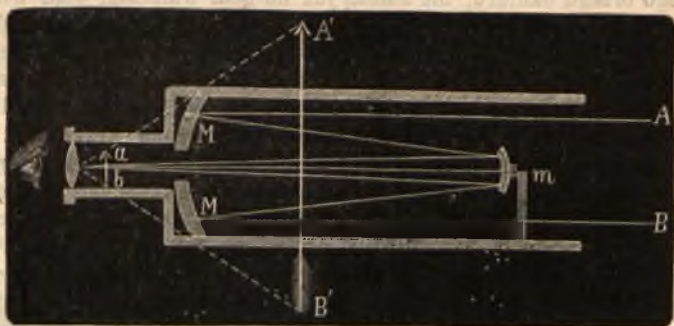


Fig. 166.

w środku, które według drugiego zasadniczego prawa dla zwierciadeł wklęsłych, wytwarza w bliskości ogniska obraz rzeczywisty, zamniejszony i odwrótny względem przedmiotu dalekiego AB. Drugie małe zwierciadło wklęsłe m ustawia się tak, aby wzmiarkowany obraz przypadał między jego ogni-



Fig. 167.

skiem, a środkiem tegoż zwierciadła; skutkiem tego, na mocy czwartego prawa dla zwierciadeł wklęsłych, powstaje obraz a b powiększony i odwrótny względem obrazu poprzedniego, a więc już prosty; na ten drugi obraz patrzy się przez lupę i widzi się go w A'B' prostym i zwiększonym jeszcze, skutkiem wpływu lupy.

2. *Teleskop Newton'a* (1671). Newton pragnąc użytkować środkową, jako najlepszą część wielkiego zwierciadła wklęsłego M (Fig. 167) puścił promień od niego odbite, przed zejściem się ich, na zwierciadło płaskie, skutkiem czego z boku teleskopu otrzymał mały obraz  $ab$ , zwiększony przez soczewkę okularu. Cassegrain zastąpił małe zwierciadło płaskie, zwierciadłem wypukłym. Telesko-

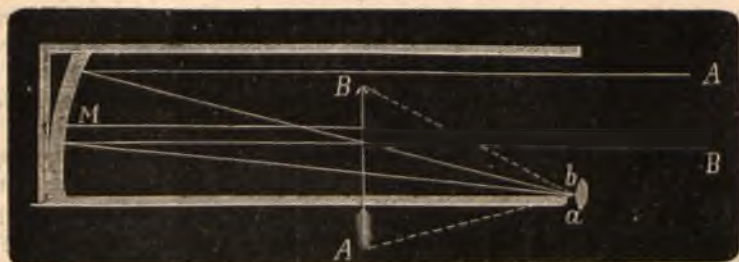


Fig. 168.

py zwierciadłowe zyskały należne uznanie dopiero od czasu Hadley'a i innych (1718), którzy wydoskonali odlewanie i szlifowanie zwierciadeł parabolicznych, i od czasu jak W. Herschel do należytej wielkości je doprowadził.

3. *Teleskop Herschla* (1789) (Fig. 168). Zwierciadło wklęsłe M ma położenie ukośne takie, że pierwszy obraz  $ab$  tworzy się przy dolnym brzegu rury teleskopu i tam zostaje zamieniony w większy  $A'B'$  przez soczewkę zbiera-

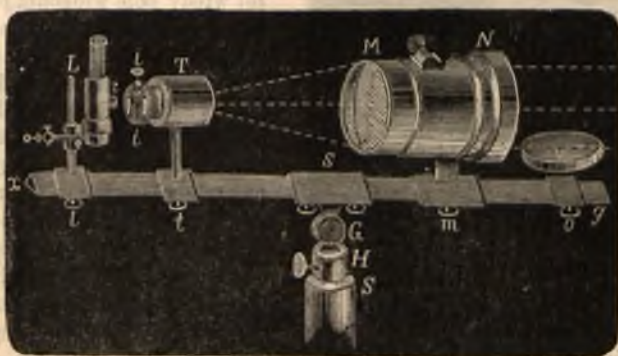


Fig. 169

jąca. Wielki teleskop Herschla miał w otworze 5' ang. i 40' odległości ogniskowej; powiększenie było blisko 7000 a siła światła była tak wielka, że Stryjusz przedstawiał blask olśniewający; największą jednak liczbę odkryć porobił Herschel używając swego 20 stopowego teleskopu. Olbrzymi teleskop lorda Rosse (1843) w Parsonstown blisko Dublina (wartości 120 000 fl.) ma 53' odległości ogniskowej i 6' otworu; stał się on narzędziem wielkiej wagi przy badaniu mgławic. Przy-

rzędy ze zwierciadłami wklęsłymi weszły w częstsze użycie od czasu wprowadzenia przez Foucault'a (1856) zwierciadeł wklęsłych posrebrzanych ( $75^\circ$  otworu i  $2,5^m$  odl. ogn.) i przyzmatu o całkowitem odbiciu, zamiast zwierciadeł metalowych i zwierciadła płaskiego. Zwierciadła szklane posrebrzane nie są tak ciężkie, posiadają większą zdolność odzwierciedlania, są twardsze i dają się lepiej polerować. Jednorazowe oszlifowanie szkła wystarcza na zawsze, dosyć jest bowiem zastępować od czasu do czasu dawną warstewkę srebra—nową. Oprócz tego lunety zwierciadłowe posiadają tę wyższość nad soczewkowymi, że zwierciadło wymaga oszlifowania jednej tylko strony, a nadto, że zwierciadła są same z siebie achromatyczne; korzyści te jednak maleją znacznie przy uwzględnieniu wielkich wymiarów a ztąd niedogodności tych przyrządów.

366.

Przyrząd do badania niejednorodności (Töpler 1867). Przyrząd ten służy do mierzenia: zmian w gęstości, sprężystości, temperaturze i ruchów zachodzących we wnętrzu ciał przezroczystych, o ile takowe modyfikują zdolność załamania. Gdy z ostro odgraniczzonego źródła świetlnego (illuminatora) pada światło na układ soczewek (głowę), to pole widzenia soczewki obserwowane przez lunetę opatrzoną zasuwkami (analizator), wydaje się jasnym. Skoro jednak zasuwka analizatora zostanie przesunięta tak, aby jej krawędź przypadała na krawędź illuminatora (ustawienie czułe) wtedy pole widzenia przedstawi się ciemnym, jeżeli soczewka jest zupełnie jednorodną. Jeżeli zaś soczewka jest znacznie niejednorodną odnośnie do siły załamania, lub jeżeli między analizatorem a głową umieszczoną zostanie w jakimkolwiek miejscu substancja silniej łamiąca, to przez nią wejdzie jeszcze światło za bryg zasuwki i niejednorodność przedstawi się jasno na tle ciemnym. Jeżeli niejednorodność łamie słabiej, to wydaje się



Fig. 170.

ciemną jeszcze przed ustawieniem czułym, czyli przed zaćmieniem się pola widzenia; w takim razie widać miejsce ciemne na jasnym tle.

Figury 169 i 170 przedstawiają opisany przyrząd. Na sztabie stalowej  $x$   $y$  jest osadzony illuminator, składający się z lampy  $L$  i z rury  $T$ , której urządzenie szczelinowe przepuszcza za pośrednictwem zasuwki i przez lewy koniec rury odcinek świetlny, ograniczony prostolinijnie. Głowa  $MN$  składa się z podwójnej obiektywy achromatycznej w takiej odległości od  $i$ , że ta ostatnia przypada na zewnątrz ogniska głowy  $MN$ , zatem z drugiej strony głowy powstaje w wielkim oddaleniu rzeczywisty obraz otworu świetlnego. Na stoliczek  $V$  kładą się przedmioty badane. W odległości 10—15' znajduje się analizator,



składający się z lunety astronomicznej  $F_0$ , powiększającej około 15 razy i z krążka metalowego  $A$  opatrzonego tubą  $r$  oraz diafragmą  $d$ , której brzeg dolny, prostolinijny, wykrawa odcinek z otworu kołowego. Dla nadania przyrządowi ustawienia czułego, sprowadza się obraz otworu świetlnego w tubę  $r$  tak, aby prosta graniczna tego obrazu była równoległą do krawędzi diafragmy i przechodziła przez środek tuby; następnie przesuwa się za pomocą szruby  $d$  krawędź wzmiankowaną dotąd, dopóki ona nie zakryje granicznej prostej obrazu, wtedy przyrząd ma ustawienie czułe. Przyrząd ten pozwala także widzieć: 1. Dyfuzję eteru w wodzie i par eteru w powietrzu. 2. Spadanie kropli wody przez wodę na dno naczynia. 3. Przepływy wody w naczyniach połączonych. 4. Fale dźwiękowe iskry elektrycznej. 5. Że fala odbita jest równa fali padającej. 6. Że fala załamana w ośrodku gęstszym jest mniejszą, a w ośrodku rzadszym — większą od fali w ośrodku poprzednim (wyjścia). 7. Prawidłową interferencję fal. 8. Że iskra elektryczna jest impulsem rozrzucającym powietrze; ciepło przeszkadza natychmiastowemu zbiegnięciu się powietrza. 9. Między chwilą, w której słychać hałas sprawiony przez iskry a chwilą, w której powstaje wyładowanie, upływa pewien czas, wynoszący, bez butelki, 0,000015, a z butelką 0,000018 do 0,000135 sek.; ztąd wypada, że wyładowanie butelki potrzebuje więcej czasu.

*Zadania.* 495. Jaka jest długość linii Fraunhofer'a w wodzie? Rozw. **367**.  
 $A = 7601$ ,  $B = 5701$ ,  $C = 5152$ ,  $D = 5037$ ,  $E = 4325$ ,  $F = 3952$ ,  
 $G = 3646$ ,  $H = 3231$ ,  $I = 2976$  dziesięciomiljonowych milimetra.

496. Wykładnik załamania dla  $B$  we flintglasie wynosi 1,627, dla  $H = 1,671$ ; jakie są długości fal tych linii? Rozw. 4222, 2439.

497. Długość fali dla  $B$  w krownnglasie = 4501; jaki jest wykładnik załamania tego szkła dla  $B$ ? Rozw. 1,526.

498. Kąt łamiący pryzmatu flintglasowego niech wynosi  $35^\circ$ , a minimum odchylenia dla 3-ch linii  $D$ ,  $F$  i  $G = 21^\circ 34' 30''$ ,  $21^\circ 59' 30''$ ,  $22^\circ 20' 10''$ ; jakie są w. z. tych trzech linii? Rozw. Według 301, jest  $n$  dla  $D = 1,576$ , dla  $F = 1,5865$ , dla  $G = 1,5953$ .

499. Puściwszy wiązkę promieni słonecznych na pryzmat równoboczny, w  $\frac{1}{3}$  wysokości powierzchni bocznej tak, aby promień w pryzmacie biegł równolegle do drugiej powierzchni bocznej, jakie dostrzeżemy zjawisko? Rozwiązanie. Z każdej powierzchni bocznej wyjdą dwie wiązki, biała i widmowa, z powodu odbicia i załamania na każdej powierzchni; okazać rysunkiem.

500. Na pryzmat krownnglasowy o  $30^\circ$  pada wiązka biała pod kątem  $30^\circ$ ; niech w. z. dla czerwoności i fioletu będą: 1,526 i 1,547; jakie są kąty wyjścia i jakie rozproszenie całkowite? Rozw.  $16^\circ 43' 30''$  i  $17^\circ 22' 56''$ , rozproszenie =  $39' 26''$ .

501. Jak długie jest widmo na ścianie odległej na  $90^\circ$ ? Rozwiązanie.—  $2,98 \sin 19' 43'' = 1,124^\circ$ .

502. Dla pryzmatu flintglasowego o  $30^\circ$ , w. z. promieni czerwonych i fioletowych są: 1,6 i 1,64; kąt padania wynosi  $90^\circ$ ; jakie jest rozproszenie?— Rozw.  $1^\circ 57' 17''$ .

503. Jaka długość ma widmo na ekranie oddalonym na  $2^m$ ? Rozwiązanie.  $6,82^\circ$ .

504. Jak przedstawia się na ciemnym tle punkt biały, linija biała, prostokąt biały, obserwowane przez pryzmat, którego krawędź łąiącą jest równoległą do linji, a w innym razie prostopadłą do niej; jak wydają się ciemne punkt, linija i prostokąt na białym tle? Dla czego?

505. Coby to znaczyło, gdyby w widmie słonecznym linija D zabłysła naraź jasno? Rozw. Wybuch rozżarzonej pary sodu; objaśnienie.

506. Coby znaczyło zniknięcie linji ciemnej D z widma słonecznego?— Rozw. Zniknięcie sodu z powłoki słonecznej; wyjaśnienie.

507. Coby znaczyło rozszerzenie się i ściemnienie linji D? Rozw. Zwiększenie się ilości i oziębienie pary sodu; wyjaśnienie.

508. Wüllner (1868) spostrzegł w widmie ciągłym rurki Gejsler'a, przez którą przepuszczał strumień iskier z maszyny elektrycznej Holtz'a do butelki lejdejskiej, liniję ciemną D; jak to wytłumaczyć? Rozw. Rozżarzona ściana szklana dawała widmo ciągłe, a sod w rurce zamieniony w parę—liniję ciemną.

509. Coby znaczyło przesunięcie się linji D w widmie słonecznym, ku czerwoności? Rozw. Opadanie pary sodu w powłoce słonecznej.

510. Jakie jest rozproszenie promienia, przechodzącego ze szkła w powietrze pod małym kątem  $\alpha$ , skoro w. z. promieni: czerwonego i fioletowego  $= n_r$  i  $n_v$ ? Rozw. Ponieważ  $\alpha$  jest bardzo małe, przeto  $\beta_r = n_v \cdot \alpha$  zaś  $\beta_v = n_r \cdot \alpha$ ; a więc rozproszenie  $= \alpha(n_v - n_r)$ .

511. Jakie jest odchylenie promienia średniego czyli żółtego? Rozwiąz.  $\beta = n\alpha$ ; zatem  $\beta - \alpha = \alpha(n - 1)$ .

512. Dla czego iloraz  $(n_v - n_r) : (n - 1)$  nazywa się zdolnością rozpraszania? Rozw. Według zad. 510 i 511, wyrażenie to daje stały stosunek odchylenia średniego do rozproszenia.

513. Jaka jest zdolność rozpraszania flintglasu w zad. 502, jeżeli średni w. z. wynosi  $1,62$ ? Rozw.  $0,064$ ; dla krownnglasu  $0,033$ , wody  $0,035$ , kryształu górnego  $0,026$ , dyamentu  $0,038$ .

514. Jakie jest rozproszenie pryzmatu w przypuszczeniu, że kąty: łąiący A i padania  $\alpha$ , są małe? Rozw.  $(n_v - n_r)A$ .

515. Jakie jest rozproszenie pryzmatu dyamentowego przy kącie  $\lambda$ .  $10^\circ$ ? Rozw.  $(n_v - n_r) = 0,038 \cdot (n - 1) = 0,056$ ; rozproszenie zatem  $= 0,56^\circ$ .

516. Znaleźć wzór ogólny na rozproszenie pryzmatu, gdy  $\alpha$  i A nie są bardzo małe? Rozw. Fig. 140 daje:

$$\sin i'_v = \sin A \cdot \sqrt{(n_v^2 - \sin^2 i_v)} - \cos A \cdot \sin i_v.$$

Znajdziemy podobnie:

$$\sin i'_r = \sin A \cdot \sqrt{(n_r^2 - \sin^2 i_r)} - \cos A \cdot \sin i_r;$$

rozproszenie zatem jest  $i'_v - i'_r$ .

517. Jaki jest kąt łąiący  $A'$  pryzmatu flintglasowego, czyniącego achromatycznym pryzmat krownnglasowy w zad. 516? Znakowanie użyte w zad. 516

służy i dla pryzmatu z flintglasu, z tą różnicą, że zamiast małych liter wchodzi duże. Rozw. Powinno być:  $I'_v = I'_r$ , czyli  $\sin I'_v = \sin I'_r$ , a zatem

$$\sin A' \cdot \sqrt{(N_r^2 - \sin^2 I_r)} - \cos A' \cdot \sin I_r = \sin A' \cdot \sqrt{(N_v^2 - \sin^2 I_v)} - \cos A' \cdot \sin I_v,$$

albo

$$\operatorname{tg} A' \{ \sqrt{(N_v^2 - \sin^2 I_v)} - \sqrt{(N_r^2 - \sin^2 I_r)} \} = \sin I_v - \sin I_r.$$

Lecz kąty  $I_v$  i  $I_r$ , jako kąty padania na drugi pryzmat, przy złożeniu achromatycznym, powinny być równe kątom wyjścia  $i'_v$  i  $i'_r$  z pierwszego pryzmatu; wartości wstaw tych ostatnich kątów znaleźliśmy przy rozwiązywaniu zadania 216; wstawiając te wartości w ostatnie równanie, otrzymamy:

$$\begin{aligned} \operatorname{tg} A' \{ \sqrt{(N_v^2 - \sin^2 I_v)} - \sqrt{(N_r^2 - \sin^2 I_r)} \} &= \\ &= \sin A \{ \sqrt{(n_v^2 - \sin^2 i_v)} - \sqrt{(n^2 - \sin^2 i_r)} \}, \end{aligned}$$

z kądem nakoniec:

$$\operatorname{tg} A' = \frac{\sqrt{(n_v^2 - \sin^2 i)} - \sqrt{(n^2 - \sin^2 i)}}{\sqrt{(N^2 - \sin^2 I_r)} - \sqrt{(N_r^2 - \sin^2 I_r)}} \cdot \sin A,$$

gdzie  $i_v$  i  $i_r$ , jako kąty padania promieni fioletowych i czerwonych, oznaczone przez  $i$ , są sobie równe; podobnie  $I_v$  i  $I_r$  schodzą się z  $i'_v$  i  $i'_r$  w zad. 516.

518. Jeżeli w szczególności  $n_v = 1,55$ ,  $n_r = 1,53$ ,  $N_v = 1,67$ ,  $N_r = 1,63$ ,  $A = 50^\circ$ ,  $i = I = 50^\circ$ , jaki będzie kąt łamiący pryzmatu achromatycznego? Rozw.  $A' = 29^\circ 17'$ .

519. Na dwu-wypukłą soczewkę z flintglasu, o  $40^\circ$  promienia pada światło białe z punktu oddalonego na  $50^\circ$ ; gdzie przypadają punkta zejścia się promieni czerwonych i fioletowych? Wykładnik załamania podany w zadaniu 518. Rozw. Według wzoru (42),  $b'_v = 87^\circ$ ,  $b_v = 74^\circ$ .

520. W achromatycznym układzie soczewek, odległość ogniskowa wypukłej soczewki z krownnglasu tak się ma do odległości rozpraszania wklęsłej soczewki flintglasowej, jak zdolność rozpraszania krownnglasu do takiejże zdolności flintglasu; udowodnić to twierdzenie. Rozw. Niech te dwie odległości będą  $f'$  i  $f''$ , to trzeba najpierw okazać, że odległość ogniskowa układu soczewek  $f = \frac{f' f''}{f' - f''}$ , czyli że  $\frac{1}{f} = \frac{1}{f'} - \frac{1}{f''}$ . Wstawiając w to równanie wartość na  $f'$  i  $f''$  z zad. 297, tak dla czerwonych, jak dla fioletowych promieni, i pamiętając, że  $\frac{1}{f}$  z przyczyny achromatyzmu, dla obu barw winna mieć tę samą wartość, otrzymamy wzór żądany.

521. Niech średnica przedmiotu wynosi  $d$ , oddalenie jego od oka  $= a$ , odległość punktu skrzyżowania od rogówki  $= b$ , od siatkówki  $= c$ ; jaki jest kąt widzenia i średnica obrazu na siatkówce? Rozw.  $\sin \frac{\alpha}{2} = \frac{d}{2(a+b)}$ ;  $x = \frac{cd}{a+b}$ .

522. Jakie są: kąt widzenia i obrazek siatkówki, gdy  $a = 120^\circ$ ,  $d = 4^\circ$ ,  $b = 10^m$ ,  $c = 14^m$ ? Rozw.  $\alpha = 1^\circ 53' 38''$ ;  $x = 0,46^m$ .

523. Jeżeli przy umiarkowanym oświetleniu najmniejszy widzialny obrazek na siatkówce powinien wypełniać całkowicie jeden czopek plamy żółtej, (średnica podług najnowszych pomiarów Maxa Schultze'go  $= 0,0025^{\text{mm}}$ ), pytanie ile razy oddalenie przedmiotu może wtedy przewyższać jego wysokość? Rozwiązanie. 5600.

524. W jakim oddaleniu nikłaby wtedy dla oka nitka pajęczna,  $d = \frac{1}{500}^{\text{mm}}$ ? Rozw.  $11^{\text{mm}}$ .

525. W jakim oddaleniu możnaby jeszcze widzieć człowieka, wysokiego na  $1,6^{\text{m}}$ ? Rozw.  $8960^{\text{m}}$ .

526. Jakiej wielkości są najmniejsze przedmioty na księżycu, dostrzegane gołym okiem? Rozw. 9 m.

527. Jaki jest kąt widzenia dla nitki ciemnej, o średnicy  $= 0,002^{\text{mm}}$ , którą widać jeszcze w odległości  $20^{\circ}$ ? Rozw.  $9''$ .

528. Dla czego przez mały otwór widać blizki przedmiot wyraźniej, niż bezpośrednio? Rozw. Z przyczyny mniejszego koła rozproszenia; wyjaśnienie.

529. Dla czego jednym okiem widzimy przez dwa otwory przedmiot blizki podwójnie? Rozw. Ponieważ przedmiot ten leży przed punktem blizkim; wyjaśnienie.

530. W jakiej odległości przedmiot ten wydaje się, po raz pierwszy, pojedynczym? Rozw. W punkcie blizkim  $4-5''$ .

531. Gdzie go widać pojedynczo i wyraźnie? Rozw. W odległości wyraźnego widzenia  $25^{\circ}$ .

532. Dla oka hypermetropijnego, którego punkt blizki przypada w  $20''$  wyznaczyć okular wypukły, pozwalający widzieć przedmioty w odległości  $10''$ . Rozw. Pomijając odległość okularu od oka, mamy:

$$\frac{1}{10} - \frac{1}{20} = \frac{1}{f},$$

ząd  $f = 20''$ .

533. Oznaczyć odl. og. okularu wklęsłego dla oka brachymetropijnego, którego punkt odległy jest  $30''$ , tak aby oko to mogło widzieć przedmioty w od-

daleni  $50''$ . Rozw.  $\frac{1}{30} - \frac{1}{50} = \frac{1}{f}$ , ząd  $f = 75''$ .

534. Jeżeli ogólnie punkt blizki  $= b$ , odległość przedmiotu  $= d$ , oddalenie okularu od oka  $= a$ , jakie jest  $f$ ? Rozw.

$$f = \frac{db - a(d + b) + a^2}{b - d}.$$

Opuszczając  $a$ :

$$f = \frac{db}{b - d}.$$

535. Jakie powiększenie przedstawia lupa o  $2''$  odległości ogniskowej, oku krótkowidzącemu (myopijnemu), którego odległość dokładnego widzenia wynosi  $4''$ , i oku presyopijnemu, którego odległość dokładnego widzenia  $= 30''$ ? Rozw. 3 i 16.

536. Jakie powiększenie daje lupa o  $8^m$  odległości ogniskowej, gdy odległość dokładnego widzenia wynosi  $25^c$ ? Rozw. 32.

537. Jaka jest odległość ogniskowa lupy, przedstawiającej oku emmetropijnemu powiększenie 80-krotne? Rozw.  $3,16^m$ .

538. Dwa szkła lupy podwójnej są odległe od siebie na  $m$ ; jeżeli ich odległości ogniskowe są  $f'$  i  $f''$ , jaka jest odległość ogniskowa połączenia? Rozw.

$$f = \frac{f'(f'' - m')}{(f' + f'' - m)}$$

539. Jaka jest odległość ogniskowa gdy obie soczewki stykają się? Rozw.

$$f = \frac{f' f''}{f' + f''}$$

540. Jakie powiększenie daje lupa podwójna, której soczewki stykają się z sobą i mają odległości ogniskowe 5 i  $8''$ ? Rozw. 3,6.

541. Jakie okulary powinien włożyć nurek, aby w wodzie widział wyraźnie w odległości  $10''$ , jeżeli wykładniki załamania wody (oko) i szkła są:  $n = \frac{4}{3}$  i  $n' = \frac{3}{2}$ ? Rozw.

$$\left(\frac{n'}{n} - 1\right) \frac{2}{r} = \frac{1}{b} + \frac{1}{d};$$

$$\text{zład} \quad r = \frac{2(n' - n)bd}{n(b + d)}$$

$b$  oznacza tu oddalenie siatkówki od soczewki, równe  $1''$ ,  $d = 10''$ ; zatem  $r = \frac{5}{22}''$ .

542. Jakie powiększenie daje mikroskop, którego odl. og. są  $f'$  i  $f''$ , odległość wyraźnego widzenia  $b$ , a odległość przedmiotu od obiektywy  $d$ ? Rozw.

Powiększenie sprawione przez obiektywę wynosi  $\frac{f'}{d - f'}$ ; przez okular  $\frac{b + f''}{f''}$ ; więc

$$\text{całkowite powiększenie} = \frac{f'(b + f'')}{(d - f')f''}$$

543. Jakie powiększenie daje mikroskop, gdy  $f' = 0,2''$ ,  $f'' = 1''$ ,  $b = 10''$  i  $d = 0,201''$ ? Rozw. 2200.

544. Jakie są: powiększenie, długość i pole widzenia lunety Galileusza, jeżeli jej obiektywa ma  $18^c$  odl. og., a okular  $2^c$ ? Rozw. 9,  $16^c$ , oraz  $64'26''$ ; średnica źrenicy przyjmuje się tu równą  $3^m$ ; wtedy styczna połowy pola widzenia  $= 0,5 \cdot 0,3 : (18 - 2)$ .

545. Oznaczyć powiększenie, długość i pole widzenia lunety astronomicznej, której obiektywa ma  $4^m$ , a okular  $2^c$  odl. ogn.? Rozwiąz. 200,  $4,02^m$  i  $10' 14''$ ; średnica okularu przyjmuje się równą  $0,6$  odl. og. okularu.

## 8. Nauka o interferencyi i polaryzacji światła.

## OPTYKA TEORETYCZNA.

368.

1. **Interferencya światła** (Grimaldi 1665, Young 1801). Interferencya obejmuje także zjawiska, w których przy zejściu się licznych promieni świetlnych, powstaje na pewnych miejscach zniesienie lub osłabienie, na innych zaś — wzmocnienie natężenia światła. Może to mieć miejsce wtedy tylko, gdy promienie padają na siebie, lub gdy są od siebie równoległe, lub też, gdy biegnąc obok siebie, są bardzo mało do siebie nachylone (p. 226., 227 i 228), czyli wtedy, gdy kierunki drgań są do siebie równoległe lub prawie równoległe. Gdzie różnica faz promieni wynosi parzystą liczbę półdługości fal, tam zachodzi wzmocnienie natężenia światła; wtedy bowiem punkta wyjścia dwóch promieni fal padają na siebie, albo są od siebie oddalone na 1, 2, 3.... długości fali; wszystkie atomy zatem otrzymują od jednej fali ten sam rodzaj ruchu co od drugiej, doznają więc wzmocnienia ruchu. Gdzie różnica faz wynosi nieparzystą liczbę długości półfal, tam ma miejsce osłabienie, lub w razie równości ruchów, zniesienie natężenia światła; tam bowiem punkta wyjścia dwóch promieni fal są od siebie odległe o  $\frac{1}{2}$ ,  $\frac{3}{2}$ ,  $\frac{5}{2}$ ,... długości fali; druga połowa pierwszej fali pada na pierwszą połowę drugiej, wszystkie więc atomy otrzymują od jednej fali ruch wprost przeciwny ruchowi udzielanemu im przez falę drugą, doznają zatem osłabienia lub zniesienia ruchu. Twierdzenia te zostały już udowodnione matematycznie w 226. Oczywiście, odnoszą się one tylko do fal równej długości, czyli do promieni jednorodnych, tej samej barwy.

Doświadczenie interferencyjne Grimaldi'ego było następujące: Wpuścił on światło, przez dwa bardzo bliskie sobie otwory w okiennicy, do ciemnego pokoju i ujął wiązki świetlne na ekran; powstały skutkiem tego znane dwa widma słoneczne, pokrywające się w części. Zamiast większej jasności w miejscu wzajemnego pokrywania się, zauważył Grimaldi paski ciemne i jasne, kolejno po sobie następujące. Young'owi dopiero (1802) udało się wyjaśnić to zjawisko, za pomocą interferencyi fal świetlnych. Fresnel (1820) podał nowe doświadczenia, stwierdzające interferencyę. W sławnem swem doświadczeniu ze zwierciadłami puścił on wąską świetlną wiązkę jednorodnych promieni, na dwa zwierciadła nachylone do siebie pod kątem prawie  $180^\circ$ ; jako zwierciadeł używał tafel metalowych wypolerowanych, lub zwierciadeł szklanych poczernionych; wiązka promieni padała blisko wspólnej krawędzi zwierciadeł. Dwie wiązki świetlne odbite, rozchodziły się bardzo mało i szły jedna obok drugiej. Po ujęciu ich na ekran, ujrzał Fresnel, między dwoma obrazami, paski kolejno jasne i ciemne, które przy zakryciu jednego zwierciadła, zaraz zniknęły. Fresnel używał światła różnych barw widmowych i znalazł paski interferencyjne najszerszemi dla światła czerwonego, a najwęższemi dla fioletowego. Wyjaśnił on to zjawisko roz-

małą długością fal różnych barw; środek a (fig. 171) otrzymuje od obu zwierciadeł promienie ia i i'a; oba te promienie odbite, są sobie równe co do długości, nie przedstawiają żadnych różnic w przebiegu, więc wzmacniają się: w środku, między dwoma obrazami, przypada pasek jasny. Dla punktu b przeciwnie, dwa promienie ib i i'b nie są sobie równe; jeżeli różnica ich długości wynosi  $\frac{1}{2}$  długości fali użytego jednorodnego światła, to w b pojawi się pasek ciemny. Dla punktu c różnica w przebiegu promieni ic i i'c jest jeszcze większa, i jeżeli wynosi całą długość fali, to w c jest znowu jasność i t. d.; wielkość ac a więc

i przestrzeń zajmowana przez paski jasne i ciemne zależy widocznie od długości fali światła; różnica między promieniami przy przejściu od a do b będzie tem wcześniej równą połowie długości fali, im mniejsza jest długość fali; ciemne b będzie tem bliżej a, im długość fal jest mniejsza: paski fioletowe zatem są węższe od czerwonych. Przy użyciu światła złożonego, w b np. światło fioletowe już zgaśnie, gdy czerwone i barwy pozostałe będą jeszcze zachodzić; i odwrotnie, gdy w c zniknie światło czerwone, to fioletowe wraz z innymi barwami znów się tam wynurzy; wtedy więc na wszystkich miejscach zachodzą barwy mieszane. Przy użyciu światła różnorodnego, powstaje zatem w środku między dwoma obrazami pasek jasny, przechodzący w oba obrazy przez barwne paski interferencyjne. Ponieważ różne barwy posiadają odmienne siły świecenia, przeto i przy świetle niejednorodnym pojawia się również kolejne następstwo pasków jasnych i ciemnych, szczególnie w ten sposób, gdy całe pole obrazu jest bardzo małe, co się zgadza ze wskazaniem Grimaldi'ego. Ohm (1840) wykonał to samo doświadczenie za

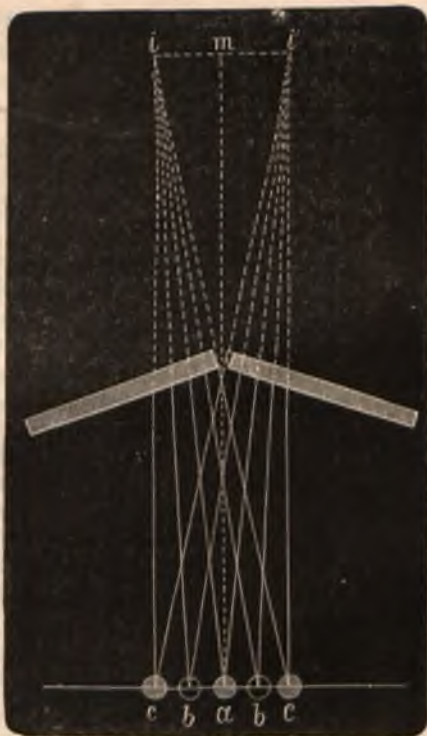


Fig. 171.

pomocą pryzmatu interferencyjnego, którego dwie ściany boczne tworzyły kąt bardzo rozwarty. Z szerokości pasków interferencyjnych można obliczyć długość fali i liczbę drgań dla różnych barw. Jeżeli różnicę przebiegu promieni oznaczymy przez  $d$ , a długość fali przez  $\lambda$ , to w razie interferencji musi zachodzić związek:  $d = \frac{1}{2}n \cdot \lambda$ , gdzie  $n$  oznacza liczbę nieparzystą dla promieni ciemnych, a parzystą dla jasnych. Jeżeli nadto oznaczymy  $ii' = x$ ,  $am = y$  i  $a, b$ , szerokość paska,  $= \beta$ , to będzie:

$$ib = \sqrt{y^2 + (\frac{1}{2}x - \beta)^2}, \quad i'b = \sqrt{y^2 + (\frac{1}{2}x + \beta)^2}.$$

Rozwijając oba pierwiastki i opuszczając wyższe potęgi  $\beta$  i  $x$  z przyczyny ich małości, wypadnie:

$$d = i'b - ib = \frac{x\beta}{y}$$

Zakładając, że dwie wartości  $d$  są sobie równe, otrzymamy:

$$\beta = \frac{\frac{1}{2}n \cdot ly}{x}$$

We wzorze tym trzeba opuścić  $\frac{1}{2}n$  wtedy, gdy chodzi o oddalenie dwóch pasków sąsiednich, wtenczas bowiem liczba całkowitych pół-fal  $= 1$ ; zatem

$$\beta = \frac{ly}{x},$$

$$\text{zład } l = \frac{\beta x}{y}$$

Pierwsze równanie wskazuje, że szerokość pasków jest w stosunku prostym do długości fal, drugie zaś pozwala obliczyć długość fali ze znanych: szerokości paska, oddalenia od siebie obrazów za zwierciadłami i odległości obrazów od ekranu; to jest pierwsza metoda, za pomocą której znaleźć można przytaczane tak często liczby drgań. Nie zbadano dotąd co się dzieje ze światłem zniesionem przez interferencję; prawdopodobnie zamienia się ono w ciepło, może w promienie chemiczne. Wrede (1835) wyjaśnił pochłonięcia interferencyjne innym sposobem, który jednak ustąpić musiał wyjaśnieniu tego zjawiska przenoszeniem się eteru na molekuly ciał. Barwy: perłowej macicy i guzików irryzujących, należą także do barw interferencyjnych. Ciała tęczowo błyszczące mają powierzchnię nadzwyczaj delikatnie żłobkową. Promienie świetlne padające na taką powierzchnię odbijają się od powierzchni żłobków i od wyniesień między żłobkami; promienie odbite od pierwszych są spóźnione w fazie względem promieni odbitych od drugich; ta zatem barwa, dla której różnica faz wynosi  $\frac{1}{2}$  długości fali, zostaje zniesioną, inne zaś — wzmocnione; wynikiem tego jest barwne odbicie światła białego. Nadanie innego kierunku powierzchni błyszczącej pociąga za sobą zmianę kierunku promieni odbitych, które w tem drugim położeniu mogą być więcej lub mniej nachylenemi do powierzchni; przewyżka zatem drogi dla promienia odbitego od żłobka, nad drogą promienia odbitego od wyniesienia zwiększa się lub zmniejsza i wynosi teraz  $\frac{1}{2}$  długości fali już dla innej barwy; odmienne więc od poprzednich barwy zostaną zniesione lub wzmocnione; skutkiem tego zachodzić musi zmiana barwy powierzchni. Brewster odcisnął w laku pieczętarskim perłową macicę, niby pieczętkę, i otrzymał na powierzchni laku odcisniętej odbłask perłowej macicy. Guziki irryzujące przedstawiają na swych powierzchniach nader subtelne układy żłobków o różnych kierunkach, dają zatem rozmaite barwy.



ją się barwnymi w świetle odbitem i przepuszczonem; barwy zmieniają się z grubością warstw. Zjawiska te zauważył zapewne każdy po bańkach mydlanych, na cienkich warstewkach oliwy płynących po wodzie, na starych szybach, na utlenionych powierzchniach metalicznych, na kulach szklanych, wydymanych aż do rozprysnięcia się, na przerwach w kryształach i szkłe, zawierających w sobie cienkie warstewki powietrza. Newton otrzymał barwy blaszkowe w postaci pierścieni, umieszczając na równej tafli szklanej soczewkę o bardzo małej krzywiznie (40—60' promienia); między taflą a soczewką tworzyła się bardzo cienka, pierścieniowa warstwa powietrza, grubiejąca w miarę oddalania się od punktu zetknięcia. Używając do tego doświadczenia światła jednorodnego, otrzymuje się kolejno pierścienie barwne i ciemne, okrężające plamkę ciemną. Pierścienie jasne i ciemne są jednakowej szerokości wtenczas, gdy szkło położone na tafli nie jest krzywe, lecz gdy od punktu zetknięcia podnosi się prostolinijnie, gdy zatem grubość warstwy powietrza jest proporcjonalną do jej oddalenia od punktu zetknięcia się; jeżeli jest krzywe, to pierścienie są coraz szersze. Grubości warstw powietrza na miejscach jasnych, są zawsze do siebie w stosunku  $1 : 3 : 5 : 7 : \dots$ , a na miejscach ciemnych, w stosunku  $0 : 2 : 4 : \dots$ . Pierścienie jasne przedstawiają odmienne szerokości dla światła jednorodnych, lecz różnej natury: dla światła jednorodnego czerwonego są najszersze, dla fioletowego najwęższe. Przy świetle niejednorodnym miejsce ciemne wydaje się otoczonem pierścieniami różnobarwnymi; ponieważ różne barwy posiadają odmienne siły świecenia, przeto i w tym razie paski jaśniejsze i ciemniejsze zdają się kolejno po sobie następować; barwy pierwszego porządku, zawarte między miejscem ciemnym a pierwszym ciemnym promieniem są; niebieskawo-biała, żółtawo-biała, czerwona; 2-go porządku: fioletowa, niebieska, żółta, czerwona; 3-go porządku: purpurowa, niebieska, zielona, ciemno-czerwona.

Young podał wytłumaczenie tych zjawisk na zasadzie teoryi fal. Promienie padające na blaszkę cienką zostają odbite od jej powierzchni górnej i dolnej; promienie odbite od obu tych powierzchni, padające na siebie lub bardzo siebie blizkie, skutkiem interferencji bądź znoszą się, bądź wzmacniają się, stosownie do tego, czy promienie odbite od powierzchni dolnej z promieniami odbitemi od powierzchni górnej znajdują się w fazie przeciwnej lub tej samej, co znów zależy od grubości warstwy. Przytem zauważyć trzeba, że jedno odbicie zachodzi w cieple stałym, drugie—w powietrzu, że zatem przy pierwszym odbiciu, nowy ośrodek jest gęstszy od dawnego, że według 231, fala odbita jest przesunięta od padającej o połowę długości fali, co nie ma miejsca przy odbiciu w powietrzu. Gdzie blaszka i soczewka stykają się z sobą, w a (fig. 172), tam światło od dolnej powierzchni b c soczewki zostaje odbite w powietrze, lecz i drugie odbicie zachodzi także od górnej powierzchni blaszki d c, zatem od szkła. Jakkolwiek punkta wyjścia obu promieni odbitych padają w a, to jednak drugi promień opóźnia się

względem pierwszego o połowę długości fali; oba więc promienie muszą znosić się w miejscu zetknięcia; w a musi być miejsce ciemne. Jeżeli przy f grubość warstwy powietrza fh, czyli odwołanie obu powierzchni odbijających wynosi  $\frac{1}{4}$  długości fali, np. dla światła czerwonego, to promień odbijający się od powierzchni dolnej musi przebyć drogę fh, zanim złączy się z promieniem gh; różni się więc od ostatniego o  $\frac{1}{2}$  długości fali, a ponieważ skutkiem odbicia przy ośrodku gęstszym zostaje przesunięty jeszcze o  $\frac{1}{2}$  długości fali, więc całkowita różnica faz wynosi całą długość fali: promień fh wzmacnia promień gh, a zatem miejsce przejścia tych promieni jest jasne. To samo działanie będzie zachodzić w miejscach, gdzie grubość warstwy powietrza wynosi  $\frac{3}{4}$ ,  $\frac{5}{4}$ ,  $\frac{7}{4}$  . . . długości fali; z tej przyczyny grubości warstw w miejscach jasnych mają się do siebie jak liczby nieparzyste. Jeżeli w i grubość warstwy wynosi  $\frac{2}{4}$  długości fali, to promień odbity od powierzchni dolnej opóźni się od górnego o  $\frac{1}{4}$  = 1 długości fali, z powodu 2 razy przebytej drogi ik; oprócz tego z przyczyny odbicia się od

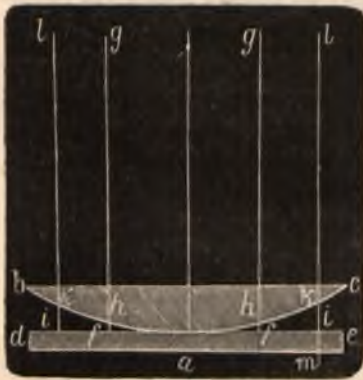


Fig. 172.

gęstszego środka, zostanie on przesunięty jeszcze o  $\frac{1}{2}$  długości fali; całkowita różnica faz wyniesie zatem  $\frac{3}{2}$  długości fali, skutkiem czego nastąpi zniesienie światła.— To zniesienie będzie miało miejsce także przy grubościach wynoszących  $\frac{1}{4}$ ,  $\frac{6}{4}$ , . . . długości fali; grubości warstw powietrza na miejscach ciemnych mają się do siebie jak liczby parzyste. Ponieważ dla światła fioletowego, z powodu mniejszej długości fali, punkt f, w którym  $fh = \frac{1}{4}$  długości fali, jest bliżej punktu a niż dla światła czerwonego, ponieważ nadto toż samo zachodzi w punkcie i, przeto średnice i szerokości pierścieni dla światła fioletowego muszą być mniejsze od średnic i szerokości pierścieni dla światła czerwonego; inne

barwy muszą przedstawiać wymiary pierścieni pośrednie. Używając zatem światła białego, otrzymamy bezpośrednio wokół ciemnego miejsca pierścienie fioletowe i niebieskie, mieszające się z sobą na niebiesko-białe; dalej, ze zmieszania się barw: żółtej, zielonej i pomarańczowej utworzy się barwa żółta, która z przyczyny niknącego powoli błękitu i wynurzającej się czerwoności, musi ustąpić tej ostatniej. W świetle przepuszczonym, przy użyciu światła jednorodnego, jasnymi wydają się te pierścienie, które w świetle odbitem były ciemne i odwrotnie; przy użyciu światła białego, pierścienie w świetle przepuszczonym są dopełniającymi względem pierścieni w świetle odbitem; pierścienie te jednak są więcej matowe niż pierścienie światła odbitego. Odwrotność zjawisk wyjaśnia się w sposób następujący: Gdy część wiązki świetlnej li przechodzi w m przez płatkę dolną, to przypada razem z inną częścią, która została odbita przy i, i przy k, i która również względem pierwszej części jest opóźniona o  $\frac{1}{4}$  długości fali; lecz ta druga część odbiła się nadto dwa razy od środka gęstszego, doznała zatem 2 razy przesunięcia o  $\frac{1}{2}$  długości fali; ostatecznie więc, światło przepuszczone różni się od odbitego zawsze tylko o  $\frac{1}{2}$  długości fali; barwa, która w ostatnim

zagasła, zostaje przy pierwszym wzmocniona i odwrotnie. Tu nasuwa się druga metoda oznaczania długości fal różnych barw i liczb drgań. Można bowiem obliczyć grubość pierścieni  $hf$ ,  $ki$ , . . . z wiadomej krzywizny soczewki i z promieni  $af$ ,  $ai$ , . . . Grubości te są  $\frac{1}{4}$ ,  $\frac{3}{4}$ , . . . długości fali użytego jednorodnego światła; łatwo więc oznaczyć długość fali; często przytaczane liczby drgań otrzymujemy zatem po raz drugi, a wielkość ich wypada taka sama jak z doświadczenia Fresnel'a. Barwy cienkich blaszek prowadzą już do wytłumaczenia barw łuszczyk rybich, barw Nobili'ego na naczyniach metalowych i innych barw przytoczonych na wstępie tego rozdziału. Fizeau (1866) użył barw blaszkowych do studyów nad rozszerzalnością kryształów, spowodowaną ciepłem. Clausius (1849) wytłumaczył błękitny kolor nieba uwzględnieniem cienkich warstewek pęcherzyków wody, zawieszonych w powietrzu; te delikatne pęcherzyki wytwarzają w świetle odbitem błękit pierwszego porządku, a światłu przepuszczonemu pozostawiają dopełniającą barwę pomarańczową; ta ostatnia jest przyczyną zorzy porannej i wieczornej, jej też zawdzięczają zabarwienie czerwone słońce i księżyc przy poziomie. Brücke (1852) okazał, że wszystkie ośrodki mętne wydają się skutkiem interferencji niebieskimi, przed tłem ciemnym, w świetle odbitem, a przed tłem jasnym, w świetle przepuszczonem, wydają się czerwonymi. Według Brücke'go, ośrodek mętny jest ciałem przezroczystym, zawierającym w sobie cząstki innego ośrodka, w którym światło rozchodzi się prędzej lub wolniej; światło wnikające w jedną z takich cząstek odbija się od powierzchni przedowej i tylnej, a samo gaśnie skutkiem tych odbić; gdyby cząstki były nieskończenie małe, ośrodek mętny byłby ciemnym. Lecz ponieważ cząstki wzmiankowane nie są nieskończenie małe, przeto nie całe światło niknie; w świetle odbitem pozostaje jeszcze fiolet, błękit i zieloność, które łączą się z sobą na barwę niebieską, w świetle zaś przechodzącem pozostaje dopełniająca barwa pomarańczowa.

**Uginanie się albo diffrakcja światła** (Grimaldi 1665, Fresnel 1826, 370. Schwerd 1835). Przez uginanie rozumiemy, mające związek z interferencją odchylenie się światła za brzegiem ciała nieprzezroczystego, gdzie właśnie skutkiem interferencji powstają paski ciemne i jasne. Już Grimaldi zauważył, że obrazek słoneczny w kamerze optycznej jest cokolwiek większy, niżby powinien być według wykreślenia geometrycznego, i że jest otoczony słabymi pierścieniami barwnymi. Newton wpuścił światło jednorodne przez wąską szparę i rozróżnił, po obu stronach paska świetlnego, paseczki jasne i ciemne, których wyraźność malała powoli w miarę oddalenia obrazu od szpary. Paseczki są najszersze przy świetle czerwonym, najwęższe przy fioletem; stają się także szerszemi wtedy, gdy szpara staje się węższą. W świetle słonecznym, po obu stronach szpary widać znów paski barwne. Fresnel podał objaśnienie matematyczne zjawisk uginania, na zasadzie teorii fal; Fraunhofer i Schwerd rozciągnęli to objaśnienie do otworów złożonych, najrozmaitszego kształtu; wykrywali oni często różne rodzaje zjawisk uginania w pierw jako wyniki rachunku a dopiero później przekonywali się o prawdzie

swych wyników za pomocą doświadczenia, które stwierdzało zawsze ich wywody teoretyczne.

Sposób wykonywania doświadczeń bywa rozmaity: Wpuszcza się światło słoneczne przez szparę w okiennicy, albo światło lampy przez szparę zrobioną w ciemnej rurze blaszanej, otaczającej lampę, do ciemnego pokoju; wiązkę taką przeprowadza się przez szparę ekranu, równoległą do pierwszej i ujmuje się ją na inny ekran ustawiony w znacznej odległości; na tym drugim ekranie pojawia się obraz szpary, a po obu jego stronach paski jasne i ciemne, jeżeli światło jest jednorodne; przy świetle niejednorodnym paski posiadają różne barwy. Fraunhofer umieścił przed drugą szparą, czyli przed otworem uginającym, obiektywę lunety, przez którą patrzył w kierunku szpary pierwszej. Schwersd używał za źródło światła punktu jasnego, zrobionego w poczernionem szkłe zegarka lub guzika metalowego, a także linii świetlnej w poczernionej wewnątrz rurce, i patrzył wprost przez otwór uginania w kierunku źródła światła. Otwory powinny być wtedy bardzo wąskie, mogą mieć też delikatne nacięcia, porobione za pomocą nakładek z cynfolji. Gdy otwór uginający jest równoległobokiem, to wydaje się otoczonym licznymi równoległobokami jasnymi, we wszystkich kierunkach; przez otwór trójkątny widać gwiazdę sześciopromienną. Przez dwie szpary równoległe, obraz wydaje się prawie tak, jak przez jedną szparę, z tą tylko różnicą, że jest poprzerzynany licznymi linijami ciemnymi w kierunku szerokości. Przez dwa otwory kołowe, obraz wydaje się tak, jak przez jedno koło, lecz jest przecięty paskami ciemnymi, prostopadłymi do linii łączącej oba otwory; przez 4 otwory widać jeszcze więcej linii ciemnych, prostopadłych do poprzednich, tak że cały obraz wydaje się jakby pokratkowanym. Przez kratę sztabkową widać, przy świetle jednorodnym, linię środkową jasną i wiele linii bocznych różnych sobie, w różnych odstępach; są one bliżej środka przy świetle fioletowem niż przy czerwonym; używając światła białego otrzymujemy po obu stronach linii świetlnej widma więcej prawidłowe od pryzmatycznych, przedstawiające nawet linie Fraunhofer'a. Dwie kraty skrzyżowane dają wspaniały obraz, w którym punkt świetlny jest otoczony ze wszystkich stron widmami.

**Wyjaśnienie uginania.** W celu wyjaśnienia zjawisk uginania światła, przynajmniej dla przypadku najprostszego, dla szpary, musimy zbadać interferencję takich dwóch promieni, których różnica faz nie jest parzystą lub nieparzystą liczbą długości półfal, lecz wynosi mniej lub więcej. Użyjemy wiadomości z 226; znaleźliśmy tam, że dalekość drgania atomu, pobudzanego współcześnie przez dwie fale, wyraża się wzorem:

$$R = \sqrt{r^2 + r_1^2 + 2rr_1 \cos 2\pi \frac{a}{l}}$$

gdzie  $r$  i  $r_1$  są amplitudami pojedynczemi,  $l$  długość fali, a zaś, przedział między dwoma punktami wzbudzającymi fale, w kierunku promienia. Ponieważ rozmaite punkta oświetlonej szpary posiadają jednakowe natężenia, a przy świetle jednorodnym, jednakowe amplitudy, przeto  $r_1 = r$ , zatem:

$$R = r \sqrt{2 + 2\cos 2\pi \frac{a}{l}}$$

Z zasady Huyghens'a (230) wydeda, że z każdego punktu świetlnego szpary wychodzą fale świetlne, zatem i promienie, we wszystkich kierunkach; każdy więc punkt ekranu lub siatkówki doznaje wpływu promieni idących od wszystkich punktów szpary; promienie te, z powodu znacznego oddalenia szpary w stosunku do jej małości, mogą być uważane za równoległe. Niech przeto (fig. 173) obdc, obhg, obfe przedstawiają wiązki świetlne, dla pojedynczych punktów ekranu, i dajmy, że drgania eteru w ob, w przecięciu poprzecznym szpary, są w jednakowych fazach. Wewnątrz jednej takiej wiązki, promienie mogą działać wzajemnie na siebie jedynie w tych miejscach, które znajdują się na prostopadłej do kierunku promienia, drgania bowiem eteru są prostopadłe do promienia. (Odwrotnie, z faktu, że takie działania zachodzą, wynika prostopadłość kierunku drgań eteru do kierunku promienia).

Takimi miejscami działającymi są np. w wiązce obdc punkta linii ik, w wiązce obfe punkta linii om i nq, w wiązce obhg punkta linii bp i uv. W ik wszystkie promienie są w tej samej fazie, lecz w om i nq, równie jak w bp i uv mają fazy różne. Różnica faz zależy od długości bm i op, a długości te są z warunkowane pochyleniem promieni. Jeżeli np.  $bm = \frac{1}{2}$  długości fali, to każde 2-je z 16-tu obok siebie idących wiązek, mają różnicę faz  $= \frac{1}{32}l$ . W naszym wzorze na R, a oznacza (p. 226) oddalenie od siebie dwóch punktów

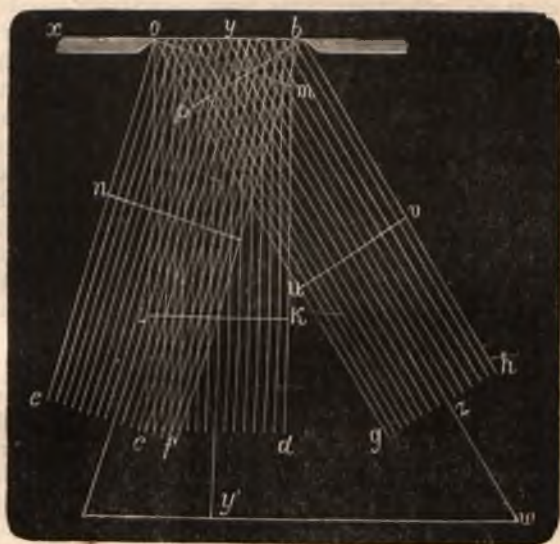


Fig. 173.

wzbudzających fale w kierunku promienia; między o i b przedział takich dwóch punktów wynosi  $\frac{1}{16}$  szpary; cała szpara odrzucona na promień i zmierzona w jego kierunku wynosi  $bm = \frac{1}{2}$  długości fali; zatem a, dla każdego dwóch sąsiadnych promieni,  $= \frac{1}{32}l$ , czyli wogóle równa się różnicy faz. Ponieważ w wiązce obdc różnica faz jest  $= 0$ , przeto także  $a=0$ ; zatem  $R=2r$ , t. j. promienie działają na siebie wzmacniająco; punkta zostające pod wpływem wiązki prostopadłej, mają największe natężenie światła. Gdzie promienie padają ukośnie i tak, że różnica faz promieni brzeżnych, jak np. w obfe wynosi  $\frac{1}{2}$  długości fali, tam  $a = \frac{1}{32}l$ , zatem:

$$R = r \sqrt{2 + 2 \cos \left( \frac{36}{32} \right)} = r \sqrt{3,962} = 1,97r.$$

W tej wiązce, której promienie wzajemnie na siebie działają, znoszą się wprawdzie promienie brzeżne, gdyż różnica ich faz wynosi  $\frac{1}{2}l$ , lecz dwa środkowe, dla których różnica faz jest tylko  $\frac{1}{32}l$ , wydają działanie prawie podwójne. Dwa inne promienie oboczne, dla których  $a = \frac{3}{32}l$ , dają:

$$R = r \sqrt{3,663} = 1,91 r;$$

działanie zatem każdego dwóch coraz bliższych brzegu promieni, staje się coraz mniejszem tak, że dla dwóch promieni brzeżnych przechodzi na 0. Chociaż działanie wiązki obfe nie jest równe działaniu wiązki ob dc, to jednak za brzegiem x o zachodzi pewne działanie świetlne; obraz szpary rozciąga się dalej, niż wskazuje wiązka środkowa, odpowiadająca wykreśleniu geometrycznemu; to rozszerzenie się jednak maleje powoli pod względem natężenia światła, a jak daleko rozciąga się, zobaczymy zaraz przy rozważaniu wiązki obhg, której kierunek jest tak ukośny, że różnica op w przebiegu promieni brzeżnych wynosi całą długość fali. Różnica między drogą przebytą przez promień środkowy yz, a drogą promienia brzeżnego bh równa się długości półfali, zatem dwa te promienie znoszą się; toż samo ma miejsce także dla promienia na lewo od yz i dla promienia na lewo od bh, gdyż różnica ich przebiegu wynosi również  $\frac{1}{2}l$ ; podobnie zachowują się: drugi promień na lewo od yz i drugi na lewo od bh; jednym słowem, każdy promień ma inny, sobie odpowiadający taki, który znosi jego działanie dla tego, że różnica ich faz wynosi  $\frac{1}{2}$  długości fali. Zatem punkt boczny obrazu szpary, taki, na który trafia wiązka obhg, jest ciemny; po obu stronach rozszerzonego obrazu szpary powstają paski ciemne, w których obraz gubi się zwolna. Przejdźmy teraz do wiązki (nienarysowanej na figurze), której promienie brzeżne przedstawiają różnicę faz równą  $\frac{3}{2}$  długości fali. Wiązka tę można rozłożyć łatwo na 3 inne; pierwszy promień pierwszej części wiązki i pierwszy promień drugiej różnią się od siebie o  $\frac{1}{2}l$ , znoszą się więc, równie jak dwa drugie, dwa trzecie i t. d.; krótko mówiąc, dwie wiązki cząstkowe znoszą się wzajemnie, a pozostaje tylko trzecia, której promienie brzeżne różnią się o  $\frac{1}{2}l$ , i która wywiera działanie równe  $\frac{1}{3}$  działania wiązki obfe. Po obu więc stronach pasków ciemnych występują paski jasne, przechodzące powoli w ciemne. Dalsze rozważanie przekonuje, że paski jasne i ciemne, coraz słabsze, kolejno następują po sobie. Im szpara jest węższa, tem ukośniejszym musi być kierunek wiązki, aby różnica faz jej promieni brzeżnych wyniosła  $\frac{1}{2}$  długości fali; paski więc są tem szersze, im szpara jest węższa. Kierunek wiązki sprowadzający taką różnicę faz musi być także tem większy, im większą jest długość fali użytego światła; światło czerwone zatem przedstawia paski najszersze. Przy użyciu światła białego, dla fioleto i błękitu musi zachodzić pasek jasny na tem miejscu, gdzie dla czerwoności występuje pierwszy pasek ciemny, gdyż fiolet i błękit osiągają różnicę faz równą  $\frac{3}{2}$  długości fali przy tej pochyłości wiązki, która światłu czerwonemu daje różnicę faz równą zaledwo 1 długości fali; gdzie zaś błękit i fiolet gasną, tam zachodzić musi zieloność i czerwoność. Przy użyciu zatem białego światła, tworzą się paski barwne po obu stronach obrazu białego. Zresztą, fiolet nie graniczy bezpośrednio z białym obrazem szpary, gdyż w tym ostatnim części składowe: czerwona i żółta są szersze od pozostałych; fiolet i błękit gasną już w tych miejscach, gdzie istnieją jeszcze: czerwoność żółtość i zieloność; biały obraz przechodzi zatem przez żółtość i czerwoność w błękit, po którym następują barwy pier-

ścieni Newtona. Tu znów nasuwa się trzeci sposób oznaczania liczb drgań; z podobieństwa bowiem trójkątów  $obp$  i  $ywy'$  (fig. 173) wypada:

$$yy' : y'w = bp : op.$$

$yy'$  jest znane, jako oddalenie ekranu od szpary,  $bp$  bez znacznego błędu może być przyjęte za równe szerokości szpary:  $y'w$  równa się połowie szerokości obrazu środkowego, rozciągającego się do środka pierwszego ciemnego paska; łatwo więc oznaczyć nieznaną ilość  $op$ , t. j. długość fali, a z tej obliczyć liczbę drgań.

Najgodniejszym uwagi jest *uginanie przez kratę sztabkową*, złożoną z wielu szpar równoległych. Już przy dwóch szparach tworzą się wyraźnie ciemne kreski w samym obrazie głównym szpary, gdyż na nim schodzą się takie promienie z obu szpar, które w pewnych miejscach różnią się od siebie o  $\frac{1}{2}$  długości fali, a więc wzajemnie znoszą się. Liczba linii ciemnych zwiększa się z liczbą szpar, a dla kraty linije te zlewają się razem jako pola ciemne, między którymi, przy świetle jednorodnym, powstają tylko pojedyncze linije jasne z środkową najjaśniejszą. Jak w obrazie zginania szpary, najbliżej obrazu głównego wynurza się fiolet w tych miejscach, w których czerwoność jeszcze jest wygaszona, tak też w obrazie uginania licznych szpar, czyli w diffrakcyjnym obrazie kraty, przy świetle niebieskiem, boczne linije jasne przypadają bliżej linji środkowej, niż przy świetle czerwonym. Jeżeli więc użytym zostało światło białe, to najbliżej obrazu środkowego przypadają części fioletowe, do których dalej przyłączają się barwy pozostałe. Tworzą się zatem, z obu stron, widma o barwach jednorodnych, kolejno powtarzające się, rozdzielone z początku polami ciemnymi, później zaś pokrywające się w części. Widma te są tem czystsze i wyraźniejsze, im liczba szpar jest większą, i im one są węższe; przy dostatecznej wąkości, można nawet rozpoznać linije Fraunhofer'a. Widma te różnią się tem od przyrmatycznych, że w pierwszych żółtość przypada w środku a przestrzenie zajmowane przez 7 barw są prawie sobie równe, gdy tymczasem przy załamaniu, promienie czerwone są zagęszczone a fioletowe przedstawiają znaczne rozszerzenie. Z odległości występujących tu linij Fraunhofer'a od obrazu głównego, z oddalenia ekranu od kraty i z oddalenia dwóch szpar od siebie, można znów obliczyć liczby drgań (metoda Eisenlohr'a 1856; znalazł on nawet za pomocą tej metody, długość fal najbardziej krańcowych, pozafioletowych promieni równą  $0,000355^{mm}$ ).

Za pomocą uginania można wyjaśnić barwy, które widać przy zmrzaniu oczów, barwy widziane przez muślin, krepeę i inne materye, jak również przez pióra ze skrzydełek i ogonków małych ptaków. Wspaniałych zjawisk dostarczają kraty szklane Norbert'a, szczególnie kraty kołowe. Pajęczyna, delikatne włosy wełniane, jedwabne i t. d. dają barwy uginania w świetle słonecznym.— Patrząc na światło przez tafłę szklaną posypaną pyłkiem czarnokwitu widać wokół światła barwy uginania; podobnie przedstawia się obraz zwierciadłowy na zapotniatej szybie. Niektórzy objaśniają także małe obwódki około słońca i księżyca przez uginanie się promieni światła przy brzegach pęcherzyków mgły.

**Podwójne załamanie światła** (Bartholin 1669, Huyghens 1691). Przez podwójne załamanie rozumiemy własność wielu ciał przezroczystych, mocą której promień w nie wchodzący rozkłada się na dwa promienie, odchylają-

371.

372.

ce się od kierunku pierwotnego. Własność tę posiadają kryształy wszystkich systemów, z wyjątkiem systemu regularnego, jak również szkła ściskane i niejednostajnie ogrzane lub oziębione. W kryształach systemu kwadratowego i sześciokątnego, jeden z promieni załamanych podlega prawom pojedynczego załamania i nazywa się promieniem zwyczajnym; drugi nie ulega tym prawom, wychodzi z płaszczyzny padania, ma w różnych kierunkach odmienne wykładniki załamania, uchyla się zatem raz więcej, raz mniej od promienia zwyczajnego; z tego powodu nazywa się on promieniem nadzwyczajnym. W wielu kryształach promień nadzwyczajny załamuje się mniej od zwyczajnego; takie kryształy noszą nazwę odjemnych; do nich należą: spat wapienny, turmalin, beryl, szafir, rubin. W innych kryształach zwanych dodatnimi, promień nadzwyczajny łamie się silniej od zwyczajnego; takimi są: kryształ górny, cyrkon, lód. Każdy z kryształów podwójnie łamiących przedstawia taki kierunek, w którym zachodzi tylko pojedyncze załamanie; kierunek ten nazywa się osią optyczną. Kryształy systemów kwadratowego i sześciokątnego są optycznie jednoosiowe, mają tylko jedną oś optyczną, która zgadza się z osią krystalograficzną główną. Kryształy systemów: rombicznego, klinorombicznego i klinoromboidalnego są dwuosio- we optycznie, posiadają bowiem dwa kierunki, w których ma miejsce pojedyncze załamanie światła. Te dwie osie mają rozmaite względem siebie nachylenia, np. w saetrze  $5^{\circ}$ , w gipsie  $57^{\circ}$ , w feldspacie  $54^{\circ}$ , w siarczanie żelaza  $90^{\circ}$ , i nie zostają w prostej zależności od osi krystalograficznych.

Spat islandzki przedstawia bardzo wyraźnie najprostsze zjawisko podwójnego załamania; przez romboedr tego ciała, położony na białym papierze z punktem czarnym, widać punkt ten podwójnie; wiązka świetlna, padająca na ten romboedr, przez otwór zrobiony w karcie leżącej na romboedrze, wydaje się rozszereżoną. Jeżeli dwa kąty tępsze takiego romboedru zostaną zeszlifowane prostopadle do linii je łączącej i jeżeli kryształ zostanie położony jednym ścięciem na punkt ciemny, to ten ostatni wyda się pojedynczym; promień ma w tym razie kierunek osi optycznej. Patrząc zaś przez te dwa ścięcia na przedmiot znajdujący się z boku, przedmiot ten wyda się znów podwójnym, oba jednak obrazy leżą wtedy w kierunku przedmiotu; toż samo ma miejsce, gdy kryształ jest tak oszlifowany, że powierzchnia oszlifowania jest równoległą do osi optycznej; w każdym innym razie jeden obraz leży na zewnątrz linii łączącej obraz drugi z przedmiotem, z kądem wypada, że w największej liczbie przypadków, jeden promień załamany wychodzi z płaszczyzny padania. Zeszlifowawszy należycie pryzmat spatu wapiennego tak, aby krawędź łamiąca była równoległą do osi optycznej, znajdziemy w. z. dwóch promieni równymi 1,654 i 1,483; w pryzmatach mających inne położenie krawędzi łamiącej względem osi optycznej, znajdziemy w. z. promienia najczęściej odchylanego, równym zawsze 1,654, a drugiego promienia większym od 1,483. Pryzmat, którego krawędź łamiąca jest prostopadłą do osi optycznej, daje, przy symetrycznym przejściu, jeden tylko promień załamany o w. z. 1,654;



przez taki pryzmat można widzieć jeden lub dwa obrazy, stosownie do tego, czy promienie wchodzą prostopadłe czy pochyło względem osi. Pryzmat kwarcu daje zawsze dla promienia mniej odchyłonego w. z. 1,548, a dla promienia więcej odchyłonego wartość między 1,548 i 1,558; drugi promień otrzymamy przepuszczając wiązkę światła prostopadłe do osi przez dwie powierzchnie kryształu górnego.

W celu wyjaśnienia podwójnego załamania należy zwrócić uwagę na powstawanie kryształów. W kryształach systemu regularnego główne wymiary są sobie równe, musiało więc zachodzić przy powstawaniu kryształu jednakowe nakładanie się we wszystkich kierunkach, przyciąganie samego zarodka kryształu i kryształu zwiększającego się musiało być równej wielkości we wszystkich kierunkach; atomy zatem musiały się ułożyć we wszystkich kierunkach z jednakowym zagęszczeniem, skutkiem czego i eter we wszystkich kierunkach otrzymał też samą gęstość. W kryształach systemu kwadratowego i sześciokątnego, w kierunku osi głównej musiał zachodzić przyrost większy lub mniejszy, niż w kierunkach do tej osi prostopadłych, w których, z przyczyny równości wymiarów, przyjąć należy przyrosty jednakowe; zatem w kierunku osi głównej gęstość eteru musi być większą lub mniejszą niż w kierunkach do tej osi prostopadłych, w których musi zachodzić jednakowa gęstość eteru. W podobny sposób można wyrozumować, że dla pozostałych systemów krystalograficznych, eter we wszystkich trzech kierunkach przedstawia odmienną gęstość. Przyjmując, że sprężystość eteru jest wszędzie ta sama, wypadnie, iż w systemie regularnym światło rozchodzi się we wszystkich kierunkach z jednakową prędkością, że w dwóch następujących systemach prędkość ta jest większą lub mniejszą w kierunku osi głównej, niż w kierunkach do tej osi prostopadłych, i że nakoniec w trzech ostatnich systemach prędkość ta jest odmienną dla każdej z trzech osi. Jedynie kryształy systemu regularnego są izotropijne, kryształy zaś innych systemów — anizotropijne. W spacie wapiennym np. gęstość eteru w kierunku osi głównej jest większa niż w kierunkach do niej prostopadłych, światło zatem rozchodzi się w pierwszym kierunku wolniej niż w innych, w których prędkości rozchodzenia się są sobie równe. Jeżeli więc promień światła idzie w kierunku osi głównej, to drgania jego, jako prostopadłe do osi głównej, mogą się rozchodzić we wszystkich kierunkach z równą prędkością, nie ulegają przeto rozkładowi, a promień idzie dalej według praw pojedynczego załamania. Lecz jeśli promień posiada inny kierunek, to każde drganie rozkłada się na dwa inne, gdyż składowa tego drgnięcia, prostopadła do osi głównej, rozchodzi się wolniej od składowej pozostałej; nawet wtedy, gdy promień jest prostopadły do osi głównej, zachodzą w nim drgania ukośne względem tej osi, gdyż drgania udzielają się we wszystkich kierunkach prostopadłych do promienia. W każdym więc razie, gdy promień nie ma kierunku osi głównej, pojedyncze drganie rozkłada się na dwa inne, z których jedno działa prostopadłe do osi głównej. Drganie to jest nie tylko prostopadłe do osi głównej, ale także i do kierunku promienia: jest więc prostopadłe do płaszczyzny wyznaczonej przez te dwie linie, do płaszczyzny przecięcia głównego; odnosi się to oczywiście do każdego drgania, wszystkie przeto drgania promienia są do siebie równoległe, promień jest polaryzowany, a jego drgania są prostopadłe do przecięcia głównego. Druga składowa każdego pierwotnego drgania musi być prostopadła do pierwszej, gdyż inaczej zawierałaby jeszcze jedną składową do pierwszej równoległą; każda więc druga składowa

musi leżeć na przecięciu głównem, a ponieważ i ona jest także prostopadłą do swego promienia, przeto wszystkie tego rodzaju składowe muszą być do siebie równoległe; zatem drugi promień jest również polaryzowany i prostopadły do pierwszego. Promienie powstałe z pierwszych składowych idą w kierunkach przedstawiających jednakową gęstość eteru, fala ich jest więc kulą  $abc$  (fig. 174), każdy z tych promieni załamuje się zwyczajnie. Wykładnik załamania jest zawsze równy promieniowi  $de$  fali kulistej dawnego ośrodka, podzielonemu przez promień  $df$  fali kulistej nowego ośrodka, jest zatem stały. Płaszczyzna załamania przypada razem z płaszczyzną padania, gdyż płaszczyzny styczne  $gf$  i  $ge$ , poprowadzone z jakiegokolwiek punktu do obu fal kulistych, dotykają obu kul w płaszczyźnie  $gef$ , schodzącej się z płaszczyzną padania. Fala drugich składowych jest powierzchnią sferoidy, t. j. takiej powierzchni, która powstaje przez obrót elipsy około osi małej; ta ostatnia przedstawia prędkość w kierunku osi optycznej, a oś wielka — prędkość w kierunku prostopadłym do osi optycznej. Sferoida ta musi zamykać w sobie falę kulistą pierwszych składowych, gdyż promień jej jest równy prędkości w kierunku osi optycznej; nadto sferoida musi być styczną do fali kulistej w nowym ośrodku, w punktach przecięcia się kuli z osią optyczną, gdyż w tym tylko kierunku prędkości oznaczone temi dwiema powierzchniami są sobie równe. Jeżeli więc  $db$  przedstawia oś optyczną, to  $hbkl$  będzie powierzchnią falową sferoidalną. Zgodnie ze znanem już wykreśleniem, otrzymujemy promień  $dk$  powstały z drugich składowych. Jest to promień nadzwyczajny; jego



Fig. 174.

wykładnik załamania zmienia się z kierunkiem promienia padającego; wykładnik ten bowiem jest równy stałemu promieniowi  $de$  dawnego ośrodka, podzielonemu przez wielkość zmienną  $dk$ ; wykładnik załamania jest największy wtedy, gdy  $dk = df$ , t. j. w kierunku osi optycznej; najmniejszy jest wtenczas, gdy promień jest prostopadły do osi optycznej. W tym razie promień nadzwyczajny leży także w płaszczyźnie padania, równie jak i w tych przypadkach, w których oś optyczna schodzi się z płaszczyzną padania, lub w których powierzchnia łamiąca kryształu jest prostopadłą do osi optycznej. We wszystkich innych przypadkach, płaszczyzna styczna  $gk$  dotyka sferoidy na zewnątrz płaszczyzny figury, na zewnątrz płaszczyzny padania, zatem promień nadzwyczajny wychodzi z płaszczyzny padania. Tak wyjaśniają się zjawiska podwójnego załamania dla kryształów odjemnych. W kryształach górnych i w innych kryształach dodatnych, prędkość światła w kierunku osi jest większa; fala kulista zamyka wtedy falę drugich składowych; ta druga fala jest w tym razie elipsoidą obrotową, czyli taką powierzchnią, która powstaje przez obrót elipsy około osi

wielkiej; ztąd wniesć już łatwo, że wykładnik załamania promienia nadzwyczajnego jest większy niż zwyczajnego.

Zjawiska podwójnego załamania w kryształach optycznie dwuosiowych są nader zawiłane i dostępne jedynie rachunkowi wyższemu. Zostały one wykryte przez Fresnel'a (1827) na drodze matematycznej na zasadzie teorii undulacyi, a następnie stwierdzone doświadczeniem. Jeżeli dla wykreślenia promieni w kryształach jednoosiowych potrzeba było połączenia powierzchni kuli i elipsoidy, to w kryształach dwuosiowych optycznie, zachodzą daleko zwickłańsze kombinacye elipsoid. Na przecięcia tych powierzchni fal płaszczyznami wypadają najczęściej dwie krzywe, niekiedy jedna elipsa i jedno koło. Przecięcia w kierunkach największej i najmniejszej prędkości są: elipsa i koło, przecinające się z sobą w 4-ch punktach. Przez te punkta przechodzą osie optyczne, a ponieważ przy tych punktach mają miejsce lejkowate zagłębienia, przeto na wspólną powierzchnię fal styczną trafia cały ostrokąć promieni, rozkładający się przy wyjściu jako fala. Te na drodze teorii wykryte przez Hamilton'a (1829) zjawiska tak zwanego wewnętrznego stożkowego odbicia, zostały sprawdzonemi przez Lloyd'a dla arragonitu. Odwrotnie, do wewnętrżnych punktów lejka daje się poprowadzić wiele płaszczyzn stycznych, nachylających się wspólnie ku punktowi przecięcia; przeto wiązka promieni idąca z wewnątrz na zewnątrz i trafiająca na pewien punkt, musi przy wyjściu rozszerzać się w ostrokąć; to zewnętrzne stożkowe odbicie zostało również wywiedzionem teoretycznie przez Hamilton'a i sprawdzonem doświadczeniami Lloyd'a.

**Polaryzacja światła (Malus 1808).** Światłem spolaryzowanym nazywamy takie światło, którego drgania, wzajemnie od siebie równoległe, są prostopadłe do promienia. Stosownie do tego czy drgania są prostolinijne, kołowe lub eliptyczne, światło nazywa się: prostolinijnie, kołowo lub eliptycznie spolaryzowanym. Rozważymy naprzód światło spolaryzowane linijnie. Płaszczyzna, na której leżą drgania światła prostolinijnie spolaryzowanego, nazywa się płaszczyzną drgań, a płaszczyzna, do której drgania są prostopadłe—płaszczyzną polaryzacyi. Światło spolaryzowane różni się od zwyczajnego odbiciem, załamaniem, pochłanianiem, podwójnem załamaniem i interferencyą. Mamy więc sposoby rozpoznania światła spolaryzowanego; potrzebne na ten cel przyrządy nazywają się *rozkładaczami* albo *analizerami*.

Światło spolaryzowane zostaje całkowicie odbitem od zwierciadła pocernionego z tyłu, lub od pewnej liczby tafelek szklanych wtedy tylko, gdy analizery te mają takie położenie, że drgania są równoległe od powierzchni odzwierciadlającej, czyli wtedy, gdy płaszczyzna polaryzacyi pada na płaszczyznę odbicia; w tym bowiem razie drgania nie mogą wnikać między molekuly zwierciadła i pole widzenia wydaje się jasnym. Przy powolnym obrocie analizera, drgania przestają być równoległemi do powierzchni, lecz zawierają jeszcze składową równoległą, która też zostaje odbita. Ponieważ ta składowa równoległa, w ciągu dalszego obrotu, coraz bardziej maleje, przeto i natężenie światła odbitego musi się zmniejszać, aż nakoniec staje się ono najmniejszym przy obrocie o 90°; pole widzenia w świetle odbitem jest wtedy najciemniejsze. Lecz podczas

tego obrotu rosła coraz bardziej składowa drgań prostopadła, która z łatwością mogła działać impulsyjnie na atomy eteru między molekułami zawarte i przechodzić skutkiem tego przez zwierciadło; zwierciadło zaczernione pochłania tę składową, przez samo szkło zaś może się ona przedostać. W naszym więc doświadczeniu, światło musi ukazywać się stopniowo za platkami szklanymi, w miarę obrotu zwiększać swe natężenie, i nakoniec przy obrocie  $= 90^{\circ}$  przedstawiać się najwyraźniej. Przy dalszym jeszcze obrocie analizera, natężenie odbitego pola widzenia będzie się znów powiększać, a załamane — zmniejszać, aż przy  $180^{\circ}$  pierwsze osiągnie maximum, drugie — minimum; naodwrot, przy  $270^{\circ}$  światło odbite będzie najsłabsze, przepuszczone — najsilniejsze i t. d. Innym analizem jest cienka płytka turmalinu; turmalin ma godną uwagi własność przepuszczania jedynie tych drgań, które są równoległe do jego osi głównej, pochłaniania zaś drgań prostopadłych do tej osi. Jeżeli zatem drgania światła spolaryzowanego padają na płatkę turmalinu, przez którą patrzymy, to pole widzenia wydaje się jasnym; pozostaje ono jasnym w każdym takim położeniu platki, w którym oś jest równoległa do drgań, lecz zaćmiewa się, gdy oś staje się względem drgań ukośną; przy  $90^{\circ}$  obrotu otrzymujemy minimum, — ciemność. Spat podwójny może służyć także za analizę: posiada on bowiem, jak wiadomo, własność rozkładania każdego promienia na dwa takie, że drgania jednego są prostopadłe do głównego przecięcia, drugiego zaś — leżą na przecięciu głównym. Puszczając zatem światło spolaryzowane na spat podwójny tak, aby płaszczyzna polaryzacji leżała w płaszczyźnie przecięcia głównego, t. j. aby drgania były prostopadłe do przecięcia głównego, drgania przejdą przez kryształ nierozłożone i utworzy się jeden tylko obraz; jeden obraz powstaje i wtedy, gdy drgania światła spolaryzowanego padają na przecięcie główne; w każdym innym razie tworzą się dwa obrazy, których wyraźność maleje i rośnie, przy zwracaniu kryształu z jednego położenia w drugie. Najlepszym analizem jest pryzmat Nicol'a (1828). Dwie równoległe powierzchnie końcowe romboedru spatu podwójnego, nachylone do krawędzi tępych pod kątem  $71^{\circ}$ , zostają tak zeszlifowane, że nachylenie to wynosi jeszcze  $68^{\circ}$ ; następnie kryształ zostaje przepiłowanym tak, aby powierzchnie przepiłowania były prostopadłe do dwóch nowych powierzchni. Po starannym wypolerowaniu powierzchni przepiłowanych i po skitowaniu ich za pomocą balsamu kanadyjskiego, kryształ tak spojony ujmuje się w oprawę mosiężną, zaczernioną. Przy wejściu światła w taki kryształ, promień rozkłada się na dwa promienie; zwyczajny zostaje załamany silnie, pada zatem bardzo ukośnie na słabiej łamiącą warstwę balsamu, zostaje od niej całkowicie odbity i odrzucony na poczernioną oprawę, która go pochłania. Promień nadzwyczajny zaś, czyli promień, którego drgania leżą w przecięciu głównym, skutkiem mniejszego załamania, przechodzi przez warstwę balsamu. Patrząc zatem przez pryzmat Nicol'a na światło spolaryzowane, będziemy je widzieć nieosłabionem wtedy tylko, gdy płaszczyzna polaryzacji jest prostopadła do przecięcia głównego; w każdym innym razie światło będzie słabsze, a przy padaniu na siebie obu płaszczyzn — zniknie zupełnie. Pole widzenia w pryzmacie Nicol'a wydaje się przy świetle spolaryzowanym, w ciągu obrotu raz jasne, raz ciemne, gdy tymczasem w świetle zwyczajnem — zawsze jasne. Interferencja światła spolaryzowanego będzie rozbieżną później.

**Przyrządy polaryzacyjne**, służące do wytworzenia światła spolaryzowanego ze zwyczajnego, są bardzo rozmaite. W naturze trafia się wprawdzie światło spolaryzowane, lecz jest ono zawsze zmieszane ze światłem zwyczajnym; światło spolaryzowane czyste, lub przynajmniej przeważające nad zwyczajnym, trzeba przeto otrzymywać sztucznie. Cztery metody prowadzą do tego celu: 1) przez odbicie, 2) przez pojedyncze załamanie, 3) przez pochłonięcie, 4) przez podwójne załamanie.

**I. Polaryzacja przez odbicie.** Każde światło odbite od powierzchni zwierciadłowych, z wyjątkiem powierzchni metalicznych, jest w części spolaryzowane. Gdy bowiem drganie trafia ukośnie na powierzchnię zwierciadłową, to jego składowe równoległe do tej powierzchni nie mogą wejść w nią, zostają odbite; promień odbity, powstający z tych drgań, byłby całkowicie spolaryzowanym, gdyby i druga składowa nie odbijała się w części. Drgania pierwszej składowej są prostopadłe do płaszczyzny padania, drgania drugiej muszą leżeć na tej płaszczyźnie, jako prostopadłe do promienia i do pierwszej. Gdyby ta druga składowa wnikała całkowicie w ciało odbijające, to promień odbity byłby całkowicie spolaryzowanym.—Spełnienie tego warunku zależy od wielkości kąta padania; kąt utworzony przez promień odbity a całkowicie spolaryzowany, z powierzchnią odzwierciedlającą, albo przez odpowiedni promień padający z tą powierzchnią, nazywa się *kątem polaryzacji*. Podlega on następującemu prawu: *Styczna kąta polaryzacji równa się odwrotności wykładnika załamania w ciele odzwierciedlającym* (Brewster 1815).

**Dowód** (Fresnel 1831). Dowód polega na zasadzie zachowania siły; summa sił żywotnych drgających cząstek atomowych w promieniach padających, musi być równa summie sił żywotnych w promieniach odbitych i wnikliwych czyli załamanymi. Na fig. 174, gdzie  $dm$  oznacza falę padającą,  $eg$  odbitą, a  $gf$  załamaną, całkowity ruch atomów, zawarty w  $dmg$  rozdziela się na ruchy zawarte w trójkątach:  $d eg$  i  $d fg$ ; powierzchnia ostatniego odnosi się do  $dmg$  jak  $df . gf$  do  $dm . gm$ , czyli jak  $\sin \beta . \cos \beta : \sin \alpha . \cos \alpha$ . Oznaczmy gęstość eteru w dawnym ośrodku przez  $\delta$ , w nowym przez  $\delta'$ , to masy eteru w tych przestrzeniach zawarte, mają się do siebie jak:  $\delta . \sin \alpha . \cos \alpha : \delta' \sin \beta . \cos \beta$ . Oznaczmy prędkość eteru w fali padającej przez  $c'$ , w odbitej przez  $x$ , a w załamaniej przez  $y$ , to siły żywotne odpowiednio będą:

$$c^2 \delta \sin \alpha \cos \alpha, \quad x^2 \delta \sin \alpha \cos \alpha, \quad y^2 \delta' \sin \beta \cos \beta;$$

na mocy przytoczonej zasady musi zachodzić równanie.

$$c^2 \delta \sin \alpha \cos \alpha = x^2 \delta \sin \alpha \cos \alpha + y^2 \delta' \sin \beta \cos \beta, \quad \text{albo:}$$

$$(c^2 - x^2) \delta \sin \alpha \cos \alpha = y^2 \delta' \sin \beta \cos \beta.$$

W przypuszczeniu, że prędkość światła w eterze o różnej gęstości jest odwrotnie proporcjonalną do pierwiastku kwadratowego z gęstości, mamy:

$$c : y = \sqrt{\delta'} : \sqrt{\delta},$$

a że jak wiadomo

$$c : y = \sin \alpha : \sin \beta,$$

przeto

$$\sqrt{\delta'} : \sqrt{\delta} = \sin \alpha : \sin \beta,$$

albo

$$\delta \sin^2 \alpha = \delta' \sin^2 \beta.$$

Dzieląc równanie zasadnicze przez ostatnie, otrzymamy:

$$(c^2 - x^2) \cotg \alpha = y^2 \cotg \beta.$$

Przy pomocy tego równania będziemy się starali oznaczyć warunki potrzebne na to, aby składowa drgań, leżąca w płaszczyźnie padania, nie została odbita, warunki, przy spełnieniu których, natężenie światła odbitego, drgającego w płaszczyźnie padania, jest równe zeru. W tym celu wystawmy sobie, że drgania: padające, odbite i załamane, zostały rozłożone, każde z osobna, na dwie składowe, z których jedna drga zawsze w płaszczyźnie padania, druga zaś jest prostopadła do tej płaszczyzny. Prędkości trzech pierwszych składowych są:

$$c \cos \alpha, \quad x \cos \alpha, \quad y \cos \beta;$$

ponieważ pierwsza prędkość, w tym samym kierunku, przechodzi w dwie drugie, przeto:

$$c \cos \alpha = x \cos \alpha + y \cos \beta,$$

albo

$$(c - x) \cos \alpha = y \cos \beta.$$

Jeżeli równanie zasadnicze, w ostatniej swej formie, podzielimy przez dopiero otrzymane, wypadnie;

$$(c + x) \sin \alpha = y \sin \beta.$$

Rugując y z dwóch form równania zasadniczego, otrzymamy:

$$(c - x) \sin \beta \cos \beta = (c - x) \sin \alpha \cos \alpha,$$

a ztąd

$$x = \frac{c (\sin \alpha \cos \beta - \sin \beta \cos \alpha)}{\sin \alpha \cos \alpha + \sin \beta \cos \beta} = c \frac{\operatorname{tang} (\alpha - \beta)}{\operatorname{tang} (\alpha + \beta)}.$$

To wyrażenie staje się zerem, gdy  $\alpha + \beta = 90^\circ$ . Zatem światło odbite jest całkowicie spolaryzowane wtenczas, gdy promień odbity jest prostopadły do załamane. W takiej formie wykrył Brewster powyżej przytoczone prawo. Przybiera ono formę odpowiedniejszą do wyrachowań, przez wstawienie w równanie

$$\sin \alpha = n \sin \beta$$

wartości  $\beta = 90 - \alpha$ ; wypada wtedy  $\sin \alpha = n \cos \alpha$  albo  $\operatorname{tang} \alpha = n$ . Ponieważ , kąt polaryzacji, jest dopełnieniem kąta padania, przeto ostatecznie

$$\operatorname{tang} \psi = \frac{1}{n}.$$

Według tego, światło odbite od szkła zostaje całkowicie spolaryzowane wtedy, gdy  $\operatorname{tang} \psi = \frac{1}{n}$ , gdy zatem  $\psi = 35^\circ 25'$ , czyli gdy pod takim kątem padają promienie światła na szkło. (Woda  $37^\circ$ , obsydyan  $33^\circ$ , dyament  $13^\circ$ ). Na tej zasadzie polega konstrukcja rozmaitych przyrządów polaryzacyjnych; opiszemy

przyrząd Nörremberg'a (1830) (fig. 175). AB jest zwierciadłem polaryzującym (polaryzerem) nachylnym do pionowej osi przyrządu pod kątem  $35^{\circ} 25'$ ; skutkiem tego promień ab nachylony do polaryzera pod kątem  $35^{\circ} 25'$  zostanie odbity w kierunku bc, a następnie znów odbity od równego, obłożonego zwierciadła, umieszczonego w podstawie przyrządu. Promień ten przechodzi przez zwierciadło polaryzujące, po kierunku bs i trafia na zwierciadło rozpraszające s, przytwierdzone ruchomo do górnej części przyrządu. Ponieważ to zwierciadło powinno odbijać światło spolaryzowane — również spolaryzowanem, więc przyjmować musi promień, nań padający, także pod kątem polaryzacji, czyli samo musi być nachylone do pionowej pod kątem  $35^{\circ} 25'$ . Gdy rozkładacz ma takie położenie, że wskaźnik jego stoi na zerze, wtedy jest równoległy do polaryzera, płaszczyzna odbicia przypada razem z płaszczyzną polaryzacji i w zwierciadle s widać przedmiot wysyłający promienie; pole widzenia jest jasne. Po obrocie rozkładacza o  $90^{\circ}$ , pole widzenia stanie się ciemnym; wyjaśnia się ono powoli podczas obrotu rozkładacza od  $90^{\circ}$  do  $180^{\circ}$  i przy  $180^{\circ}$  jest znów zupełnie jasne, wtedy bowiem płaszczyzna odbicia i płaszczyzna polaryzacji padają na siebie. Przy  $270^{\circ}$  obrotu pole widzenia jest ciemne, a przy  $360^{\circ}$  znów jasne.

Kierunek polaryzacji oznacza się z położenia płaszczyzny polaryzacji; ponieważ ta ostatnia dla światła odbitego leży w płaszczyźnie odbicia, przeto mówi się, że promień odbity zostaje spolaryzowanym w płaszczyźnie odbicia. Przy podwójnym załamaniu promień zwyczajny polaryzuje się na przecięciu głównym, a nadzwyczajny — w kierunku prostym do przecięcia głównego. Metale mają bardzo mały kąt polaryzacji, z przyczyny wielkich wykładników załamania, przez odbicie zatem nie

wytwarzają prawie wcale światła spolaryzowanego; przeciwnie, światło odbite od szkła, wody, powietrza, ciał niebieskich, jest w części spolaryzowane, co rozpoznać można po powolnym zmniejszaniu się i wzrastaniu dwóch obrazów podczas obrotu spatu podwójnego, lub też po powolnym zmienianiu się obrazu wytworzonego przez pryzmat Nicol'a. Zjawiska te mają zastosowanie w astronomji przy poszukiwaniach, czy ciała niebieskie świecą własnym czy też obcym światłem.— Tęcza, olśniewający blask szkła i wody, malowideł nikań gdy zwrócimy na nie pryzmat Nicol'a lub turmalin. Błękit nieba jest spolaryzowany w płaszczyźnie przechodzącej przez słońce, przez wpatrujące się oko i przez punkt nieba obserwowany; na tej zasadzie polega zegar polarny Wheatstone'a.

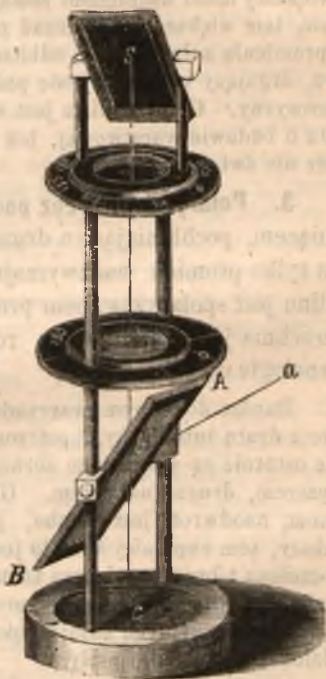


Fig. 175.

**377. 2. Polaryzacja przez załamanie.** Gdy promień światła pada pod kątem polaryzacji na szkło, to część jego składowa, załamana, polaryzuje się słabo, lepiej zaś wtedy, gdy przechodzi nie przez pojedynczą płatkę szklaną, lecz przez większą masę szkła.

Po przejściu bowiem przez jedną tylko płatkę, składowe załamane drgań padających na szkło, mogą jeszcze zawierać większe lub mniejsze części składowych, równoległych do powierzchni szkła, a zatem mogą nie posiadać kierunków równoległych; im przez większą liczbę platek przechodzi promień załamany, tem w większej ilości usuniętemi zostają te części równoległe, przez odbicie i pochłonięcie, tem większa ilość drgań przechodzących przyjmuje kierunki prostopadłe do promienia załamanego i odbitego. Z materii szklistej przeto, wychodzi promień, drgający w płaszczyźnie padania, więc spolaryzowany prostopadłe do tej płaszczyzny. Ciało szkliste jest w tym razie i polaryzerem i rozkładaczem.—Ciała o budowie warstwowej, jak perłowa macica, agat, polaryzują przechodzące przez nie światło.

**378. 3. Polaryzacja przez pochłonięcie.** Turmalin jest ciałem podwójnie łamiącym, pochłaniającym drgania promienia zwyczajnego, a przepuszczającym tylko promień nadzwyczajny; światło zatem przeszłe przez płatkę turmalinu jest spolaryzowanym prostopadłe do przecięcia głównego. Jeżeli powierzchnia jest zeszlifowana równoległe do osi, to drgania przechodzące są równoległe do tej osi.

Bardzo dogodnym przyrządem polaryzacyjnym są obciążki turmalinowe, wygięte z drutu lub blachy, opatrzone na obu przeciwnych końcach pierścieniami; w te ostatnie są wprawione obracalnie platki turmalinowe. Jedna platka jest polaryzerem, druga analizysem. Gdy osie są od siebie równoległe, pole wydaje się jasnym, naodwrot, jest ciemne, gdy osie tworzą kąt prosty. Im polaryzer jest grubszy, tem zupełnie światło jest spolaryzowane, lecz tem też jest słabsze; mętno-zielona i brunatna barwa turmalinu odbiera temu przyrządowi wyższość nad pryzmatem Nicol'a. Obciążki turmalinowe jednak są wyborne do obserwacji zjawisk interferencyjnych światła spolaryzowanego. Przez płatkę turmalinu można widzieć dno głębokiej wody.

**379. 4. Polaryzacja przez podwójne załamanie.** Drgania każdego promienia zwyczajnego są, jak okazano w 373., prostopadłe do przecięcia głównego, są więc wzajemnie do siebie równoległe, czyli promień zwyczajny jest spolaryzowany w przecięciu głównym. Drgania promienia nadzwyczajnego leżą w przecięciu głównym, są więc, jako prostopadłe do swego promienia, od siebie równoległe, czyli promień nadzwyczajny jest spolaryzowany prostopadłe do przecięcia głównego. Oba więc promienie są spolaryzowane prostopadłe względem siebie.

Już Huyghens zauważył, że cztery obrazy tworzące się przez nałożenie na siebie dwóch spatów podwójnych, w czasie obrotu zmieniają stopniowo natężenie światła i w pewnych położeniach redukują się do dwóch. Każdy kryształ po-



dwójnie łamiący jest polaryzerem i analizерem; przy patrzeniu na błyszcząca szybę prze spat podwójny, natężenia obu obrazów zmieniają się podczas obrotu. Pryzmat Nicol'a jest równie wysmienitym polaryzerem jak analizерem. Dichroskopijna lupa Hejdinger'a zawiera spat podwójny między dwoma pryzmatami szklanemi, ujętemi w rurkową oprawę; na jednym końcu oprawy jest otwór okrągły, a na drugim kwadratowy, który, przy patrzeniu przez otwór okrągły, widać podwójnie wraz ze światłem spolaryzowanym w kierunkach wzajemnie prostopadłych. Lupa ta używa się do interferencyi światła spolaryzowanego. Mikrometr Rochon'a składa się z dwóch, skitowanych ze sobą, pryzmatów kryształu górnego; oś optyczna jednego z nich jest prostopadła do jednej powierzchni bocznej, oś drugiego — do podstawy. Promień padający na pierwszą powierzchnię, idzie bez załamania aż do powierzchni rozdzielającej; ztąd promień zwyczajny idzie dalej nie załamując się, gdy tymczasem nadzwyczajny zostaje cokolwiek odchylnym; kąt tego odchylenia można obliczyć albo z kątów drugiego pryzmatu, albo też znaleźć przez obserwację. Z wielkości tego kąta i z odchylenia się dwóch obrazów przedmiotu, obserwowanych przez lunetę opatrzoną mikrometrem, można oznaczyć wielkość przedmiotu. Niektóre ciała organiczne, jak róg, szypułka pióra polaryzują światło tak, jak ciała optycznie dwuosiowe. Oko zdaje się być także podwójnie łamiącym analizерem; gdyż, według Hejdinger'a, w świetle spolaryzowanym widać dwa pęczki blade-żółte, naprzeciw krózych pojawiają się niekiedy dwa inne, niebiesko-fioletowe, w położeniu do pierwszych prostopadłym; najlepiej się widzi przez pryzmat Nicol'a, patrząc w kierunku jasnego obłoku.

**Interferencja światła spolaryzowanego.** Promienie spolaryzowane do siebie równoległe, przypadające na siebie lub obok siebie, mogą się znosić lub wzmacniać skutkiem interferencyi, gdyż drgania ich padają na też same linije proste i wzmacniają się lub znoszą, stosownie do zgodności lub przeciwieństwa ruchów. Promienie spolaryzowane w kierunkach względem siebie ukośnych mogą również być przyczyną zwyczajnych zjawisk interferencyjnych, gdyż drgania tych promieni mają składowe równoległe. Lecz promienie spolaryzowane prostopadłe do siebie nie interferują dla tego, że siły wzajemnie do siebie prostopadłe mają wypadkową rzeczywistą i nie zawierają składowych równoległych. Ponieważ zwykłe promienie światła zawsze interferują, przeto przyjmujemy tu, że drgania ich są prostopadłe do promienia we wszystkich kierunkach. Promienie spolaryzowane prostopadłe do siebie mogą interferować wtedy tylko, gdy drgania ich zostaną rozłożone za pomocą analizera na składowe równoległe lub pochylone względem siebie. Na tem polegają następujące zjawiska:

**I. Zabarwienie cienkich blaszek kryształów.** Cienkie blaszki kryształów dwójnie łamiących, bezbarwne przezroczyste w świetle zwyczajnem,— w świetle spolaryzowanym i w pewnych położeniach przedstawiają żywe zabarwienie, gdy są badane za pomocą analizera. Barwa jest najżywsza wtedy, gdy przecięcie główne blaszki czyni z płaszczyzną polaryzacji kąt

45°; podczas obrotu blaszki natężenie barwy maleje; przy 0° i 90° jest ono najsłabsze. Barwa przechodzi w dopełniającą, gdy analizator zostanie obrócony o 90°, albo gdy używając materyi szklistej, obserwujemy blaszkę nie w odbitem lecz w przepuszczonym świetle; przy użyciu spatu podwójnego albo lupy Hejdinger'a dwa obrazy przedstawiają zabarwienia dopełniające, a w miejscu gdzie się pokrywają wzajem—białe. Barwy są tem żywsze, im blaszki są cieńsze, lecz znikają przy zbyt małej lub zbyt wielkiej grubości, w kryształach górnych już przy  $\frac{1}{2}$  mm. Grubość ta jest tem mniejsza, im większą jest różnica między promieniem zwyczajnym a nadzwyczajnym. Grubości te dla różnych barw mają się do siebie jak długości fal; przy niejednakowej zatem grubości, blaszka przedstawia rozmaite zabarwienia (kalejdo-polaryskop); blaszki klinowe okazują w paskach równoległych barwy Newton'a.

**Wyjaśnienie** (Young 1814). Zjawiska te przedstawiają się najwyraźniej na blaszkach gipsu z Montmatre; kładąc taką blaszkę na tafłę szklaną, w pierścieniu przy A (fig. 175) tak, aby płaszczyzna drgań wstępującego promienia spolaryzowanego *cs* padała na jedno z dwóch przecięć głównych blaszki, drgania przejdą na analizator niezmiennymi; ten ostatni przeto wyda się jasnym przy ustawieniu równoległym, przy skrzyżowanym — ciemnym; lecz jeżeli płaszczyzna drgań promienia spolaryzowanego nie pada na żadne z przecięć głównych, to promień ten zostanie rozłożony przez blaszkę na dwa promienie spolaryzowane prostopadłe do siebie, które opuszczając powierzchnię blaszki, udają się do analizera. Oba trafiają na niego pod kątem 45°; drgania ich rozkładają się na składowe równoległe i prostopadłe; obie składowe równoległe podobnie jak dwie składowe pionowe, wpływają na siebie osłabiająco lub wzmacniająco, stosownie do tego czy są w fazach przeciwnych, czy w jednakowych. Odmienność faz zostaje wywołana skutkiem tego, że dwa promienie powstające w blaszce doznają niejednakowo silnych załamania, t. j. przechodzą przez blaszkę z odmienną prędkością. Jeżeli np. różnica dróg obu promieni, w czasie przebiegu ich przez blaszkę, wynosi  $\frac{1}{2}$  długości fali światła czerwonego, to przy ustawieniu równoległym analizera obie składowe obu drgań, równoległe do niego, są skierowane przeciwnie, a zatem znoszą się; w świetle odbitem znikają więc części składowe czerwone dwóch promieni białych; w świetle przepuszczonym przeciwnie, wzmacniają się, gdyż obie składowe prostopadłe są jednakowo skierowane. Lecz w tej samej chwili różnica obu części składowych promieni fioletowych wynosi prawie całą długość fali światła fioletowego; dwie składowe obu drgań tego światła, równoległe do analizera, posiadając ten sam kierunek, wzmacniają się, gdy tymczasem składowe prostopadłe wzajemnie się znoszą. Gdy przeto znika czerwoność w świetle odbitem, powstaje fiolet i w małym stopniu inne barwy; powstaje więc takie samo zmieszanie jak w pierwszym pierścieniu barwnym Newton'a. W tych samych okolicznościach znika fiolet w przepuszczonym świetle a powstaje czerwoność; światło przepuszczone jest przeto dopełniające względem odbitego. Zupełnie w taki sposób zachodzą zjawiska przy skrzyżowaniu zwierciadeł i wtedy także można objaśnić tak samo barwy dopełniające dwóch obrazów spatu podwójnego. Wprowadziwszy między dwa pryzmaty Nicol'a blaszkę gipsu, przepuściwszy wiązkę świetlną a na-

stępnie rozkładając ją za pomocą pryzmatu, widmo przekona o istotności przytoczonego dopiero mieszania się barw. W widmie tem oprócz linii Fraunhofer'a zachodzą jeszcze inne linije ciemne, zwane linijami Talbot'a, których Esselbach użył do obliczenia długości fali promieni pozafioletowych.

**2. Pierścienie barwne w grubych płatkach kryształów.** Wprowadza- 382.  
 ją w obciążki turmalinowe lub między dwa pryzmaty Nicol'a, grubszą płatkę kryształową, albo kładąc taką płatkę na płytę szklaną polaryzacyjnego przyrządu Nörremberg'a i umieszczając przed nią soczewkę zbierającą, ujrzymy układy pierścieni barwnych. W kryształach optycznie jednoosiowych, poprzecinanych prostopadłe do osi, przy skrzyżowanym ustawieniu analizera, widać układy kół barwnych z czarnym krzyżem; przy ustawieniu analizera równoległym — układy barw dopełniających z krzyżem jasnym. W kryształach dwuosiowych optycznie, przepiłowanych prostopadłe do linii środkowej, t. j. do linii przepoławiającej kąt obu osi optycznych, pojawiają się dwa układy pierścieni, połączone ze sobą eliptycznie i lemniskatycznie, poprzerzynane czarnymi hiperbolami lub krzyżami; i tu także barwa i światło stają się odwrotnymi przy równoległym skierowaniu analizera. Jeżeli kąt między osiami przechodzi pewną granicę, to widać tylko jeden układ pierścieni, przerznięty paskiem jasnym, lub ciemnym. Do uwidocznienia obu układów pierścieni i umożliwienia dokładniejszych postrzeżeń służy mikroskopijny przyrząd polaryzacyjny Nörremberga, opatrzony nad i pod płytą układami soczewek koncentrujących promienie, a nadto pryzmatem Nicol'a, służącym za analizę. Z dwóch układów pierścieni można wyznaczyć kąt między osiami optycznymi (stauroskop Kobell'a). W niektórych kryształach oś optyczna przybiera bardzo rozmaite położenia dla różnych barw; to znów układy bywają wyraźne tylko w świetle jednorodnym, w białym zaś zatarte, a czarne paski opatrzone brzegami barwnymi (tytanit). Kryształy zeszlifowane równoległe do osi wydają się, w białym świetle spolaryzowanym, tylko jasnymi i ciemnymi; w świetle jednorodnym okazują paski hiperboliczne. Szkła ściśnięte, szybko oziębione i dźwięczne zachowują się w świetle spolaryzowanym tak, jak kryształy podwójnie łamiące. Wszystkie te układy barwne można za pomocą soczewek powiększyć i przedstawić na ekranie; powstają wtedy wspaniałe zjawiska.

W oko patrzące na środek platki, wchodzi od tego środka promienie prostopadłe do platki, a od punktów sąsiednich — takie promienie, które przeszły ukośnie przez płatkę i których długość wewnątrz platki jest odmienną, lecz jednakową w równych odległościach od środka. Gdy platka jednoosiowa jest przecięta prostopadłe do osi, to promień spolaryzowany przechodzi przez jej środek niezmiennym; dla tego też, przy krzyżowym ustawieniu analizera, środek jest ciemny. Promienie zaś idące do oka z boku zostają rozłożone, a dwie części składowe każdego z nich — niejednakowo załamane, jedna — zwyczajnie, druga —

nadzwyczajnie, z placki więc nie wychodzą razem. Pomimo to z każdym promieniem zwyczajnym wyjdzie także i jeden nadzwyczajny, który jednak z powodu odmiennej długości fal obu promieni, będzie w ogóle posiadać fazę różną od fazy promienia zwyczajnego. Jeżeli różnica ta wynosi na pewnym miejscu całą długość fali światła fioletowego i jeżeli wzmiankowane promienie wchodzą w oko przez analyzer skrzyżowany, to składowe ich równoległe znoszą się: fiolet znika ze światła odbitego; na tem samym miejscu różnica dla czerwoności wynosi wtedy tylko  $\frac{1}{2}$  długości fali, przeto składowe równoległe, przy ustawieniu skrzyżowaniem, mają jeden kierunek: czerwoność zostaje wzmocnioną. Występują tu znów barwy Newton'a. Dla wszystkich punktów równo oddalonych od środka, zjawisko jest zawsze tożsamo — ztąd kołowa forma pierścieni. Czarny krzyż tworzy się z promieni, które, posiadając drgania w przecięciu głównym, przechodząc przez środek, lub też drgania prostopadłe do tego przecięcia, przechodzą nierozłożonemi i które zatem, jako czyste światło spolaryzowane, zostają stłumione przez krzyżujący analyzer, a odbite przez analyzer równoległy i w tym ostatnim razie tworzą krzyż jasny.

**383. Polaryzacja kołowa (Fresnel 1817).** Gdy dwa promienie światła, spolaryzowane prostopadle względem siebie, których różnica faz jest zero lub wynosi dowolną liczbę długości pól fal i które mają jednakowe amplitudy i czasy drgań, padają na siebie, to powstają zawsze drgania prostoliniowe; odpowiadająca cząstka eteru zostaje wypychana z obu kierunków drgań zawsze o tę samą długość przez siłę drgającą obu promieni. Lecz gdy dwa promienie różnią się w fazie o  $\frac{1}{4}$  długości fali, to cząsteczka otrzymując w pewnej chwili impuls najsilniejszy, równy amplitudzie tego drgania, od drugiego drgania nie odbiera żadnego ruchu; gdy cząstka przybyła do końca amplitudy to zwraca się znów w niej powoli. Lecz w tej samej chwili otrzymuje od drugiego drgania silny impuls, który ją odchyła gwałtownie po kierunku prostopadłym do kierunku poprzednio przez nią przebieganego; z tych dwóch ruchów powstaje droga wypadkowa, prostopadła pierwszym swym elementem do pierwszego kierunku, lecz powoli uchylająca się od niego, będąca przeto pewną linią krzywą. Prędkość w pierwszym kierunku staje się coraz większą, gdy tymczasem w drugim — maleje; cząsteczka zatem zwraca się coraz wyraźniej ku pierwszemu kierunkowi, a od drugiego odchyła się coraz więcej; droga jej nabiera równoległości do kierunku pierwszego, a więc prostopadłości do drugiego a po  $\frac{1}{4}$  czasu drgania prędkość cząsteczki w pierwszym kierunku staje się największą, a w drugim — równą zero. Cząsteczka w tej chwili tak jest oddaloną od punktu rozpoczęcia ruchu, jak na początku tej czwartej części czasu drgania. Widocznie cząsteczka opisała ćwiartkę koła, więc w ciągu całego czasu drgania opisuje całe koło. Jeżeli przeto dwa promienie spolaryzowane do siebie pod kątem prostym, różnią się od siebie o  $\frac{1}{4}$  długości fali, to wytwarzają promień spolaryzowany kołowo. Z poprzedniego wynika także, że promień spolaryzowany eliptycznie powstaje wtedy,

gdy różnica faz przypada między  $0$  i  $\frac{1}{4}$ , między  $\frac{1}{4}$  i  $\frac{1}{2}$  i t. d. długości fali. Jeżeli w pewnym promieniu wszystkie cząstki opisują elipsy, to linija łącząca atomy eteru, nie jest falą płaską, lecz liniją szrubową, gdyż każda następną cząstka opóźnia się cokolwiek w swej elipsie i dopiero ostatni atom eteru w fali, ma to samo położenie co pierwszy. W podobny sposób wykrył Fresnel teoretycznie polaryzację kołową i jej prawa. Pozwalają owe wyjaśnić następujące zjawiska:

1. Gdy blaszka miki, dostarczająca dwóch promieni spolaryzowanych prostopadle do siebie, których różnica faz wynosi wielokrotność długości półfali, wydaje się ciemną w świetle jednorodnym, przy ustawieniu równoległym lub skrzyżowanym, stosownie do tego czy wielokrotność jest parzystą lub nieparzystą, to pozostaje niezmiennie jasną przy każdym ustawieniu analizera, jeżeli grubość jej jest tak mała, że różnica faz wynosi  $\frac{1}{4}$ ,  $\frac{3}{4}$ ,  $\frac{5}{4}$ , . . . długości fali (polaryzacja kołowa), — a zmienia się pod względem siły światła, nie stając się jednak ciemną, jeżeli różnica faz przypada między ćwiartkami nieparzystymi i parzystymi (polaryzacja eliptyczna). Blaszka miki dostarczająca światła pewnej barwy, spolaryzowanego kołowo polaryzuje eliptycznie barwy bliższe, a prostolinijnie — odleglejsze; jedynie ta blaszka, która polaryzuje kołowo barwę żółtą, zachowuje się prawie tak samo względem białości.

2. Jeżeli promień spolaryzowany zostaje *całkowicie odbity*, wtedy depolaryzuje się, t. j. rozkłada się na dwa promienie spolaryzowane prostopadle do siebie, a różniące się o mały ułamek ( $\frac{1}{8}$ ) długości fali; promienie te interferują się na jeden promień, spolaryzowany eliptycznie; przy dwukrotnym całkowitem odbiciu powstaje polaryzacja kołowa (równoległością Fresnel'a). Światło spolaryzowane zamienia się także przez *odbicie metaliczne* w światło spolaryzowane eliptycznie i kołowo (Jamin 1847).

3. Umieściwszy w przyrządzie polaryzacyjnym płatkę kwarcową, zeszlifowaną prostopadle do osi, grubą na  $1^{\text{mm}}$ , przy równoległym ustawieniu analizera trzeba będzie dla światła czerwonego obrócić analizę dalej o  $19^{\circ}$ , aby otrzymać największość siły światła, a o  $19^{\circ}$  za  $90^{\circ}$  i za  $270^{\circ}$  dla otrzymania ciemności; dla barwy żółtej obrót ten wynosi  $24^{\circ}$ , dla błękitu  $32^{\circ}$ , dla fioleto  $40^{\circ}$ . Ztąd wypada koniecznie, że w białym świetle spolaryzowanym, płatka musi wydawać się barwną, i że barwy, chociaż mieszane, następują po sobie w czasie obrotu tak, jak pryzmatowe. Jeżeli dla przejścia z czerwoności w żółtość i t. d. trzeba obracać analizę na prawo, to mówi się, że kryształ zwraca na prawo. w przeciwnym razie jest to kryształ zwracający na lewo. Wielkość obrotu rośnie z grubością platki. Kwarc przeto ma własność *zwracania drgań światła spolaryzowanego, czyli płaszczyzny polaryzacji o kąty różne dla różnych barw i proporcjonalnie do grubości platek*. Własność ta została wyjaśnioną przez Fresnel'a w następujący sposób: Promień spolaryzowany rozkłada się w płatce kwarcowej na dwa promienie spolaryzowane kołowo, które rozchodzą się nie z jednakową prędkością, ale posiadają równe natężenia, tenże sam czas obiegu i rotacje wprost przeciwne. Oba te promienie spolaryzowane kołowo zostają przez analizę znów złączone w jeden spolaryzowany prostolinijnie, którego drgania, względem drgań pierwotnie spolaryzowanego promienia są odwrotne, dla tego, iż nowe prostoli-

nijne drganie zajmuje zawsze środek między położeniami molekułów drgających w dwóch kołach, a nadto dla tego, że w kołach tych jeden molekuł oddala się bardziej od punktu wyjścia ruchu, niż drugi. Zwrot płaszczyzny drgań czyli płaszczyzny polaryzacji na lewo lub na prawo, zależy od tego, który z dwóch ruchów kołowych jest szybszym. Łatwo także okazać, że prędkość obrotu zmienia się z barwą i że jest proporcjonalna do grubości. Umieszczając przed okiem blaszkę kwarcową ujętą w obciążki turmalinowe, do oka dojdą nietylko promienie prostopadłe, które wytwarzają przytoczone wyżej barwy, lecz także promienie ukośne jednakowo rozmieszczone względem środka. Tworzy się wtedy, przy skrzyżowanym ustawieniu analizera, koło barwne, otoczone pierścieniami barwnymi, z których dopiero więcej na zewnątrz wynurzają się resztki czarnego krzyża. Dwie płatki zwracające w kierunkach przeciwnych dają piękny spłot spiralnych barwnych z kołami barwnymi.

Z ciał stałych, oprócz kwarcu, jeden tylko boran sody ma własność zwracania płaszczyzny polaryzacji; na własność tę natrafia się najczęściej w cieczach. Zwracają na lewo: olejek terpentynowy, nalewka bobkowa, roztwór gumy i inne; zwracają na prawo: roztwór cukru, olejek cytrynowy i inne; światło jednak musi przejść przez kolumnę cieczy, jeżeli ma okazać zwrócenie dając się wymierzyć; w roztworze cukru np. zwrócenie to jest proporcjonalne do ilości cukru. Na tem polega sacharometr (σάχαρο, cukier; Biot 1840), służący do mierzenia zawartości cukru za pomocą obrotu płaszczyzny polaryzacji. Do tego celu niezbędne jest urządzenie czyniące małe obroty dostrzegalnymi. Temu warunkowi czyni zadosyć podwójna płatka kwarcowa Soleil'a; składa się ona z dwóch platek skitowanych ze sobą, zwracających przeciwnie, grubych na  $3,75^m m$ ; umieszczona między dwoma równoległymi ustawionymi pryzmatami Nicol'a wydaje się purpuro-fioletową, która to barwa, przy najmniejszym obrocie, przechodzi w błękit jednej, lub w czerwoność drugiej płatki i dla tego nazywa się barwą przejściową (teinte de passage). Jeżeli zatem pomiędzy dwa pryzmaty Nicol'a zostanie wprowadzone ciało zwracające płaszczyznę polaryzacji, to barwa przejściowa zmienia się; z wielkości obrotu jednego z pryzmatów, potrzebnej do sprowadzenia znów barwy przejściowej, daje się obliczyć zdolność zwracania i ilość cukru zawartego w roztworze. W sacharometrze Soleil'a zamiast obrotu jednego z pryzmatów, przesuwają się klinowa płatka kwarcu naprzód lub w tył; zdolność zwracająca tej płatki, wprost przeciwna takiejże zdolności cukru, daje możliwość przywrócenia zmienionej wpływem cukru teinte de passage. Z wielkości przesunięcia płatki, mierzonego za pomocą skali i nonijusza, oblicza się zawartość cukru.

**385. Harmonija barw** (Chevreul 1830, Brücke 1866). Harmonija barw oznacza przyjemne dla oka zestawienie barw w dziełach sztuki, przemysłu i codziennego życia. Pomimo usiłowań, nauka o harmonii barw nie zyskała ogólnego uznania, a przeciw nielicznym twierdzeniom, postawionym przez dawniejszą fizykę, walczy nietylko praktyka, ale i teoria z lat ostatnich. Twierdzenia owe polegają na fakcie, że oko nuży się przydługim rozpatrywaniem jednej barwy, że zatem ustawiczość jednej barwy wywiera nań wrażenie przykre, że przeciwnie, barwy dopełniające nie nużąc oka sprawiają nań wpływ przyjemny. Oprócz tego barwy dopełniające nie szkodzą sobie kontrastem, gdyż wpływ kontrastu

jednej barwy wytwarza drugą, gdy tymczasem barwy nie dopełniające się tracą na nasyceniu skutkiem znużenia oka przesytem wspólniej im części składowej, albo co na jedno wychodzi, barwy dopełniające mieszając razem swe działania, zmieniają się i płowieją. Dla tego to już oddawna uważano za najdoskonalszą harmoniję barw, zestawienie barw dopełniających. I rzeczywiście, rzadko zdarza się widzieć coś przyjemniejszego nad dwa obrazy cieni- kich blaszek gipsowych, wytworzone przez wielki przyrząd polaryzacyjny lub przez schistoskop Brücke'go (1866) (*οχιζω*, rozszczepiać). A jednak niektórzy uważają zestawienie barw jednorodnych za zbyt jaskrawe, niedelikatne i gminne (Schiffermüller). Brücke wyjaśnia to w ten sposób, że w takich razach farby albo nie zostały utracone, albo też, że były zrobione z niewła- ściwych materiałów; barwy bowiem mające wywołać wrażenie przyjemne, powinny zgadzać się nie tylko w tonacji ale także i pod względem nasycenia i jasności z danymi schistoskopu. Brücke zatem trzyma się barw dopełnia- jących; pomimo to, wyłączne ich stosowanie czyniłoby liczbę przyjemnych par barwnych, zbyt małą, a oprócz tego znane są wszystkim połączenia dwóch trzech i więcej barw, sprawiających wrażenia przyjemne, chociaż niedopeł- niających się. Jakkolwiek przyczyna tych wpływów nie jest dotąd znana, i jakkolwiek nie udało się dotąd wykryć prawa, które niemi rządzi, to jednak Brücke zestawiał wszystkie dobre i złe kombinacje barw, wystarczające zu- pełnie do praktycznych zastosowań.

Schistoskop składa się z pryzmatu Nicol'a, będącego polaryzerem i z lupy Hejdingera, użytej tu za analizę; przez lupę patrzy się na tablicę białą lub barwną; między lupę i tablicę wkładają się blaszki gipsu, które, zmieniane co do liczby i grubości, wydają najrozmaitsze barwy. Chevreul rozróżnia 6 harmonij barwnych, przy czem używa nomenklatury następującej: Wszystkie stopniowania powstające ze zmieszania w jedną barwę białości z czarnością, przedstawiające zatem różne stopnie nasycenia i jasności, tworzą skalę, której pierwsze podziały noszą nazwę atramentów, ostatnie zaś—cieniowań; dodanie czarność, która, jak wiadomo, powstaje także skutkiem pochłonięcia mieszających się z sobą barw, nadaje każdej barwie charakter szary; z tej przyczyny cieniowania nazywają się jeszcze barwami załamaniem lub szarością. Przez domieszanie małych ilości in- nych barw czyli tonów do barwy czystej tworzą się odcienie. Harmonije wzmian- kowane rozpadają się na dwa działy, na harmonije analogiczne i na harmonije kontrastu. Do pierwszych należą: 1). Harmonija skali, wywoływana widokiem wszystkich atramentów i cieniowań jednej i tej samej barwy. 2). Harmonija od- cieni, składająca się z jednakowych atramentów i cieniowań tonów sąsiednich. 3). Harmonija przeważającego światła barwnego, wytwarzana przez barwy od- mienne, które łączą się ze sobą według praw kontrastu, lecz w których jedna przeważa, ma to miejsce np. przy wpatrywaniu się w barwy przez szkło słabo za- kolorowane. Do harmonij kontrastu należą: 4). Harmonija kontrastu skali, wy- woływana dwoma znacznie od siebie oddalonymi podziałami tejże skali. 5). Har-

monija kontrastu odcieni, sprawiana takimi sąsiednimi barwami skal, które przedstawiają bardzo odmienną wysokość. 6). Harmonija kontrastu barw, sprawiana barwami skal odległych; różnica może być jeszcze wzmocniona różnicą wysokości w każdej skali. Brücke uważa pierwsze trzy połączenia za małe interwalle, ostatnie trzy za wielkie interwalle. Chevreul rozróżnia jeszcze barwy świecące: żółta, pomarańczową, czerwoną i jasno-zieloną, od barw ciemnych: błękitu i fioleto. Wszystkie barwy zyskują na zestawieniu z białością, lecz nie w jednakowym stopniu; barwy najciemniejsze przedstawiają wtedy zbyt silny kontrast tonu, barwy zaś najjaśniejsze w połączeniu z białością wydają za mocny odbłask. Czarność tworzy harmonije analogiczne z barwami ciemnymi, ze świecącymi zaś—harmonije kontrastu. Wszystkie barwy zyskują na czystości i odbłasku przez zestawienie ich z barwą szarą.

KONIEC TOMU DRUGIEGO.



#18094











Biblioteka im. Hieronima  
Łopacińskiego w Lublinie



323984

. T.2



1000084275