



Monochromatyczność

spójność

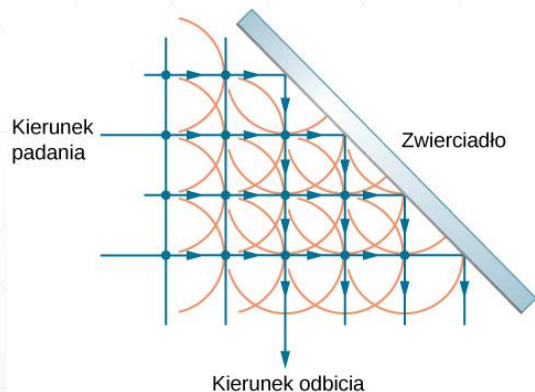
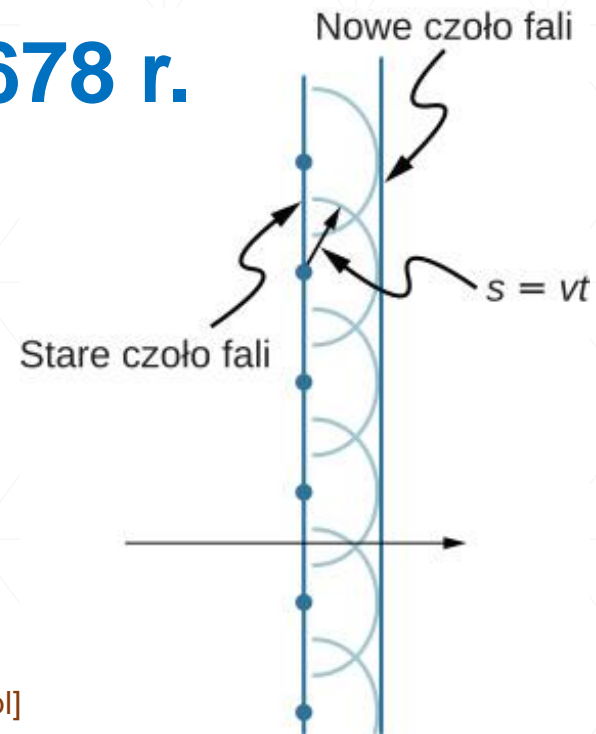
polaryzacja



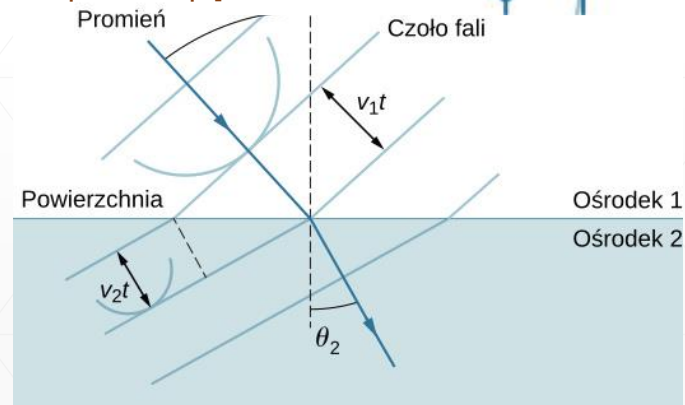
Zasada Huygensa 1678 r.

Zasada Christiana Huygensa zakłada, że światło jest falą (a nie strumieniem cząstek), która rozprzestrzenia się w ten sposób, że **wszystkie punkty czoła fali można uważać za źródła nowych fal kulistych**, a położenie czoła fali po czasie t będzie dane przez powierzchnię styczną do tych fal kulistych

Metoda Huygensa daje się zastosować jakościowo do **wszelkich zjawisk falowych**. Za pomocą fal elementarnych Huygensa można przedstawić zarówno odbicie fal jak i ich załamanie.



[Fizyka dla szkół wyższych – t. 3, www.openstax.pl]



Odbicie: fale kuliste (wtórne) powstają wtedy, gdy dany punkt czoła fali dociera do zwierciadła. Styczna do powierzchni powstających fal kulistych wytycza nowe czoło fali odbitej pod kątem równym kątowi padania. Kierunek rozchodzenia się fali jest prostopadły do czoła fali i przedstawiony jako strzałka skierowana pionowo w dół.

Załamanie: zastosowanie zasady dla fali płaskiej przemieszczającej się z jednego ośrodka do drugiego, w którym prędkość fali jest mniejsza. Promień ugina się w kierunku normalnej, ponieważ fale poruszające się w drugim ośrodku³ mają mniejszą prędkość.

Równania Maxwella 1873 r.

- Prawo Gaussa dla pola elektrycznego

$$\operatorname{div} \vec{D} = \rho$$

źródłowość pola – ładunek elektryczny wytwarza pole elektryczne

- Prawo Gaussa dla pola magnetycznego

$$\operatorname{div} \vec{B} = 0$$

nie istnieje ładunek magnetyczny, pole magnetyczne jest bezźródłowe

- Prawo indukcji elektromagnetycznej

$$\operatorname{rot} \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}$$

zmienne pole magnetyczne wytwarza wirowe pole elektryczne (prąd elektryczny)

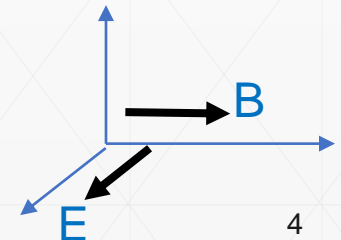
- Uogólnione prawo Ampera

$$\operatorname{rot} \vec{H} = \vec{j} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t}$$

prąd elektryczny lub zmienne pole elektryczne wytwarzają wirowe pole magnetyczne

Założmy, że $E_x = E_z = 0$, $E = E_y \neq 0$ oraz $B = B_z \neq 0$, $B_x = B_y = 0$.

Z równań Maxwella mamy, że



$$(1) \frac{\partial E_y}{\partial x} = \frac{\partial E}{\partial x} = -\frac{\partial B}{\partial t}$$

$$(2) -\frac{\partial B_z}{\partial x} = -\frac{\partial B}{\partial x} = \mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial E}{\partial t}$$

$$(1) \frac{\partial^2 E}{\partial x^2} = -\frac{\partial^2 B}{\partial t \partial x}$$

$$(2) -\frac{\partial^2 B}{\partial x \partial t} = \mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial^2 E}{\partial t^2}$$



$$\frac{\partial^2 E}{\partial t^2} = \frac{1}{\mu_0 \epsilon_0} \frac{\partial^2 E}{\partial x^2}$$

$$(1) \frac{\partial^2 E}{\partial x \partial t} = -\frac{\partial^2 B}{\partial t^2}$$

$$(2) -\frac{\partial^2 B}{\partial x^2} = \mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial^2 E}{\partial t \partial x}$$



$$\frac{\partial^2 B}{\partial t^2} = \frac{1}{\mu_0 \epsilon_0} \frac{\partial^2 B}{\partial x^2}$$

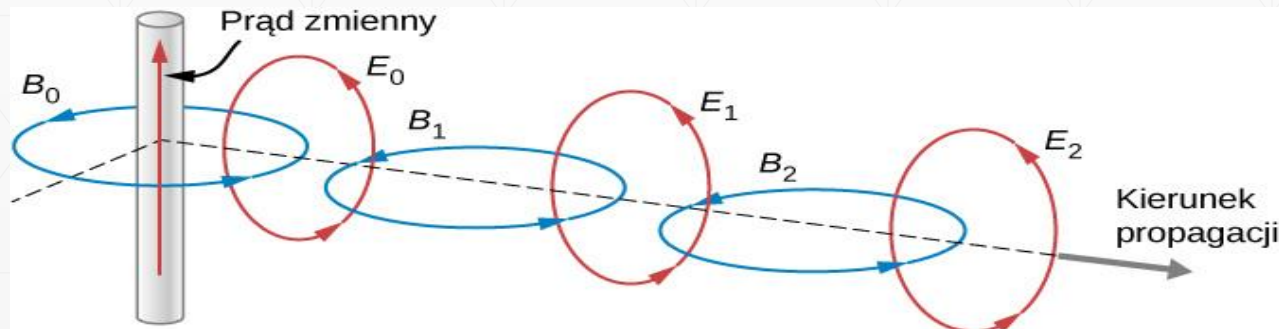
Równanie płaskiej fali $\frac{\partial^2 y}{\partial t^2} = v^2 \frac{\partial^2 y}{\partial x^2}$ o prędkości fazowej v

$$y(x, t) = A \sin(\omega t - kx) = A \sin \left[\frac{2\pi}{\lambda} (vt - x) \right]$$

Podstawiając $\epsilon_0 = 8.12 \cdot 10^{-12} \text{ C}^2/(\text{Nm})$ i $\mu_0 = 4 \cdot 10^{-7} \text{ Wb}/(\text{Am})$ do wzoru na prędkość rozchodzenia się zaburzenia pola elektromagnetycznego, otrzymamy

$$v = \frac{1}{\sqrt{\mu_0 \epsilon_0}} \equiv c$$

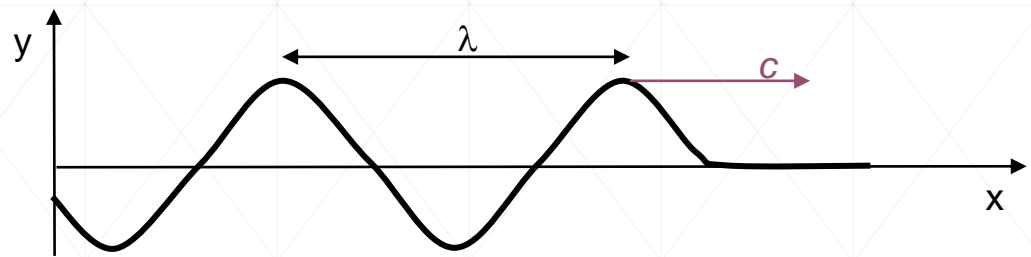
A więc fale elektromagnetyczne rozchodzą się z prędkością światła, Pola \mathbf{E} i \mathbf{B} są polami sprzężonymi. Rozwiązania równań Maxwella opisują płaską falę elektromagnetyczną biegnącą wzdłuż osi x z prędkością c .



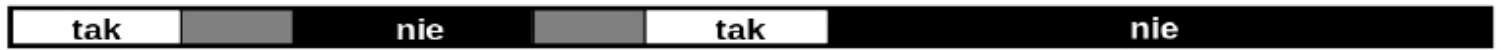
$$y(x, t) = A_o \sin(\omega t - kx)$$

ponieważ $k = \omega/c$

$$\text{to } c = \frac{\omega}{k} = \frac{2\pi f}{2\pi/\lambda} = f \cdot \lambda = \text{const}$$



Przenika atmosferę ziemską?



Typ promieniowania
Długość fali (m)

radiowe

10^3



budynki

mikrofale

10^{-2}



człowiek

podczerwień

10^{-5}



motyl



ostrze igły

światło widzialne

$0,5 \times 10^{-6}$



najmniejsze pierwotniaki

ultrafiolet

10^{-8}



duże cząsteczki

rentgenowskie gamma

10^{-10}



atomy

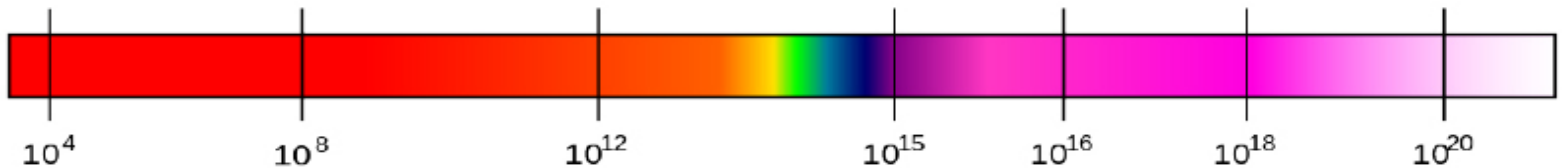
10^{-12}



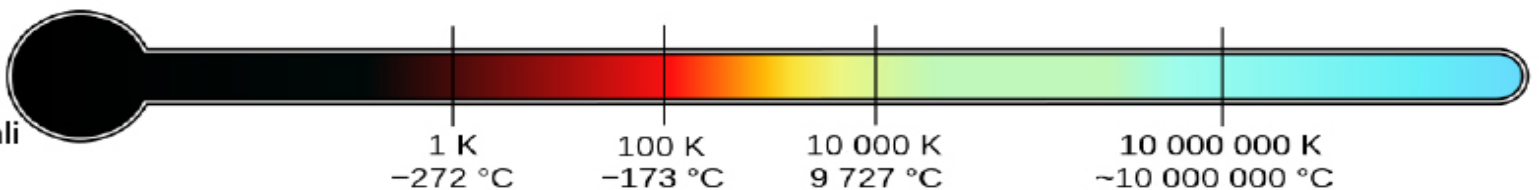
jądra atomowe

Obiekt o skali zbliżonej do długości fali

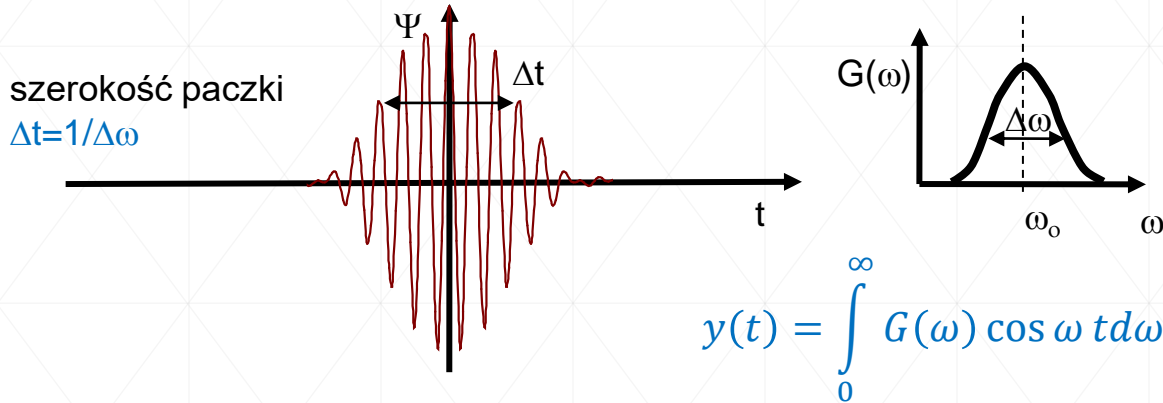
Częstotliwość (Hz)



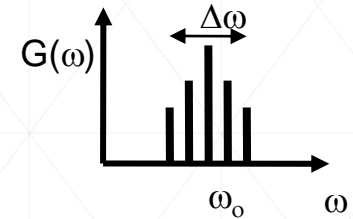
Temperatura ciała emitującego promieniowanie o podanej długości fali



W rzeczywistości mamy do czynienia z rozchodzeniem się nie jednoczęstotliwościowej fali ale tzw. **paczki falowej** (sumowanie nieskończonej liczby fal o częstościach bliskich ω_0 i amplitudach opisanych funkcją Gaussa otrzymujemy pojedynczą.



Skąd się bierze takie widmo

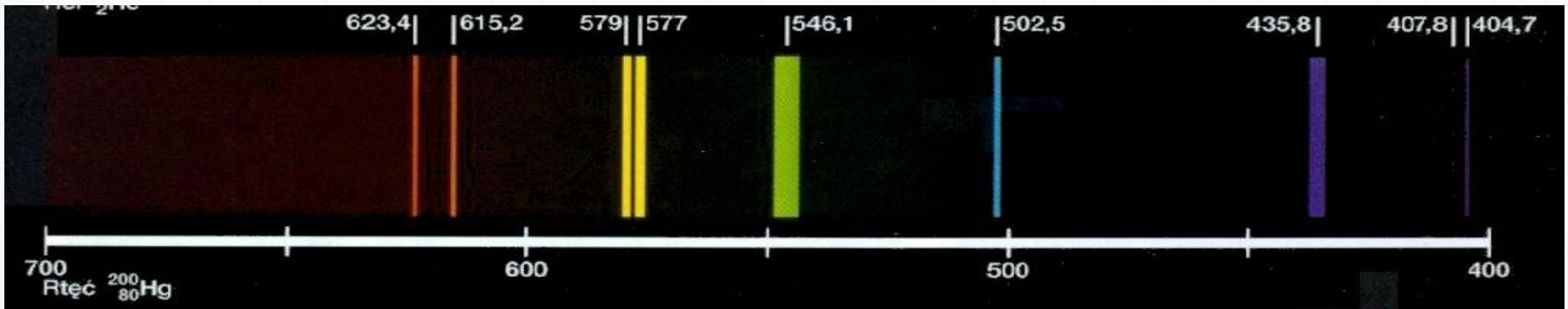


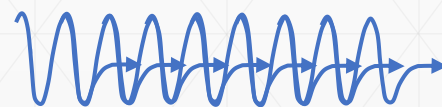
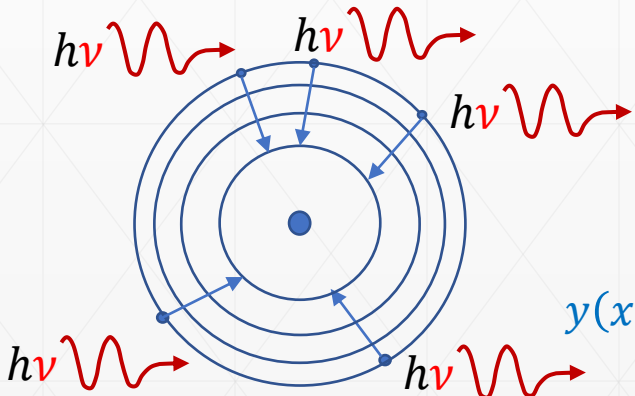
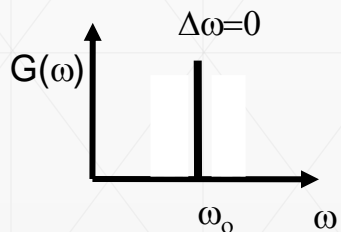
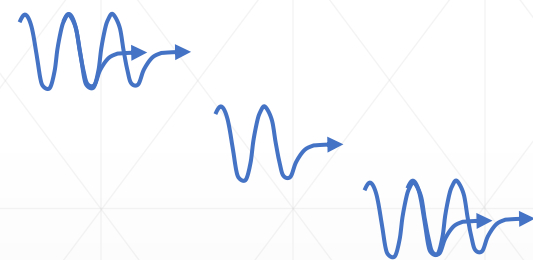
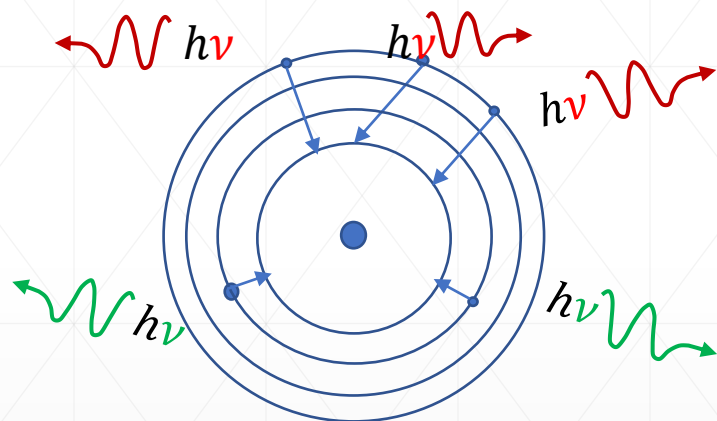
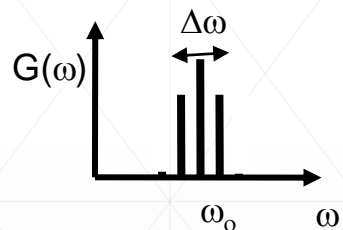
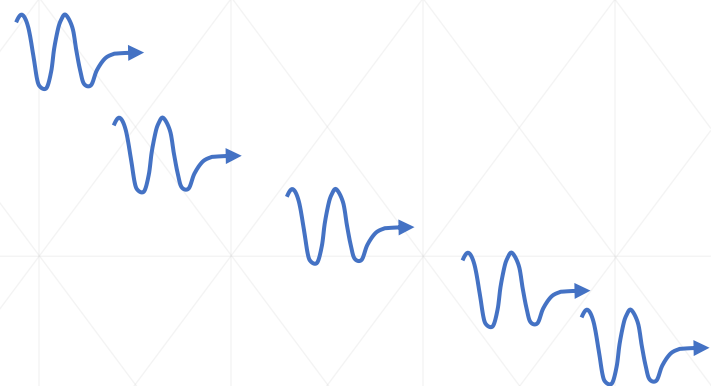
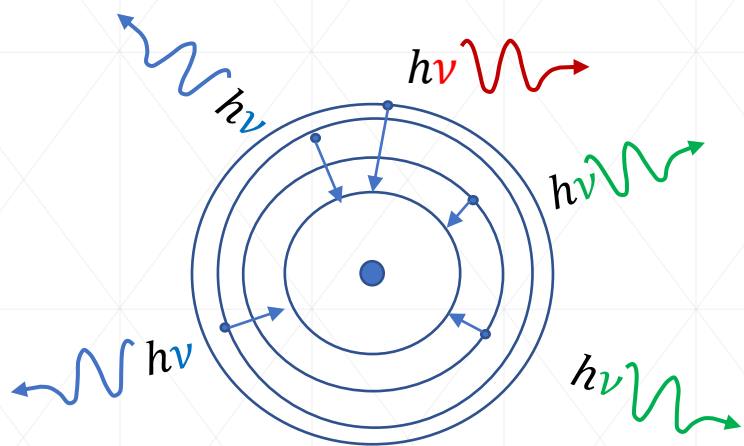
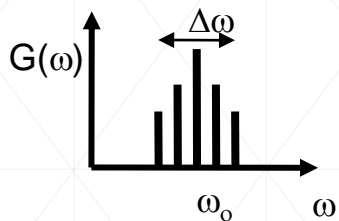
Widmo optyczne: wzbudzone atomy przechodzą do stanu niższego promieniując energię w postaci kwantów promieniowania o częstości ν_{nm} równej

$$\nu_{nm} = \frac{E_n - E_m}{h}$$

gdzie E_n i E_m – energia elektronu odpowiednio na wyższym i niższym poziomie energetycznym

- każdy pierwiastek ma charakterystyczny układ linii emisyjnych

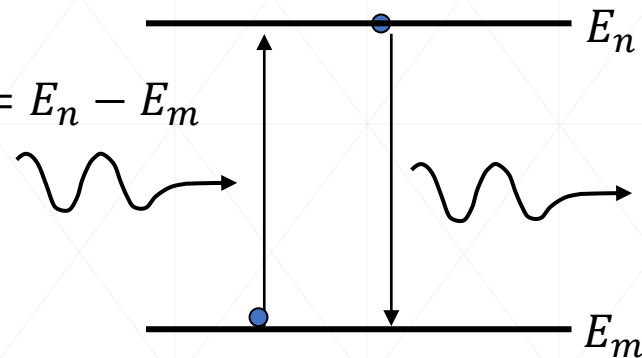




$$y(x, t) = A \sin(\omega t - kx) = A \sin\left[\frac{2\pi}{\lambda}(vt - x)\right]$$

Zmiana stanu kwantowego atomu musi się więc wiązać albo z wydzieleniem (emisją) pewnej części energii albo z jej pochłonięciem (absorpcją) przy czym tymi procesami rządzą określone prawa fizyczne (Einstein 1917 r.):

Absorpcja - proces pochłaniania fali poprzez przejście atomu ze stanu podstawowego E_m do stanu wzbudzonego E_n . $h\nu_{nm} = E_n - E_m$
 Liczba przejść absorpcyjnych jest proporcjonalna do gęstości widmowej prom. $u(\nu_{nm}) \rightarrow dN_m = B_{mn}u(\nu_{nm})N_m dt$
 gdzie B_{mn} - współczynnik absorpcji.

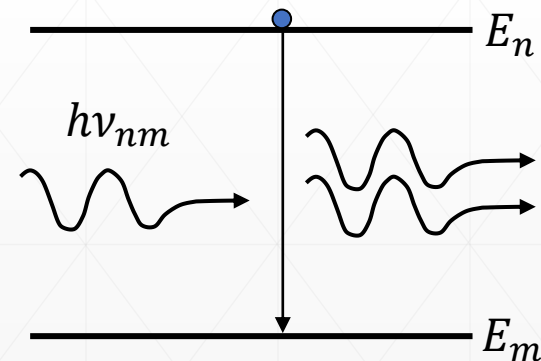


Emisja (spontaniczna) - emisja kwantu promieniowania przy samorzutnym przejściu atomu ze stanu wzbudzonego E_n do stanu niższego energetycznie E_m .

Liczba przejść spontanicznych w czasie dt jest proporcjonalna do $N_n(t)dt \rightarrow dN_n = A_{mn}N_n dt$
 gdzie A_{mn} - współczynnik emisji spontanicznej. Jest on równy odwrotności średniego czasu życia atomów w stanie wzbudzonym (około 10^{-8} s) i określa prawdopodobieństwo przejścia spontanicznego w jednostce czasu do stanu o niższej energii.

Zderzenia atomów z kwantami energii mogą doprowadzić nie tylko do pochłonięcia kwantu, **ale i do emisji kwantu energii i do przejścia atomu do stanu niższego energetycznie**. Emisję pod wpływem promieniowania o tej samej częstotliwości nazywamy **emisją wymuszoną**.

Liczba przejść wymuszonych w czasie dt jest proporcjonalna do liczby wzbudzonych atomów $N_n(t)dt$ i gęstości widmowej promieniowania $u(\nu_{nm}) \rightarrow dN_n = B_{nm}u(\nu_{nm})N_n dt$
 gdzie B_{nm} - współczynnik emisji wymuszonej.

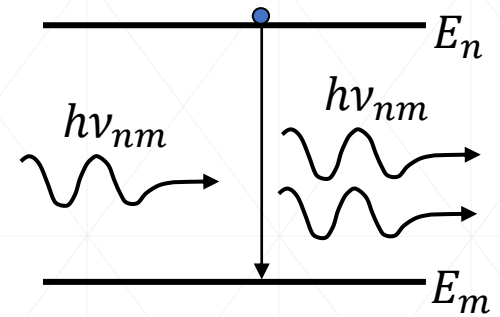


W warunkach równowagi termodynamicznej w określonej temperaturze T , liczba przejść z poziomu wyższego na niższy musi być taka sama jak z niższego na wyższy. Możemy więc zapisać:

$$A_{nm}N_n dt + B_{nm}u(\nu_{nm})N_n dt = B_{mn}u(\nu_{nm})N_n dt$$

W emisji wymuszonej kwant promieniowania o odpowiedniej częstotliwości **wyzwała nowy kwant, nie tracąc przy tym na działanie wymuszające nic ze swej energii**. Zamiast jednego kwantu wchodzącego do układu mamy na jego wyjściu dwa jednakowe kwanty, co oznacza **wzmocnienie promieniowania**.

Częstotliwość promieniowania pochodzącego od emisji wymuszonej **jest identyczna** z częstotliwością promieniowania wymuszającego, a ich **fazy są ze sobą ściśle powiązane**, zaś **kierunek jest zgodny z kierunkiem** w którym porusza się kwant wymuszający.



Z teorii Einsteina wynika, że:

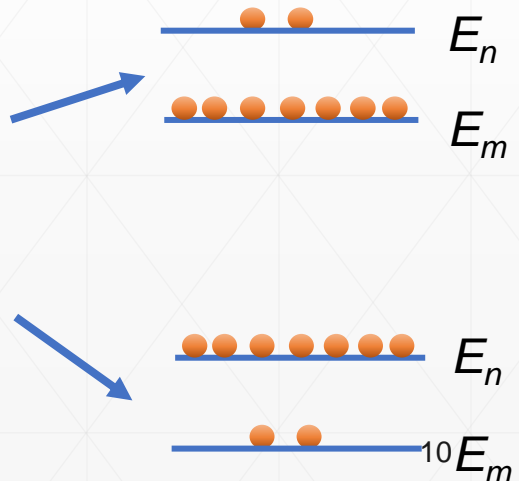
1. Współczynnik emisji wymuszonej jest równy współczynnikowi absorpcji.
2. W emisji z poziomu E_n udział emisji spontanicznej rośnie proporcjonalnie do trzeciej potęgi częstotliwości promieniowania emitowanego w stanie równowagi termodynamicznej.

$$B_{nm} = B_{mn}$$

$$\frac{A_{nm}}{B_{nm}} = \frac{8\pi h \nu_{nm}^3}{c^3}$$

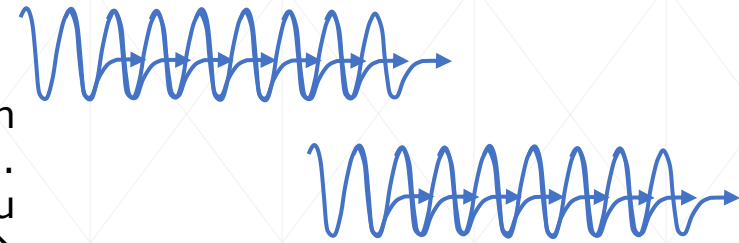
Z rozkładu Boltzmanna wynika, że w stanie równowagi termodynamicznej $N_n \ll N_m$. Oznacza to, że absorpcja zdecydowanie przewyższa emisję wymuszoną, czyli promieniowanie emitowane jest absorbowane w układzie.

Gdyby doprowadzić do sytuacji w której $N_n > N_m$, to wówczas promieniowanie będzie w układzie wzmacniane – przeważać będzie emisja wymuszona. Sytuację w której na wyższym poziomie energetycznym znajduje się więcej atomów niż na niższym nazywamy **inwersją obsadzeń**. Można ją osiągnąć w warunkach nierównowagowych przy pomocy oddziaływań zewnętrznych.



Spójność

Koherencja – zgodność między fazami w różnych punktach wiązki światła lub w różnych wiązkach, tj. różnica faz fal świetlnych docierających do danego punktu jest stała w czasie obserwacji. Źródło światła spójnego → **laser**



Niekoherentne źródła fal (np. żarówki, słońce): światło emitowana przez różne atomy składa się z ciągów fal o skończonej długości - różnica faz dla fal pochodzących z takiego źródła zmienia się w czasie w sposób nieuporządkowany.



W ciągu czasu $\Delta t_0 = 1/2\Delta f = 1/\Delta\omega$, gdzie Δf jest szerokością linii, dowolna para fotonów będzie zachowywać względem siebie **stałą fazę**

Czas ten nazywamy **czasem spójności (koherencji)** a odpowiadającą mu długość paczki falowej – $\Delta L = c\Delta t_0$ - **długością koherencji**

Dla linii widm atomowych $\Delta t_0 = 10^{-8}$ s

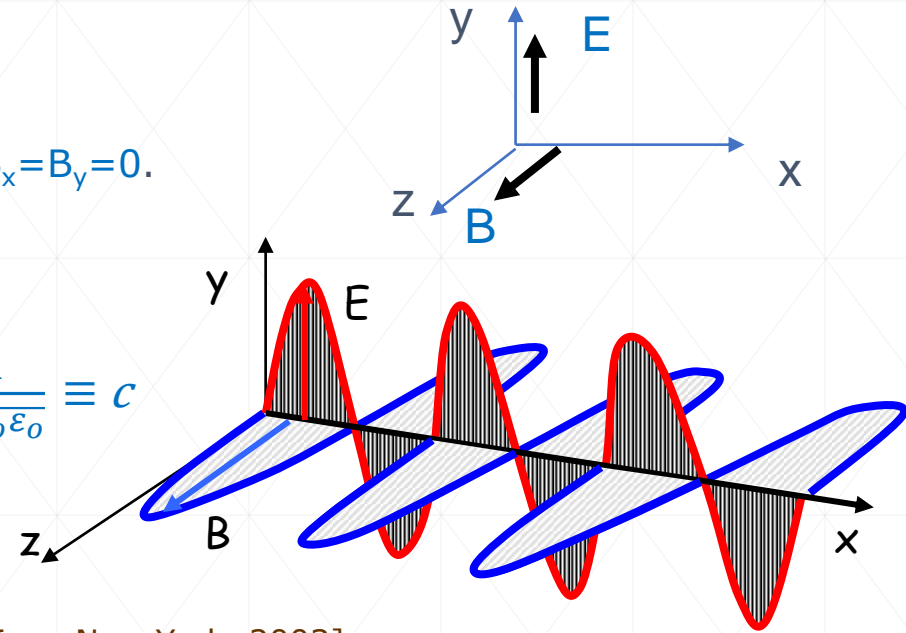
Im dłuższy czas spójności tym drganie jest bliższe harmonicznemu

Polaryzacja światła

Zakładając, że $E_x=E_z=0$, $E=E_y \neq 0$ oraz $B=B_z \neq 0$, $B_x=B_y=0$.

Z równań Maxwella:

$$\frac{\partial^2 E}{\partial t^2} = \frac{1}{\mu_0 \epsilon_0} \frac{\partial^2 E}{\partial x^2} \quad \frac{\partial^2 B}{\partial t^2} = \frac{1}{\mu_0 \epsilon_0} \frac{\partial^2 B}{\partial x^2} \quad v = \frac{1}{\sqrt{\mu_0 \epsilon_0}} \equiv c$$



[D. Goldstein: *Polarized Light*, Marcel Dekker Inc., New York, 2003]:

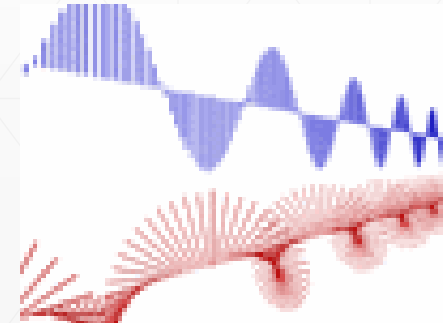
Polaryzacją nazywamy wektorową naturę światła

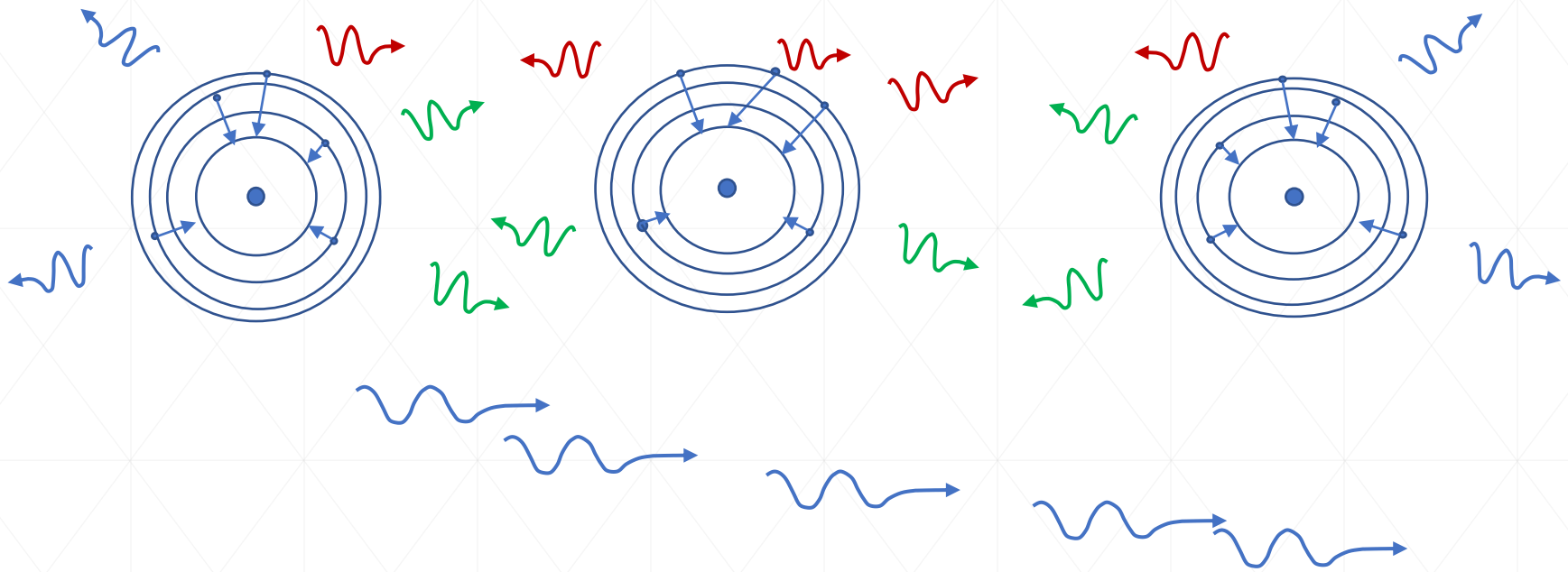
Fala EM jest spolaryzowana gdy wektory \mathbf{E} i \mathbf{B} mają ustalony kierunek w przestrzeni

- polaryzacja liniowa – \mathbf{E} drga w jednym kierunku
- polaryzacja kołowa – \mathbf{E} zatacza koła

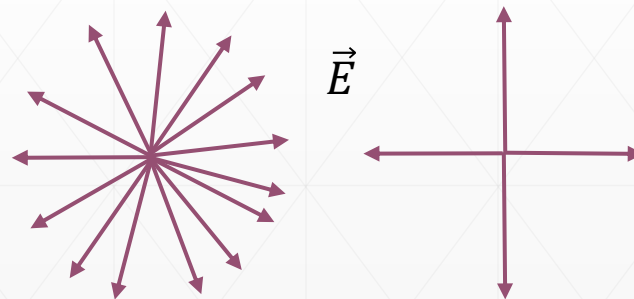
Polaryzacja jest zjawiskiem, które występuje tylko dla fal poprzecznych

Kierunek polaryzacji to kierunek drgań \mathbf{E}





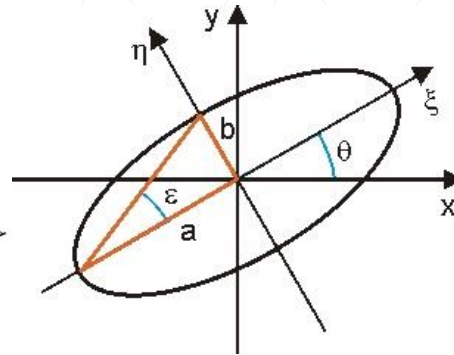
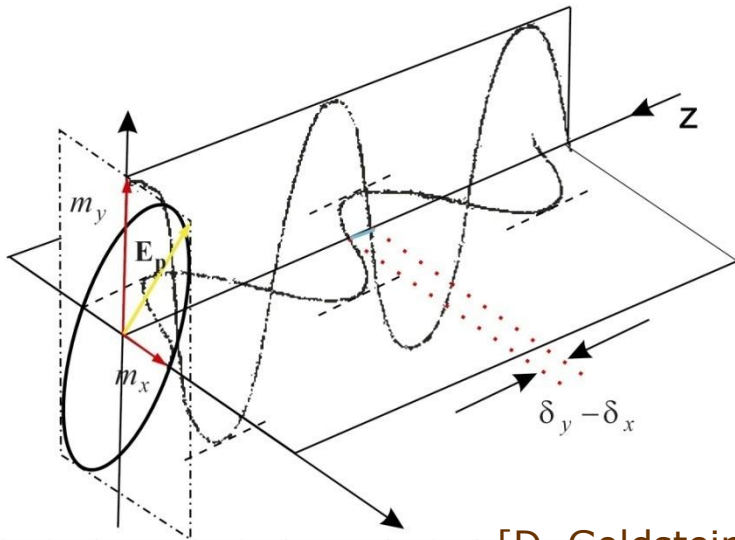
Światło wysyłane przez wiele źródeł – atomów jest niespolaryzowane – składa się z wielu różnych kierunków polaryzacji



Światło niespolaryzowane jest sumą dwóch fal spolaryzowanych wzajemnie prostopadle

$$\vec{\Psi}(\vec{r}, t) = \vec{A}(\vec{r}, t) \exp[i\phi(\vec{r}, t)] \stackrel{\text{sens fizyczny}}{\equiv} \text{Re}[\vec{\Psi}(\vec{r}, t)] \quad \vec{\Psi}(\vec{r}, t) = \vec{E}(\vec{r}, t)$$

$$\vec{E}(\vec{r}, t) \equiv A(\vec{r}, t) \vec{e} \cos(\omega t + \vec{k} \cdot \vec{r}) \xrightarrow{\text{Dla fali płaskiej w kierunku } z'} \vec{E}(\vec{r}, t) \equiv \vec{E}_t \cos(\omega t - kz)$$



Stan polaryzacji (SOP)

Azymut Θ – kąt pomiędzy osią elipsy, a kierunkiem osi Ox

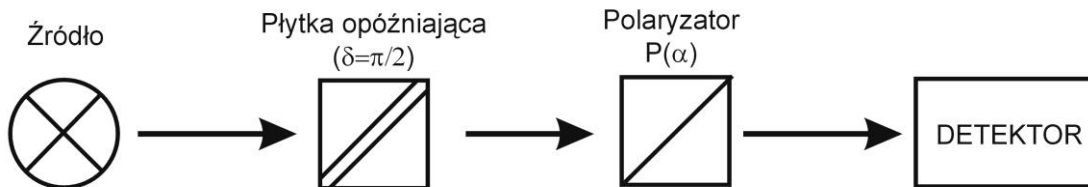
Kąt eliptyczności ε - kąt którego tangens jest stosunkiem długości małej do dużej półosi elipsy polaryzacji

$$\varepsilon = \text{tg}(b/a)$$

[D. Goldstein: *Polarized Light*, 2003]

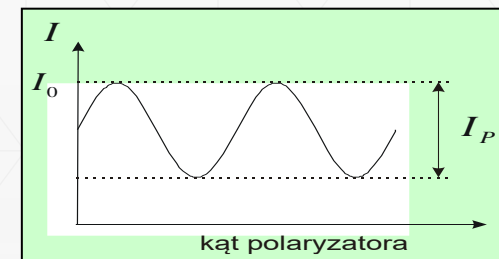
Azymut drgania elektrycznego R - wielkość drgania elektrycznego - jego kwadrat jest proporcjonalny do gęstości energii w danym punkcie pola $R = (a^2 + b^2)^{1/2}$

Stopień polaryzacji (DOP) [M. Born, E. Wolf, *Principle of Optics*, Pergamon NY, 1968]



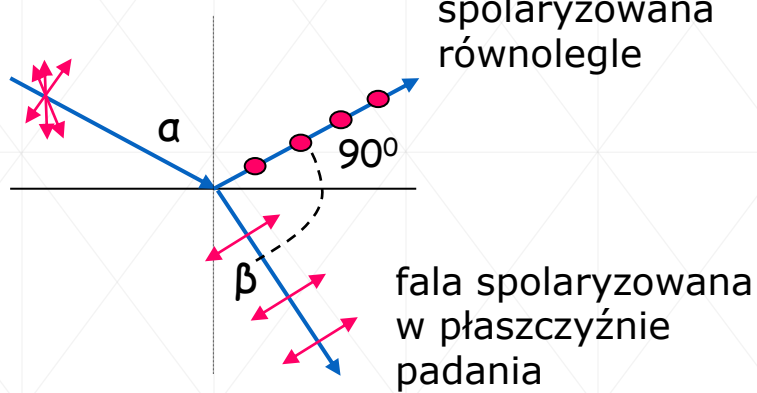
$$P = \frac{I_p}{I_0}$$

$$P \in < 0, 1 >$$



Sposoby polaryzacji

ODBICIE



Dwie składowe wektora E padającej fali:

- prostopadła do płaszczyzny padania,
- leżąca w płaszczyźnie padania.



Jeśli $\alpha + \beta = 90$, to fala odbita jest całkowicie spolaryzowana.

Kąt Brewstera Jeśli $\alpha + \beta = 90$, to $n = \sin\alpha / \sin\beta = \sin\alpha / \sin(90 - \alpha)$

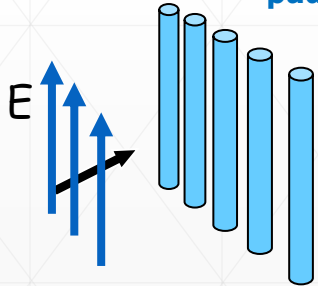


$$n = \operatorname{tg}\alpha$$

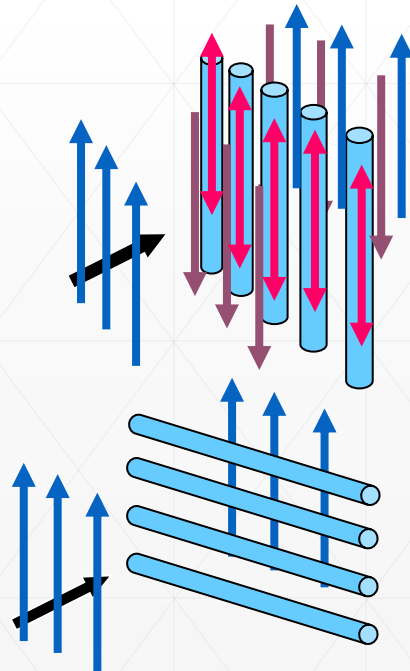
oś polaryzatora – linia prostopadła do prętów

POLARYZATORY

Fala padająca E_{pad}



polaryzator: metalowe pręty (mikrofale, fale radiowe), długie cząsteczki (światło)



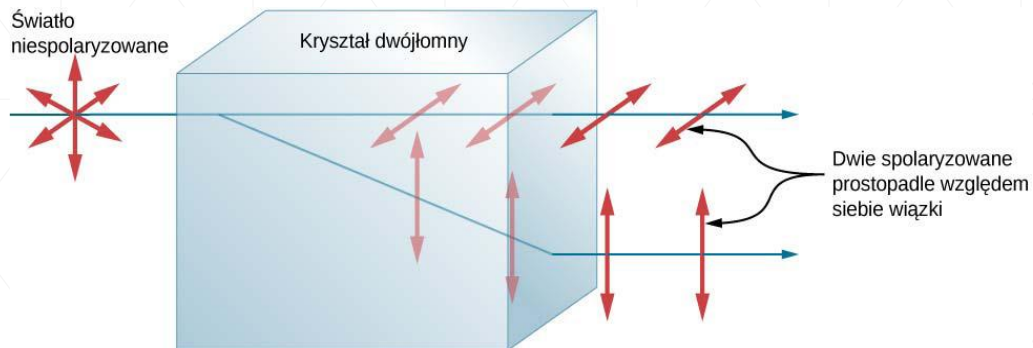
Fala przepuszczona
 $E = E_{\text{pad}} + E_{\text{pręty}} = 0$

Fala wytworzona przez prąd
 $E_{\text{pręty}} = -E$

Fala przepuszczona = fala padająca

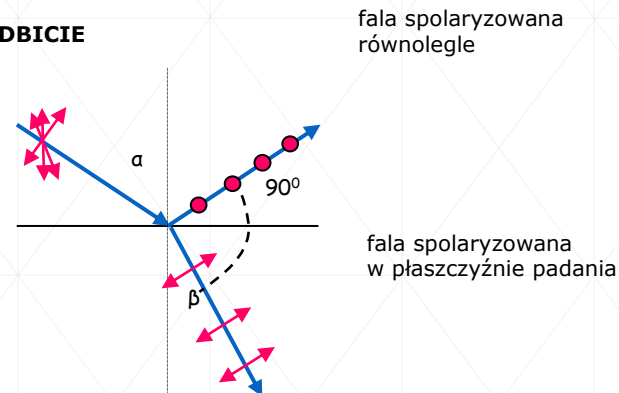
Wygaszenie lub przepuszczenie fali jest wynikiem oddziaływania fali padającej i wytworzonej w materiale polaryzatora

Za pomocą materiałów **dwójłomnych** [właściwość niektórych ośrodków optycznych dających podwójne załamywanie światła (rozdwojenia promienia świetlnego)].



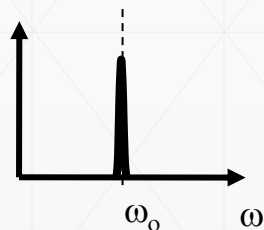
[„Fizyka dla szkół wyższych – tom 3”, www.openstax.pl]

ODBICIE



Zjawisko dwójłomności odkrył w 1669 roku Rasmus Bartholin, zaś wyjaśnił Augustin J. Fresnel w pierwszej połowie XIX w wieku. Dwójłomność wykazuje wiele substancji krystalicznych (ryt, kalcyt), a także wszystkie ciekłe kryształy.

Światło spolaryzowane $P=1$ nie występuje dla naturalnych źródeł światła. Ale co gdybyśmy uzyskali ściśle monochromatyczny generator światła – idealny laser, jednoczęstotliwościowy o zerowej szerokości linii $\Delta\omega=0$, którego wszystkie generowane fotony są spójne i tym samym mający długość koherencji $\Delta L=c\Delta t_0=1/\Delta\omega$ równą nieskończoność!!!



Myślę, że $P=1$ ale czy *SOP* liniowe czy kołowe ???

