

6. Interferencja światła

Natężenie światła:

Częstotliwość fali świetlnej jest tak duża, że nie istnieje detektor zdolny do podążania za zmianami pola elektrycznego. Dlatego detektory światła mierzą nie wartość pola a uśredniony po czasie jego kwadrat. Wielkością mierzona proporcjonalną do energii fali jest

$$I = \langle E^2 \rangle / Z_0,$$

nazywane natężeniem światła (dokładniej: jest to energia padająca na element powierzchni w jednostce czasu). Z_0 jest stałą zaś $\langle \rangle$ oznacza uśrednienie po czasie, w którego wyniku

między innymi uzyskuje się $\langle \cos(\omega t + \varphi) \rangle = 0$, $\langle \cos^2(\omega t + \varphi) \rangle = \frac{1}{2}$. W rezultacie, jeśli fala

jest monochromatyczna, czyli $E = A \cos(\omega t - kx + \varphi)$, to jej natężenie wynosi $I = A^2 / 2Z_0$.

Nakładanie się dwóch fal

Jeśli dwie fale monochromatyczne, opisywane wzorami: $E_1 = A_1 \cos(\phi_1)$, $E_2 = A_2 \cos(\phi_2)$, (gdzie $\phi_1 = \omega_1 t - k_1 x + \varphi$, $\phi_2 = \omega_2 t - k_2 x + \varphi$), o natężeniach odpowiednio I_1 i I_2 , nałożą się w pewnej płaszczyźnie $x = \text{const}$, to:

wypadkowe pole elektryczne E jest sumą pól składowych: $E = E_1 + E_2$;

wypadkowe natężenie światła I nie jest prostą sumą natężeń, gdyż:

$$I = \langle E^2 \rangle / Z_0 = \langle (E_1 + E_2)^2 \rangle / Z_0 = \langle (E_1)^2 + (E_2)^2 + 2E_1 E_2 \rangle / Z_0 = I_1 + I_2 + 2\langle E_1 E_2 \rangle / Z_0$$

Zatem pojawia się dodatkowy czynnik $2\langle E_1 E_2 \rangle$, który da się zapisać w postaci:

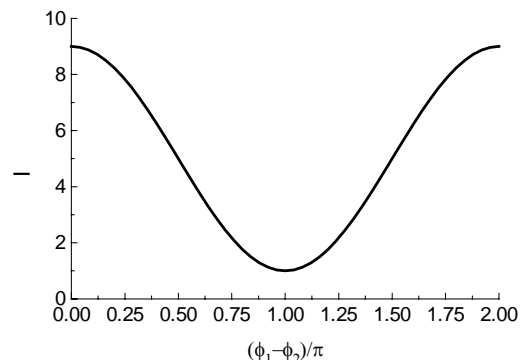
$$\langle 2E_1 E_2 \rangle = \langle 2A_1 A_2 \cos \phi_1 \cos \phi_2 \rangle = A_1 A_2 \langle \cos(\phi_1 + \phi_2) + \cos(\phi_1 - \phi_2) \rangle$$

Obie fazy ϕ_1 i ϕ_2 są liniowymi funkcjami czasu, więc wartości średnie z cosinusa ich sumy i różnicy powinny się zerować i wówczas natężenie wypadkowe jest sumą natężeń: $I = I_1 + I_2$.

Jednakże, gdy częstości obu fal składowych są takie same ($\omega_1 = \omega_2$), to różnica faz jest niezależna od czasu: $\phi_1 - \phi_2 = k_1 x - k_2 x$ i wówczas wypadkowe natężenie światła wynosi:

$$I = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \cos(\phi_1 - \phi_2).$$

Natężenie wypadkowe I może być większe lub mniejsze od sumy natężeń fal składowych w zależności od znaku funkcji cosinus. Dla przypadku jednakowych natężeń fal składowych $I_1 = I_2$ wypadkowe natężenie może być równe zero, gdy $\phi_1 - \phi_2 = \pi$ (fale się wygaszają), lub być dwa razy większe niż suma natężeń, gdy $\phi_1 - \phi_2 = 0$ (fale się wzmacniają). Wykres obok przedstawia wartość wypadkową natężenia dla fal składowych o różnych natężeniach $I_1 = 4$ i $I_2 = 1$ w zależności od niezmienniczej w czasie różnicy faz między nimi.

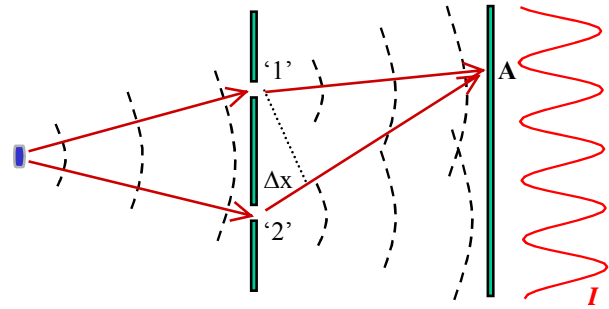


Interferencja

Nałożenie się dwóch fal, w którego wyniku wypadkowe natężenie nie jest sumą natężeń nazywa się interferencją a człon $2\sqrt{I_1 I_2} \cos(\phi_1 - \phi_2)$ nazywa się członem interferencyjnym.

Interferencję można obserwować w układzie przedstawionym na rysunku. Źródła kulistych fal monochromatycznych '1' i '2' (o jednakowych fazach) oświetlają płaski ekran. Droga, jaką musi przebyć fala do punktu A na ekranie od źródła '1' jest krótsza o Δx od drogi fali ze źródła '2'. Dlatego w punkcie A pojawi się między obiema falami różnica faz $\phi_1 - \phi_2 = -k\Delta x$.

Różnica faz jest inna w każdym punkcie i dlatego w wyniku interferencji obserwuje się lokalnie maksima i minima wypadkowego natężenia światła, czyli tzw. prążki interferencyjne. Należy podkreślić, że całkowita energia jest zachowana a skoro w jednych miejscach fale się wygaszają, to w innych muszą się wzmacnić. Zatem interferencja powoduje redystrybucję rozkładu energii (natężenia) fali.



Spójność światła

W rzeczywistości nie istnieją dwa różne źródła, których fazy zawsze byłyby identyczne, czyli różnica faz $\phi_1 - \phi_2$ nie zawsze jest stała w czasie. Gdy zmiany różnicy faz są na tyle duże, że obserwacja interferencji jest niemożliwa, źródła obu fal składowych nazywa się niespójnymi. Źródła są spójne wtedy, gdy różnica faz jest na tyle stabilna, że obserwuje się ich interferencję. Czyli do wystąpienia interferencji potrzeba spójnych fal o tej samej częstotliwości. Dlatego min. na stole oświetlonym przez dwie lampy nie widać prążków interferencyjnych.

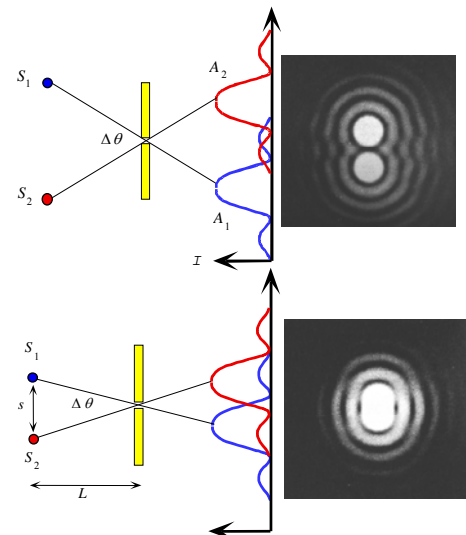
Dyfrakcja

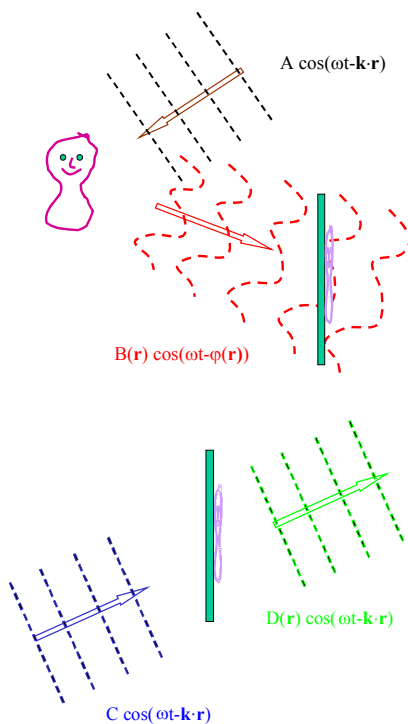
Czoło fali można traktować jako zbiór punktowych źródeł fal. Każde z takich źródeł wytwarza falę kulistą, która się nakłada na fale wytworzone przez pozostałe źródła. Kierunek rozchodzenia się czoła fali jest zdeterminowany przez interferencję takich fal składowych i dlatego czoło fali wypadkowej jest prostopadłe do kierunku przesuwania się fali. Powierzchnie wyznaczone przez kolejne położenia czoła fali są powierzchniami stałej fazy.

Powyższy model propagacji fal nazywany jest modelem Huygensa (czyt.: *hojhensa*). Pozwala on zrozumieć, co się dzieje, gdy na drodze fali znajduje się przeszkoda, np. w postaci nieprzeźroczystej przesłony, jak na rysunkach obok. Składowe fale kuliste promieniujące w obszar za przesłoną nie są wówczas

wygaszane interferencyjnie, w przeciwieństwie do przypadku, gdy nie ma przesłony. Dlatego fala wypadkowa ulega ugięciu na krawędzi przesłony. Zjawisko to nazywane jest dyfrakcją fali.

Dyfrakcja powoduje między innymi, że obraz punktu w rzeczywistym układzie optycznym jest rozmyty (każda soczewka ma skończoną szerokość, czyli należy ją traktować jak umieszczoną w otworze nieprzeźroczystej przesłony). Dlatego obrazy dwóch punktów będą widoczne jako niezależne tylko, gdy są odpowiednio od siebie odległe (górny rysunek obok), natomiast gdy są blisko siebie stają się nierozróżnialne (dolny rysunek obok). Ogranicza to rozdzielczość układów optycznych takich jak mikroskopy czy teleskopy.





Holografia

Płaska fala monochromatyczna $A \cos(\omega t - \mathbf{k} \cdot \mathbf{r})$ ma niezależną od położenia amplitudę A (i natężenie) oraz prostą zależność fazy od położenia. W ogólniejszym przypadku fali monochromatycznej, która nie jest falą płaską:

$$B(\mathbf{r}) \cos(\omega t - \varphi(\mathbf{r})),$$

zarówno amplituda $B(\mathbf{r})$ jak i faza $\varphi(\mathbf{r})$ może być złożoną funkcją położenia \mathbf{r} . Przykładowo w fali odbitej od obiektu oświetlonego falą płaską (rysunek) amplituda niesie informację o przestrzennej zdolności odbijającej obiektu zaś faza określając odległość, jaką przebywa fala, niesie informację o kształcie przestrzennym tego obiektu.

Zwykle zdjęcia zapisują natężenie światła tworząc dwuwymiarowy obraz rozkładu jasności proporcjonalny do natężenia światła odbitego od obiektu $\mathcal{I} = \zeta |B(\mathbf{r})|^2$. Po oświetleniu wywołanego zdjęcia fala przechodząca (jak również odbita) ma rozkład natężenia proporcjonalny do jasności obrazu $D(\mathbf{r}) = \zeta |B(\mathbf{r})|^2 C$ lecz fazę fali oświetlającej zdjęcie. W ten sposób gubiona jest informacja o kształcie obiektu w trzecim wymiarze.

Zapis fazy jest możliwy przez wykorzystanie zjawiska interferencji a ten sposób zapisu trójwymiarowości obiektów stosuje się w holografii. Hologram jest zdjęciem obrazu interferencyjnego światła o znanej fazie (zwanej falą odniesienia np. fali płaskiej $C \cos(\omega t - \mathbf{k} \cdot \mathbf{r})$) ze światłem odbitym od obiektu fotografowanego (falą obrazową). Po wywołaniu hologramu otrzymujemy rozkład jasności proporcjonalny do obrazu interferencyjnego fali odniesienia z falą obrazową:

$$\mathcal{I} = \zeta |B(\mathbf{r})|^2 + \zeta |C|^2 + 2\zeta B(\mathbf{r})C \cos(\varphi(\mathbf{r}) - \mathbf{k} \cdot \mathbf{r}).$$

Oświetlając hologram taką samą falą, jak stosowana do jego zapisu fala odniesienia, fala przechodząca ma postać:

$$\mathcal{I} C \cos(\omega t - \mathbf{k} \cdot \mathbf{r}) = \{...\} + 2\zeta B(\mathbf{r})C^2 \cos(\varphi(\mathbf{r}) - \mathbf{k} \cdot \mathbf{r}) \cos(\omega t - \mathbf{k} \cdot \mathbf{r}) = \{...\} + \zeta B(\mathbf{r})C^2 \cos(\omega t + \varphi(\mathbf{r}) - 2\mathbf{k} \cdot \mathbf{r}) + \zeta B(\mathbf{r})C^2 \cos(\omega t - \varphi(\mathbf{r})).$$

gdzie $\{...\} = [\zeta |B(\mathbf{r})|^2 + \zeta |C|^2] C \cos(\omega t - \mathbf{k} \cdot \mathbf{r})$ oraz skorzystano z wzoru na iloczyn cosinusów.

Podkreślony człon opisujący falę przechodzącą przez hologram jest z dokładnością do ζC^2 identyczny z falą obrazową. Oznacza to, że w świetle przechodzącym przez hologram odtworzeniu uległa fala zawierająca również fazę fali odbitej od obiektu fotografowanego niosąca informacje o trójwymiarowych własnościach obiektu.

Zapisując i odtwarzając hologram trzeba korzystać ze spójnych monochromatycznych źródeł światła (laserów). Są jednak specjalne rodzaje hologramów, które można oglądać w świetle białym. W takich hologramach obiekt odtwarzany jest przez falę o jednej długości i dlatego są one jednobarwne. Aby stworzyć wrażenie dowolnej barwy można jednak zapisać na jednej fotografii trzy hologramy odtwarzane przez fale o różnych długościach. Dla prostych obiektów można tworzyć hologramy tzw. syntetyczne, w których obraz interferencyjny jest wyliczany komputerowo.

