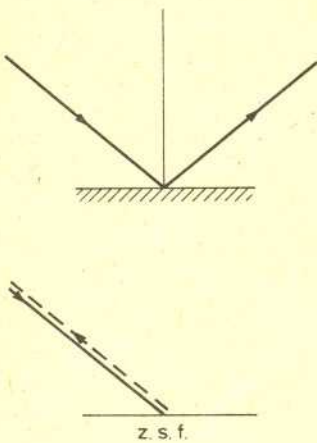
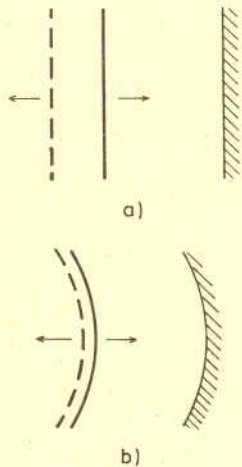


Odwrócenie frontu fali świetlnej

Prof. dr Adam KUJAWSKI



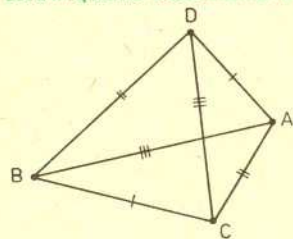
Rys. 1



Rys. 2



Rozwiązanie zadania M 547.



Oznaczmy $BC = k$, $CA = l$, $AB = m$,
 $DA = n$, $DB = o$, $DC = p$.

Mamy $k + l + m = l + n + p$, skąd

$$(*) \quad k + m = n + p,$$

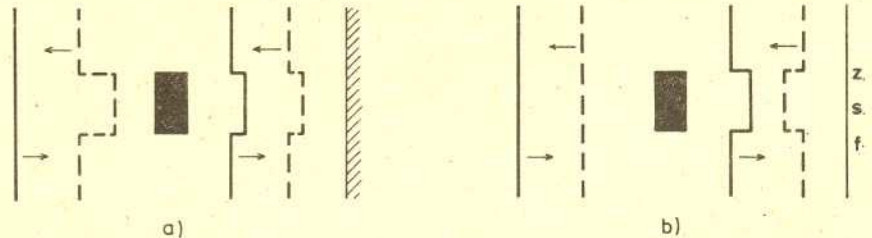
a także $m + n + o = k + o + p$, skąd

$$(**) \quad m + n = k + p.$$

Odejmując stronami (*) i (**) otrzymujemy $k - n = n - k$, tj. $k = n$; wynika stąd, że $m = p$. Ponadto $k + l + m = k + o + p$, więc $l = o$. Zatem przeciwległe krawędzie czworokąta mają równe długości, stąd od razu wynika, że ściany są przystające.

Obserwując zjawisko odbicia światła od zwierciadła stwierdza się w prosty sposób, że promień padający, odbity i prostopadła padania leżą w jednej płaszczyźnie, a kąt odbicia jest równy kątowi padania. We współczesnej optyce nieliniowej bada się zjawiska, w których promień „odbija się” w zupełnie inny sposób. Rysunek 1 ilustruje odbicie od zwykłego zwierciadła oraz od tak zwanego zwierciadła sprzęgającego fazę (w jęz. ang. *phase-conjugate mirror*). W tym drugim przypadku wytwarzany jest promień odbity o kierunku przeciwnym do kierunku promienia padającego. Zjawisko to w opisie optyki falowej nazywa się odwróceniem frontu fali świetlnej. Jest ono w centrum zainteresowań wielu ośrodków badawczych ze względu na jego oryginalność i duże możliwości zastosowań.

Niech na zwierciadło płaskie pada prostopadle fala, której powierzchnia stałej fazy jest płaszczyzną, jak na rysunku 2a. Podobnie, niech na zwierciadło sferycznie wklęsłe pada fala o sferycznej powierzchni stałej fazy „dopasowanej” do powierzchni zwierciadła, jak ilustruje to rysunek 2b. Te przykłady pokazują, że po odbiciu fala może mieć taką samą powierzchnię stałej fazy; oznacza to, że jej front falowy nie zmienia się, zmienia się natomiast kierunek propagacji. Taką sytuację przyjęto nazywać odwróceniem frontu fali lub wytwarzaniem fali o fazie sprzężonej. To drugie określenie wynika z odpowiedniego opisu matematycznego. Jeśli jednak front falowy nie jest dopasowany do zwierciadła, na przykład na skutek przejścia fali płaskiej przez płytkę szklaną, jak na rysunku 3a (pomijamy efekty dyfrakcyjne), odbicie od zwykłego zwierciadła i ponowne przejście przez płytkę prowadzi do powstania fali o innym froncie falowym niż płaski. Co dzieje się, gdy fala o odkształconym froncie falowym pada na zwierciadło sprzęgające fazę? W tym przypadku, jak pokazuje rysunek 3b, front fali zostaje odwrócony, a po ponownym przejściu przez płytkę powstaje fala o froncie falowym takim samym jak front fali padającej. Jest to prosta ilustracja możliwości zastosowań praktycznych zwierciadła sprzęgającego fazę.



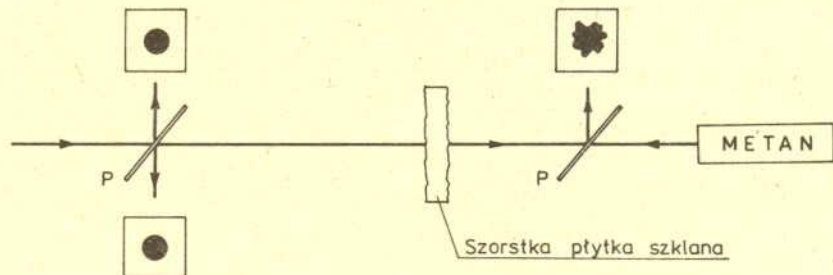
Rys. 3

W 1972 r. B.J. Zeldowicz ze współpracownikami przeprowadzili eksperyment, w którym wykazano, że w zjawisku wymuszonego rozpraszania Brillouina-Mandelsztama zachodzi odwrócenie frontu fali świetlnej. Ten eksperyment stał się początkiem nowego kierunku badań zwanego obecnie optyką pół ze sprzężoną fazą (w jęz. ang. *phase-conjugate optics*). Zjawisko wymuszonego rozpraszania Brillouina-Mandelsztama zaobserwowano w latach sześćdziesiątych, gdy rozpoczęły się intensywne badania optycznych zjawisk nieliniowych. Wyjaśnijmy na czym polega to zjawisko. Najpierw przypomnijmy, że gdy wiązka światła o małym natężeniu przechodzi przez ośrodek przezroczysty (może to być ciecz, gaz, kryształ lub szkło), zachodzi niewielka absorpcja i rozproszenie światła. Jeśli na ośrodek ten pada jednocześnie fala ultradźwiękowa (która w szczególności może tworzyć falę stojącą), zachodzi dodatkowe rozpraszanie światła, jak wykazali niezależnie L. Brillouin i L.I. Mandelsztam. Dzieje się tak dlatego, że zmiany gęstości ośrodka na skutek rozchodzenia się fali mechanicznej (ultradźwiękowej) powodują zmiany współczynnika załamania światła. W kwantowej interpretacji oznacza to, że rozproszenie pierwotnego fotonu o energii $\hbar\omega_1$ i pędzie $\hbar\vec{k}_1$ prowadzi do powstania fotonu o energii $\hbar\omega_2$ i pędzie $\hbar\vec{k}_2$ oraz fononu (kwantu drgań ośrodka) o energii $\hbar\omega_a$ i pędzie $\hbar\vec{k}_a$. Obowiązują zasady zachowania energii $\omega_1 = \omega_2 + \omega_a$ i pędu $\vec{k}_1 = \vec{k}_2 + \vec{k}_a$. Ponieważ częstość ω_2 jest bliska wartości ω_1 . Jednocześnie kierunek fotonu rozproszonego zależy od kierunku fali ultradźwiękowej. Gdy nie ma zewnętrznej fali ultradźwiękowej, rozproszenie jest wynikiem fluktuacji termicznych ośrodka. Nosi ono nazwę spontanicznego rozpraszania Brillouina-Mandelsztama.

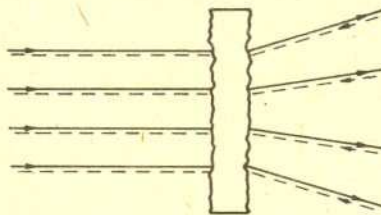
Elektrostrykcja – odkształcenie ośrodka dielektrycznego (obserwowane również w półprzewodnikach) spowodowane zewnętrznym polem elektrycznym. Wykorzystuje się do wytwarzania ultra i hiperdźwięków o częstościach do $10^9 \div 10^{11}$ Hz.

Dla dostatecznie dużego natężenia światła (odpowiada to gęstości mocy rzędu MW/cm^2) przebieg zjawiska jest inny i zachodzi prawie całkowite „odbicie” wiązki padającej. Tak duże moce można uzyskać z laserów pracujących impulsowo; są to tak zwane impulsy gigantyczne. Impuls światła o dostatecznie dużym natężeniu padając na ośrodek materialny rozpoczyna za pośrednictwem zjawiska elektrostrykcji wzbudzanie fal ultradźwiękowych o różnych kierunkach; ich pojawienie się powoduje jednocześnie rozpraszanie światła padającego. Wytworzona fala świetlna o mniejszej częstości i przeciwnym kierunku propagacji niż fala padająca interferuje z falą padającą, co prowadzi do generacji fali ultradźwiękowej o kierunku propagacji przeciwnym do kierunku padającej fali świetlnej. Tak wzbudzona fala ultradźwiękowa powoduje w dużym stopniu ukierunkowane rozproszenie światła. To wzajemne oddziaływanie powoduje, że światło rozproszone formuje się na kształt wiązki padającej i rozchodzi się w kierunku przeciwnym. Z tego powodu efekt ten nazywa się po prostu odbiciem. Nosi ono nazwę wymuszonego efektu Brillouina-Mandelsztama.

W oryginalnym doświadczeniu Zeldowicza i jego grupy impuls światła z lasera rubinowego przechodził przez płytkę szklaną o szorstkiej powierzchni (rodzaj matówki), a następnie padał na sprężony metan w naczyniu o kształcie światłowodu (przekrój poprzeczny $4 \times 4 \text{ mm}^2$, długość około 1 m). Po przejściu przez matówkę kąt rozbieżności impulsu światła powiększa się i rozkład natężenia w płaszczyźnie prostopadłej do kierunku propagacji staje się nieregularny. W wyniku wymuszonego rozpraszania Brillouina-Mandelsztama powstaje impuls odbity, który ponownie przechodzi przez matówkę, a jego rozbieżność kątowa i rozkład natężenia okazują się być takie same jak impulsu pierwotnego. Schemat eksperymentu ilustruje rysunek 4.



Rys. 4



Rys. 5

Zaznaczono na nim płytki częściowo odbijające P , które umożliwiają ocenę rozbieżności kątowej impulsu pierwotnego i impulsu, który dwukrotnie przeszedł przez matówkę, a także impulsu rozproszonego po przejściu przez matówkę. Omawiany efekt nie zachodzi, a ponowne przejście przez matówkę powiększa rozbieżność kątową, gdy zamiast zbiornika z metanem wstawione jest zwykłe zwierciadło. Rysunek 5 ilustruje rolę zwierciadła odwracającego front fali; promienie światła odbitego (linie przerywane) mają kierunki przeciwnie niż promienie padające, tak że ponowne przejście przez ośrodek niejednorodny, zmieniający rozkład powierzchni stałej fazy fali padającej, odtwarza wiązkę pierwotną.

Obecnie wytwarzanie fali o odwróconym froncie falowym zostało zaobserwowane dla prawie każdego optycznego zjawiska nieliniowego i znalazło liczne zastosowania. Szczególnie ważne i mające głębokie związki z hologafią okazało się zjawisko mieszania czterech fal. W tym zjawisku dwie wiązki światła padają z dwóch przeciwnych stron na ośrodek nieliniowy, a jednocześnie padająca trzecia wiązka, zwana sygnałową, powoduje generację czwartej fali, mającej odwrócony front falowy względem fali sygnałowej. Generacja fali fazowo sprzężonej jest możliwa zarówno dla impulsów, jak i dla fali ciągłej. Okazuje się także, że fala generowana może mieć natężenie większe niż fala sygnałowa. Część tych badań zalicza się do nowej dziedziny zwanej hologafią dynamiczną.

Nazwa zwierciadło odwracające front fali (lub sprzęgające fazę fali padającej) jest powszechnie używana; należy jednak podkreślić, że nie jest tutaj istotne zjawisko odbicia, lecz to, że w różnych zjawiskach nieliniowych może być generowana wiązka lub impuls światła o takim samym kształcie przestrzennym i przeciwnym kierunku propagacji. Może to być także interpretowane jako „odwrócenie” fali świetlnej w czasie, bowiem zostaje ona ponownie odtworzona. Warto wspomnieć, że koncepcja zwierciadła odwracającego front fali padającej, chociaż dotychczas realizowana tylko w warunkach specjalnie dobranych, stała się źródłem idei różnych zastosowań, jak też pytań o jego własności podstawowe. Zastanów się, na przykład, nad następującym prostym pytaniem. Co zobaczysz patrząc na zwierciadło odwracające front fali?