

*M. Wojciechowski.*

## O oddziaływaniu wzajemnem dwóch źródeł akustycznych drgających synchronicznie.<sup>1)</sup>

*Sur l'action mutuelle de deux sources acoustiques à vibrations synchroniques.<sup>2)</sup>*

### S o m m a i r e.

Le présent travail contient une étude de l'action pondéromotrice des ondes stationnaires sur l'oscillateur piézoélectrique de quartz suspendu par deux fils de cuivre très fins, comme le montre la figure 5. Dans certaines positions l'oscillateur vibrant était repoussé, dans d'autres attiré par l'écran. Les courbes dessinées dans la figure 6a, 6b et 6c présentent les résultats expérimentaux obtenus avec trois plaques de quartz, la fréquence de résonance  $n = 54\,500 \text{ sec}^{-1}$  (longueur d'onde dans l'air  $\lambda = 6,32 \text{ mm}$ ),  $45\,400 \text{ sec}^{-1}$  ( $\lambda' = 7,54 \text{ mm}$ ) et  $34\,100 \text{ sec}^{-1}$  ( $\lambda'' = 10,1 \text{ mm}$ ). Ces courbes donnent les rapports entre  $f$  et  $l$ , où  $f$  est la force pondéromotrice agissant sur l'oscillateur et  $l$  la distance entre l'oscillateur et l'écran exprimée en mm. Quand la longueur  $l$  est petite, la force du repoussement est en général plus grande que celle de l'attraction, mais quand  $l$  augmente, les différences entre les valeurs maximales (absolues) du repoussement et de l'attraction s'effacent de plus en plus.

Le phénomène de l'attraction et celui du repoussement, décrit ci-dessus, peut être expliqué à l'aide des phénomènes observés par Wood et Loomis; c'est-à-dire quand les ondes qui interfèrent entre l'écran et l'oscillateur s'éteignent (ou au moins sont très faibles), le rayonnement n'a pas lieu dans la direction vers l'écran, mais se propage dans la direction opposée, ce qui entraîne le rapprochement de l'oscilla-

<sup>1)</sup> Praca referowana na VI Zjeździe Fizyków Polskich w Warszawie, 1 października 1932.

<sup>2)</sup> Travail présenté au VI-e Congrès des Physiciens Polonais à Varsovie, le 1 octobre 1932.

teur vers l'écran. Sans doute le phénomène de D v o ř à k joue un rôle important, parce que la petite colonne d'air de la longueur de  $l$  peut être considérée comme remplaçant le corps qui peut résonner. En outre, un grand nombre de phénomènes qui ont lieu pendant les vibrations ultraacoustiques, ont une influence sur les résultats obtenus.

Enfin, on peut en tirer la conclusion que les deux sources acoustiques qui vibrent synchroniquement s'attirent ou se repoussent mutuellement en dépendance de leur distance.

*Institut de physique expérimentale de l'Université de Poznań.*

Manuscrit reçu le 9 novembre 1932.

## I. W s t ę p.

Oddziaływanie wzajemne dwóch źródeł akustycznych należy do t. zw. sił ponderomotorycznych w akustyce, które występują wtedy, gdy fale akustyczne padają na jakiś przedmiot, np. na doskonale sztywny ekran, na małą zawieszoną płytkę, na membranę lub na inne źródło drgań i t. d.

Należy odróżnić sześć najważniejszych rodzajów sił ponderomotorycznych<sup>1)</sup>:

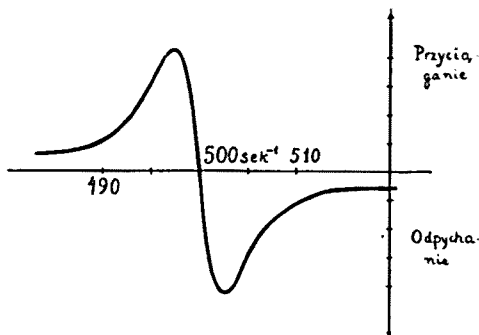
1. Do pierwszego najprostszego rodzaju można zaliczyć przeciętne ciśnienie fal akustycznych, padających na ekran, całkowicie je pochłaniający, względnie odbijający, i to w ten sposób, że fala odbita nie interferuje z padającą. O ile nawet zjawisko interferencji występuje, jest ono bardzo nieznaczne; jeśli bowiem uwydatnia się silniej, otrzymujemy inny rodzaj sił ponderomotorycznych (por. 4).

Według Lorda R a y l e i g h a przeciętne ciśnienie na ekran, doskonale odbijający fale, wynosi:  $p = \frac{I}{2} \left( \frac{c_p}{c_v} + 1 \right) \epsilon$ , gdzie  $\epsilon$  jest gęstością energii akustycznej.

2. Drugiego rodzaju siły ponderomotoryczne zachodzą, gdy na drodze fal akustycznych znajduje się mała płytka, zawieszona na cienkiej nici (płytkę R a y l e i g h a); umieszczona pod pewnym kątem do promieni akustycznych, skręca się ona, usiłując zająć położenie do nich prostopadle.

<sup>1)</sup> Rodzaje sił ponderomotorycznych są tu zgrupowane inaczej, niż w pracy E. W a e t z m a n n a, *Naturwissenschaften*, 16, 677, 1928.

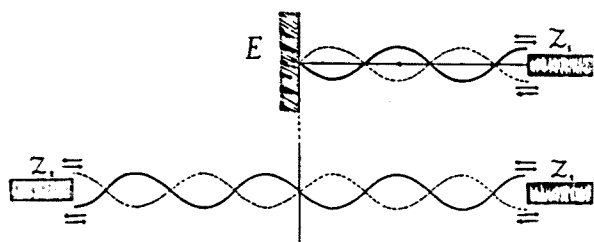
3. Trzeciego rodzaju siły ponderomotoryczne występują, gdy fale akustyczne padają na membranę, lub też inne ciało, mogące rezonować. Dvořák mianowicie spostrzegł, że drgające widelki strojowe przyciągają lub odpychają membranę, zależnie od tego, czy częstość fal padających jest niższa czy wyższa od częstości rezonancji membrany. Zjawisko powyższe również badali: Lebedew<sup>1)</sup>, Meyer<sup>2)</sup>, Hippe<sup>3)</sup> i inni. Uzyskali oni krzywą przedstawioną na rys. 1; na osi odciętych są odmierzone częstości fal, które padają na membranę, mającą częstość rezonancji 500 sek<sup>-1</sup>, na osi zaś rzędnych — siłę; ku górze — przyciąganie, ku dołowi — odpychanie.



Rys. 1.

Wyniki doświadczalne bardzo dobrze zgadzają się z teoretycznymi.

4. Do czwartego rodzaju sił ponderomotorycznych można zaliczyć siły działające na sztywny ekran, gdy fale akustyczne nań padające interferują z falami odbitymi. Gdy interferujące fale wzajemnie się wzmacniają (czyli gdy najsilniej powstają fale stojące), ekran doznaje największego ciśnienia, gdy zaś „gaszą się” — na ekran nie działają żadne siły,



Rys. 2.

a więc sprawa przedstawia się tak, jak gdyby wówczas nie było żadnego promieniowania (akustycznego) w kierunku ekranu. Przesuwając ekran wzdłuż kierunku rozchodzenia się fal, obserwuje się co  $\frac{1}{2} \lambda$  maksymalne

ciśnienia. Na powyższej zasadzie Wood i Loomis zbudowali w roku 1927 interferometr ultraakustyczny<sup>4)</sup>.

5. Kiedy fale interferują między odbijającym ekranem *E* (rys. 2) a źródłem drgań *Z*<sub>1</sub>, siły ponderomotoryczne działają nie tylko na ekran *E*, lecz także i na źródło drgań *Z*<sub>1</sub>, i ten nowy przypadek można zaliczyć,

1) P. Lebedew, Wied. Ann. 62, 158, 1897.

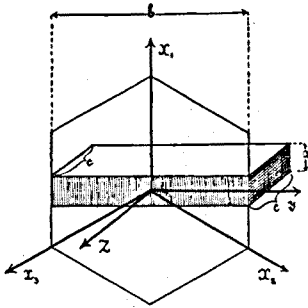
2) E. Meyer, Ann. d. Phys. 71, 567, 1923.

3) G. Hippe, Ann. d. Phys. 82, 161, 1927.

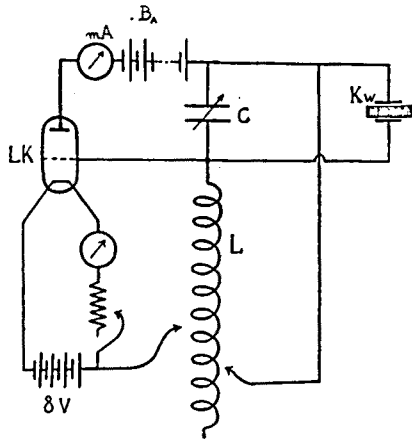
4) E. Waetzmann, l. c. p. 683.

do piątego rodzaju sił ponderomotorycznych; a mianowicie w tym przypadku na źródło drgań akustycznych (i temsamem ultraakustycznych), będzie działała siła odpychająca źródło od ekranu, względnie przyciągająca go do ekranu w zależności od ich wzajemnej odległości.

Do tego samego rodzaju sił ponderomotorycznych należy zaliczyć przypadek, kiedy fale wprost padają na drugie źródło akustyczne  $Z_2$ , drgające synchronicznie z pierwszym  $Z_1$ ; falę bowiem odbitą od ekranu w pierwszym przypadku można uważać za pochodzącą od drugiego źródła  $Z_2$ , będącego odbiciem pierwszego źródła w płaszczyźnie ekranu. Mamy więc tutaj zagadnienie oddziaływania wzajemnego dwóch źródeł akustycznych, drgających synchronicznie.



Rys. 3.



Rys. 4.

Podobne oddziaływanie wzajemne dwóch pulsujących kul w cieczach zaobserwował i wyjaśnił teoretycznie C. A. B j e r k n e s.

6. Do szóstego rodzaju sił ponderomotorycznych można zaliczyć zjawisko S c h e l l b a c h a, a mianowicie, że ciała o gęstości większej od ośrodka są przyciągane do źródła drgań, a o gęstości mniejszej — odpychane od niego.

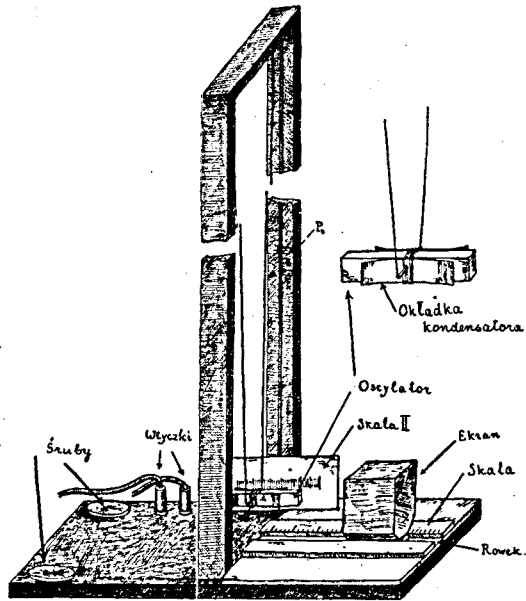
## II. Metoda badania, przyrządy.

Do zbadania sił ponderomotorycznych, działających na źródło drgań, użyłem oscylatorów kwarcowych piezoelektrycznych, ponieważ pozwalają one na wytwarzanie fal ultraakustycznych (a również akustycznych) o bardzo wielkiej energii.

Rys. 3 przedstawia sposób wycięcia czterech płytek kwarcowych, którymi rozporządzałem.  $X_1, X_2, X_3$  — osie elektryczne;  $Z$  — oś optyczna. Płytki różniły się między sobą jedynie długością krawędzi  $b$  ( $b \perp X$  i  $Z$ ), a mianowicie 2 płytki:  $b_1 = b_2 = 50$  mm; trzecia:  $b_3 = 60$  mm; czwarta:  $b_4 = 80$  mm, krawędzie:  $a = 3$  mm ( $a \parallel X_1$ ),  $c = 9$  mm ( $c \parallel Z$ ).

Zmienne pole elektryczne wytwarzałem przy pomocy obwodu drgającego, przedstawionego na rys. 4, gdzie pominięto cały szereg drobnych szczegółów.  $LK$  — lampka katodowa Philipsa TB 04/10;  $B_A$  — napięcie sieci miejskiej (220 V);  $C$  — kondensator obrotowy o maks. pojemności 1 000 cm;  $L$  — cewka z odprowadzeniami po 100 zwojów (0,1 Henry);  $mA$  — miliampermierz, który zwykle podczas pracy wykazywał 55 mA; podczas badań z płytką trzecią o długości 6 cm wykazywał 22 mA;  $Kw$  — oscylator kwarcowy.

Płytką kwarcową, umieszczoną między dwiema blaszanymi okładkami kondensatora, związanymi nicią, była zawieszona na cienkich miedzianych drucikach (długości 43 cm), które służyły jednocześnie jako przewodniki, doprowadzające elektryczność do okładek kondensatora (rys. 5). W pewnej odległości od oscylatora widziemy na rys. 5 ekran, który może się przesuwać wzdłuż rowka zaopatrzonego w podziałkę, pozwalającą określić jego położenie z dokładnością do 0,1 mm. Tuż za oscylatorem kwarcowym znajduje się skala II, na tle której można było oglądać oscylator przez lunetkę, umieszczoną w odległości około 130 cm.



Rys. 5.

Przystępując do badania, regulowałem śrubami tak (rys. 5), żeby ścianka czołowa płytki schodziła się z jedną z kresek skali II, a następnie określałem punkt zerowy, czyli takie położenie ekranu na skali I (poziomej), przy którym ekran stykał się z płytką. Oscylator pobudzałem do drgań, zmieniając odpowiednio pojemność kondensatora obrotowego. Istnienie drgań stwierdzałem przy pomocy iskrzenia się, które występowało między okładkami kondensatora oraz powierzchnią płytki. Każdorazowemu przerwaniu się drgań oscylatora towarzyszył dźwięk (podobny do jęku)<sup>1)</sup>, wydawany przez okładki powietrznego kondensatora.

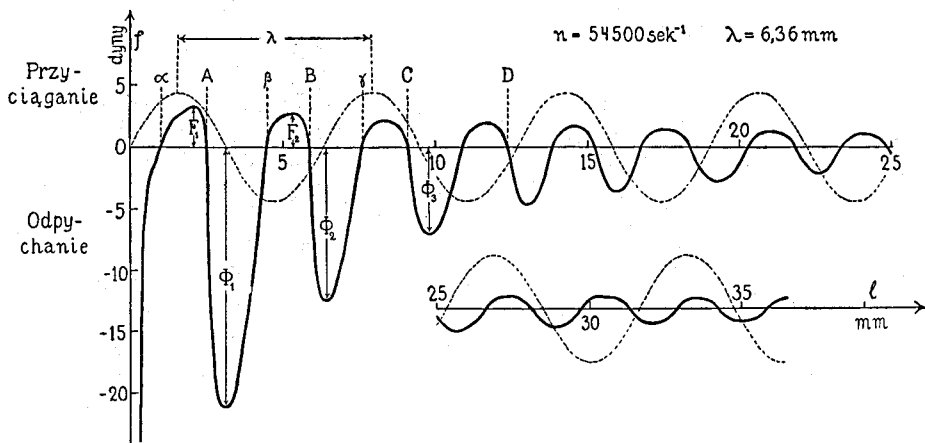
Przy niektórych położeniach ekranu krótkie pobudzenie do drgań powodowało gwałtowne odepchnięcie kryształu od ekranu niérz na

<sup>1)</sup> Ca d y podał metodę wykrywania drgań płytek piezoelektrycznych za pomocą podobnego dźwięku słyszanego w obwodzie telefonicznym.

odległość przeszło 1 mm, przy innych znów położeniach płytka zbliżała się do ekranu. Kiedy trudno było zdecydować od razu, czy zachodzi przyciąganie czy też odpychanie, pobudzano płytkę okresowo do drgań w odstępach czasu, zgodnych z okresem wahań na drucikach zawieszenia. Stosując powyższą metodę, wahający się kryształ można było unieruchomić. Znając ciężar płytki kwarcowej z kondensatorkiem, długość drucików zawieszenia (zazwyczaj 43 lub 23 cm) i wychylenie od punktu równowagi, można było badać zjawisko ilościowo.

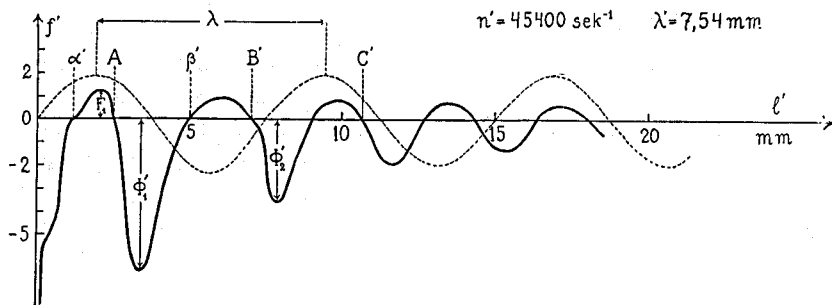
### III. Uzyskane wyniki.

Rys. 6a przedstawia krzywą okresową, uzyskaną na podstawie badań z płytką kwarcową o długości 50 mm i częstości rezonancji



Rys. 6 a.

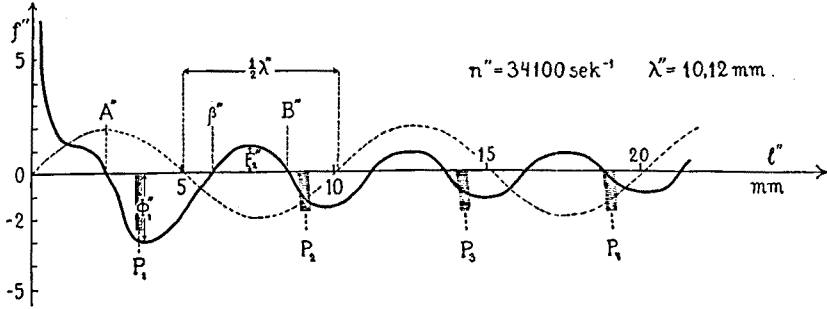
$54\,500 \text{ sek}^{-1}$ ; długość fali w powietrzu  $\lambda$  wynosiła 6,36 mm. Na osi odciętych odmierzone odległość  $l$  ekranu od płytki kwarcowej (wyrażoną w mm), na osi zaś rzędnych siłę  $f$  wyrażoną w dynach. Dla lepszej orientacji została wykreślona sinusoida.



Rys. 6 b.

Na rys. 6 b w układzie kreskowanym ( $l', f'$ ) podano krzywą uzyskaną dla płytki o długości 60 mm, o częstości rezonancji  $45\,400 \text{ sek}^{-1}$ ;  $\lambda' = 7,54 \text{ mm}$ .

Na rys. 6 c w układzie podwójnie kreskowanym ( $l'', f''$ ) podano



Rys. 6 c.

krzywą, uzyskaną dla płytki o długości 80 mm, częstości rezonancji  $n'' = 34\,100 \text{ sek}^{-1}$ ,  $\lambda'' = 10,12 \text{ mm}$ .

Widzimy z wykresu (rys. 6a), że gdy  $l = 0$ , wtedy  $|f| \propto 100 \text{ dyn}$ , przyczem  $f < 0$ , czyli, że występuje odpychanie; gdy  $l$  jest nieco większe od odcinka  $Oa$ , lecz mniejsze od  $OA$ , wtedy  $f > 0$ , czyli obserwujemy przeciąganie, gdy zaś  $l$  jest zawarte w przedziale  $(OA, O\beta)$ , występuje znów odpychanie i t. d. Przyciągania i odpychania można było jeszcze obserwować, gdy  $l > 70 \text{ mm}$ .

Na rys. 6c, w odróżnieniu od tego, co mieliśmy dla pierwszej krzywej (rys. 6a), dla  $l'' = 0$ ,  $f'' > 0$  ( $f'' \propto 70 \text{ dyn}$ ).

Jeżeli przez  $F_i$  oznaczmy maksymalną wartość  $f$  w  $i$ -tem z kolei maximum, a przez  $\Phi_i$  oznaczmy  $i$ -te z kolei  $f_{\min}$ , to spostrzegamy, że stosunek  $\left| \frac{\Phi_i''}{F_i''} \right|$  ze wzrostem  $l$  (oraz temsamem z wzrostem  $i$ ) coraz bardziej maleje, dążąc do 1. Dla krzywej na rys. 6c stosunek  $\left| \frac{\Phi_i''}{F_i''} \right|$  niewiele się różni od 1.

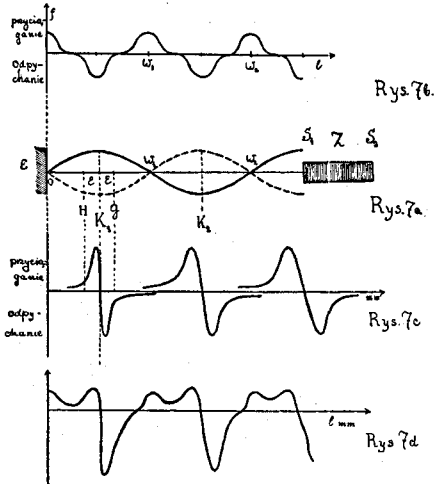
Pasma  $P_1, P_2, P_3, \dots$  na rys. 6c oznaczają miejsca, w których najwyraźniej powstawały figury Kundta uzyskane w małej czworokątnej rurce ze szczelnie wchodzącym tłoczkiem.

#### IV. Częściowe wyjaśnienie.

Ażeby wyjaśnić działanie sił ponderomotorycznych na zawieszony kwarcowy oscylator piezoelektryczny, umieszczony przed odbijającym ekranem, należy oprzeć się na zjawisku Wooda i Loomisa (4 rodzaj sił pond.) W przypadku bowiem, kiedy fale między ekranem  $E$  a oscy-

latozem  $Z_1$  wzajemnie się wzmacniają (rys. 7a), fala odbita wywiera pewien przeciwny nacisk na  $Z_1$ , powodując jego odpychanie się od  $E$ ; gdy zaś fale „gaszą się“, to w kierunku ekranu (od  $Z_1$  do  $E$ ) niema promieniowania (ultra-) akustycznego (a w każdym razie jest bardzo osłabione), rozchodzi się jednak w kierunku przeciwnym (od  $E$  do  $Z_1$ ), zatem oscylator  $Z_1$  jest popychany do ekranu (w kierunku od  $Z_1$  do  $E$ ). Odpowiednie przyciągania i odpychania oparte na powyższem rozumowaniu ilustruje rys. 7b.

Niewątpliwie prócz powyższego zjawiska występuje jeszcze zjawisko D v o ř á k a: słupek powietrza bowiem można uważać za ciało rezonujące przy pewnych częstościach. Kiedy ścianka  $S_1$  zajmuje położenie  $K_1$



Rys. 7b, a, c, d.

zajmuje położenie  $K_1$  (rys. 7a), słupek  $OK_1$  rezonuje; gdy zaś zajmuje położenie  $H$ , słupek  $OH$  może rezonować przy częstościach wyższych od częst. drgań oscylat.  $n$ , czyli wtedy, zgodnie ze zjawiskiem D v o ř á k a (3 rodzaj sił pond.), mamy przyciąganie, słupek zaś  $OG$  rezonuje przy częstościach  $n_G < n$ , czyli w punkcie  $G$  występuje odpychanie, co ilustruje pierwsza krzywa na rys. 7c, zupełnie podobna do krzywej na rys. 1. Ponieważ słupek powietrza może jeszcze rezonować przy innych położeniach oscylatora, dlatego na rys. 7c mamy szereg innych

krzywych (nieco mniej stromych).

Wypadkową krzywych, przedstawionych na rys. 7b i 7c, jest krzywa, przedstawiona na rys. 7d.

Gdybyśmy uwzględnili jeszcze zmniejszanie się sił ponderomotorycznych wraz ze wzrostem  $l$ , otrzymalibyśmy krzywą, bardzo podobną do krzywych, otrzymanych drogą doświadczalną.

Na kształt krzywych, uzyskanych doświadczalnie (rys. 6a, b, c), wpływa jeszcze niewątpliwie:

1. Zmiana natężenia drgań oscylatora wraz ze zmianą odległości  $l$  (H e h l g a n s, P i e l e m e i e r).
2. Wydzielające się ciepło, które występuje podczas drgań ultrakustycznych (przypuszczalnie zmniejsza ono przyciąganie).
3. Okresowa zmiana częstości drgań w zależności od  $l$ <sup>1)</sup>.

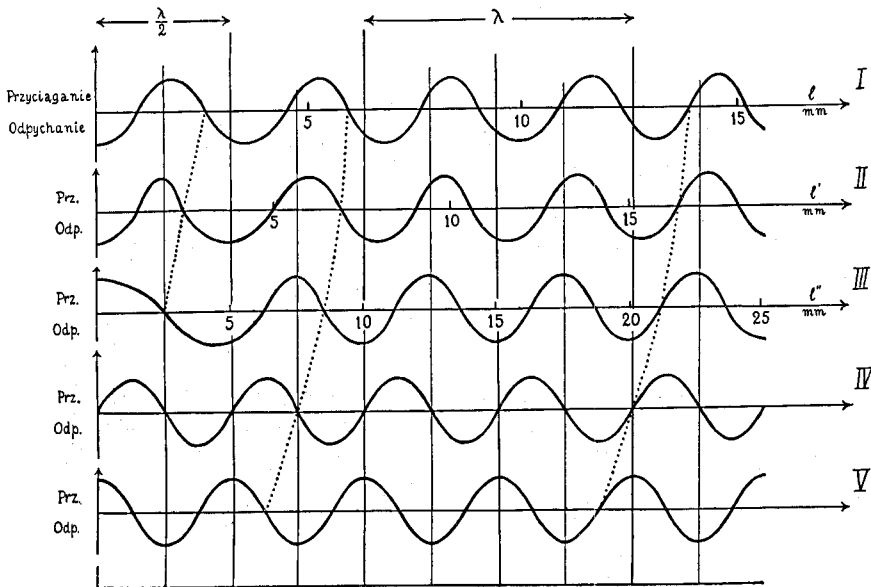
<sup>1)</sup> E. G r o s s m a n n i M. W i e n, Phys. ZS. 32, 377, 1931.



4. Wytwarzający się strumień powietrza, zwłaszcza przy małych  $l$  (najprawdopodobniej jest on główną przyczyną tego, że przy małych  $l$  na rys. 6a i 6b występuje odpychanie).
5. Zjawisko Schellbacha (leży w granicach błędów doświadczalnych).
6. Siły natury elektrycznej (w gr. błędów dośw.).
7. Zwiększona prędkość promieni ultraakustycznych w pobliżu oscylatora piezoelektrycznego<sup>1)</sup>.

### V. Dyskusja.

Na rys. 8 wykreślono szereg krzywych I—V, odpowiadających kolejno krzywym na rys. 6a, 6b, 6c, 7c i 7b, wskazujących jedynie miejsca



Rys. 8.

w których występuje przyciąganie, bądź też odpychanie (bez uwzględnienia ilościowej strony w zależności od  $l$  wyrażonej w  $\lambda$ ).

Widzimy jak krzywe coraz bardziej się przesuwają na lewo wraz ze zmniejszeniem się częstości. Granicznym ich położeniem jest najprawdopodobniej krzywa, najbardziej zbliżona do krzywej IV, lecz nieco przesunięta na lewo.

<sup>1)</sup> Pan Tcheng Kao, Phys. Berichte, 13, 1301, 1932.

Na krzywej IV przyciągania się zachodzą w interwałach od  $(k-1)\frac{\lambda}{4}$  do  $k\frac{\lambda}{4}$  dla  $k = 1, 3, 5, \dots$ , odpychania zaś dla  $k = 2, 4, 6, \dots$ . Gdybyśmy uwzględnili przesuwanie się krzywych w prawo ze wzrostem częstości, można byłoby w przybliżeniu napisać, że w przedziałach od  $(k-1)\frac{\lambda}{4} + \eta$  do  $k\frac{\lambda}{4} + \eta$ , gdzie  $\eta$  jest pewną funkcją częstości, przyciąganie występuje dla  $k = 3, 5, 6, \dots$ , odpychanie zaś dla  $k = 4, 6, 8, \dots$ ; wartości na  $k = 1, 2$  pominięto, ponieważ przy małych  $l$  występują znaczne odchylenia.

Ponieważ, jak wyżej było zaznaczone (str. 449, rys. 2), falę odbitą od ekranu można uważać za pochodzącą od innego źródła drgającego synchronicznie z pierwszym i mając na uwadze to, że promieniowanie zniekształca się w pobliżu oscylatora, a nie przy ekranie, można w przybliżeniu zaznaczyć, że dwa źródła akustyczne w interwałach od  $(k-1)\frac{\lambda}{2} + \eta'$  do  $k\frac{\lambda}{2} + \eta'$  ( $\eta' = 2\eta$ ), przyciągają się, gdy  $k = 3, 5, 7, \dots$ , odpychają się zaś, gdy  $k = 4, 6, 8, \dots$ ; dla  $k = 1, 2$  mamy znaczne odchylenia.

\* \* \*

Zjawisko powstawania fal stojących oraz ich „gaszenia się“ (zjawisko *Wooda i Loomisa*: czwarty rodzaj sił pond.) występuje tak samo w przypadku fal elektromagnetycznych, a w szczególności w optyce. Zjawisko *Dvořáka* było również zaobserwowane przez *Lebedewa* w przy zastosowaniu rezonatorów elektrycznych i magnetycznych<sup>1)</sup>, a więc możemy przypuszczać, że dwa źródła fal elektromagnetycznych, a w szczególności świetlnych, o tej samej częstości, wzajemnie się przyciągają względnie się odpychają, w zależności od ich wzajemnej odległości.

\* \* \*

Należałoby jeszcze zaznaczyć, że w toku pracy napotymano stale bardzo wielkie przeszkody natury finansowej z powodu nader skromnych środków, jakimi rozporządza Zakład Fizyki Doświadczalnej U. P., dzięki czemu nie można było zbadać szeregu naogół nawet bardzo prostych zagadnień (np. wydzielające się ciepło i t. d.).

Poczuwam się do miłego obowiązku złożenia podziękowania P. Prof. Dr. *A. Denizotowi* za pomoc oraz cenne wskazówki podczas wykonywania pracy.

*Zakład Fizyki Doświadczalnej Uniwersytetu Poznańskiego.*

Rękopis otrzymany dnia 9 listopada 1932.

<sup>1)</sup> P. *Lebedew*. *Wied. Ann.* 52, 609, 1894.