

Wykład 18: Elementy optyki

Dr inż. Zbigniew Szklarski

Instytut Elektroniki, paw. C-1, pok.321

szkla@agh.edu.pl

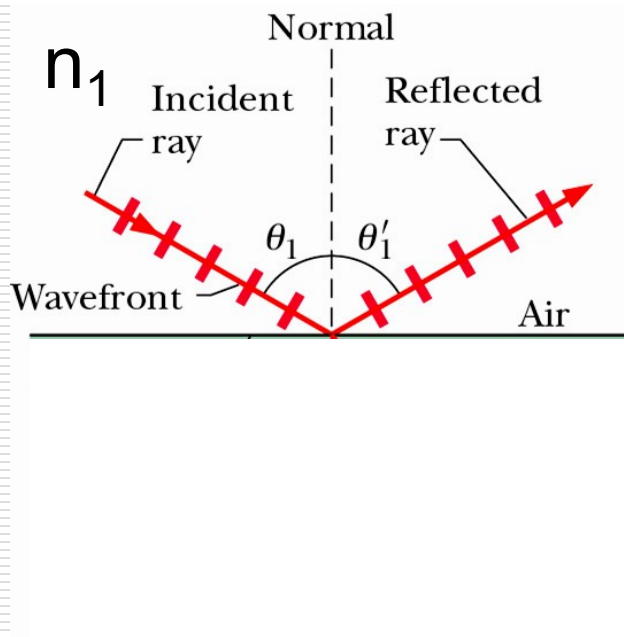
<http://layer.uci.agh.edu.pl/Z.Szklarski/>

Odbicie i załamanie światła

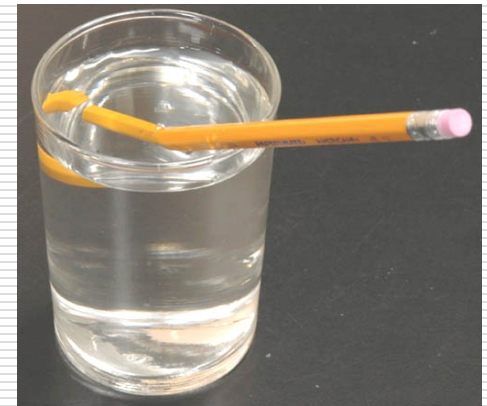
Prawo odbicia:

$$\theta_1 = \theta_1'$$

i
współpłasz-
czynność



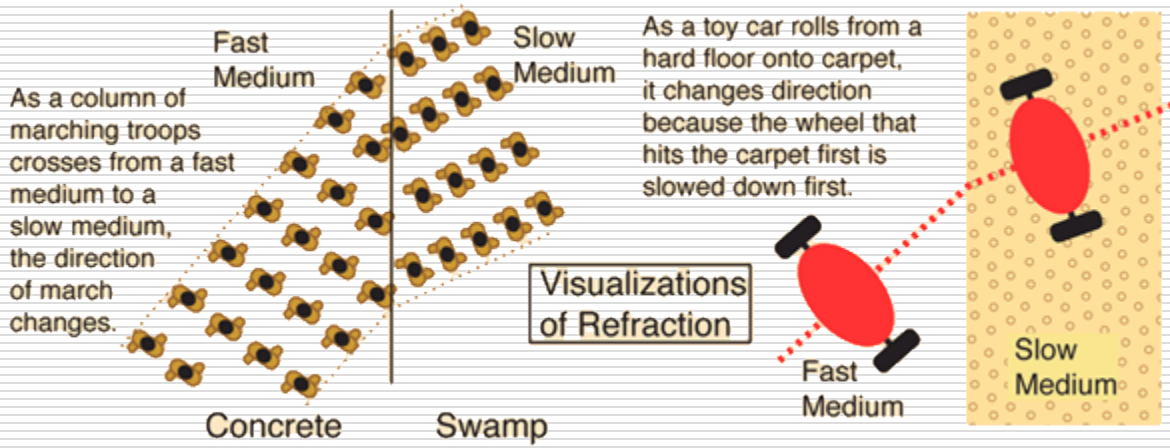
Czemu ołówek
wydaje się być
złamany?



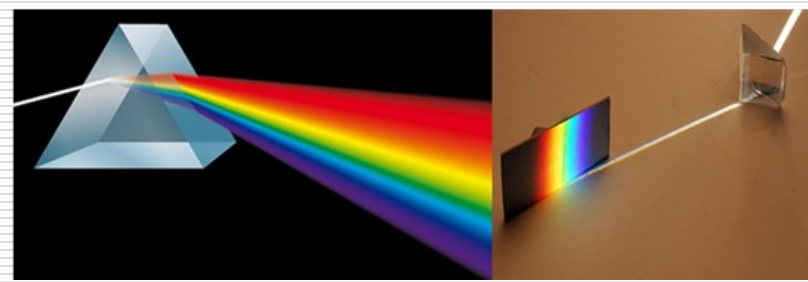
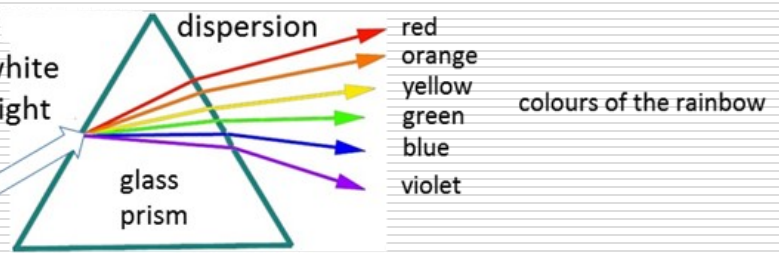
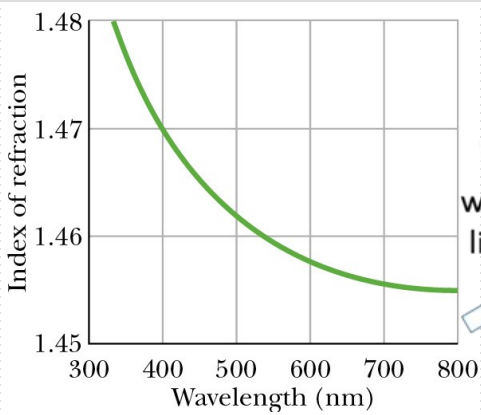
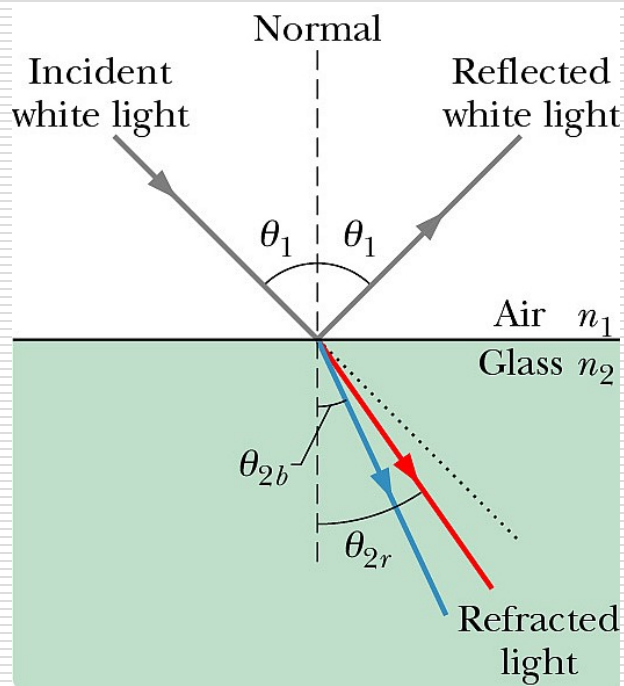
Prawo załamania- prawo Snella $n_2 \sin\theta_2 = n_1 \sin\theta_1$



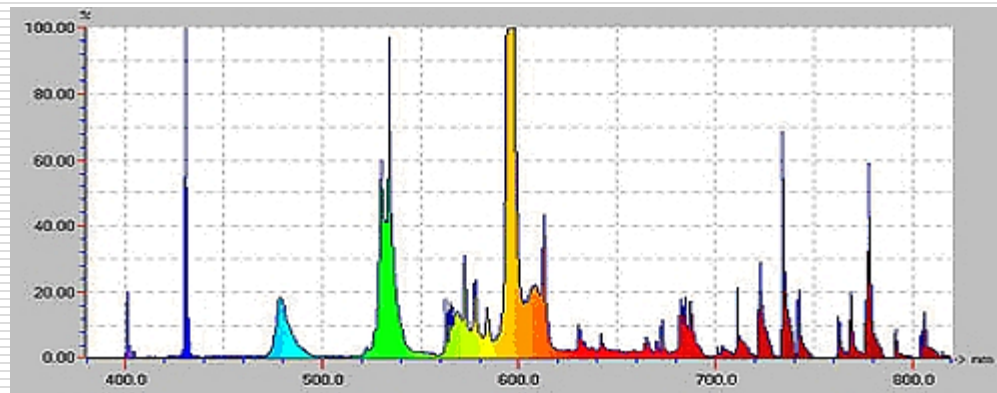
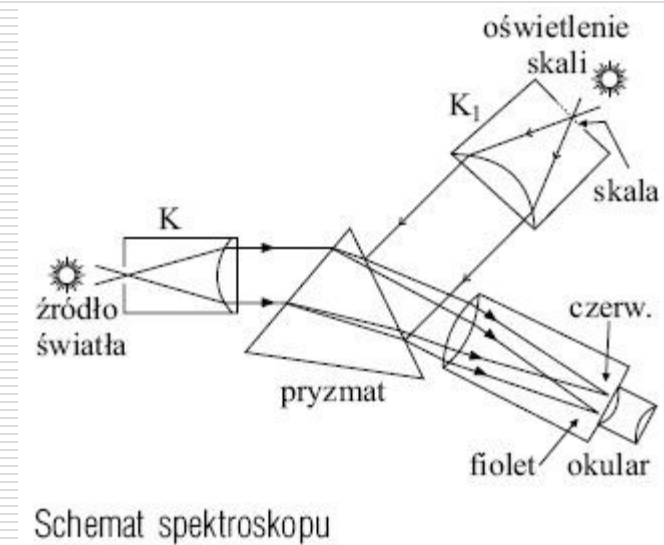
różna jest prędkość rozchodzenia się fali w ośrodkach różniących się współczynnikiem załamania $n=c/v$



□ Dyspersja



□ Spektroskopia optyczna

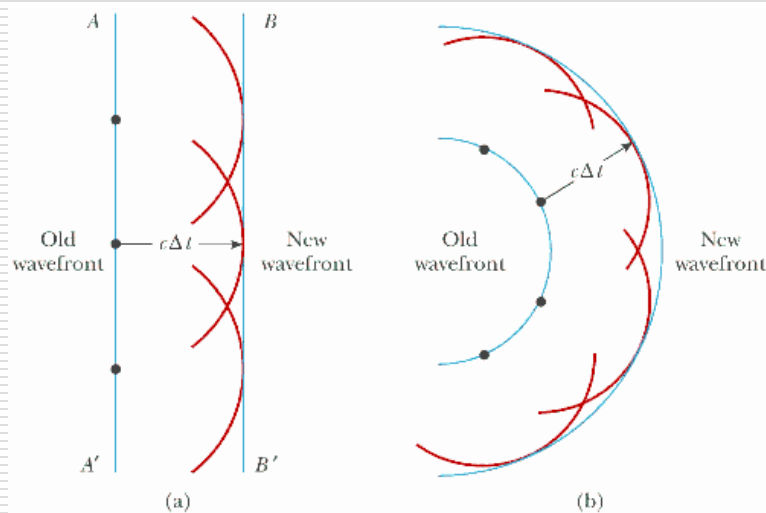


Optyka falowa.

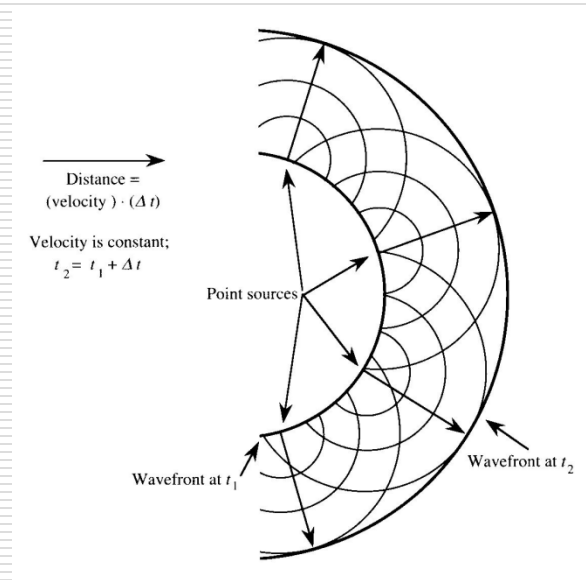
Zasada Huyghensa

Christian Huygens – 1678 r. pierwsza falowa teoria światła

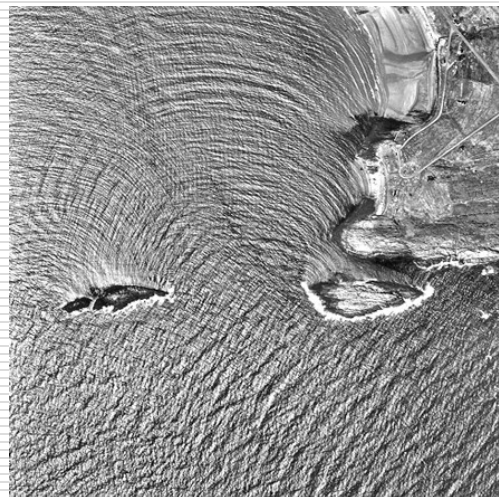
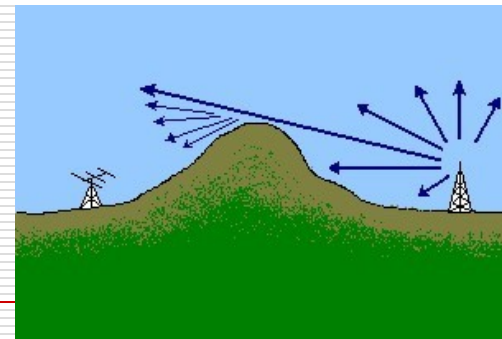
Zasada Huyghensa: Wszystkie punkty czoła fali zachowują się jak punktowe źródła elementarnych kulistych fal wtórnych. Po czasie t nowe położenie czoła fali jest wyznaczone przez powierzchnię styczną do powierzchni fal wtórnych



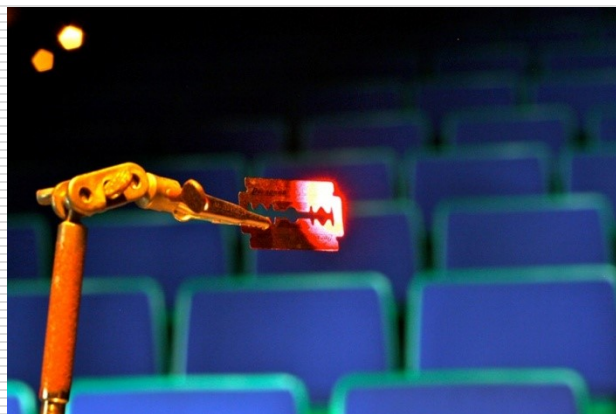
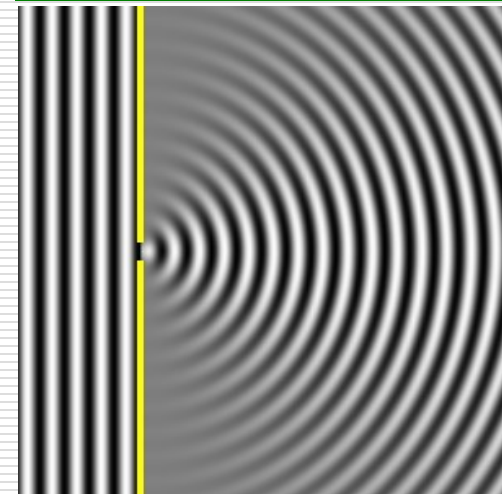
©2004 Thomson - Brooks/Cole



Dyfrakcja czyli ugięcie

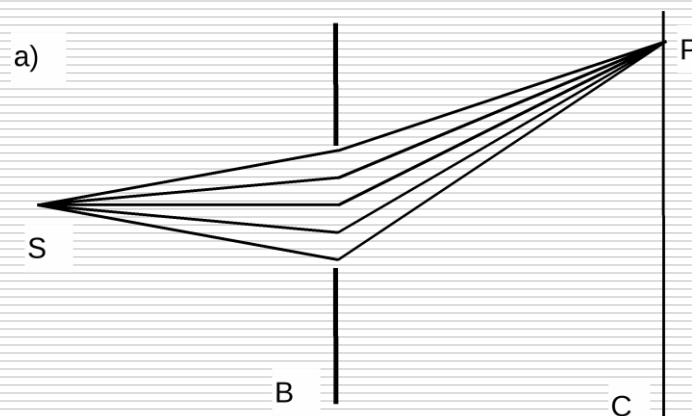


To nie tylko rozprze-
strzenianie się fali,
ale w przypadku
światła również
powstawanie obrazu
interferencyjnego.



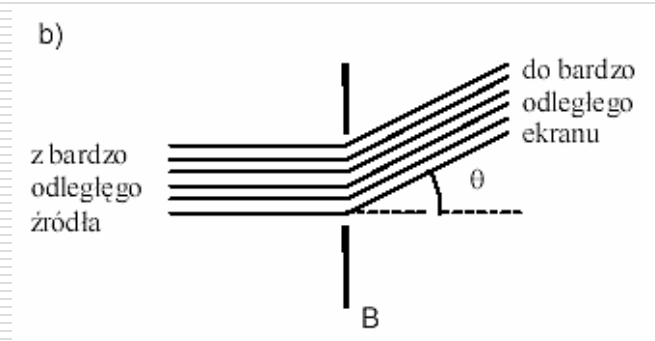
□ Dyfrakcja Fresnela

- przy niewielkiej odległości ekranu od szczeliny uginającej. Promienie padające i ugięte na szczeliny nie są równoległe.

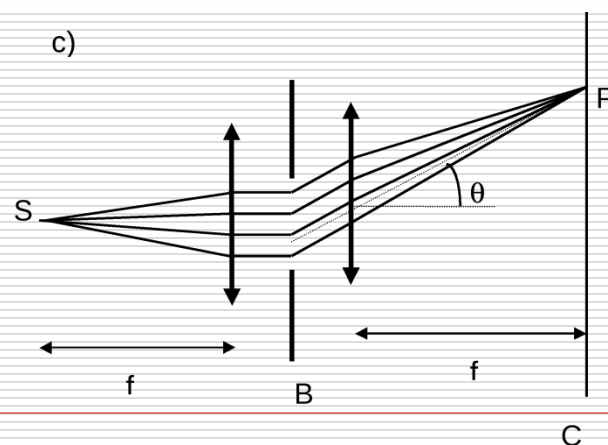


□ Dyfrakcja Fraunhofera

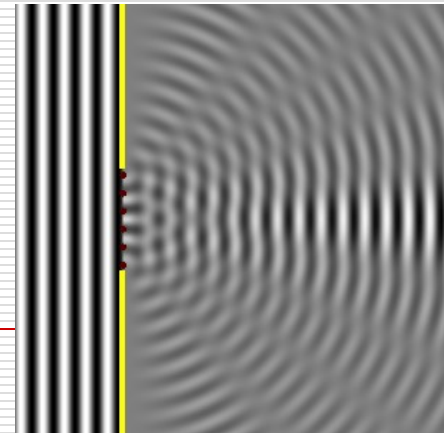
- ekran w dużej odległości od szczeliny, czoła fal padających i ugiętych są płaskie, a promienie są równoległe.



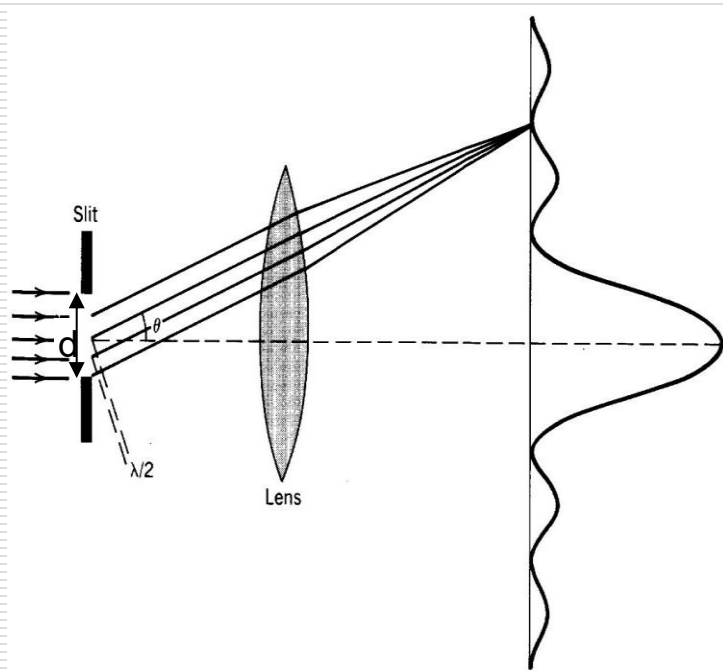
Praktyczna realizacja dyfrakcji Fraunhofera przy pomocy soczewek - przy niewielkiej odległości ekranu od szczeliny uginającej. Promienie padające i ugięte na szczeliny są równoległe.



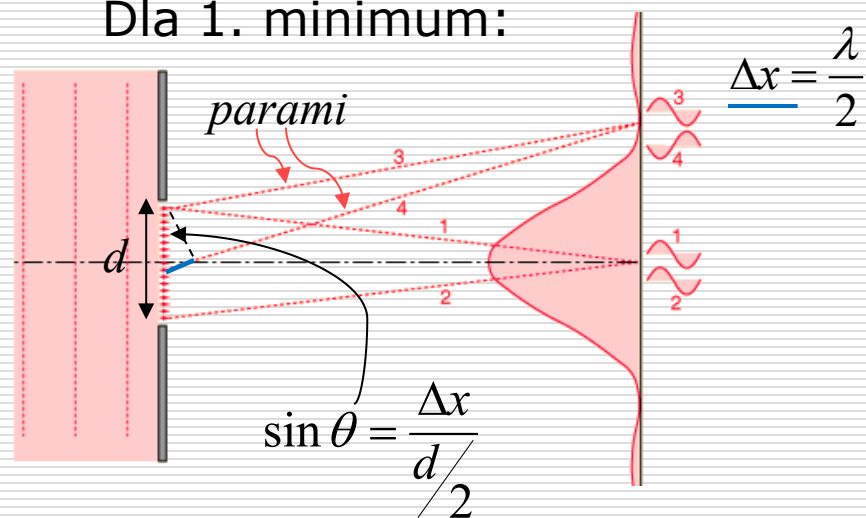
Pojedyncza szczelina



Dyfrakcja Fraunchofera jest granicznym przypadkiem dyfrakcji Fresnela.



Dla 1. minimum:



$$\frac{1}{2} d \cdot \sin \theta = \frac{\lambda}{2}$$

$$d \cdot \sin \theta = \lambda$$

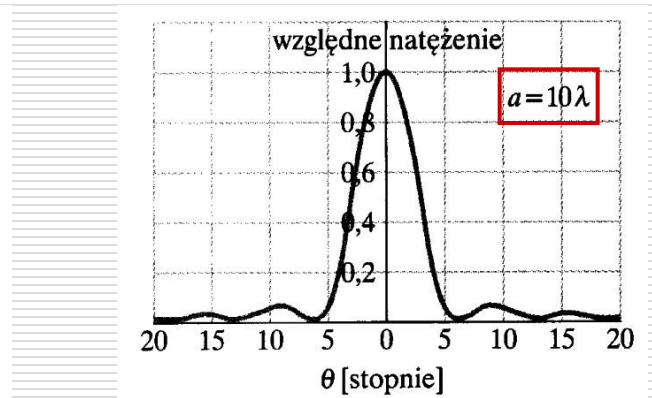
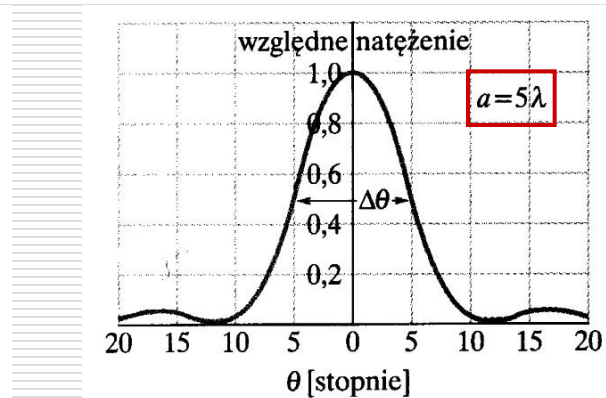
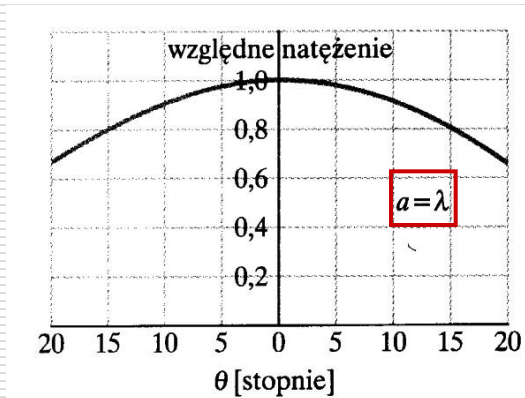
Ogólny warunek na minimum

dla pojedynczej szczeliny:

$$d \cdot \sin \theta = n \lambda$$

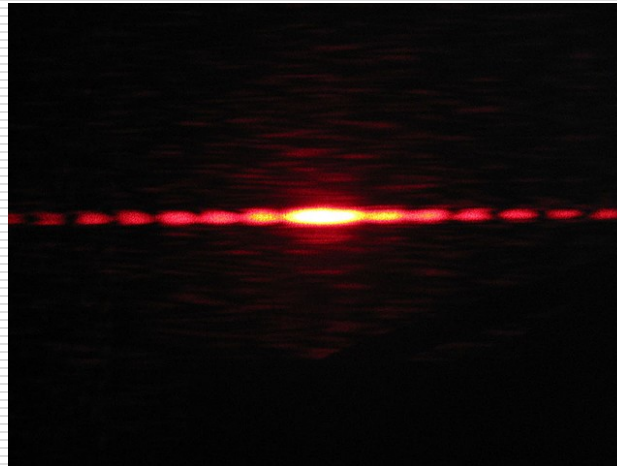
$$n = 1, 2, 3, \dots$$

Względne natężenie w obrazie dyfrakcyjnym dla różnych szerokości szczeliny.



$$I_{\theta} = I_m \left(\frac{\sin \alpha}{\alpha} \right)^2$$

$$\alpha = \frac{\pi a}{\lambda} \sin \theta$$



$$\alpha = m\pi, \quad m = 1, 2, 3, \dots$$

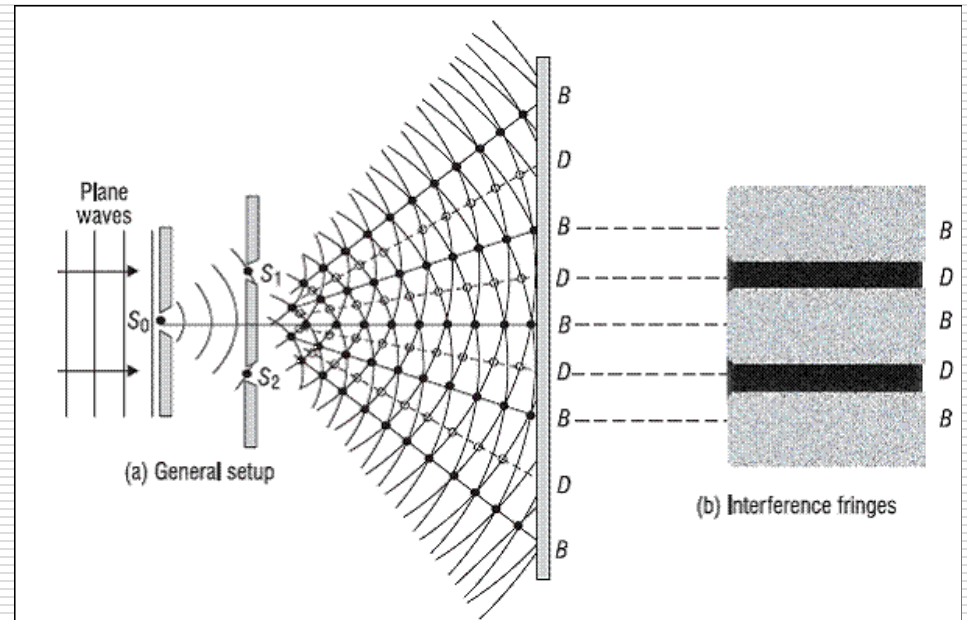
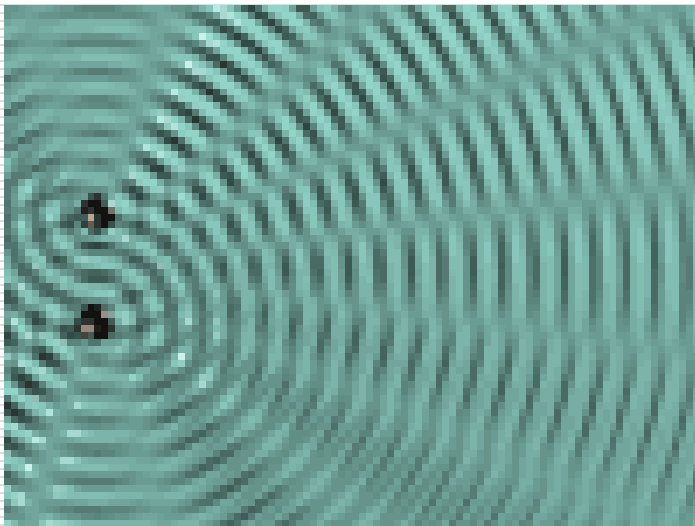
minimum

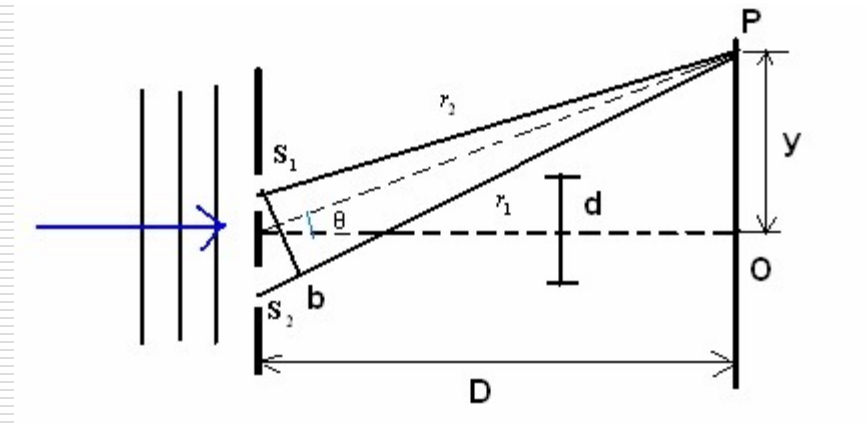
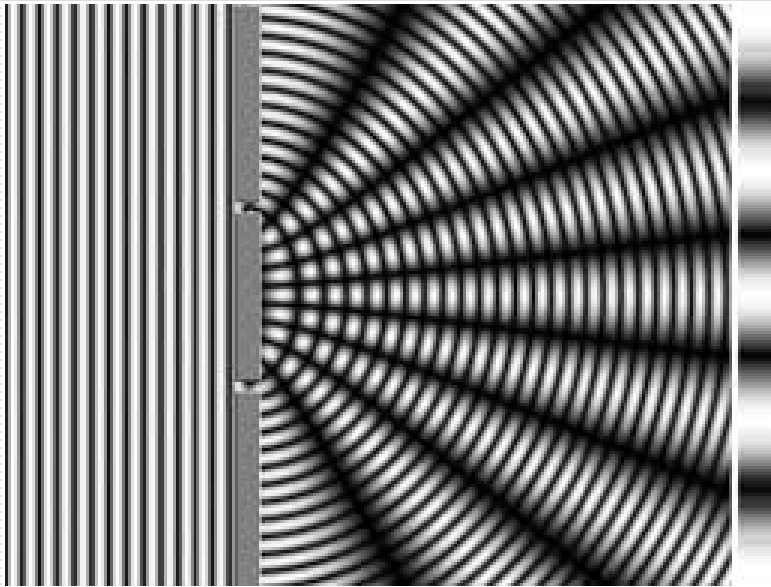
$$\alpha = \left(m + \frac{1}{2} \right) \pi, \quad m = 1, 2, 3, \dots$$

maksimum

Doświadczenie Younga

1801 r. – światło jest falą bo ulega interferencji

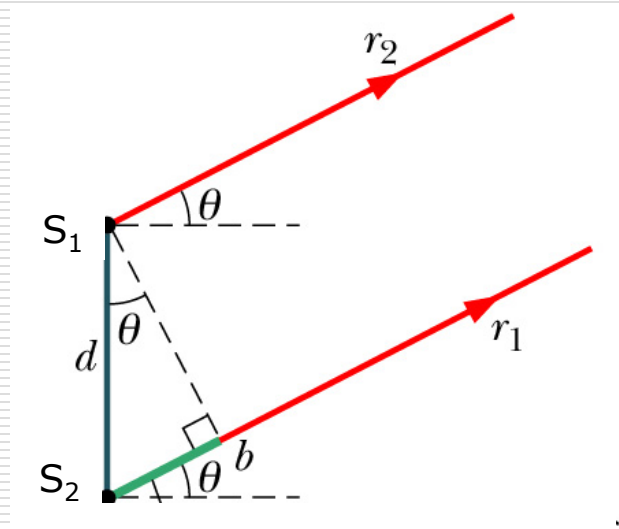




O wyniku interferencji fal decyduje różnica faz $\Delta\varphi$

Dla światła rozchodzącego się w przestrzeni 3D (w próżni lub ośrodku materialnym) główną przyczyną powstawania różnicy faz $\Delta\varphi$ jest różnica dróg optycznych ΔL

$$\Delta L = S_2 b = d \sin\theta$$



□ Warunki interferencji:

różnica faz musi być stała w czasie – spójność czasowa oraz w przestrzeni – spójność przestrzenna

Źródła światła muszą być spójne (**koherentne**)

gdy $\Delta L = \lambda$ to $\Delta \varphi = 2\pi$ i
zachodzi interferencja
konstruktywna

$$\frac{\Delta \varphi}{\Delta L} = \frac{2\pi}{\lambda} \Rightarrow \Delta \varphi = \frac{2\pi}{\lambda} \Delta L$$

- warunek interferencji konstruktywnej (maximum)

$$d \sin \theta = m \lambda \quad m = 0, 1, 2, \dots$$

- warunek interferencji destruktywnej (minimum)

$$d \sin \theta = \left(n + \frac{1}{2}\right) \lambda \quad n = 1, 2, \dots$$

Odwrotnie niż przy jednej szczelinie !!

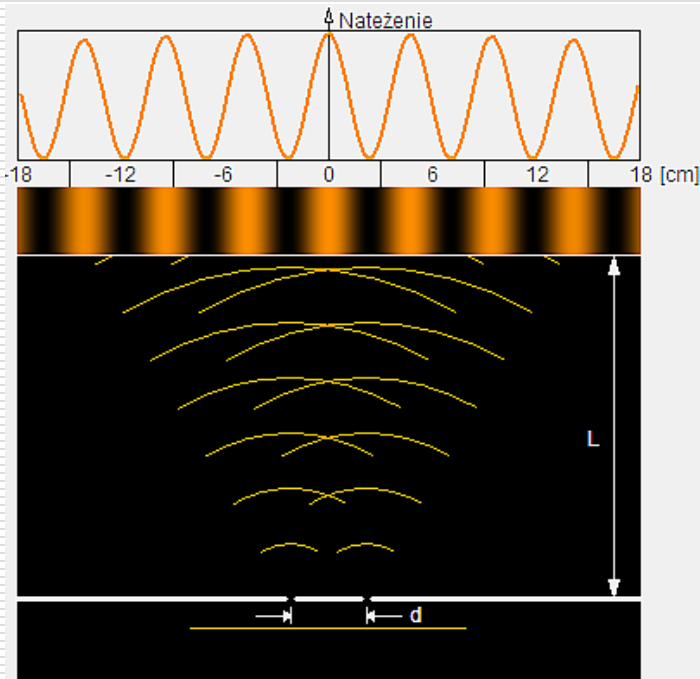
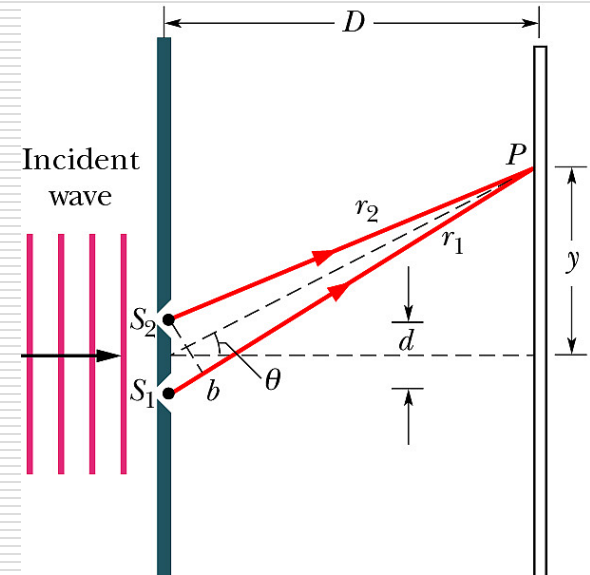
□ Położenie prążków

$$d \sin \theta = m \lambda$$

Dla małych kątów Θ :

$$\sin \Theta \approx \text{tg } \Theta$$

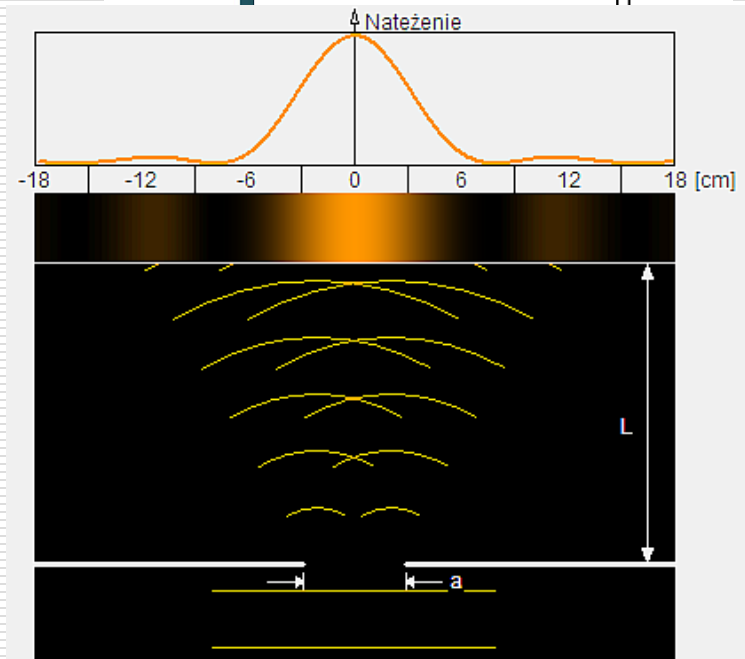
$$\text{tg } \theta = \frac{y}{D} \Rightarrow d \frac{y}{D} = m \lambda \quad y = \frac{m \lambda D}{d}$$



Obraz interferencyjny na 2 szczelinach

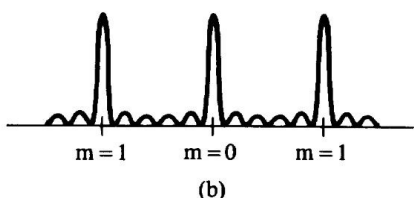
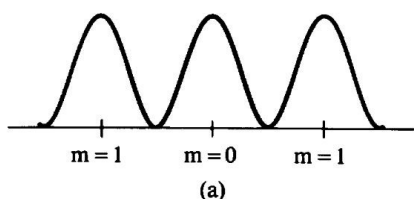


Obraz dyfrakcyjny na 1 szczelinie



□ Siatka dyfrakcyjna

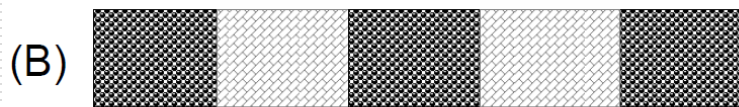
Układ N równoległych szczelin o szerokości $a \ll \lambda$



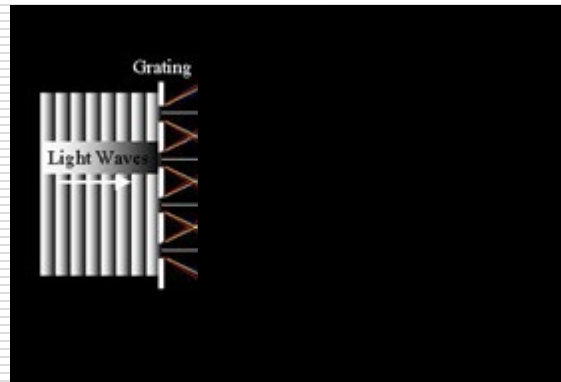
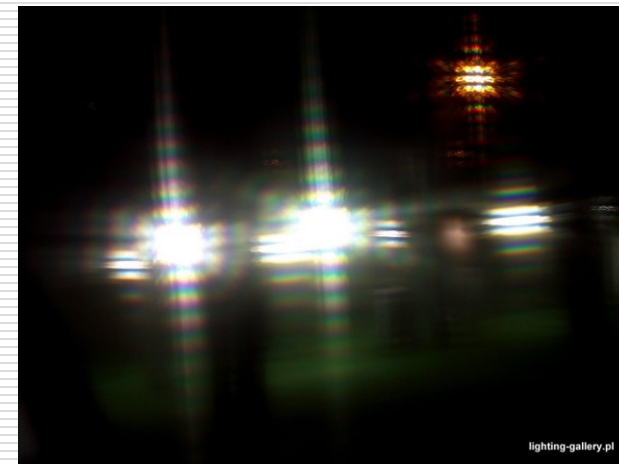
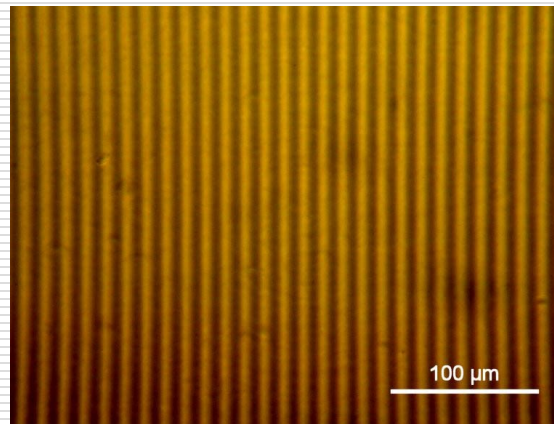
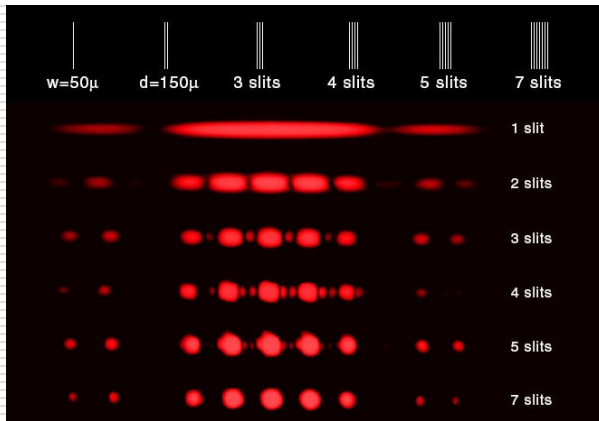
Wykres natężenia w funkcji kąta θ dla:

a) dwóch szczelin – szerokie prążki,

b) sześciu szczelin – węższe prążki.



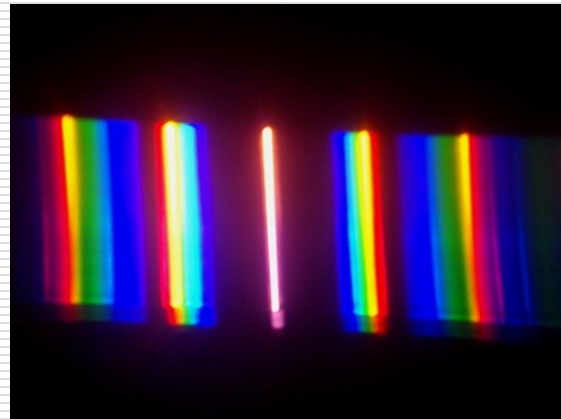
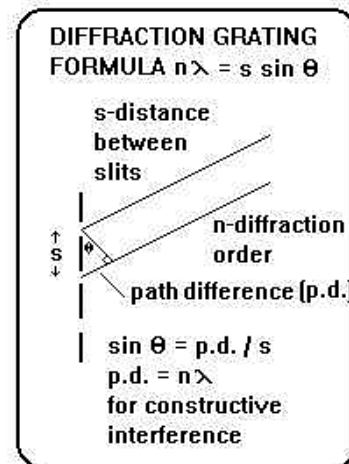
- Nie zmienia się odległość między głównymi maksimumi;
- Położenia maksimumów głównych nie zależą od N ;
- Ze wzrostem liczby szczelin N zwężają się maksima główne i powstają maksima wtórne.



Dyfrakcja światła białego

$$d \sin \theta = m \lambda$$

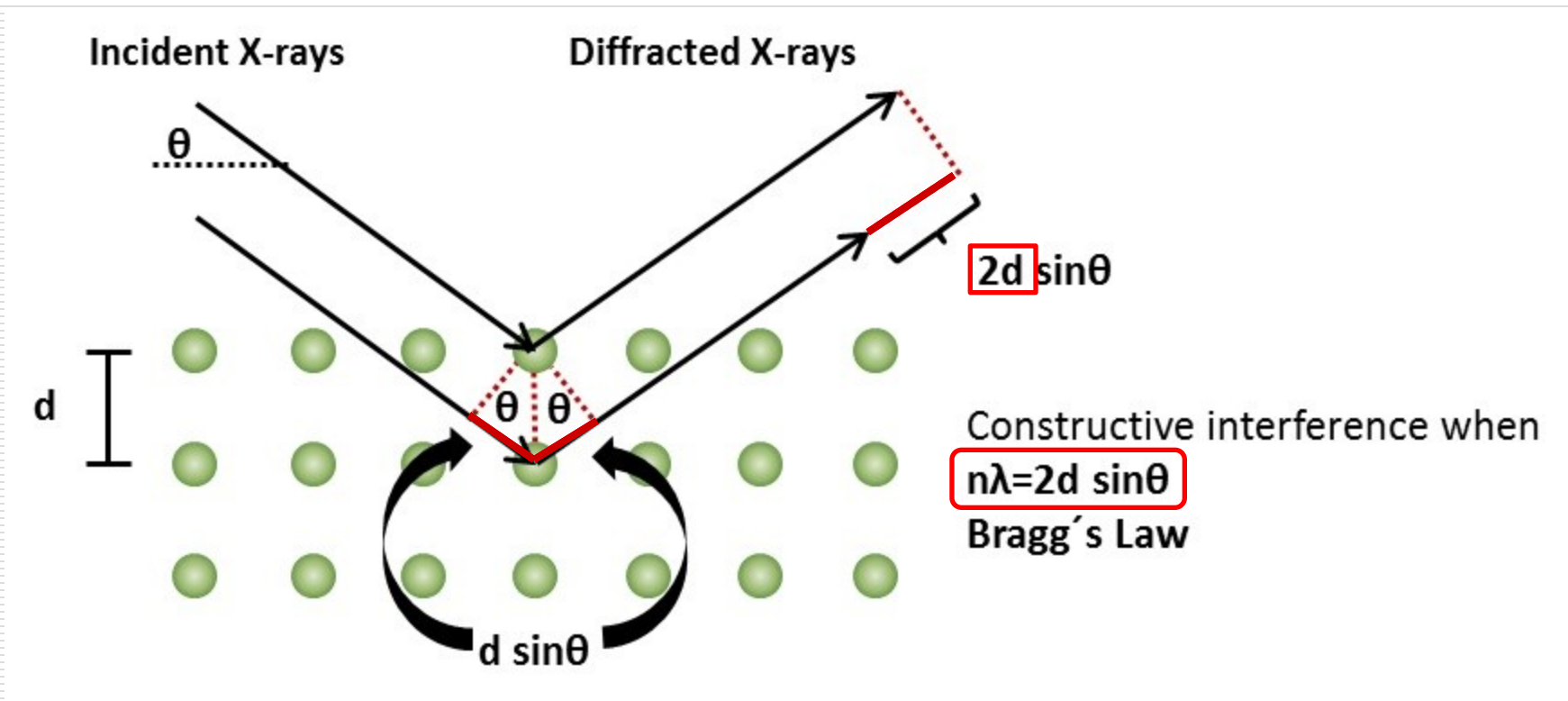
Theoretical derivation of the grating formula and the significance of spectra order

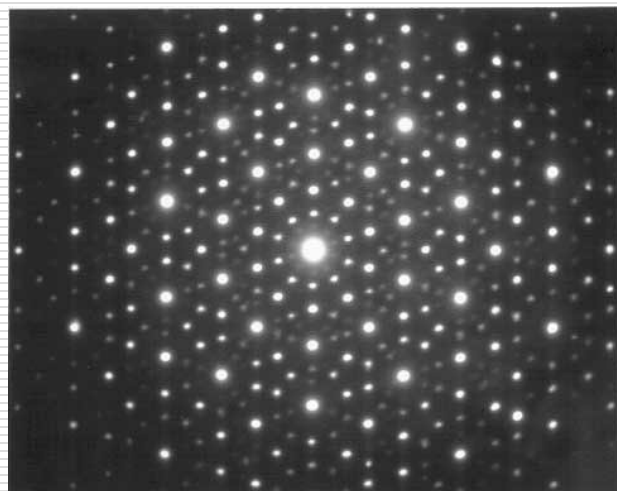
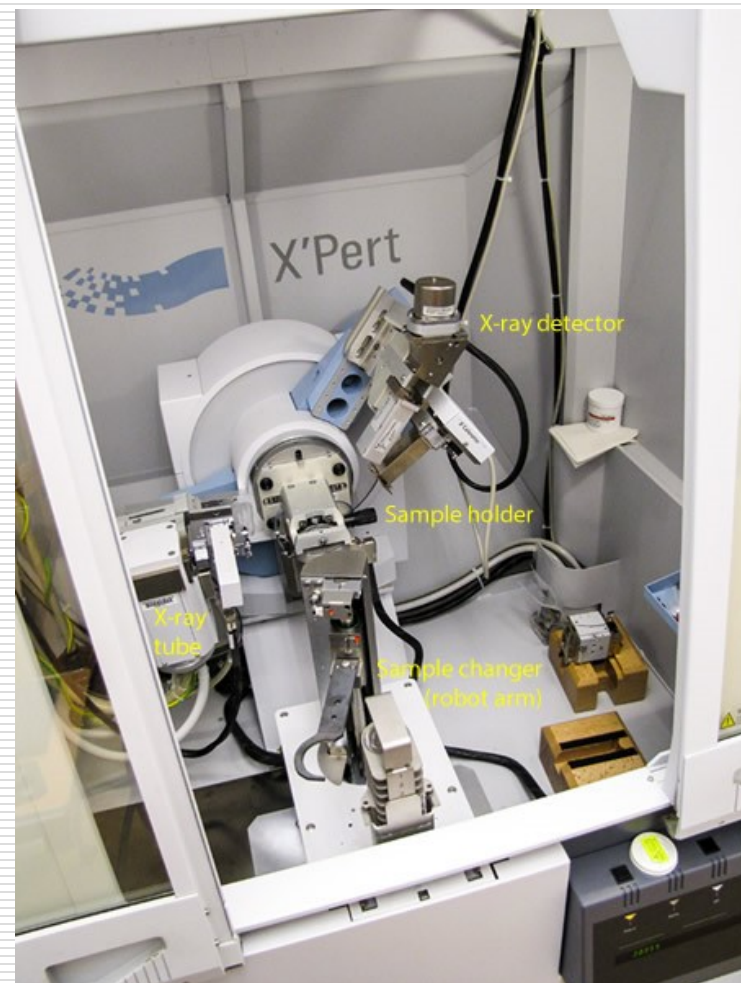
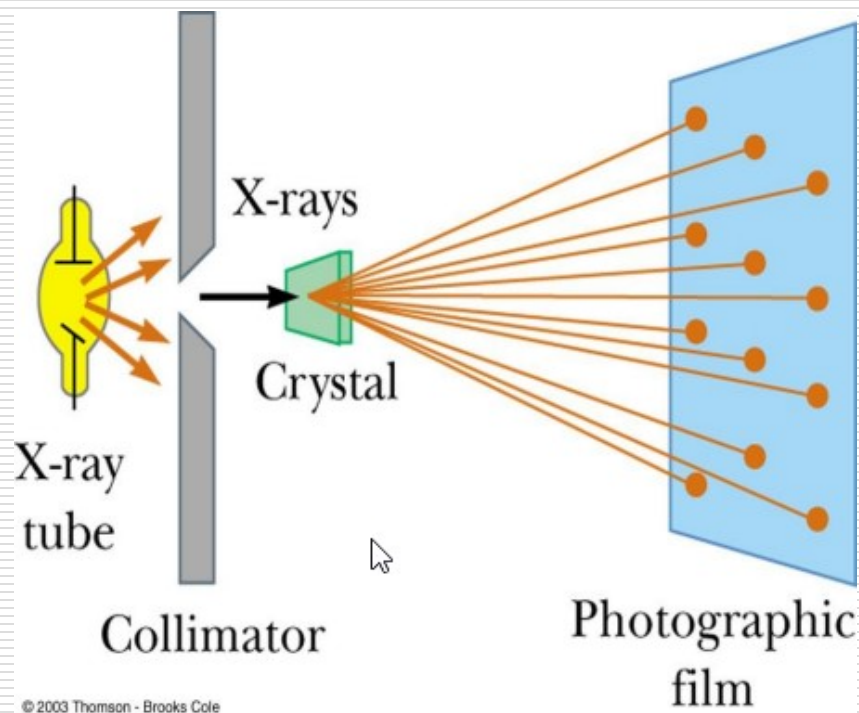


Robert Bunsen (1811-1899) and Gustav Kirchoff (1824-1887) observed in about 1859 that each element emits a light of characteristic wavelength, the beginnings of spectrum analysis and the key to unlocking the secrets of the atom

Dyfrakcja promieniowania rentgenowskiego

Naturalna siatka dyfrakcyjna – sieć krystaliczna





*Kryształ
magnetytu
(tlenku
żelaza)*

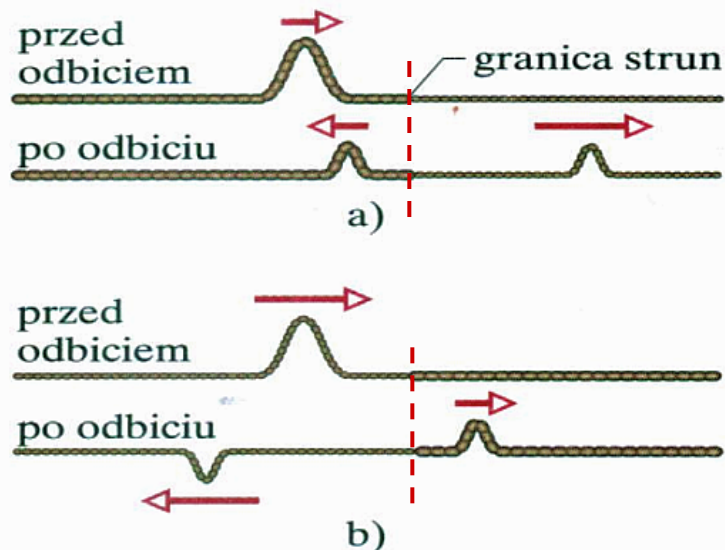
Analizując obraz dyfrakcyjny można określić strukturę kryształu – rozmieszczenie atomów w siatce krystalicznej.

□ Przykład 1.

Na siatkę dyfrakcyjną o 50 rysach na 1 mm pada monochromatyczne światło o długości $\lambda = 600 \text{ nm}$. Odległość pierwszego ciemnego prążka od prążka zerowego wynosi 3 cm.

- a) Obliczyć w jakiej odległości od siatki dyfrakcyjnej znajduje się ekran.
- b) Obliczyć najwyższy rząd widma który da się zaobserwować przy pomocy tej siatki.
- c) Jeżeli siatkę oświetlimy światłem białym (400÷700 nm) to jaka będzie szerokość jasnego prążka pierwszego rzędu?
- d) Który najwyższy rząd pełnego widma światła białego można otrzymać?

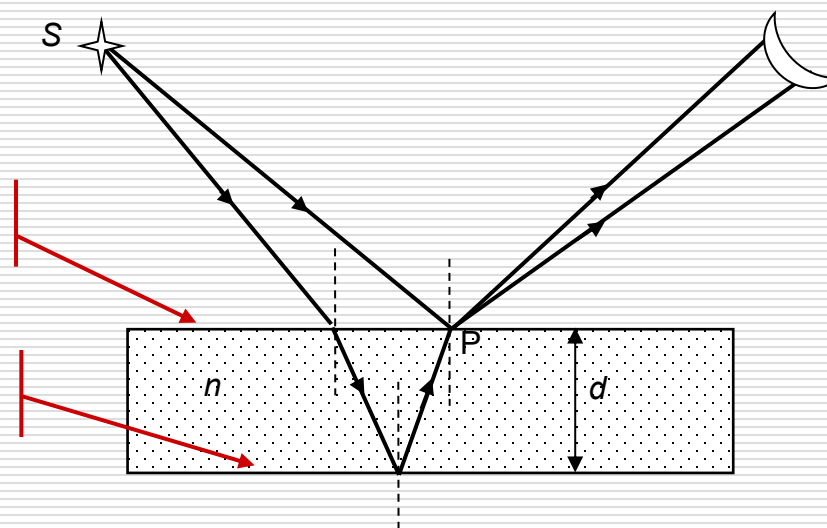
□ Interferencja w cienkich warstwach

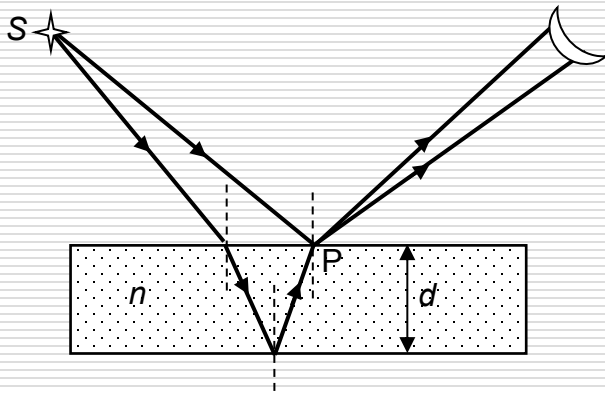


Załamanie na powierzchni rozgraniczającej dwa ośrodki nie powoduje zmiany fazy fali, natomiast odbicie od takiej powierzchni może spowodować zmianę fazy zależnie od współczynników załamania światła po obu stronach powierzchni

Światło odbijając się od ośrodka optycznie gęstszego (o większym n) zmienia fazę.

Natomiast gdy odbicie zachodzi od powierzchni ośrodka optycznie rzadszego, fala odbija się bez zmiany fazy.





Długość fali w warstwie

$$\lambda_n = \frac{\lambda}{n}$$

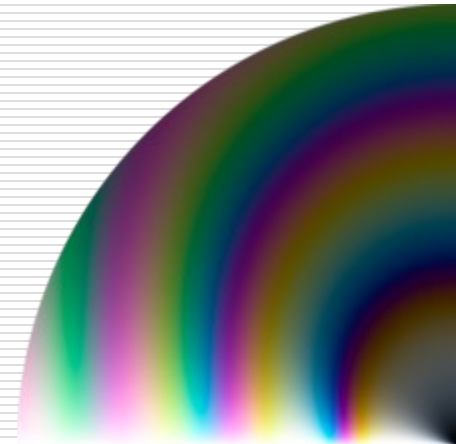
Różnica dróg optycznych promieni:
załamane i odbite (od górnej
powierzchni)

$$\Delta = 2d = m\lambda_n + \frac{\lambda_n}{2}$$

Czyli
$$2d = m\frac{\lambda}{n} + \frac{\lambda}{2n} = \frac{\lambda}{n}\left(m + \frac{1}{2}\right)$$

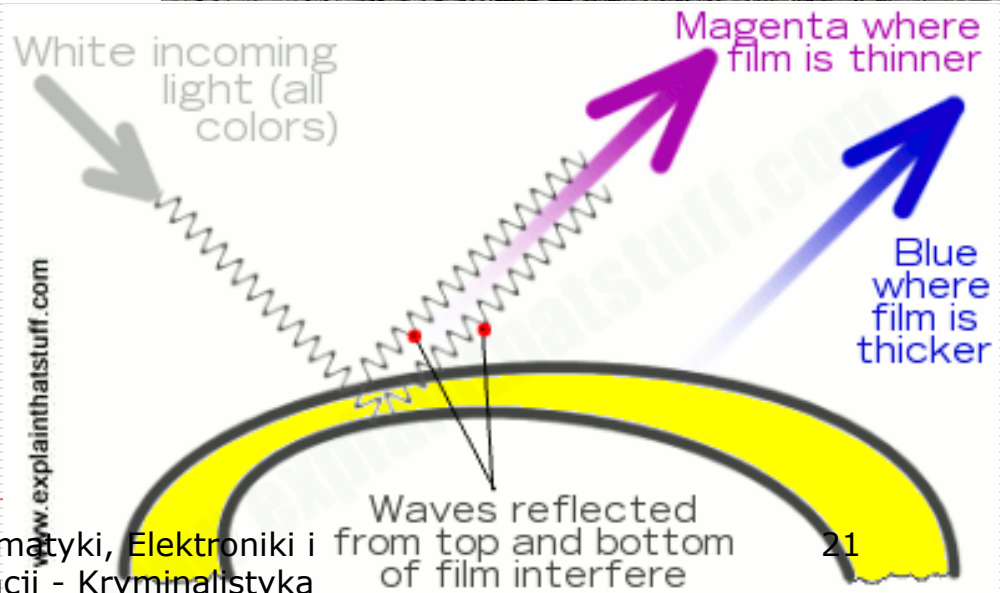
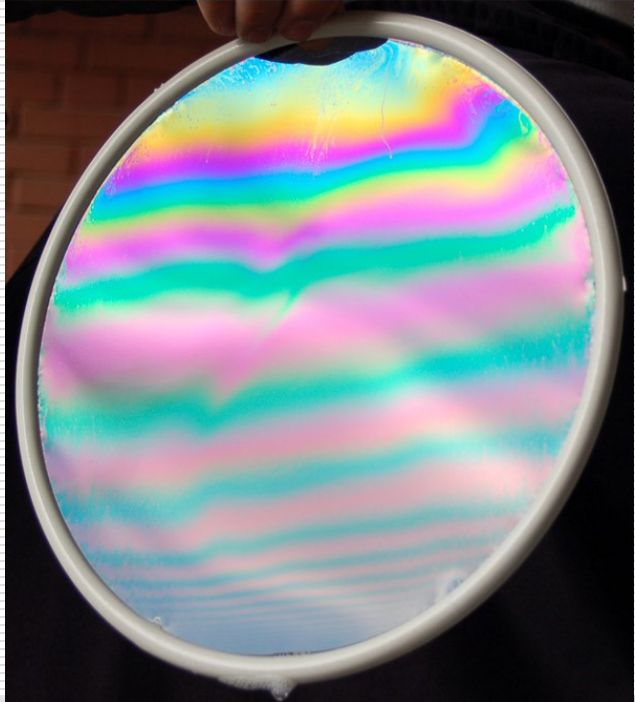
Maksimum interferencyjne:
$$2dn = \lambda\left(m + \frac{1}{2}\right)$$

Minimum interferencyjne:
$$2dn = m\lambda$$

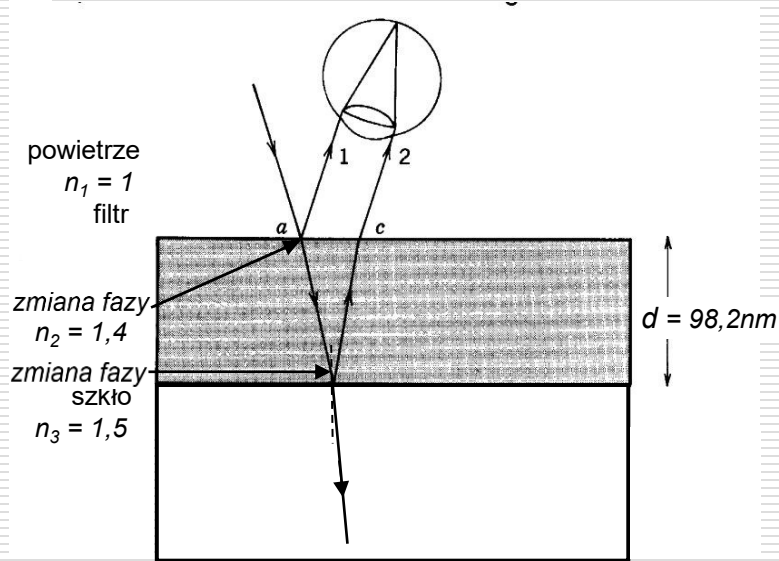


gdzie $m = 0, 1, 2, \dots$ - rząd widma

Ponieważ z punktu S wychodzą fale spójne, to dla oka maksimum/minimum interferencyjne jest obrazem punktu P .



□ Filtry optyczne



Promień 1 odbija się od powierzchni filtra ze zmianą fazy, interferując z promieniem 2, który również odbija się ze zmianą fazy!

$$n_1 < n_2 < n_3$$

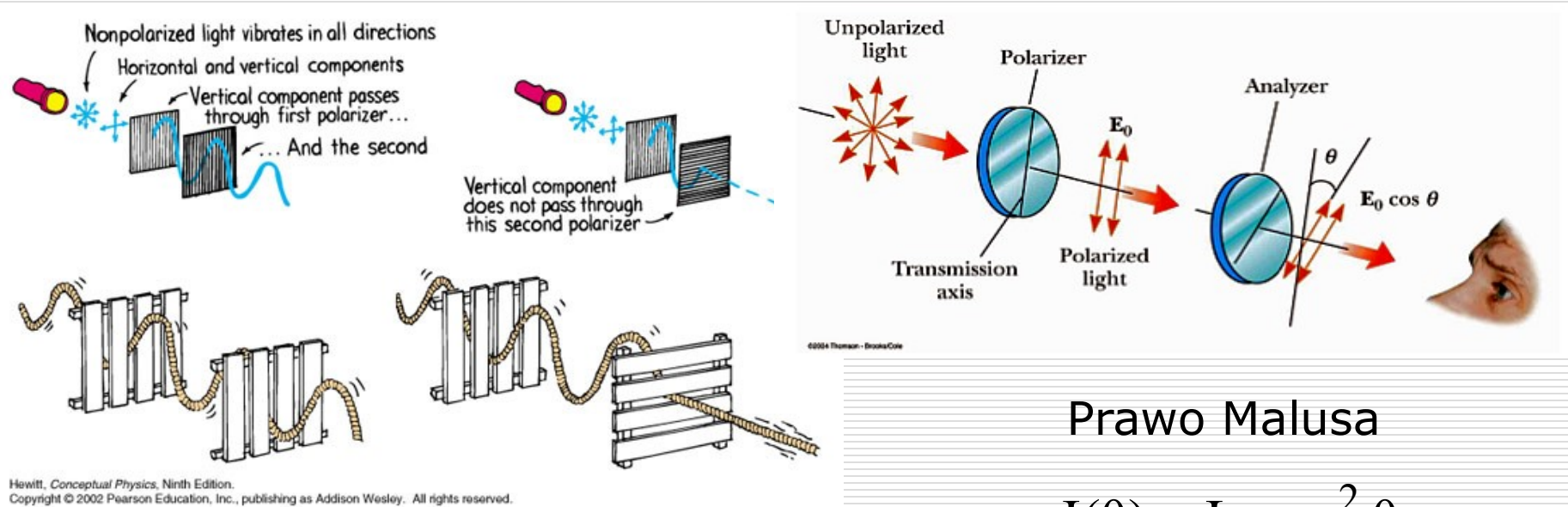
Jaka ma być grubość filtra, aby szkło pokryte filtrem nie odbijało światła (w środku widma widzialnego 550 nm)?

Minimum interferencyjne dla promienia odbitego od dolnej powierzchni filtra: $2d = (\text{nieparzysta liczba}) \lambda/2$

$$m = 0 \quad \Rightarrow \quad 2dn = \left(m + \frac{1}{2}\right)\lambda \quad d = \frac{\lambda}{4n} = \frac{550}{4 \cdot 1,4} = 98,2nm$$

Polaryzacja

Zwyczajowo przyjęto, że polaryzację fali elektromagnetycznej określa się dla jej składowej elektrycznej

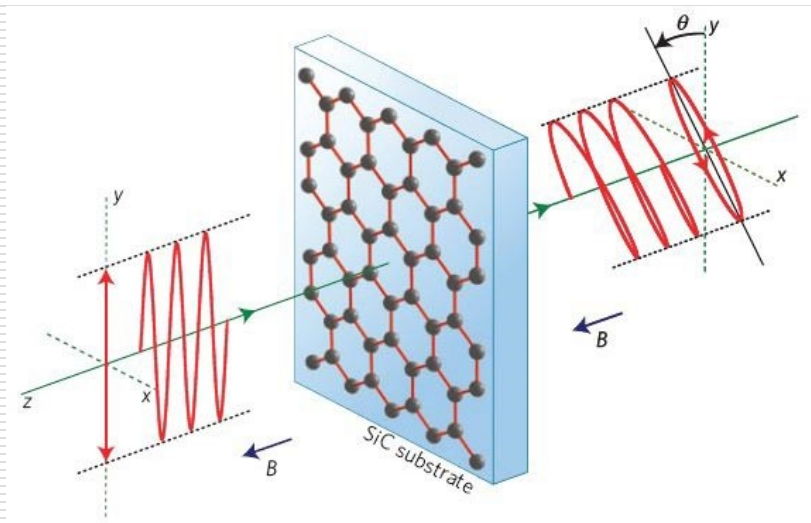
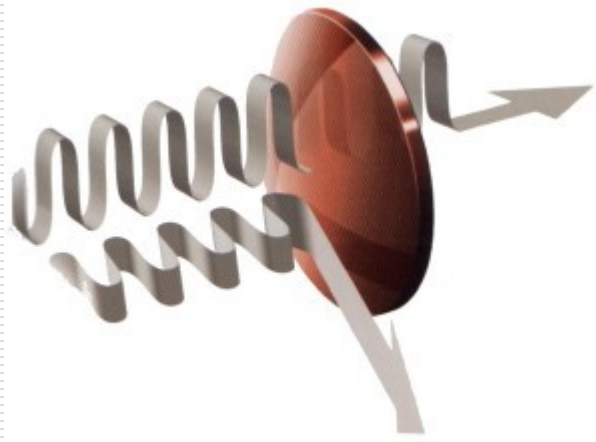


Prawo Malusa

$$I(\theta) = I_0 \cos^2 \theta$$

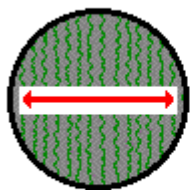
Dla fali spolaryzowanej liniowo oscylacje zaburzenia odbywają się w jednej płaszczyźnie, w kierunku prostopadłym do kierunku rozchodzenia się fali.

- Sposoby polaryzacji światła:
- polaryzatory

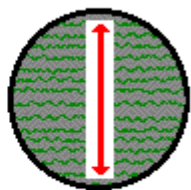


Filtrem polaryzacyjnym opatentowanym w 1929 r. w USA była płytką wykonana z nitrocelulozy, w której zatopiono kryształy siarczanu jodochininy. Kryształy te miały kształt cienkich igiełek i były w trakcie produkcji orientowane przez rozciąganie gorącego tworzywa, połączone z przykładaniem do niego silnego pola elektrycznego. Płytką otrzymana w ten sposób miała zdolność do absorbowania światła o polaryzacji poprzecznej względem kierunku orientacji kryształków i swobodnego przepuszczania światła o równoległej do kryształków polaryzacji.

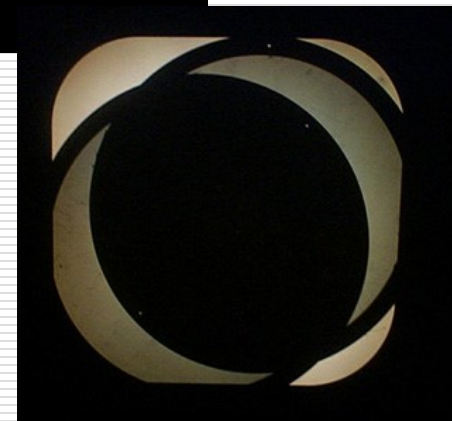
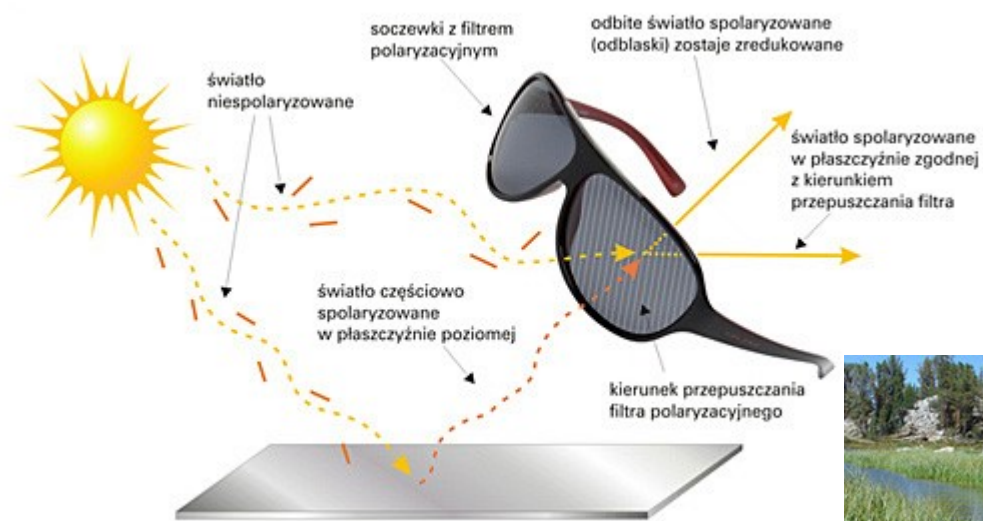
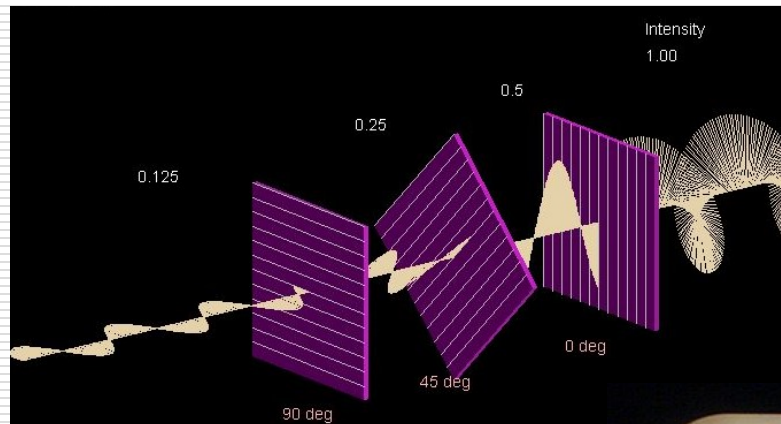
Relationship Between Long-Chain Molecule Orientation and the Orientation of the Polarization Axis



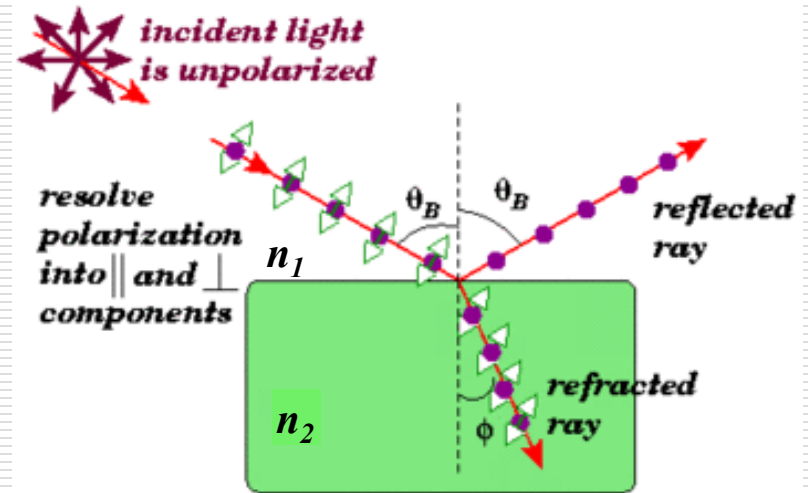
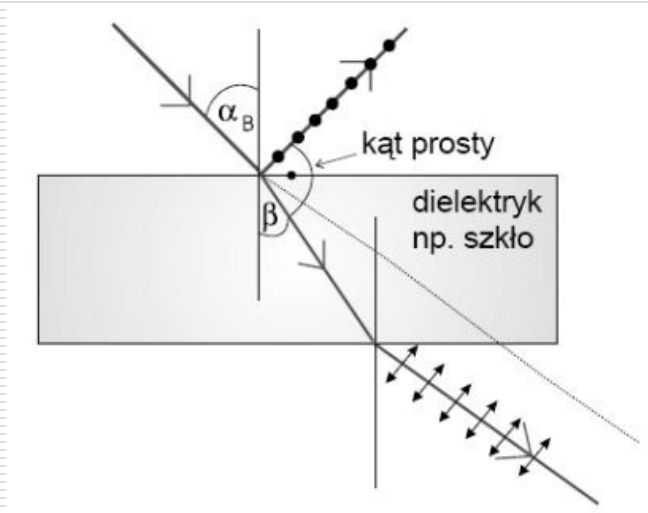
When molecules in the filter are aligned vertically, the polarization axis is horizontal.



When molecules in the filter are aligned horizontally, the polarization axis is vertical.



- Jak spolaryzować światło ?
- przez odbicie



$$\operatorname{tg} \theta_B = \frac{n_2}{n_1}$$

Prawo Brewstera

Dla odbicia np. od szkła w powietrzu

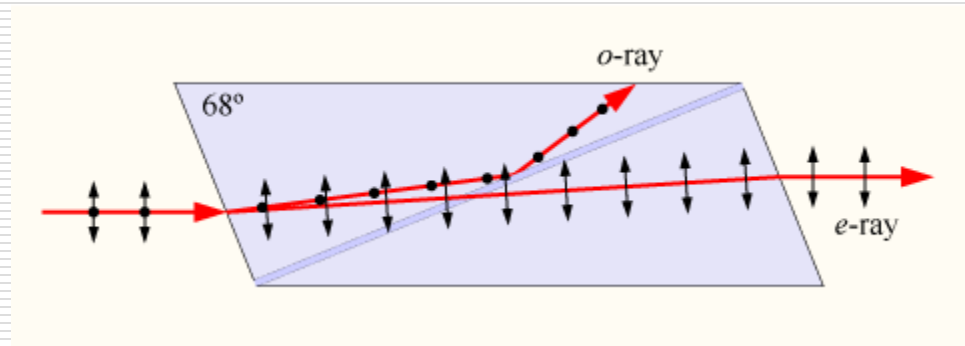
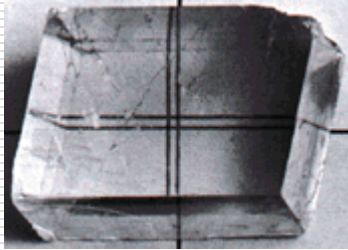
$$\operatorname{tg} \theta_B = n_{\text{szkła}}$$

Gdy niespolaryzowane światło pada na granicę dwóch ośrodków przezroczystych pod **kątem Brewstera** θ_B - promień odbity tworzy z promieniem załamanym kąt prosty, to światło odbite zostaje całkowicie, a światło przechodzące częściowo spolaryzowane liniowo.

Zjawisko polaryzacji przez odbicie zostało odkryte w 1809 r. przez Malusa.

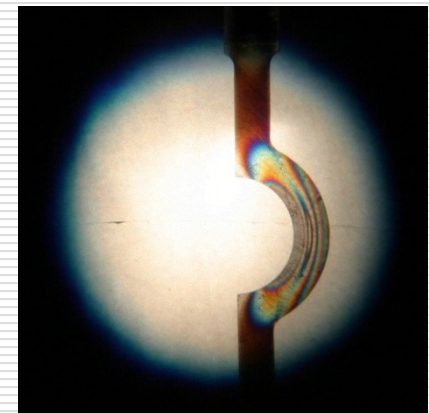
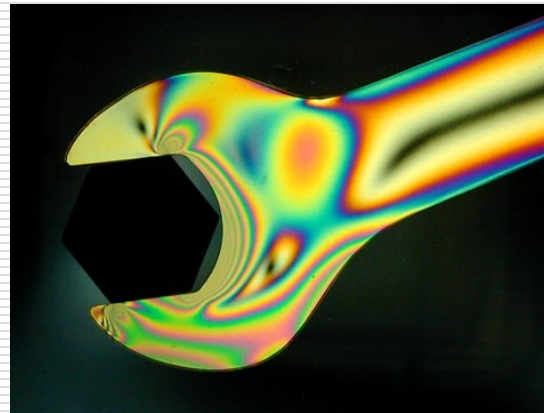
Dla innych kątów padania światła, światło odbite jest również spolaryzowane częściowo. Im kąt padania bardziej różni się od kąta Brewstera, tym stopień polaryzacji światła odbitego jest mniejszy.

- Jak spolaryzować światło ?
- kryształy dwójłomne

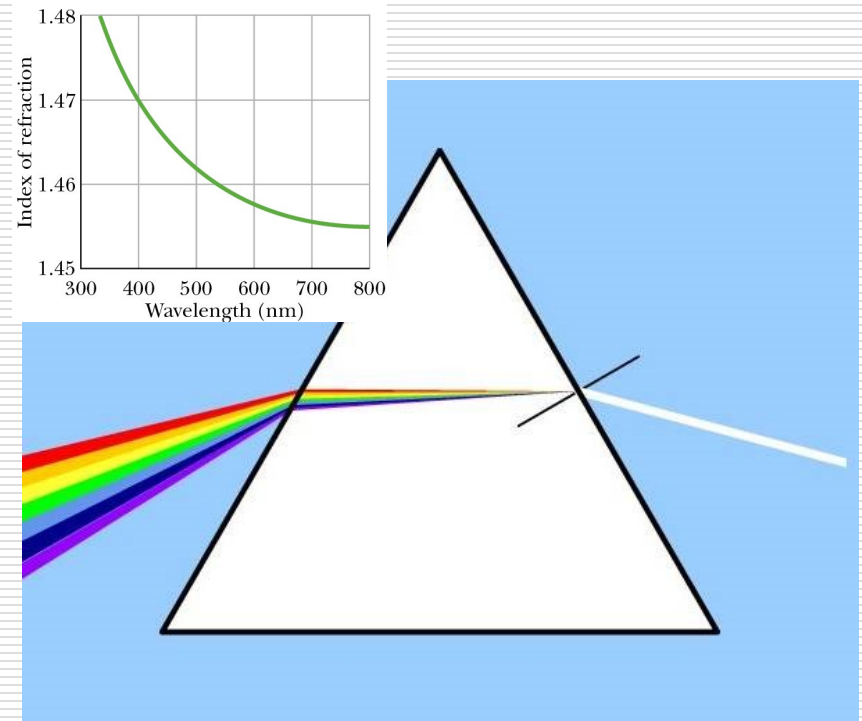
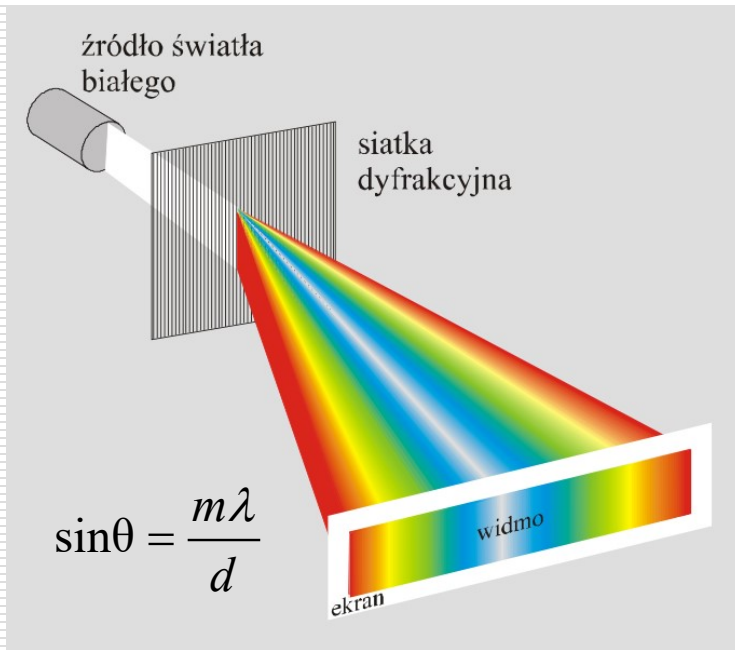


W kryształach (rutyl, kalcyt, wszystkie ciekłe kryształy) wykazujących anizotropię stałej dielektrycznej - różna prędkość światła w różnych kierunkach, a więc i współczynnik załamania zależy od kierunku.

W takim kryształach podczas załamania promień wchodzący do kryształu rozdziela się na dwa o prostopadłych polaryzacjach liniowych.



- Różnice w widmie światła rozszczepionego pryzmatem i siatka dyfrakcyjną.



Najbardziej odchylony promień:

najdłuższy - czerwony

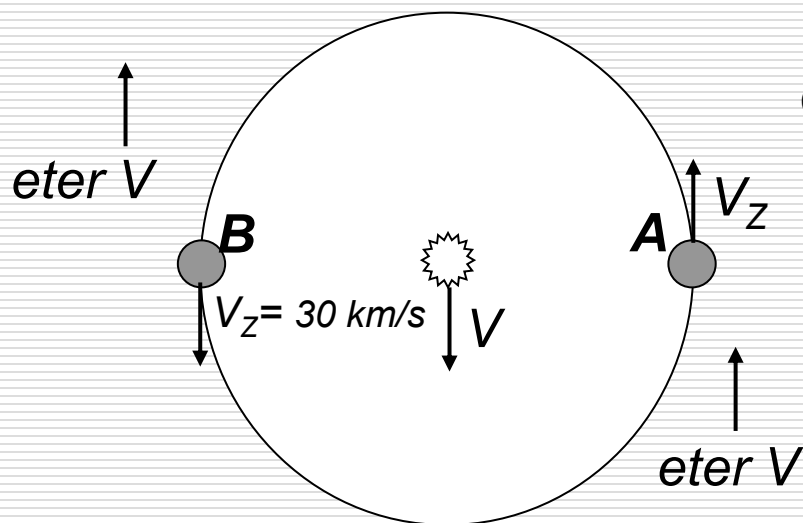
najkrótszy - fioletowy

Teoria eteru.

„Eter” – sprężysty ośrodek rozchodzenia się fal świetlnych, bezwzględny układ odniesienia. „Ośrodek” wypełniający Wszechświat.

Teoria Maxwella – „eter” \Leftrightarrow przestrzeń, a fale i pola elektromagnetyczne to stany eteru.

Czy „eter” jest unoszony przez ciała w ruchu? Jaki jest wpływ ruchu Ziemi względem „eteru” na prędkość światła?



dla obserwatora na Ziemi (A) $c + v_z$

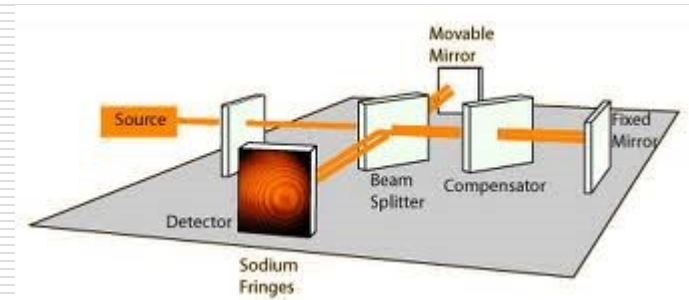
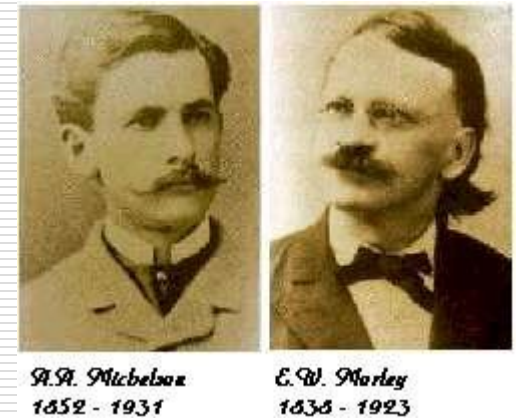
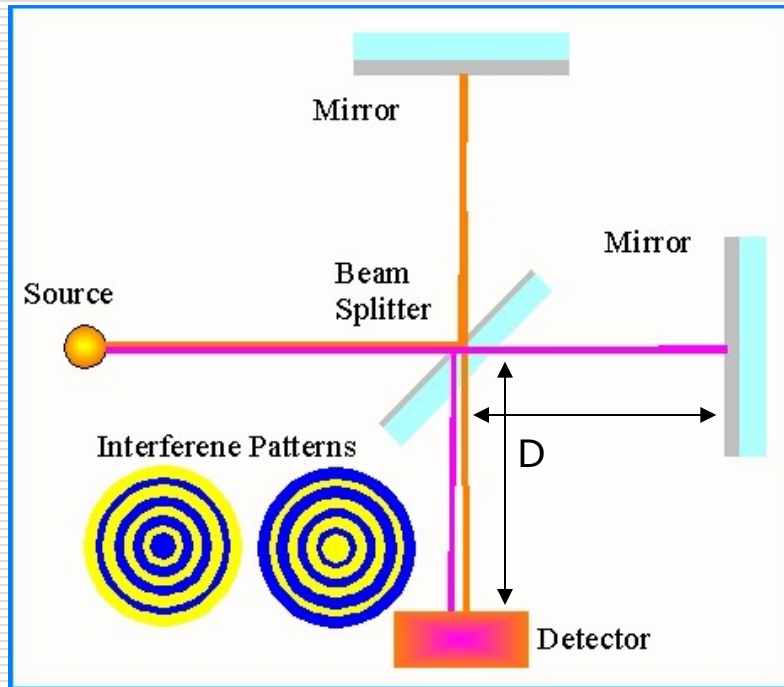
(B) $c - v_z$

prędkość światła c_R względem poruszającego się odbiornika:

$$c_R = c \pm v$$

gdzie v – prędkość odbiornika.

Doświadczenie Michelsona-Morley'a



Wynik NEGATYWNY – brak przesunięć prążków

Oszacowanie przewidywanego wyniku

$$\frac{v}{c} = \frac{30 \text{ km/s}}{3 \cdot 10^5 \text{ km/s}} = 10^{-4} \quad \text{a więc} \quad t - t' = \frac{D}{c} (10^{-4})^2 = \frac{D \cdot 10^{-8}}{3 \cdot 10^8} = \frac{D}{3} \cdot 10^{-16} \text{ s}$$

Dla $D = 3\text{m}$ (długość ramienia interferometru) otrzymujemy:

$$t - t' = 10^{-16} [\text{s}] \Rightarrow \Delta\lambda = c(t - t') = 3 \cdot 10^8 \cdot 10^{-16} = 3 \cdot 10^{-8} [\text{m}]$$

jest to efekt dobrze mierzalny !

Ale otrzymano **negatywny wynik doświadczenia** – światło emitowane przez źródło interferometru, niezależnie od jego orientacji względem ruchu Ziemi, zawsze biegnie z prędkością c względem źródła i zwierciadeł.



Fotografia interferometru Michelsona-Morley'a (1905r.)
Mt.Wilson CA