

# Fizyka II

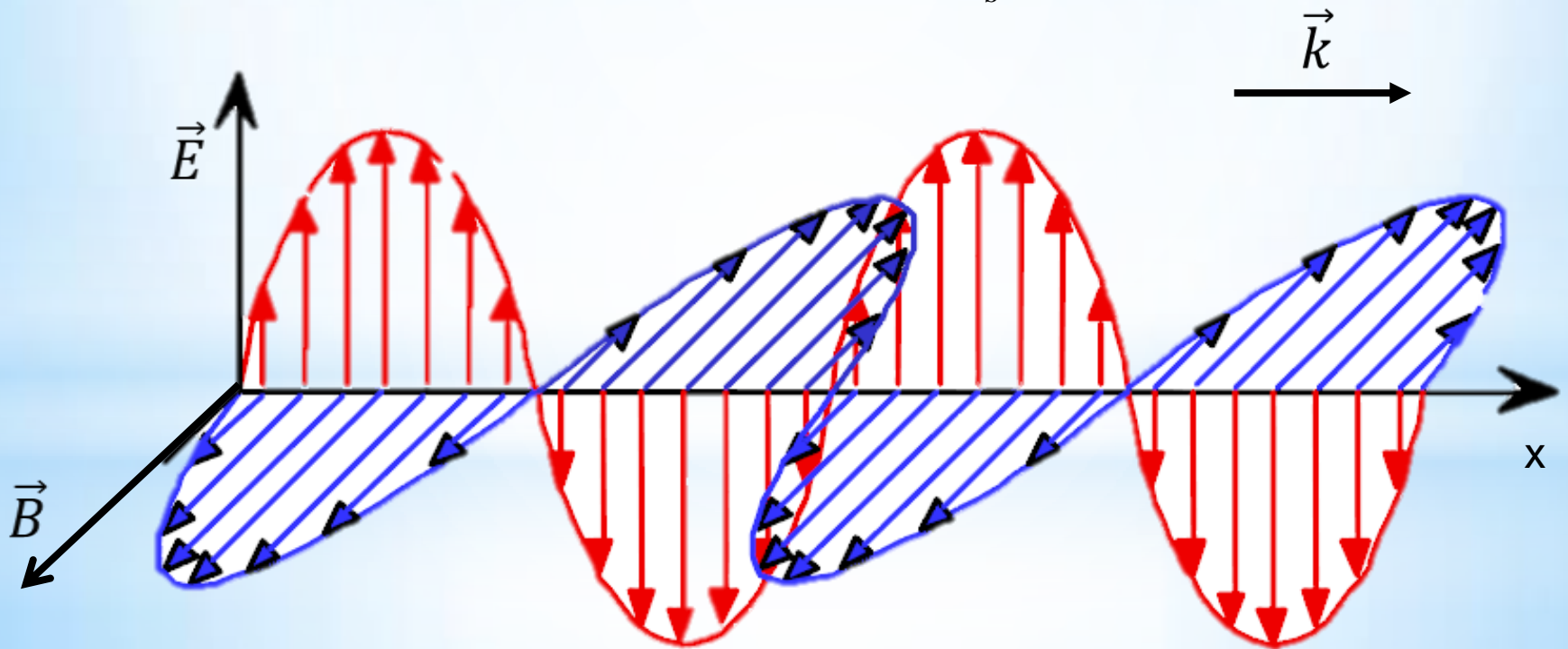
## Fale Elektromagnetyczne

Daniel Budaszewski Ph.D. Eng.

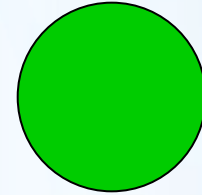
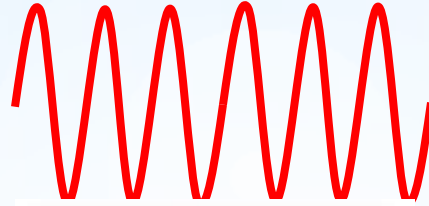
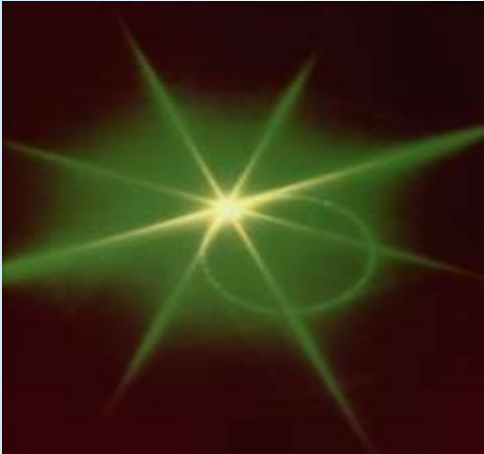


# Fale elektromagnetyczne

- Fale EM to fale, które nie wymagają materii do transportu energii.
- Fale EM w przeciwieństwie do dźwięku i fal wodnych, nie wymagają ośrodka.
- Fale EM mogą przemieszczać się w próżni.
- Wszystkie fale EM podróżują z prędkością  $3 \times 10^8 \frac{m}{s}$



# Światło – fala elektromagnetyczna czy cząstka?



- **cząstka (foton)**
- **fala EM**
- **dualizm**

- Isaac Newton (1642-1727)
- Huygens (1629-1695)
- Fresnel (1788-1827)
- dualizm korpuskularno-falowy, De Broglie (1924)

**Model falowy** - teoria elektromagnetyzmu

**Model fotonowy** - elektrodynamika kwantowa

# Fale elektromagnetyczne

Fale elektromagnetyczne mogą być opisane przy pomocy równań Maxwella:

***„Zmienne w czasie pole magnetyczne działa jako źródło pola elektrycznego, tak jak zmienne w czasie pole elektryczne działa jako źródło pola magnetycznego”***

$$\nabla \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}$$

$$\nabla \times \vec{H} = \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} + \vec{j}$$

$$\nabla \cdot \vec{D} = \rho$$

$$\nabla \cdot \vec{B} = 0$$

$\vec{E}$  = natężenie pola elektrycznego [V/m]

$\vec{D}$  = indukcja pola elektrycznego [C/m<sup>2</sup>]

$\vec{H}$  = natężenie pola magnetycznego [A/m]

$\vec{B}$  = indukcja pola magnetycznego [Tesla]

# Fale elektromagnetyczne





# Fale elektromagnetyczne

- **Światło widzialne 400 - 700 nm** – jedyna forma fali elektromagnetycznej widzialna dla ludzkiego oka.
- **Ultrafiolet** – powoduje ciemnienie naszej skóry (opalenizna), a w skrajnym przypadku powoduje jej uszkodzenie. Warstwa ozonowa chroni nas przed większością promieniowania UV pochodzącego ze Słońca.
- **Promieniowanie X** – te fale EM przechodzą przez większość materii. Nie przechodzą jednak przez kości, co pozwala stwierdzić czy kość jest złamana.
- **Promieniowanie Gamma** – te fale EM są bardzo przenikliwe i mogą doprowadzić do poważnego uszkodzenia komórek.
- **Podczerwone** – te fale są odpowiedzialne za odczuwane przez nas ciepło. Pociski wyposażone w sprzęt do wykrywania ciepła są w stanie wykryć źródła podczerwieni tj. czołgi czy samoloty.
- **Mikrofale** – te fale są używane domyślnie do podgrzewania jedzenia. Kiedy przechodzą one przez jedzenie, powodują wibrację cząstek co skutkuje ogrzaniem pożywienia. Mikrofale są również używane w komunikacji.
- **Fale radiowe** – te fale zawierają w sobie zarówno fale telewizyjne jak i radiowe. Transmitowane sygnały są przechwytywane przez urządzenia wyposażone w anteny.

(540-1650 KHz) (88-108 MHz) Microwave

AM Radio FM

1 GHz 100 GHz

Infrared far near

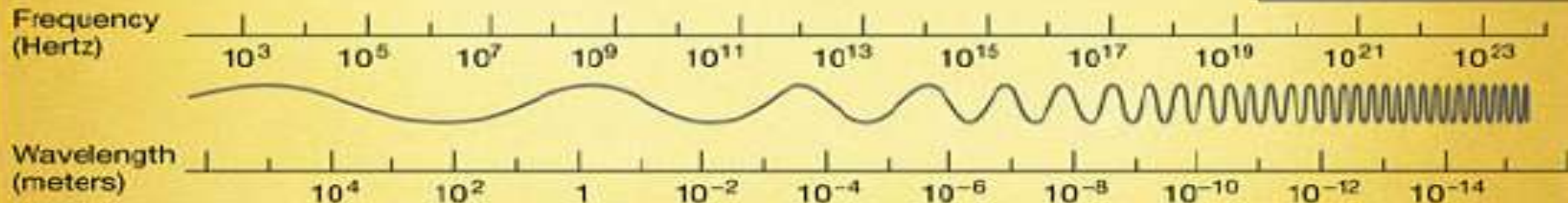
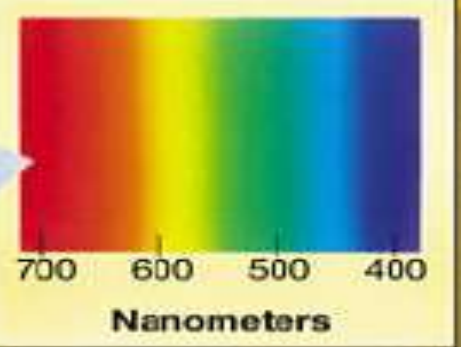
100 microns 1 microns

Visible

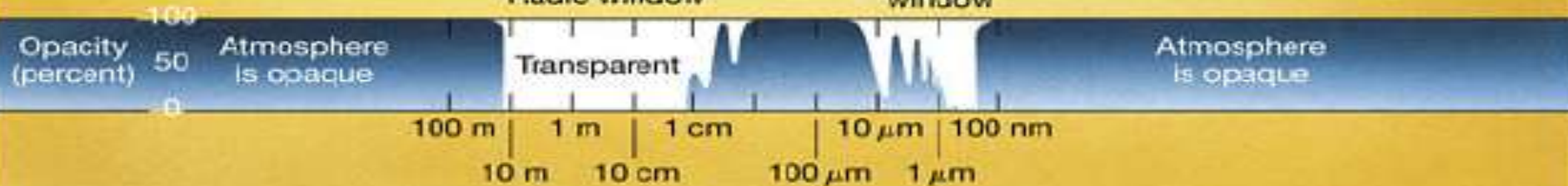
Ultraviolet near far

"Soft" X rays "Hard"

Gamma rays

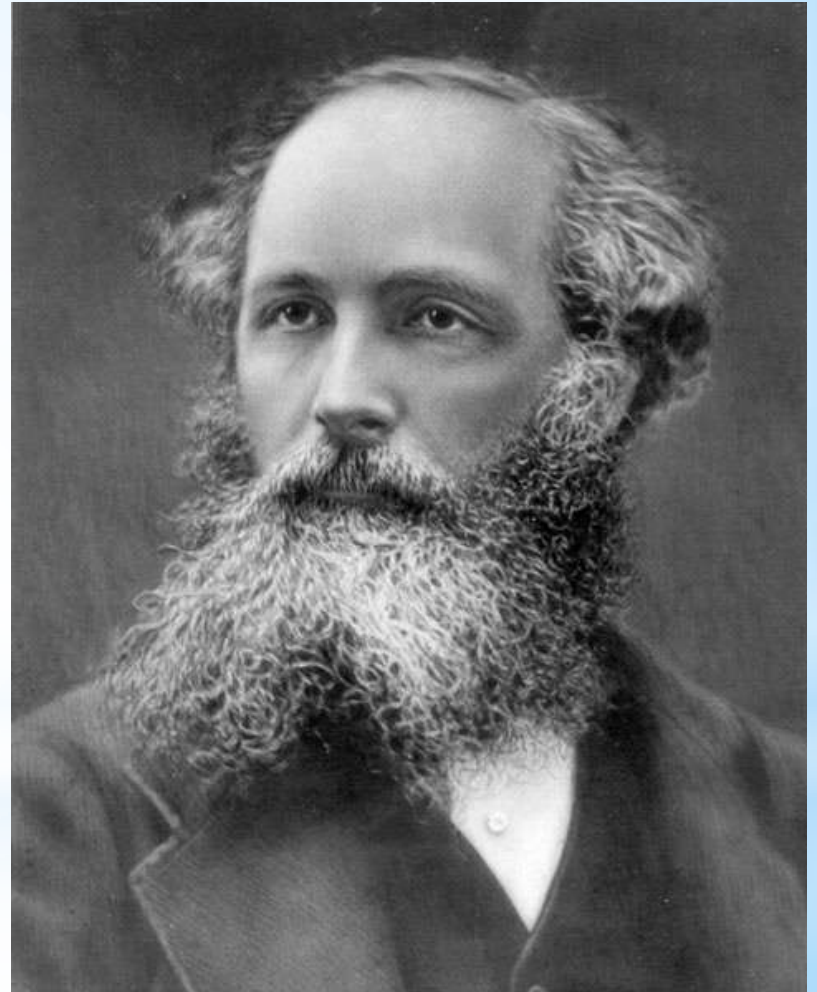


Scale



# Fale elektromagnetyczne - początki

- W 1865 James Clerk Maxwell stworzył teorię matematyczną, która łączyła elektryczność i magnetyzm,
- Wyjaśniała istniejące eksperymenty przy pomocy elektromagnetyzmu,
- ... i stworzyła nowe perspektywy.





# Fale elektromagnetyczne-początki

4 równania napisane w postaci różniczkowej lub całkowej.

Prawo Gauss'a (E)  $\oint_S \mathbf{E} \cdot d\mathbf{A} = \frac{Q}{\epsilon_0},$   $\nabla \cdot \mathbf{E} = \frac{\rho}{\epsilon_0}$

Prawo Gauss'a (B)  $\oint_S \mathbf{B} \cdot d\mathbf{A} = 0$   $\nabla \cdot \mathbf{B} = 0$

Prawo Ampere'a  $\oint_C \mathbf{H} \cdot d\mathbf{l} = \int_S \mathbf{J} \cdot d\mathbf{A} + \frac{\partial}{\partial t} \int_S \mathbf{D} \cdot d\mathbf{A}$   $\nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{J}_f + \frac{\partial}{\partial t} \mathbf{D}.$

Prawo Faraday'a  $\oint_{\partial\Sigma} \mathbf{E} \cdot d\mathbf{l} = - \iint_{\Sigma} \frac{\partial}{\partial t} \mathbf{B} \cdot d\mathbf{A}$   $\nabla \times \mathbf{E}(\mathbf{r}, t) = - \frac{\partial \mathbf{B}(\mathbf{r}, t)}{\partial t}$

# Fale elektromagnetyczne

Równania Maxwella są wykorzystywane do wyprowadzenia równań falowych dla fal elektromagnetycznych.

Prędkość fali jest równa prędkości światła  $c$ .

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

To oznacza, że jeśli naładowana cząstka *przyśpiesza*, to fala EM będzie z niej wypromieniowywać.

$$\frac{d^2 y(x, t)}{dx^2} - \frac{1}{v^2} \frac{d^2 y(x, t)}{dt^2} = 0$$

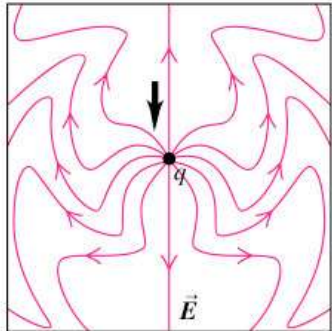
$$\frac{d^2 E(x, t)}{dx^2} - \mu_0 \epsilon_0 \frac{d^2 E(x, t)}{dt^2} = 0$$

$$\frac{d^2 B(x, t)}{dx^2} - \mu_0 \epsilon_0 \frac{d^2 B(x, t)}{dt^2} = 0$$

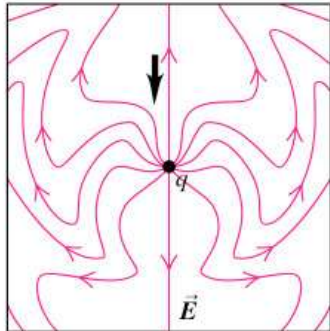
$$\nabla^2 \vec{E} - \mu_0 \epsilon_0 \frac{d^2 \vec{E}}{dt^2} = 0$$

$$\nabla^2 \vec{B} - \mu_0 \epsilon_0 \frac{d^2 \vec{B}}{dt^2} = 0$$

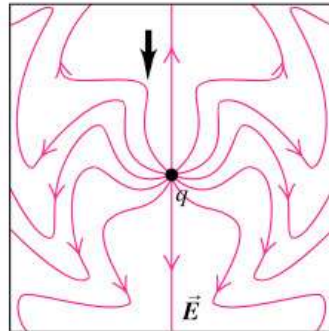
# Fale elektromagnetyczne



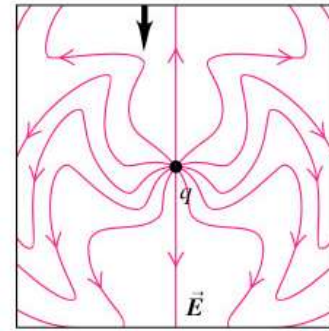
(a)  $t = 0$



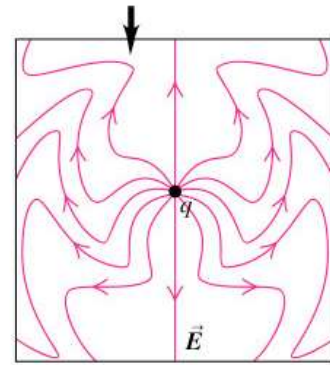
(b)  $t = T/4$



(c)  $t = T/2$



(d)  $t = 3T/4$



(e)  $t = T$

- Linie pola elektrycznego ładunku punktowego oscylują w prostym ruchu harmonicznym (podczas jednego okresu  $T$ ).
- Strzałka pokazuje jedno zagięcie linii pola elektrycznego w trakcie jego propagacji z ładunku punktowego.
- Ich pole magnetyczne (nie pokazane na rysunkach) składa się z kół, które leżą w płaszczyznach prostopadłych do tych figur, i ponadto tworzą okręgi koncentryczne z osią oscylacji.

# Równania Maxwella – Prawo Gaussa

- Znane również jako twierdzenie Gaussa,
- Sformułowane przez Carla Friedricha Gaussa w 1835,
- Dotyczy dystrybucji ładunku elektrycznego do otrzymanego pola elektrycznego.

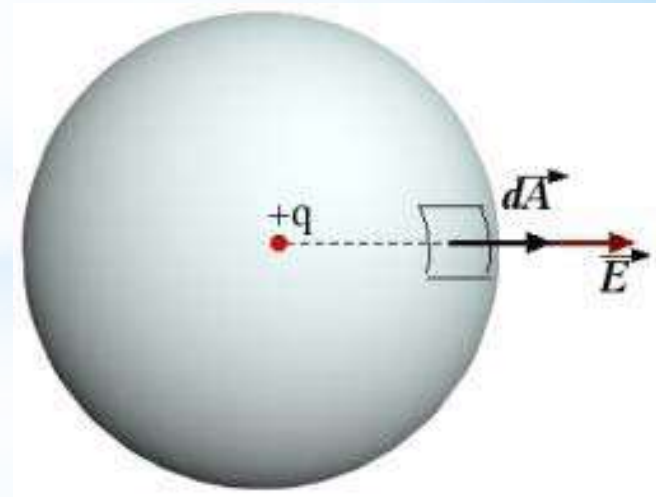
**Strumień natężenia pola elektrycznego przenikający przez dowolną powierzchnię zamkniętą jest proporcjonalny do całkowitego ładunku znajdującego się wewnątrz tej powierzchni.**

$$\oint_S \vec{E} \cdot d\vec{A} = \frac{Q}{\epsilon_0}$$

Całka powierzchniowa oznacza strumień natężenia pola elektrycznego przenikający przez zamkniętą powierzchnię S

Całkowity ładunek zawarty w S podzielony przez przenikalność elektryczną próżni:

$$\epsilon_0 = 8.854... \times 10^{-12} \frac{F}{m}$$





# Równania Maxwella – Prawo Gaussa

W postaci różniczkowej:

$$\nabla \cdot \vec{E} = \frac{\rho}{\epsilon_0}$$

Dywergencja pola elektrycznego

$\rho$  – gęstość ładunku  
 $\epsilon_0 = 8.854... \times 10^{-12} \frac{F}{m}$

Te dwie postacie są poprawne dla ładunków elektrycznych w próżni.

# Równania Maxwella – Prawo Gaussa

Wewnątrz ośrodka materialnego pole elektryczne powoduje przemieszczanie się ładunków elektrycznych, co skutkuje wytworzeniem się ładunków indukowanych.

$$\vec{D} = \epsilon \vec{E}$$



Wpływ ośrodka może być wyrażony poprzez użycie indukcji elektrycznej.

$$\oint_S \mathbf{D} \cdot d\mathbf{A} = \Phi_{D,S} = Q_{free}$$

gdzie  $\Phi_{D,S}$  to strumień indukcji elektrycznej  $\mathbf{D}$  przez zamkniętą powierzchnię  $S$ , a  $Q_{free}$  to ładunki swobodne objęte powierzchnią  $V$ . (na podstawie Tw. Stokesa)

$$\nabla \cdot \vec{D} = \rho_{free}$$

Dywergencja indukcji elektrycznej jest równa gęstości ładunków swobodnych  $\rho_{free}$

# Równania Maxwella – Prawo Gaussa dla magnetyzmu

Pole magnetyczne  $\mathbf{B}$  ma dywergencję równą zero.

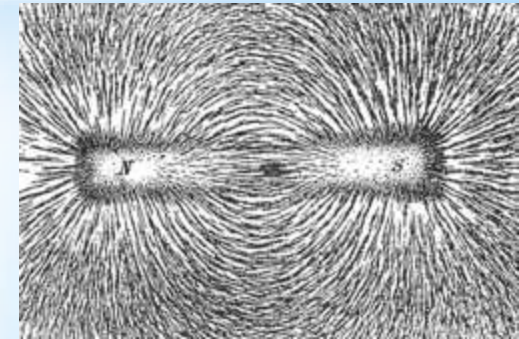
$$\nabla \cdot \vec{B} = 0$$

(nie istnieją pojedyncze ładunki magnetyczne – jedynie dipole magnetyczne)

Strumień indukcji magnetycznej przechodzący przez powierzchnię  $S$

$$\oint_S \vec{B} \cdot d\vec{A} = 0$$

Dla każdego elementu w przestrzeni istnieje taka sama liczba „magnetycznych linii pola” wchodzących i wychodzących z tego elementu. W żadnym punkcie przestrzeni nie istnieje łączny „ładunek magnetyczny”.



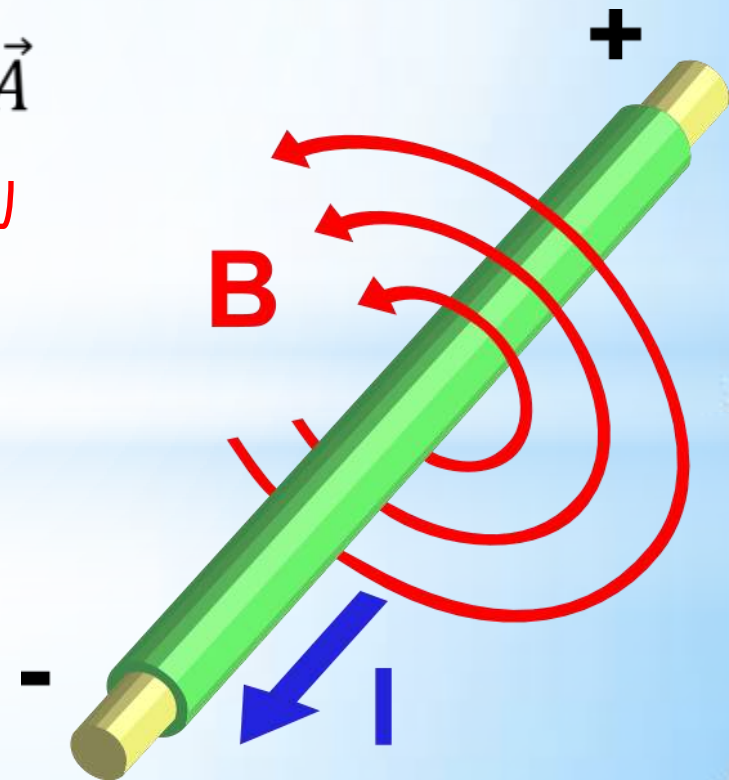
# Równania Maxwella – Prawo Ampere'a

- Wiąże indukcję magnetyczną wokół przewodnika z prądem z natężeniem prądu elektrycznego przepływającego w tym przewodniku.
- Rozszerzone przez Maxwella (poprzez dodanie prądu przesunięcia)

$$\oint_C \vec{H} \cdot d\vec{l} = \int_S \vec{J} \cdot d\vec{A} + \underbrace{\frac{\partial}{\partial x} \int_S \vec{D} \cdot d\vec{A}}_{\text{Prąd przesunięcia}}$$

$$\nabla \times \vec{H} = \vec{J}_f + \frac{\partial}{\partial x} \vec{D}$$

Pole magnetyczne jest generowane przez prąd i ładunki pola elektrycznego.





# Równania Maxwella – Prawo indukcji Faraday'a

Zmienne pole magnetyczne wytwarza pole elektryczne

$$\nabla \times \vec{E}(\vec{r}, t) = -\frac{\partial \vec{B}(\vec{r}, t)}{\partial t}$$

$$\oint_{\partial \Sigma} \vec{E} \cdot d\vec{l} = -\int_{\Sigma} \frac{\partial}{\partial t} \vec{B} \cdot d\vec{A} = -\frac{\partial}{\partial t} \int_{\Sigma} \vec{B} \cdot d\vec{A}$$

## Jedno ograniczenie:

W wyniku istnienia jedynie cząstkowych pochodnych po czasie, to równania może być stosowane wtedy gdy, ładunek jest stacjonarny w zmiennym w czasie polu magnetycznym. Kiedy naładowana cząstka się porusza w polu magnetycznym, nie jest to uznawane jako indukcja elektromagnetyczna.

# Równania Maxwella – równania ciągłości

$$\vec{D}(\vec{r}, t) = \varepsilon_0 \vec{E}(\vec{r}, t) + \vec{P}(\vec{r}, t)$$

Indukcja elektryczna  $D$  może być wyrażona jako suma stałej przenikalności elektrycznej ( $\varepsilon_0$ )  $\times E$  i polaryzacji dielektryka ( $P$ ),

$$\vec{H}(\vec{r}, t) = \frac{1}{\mu_0} \vec{B}(\vec{r}, t) - \vec{M}(\vec{r}, t)$$

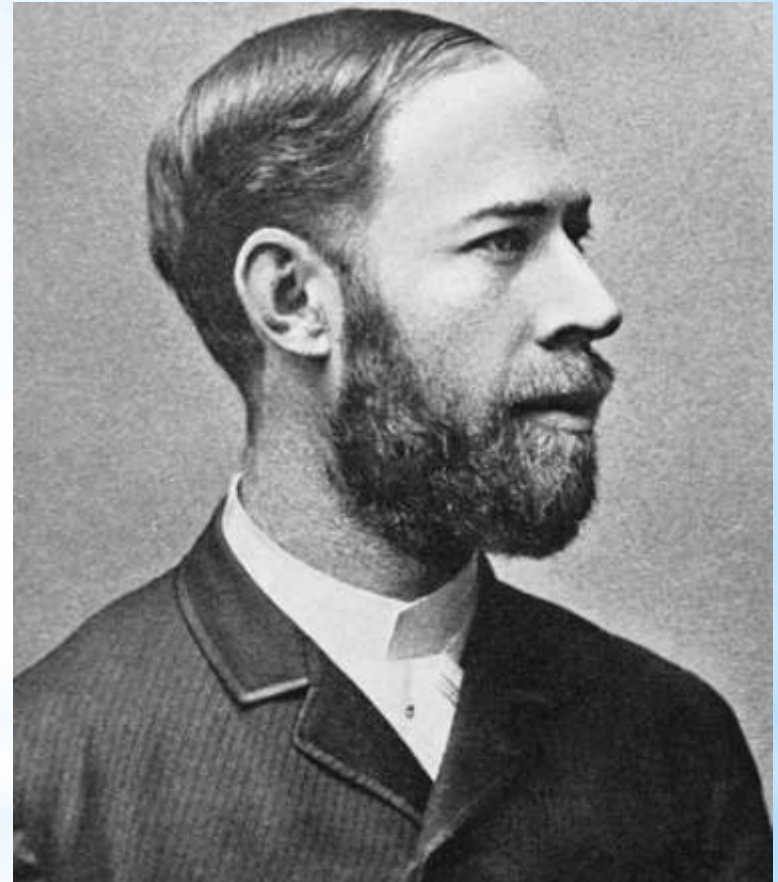
Natężenie pola magnetycznego  $H$  może być wyrażone jako różnica indukcji pola magnetycznego  $B$  przez stałą przenikalności magnetycznej i magnetyzację  $M$ .

$$c = \frac{1}{\sqrt{\mu_0 \varepsilon_0}}$$

Dwa pola ( $E$  i  $H$ ) są wzajemnie ortogonalne i poruszają się z prędkością  $c$

# Fale elektromagnetyczne - odkrycie

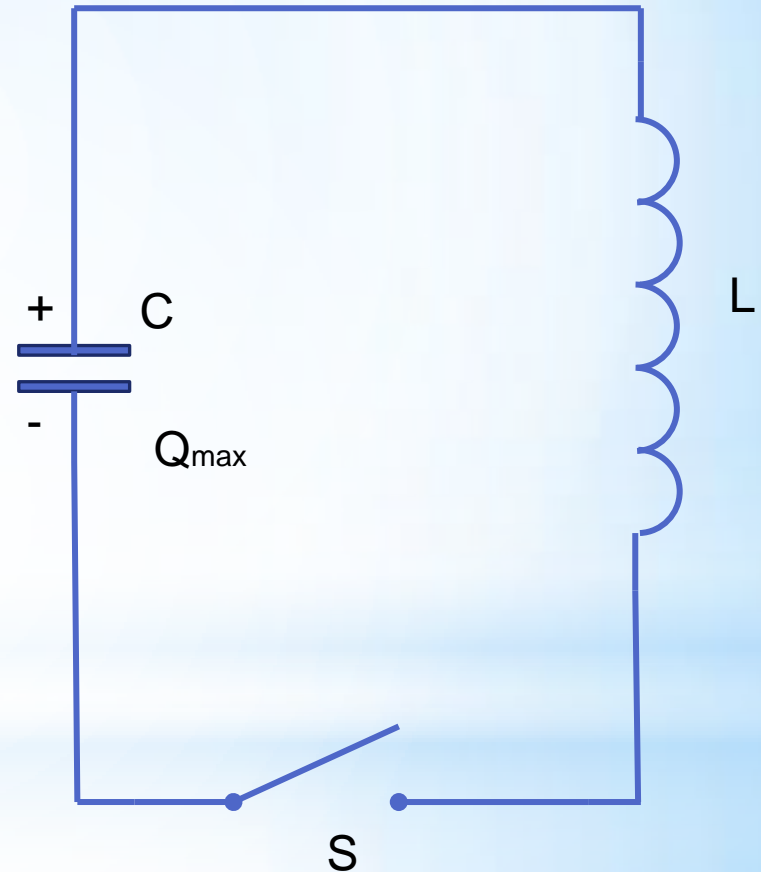
- Fale EM przewidziane przez Maxwella zostały odkryte w 1887r. przez Heinricha Hertza.
- Zastosował on obwód LC z alternatywnym źródłem.
- Jego odkrycie zostało wykorzystane przez Marconiego (Radio)



# Fale elektromagnetyczne - odkrycie

- Podstawowy obwód LC Hertz'a
- Kiedy przełącznik jest zamknięty, oscylacje zachodzą w natężeniu prądu i w ładunku na kondensatorze.
- Kiedy kondensator jest naładowany, całkowita energia obwodu jest magazynowana w polu elektrycznym kondensatora.

- W tym momencie natężenie wynosi zero i nie ma energii w cewce indukcyjnej.





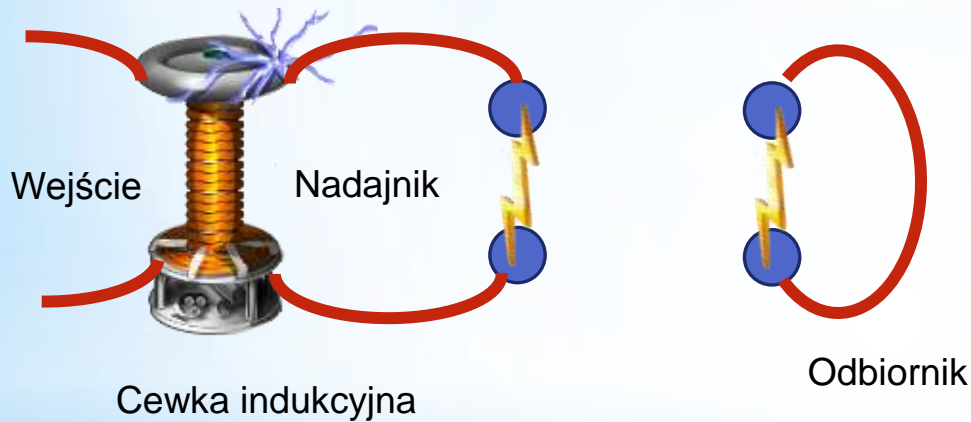
# Fale elektromagnetyczne

## - odkrycie

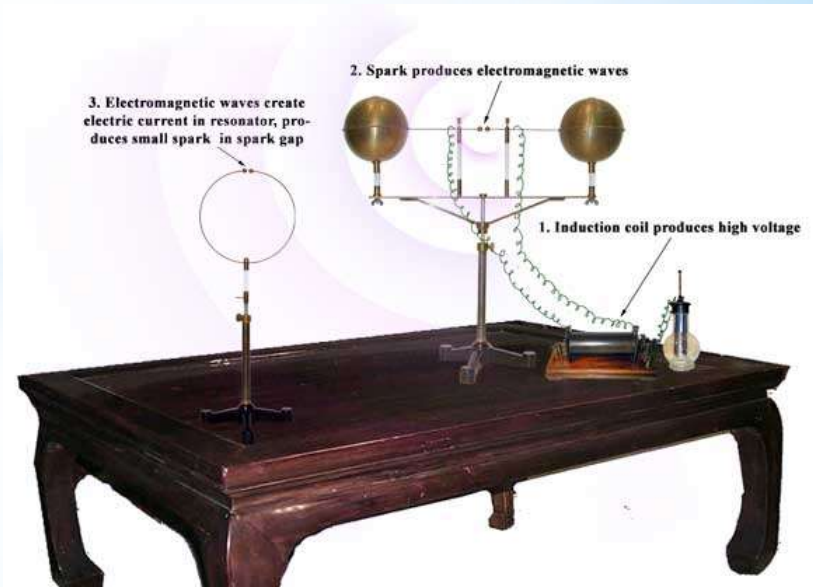
- Gdy kondensator rozładowuje się, zmniejsza się energia zmagazynowana w polu elektrycznym.
- W tym samym czasie, rośnie natężenie i zwiększa się energia zmagazynowana w polu magnetycznym.
- Kiedy kondensator rozładuje się całkowicie, w jego polu elektrycznym nie ma energii.
- Natężenie osiąga wartość maksymalną i cała energia jest zmagazynowana w polu magnetycznym cewki indukcyjnej.
- Proces zachodzi ponownie w przeciwnym kierunku.
- Zachodzi ciągły transfer energii pomiędzy cewce indukcyjnej a kondensatorem.

# Układ eksperymentalny Hertza

- Cewka indukcyjna jest połączona z dwiema dużymi kulami tworząc kondensator
- Oscylacje są inicjowane przez krótkie impulsy napięcia
- Induktor i kondensator tworzą nadajnik



- Kiedy częstotliwość rezonansu nadajnika i odbiornika są zgodne, zachodzi między nimi transfer energii

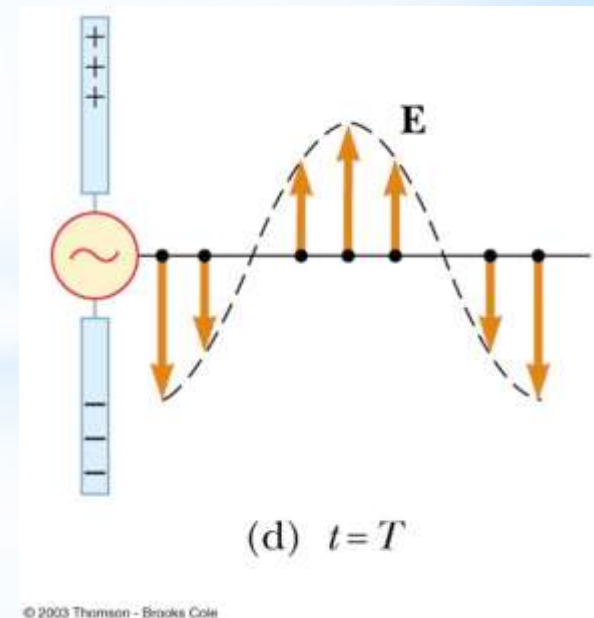
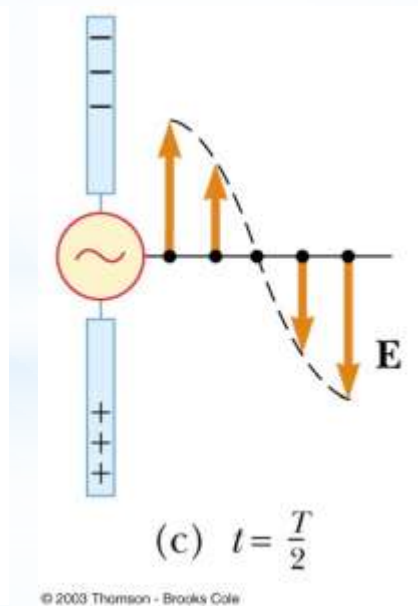
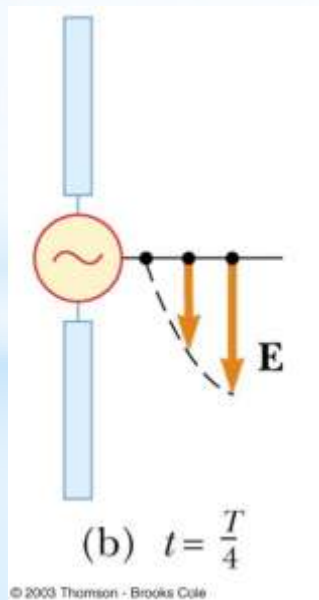
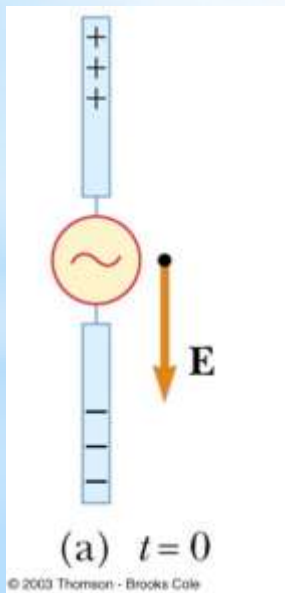


# Wnioski Hertza

- Hertz wysnuł hipotezę, że transfer energii był w formie fal
  - Teraz te fale są znane jako fale elektromagnetyczne
- Hertz potwierdził teorię Maxwella poprzez udowodnienie istnienia fal posiadających wszystkie właściwości fal świetlnych
  - Miały inne częstotliwości i długości fal
- Hertz zmierzył prędkość fal wychodzących z nadajnika
  - Użył fal by utworzyć prążki interferencyjne i obliczył długość fali, z  $v = f \lambda$ , obliczono  $v$  (bardzo bliskie prędkości światła)
- To dostarczyło dowody na poparcie teorii Maxwella

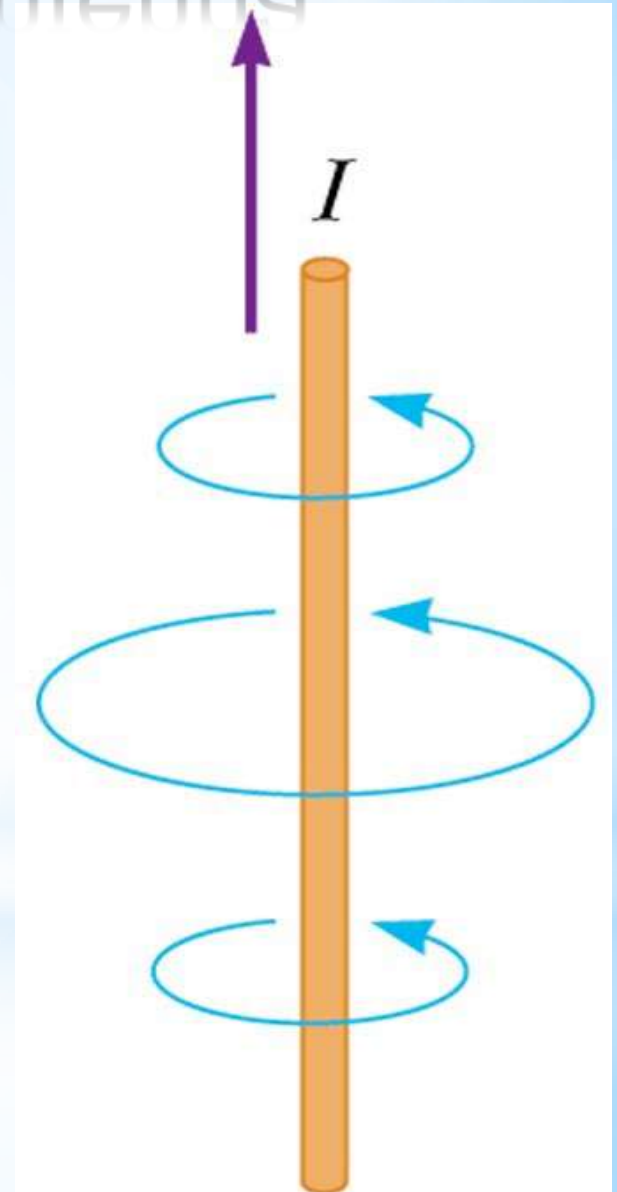
# Fale EM emitowane przez antenę

- Kiedy naładowana cząstka ulega przyspieszeniu musi wydzielać energię
  - Jeśli prądy w obwodach ac zmieniają się gwałtownie część energii jest tracona w formie fal EM
  - Fale EM są generowane przez każdy obwód prowadzący prąd zmienny
- Prąd zmienny przyłożony do kabli anteny wymusza ładunek elektryczny w antenie w celu oscylacji



# EM waves emitted by antenna

- Because the oscillating charges in the rod produce a current, there is also a magnetic field generated
- As the current changes, the magnetic field spreads out from the antenna





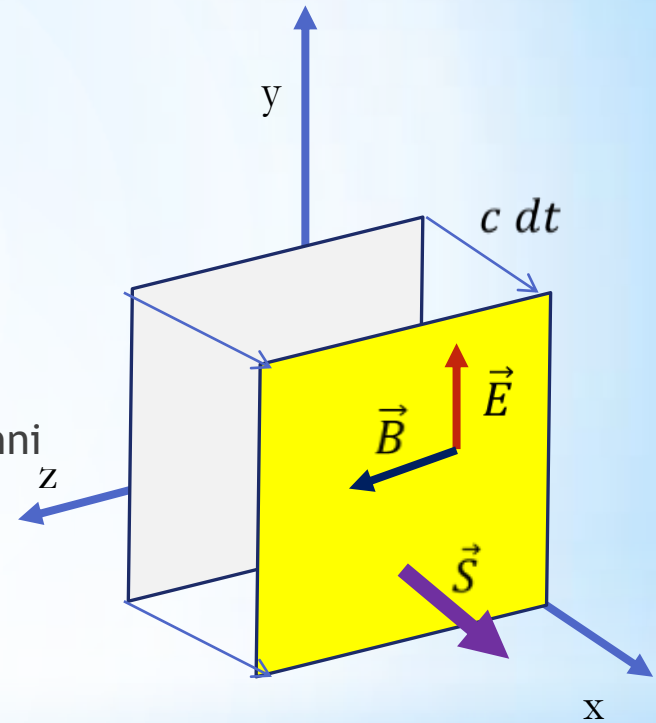
# Energia fali EM

- Pole elektryczne i magnetyczne posiadają energię.
- Fale mogą przenosić energię.
- Transport energii przez fale EM odbywa się z prędkością światła.
- Niech  $S$  będzie częścią wartości strumienia energii na jednostkę powierzchni.
  - - Energia na jednostkę czasu na jednostkę powierzchni
  - $S$  nazywa się wektorem Poyintinga.

$$S = \varepsilon_0 c E^2 = \frac{EB}{\mu_0} \quad \vec{S} = \frac{1}{\mu_0} \vec{E} \times \vec{B}$$

- Uśredniona po czasie wartość  $S$  to natężenie światła.

$$I = \langle S \rangle = \frac{E_{max} B_{max}}{2\mu_0} = \frac{1}{2} \varepsilon_0 c E^2$$



# Energia fal EM

- Fale EM przenoszą również pęd.
- Fale EM mogą wywierać ciśnienie na obiekty.
- Strumień pędu nazywany jest ciśnieniem.

## Radiometr Crooksa

- Znany również jako *młynek świetlny*,
- Składa się ze szklanej bańki zawierającej powietrze o niskim ciśnieniu.
- Wewnątrz znajduje się układ łopatek (czarno/białe) osadzonych na osi.
- Układ łopatek obraca się tym szybciej im większe natężenie światła.
- Umożliwia pomiar natężenia fali elektromagnetycznej.

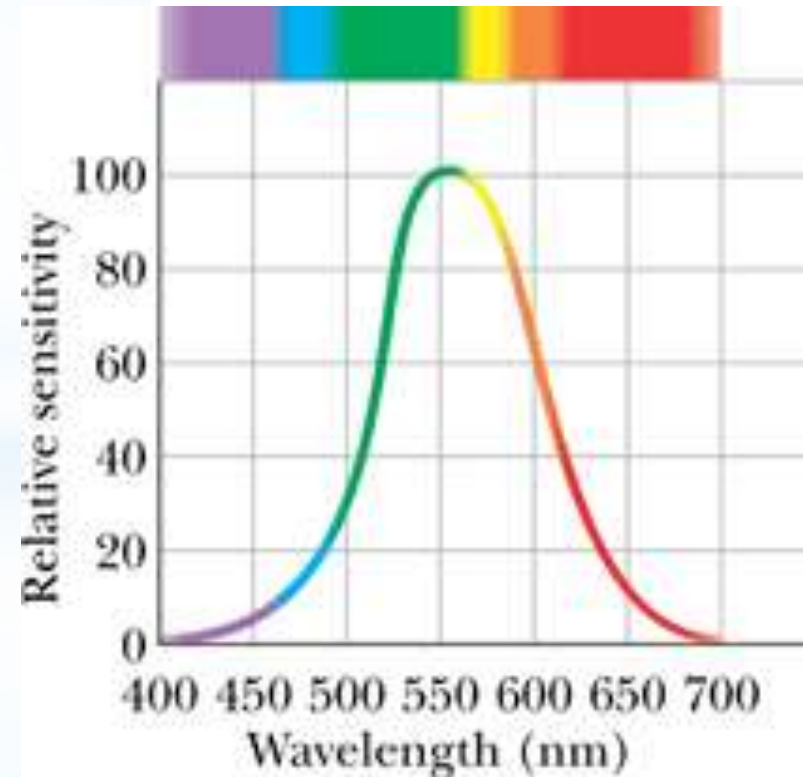
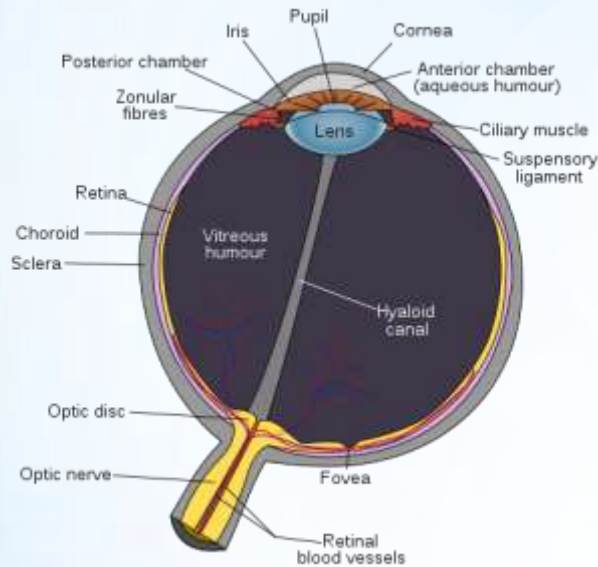
# Energia fal EM



## **STOP:**

- Zasada działania nie wiąże się z ciśnieniem światła!
- Ciemna strona łopatkki nagrzewa się szybciej niż jasna.
- Różnica ciśnień po obydwu stronach łopatkki powoduje ich ruch.

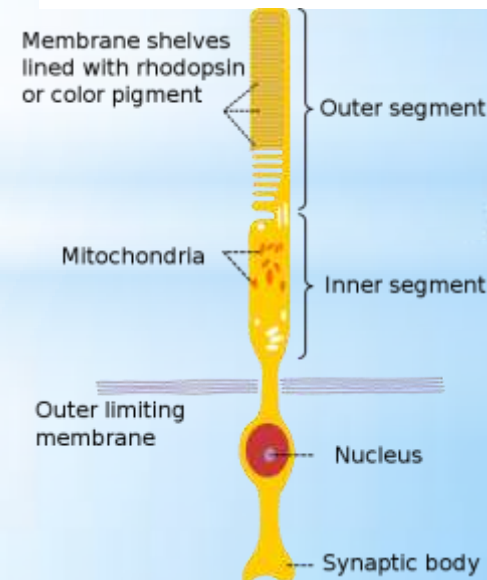
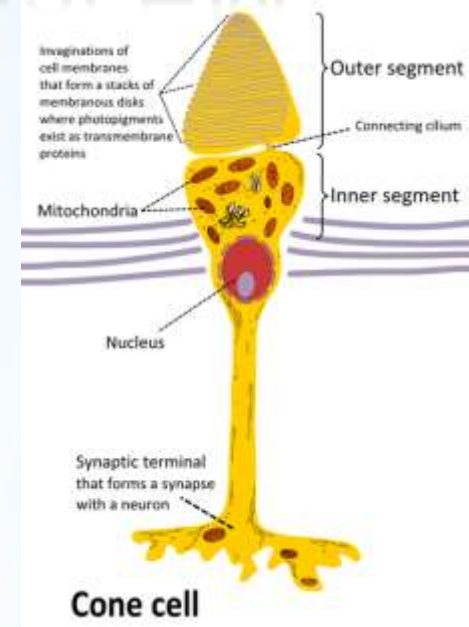
# Oczy – naturalne detektory fal EM



- Siatkówka składa się z 2 typów fotoreceptorów – pręcików i czopków.

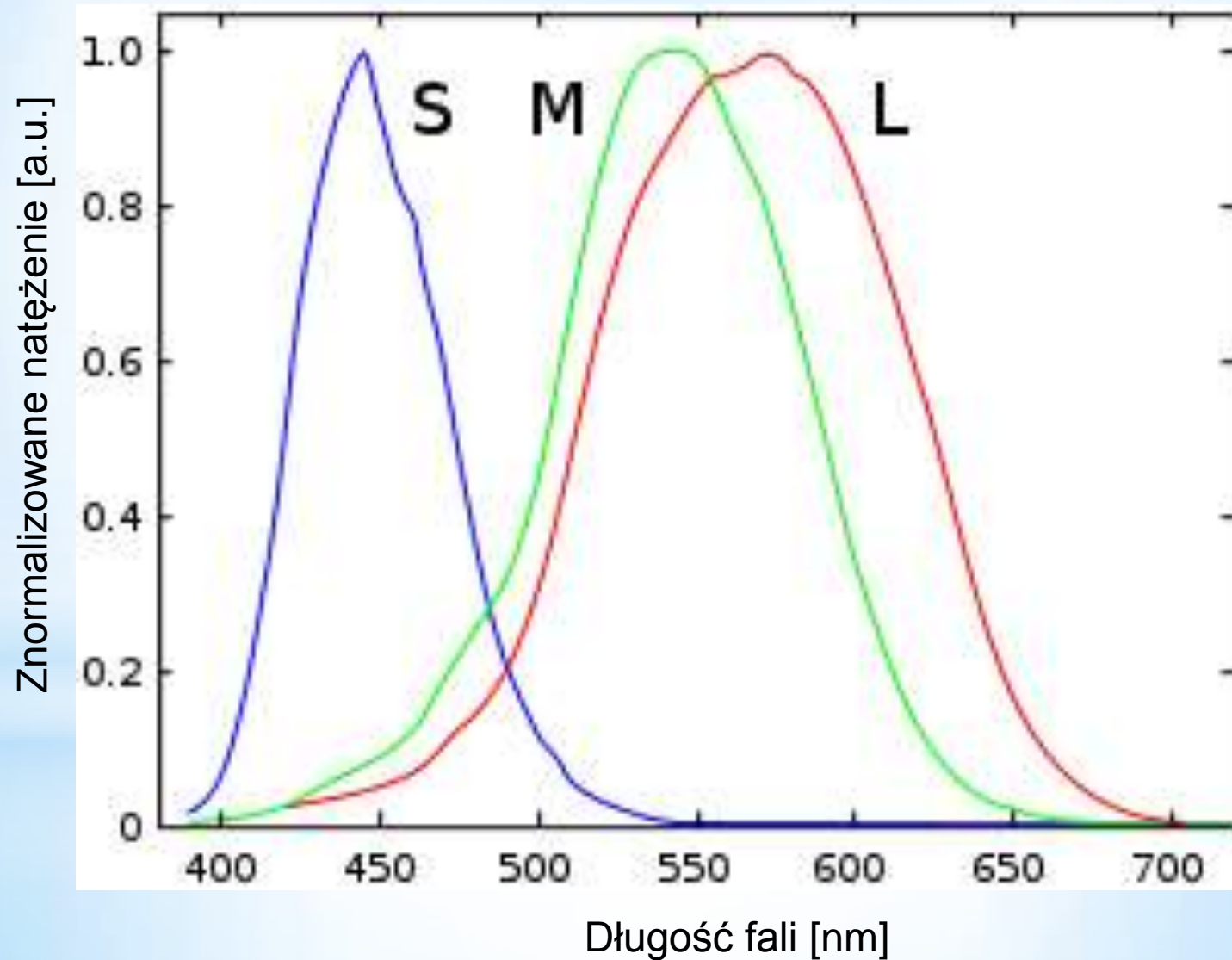
# Oczy – naturalne detektory fal EM

- Pręciki
  - Nie wyróżniają kolorów,
  - Odpowiedzialne za widzenie monochromatyczne i nisko-kontrastowe.
  - Dobrze pracują w świetle o małym natężeniu.
  - Nasycają się przy wyższym natężeniu światła.
- Czopki
  - Efektywnie funkcjonują w jasnym świetle.
  - Mniej czułe na światło niż pręciki.
  - Pozwalają na percepcję kolorów.
  - Zdolne do postrzegania szczegółów obrazów (czas odpowiedzi krótszy niż dla pręcików)
  - 3 rodzaje czopków z różnymi krzywymi odpowiedzi co umożliwia postrzeganie kolorów i widzenie trichromatyczne.



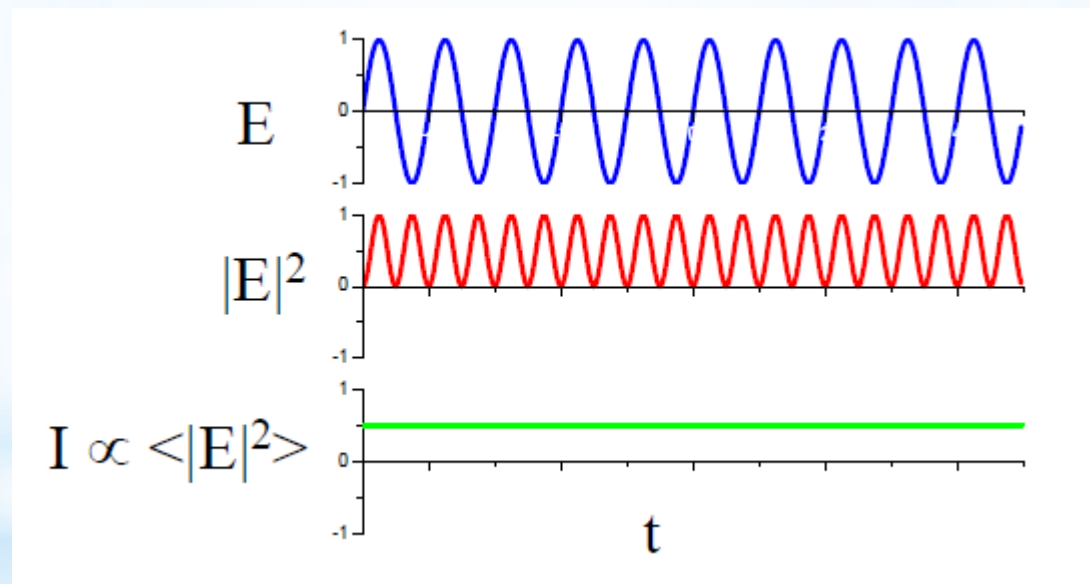


# Oczy – naturalne detektory EM



# Energia fal EM

- Częstotliwość światła jest bardzo wysoka.
- Brak detektorów zdolnych do detekcji zmian pola elektrycznego fali świetlnej.
- Możliwe jest tylko mierzenie średniej wartości kwadratu amplitudy pola elektrycznego.
- nasze oczy mogą rejestrować tylko natężenie światła a nie jego fazę.



$$\vec{S} = \frac{1}{\mu_0} \vec{E} \times \vec{B}$$

$$I = \langle S \rangle = \frac{E_{max} B_{max}}{2\mu_0} = \frac{1}{2} \varepsilon_0 c E^2$$

# Interferencja

Jeśli dwie fale monochromatyczne opisane jako:

$$E_1 = A_1 \cos(\omega_1 - k_1 x + \varphi) \quad E_2 = A_2 \cos(\omega_2 - k_2 x + \varphi)$$

Nałożą się w płaszczyźnie, to :

$$\begin{aligned} I &= \langle E^2 \rangle = \langle (E_1 + E_2)^2 \rangle = \langle E_1^2 + E_2^2 + 2E_1E_2 \rangle \\ &= I_1 + I_2 + 2 \langle E_1E_2 \rangle \end{aligned}$$

$$I = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \langle \cos(\Delta\varphi) \rangle$$

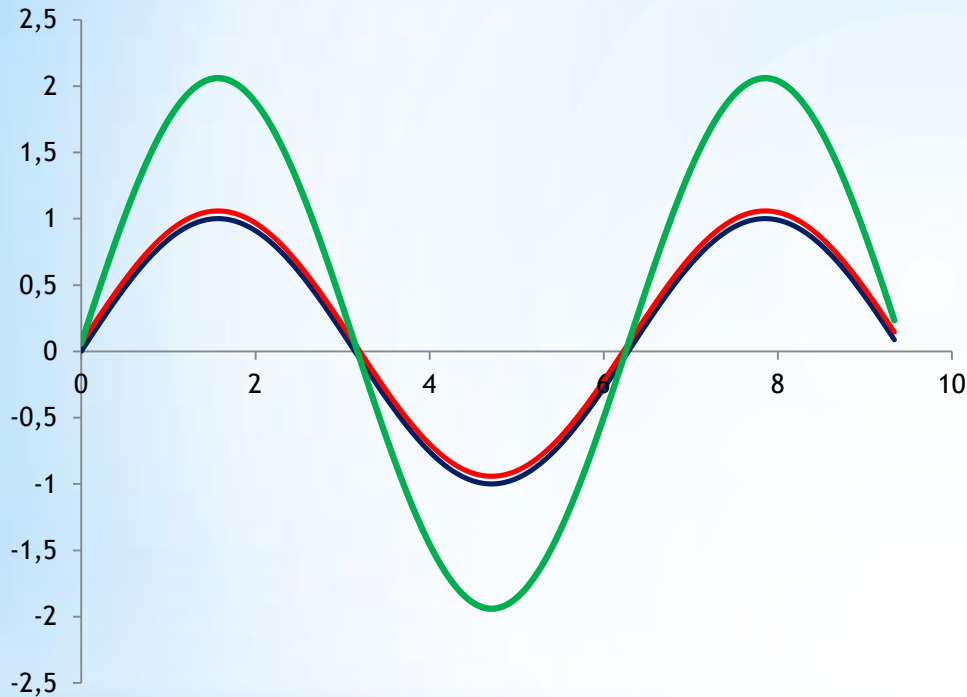
odpowiedzialny za interferencję

Dla :  $\langle \cos(\Delta\varphi) \rangle > 0$  Interferencja konstruktywna

$\langle \cos(\Delta\varphi) \rangle = 0$   $I = I_1 + I_2$

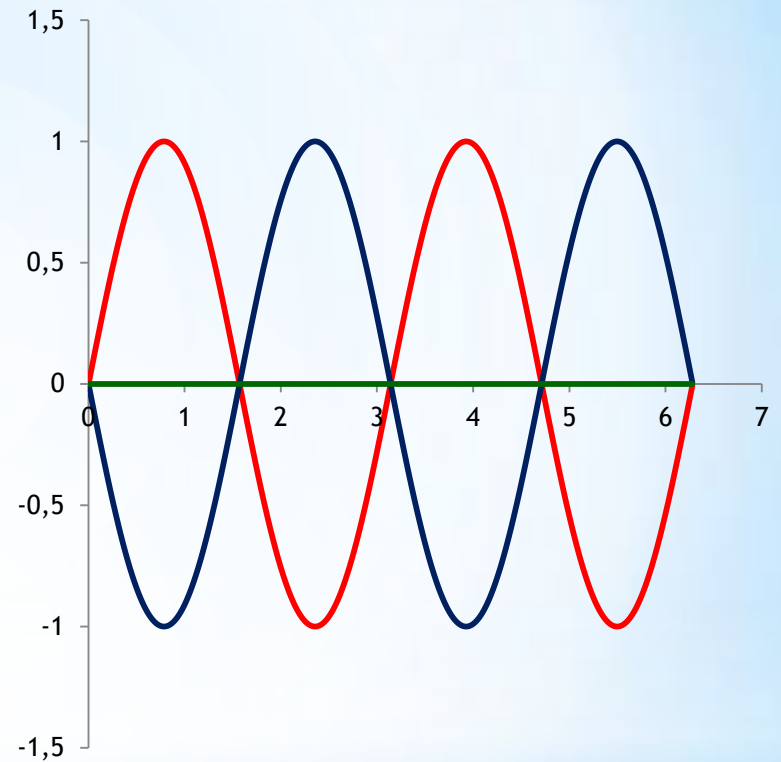
$\langle \cos(\Delta\varphi) \rangle < 0$  Interferencja destruktywna

# Interferencja



Zgodne fazy

Interferencja konstruktywna



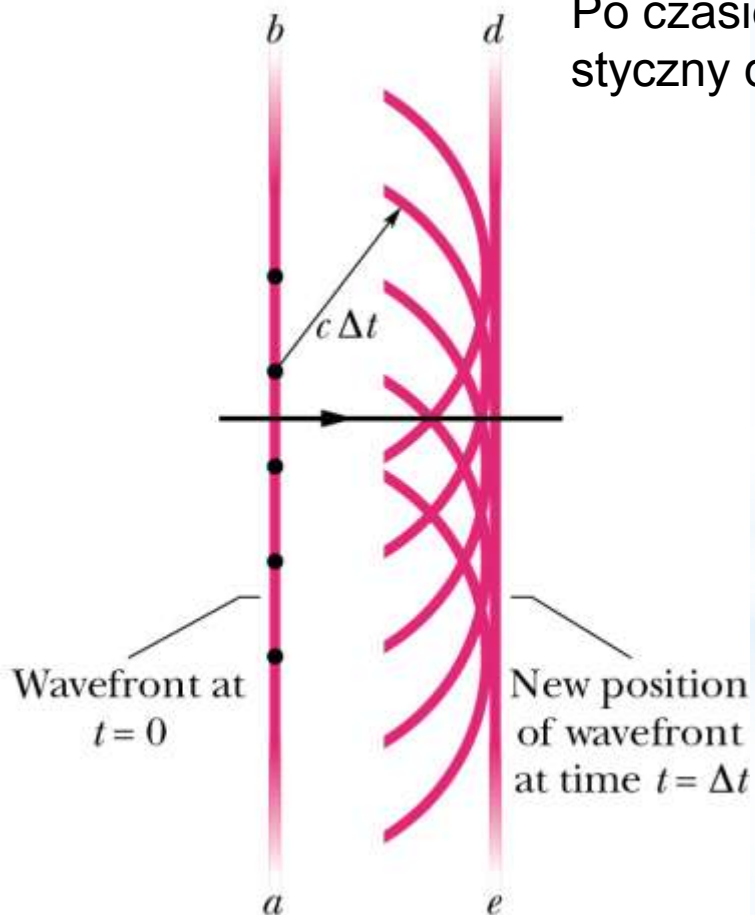
Przeciwne fazy

Interferencja destruktywna

# Zasada Huyghensa

*Każdy punkt frontu falowego służy jako źródło nowej fali kulistej.*

Po czasie  $t$ , nowy front falowy będzie styczny do powstających fal kulistych.



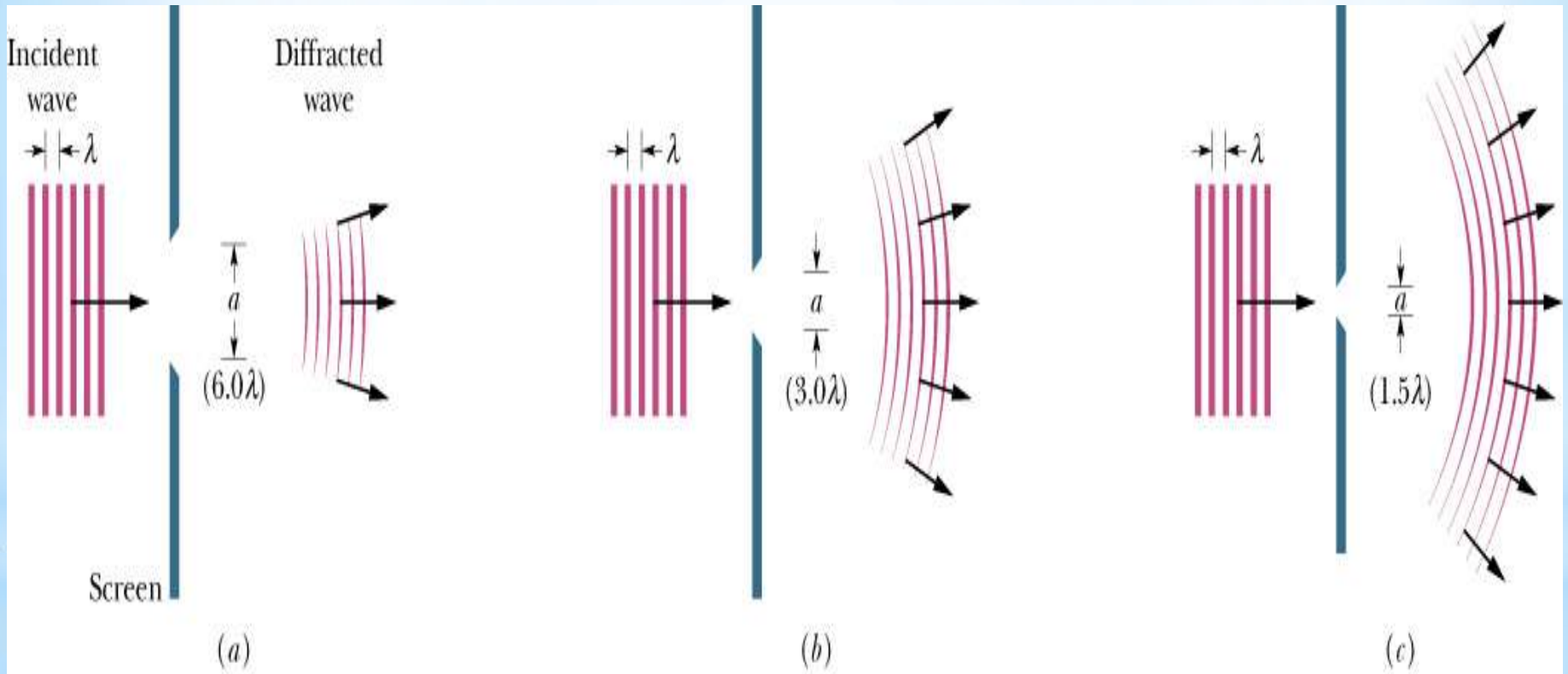
Christian Huygens

1629-1695



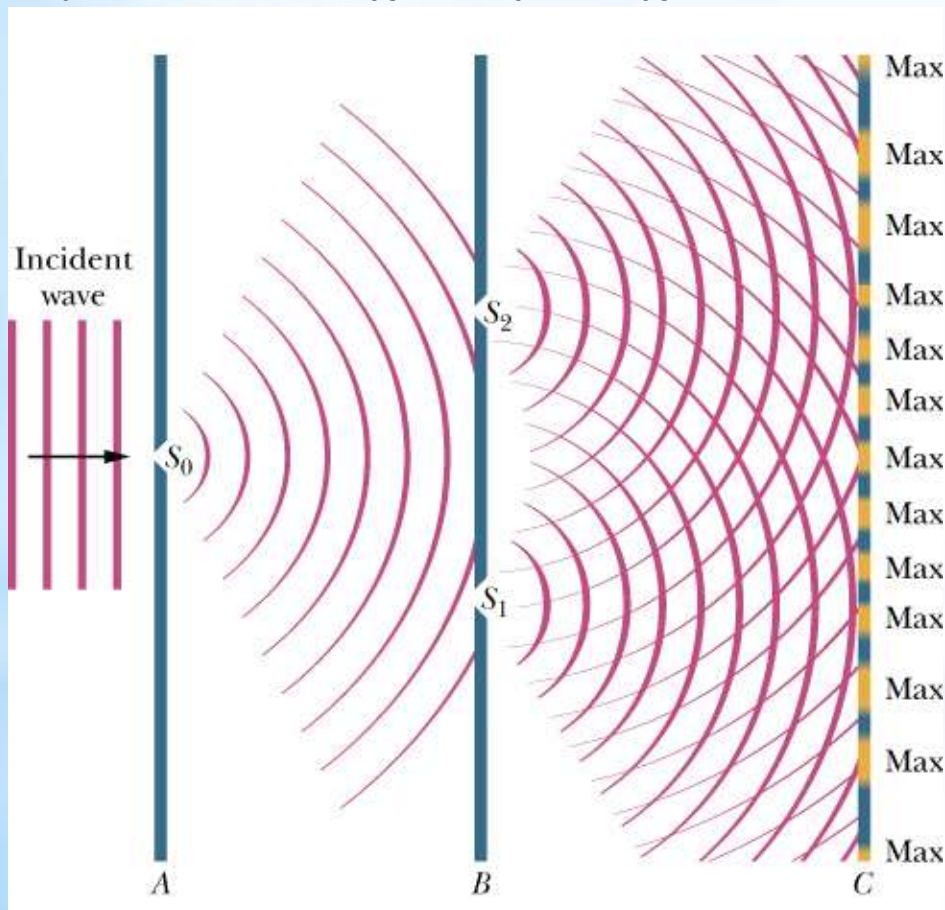
# Interferencja

Fale płaskie po przejściu przez pojedynczą szczelinę zaczynają się rozchodzić, **dyfrakcja**



# Doświadczenie Younga na dwóch szczelinach

Po przejściu przez dwie szczeliny, fale wychodzące **interferują** ze sobą i formują prążki interferencyjne (dyfrakcyjne)



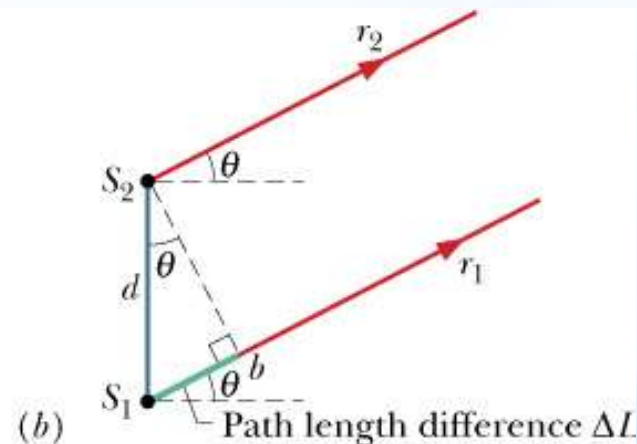
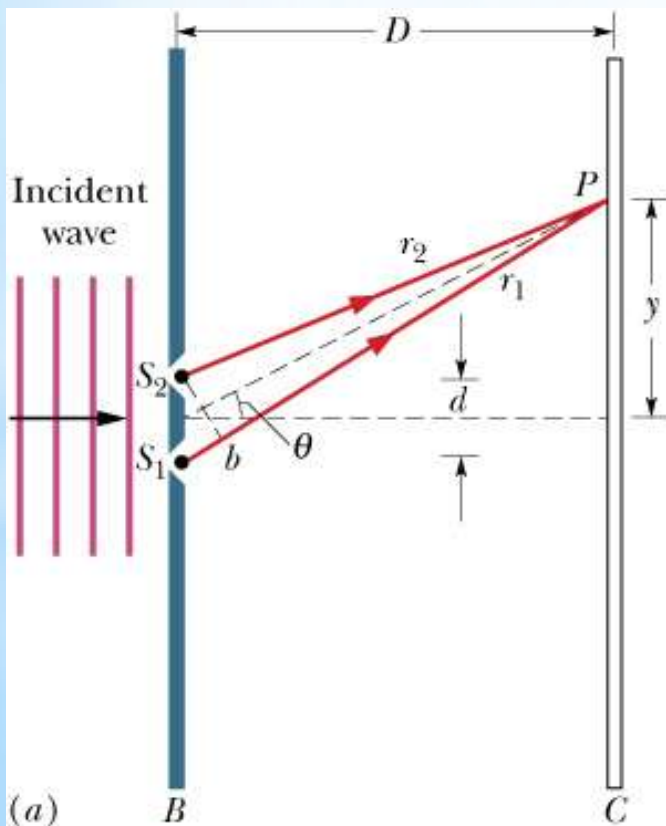
Eksperyment Younga w 1801:  
fenomen **światło jest falą**

Pierwsza fala płaska przechodzi przez małą szczelinę tworząc **koherentną** falę kulistą.

Po przejściu przez **dwie szczeliny**: na ekranie widoczna interferencja dwóch fal kulistych

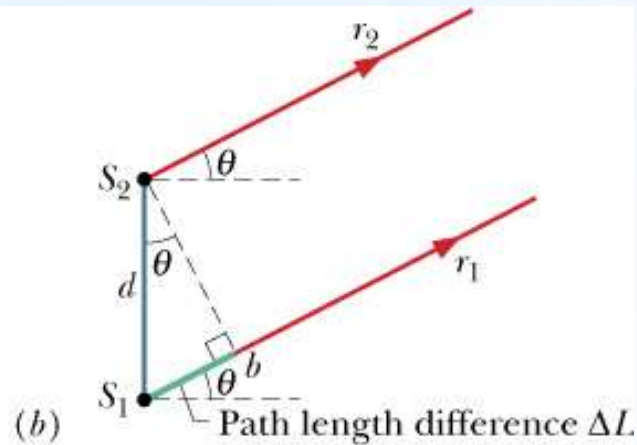
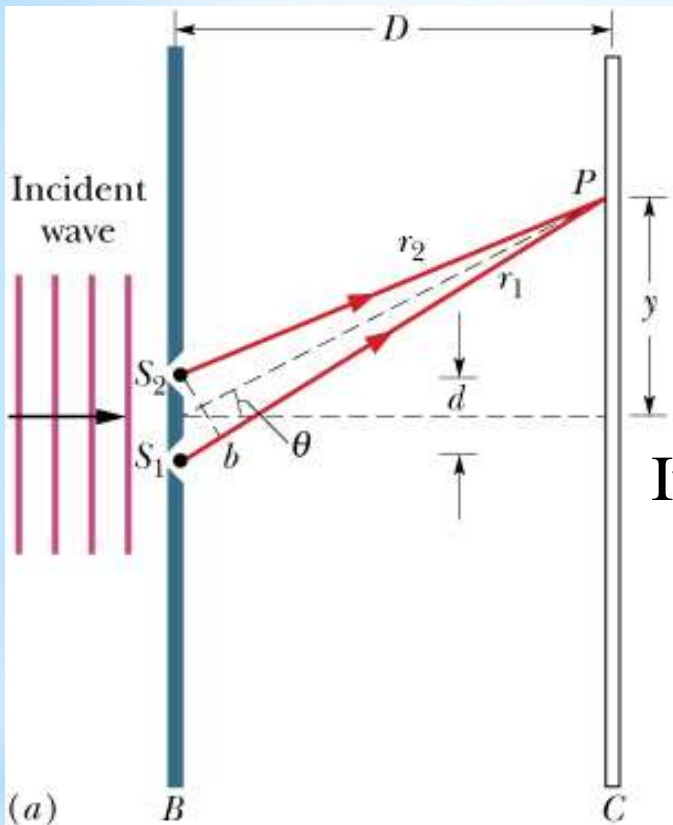
# Interferencja

- **Różnica fazy** pomiędzy dwiema falami może być różna dla dróg o różnej długości
- Każdy punkt na ekranie jest zdeteminowany przez **różnicę długości drogi  $\Delta L$**  promieni docierających do tego punktu



Różnica długości drogi:  $\Delta L = d \sin \theta$

# Interferencja



If  $\Delta L = d \sin \theta = (\text{integer})(\lambda) \rightarrow$  bright fringe

Maximum-jasne prążki:

$$d \sin \theta = m\lambda \quad \text{for } m = 0, 1, 2, \dots$$

Minimum-ciemne prążki:  $d \sin \theta = (m + \frac{1}{2})\lambda \quad \text{for } m = 0, 1, 2, \dots$

$$m = 2 \text{ bright fringe at: } \theta = \sin^{-1}\left(\frac{2\lambda}{d}\right) \quad m = 1 \text{ dark fringe at: } \theta = \sin^{-1}\left(\frac{1.5\lambda}{d}\right)$$

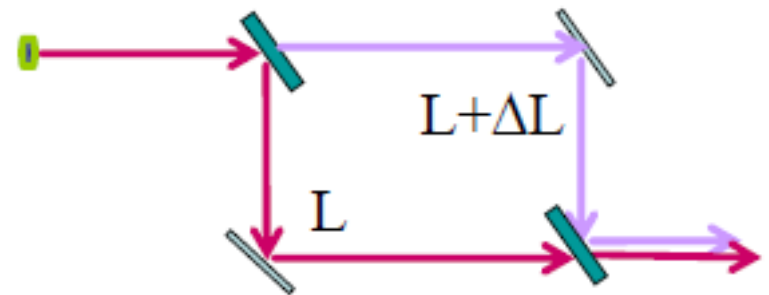
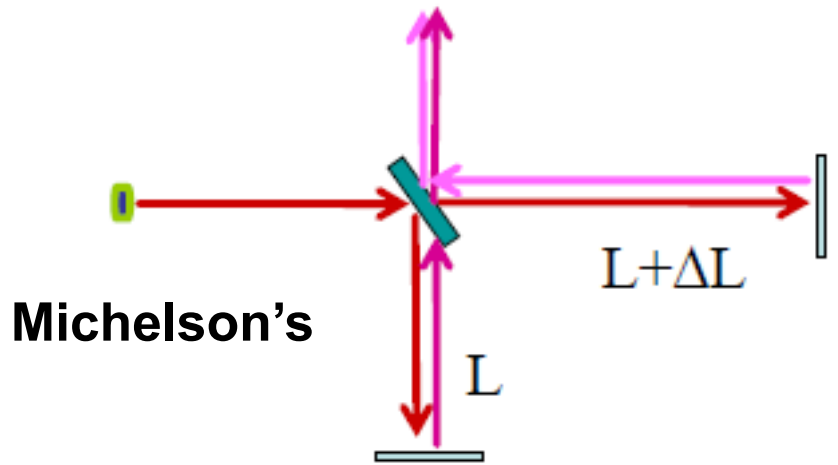
# Interferencja

- Dwa źródła mogą wytworzyć interferencję, która jest stabilna w czasie jeśli ich światło ma **związek faz** niezmienny w czasie:  $E(t) = E_0 \cos(\omega t + f)$ .
- **Źródła koherentne:** Faza  $f$  musi być dobrze zdefiniowana i stała
- Światło słoneczne jest koherentne na krótkim przedziale długości i czasu.
- Ponieważ światło laserowe jest wytwarzane dzięki wspólnemu zachowaniu atomów, jest koherentne na długim przedziale długości i czasu.
- **Niekoherentne źródła:**  $\phi$  „skacze” losowo w czasie, nie zachodzi stabilna interferencja.



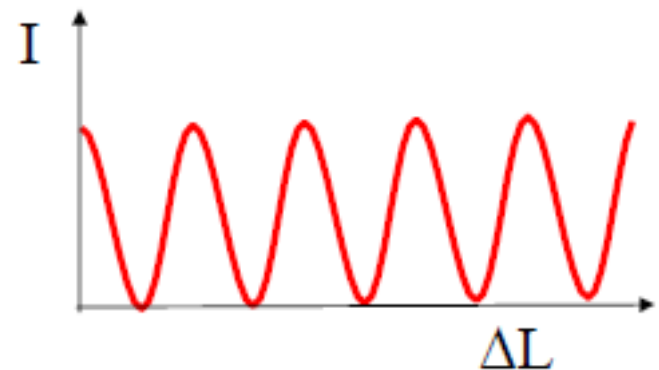
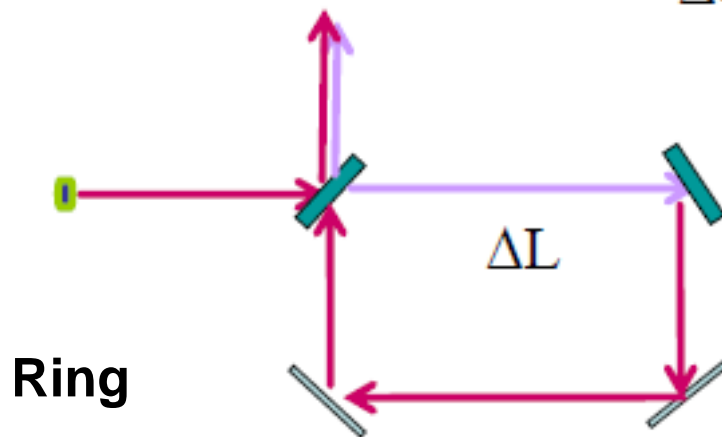


# Interferometry

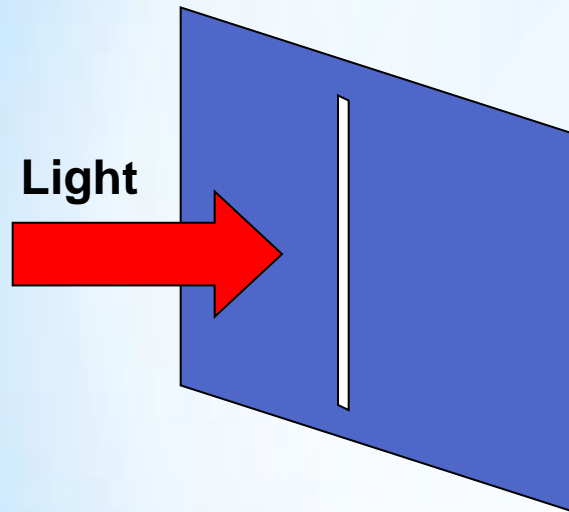


$$\Delta\phi \propto \Delta L$$

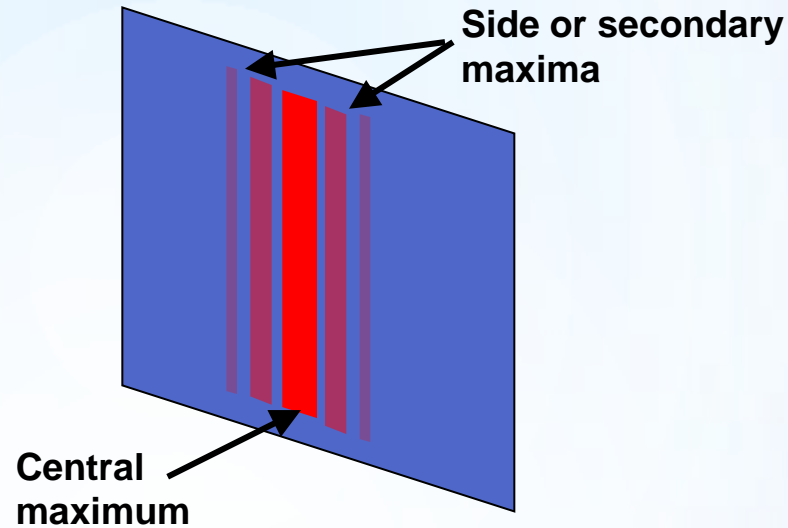
**Mach-Zehnder's**



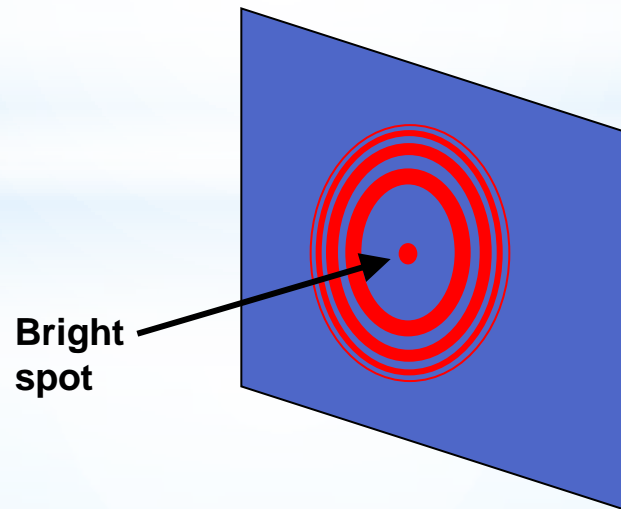
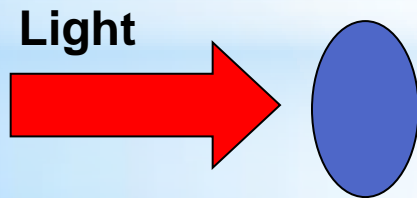
# Dyfrakcja



Fresnel Bright Spot.

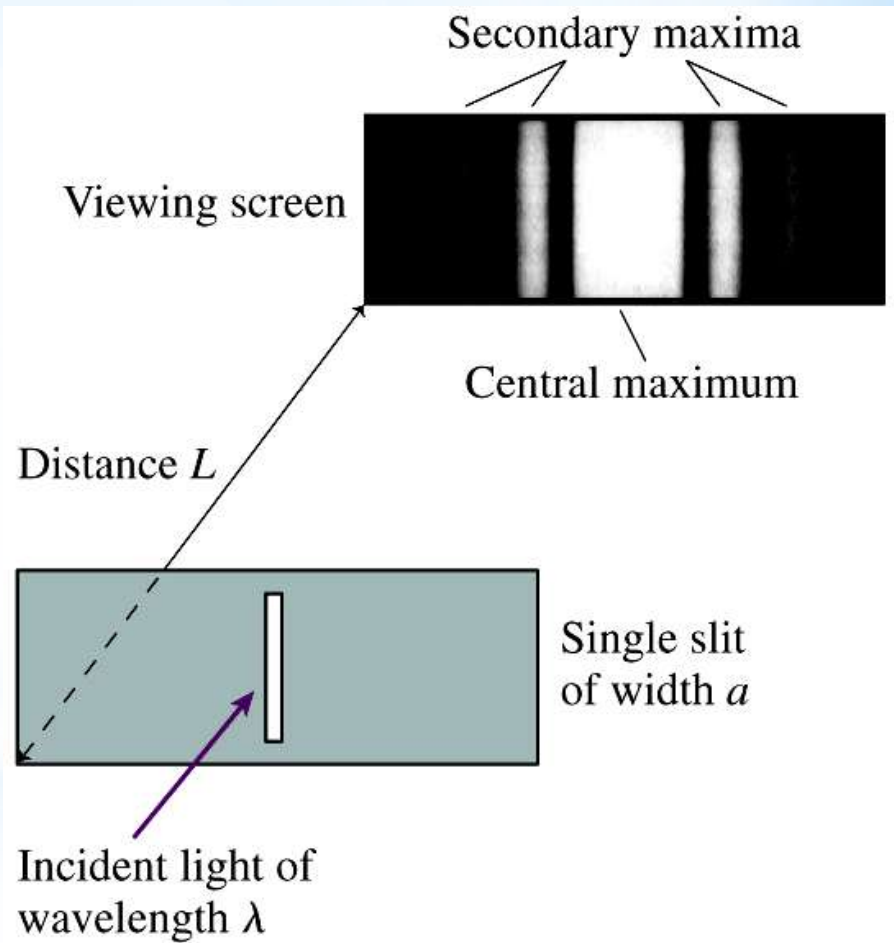
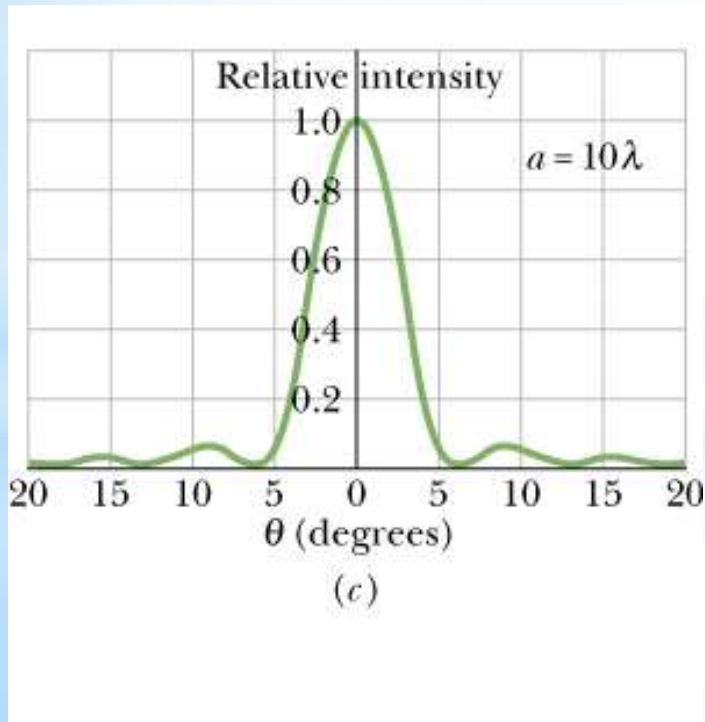


Te prążki nie mogą być wyjaśnione przy pomocy optyki geometrycznej!

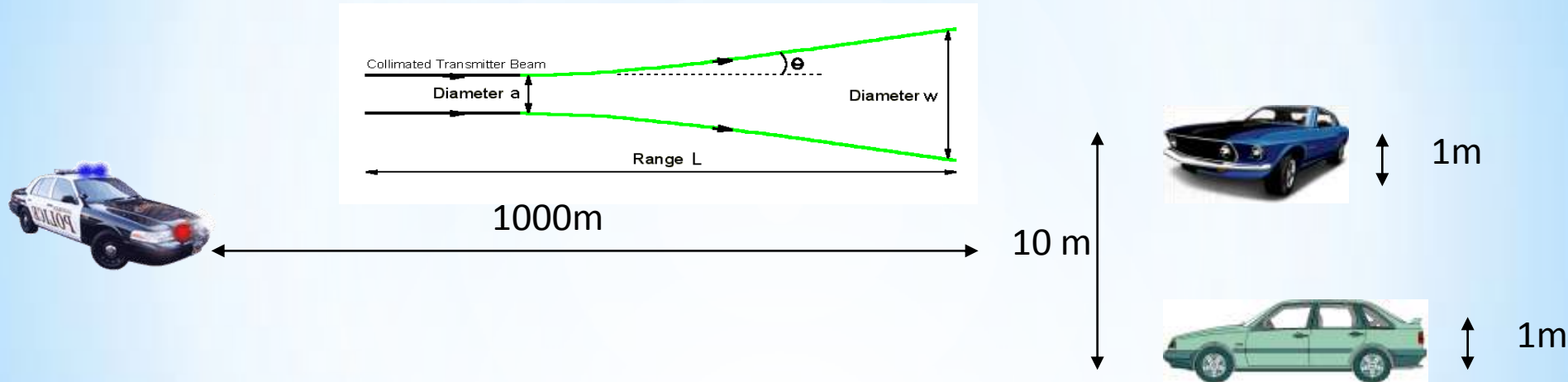


# Dyfrakcja na pojedynczej szczelinie

Kiedy światło przechodzi przez wąską szczelinę, formuje na wyjściu **prążki dyfrakcyjne**.



# Dyfrakcja



Jedziesz z prędkością 137 km/h po autostradzie A2. Mijas staruszkę jadącą 55 km/h, kiedy policiant stojący 1 km od ciebie kieruje na ciebie radar, który ma 10 cm otwór. Czy może wystawić ci mandat za zbyt szybką jazdę jeśli jego radar działa na paśmie X? Co z laserem?

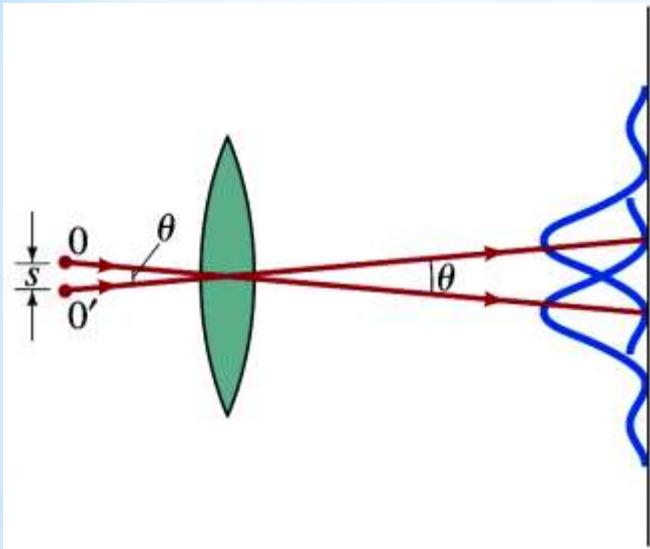
Pasmo-X:  $\lambda=10\text{cm}$

$$w = \frac{2\lambda L}{a} = \frac{2 \times 0.1\text{m} \times 1000\text{m}}{0.1\text{m}} = 2000\text{m}$$

Pasmo Lasera:  $\lambda=1\mu\text{m}$

$$w = \frac{2\lambda L}{a} = \frac{2 \times 0.000001\text{m} \times 1000\text{m}}{0.1\text{m}} = 0.02\text{m}$$

# Dyfrakcja



Kryterium Rayleigha mówi, że minimalnym warunkiem by rozdzielić dwa obiekty jest posiadanie piku dyfrakcyjnego jednego obiektu w minimum dyfrakcyjnym drugiego np,  $\Delta\theta = 1.22 \lambda/D$ .



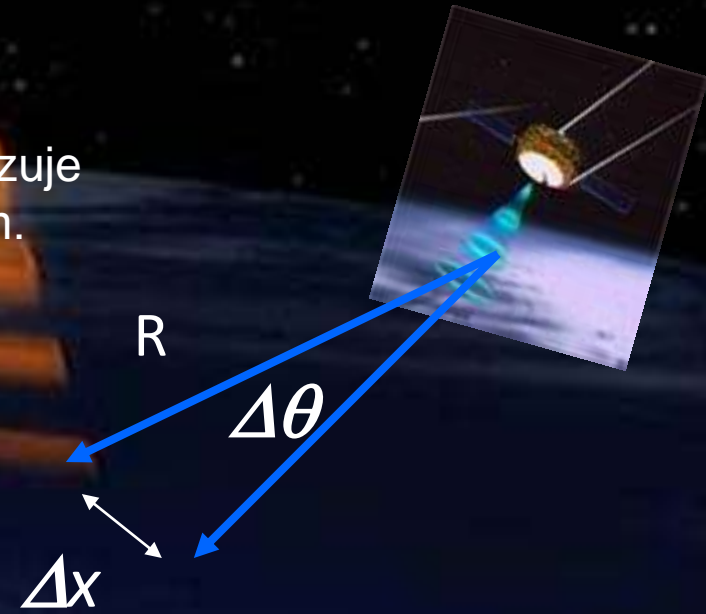
**Przykład:** Teleskop Hubble'a ma średnicę lustra 4 m, co pozwala uzyskać wspaniałą rozdzielczość blisko przelatujących obiektów. Dla światła o długości fali 500 nm, rozdzielczość kątowa Hubble'a wynosi  $\Delta\theta = 1.53 \times 10^{-7}$  radianów.



# Dyfrakcja

Satelita szpiegowski na niskiej 200 km orbicie, obrazuje Ziemię przy pomocy widzialnych długości fali 500nm.

Jak duża musi być średnica teleskopu by mógł on przeczytać ci gazetę przez ramię, pozostając w Przestrzeni?



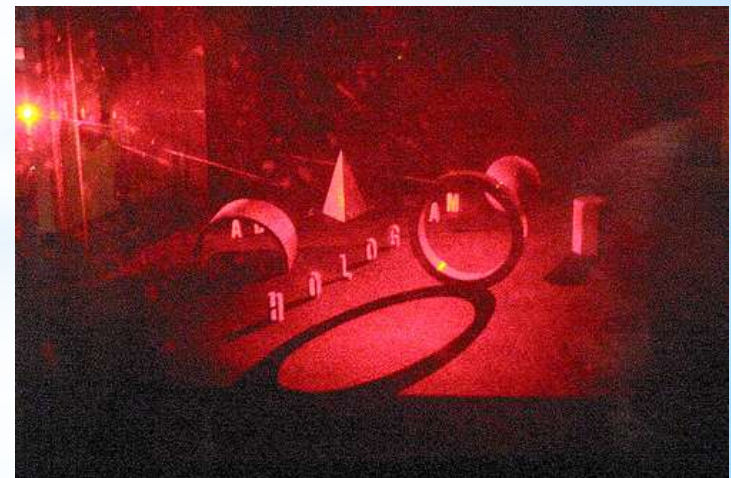
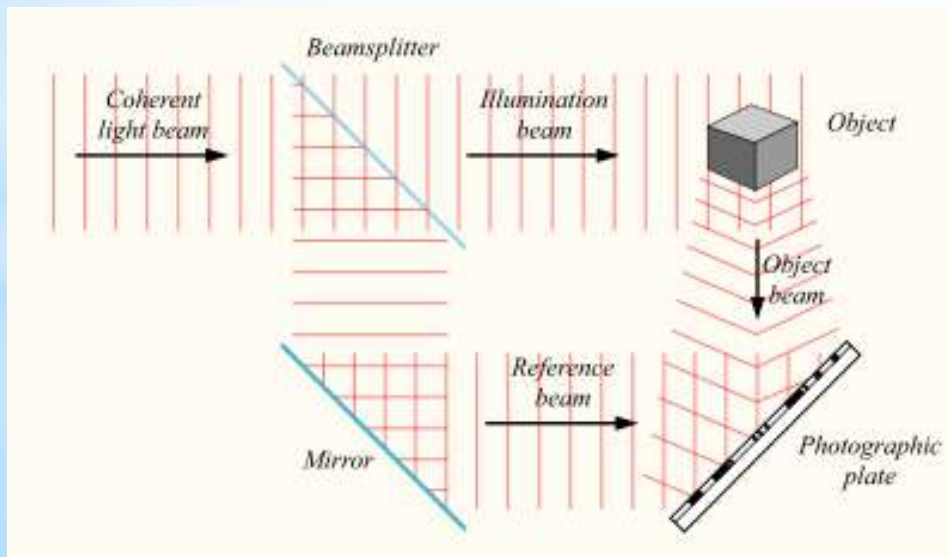
$$\Delta x = R\Delta\theta = R(1.22\lambda/D)$$

$$D = R(1.22\lambda/\Delta x) = (200 \times 10^3 \text{m})(1.22 \times 500 \times 10^{-9} \text{m}) / (10 \times 10^{-3} \text{m})$$

$$= 12.2 \text{m}$$

# Holografia

- Holografia to metoda produkowania trójwymiarowych (3-D) obrazów obiektu. (Trzy wymiary to wysokość, szerokość i długość).
- Później obiekt może być rekonstruowany.
- Hologram jest właściwie zapisem różnic między dwoma promieniami światła koherentnego
- Może być użyty jako optyczny dysk pamięci, w przetwarzaniu informacji



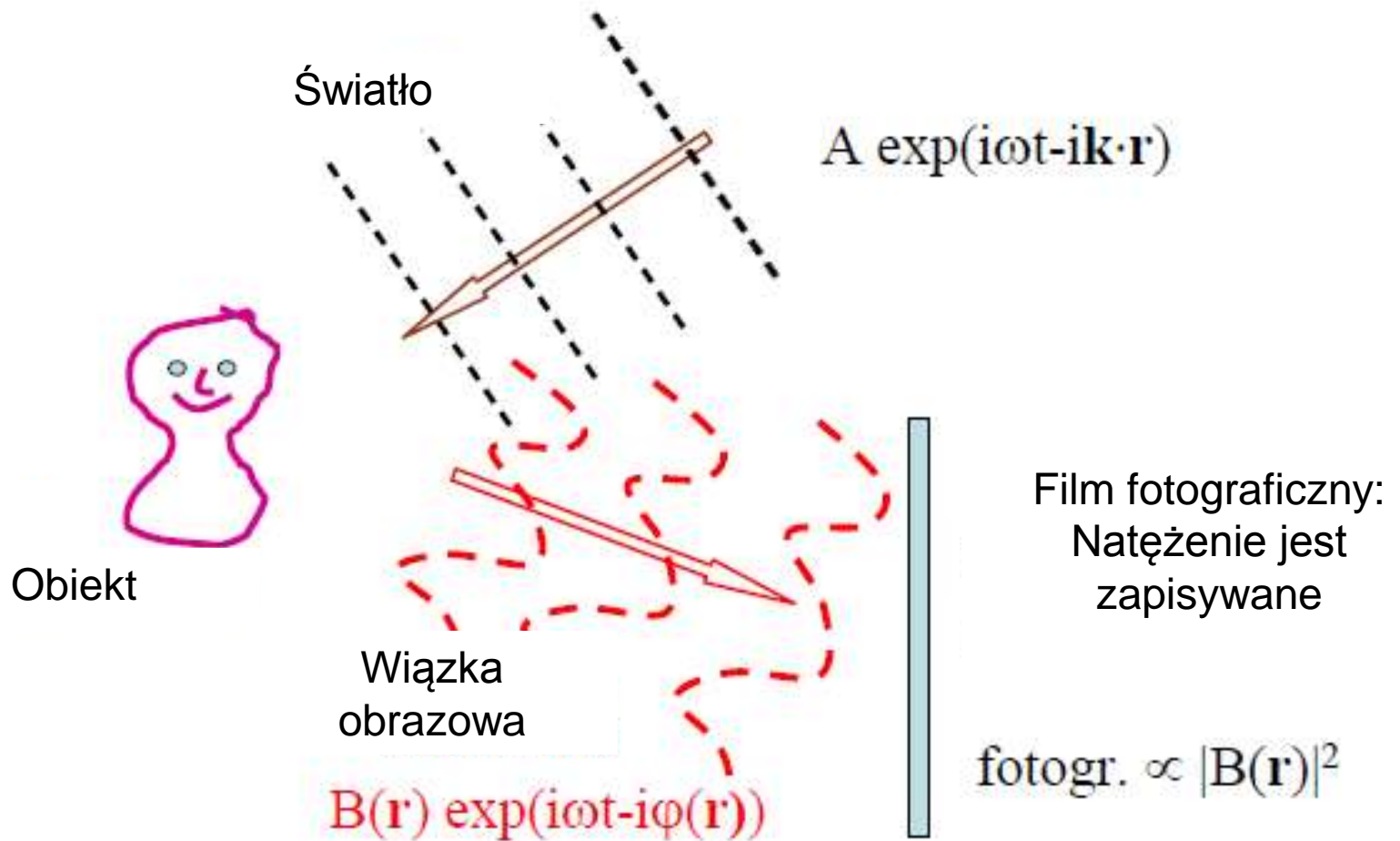
# Holografia vs. Tradycyjne zdjęcia

## Tradycyjne:

- 2-d wersja 3-d sceny
- Fotografii brakuje postrzegania głębi czy paralaksy
- Film jest wrażliwy tylko na energię promieniowania
- Relacja fazy (np. interferencji) jest zaniedbywana

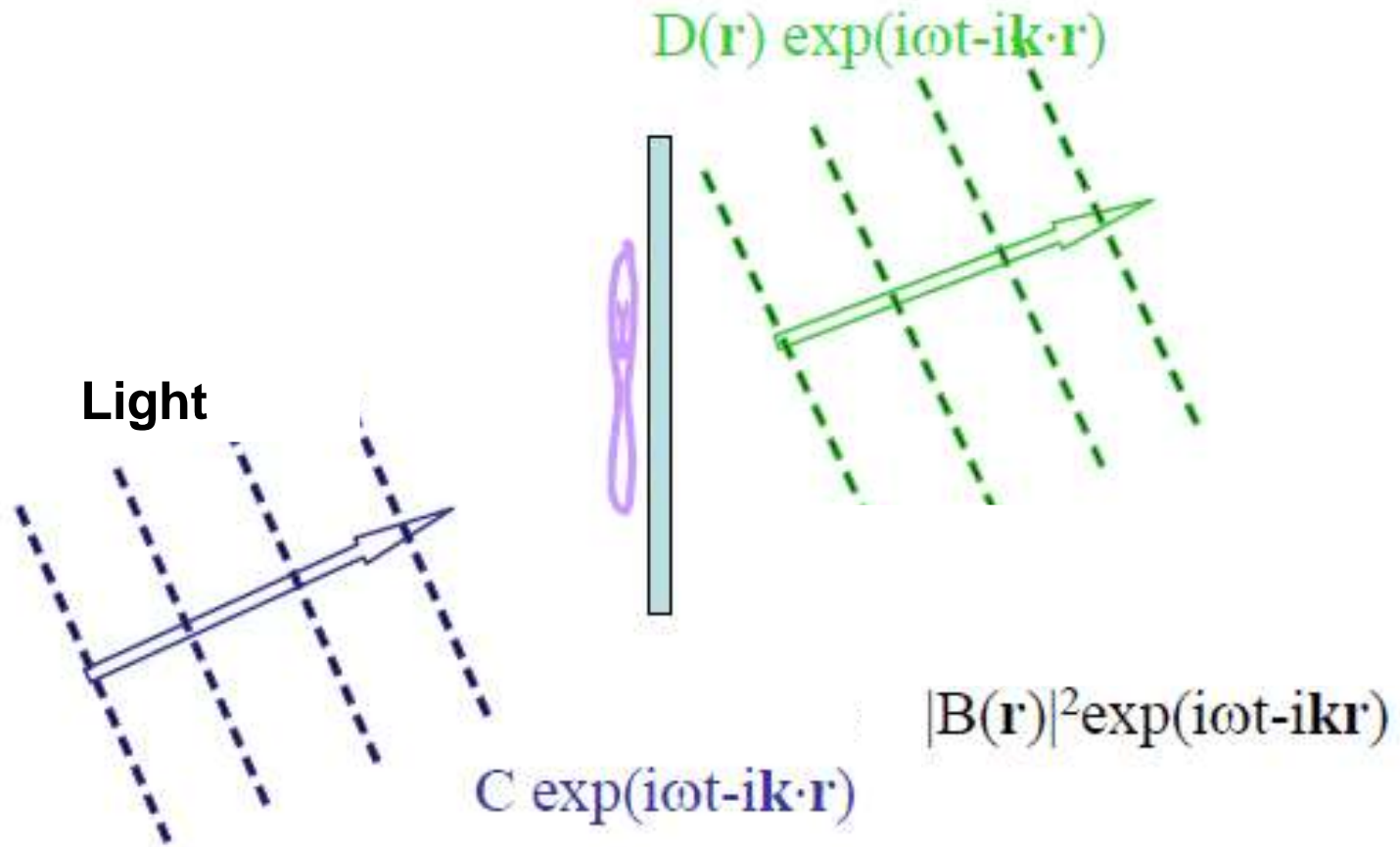


# Holografia vs. Tradycyjne zdjęcia





# Holografia vs. Tradycyjne zdjęcia





# Holografia vs. Tradycyjne zdjęcia

## Hologram:

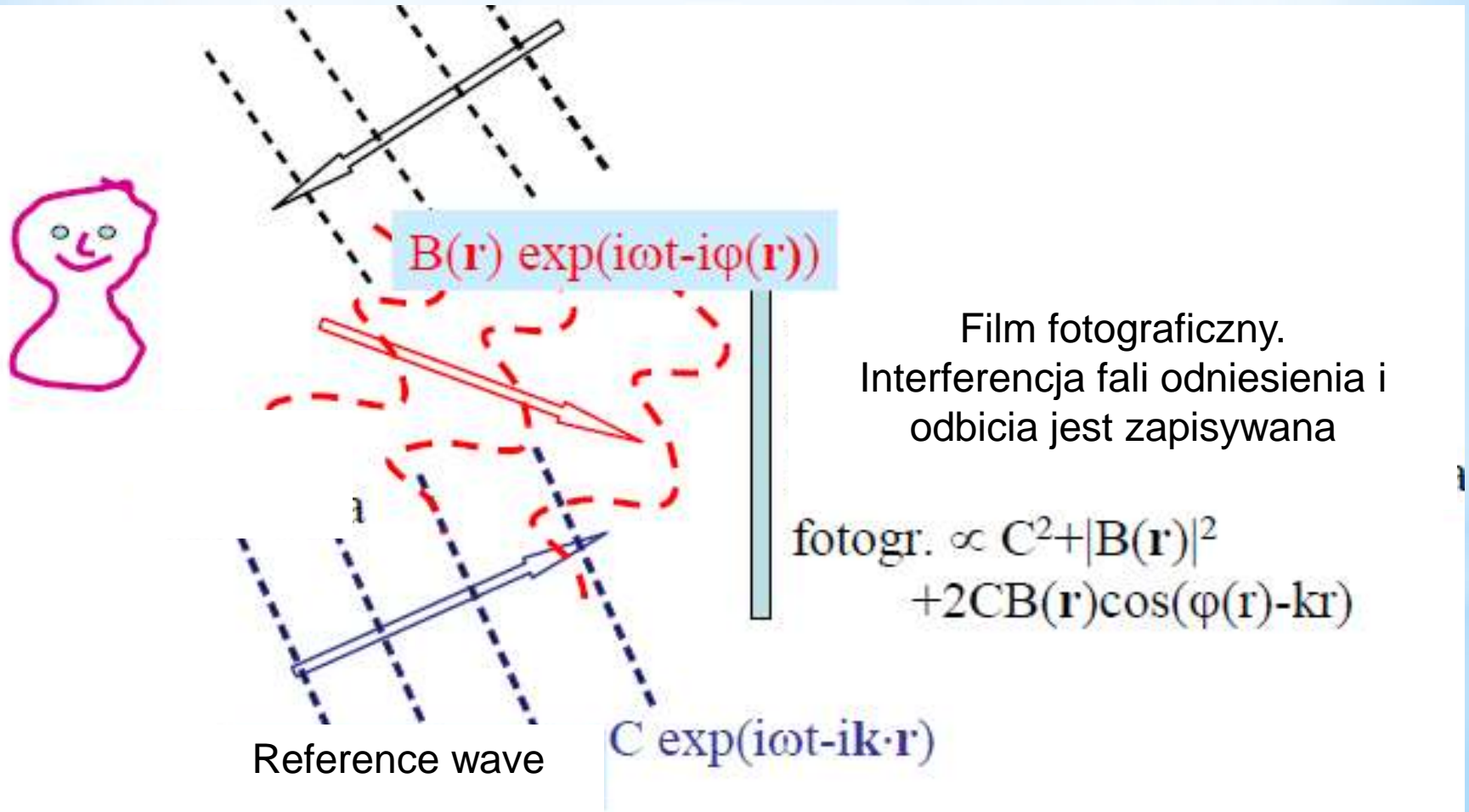
- Zatrzymuje skomplikowany front falowy światła, który przenosi całą wizualną informację o scenie
- By odtworzyć hologram należy zrekonstruować front falowy
- Otrzymany obraz będzie wyglądał jak oryginalna scena, oglądana przez okno określone przez hologram.
- Zapewnia głębię postrzegania i paralaksę



# Holografia vs. Tradycyjne zdjęcia

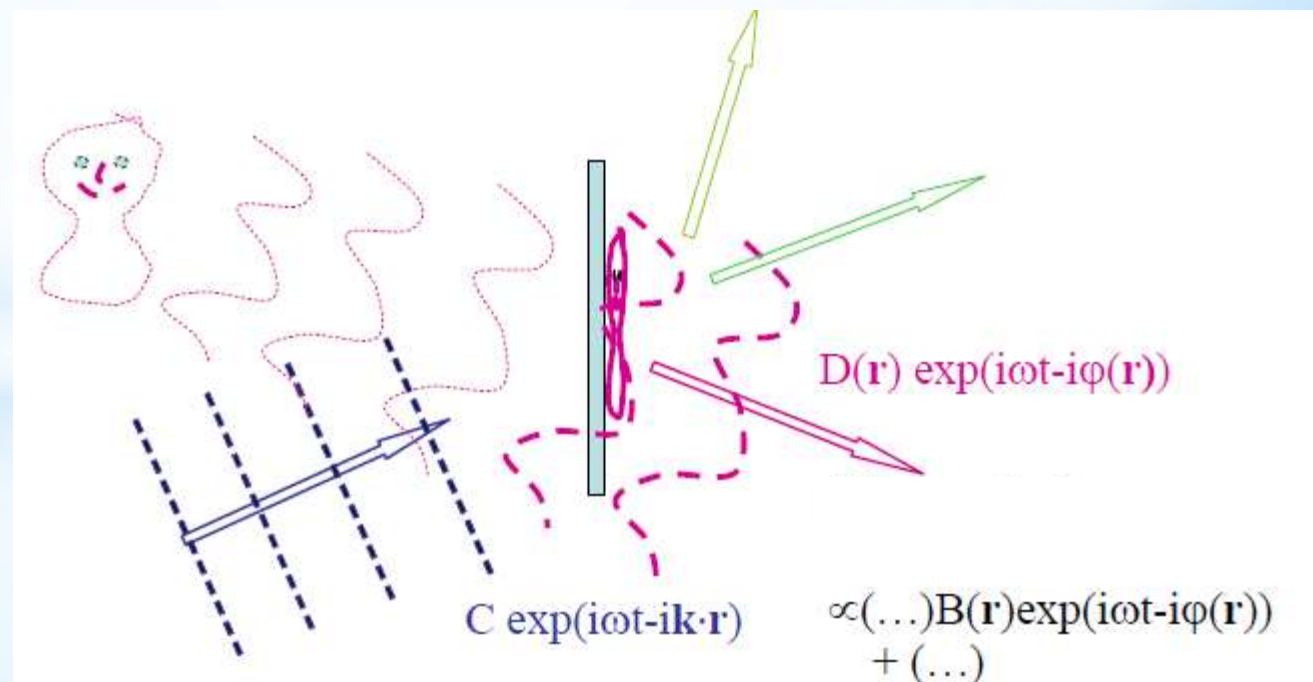
- Zamienia informację o fazie w informację o amplitudzie (wewnątrz fazy - maximum amplitudy, poza fazą - minimum amplitudy)
- Interferencja frontu falowego światła ze sceny z falą odniesienia
- Hologram jest złożonym wzorem interferencyjnym mikroskopijnie rozmieszczonych prążków

# Holografia vs. Tradycyjne zdjęcia

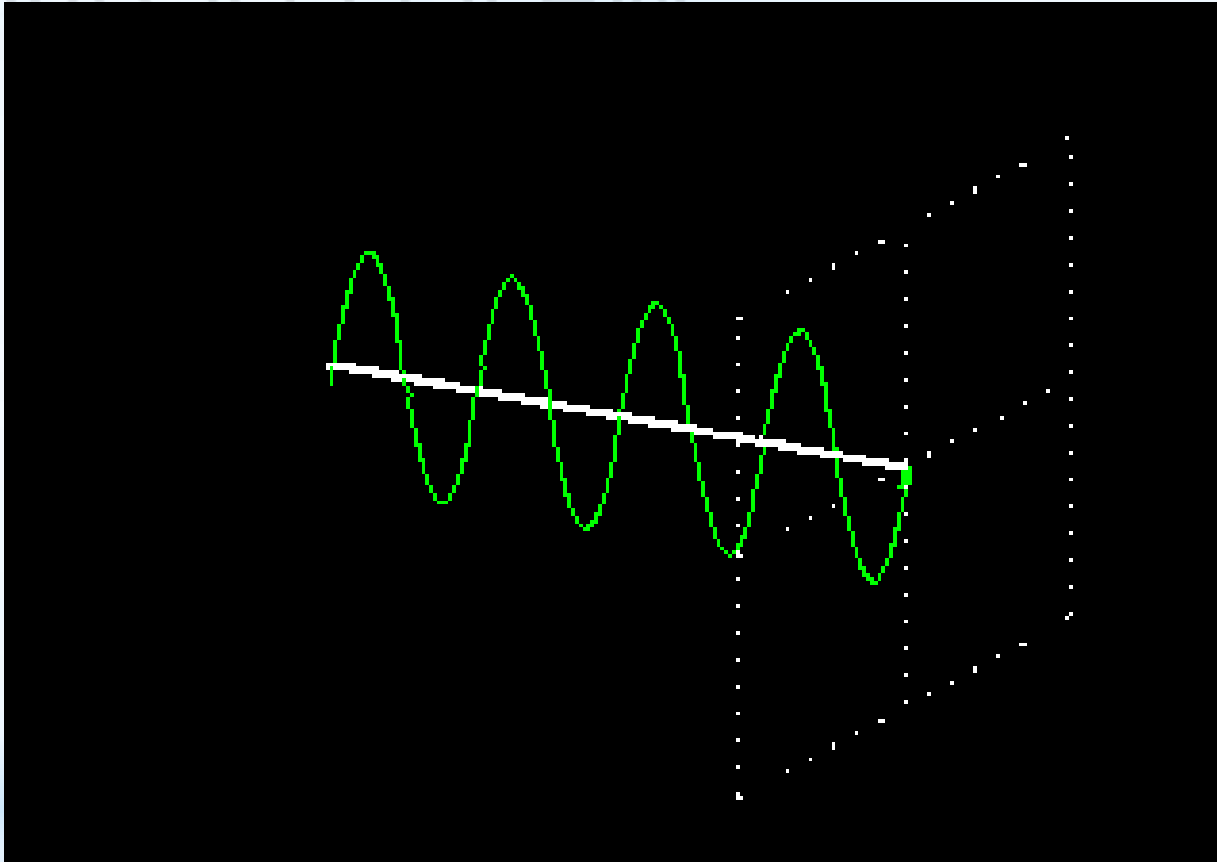


# Holografia vs. Tradycyjne zdjęcia

- Film jest rozbudowany,
- By odtworzyć hologram musi on być oświetlany pod tym samym kątem pod jakim padała wiązka odniesienia podczas oryginalnego naświetlania



# Polaryzacja fal EM



$$E_y = A \sin(2\pi x / \lambda - \omega t)$$

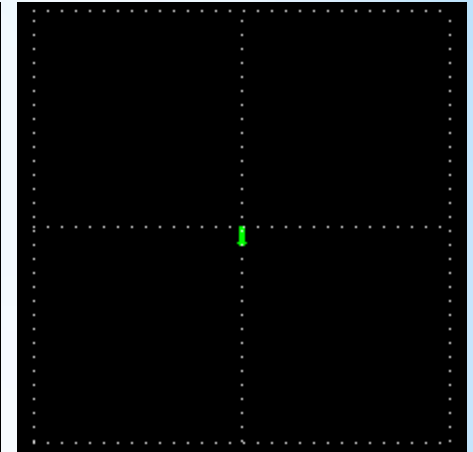
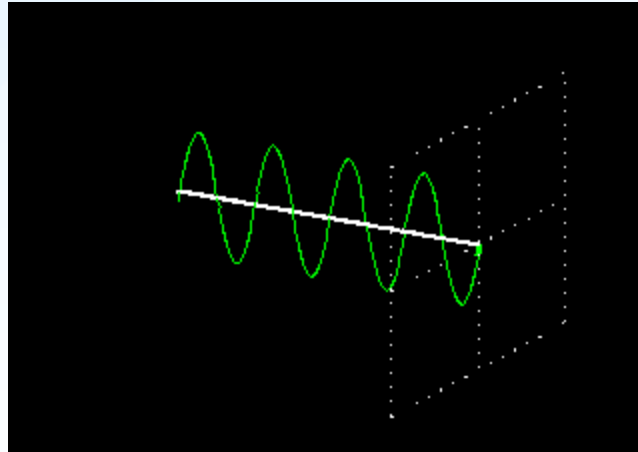
Pionowo (oś  $y$ ) spolaryzowana fala ma amplitudę  $A$ , długość fali  $\lambda$  i prędkość kątową (częstotliwość  $\cdot 2\pi$ )  $\omega$ , propagująca się wzdłuż osi  $x$ .



# Polaryzacja fal EM

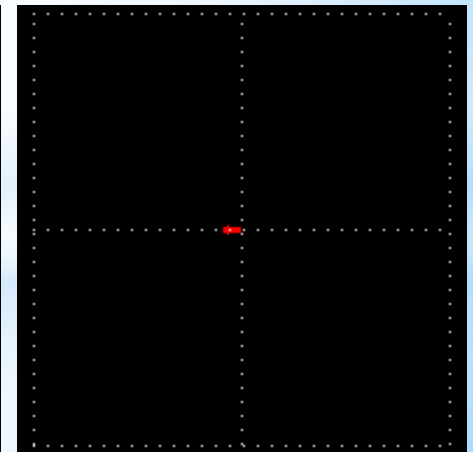
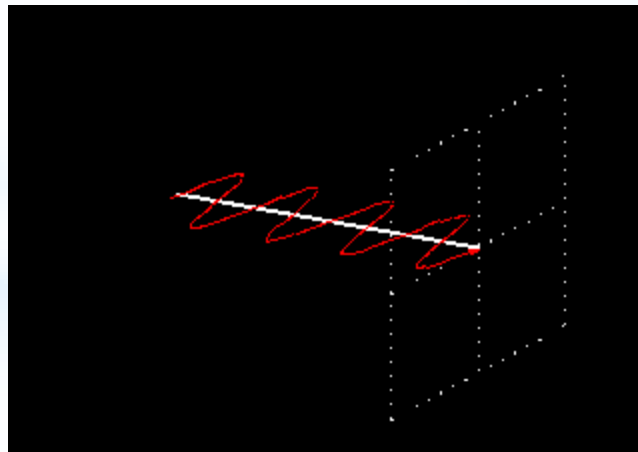
Pionowo

$$E_y = A \sin(2\pi x / \lambda - \omega t)$$

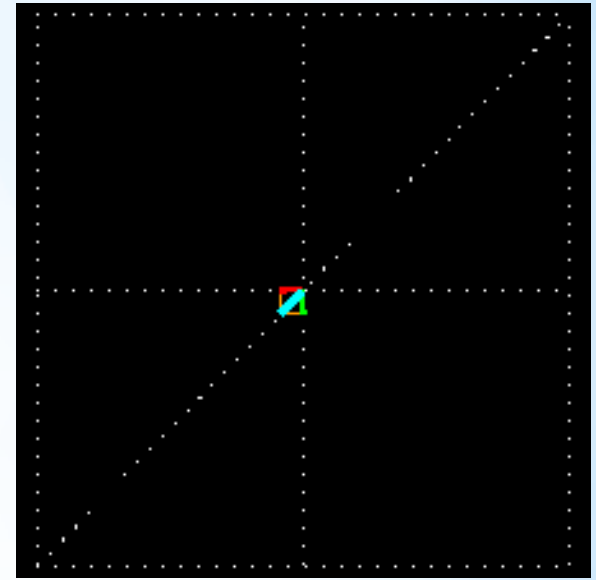
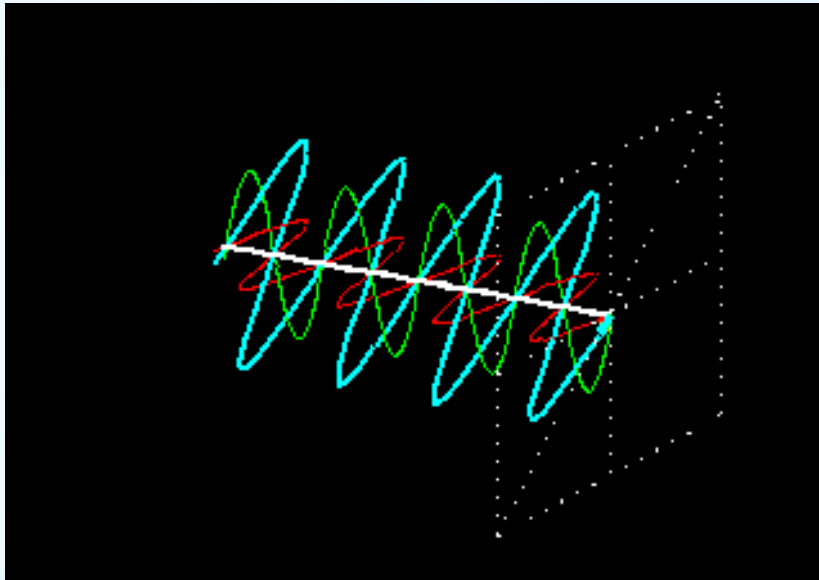


Poziomo

$$E_z = A \sin(2\pi x / \lambda - \omega t)$$



# Polaryzacja fal EM



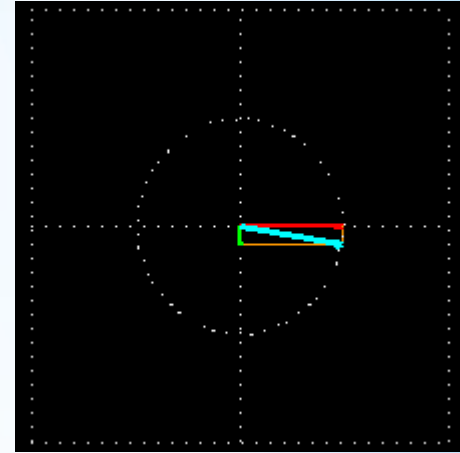
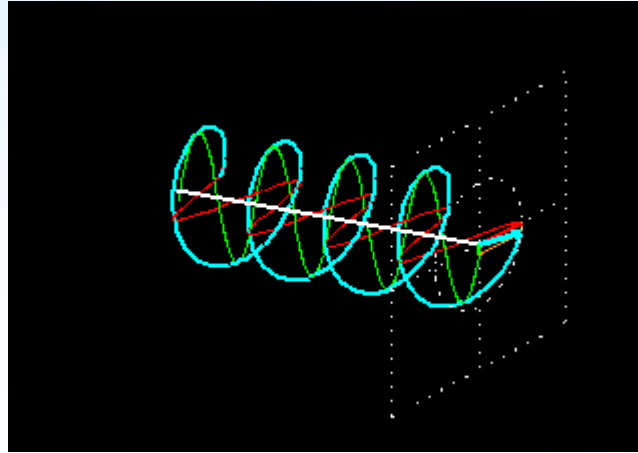
- superpozycja dwóch fal, które mają tę samą amplitudę i długość fali,
- są spolaryzowane w dwóch prostopadłych płaszczyznach i oscylują w tej samej fazie.
- Oscylacja w tej samej fazie oznacza, że dwie fale osiągają swoje maxima i minima w tym samym momencie.

# Polaryzacja fali EM

## Prawoskrętna

$$E_y = A \sin(2\pi x / \lambda - \omega t + 90^\circ)$$

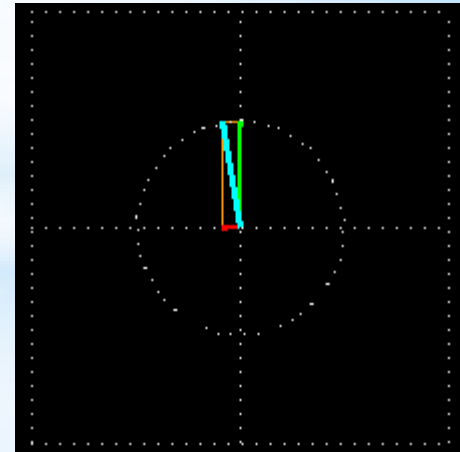
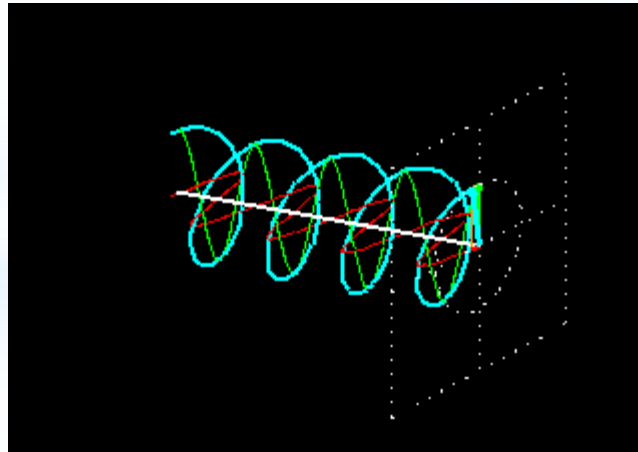
$$E_z = A \sin(2\pi x / \lambda - \omega t)$$



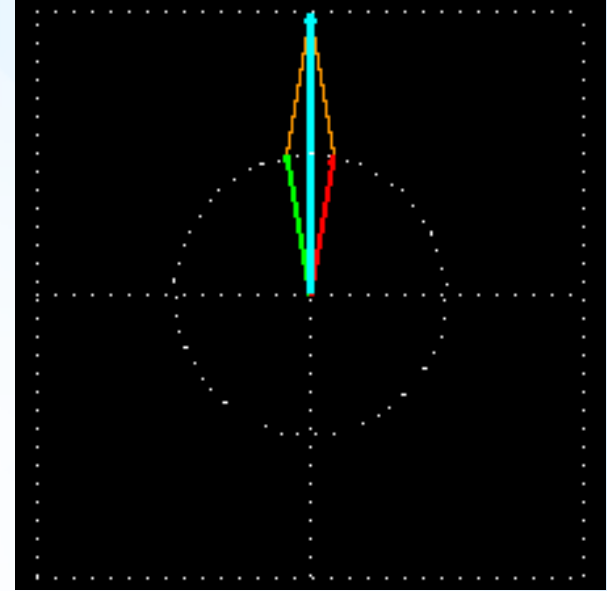
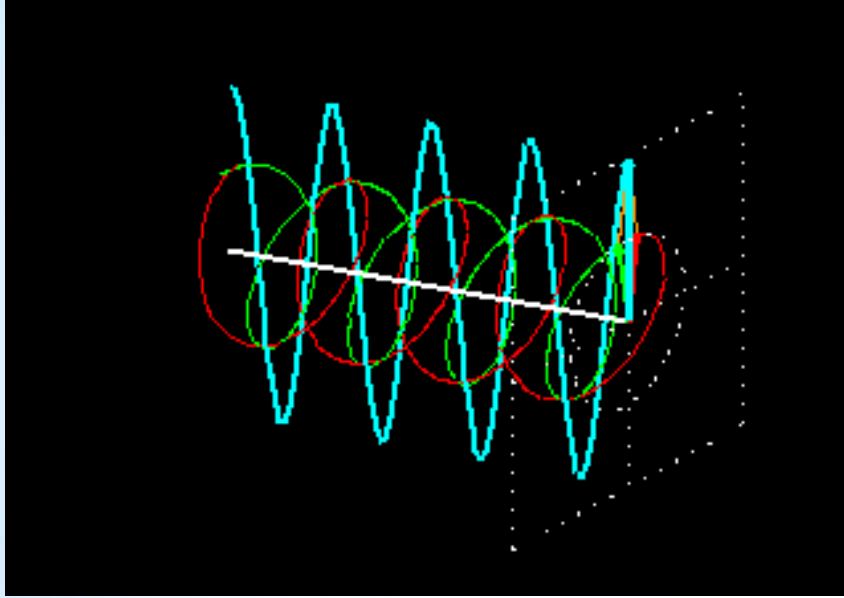
## Lewoskrętna

$$E_y = A \sin(2\pi x / \lambda - \omega t - 90^\circ)$$

$$E_z = A \sin(2\pi x / \lambda - \omega t)$$



# Polaryzacja fal EM



- dwie kołowo spolaryzowane fale również się mogą spotkać.
- W takim przypadku, pola dodaje się zgodnie z zasada dodawania wektorów, tak jak w przypadku fal spolaryzowanych liniowo.
- Superpozycja dwóch kołowo spolaryzowanych wiązek może prowadzić do różnych efektów.

**Każda liniowo spolaryzowana wiązka światła może zostać osiągnięta poprzez superpozycję lewo- i prawoskrętnie spolaryzowanych wiązek światła o identycznych amplitudach.**

# Polaryzacja fal EM

Różne polaryzacje światła zostają odbite i załamane z różnymi amplitudami („dwójłomność”)

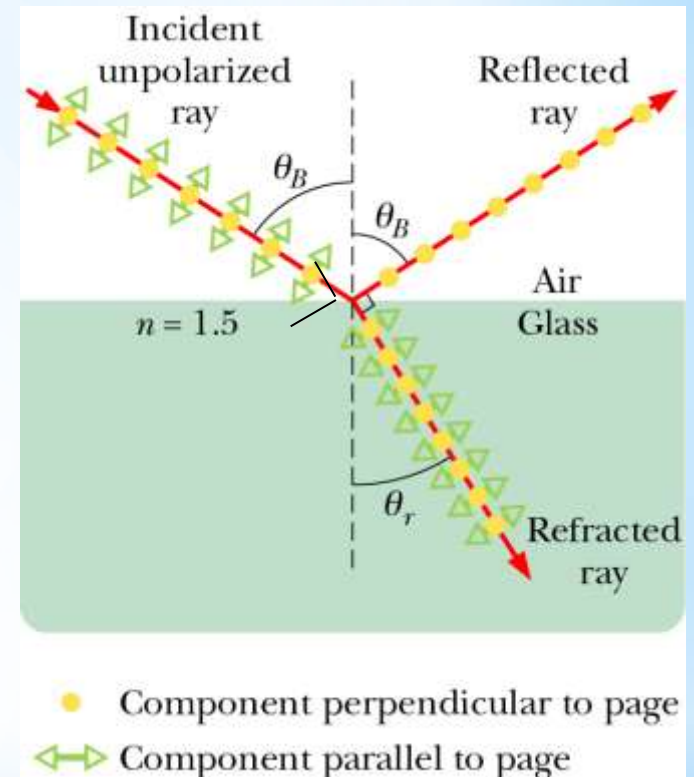
Przy jednym szczególnym kącie, polaryzacja równoległa NIE jest odbita!

To jest tzw. „kąt Brewstera”  $\theta_B$ , i  $\theta_B + \theta_r = 90^\circ$ .

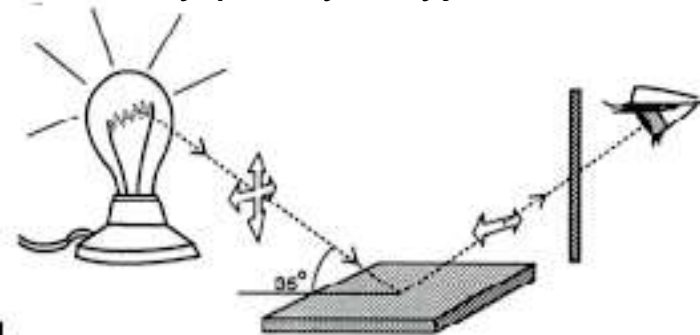
**(Absorpcja)**

$$n_1 \sin \theta_B = n_2 \sin(90^\circ - \theta_B) = n_2 \cos \theta_B$$

$$\tan \theta_B \equiv \frac{n_2}{n_1}$$

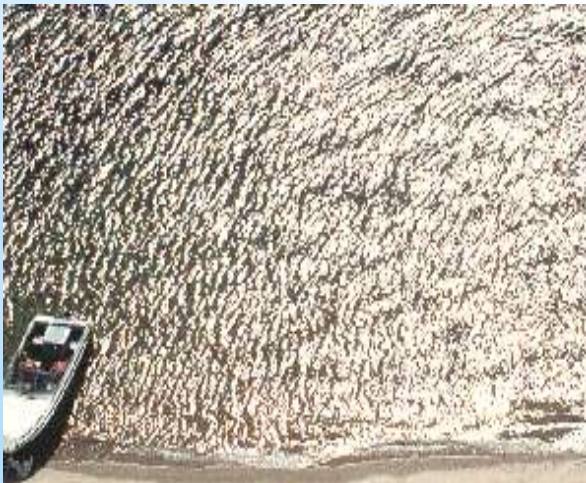
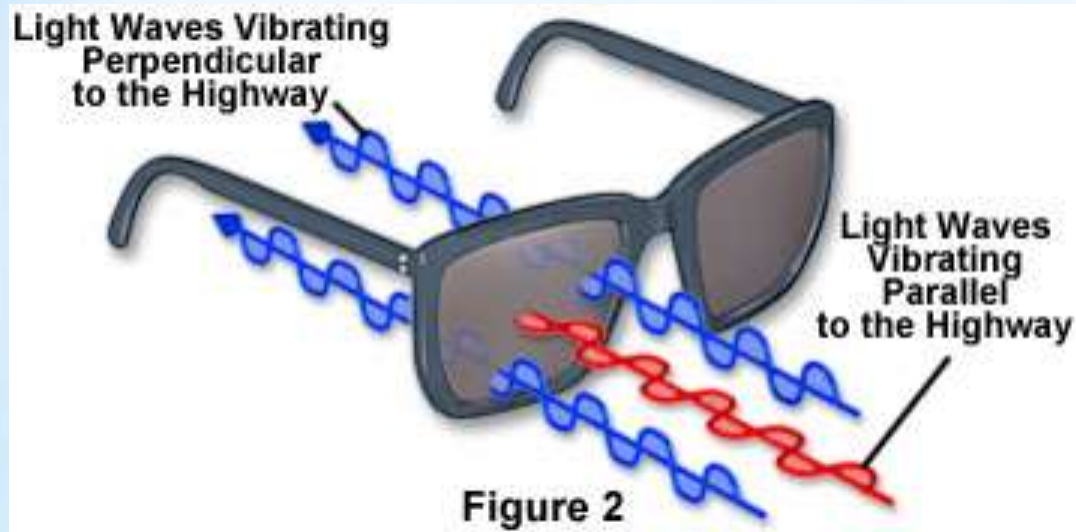


Okulary polaryzacyjne

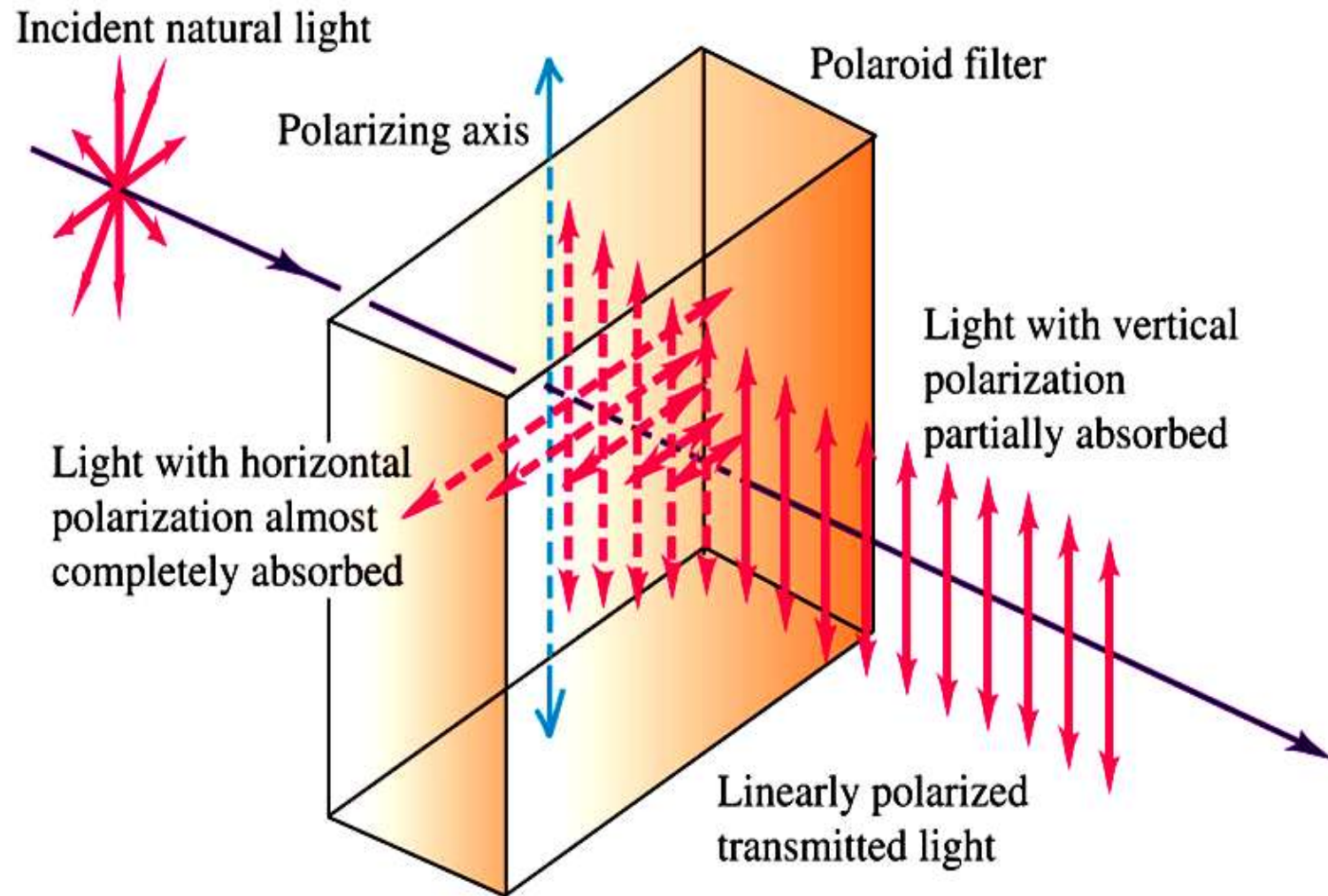




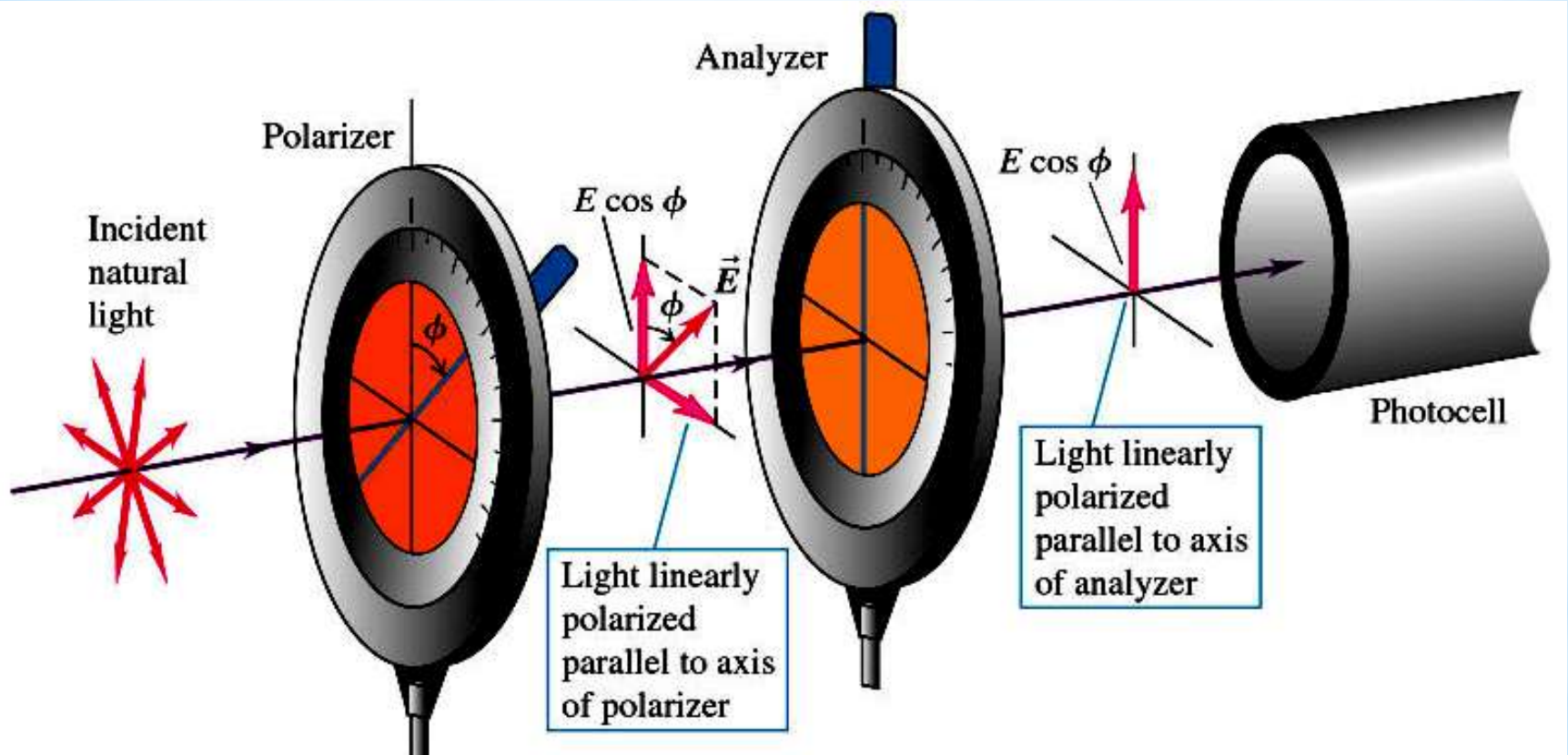
# Polaryzacja fal EM



# Polaryzacja fal EM



# Prawo Malusa



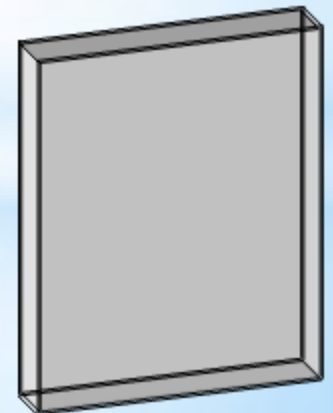
Prawo Malusa, spolaryzowane  
światła przechodzi przez  
analizator

$$I = I_{\max} \cos^2 \phi$$



# Wzajemne oddziaływanie światła w ośrodkach

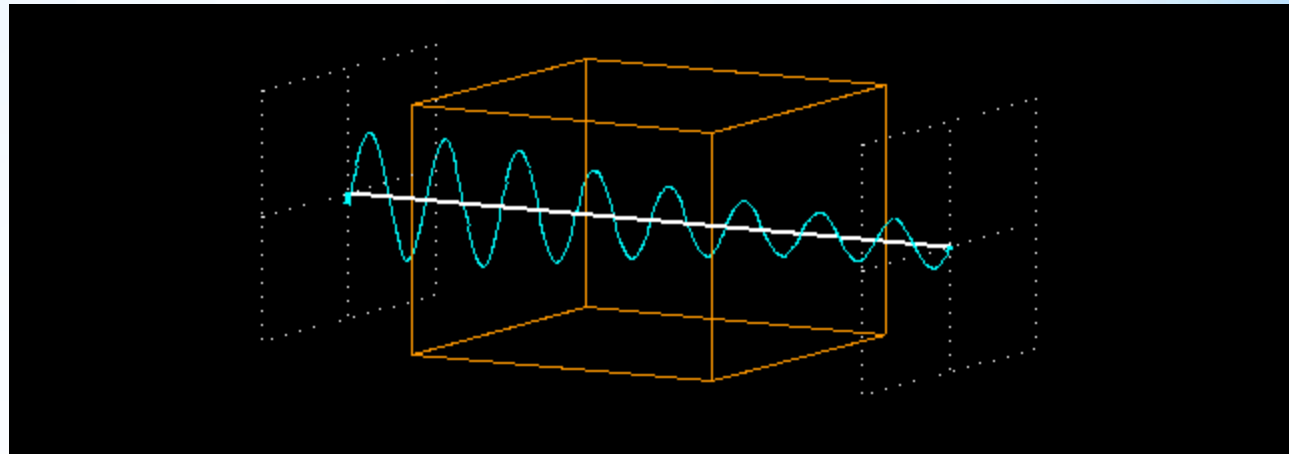
- **Nieprzeźroczysty**
  - Absorbuje albo odbija całe światło
- **Transparentny**
  - Całkowicie przepuszcza światło
- **Przeświecający**
  - Przepuszcza tylko część światła



# Absorpcja

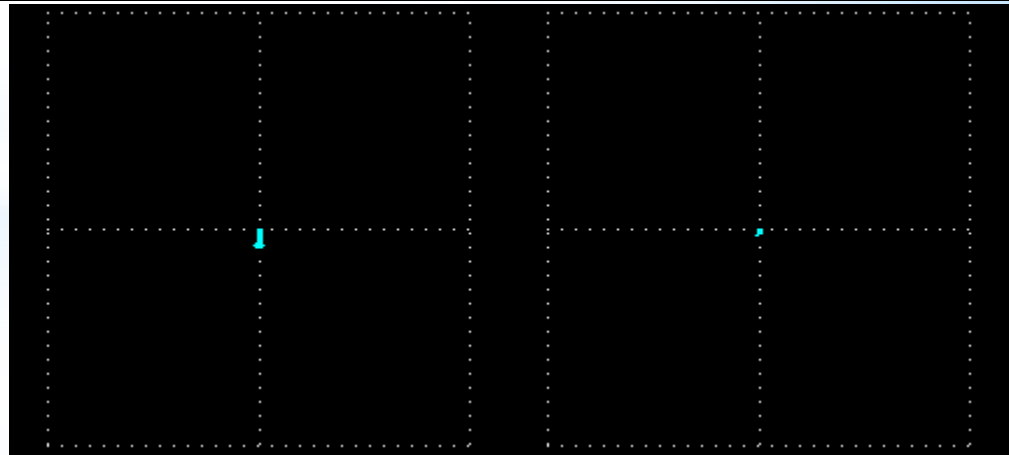
Proces w którym energia promieniowania fali EM jest absorbowana przez molekułę lub cząstkę i przetworzona na inną formę energii

Materiał ze  
współczynnikiem ekstynkcji  
 $\varepsilon$



Światło słabnie (jego amplituda spada)

$$E_y = Ae^{-\varepsilon x} \sin(2\pi x / \lambda - \omega t)$$

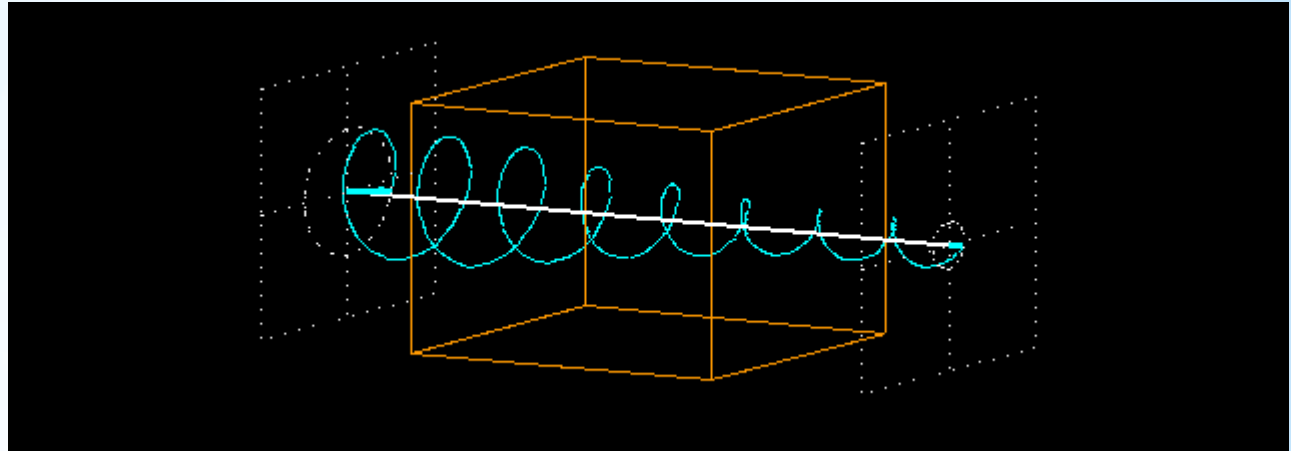


In

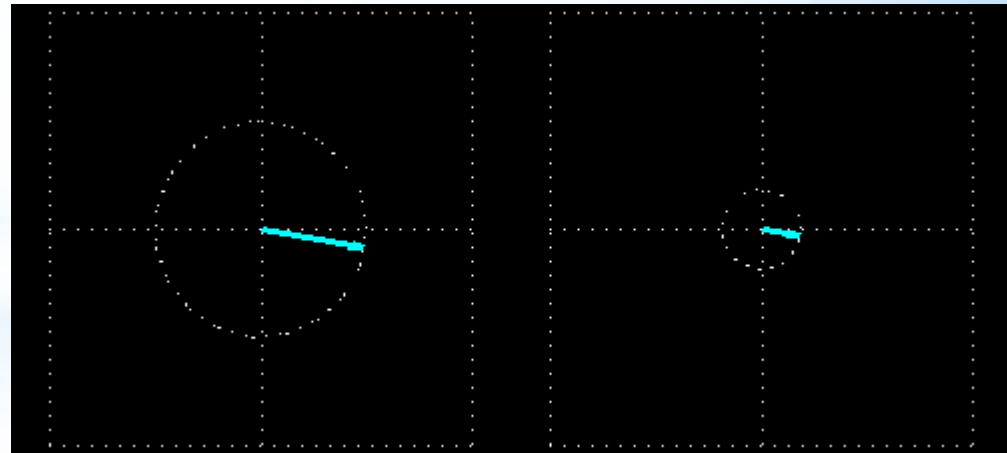
Out



# Absorpcja



- Natężenie światła spada eksponentalnie wewnątrz przedstawionego kawałka materiału.
- Po opuszczeniu ośrodka przez światło, jego wektor pola obraca się jak wcześniej, ale jego długość jest niższa niż wartość przed wejściem do materiału.

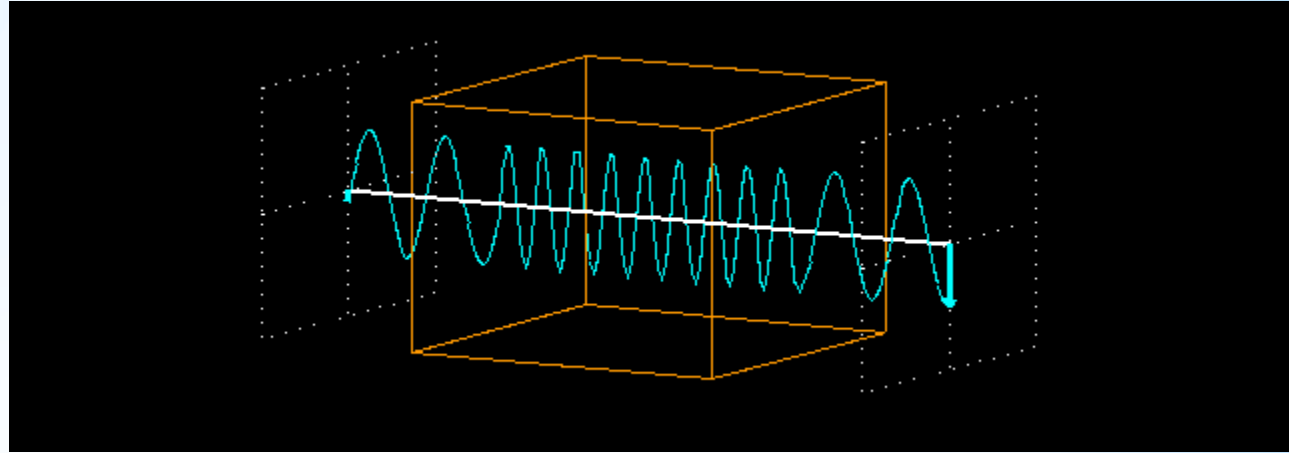


In

Out

# Załamanie

Materiał ze  
współczynnikiem  
załamania  $n$



Światła spowalnia wewnątrz materiału,  
dlatego też jego długość fali skraca się i  
dochodzi do przesunięcia fazy.

$$E_y = A \sin(2\pi n x / \lambda - \omega t)$$

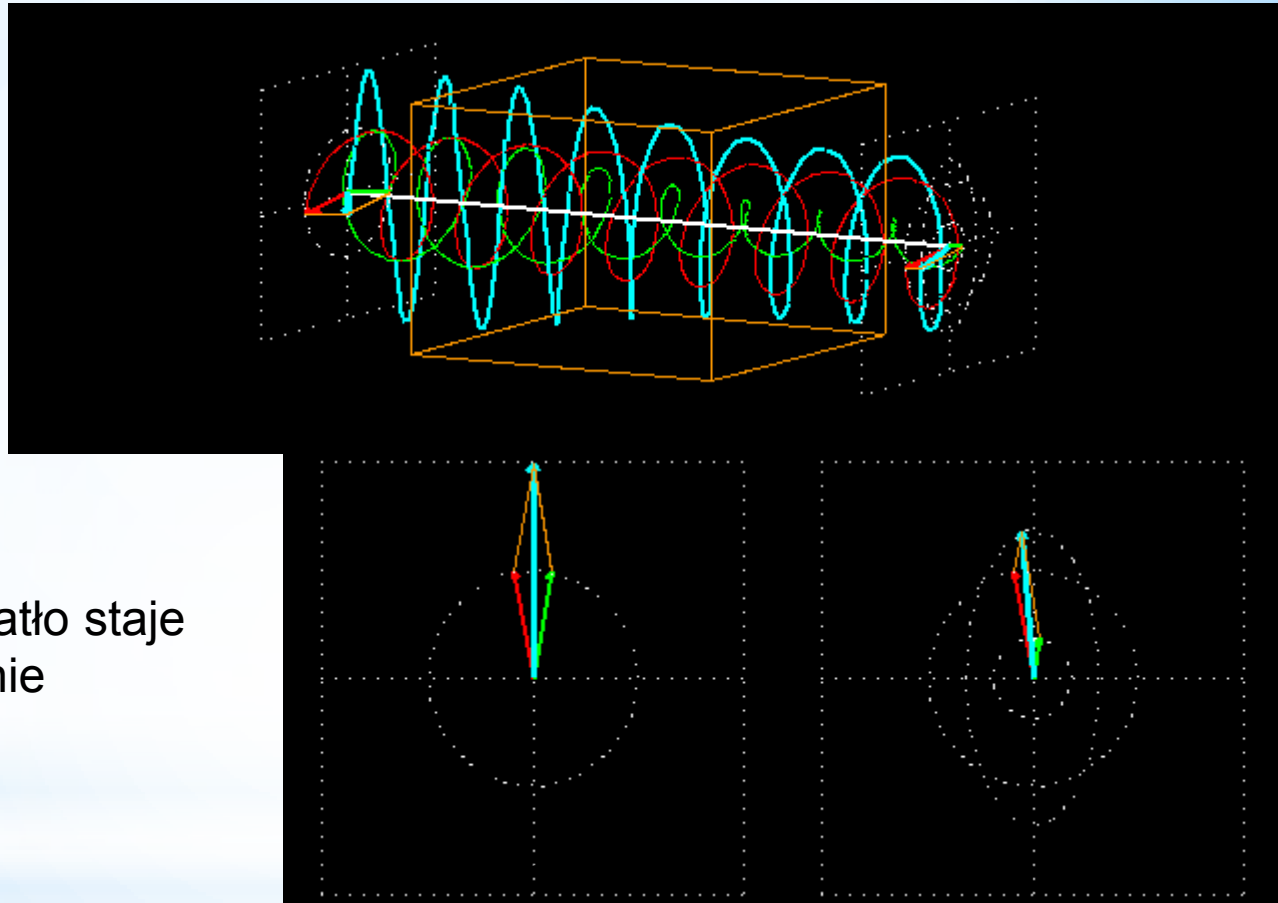


In

Out

# Dichroizm kołowy

Materiał posiadający różny współczynnik ekstynkcji dla światła spolaryzowanego lewo- i prawoskrętnie:  $\varepsilon_R$  i  $\varepsilon_L$



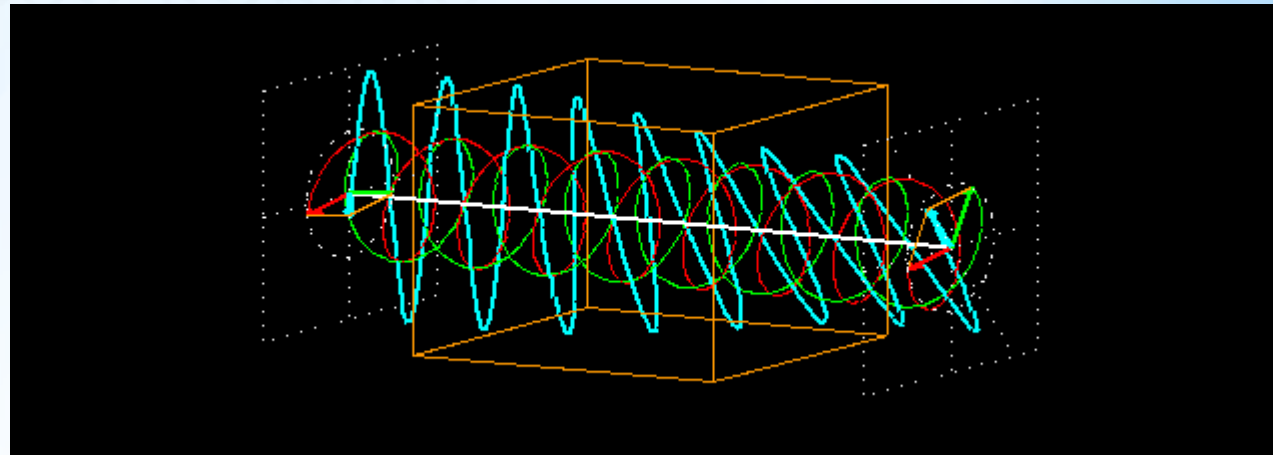
Liniowo spolaryzowane światło staje się spolaryzowane eliptycznie

$$E_y = Ae^{-\varepsilon_R x} \sin(2\pi x / \lambda - \omega t + 90^\circ) + Ae^{-\varepsilon_L x} \sin(2\pi x / \lambda - \omega t - 90^\circ)$$

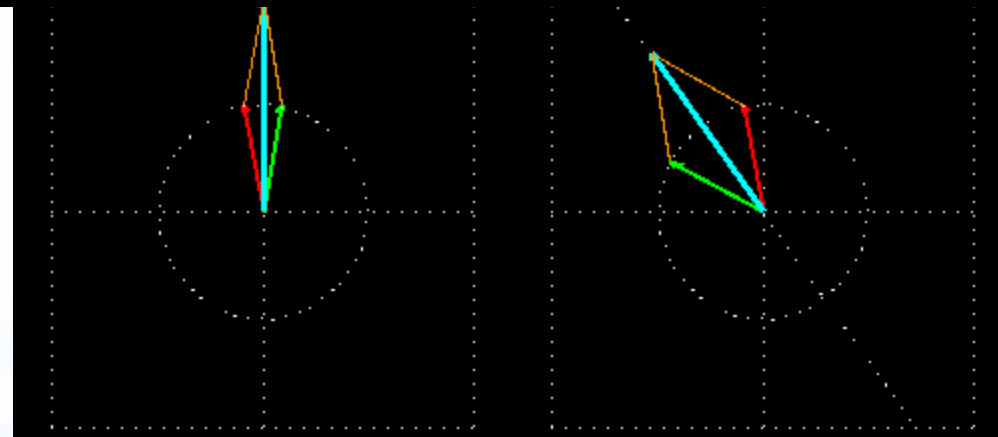
$$E_z = Ae^{-\varepsilon_R x} \sin(2\pi x / \lambda - \omega t) + Ae^{-\varepsilon_L x} \sin(2\pi x / \lambda - \omega t)$$

# Dwójłomność kołowa

Materiał posiadający różne współczynniki załamania wskazują na lewo- i prawoskrętnie spolaryzowane światło:  $n_R$  and  $n_L$



Płaszczyzna polaryzacji liniowo spolaryzowanego światła zostaje obrócona



In

Out

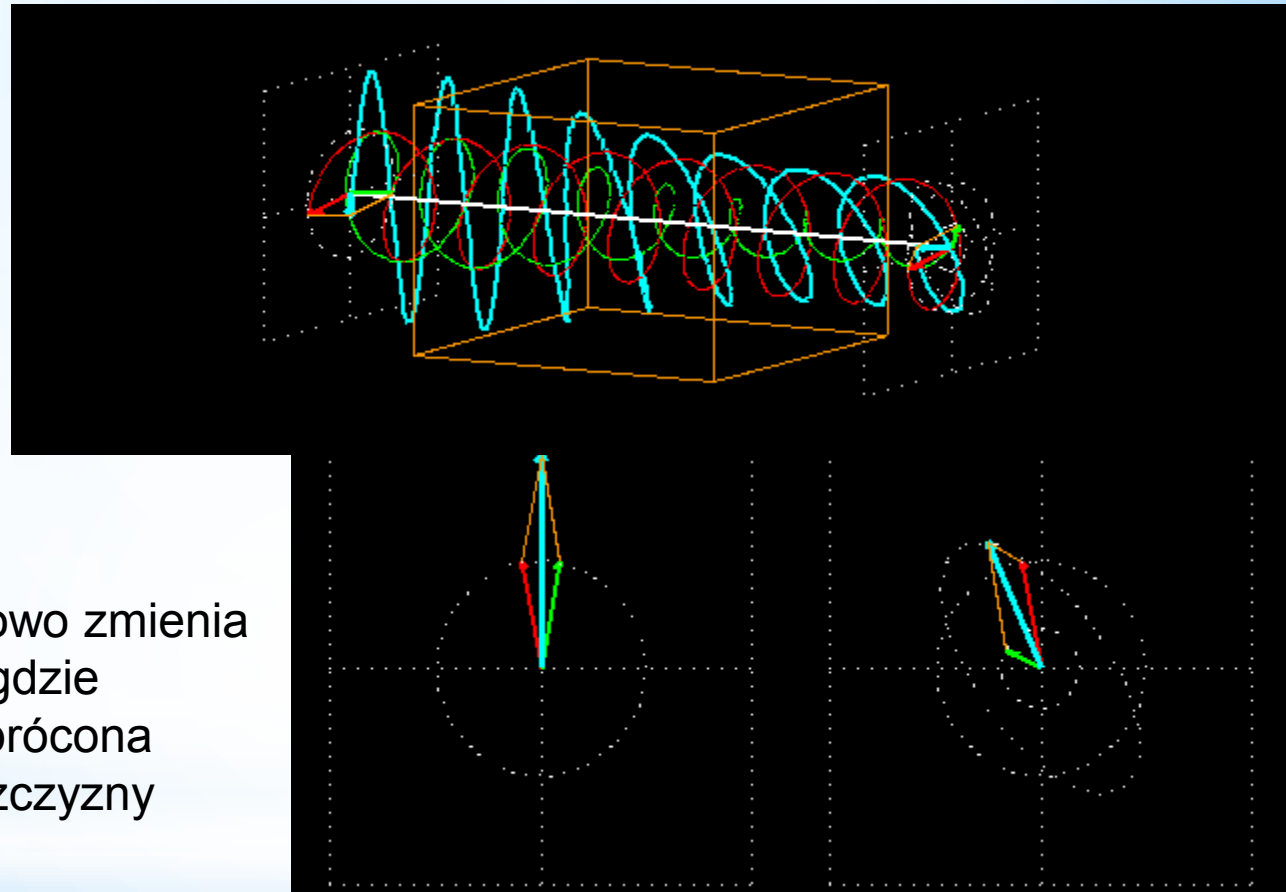
$$E_y = A \sin(2\pi n_R x / \lambda - \omega t + 90^\circ) + A \sin(2\pi n_L x / \lambda - \omega t - 90^\circ)$$

$$E_z = A \sin(2\pi n_R x / \lambda - \omega t) + A \sin(2\pi n_L x / \lambda - \omega t)$$

# Dichroizm i dwójłomność kołowa

Materiał posiadający różny współczynnik ekstynkcji ORAZ załamania wskazuje na światło spolaryzowane kołowo prawo- i lewostronnie:  $\varepsilon_R$  i  $\varepsilon_L$  ORAZ  $n_R$  i  $n_L$

Światło spolaryzowane liniowo zmienia polaryzację na eliptyczną, gdzie główna oś elipsy zostaje obrócona względem oryginalnej płaszczyzny polaryzacji



$$E_y = Ae^{-\varepsilon_R x} \sin(2\pi n_R x / \lambda - \omega t + 90^\circ) + Ae^{-\varepsilon_L x} \sin(2\pi n_L x / \lambda - \omega t - 90^\circ)$$

$$E_z = Ae^{-\varepsilon_R x} \sin(2\pi n_R x / \lambda - \omega t) + Ae^{-\varepsilon_L x} \sin(2\pi n_L x / \lambda - \omega t)$$



# Rozpraszanie światła

**Proces, gdzie promieniowanie EM jest absorbowane i natychmiast reemitowane przez cząstkę lub molekułę – energia może być emitowana w różnych kierunkach**

- Rayleigh
- Mie
- Geometryczne

**Rodzaj rozpraszania jest kontrolowany przez rozmiar długości fali względem wielkości cząstki**

# Rozpraszanie światła

## Niebieskie niebo i czerwony zachód słońca

- Molekuły w atmosferze rozpraszają promienie światła.
- Krótkie długości fali (niebieska, fioletowa) łatwiej się rozpraszają.

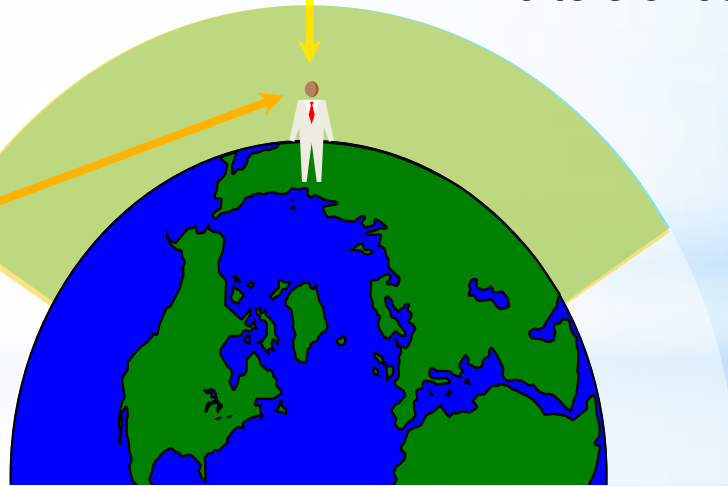
## ZACHÓD SŁOŃCA

- więcej atmosfery
- więcej rozpraszania
- pomarańczowo-czerwone niebo i słońce

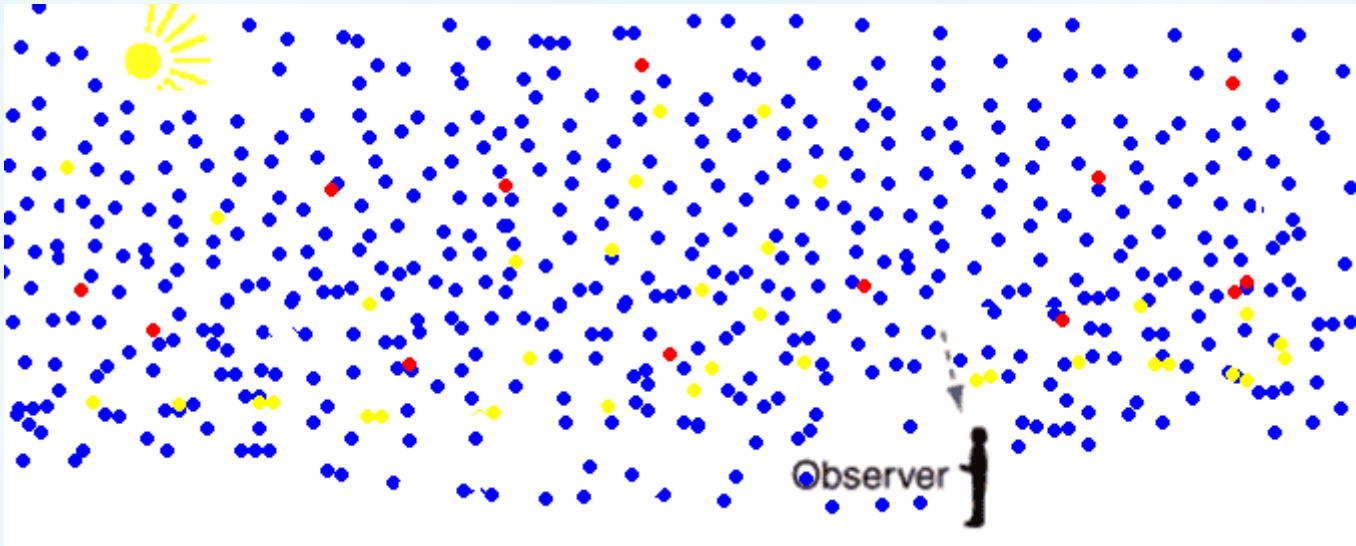


## POŁUDNIE

- mniej atmosfery
- mniej rozpraszania
- niebieskie niebo, żółte słońce



# Rozpraszanie Rayleigha



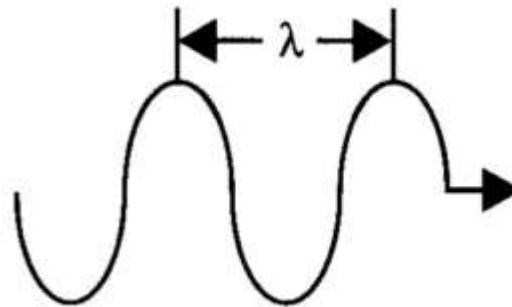
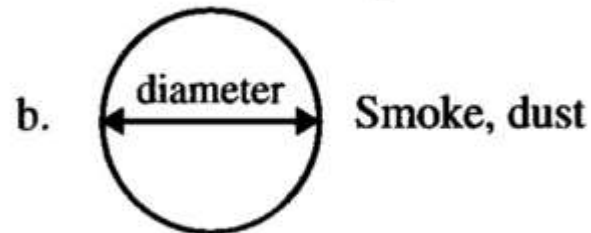
- Długość fali światła jest znacznie większa niż rozpraszanie cząstek
- Światło niebieskie ~4000 Angstromów, rozpraszanie cząstek ~1 Angstroma (1A=10<sup>-10</sup> m)

$$I_{\lambda} = I_{0\lambda} e^{-\frac{x}{\lambda^4}}$$

# Rozpraszanie Mie

- Zachodzi, gdy długość fali  $\cong$  rozmiar cząstek,
- Wyjaśnia rozpraszanie wokół większych kropelek takich jak Korona wokół słońca czy księżyca, Poświata i podobne zjawiska.
- Zachodzi z cząstkami, które są od 0.1 do 10 wielkości długości fali
- Podstawowe rozpraszanie Mie zachodzi na cząstkach kurzu, sadzy z dymu
- Rozpraszanie Mie występuje w dolnej Troposferze

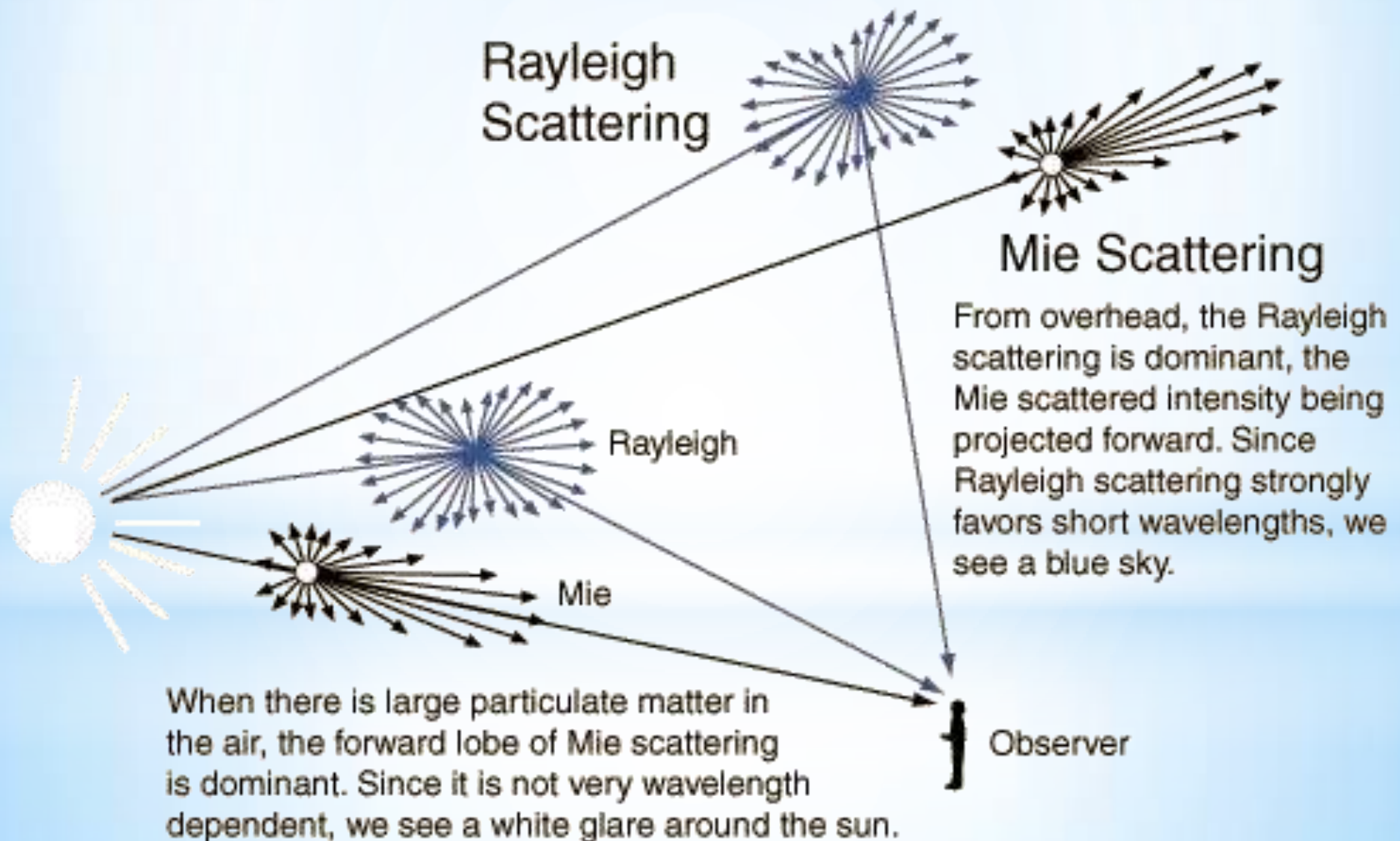
## Mie Scattering



## Non-selective Scattering



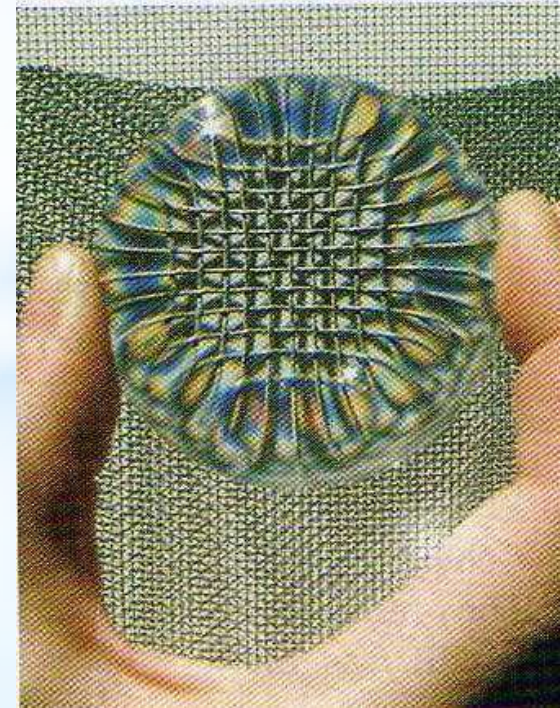
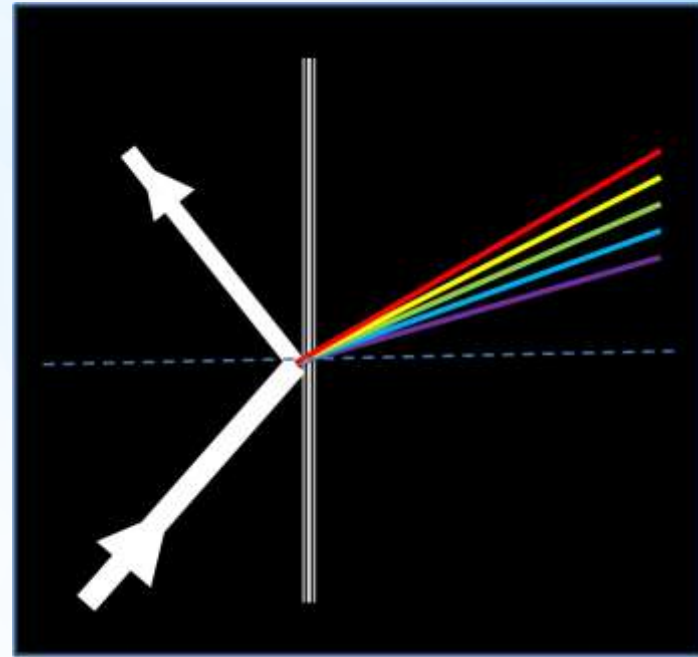
# Rozpraszanie Rayleigha i Mie





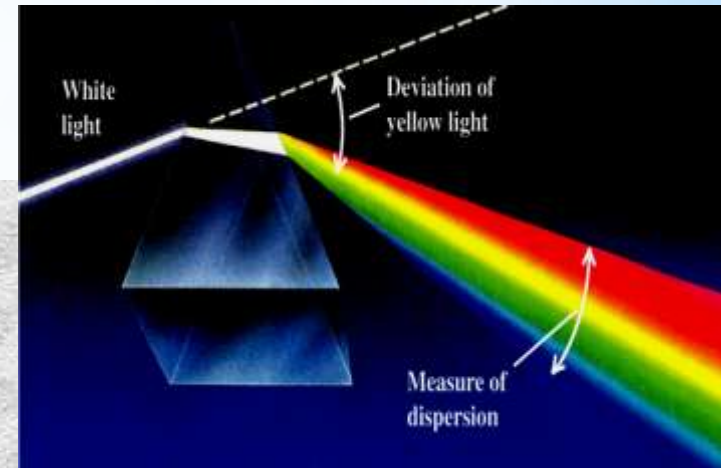
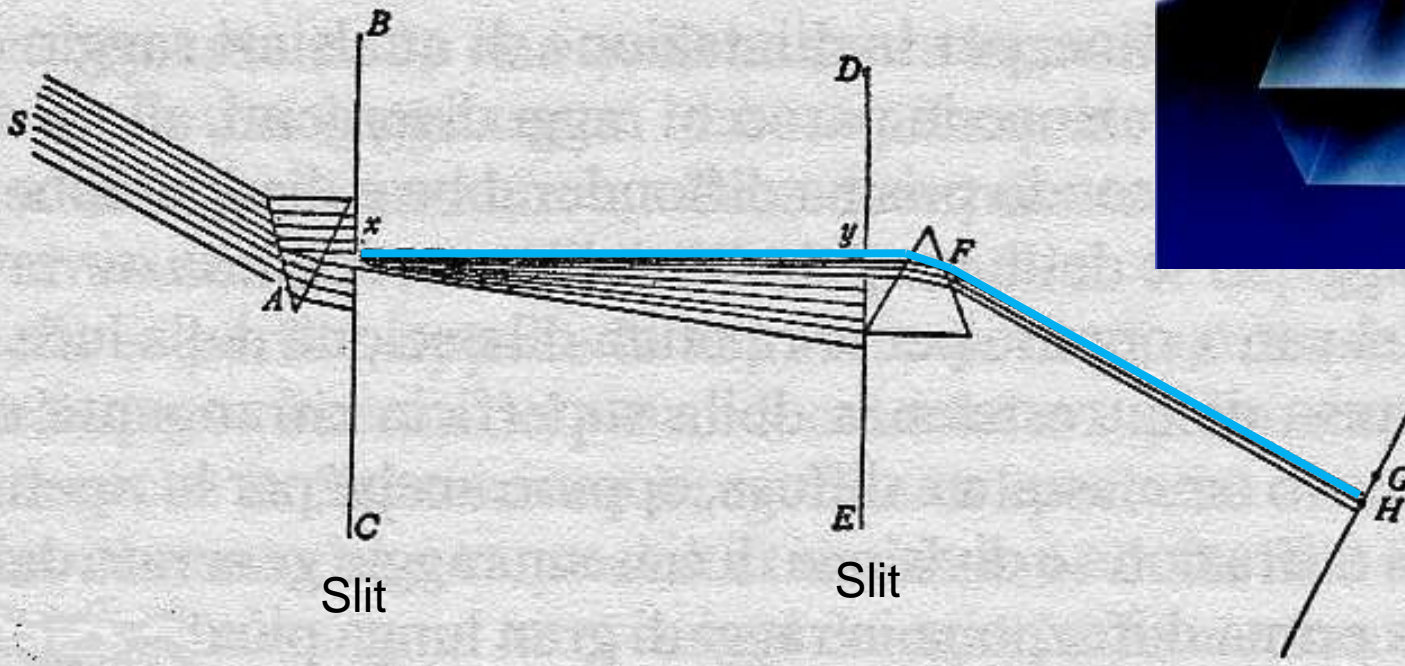
# Dyspersja

- Zależność prędkości fali i współczynnika załamania długości fali nazywa się **dyspersją**
- Współczynnik załamania zależy od częstotliwości światła: im wyższa częstotliwość tym wyższy współczynnik załamania
- Ponieważ światło białe jest mieszaniną częstotliwości, różne długości fal podróżują w różnych kierunkach.
- Dyspersja jest przyczyną aberracji chromatycznej w soczewkach
- Różne kolory skupiają się w różnych punktach
- Jest to powszechny defekt soczewek prostych
- Czasami widać obwódkę kolorów dookoła obrazu widzianego przez soczewkę lub teleskop
- Aberracja chromatyczna może być skorygowana poprzez kombinację dwóch lub więcej soczewek



# Dyspersja

- 1665-1666 – Pierwszy eksperyment Isaaca Newtona z dyspersją, *experimentum crucis*
- Dla tego rozkładu kolorów Newton stworzył nazwę **spektrum**
- Białe światło może być rozproszone na różne długości fal
- Rozproszony promień (monochromatyczny) nie może zostać podzielony na inne długości fali.



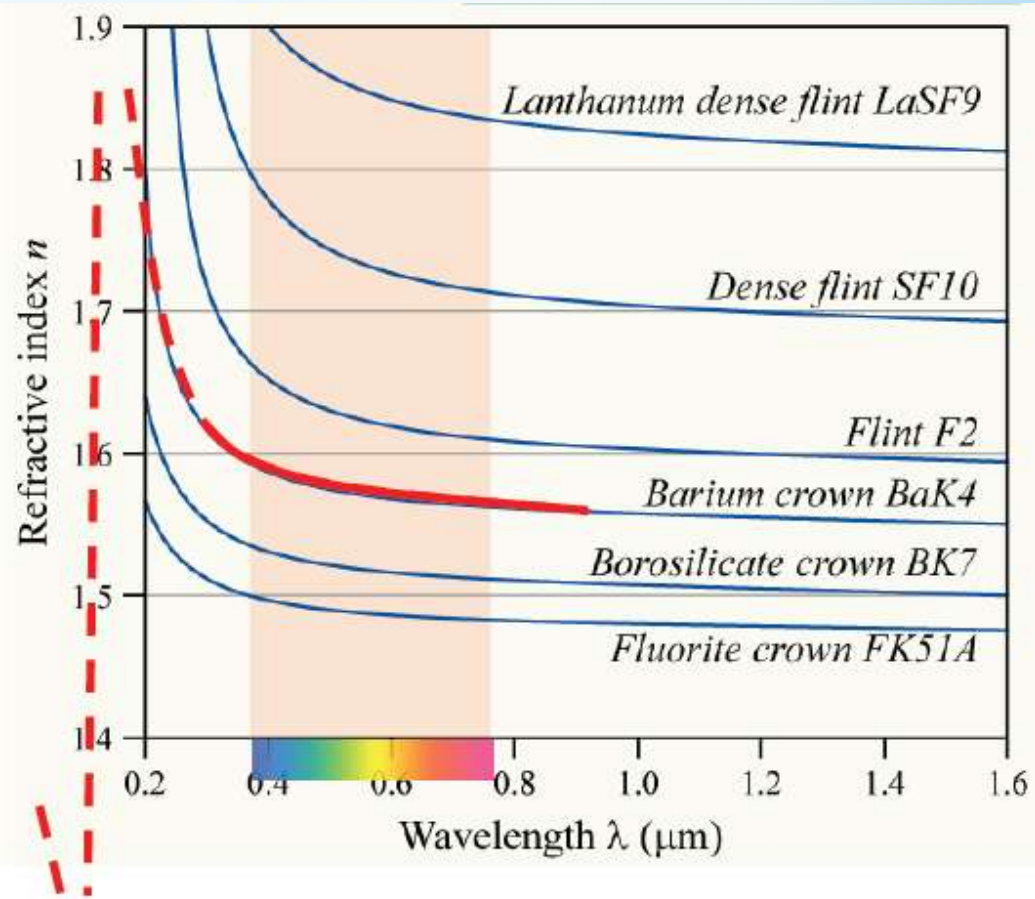
# Dyspersja – wnioski Newtona

- Światło białe jest „Niejednorodną mieszaniną różnych załamanych promieni”
- Kolory spektrum nie mogą być indywidualnie modyfikowane
- Kolory są „*Oryginalnymi i zrośniętymi właściwościami*, które w różnych promieniach są różne. Niektóre promienie są usuwane by wyróżnić tylko kolor czerwony i żaden inny; inne by wyróżnić tylko kolor żółty, inne tylko zielony itd.”.



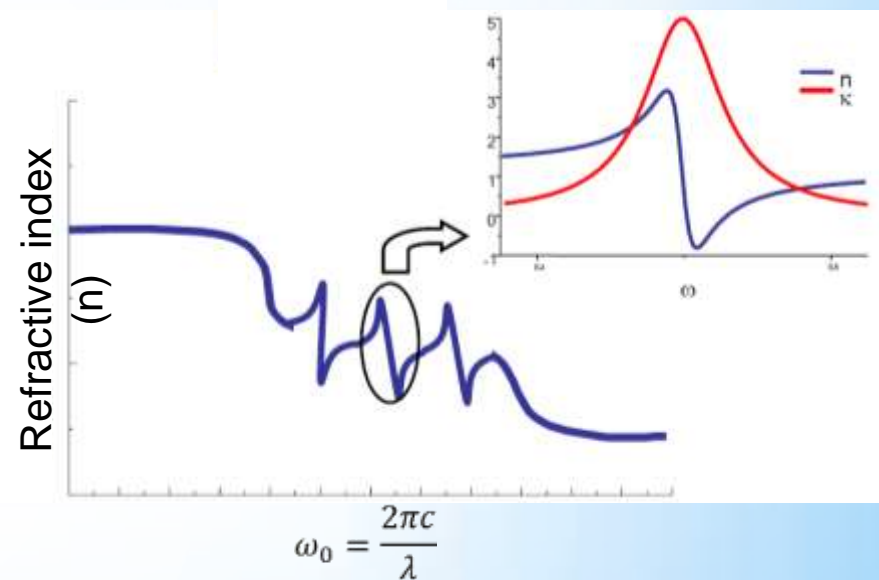
# Dyspersja

- W obecności dyspersji, prędkość falowa jest nie jednoznacznie zdefiniowana, co powoduje wzrost różnicy prędkości fazowej i prędkości grupowej.
- Znany efekt **dyspersji prędkości fazowej** jest zależnością koloru załamania światła, która może być obserwowana w pryzmatach i tęczach.
- Dyspersja może być spowodowana przez geometryczne warunki brzegowe (fallowody, płytka woda) lub przez interakcję fal z ośrodkiem transmitującym.



# Dyspersja

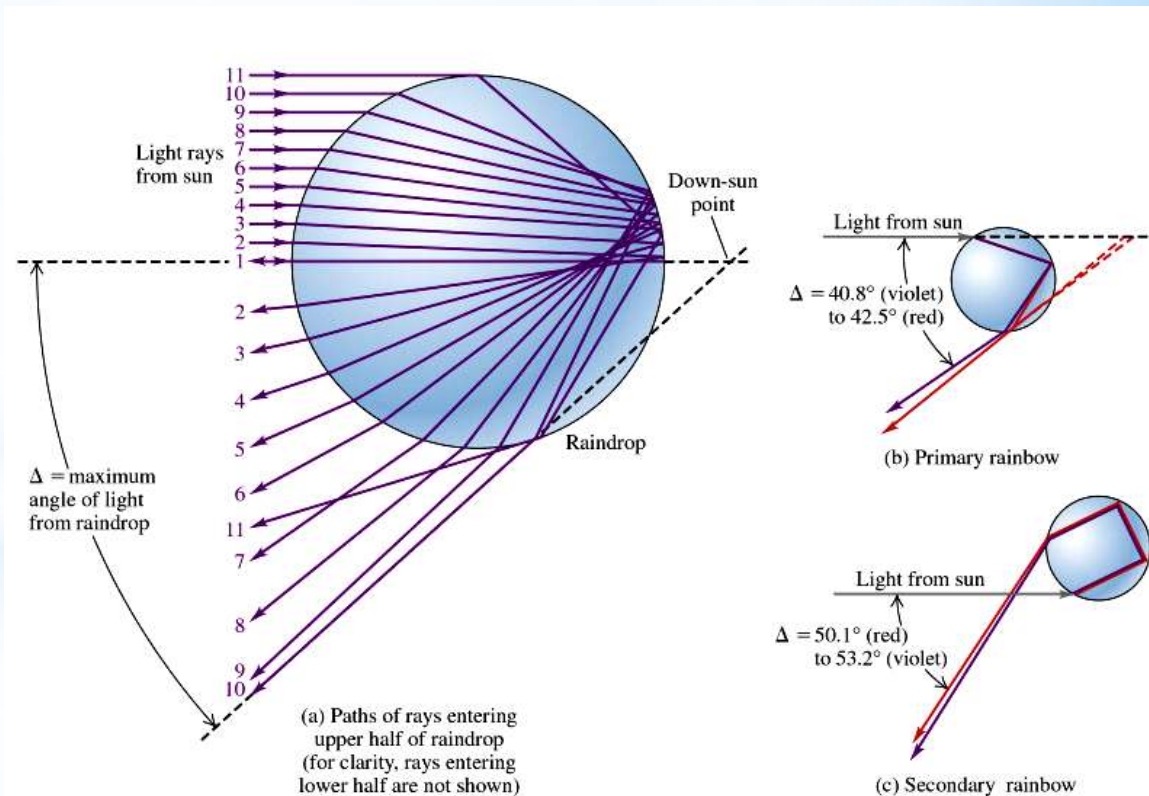
- Jest zjawiskiem w którym prędkość fazowa fali zależy od jej częstotliwości lub alternatywnie kiedy prędkość grupowa zależy od jej częstotliwości.
- Ośrodek posiadający takie właściwości jest nazywany ośrodkiem dyspersyjnym. Dyspersja jest czasami nazywana **dyspersją chromatyczną**, by podkreślić jej zależność od długości fali naturę lub **dyspersją prędkości grupowej (GVD)** by podkreślić rolę prędkości grupowej.
- Dyspersja jest nazywana normalną, kiedy współczynnik załamania spada wraz z długością fali.
- Dla materiałów z selektywną absorpcją współczynnik załamania może rosnąć w wybranych zakresach długości fali.
- Ten rodzaj dyspersji jest nazywany anomalią.





# Dyspersja

- Tęcza jest spowodowana dyspersją światła na kropkach deszczu.
- Kiedy światło słoneczne wchodzi do kropli jest rozdzielane na swoje kolorowe składowe.
- Końcowy kierunek światła jest skierowany przeciwnie do kierunku propagacji,
- Światło fioletowe zmienia kierunek o  $320^\circ$ .
- Światło czerwone zmienia kierunek o  $318^\circ$ .

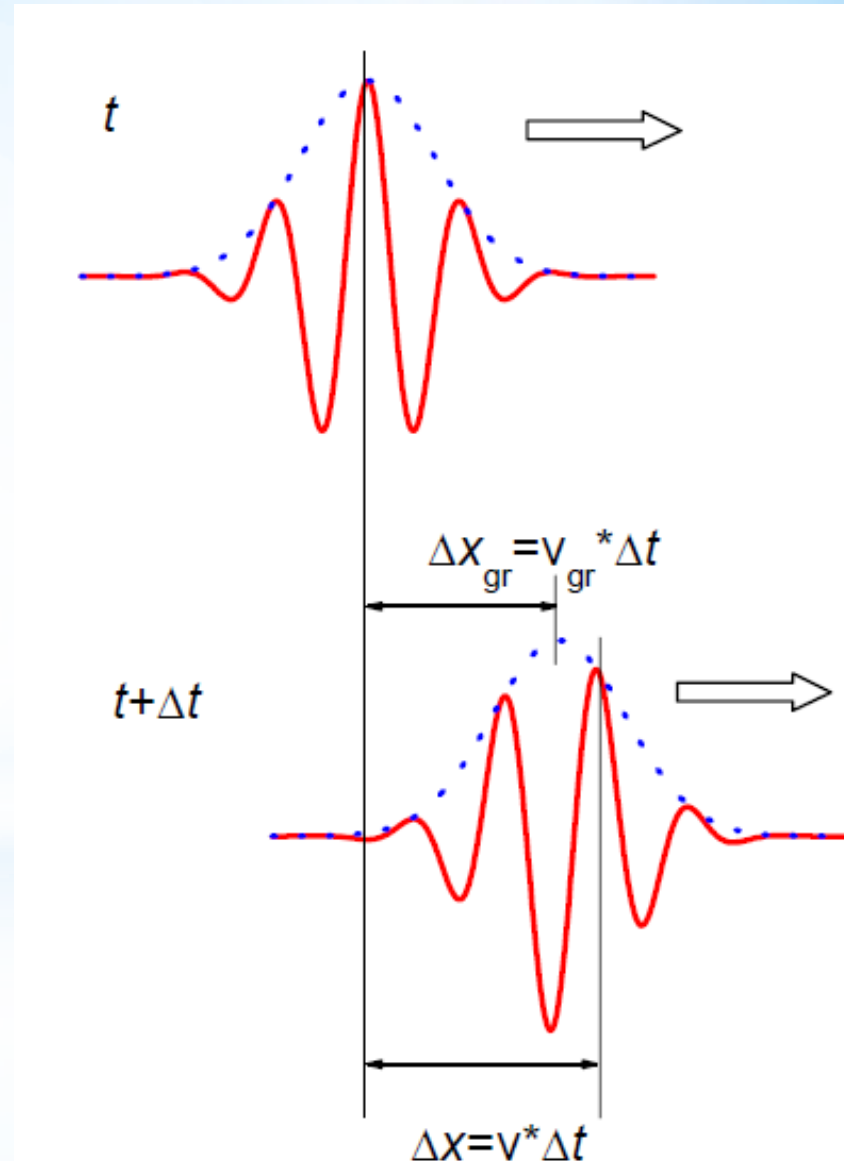


# Prędkość fazowa

- W zakresie maksimum absorpcji, współczynnik załamania może być nawet  $<1$ ,
- to oznacza, że dla  $0 < n < 1$  prędkość fali:

$$v = \frac{c}{n} > c \quad \text{Prędkość fazowa}$$

- Nie ma tu paradoksu.
- Prędkość fazowa jest tempem w jakim propaguje się faza fali.
- To nie oznacza żadnej nadświetlnej informacji ani transferu energii.



# Prędkość grupowa

- **Prędkość grupowa** fali jest prędkością z którą ogólny kształt amplitudy fali – znany jako *modulacja* albo *obwód* fali – propaguje się w przestrzeni.

$$v_{gr} = \frac{1}{(dk/d\omega)} = \frac{c}{n + \omega(dn/d\omega)}$$

- Prędkość grupowa jest często określana jako prędkość z jaką energia lub informacja jest przenoszona wzdłuż fali.
- W większości przypadków jest to zgodne i prędkość grupowa może być określana jako prędkość sygnału fali.
- Jednak jeśli fala podróżuje przez chłonny ośrodek, to ta zasada nie zawsze jest prawdziwa.

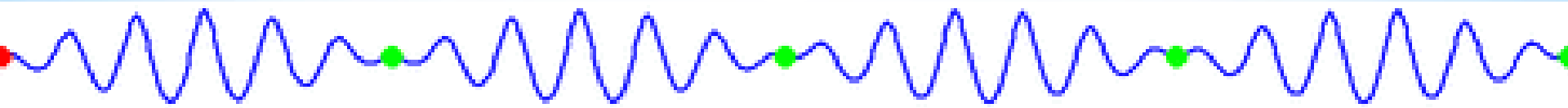
# Prędkość fazowa i grupowa

- Różne eksperymenty potwierdzają, że jest możliwe dla prędkości grupowej impulsów światła laserowego, wysyłanie przez specjalnie spreparowanych materiałów by znacząco przekroczyć prędkość światła w próżni.
- Jednakże, komunikacja nadświatlna nie jest możliwa w tym przypadku, ponieważ prędkość sygnału pozostaje mniejsza niż prędkość światła.
- Jest również możliwe by zredukować prędkość grupową do zera zatrzymując impuls lub posiadać ujemną prędkość grupową, co sprawia, że impuls wygląda jakby propagował się do tyłu.
- Jednakże we wszystkich tych przypadkach, fotony kontynuują propagację ze spodziewana prędkością światła w ośrodku.
  
- 1999 Rowland Institute for Science, Cambridge,
- 2000 NEC Research Institute, Princeton,

Prędkość grupowa (równa prędkości elektronów) nie powinna być mylona z prędkością fazową (równą pomnożonej wartości częstotliwości elektronów z ich długością fali).

# Prędkość fazowa i grupowa

- W ośrodku dyspersyjnym prędkość fazowa zależy od częstotliwości i nie koniecznie jest taka sama jak prędkość grupowa fali, która określa szybkość z jaką propagują się zmiany amplitudy (znanej jako *obwiednia* fali).
- W pewnych określonych przypadkach prędkość fazowa ma znak przeciwny do prędkości grupowej.

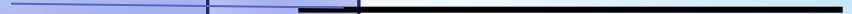
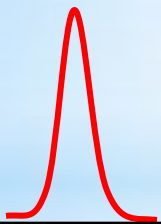


- Przemieszcza się z prędkością fazową
- Przemieszcza się z prędkością grupową



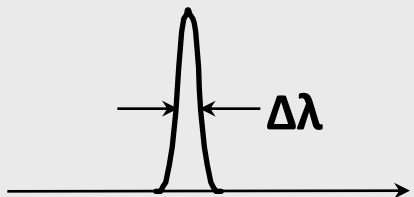
# Ośrodek dyspersyjny

- W takim ośrodku pojedynczy impuls światła będzie się rozpraszał (dyspersja)
- Obecność dyspersji powoduje ograniczenia w transmisji sygnału (np. telekomunikacja światłowodowa)
- Czy istnieją takie ośrodki w których sygnał nie będzie zmieniał swojego kształtu?



# Ośrodek dyspersyjny

Widmo optyczne



Długość światła

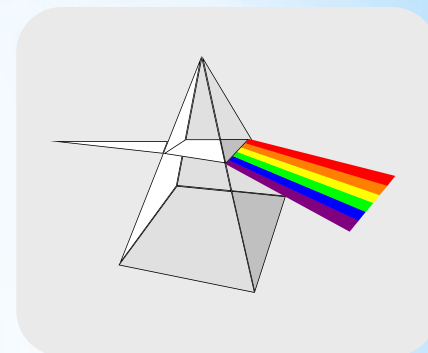
Rozszerzanie się widma



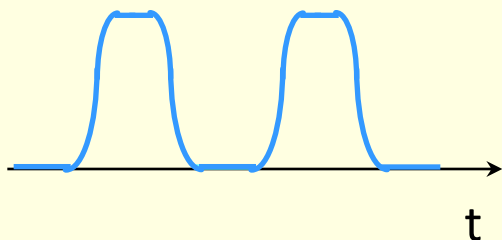
Różnice w prędkościach grupowych



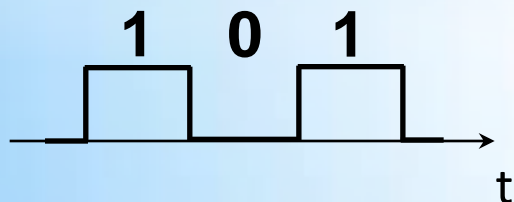
Rozszerzanie się impulsu  
(zniekształcenie sygnału)



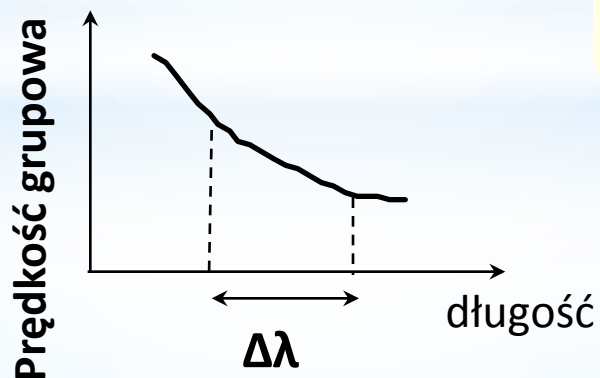
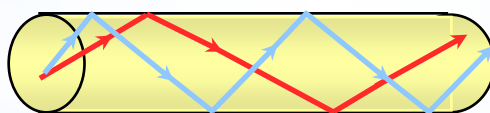
Sygnał transmitowany



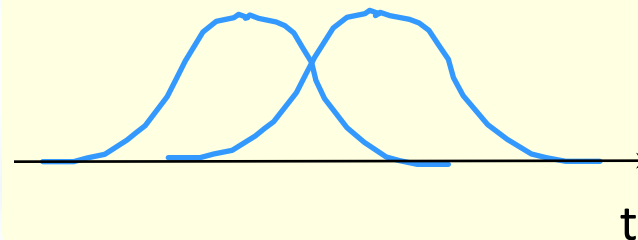
Sygnał oryginalny



Światłowód



Sygnał odebrany

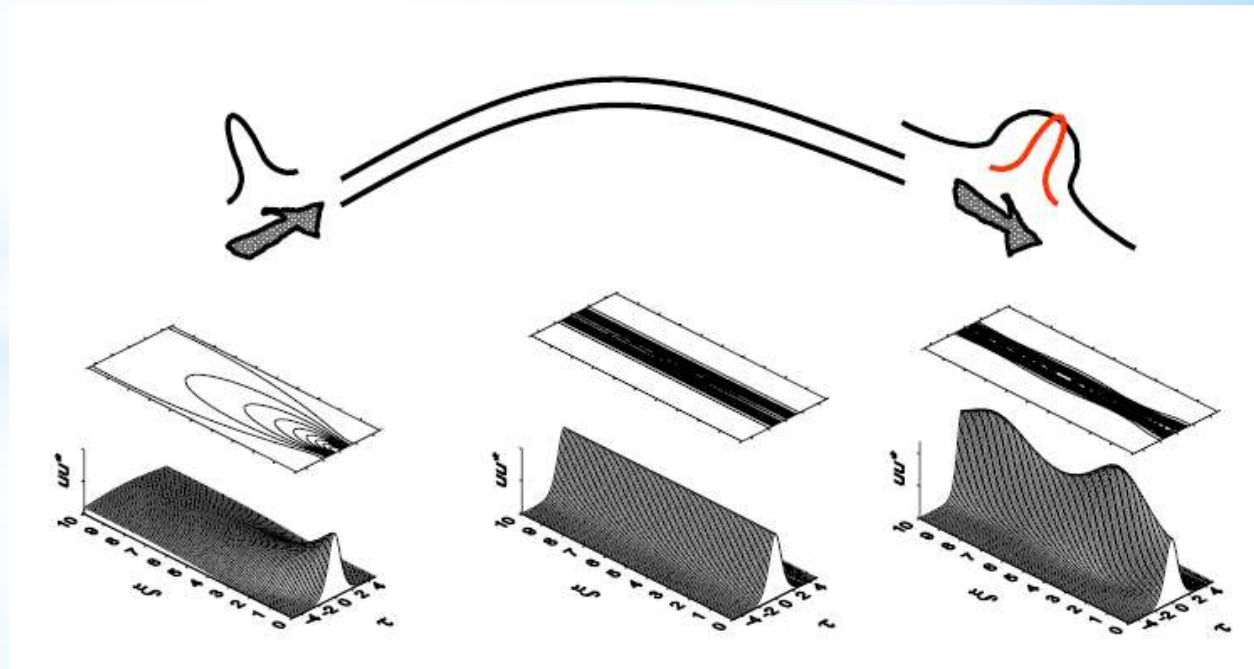


Sygnał odebrany

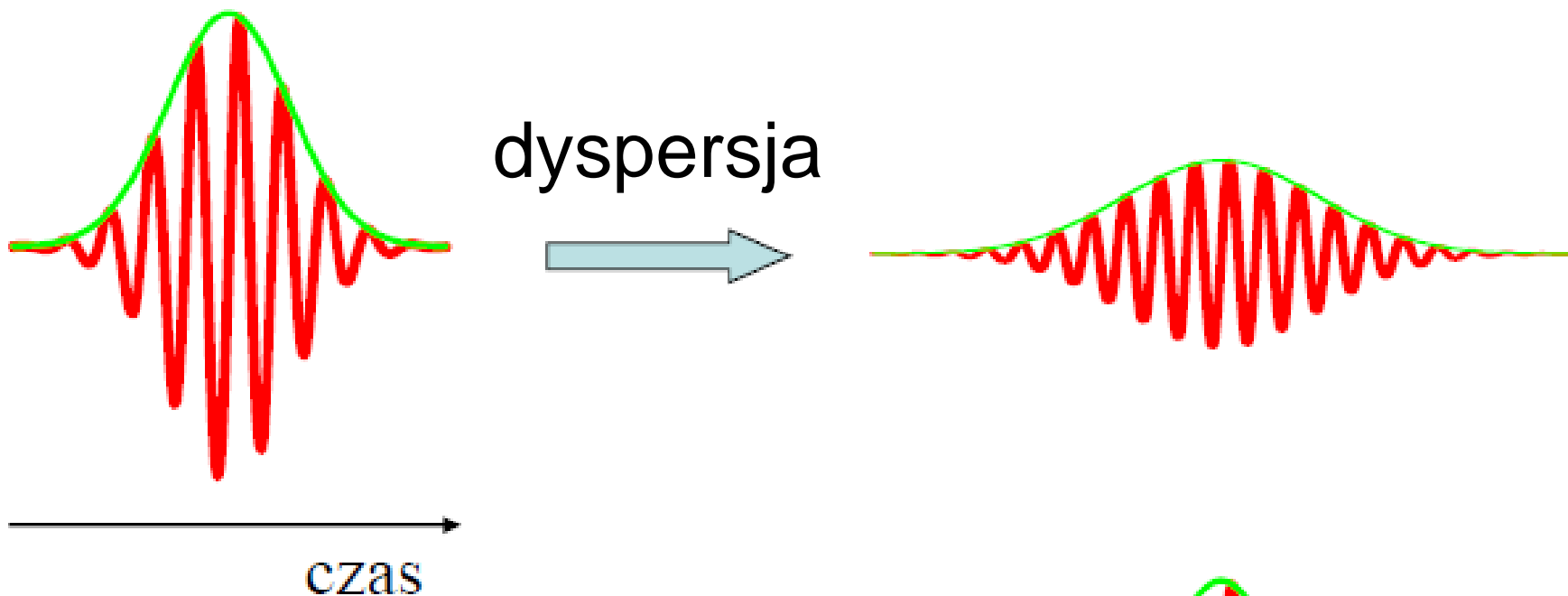


# Soliton

- **Soliton** jest samowzmacniającą się pojedynczą falą (paczką falową lub impulsem), która zachowuje swój kształt podczas przemieszczania się ze stałą prędkością.
- Solitony są spowodowane przez usunięcie nieliniowych i dyspersyjnych efektów w ośrodku. (nazwa „efekty dyspersyjne” odnosi się do właściwości konkretnych systemów, gdzie prędkość fali zmienia się zależnie do częstotliwości.)
- Pojedynczy soliton zachowuje się jak cząstka.
- Przemieszcza się ze stałym kształtem i prędkością.



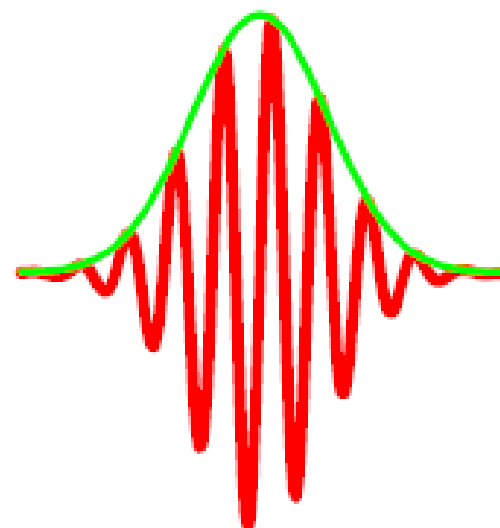
# Soliton



dyspersja + nieliniowość

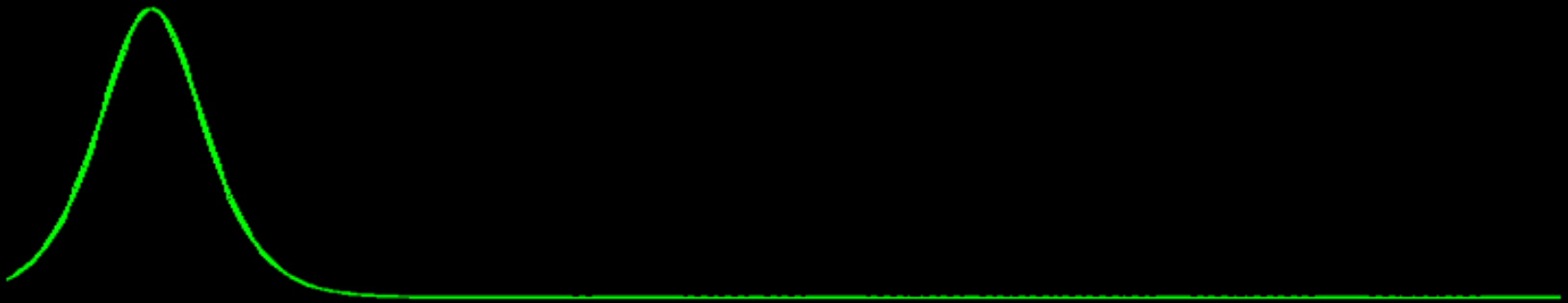


$$n = n_0 + n_2 I$$



# Soliton

- 3 właściwości solitonu:
  - Mają stały kształt;
  - Są zlokalizowane w obrębie regionu;
  - Mogą oddziaływać z innymi solitonami (po zderzeniu się dwóch solitonów ich kształt pozostaje niezmienny, zmienia się tylko faza).

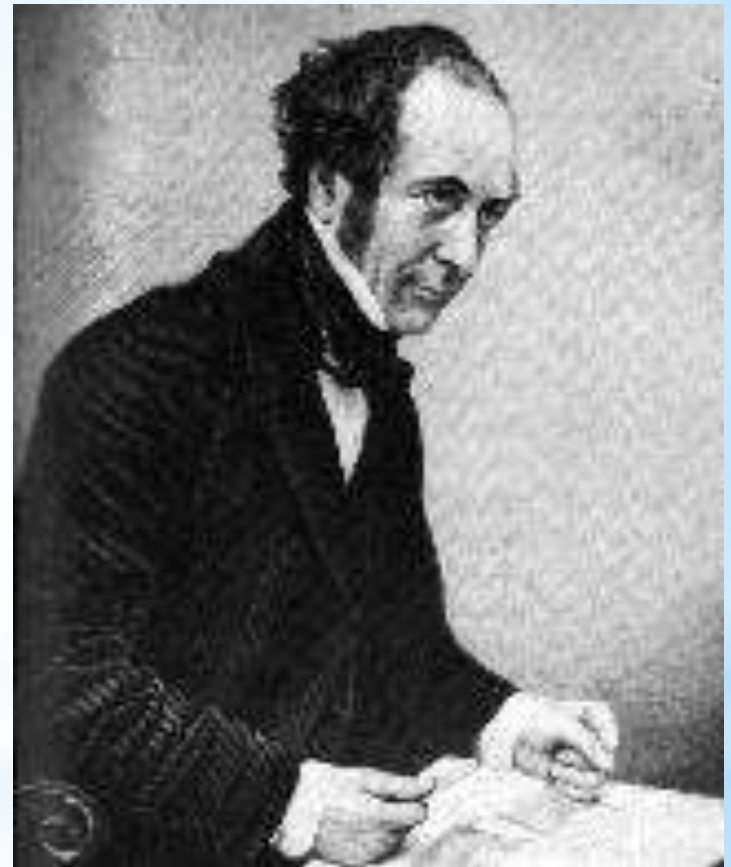




# John Scott-Russell i jego Soliton

- Pierwszy soliton został po raz pierwszy opisany przez Johna Scotta Russella (1808–1882)
- Obserwował soliton na kanale wodnym w 1834 r. niedaleko Edynburga.
- Odtworzył taki soliton w podłużnym zbiorniku i nazwał go „falą translacyjną”.
- Duża fala translacji która się nie rozprasza.

“Najszcześniejszy dzień mojego życia”

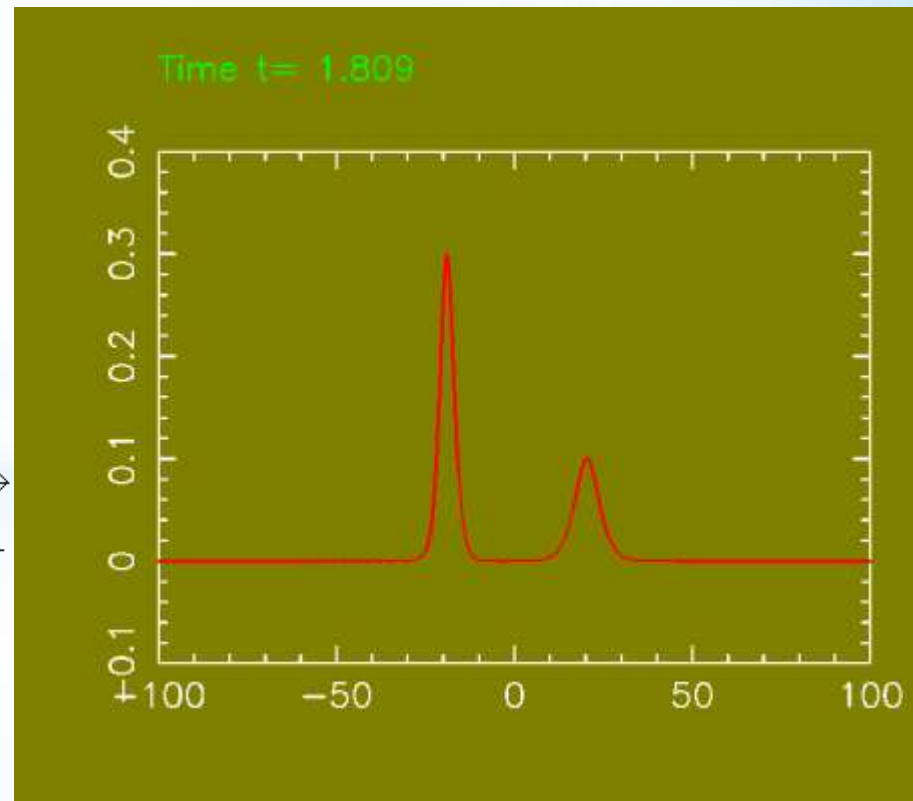
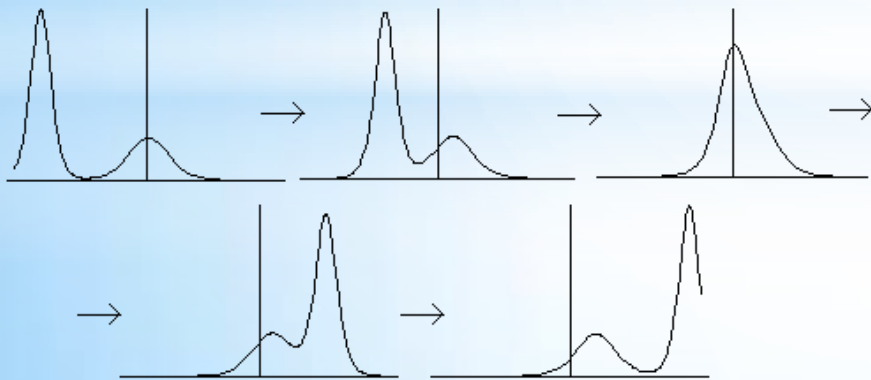


# John Scott-Russell's Soliton



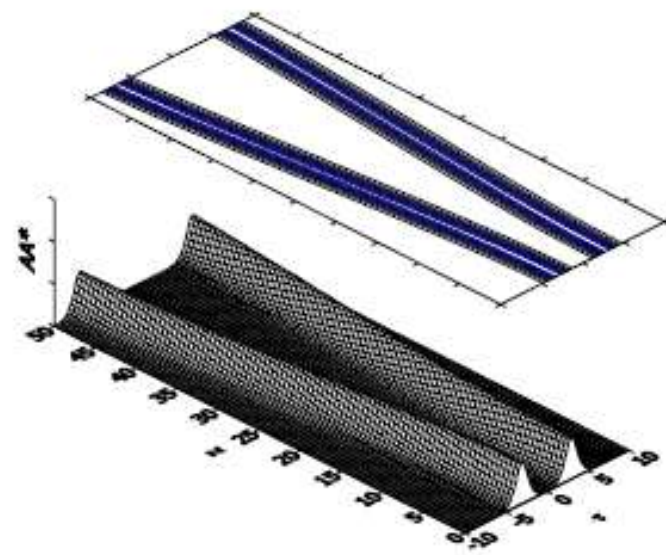
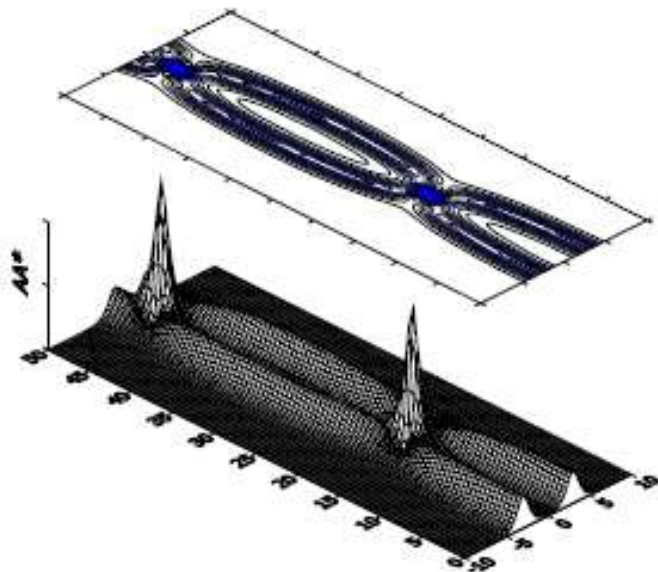
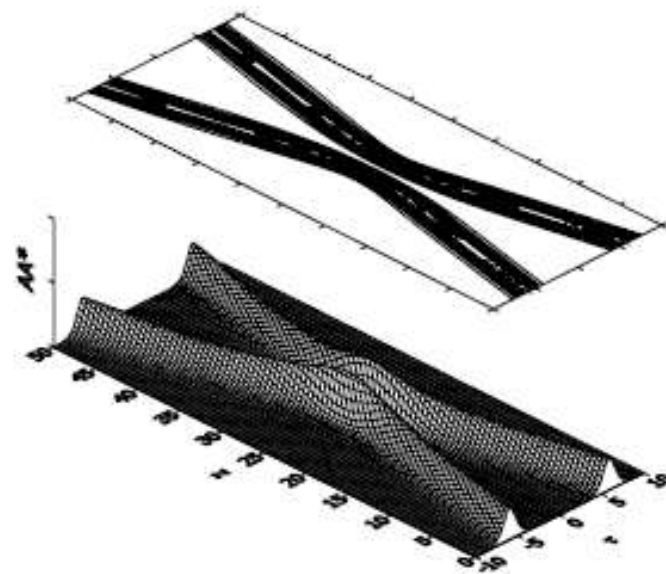
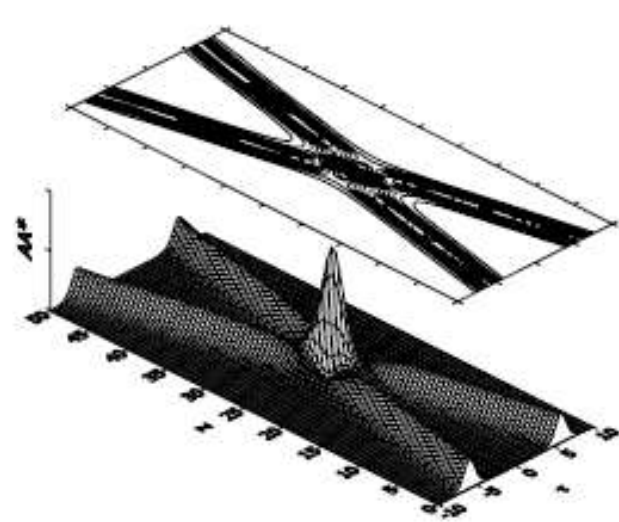
# Oddziaływanie solitonów

- Kiedy dwa solitony zbliżają się do siebie, zaczynają stopniowo się degradować.
- W końcu łączą się w jeden impuls.
- Następnie taki impuls z powrotem rozdziela się na dwie fale solitonowe o takim samym kształcie i prędkości jak przed „kolizją”.





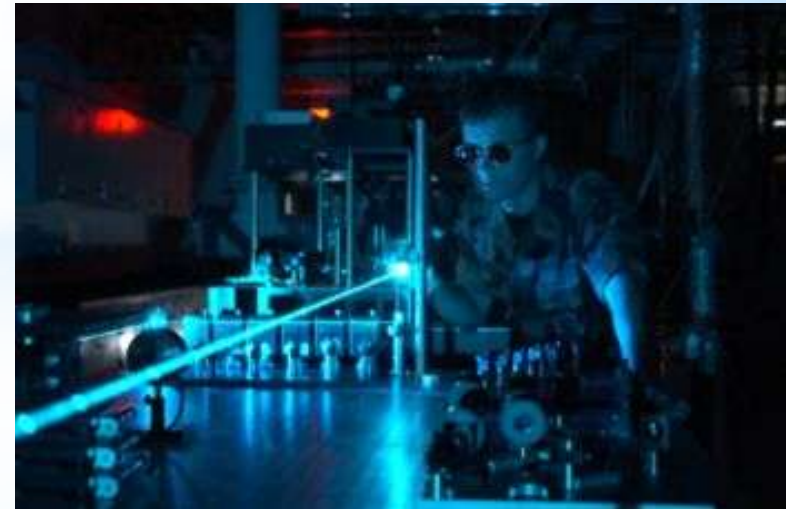
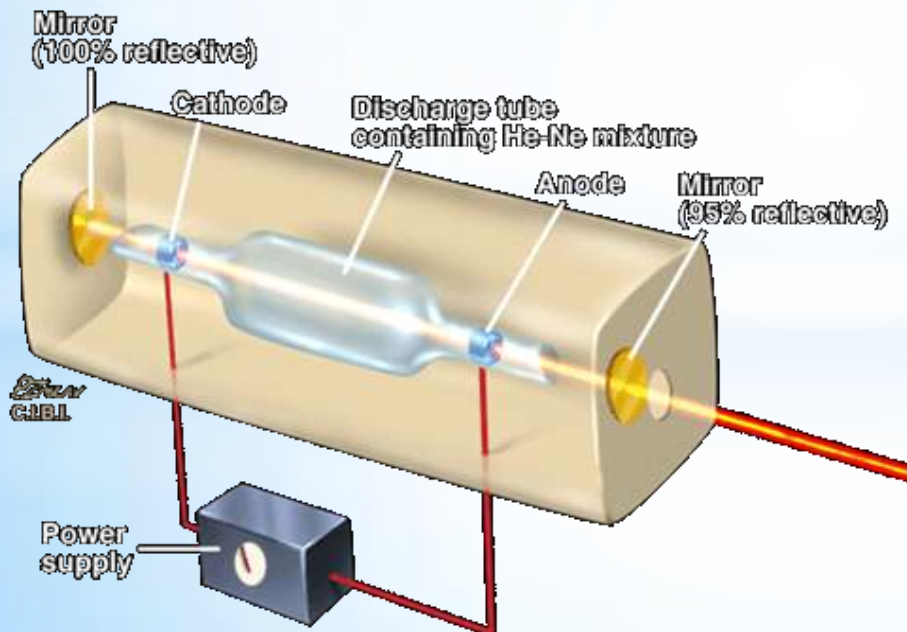
# Oddziaływanie solitonów



# Laser

- **LASER** to akronim od *Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation*
- Produkują wąskie wiązki intensywnego światła
- Często mają czyste kolory
- Są niebezpieczne dla oczu

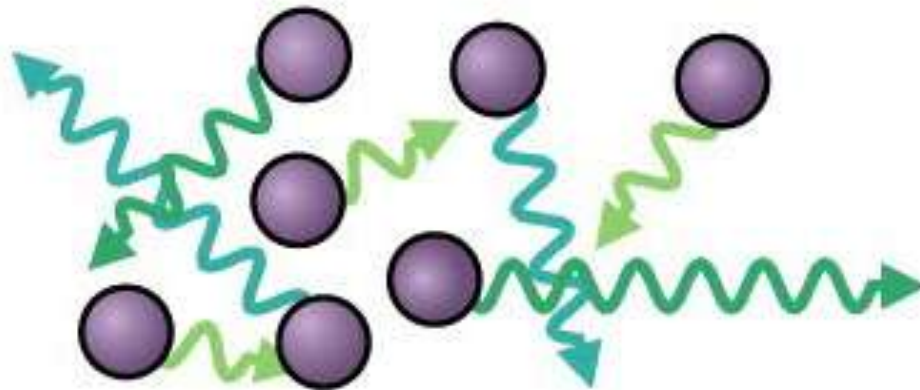
## The He-Ne Laser





# Emisja spontaniczna

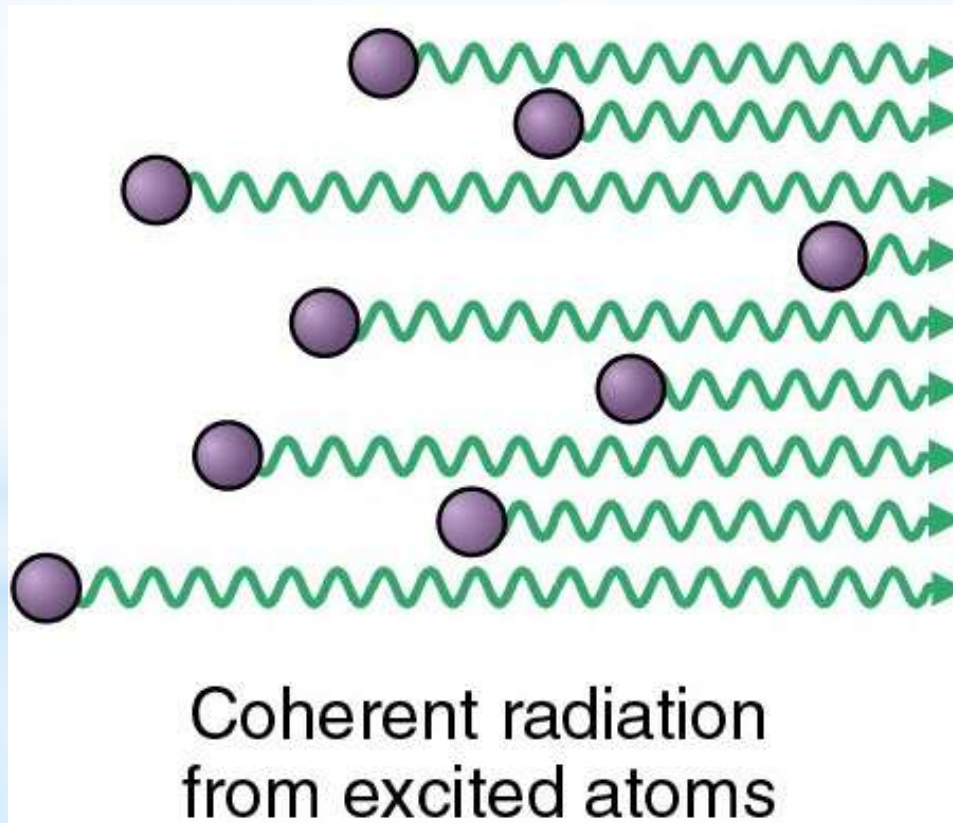
- Wzbudzone atomy normalnie spontanicznie emitują światło
- Fotony są nieskorelowane i niezależne
- Niekoherentne światło



Incoherent radiation  
from excited atoms

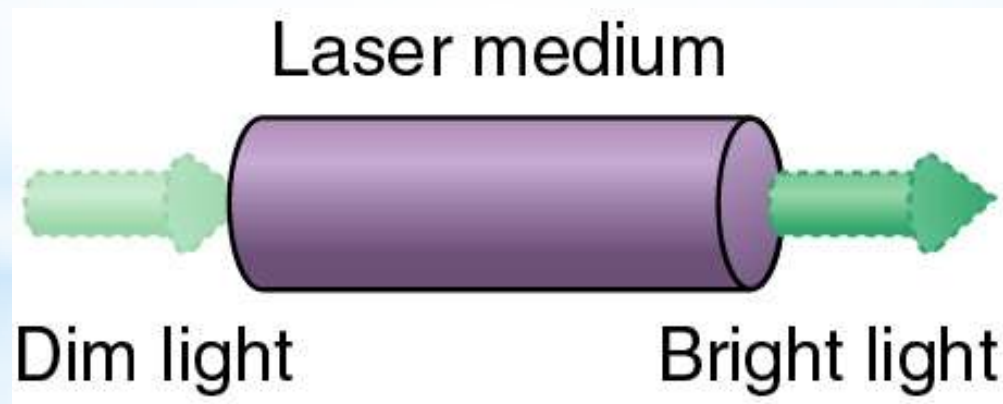
# Emisja stymulowana

- Wzbudzone atomy mogą być stymulowane do duplikowania przechodzącego światła
- Fotony są skorelowane i identyczne
- Skorelowane światło



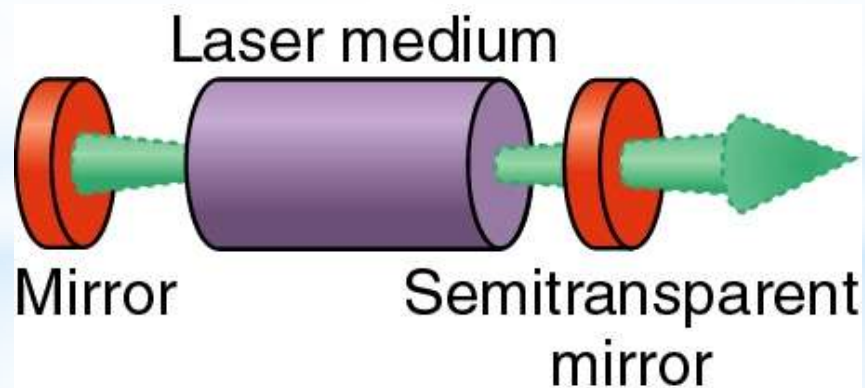
# Wzmocnienie lasera

- Emisja stymulowana może wzmacniać światło
- Ośrodek laserowy zawiera wzbudzone systemy atomopodobne
- Fotony muszą mieć odpowiednią długość fali, polaryzację i orientację, by mogły zostać zduplikowane
- Duplikacja jest doskonała; fotony są klonami



# Oscylacje lasera

- Ośrodek laserowy w rezonatorze generuje oscylacje
- Spontaniczny foton jest duplikowany w kółko
- Zduplikowane fotony przechodzą z półprzepuszczalnego lustra
- Fotony z oscylatora są identyczne



# Właściwości światła laserowego

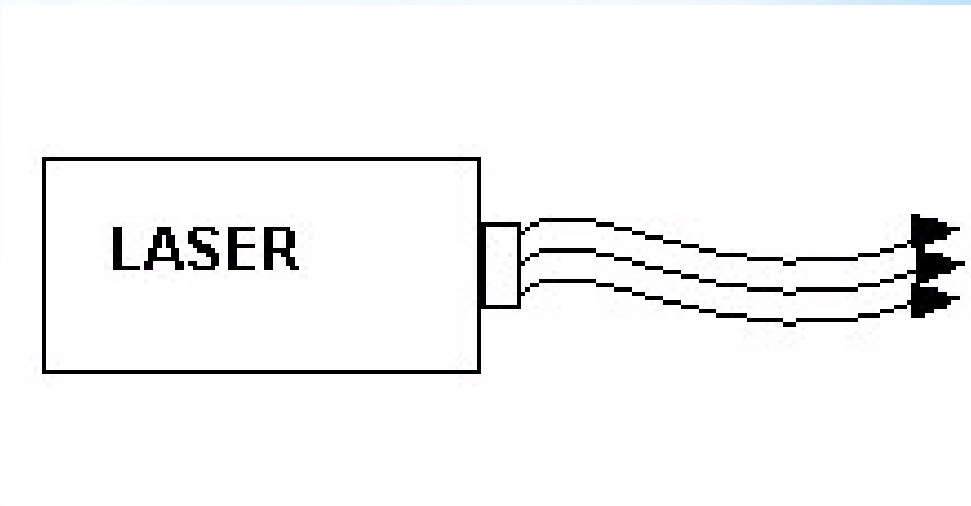
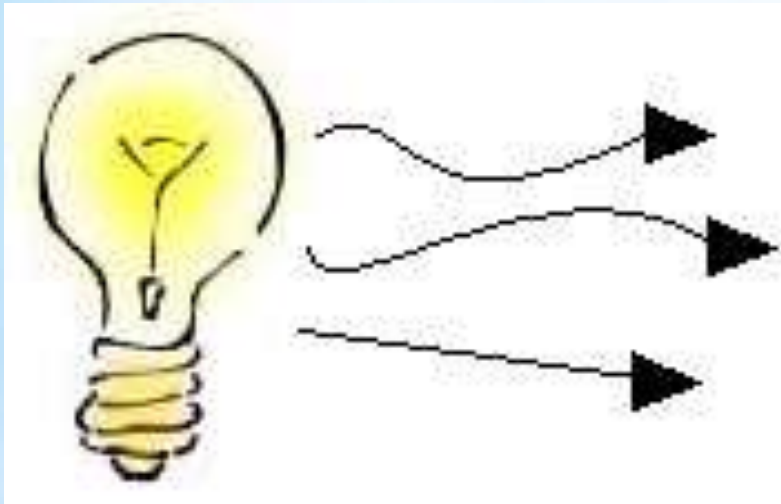
- Koherentne - identyczne fotony
- Kontrolowana długość fali/częstotliwość - wyraźne kolory
- Kontrolowana struktura przestrzenna - wąska wiązka
- Kontrolowana struktura czasowej - krótkie impulsy
- Składowanie i odzyskiwanie energii - silne impulsy
- Ogromne efekty interferencyjne
- Pomijając powyższe aspekty, światło lasera to po prostu światło



# Rodzaje laserów

- Gazowy (HeNe, CO<sub>2</sub>, Argon, Krypton)
  - Zasilany elektrycznością
- W stanie stałym (Ruby, Nd:YAG, Ti:Sapphire, Diode)
  - Zasilany elektrycznością lub światłem
- Ciekłe (Dye, Jello)
  - Zasilane światłem
- Chemiczne (HF)
- Nuklearne

# Światło jarzeniowe vs. laser



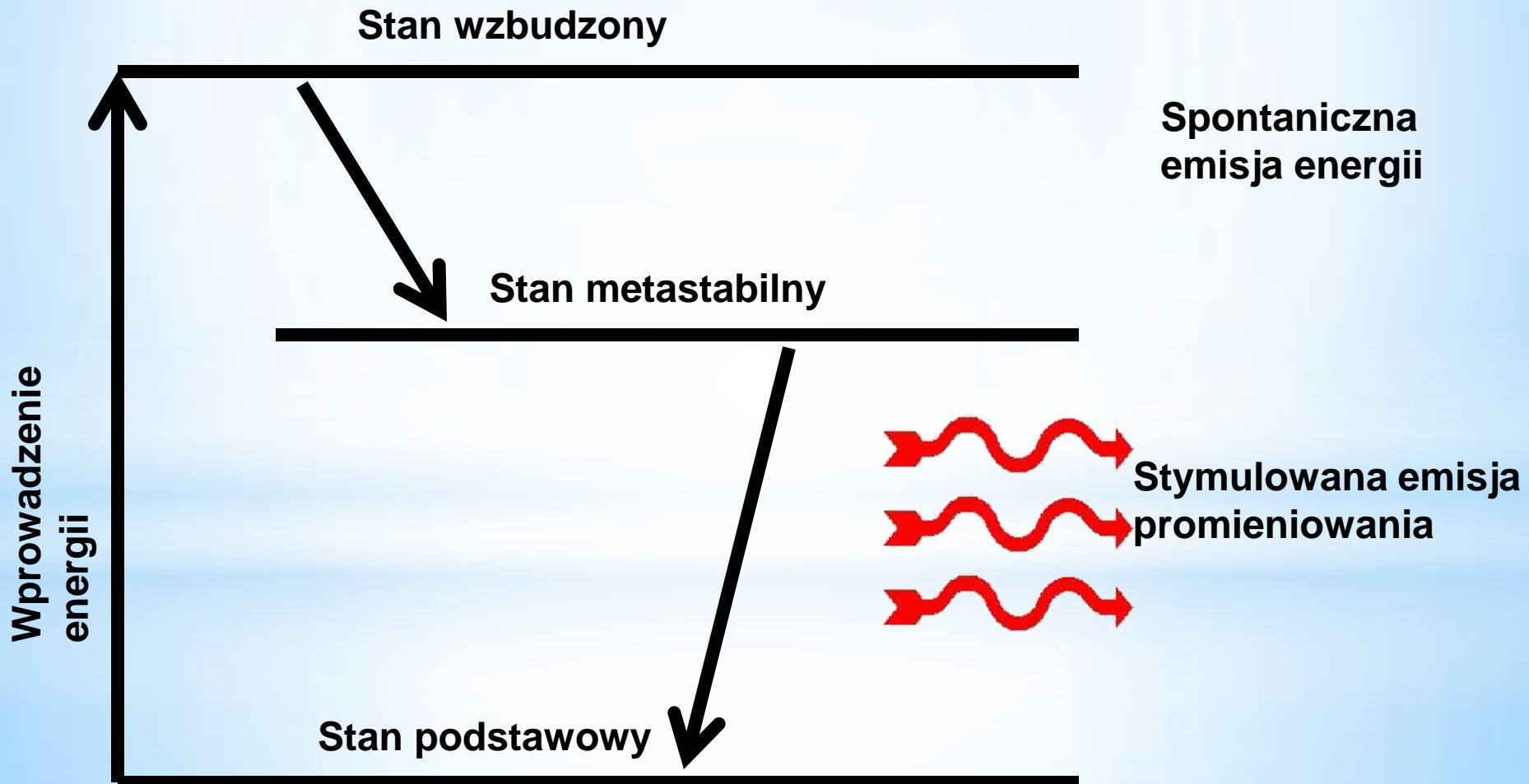
- Wiele długości fali
- Wielokierunkowe
- Niekoherentne

- Monochromatyczne
- Kierunkowe
- Koherentne

# Akcja laserowa

1. Energia jest przykładana do ośrodka, podnosząc elektrony do niestabilnego poziomu energii.
2. Te atomy spontanicznie cofają się do metastabilnego stanu o dłuższym czasie życia i niższej energii.
3. Inwersja populacji jest osiągnięta, gdy większość atomów osiągnie stan metastabilny.
4. Akcja laserowa zachodzi, gdy elektron spontanicznie powraca do stanu podstawowego i produkuje foton.
5. Jeśli energia z tego fotonu posiada dokładną długość fali, to będzie stymulowała produkcję następnego fotonu o tej samej długości fali i w rezultacie efekt kaskadowy.
6. Wysoce odbijające lustro i częściowo odbijające lustro przedłużają tą reakcję poprzez odbijanie fotonów z powrotem do ośrodka wzdłuż osi lasera.
7. Częściowo odbijające lustro pozwala na transmisję małej ilości promieniowania koherentnego, które będzie obserwowane jako „wiązka”.
8. Promieniowanie laserowe będzie trwało tak długo jak długo energia będzie przykładana do ośrodka laserowego.

# Akcja laserowa

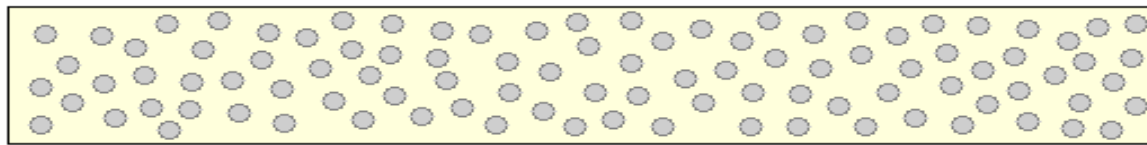


**HR**  
High Reflector  
(Totally Reflecting)

Laser Resonator consists of Lasing Medium (gas, liquid, or solid) between HR and OC Mirrors.

**OC**  
Output Coupler  
(Partially Reflecting)

1

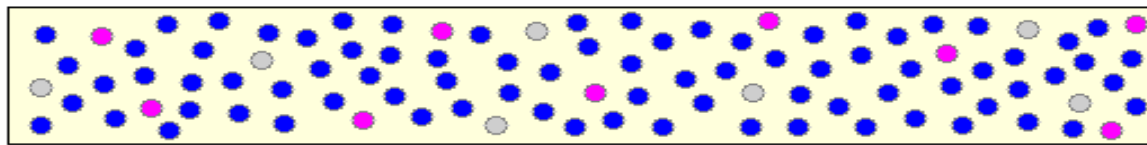


Lasing Medium at Ground State

Pump Energy (Electrical, Optical, Chemical, etc.)

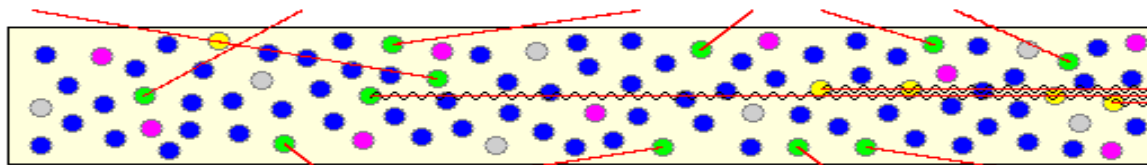


2



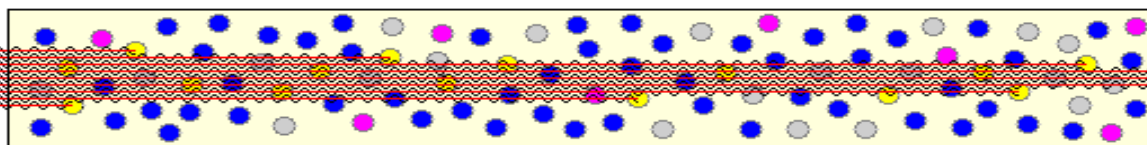
Population Inversion

3



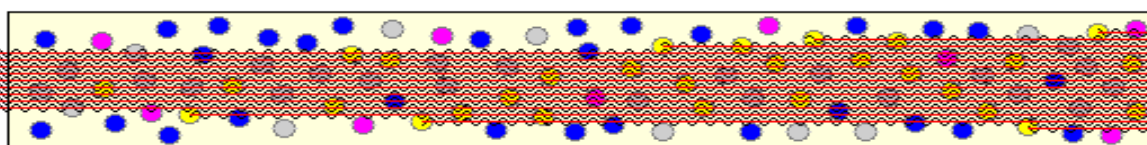
Spontaneous Emission, Start of Stimulated Emission

4



Stimulated Emission Building Up

5



Full Stimulated Emission, Coherent Laser Beam Generated

Legend:

- Ground State
- Energy Level 1
- Energy Level 2
- Spontaneous Emission
- Stimulated Emission

The ● are atoms, ions, or molecules depending on lasing medium.

Laser Beam

## Basic Laser Operation

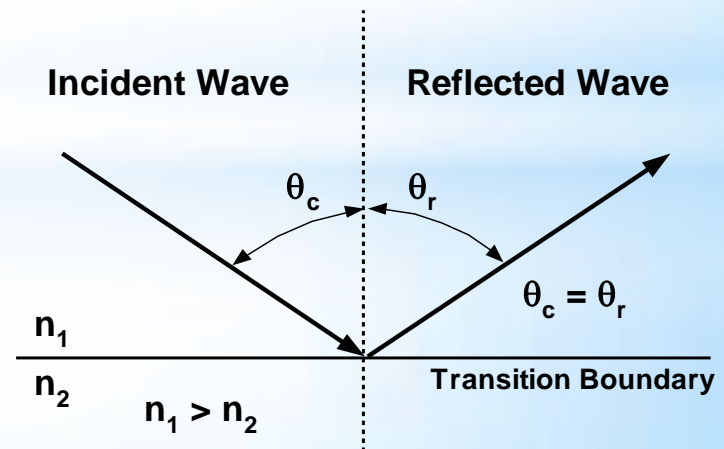


# Światłowody – Całkowite wewnętrzne odbicie

- Poza pewnym maksymalnym kątem padania, promień światła nie jest w stanie przekroczyć granicy dwóch materiałów i promień zostaje całkowicie odbity.
- Kiedy kąt padania przekracza swoją maksymalną wartość lub Kąt Graniczny, następuje Całkowite Wewnętrzne Odbicie.
- Całkowite wewnętrzne Odbicie jest własnością, która umożliwia komunikację światłowodową.

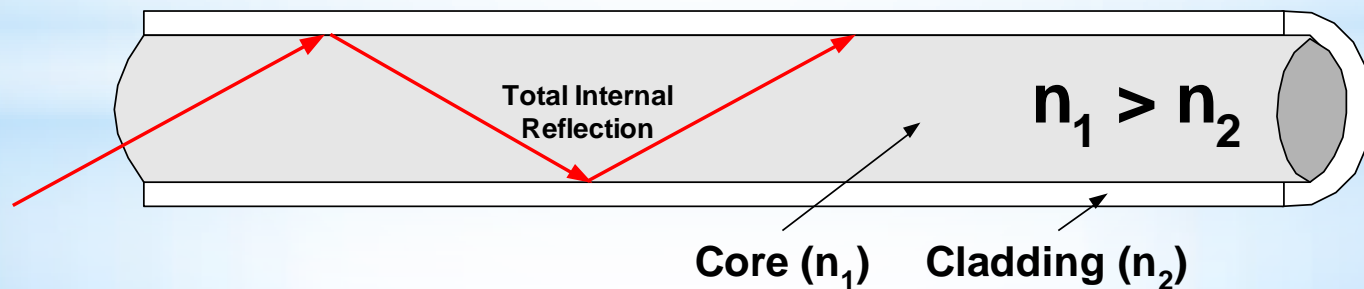
## Kąt graniczny

$$\sin \theta_C = \frac{n_2}{n_1}$$

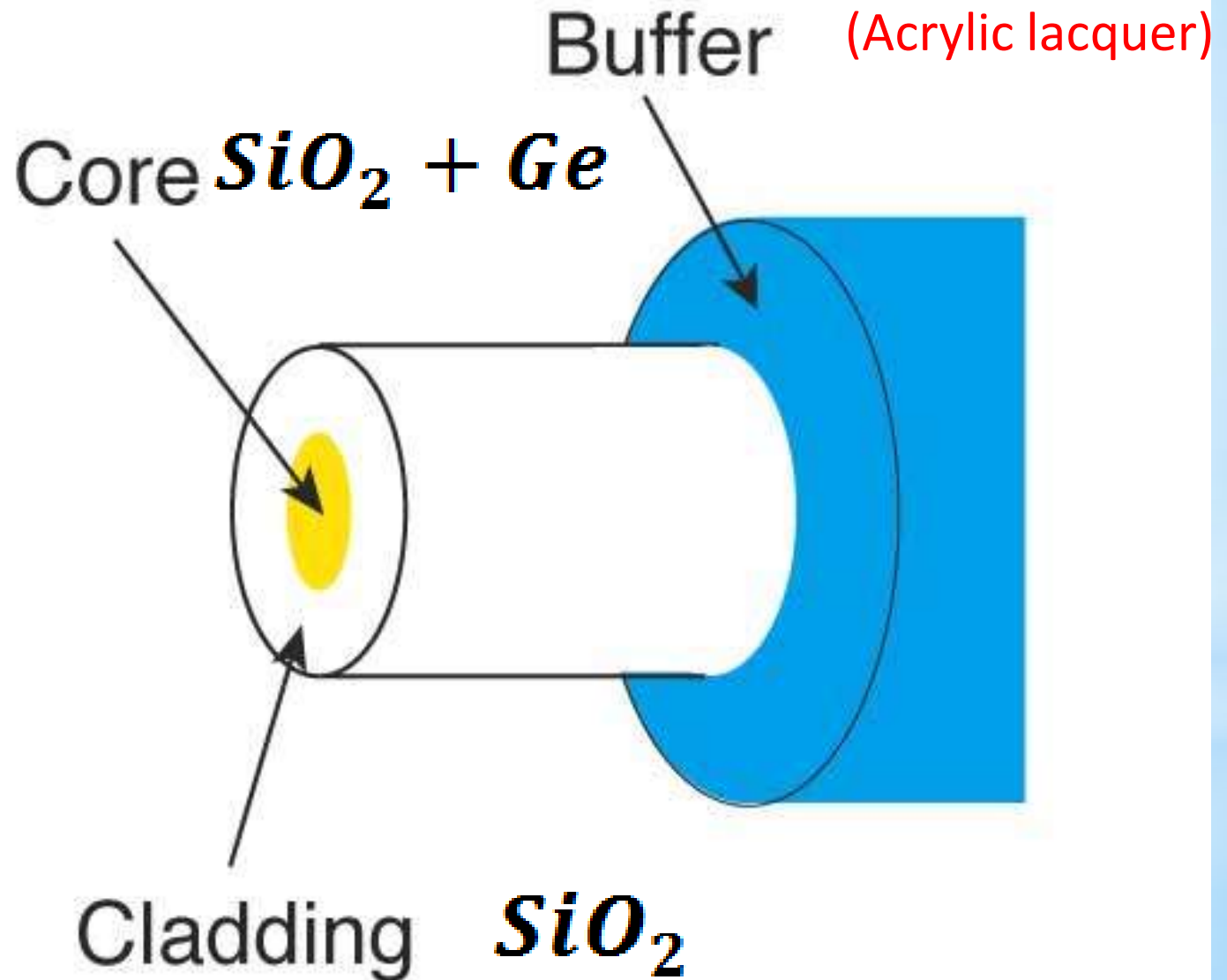


# Światłowody – Całkowite wewnętrzne odbicie

- Światłowód jest cylindrycznym falowodem zrobionym z wysokiej czystości stopionej krzemionki.
- Rdzeń ma współczynnik załamania nieznacznie wyższy niż płaszcz, co pozwala na propagację światła poprzez całkowite wewnętrzne odbicie.
- Średnica rdzenia światłowodu jednomodowego wynosi zazwyczaj  $5\text{-}10\mu\text{m}$ .
- Średnica rdzenia światłowodu wielomodowego wynosi zazwyczaj ponad  $100\mu\text{m}$ .



# Światłowody



# Światłowody



**Multimode**  
**50/125  $\mu\text{m}$**

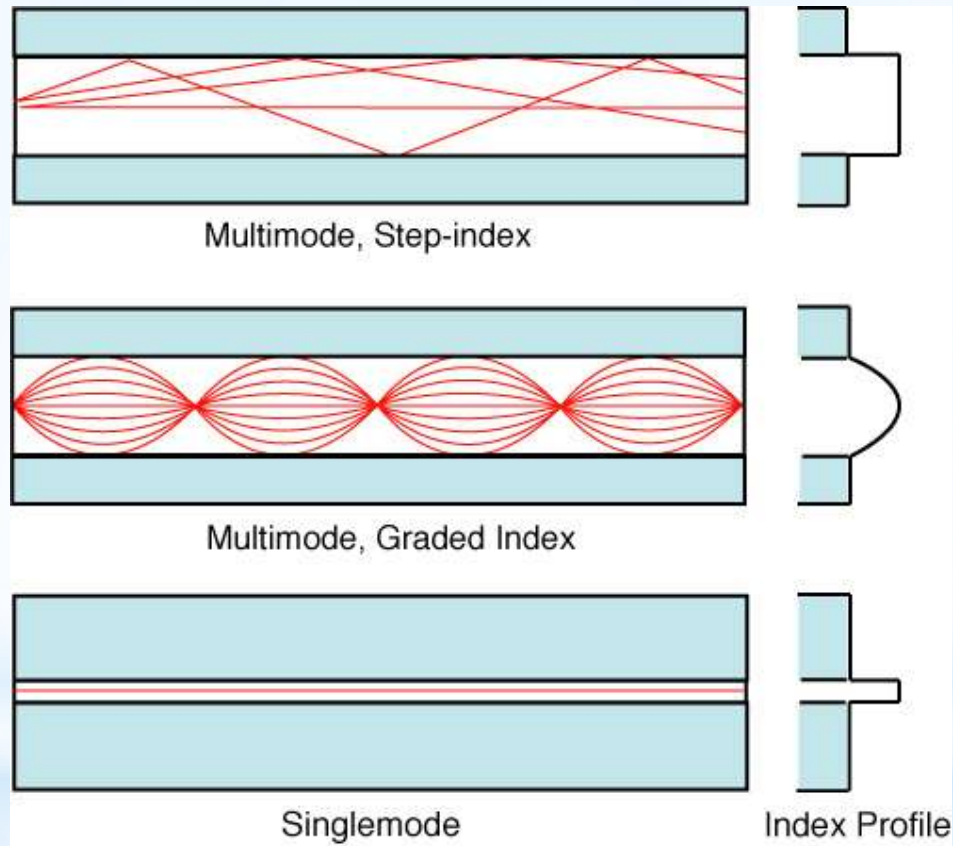


**Multimode**  
**62.5/125  $\mu\text{m}$**



**Single-mode**  
**9/125  $\mu\text{m}$**

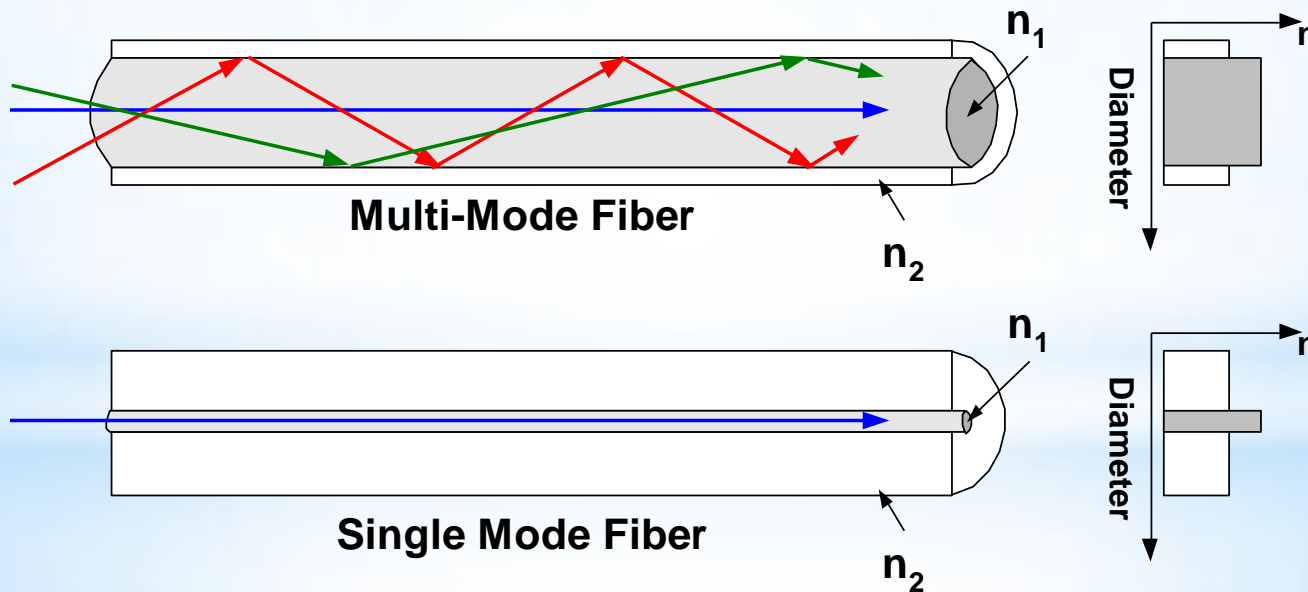
# Światłowody





# Światłowody – jedno- i wielomodowe

- Światłowody wielomodowe mają większy rdzeń i pozwalają na propagację kilku modów, gdy jednomodowe zezwalają na propagację tylko pierwszego (albo podstawowego) modu.



# Nazwy modów w światłowodach

$TE_{lm}$  modes : Wektor pola elektrycznego leży w płaszczyźnie poprzecznej.

$TM_{lm}$  modes : Wektor pola magnetycznego leży w płaszczyźnie poprzecznej.

Hybrid  $HE_{lm}$  modes : Składowa TE jest większa niż składowa TM.

Hybrid  $EH_{lm}$  modes : Składowa TM jest większa niż składowa TE.

$l = \#$  liczba zmian cykli lub zer w kierunku  $\phi$

$m = \#$  liczba zmian cykli lub zer w kierunku  $r$ .

**Liniowo Spolaryzowane (LP) mody** w słaboprowadzonych światłowodach

$(n_1 - n_2 \ll 1)$

$LP_{0m} (HE_{1m}), LP_{1m} (TE_{0m} + TM_{0m} + HE_{0m})$

**Mod Podstawowy:**  $LP_{01} (HE_{11})$

# Stała propagacji modów

$$V = \frac{2\pi a}{\lambda} \sqrt{n_1^2 - n_2^2} = \frac{2\pi a}{\lambda} \text{NA}$$

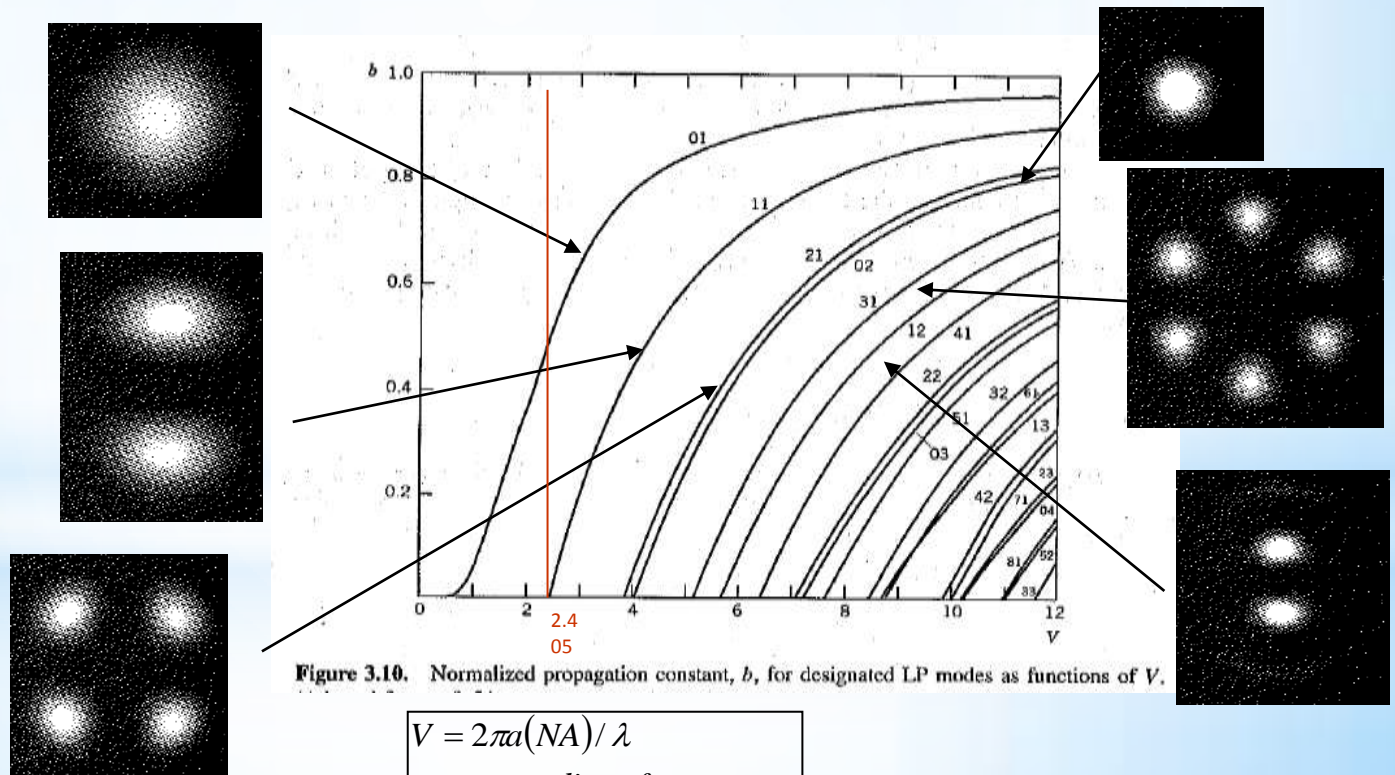


Figure 3.10. Normalized propagation constant,  $b$ , for designated LP modes as functions of  $V$ .

$$V = 2\pi a(\text{NA}) / \lambda$$

$a$  : radius of core

$\lambda$  : wavelength of lighth

# Długość fali odcięcia

Definicja: długość fali poniżej której wiele modów światła może się propagować wzdłuż określonego światłowodu, np.  $\lambda \geq \lambda_c$ , jednomodowy,  $\lambda < \lambda_c$ , wielomodowy

$$\lambda_c = \frac{2\pi a}{2.405} \times NA$$

# Droga zdudnień światłowodu

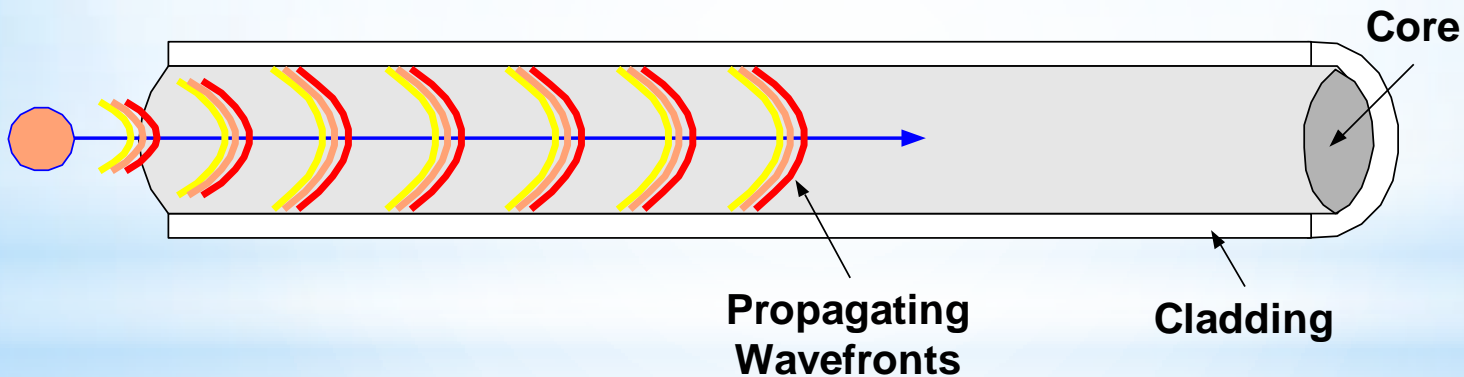
Ogólnie, liniowo spolaryzowany mod jest kombinacją obu modów zdegenerowanych. Jako, że fala modalna podróżuje wzdłuż światłowodu, różnica we współczynnikach załamania zmieniłaby różnicę fazową między tymi dwoma składowymi i w wyniku tego stan polaryzacji modu. Jednakże po przejściu pewnej długości nazywanej **drogą zdudnień światłowodu**, fala modalna będzie produkować swój oryginalny stan polaryzacji. Ta długość jest opisana wzorem:

$$L_p = \frac{2\pi}{k\Delta n}$$



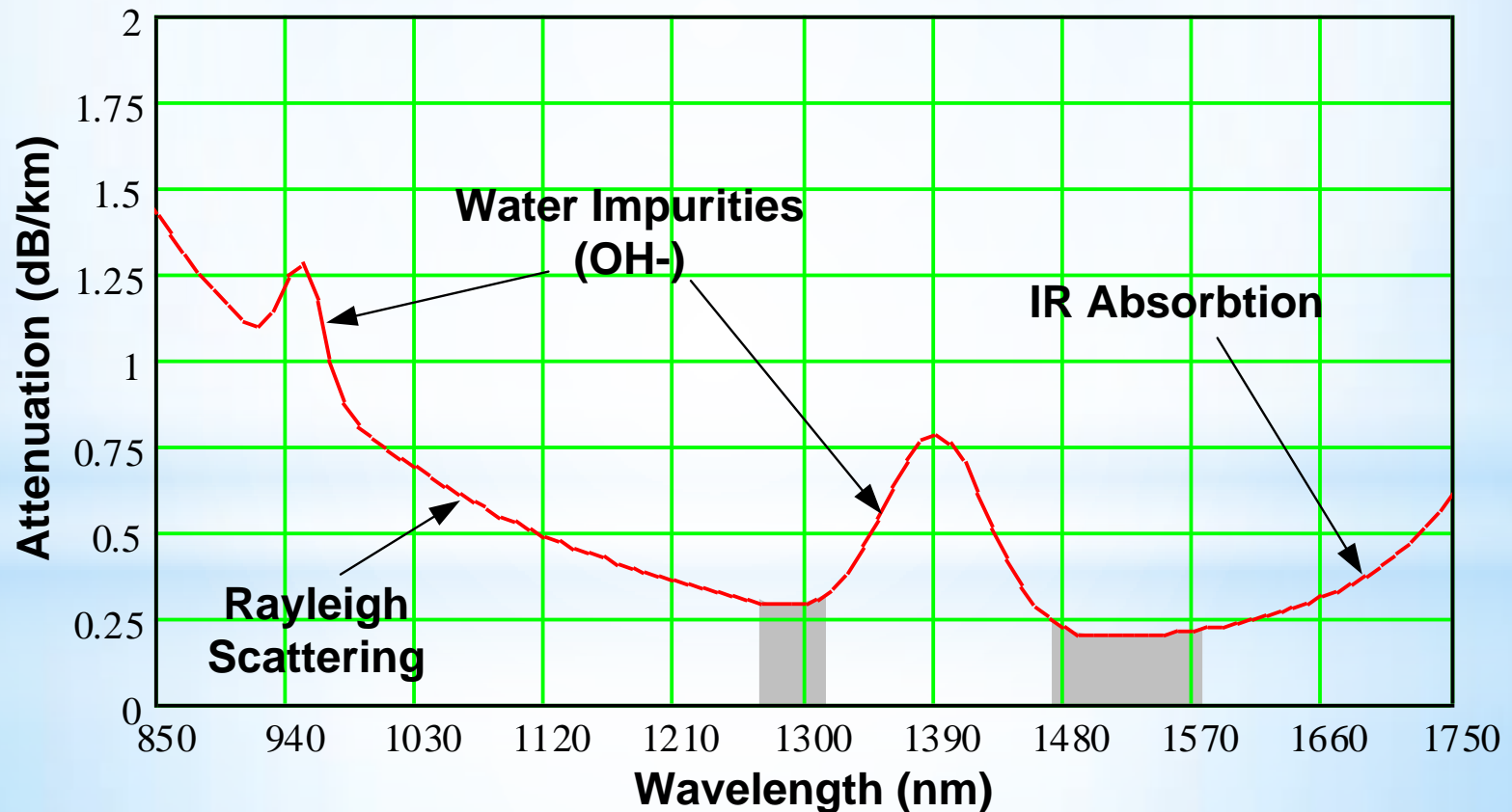
# Stała propagacji modu

- By lepiej opisać niektóre fenomeny optyczne, ważne jest by pamiętać, że światła jest podróżującą falą elektromagnetyczną.
- Gdy światło propaguje się przez światłowód, tworzy „fale stojącą” w poprzek średnicy rdzenia światłowodu. Jest to nazywane propagacją falowodu.
- Mała porcja mocy przenika również do pokrycia.



# Tłumienność światłowodów

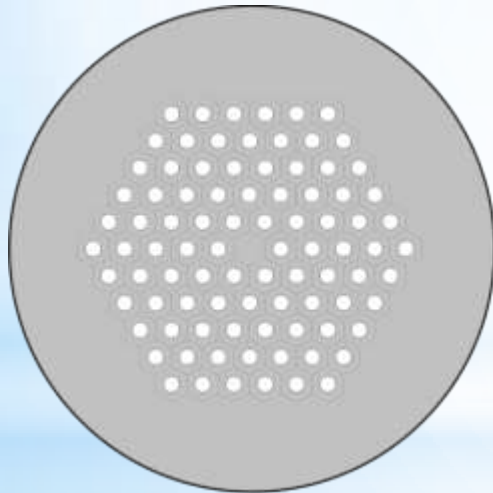
- Wskutek charakterystycznej krzywej tłumienności światłowodów, istnieją dwa regiony używane w telekomunikacji.



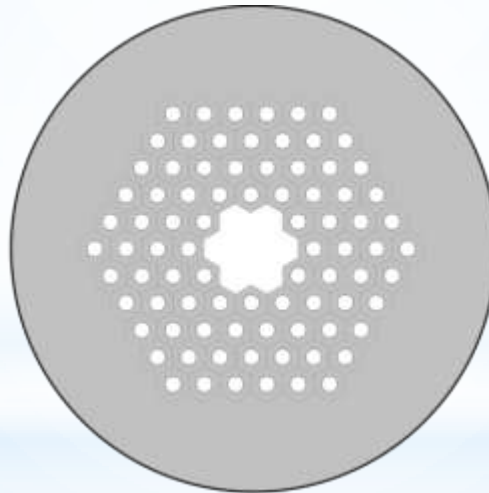
# Światłowody fotoniczne

- 2-wymiarowy kryształ fotoniczny z defektem w regionie rdzenia na całej długości włókna światłowodowego,
- Wykonane z jednego rodzaju szkła z macierzą periodycznie rozmieszczonych mikro otworków, które tworzą strukturę kryształu fotonicznego,

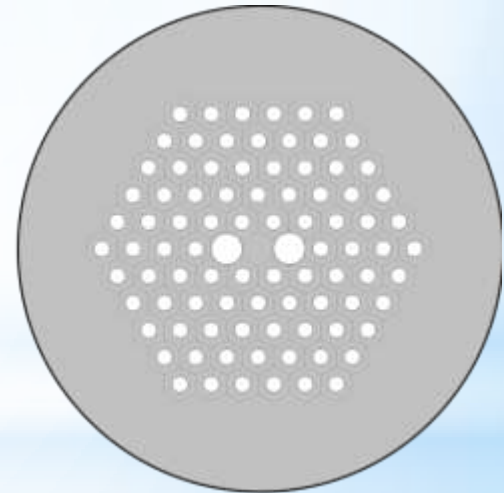
3 główne typy światłowódów fotonicznych:



**Izotropowy  
ze stałym rdzeniem**



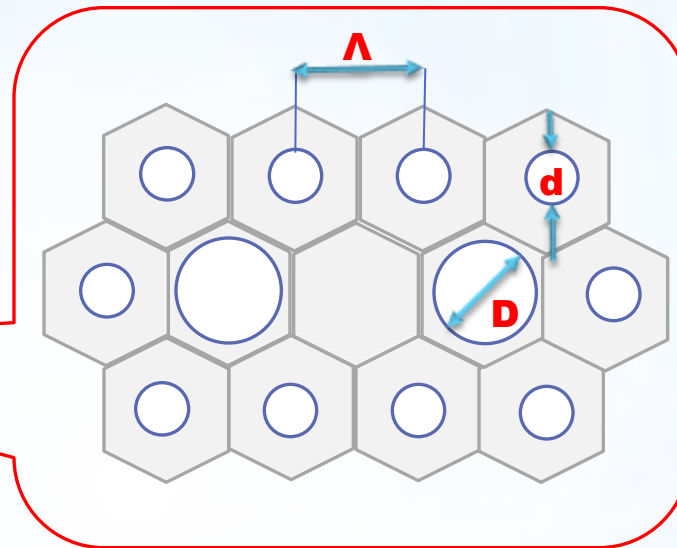
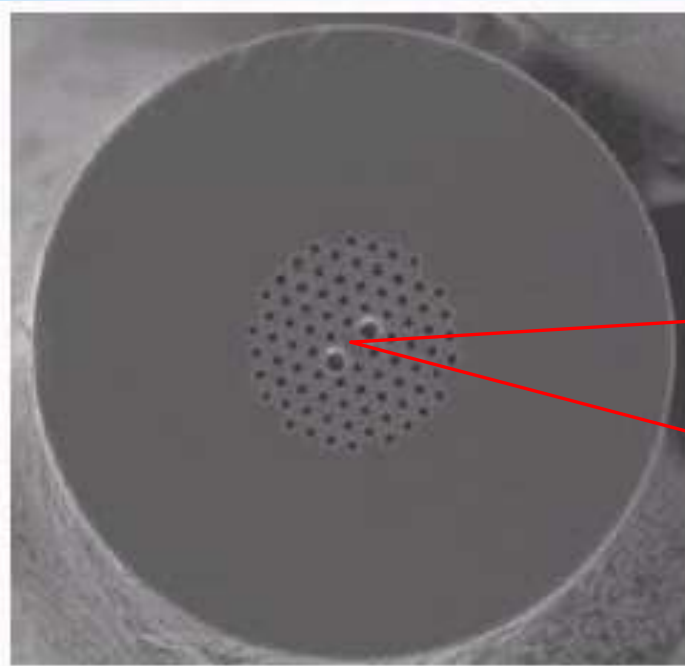
**Hollow-core**



**Dwójłomny  
ze stałym rdzeniem**

# Światłowód fotoniczny

Przykład komercyjnie dostępnego włókna fotonicznego (NKT Photonics)



## Parametry

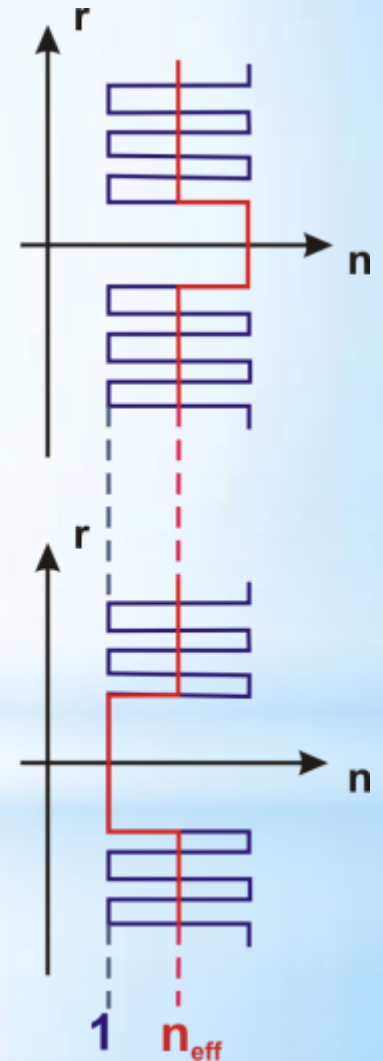
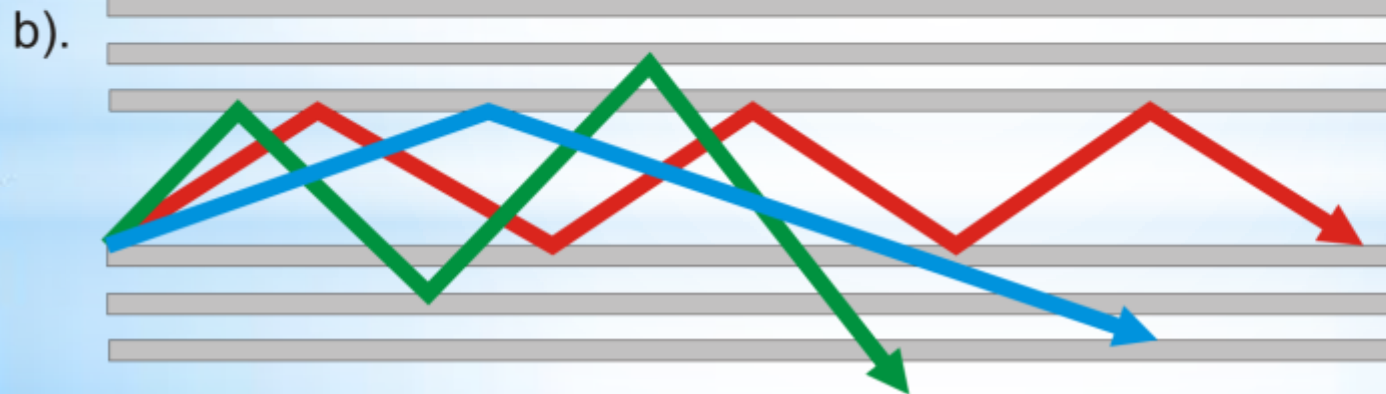
- Skok,  $\Lambda$  →  $4.4 \mu\text{m}$
- Średnica dużych otworków,  $D$  →  $4.5 \mu\text{m}$
- Średnica małych otworków,  $d$  →  $2.2 \mu\text{m}$
- Średnica obszaru fotonicznego →  $40 \mu\text{m}$
- Współczynnik wypełnienia,  $d/\Lambda$  →  $0.5$

# Mechanizmy propagacji światła

**m-TIR (modified Total Internal Reflection)** – charakterystyczny dla PCFów ze stałym rdzeniem,



**PBG (Photonic Band Gap)** – charakterystyczne dla PCFów z rdzeniem powietrznym „hollow-core”.





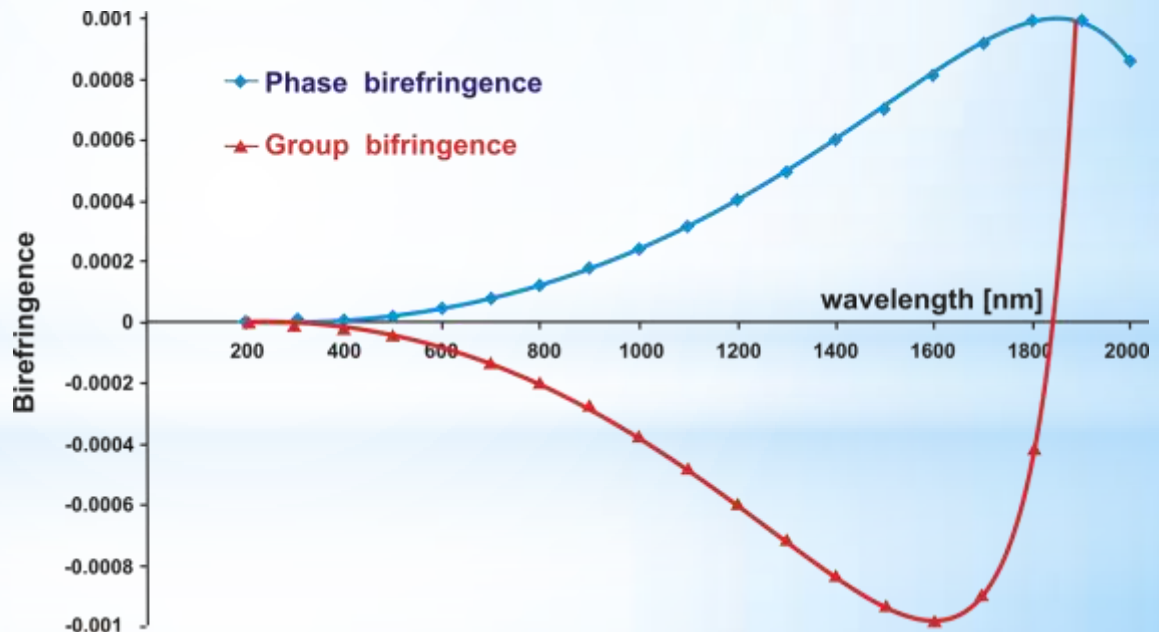
# Właściwości Światłowodów fotonicznych

- Niska czułość na wpływ temperatury,
- Dwójłomność jest generowana poprzez wprowadzenie dwuwymiarowej degeneracji w periodycznej strukturze włókna fotonicznego,
- Grupowa i fazowa dwójłomność zależy od długości fali,
- Grupowa i fazowa dwójłomność może mieć różne wartości i nawet przeciwne znaki.

$$B(\lambda) = |n_y(\lambda) - n_x(\lambda)| = \frac{\lambda}{2\pi} |\beta_y - \beta_x|$$

$$G(\lambda) = B(\lambda) - \lambda \frac{dB(\lambda)}{d\lambda}$$

Blazephotonics 1550-01



# Ciekłokrystaliczne Światłowody Fotoniczne

## Światłowód fotoniczny

Możliwość propagacji światła na zasadzie zjawiska mTIR i PBG

Różne typy struktur fotonicznych. )



## Ciekły Kryształ

Czułość na temperaturę, zewnętrzne pola AC/DC, czułość optyczna.

Różnorodność mieszanin ciekłokrystalicznych.



## Ciekłokrystaliczny Światłowód Fotoniczny

Wyższy poziom przestrajalności propagacji światła i kontroli polaryzacji poprzez zewnętrzne pola fizyczne.