

# Wykład 17: Światło - optyka geometryczna i falowa

---

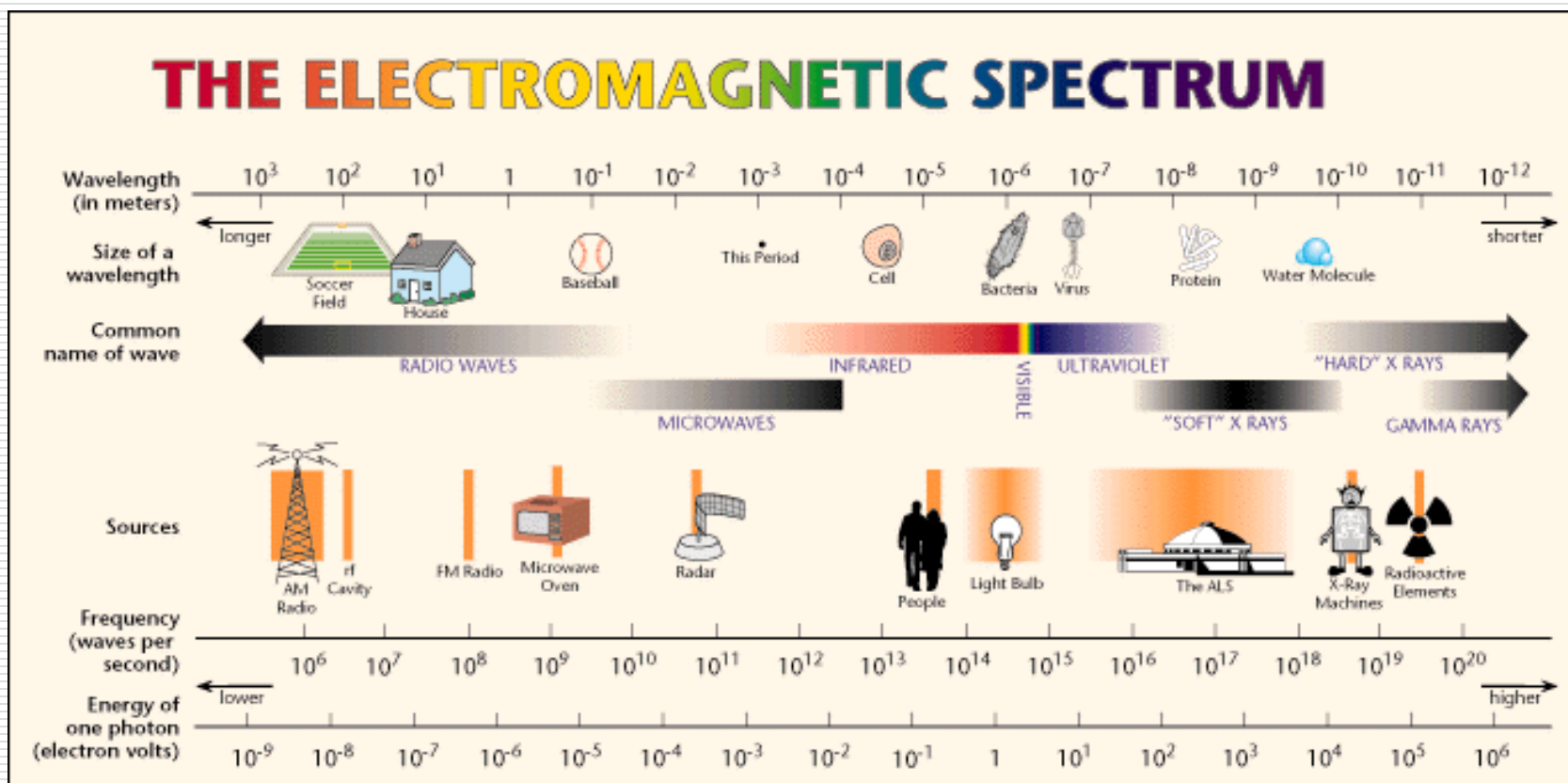
Dr inż. Zbigniew Szklarski

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

[szkla@agh.edu.pl](mailto:szkla@agh.edu.pl)

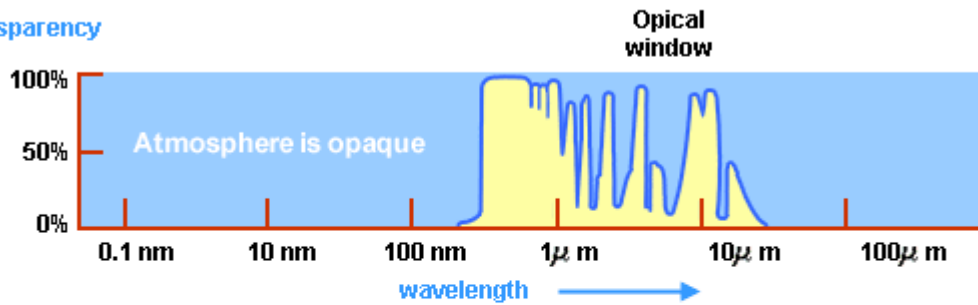
<http://layer.uci.agh.edu.pl/Z.Szklarski/>

# Widmo fali elektromagnetycznej

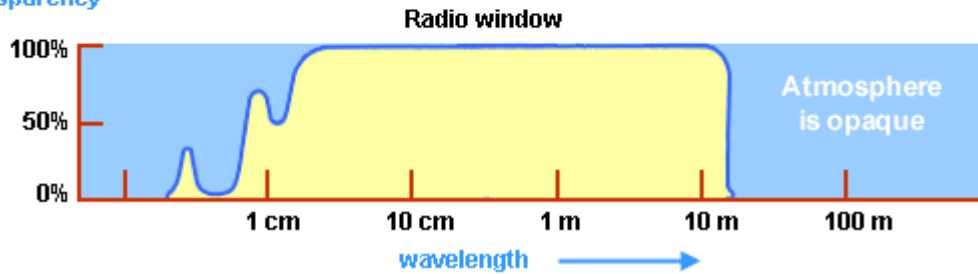


## Percentage of radiation which reaches the Earth's surface

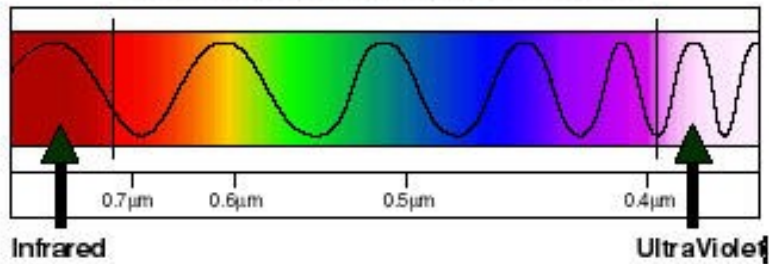
Transparency



Transparency



## Visible Light Region of the Electromagnetic Spectrum



ultrafioletowy

niebieski

zielony

czerwony

podczerwony

względna intensywność

PCF\*

Ludzkie Oko

\*promieniowanie czynne fotosyntetycznie

Światło Słoneczne

4000 K

Temperatura  
Barwowa

6500 K

2100 K

nanometry

300

400

500

600

700

800

# Pomiar prędkości światła



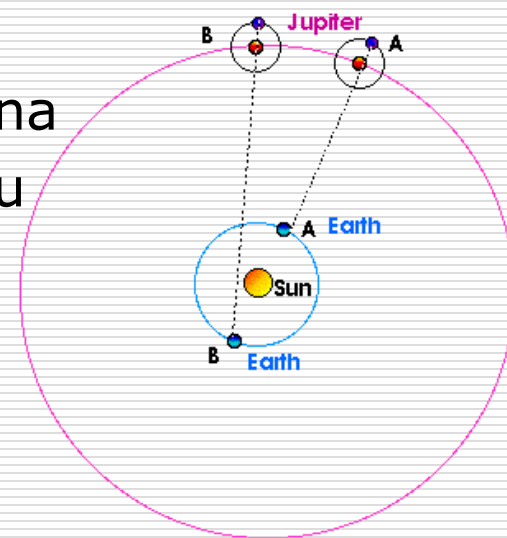
- Galileusz (1600r. ?) latarnie w odległości ok. 1,6 km



**Wniosek:** Jeśli nie nieskończona to niezwykle duża

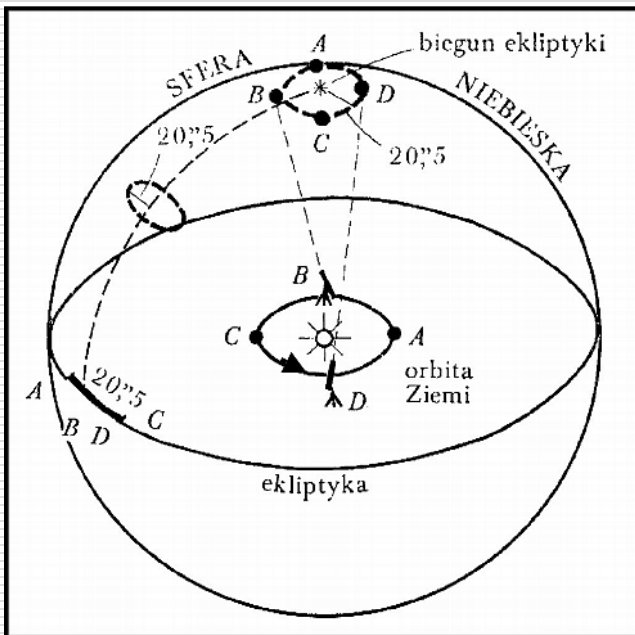
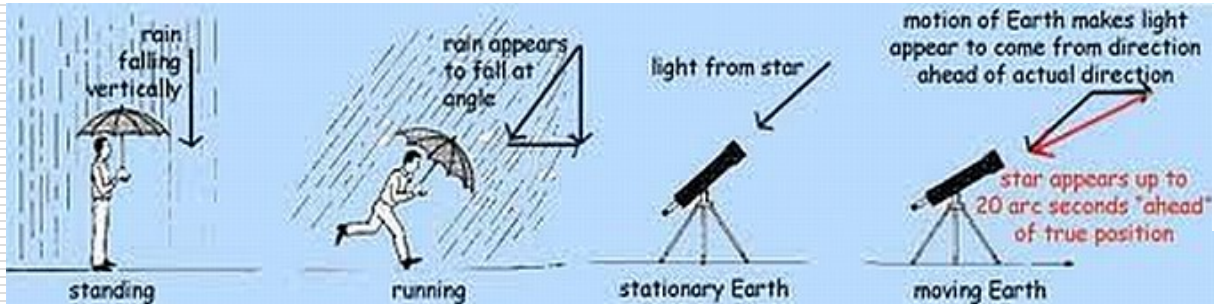
$$(t = 11 \cdot 10^{-6} \text{ s})$$

- O.Roemer (1675r.) - metoda astronomiczna zaćmienia księżyców Jowisza – co pół roku występuje różnica czasu wyjścia Io z cienia Jowisza – ok. 16,5 min.

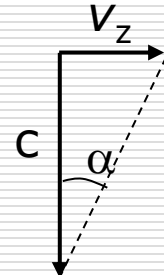
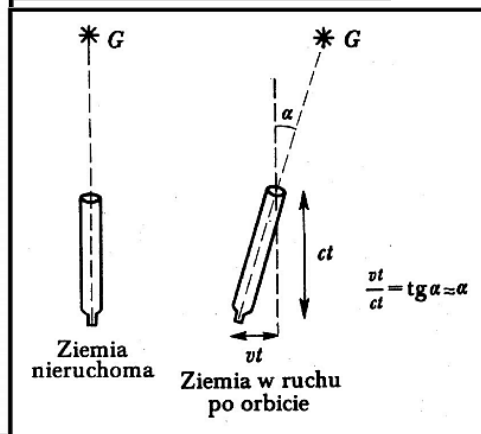
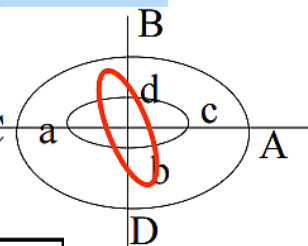


**Wynik:** ok. 215 000km/s

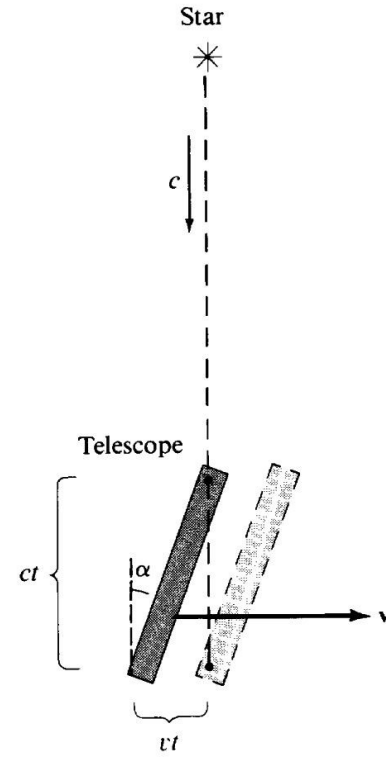
□ J. Bradley (1726r.) - metoda astronomiczna – aberracja astronomiczna światła



$2\alpha = \sim 41''$

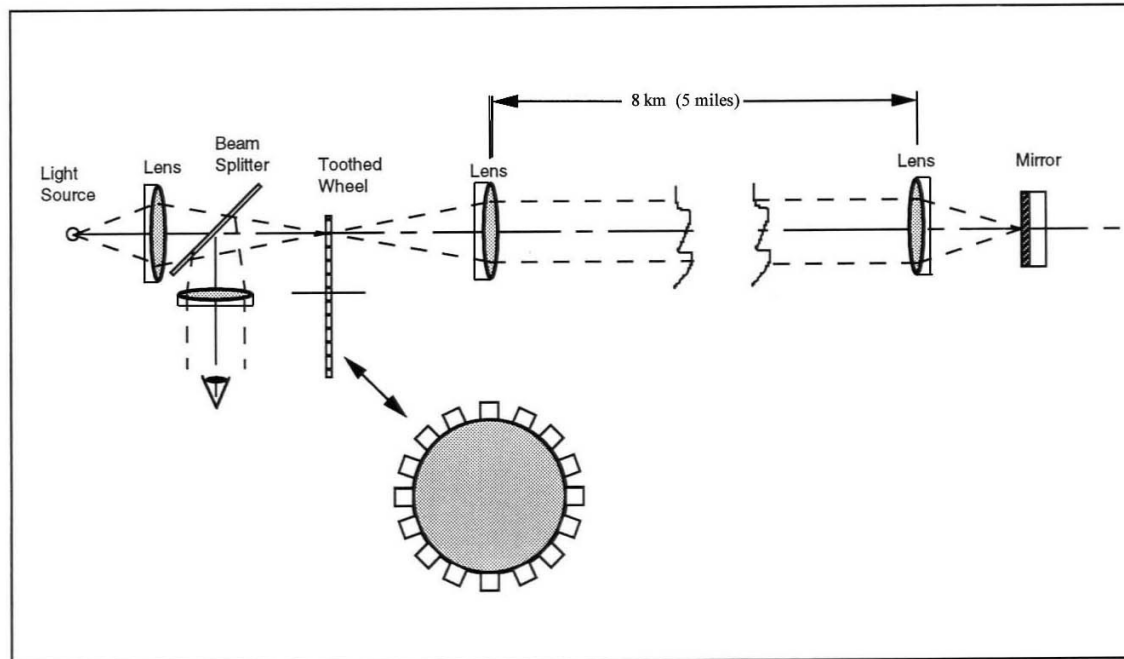


$\text{tg } \alpha = \frac{v_Z}{c} \Rightarrow$



**Wynik:** 304 000 km/s

# H.L.Fizeau (1849r.) obracające się koło zębate



**Wynik:**  
298 000 km/s

Znając: odległość  $l$  (8,6 km);

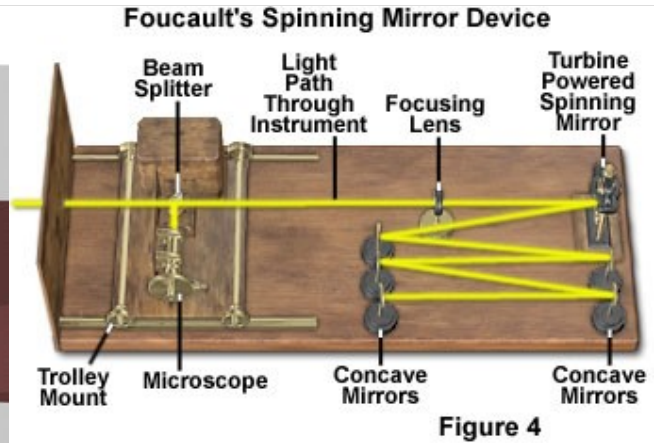
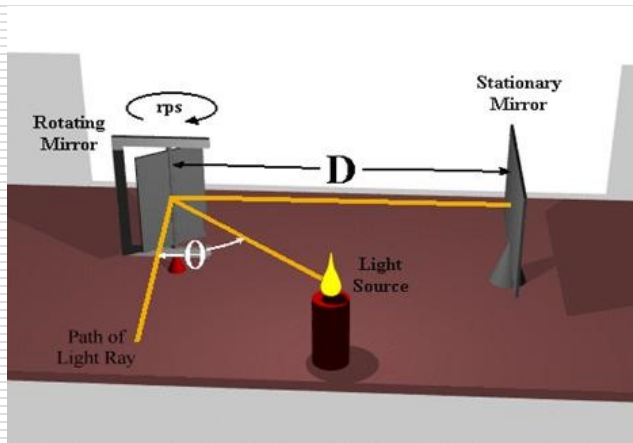
$N$  - ilość zębów

$\omega_m$  - prędkość kątową  $m$ -tego zaciemnienia,

można zapisać:

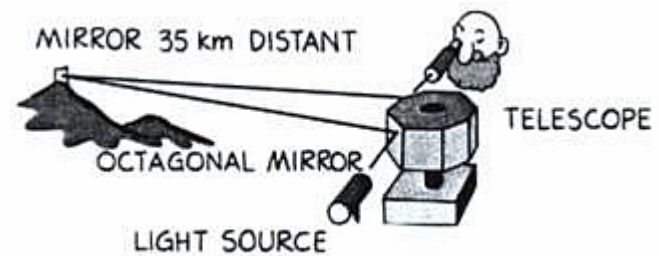
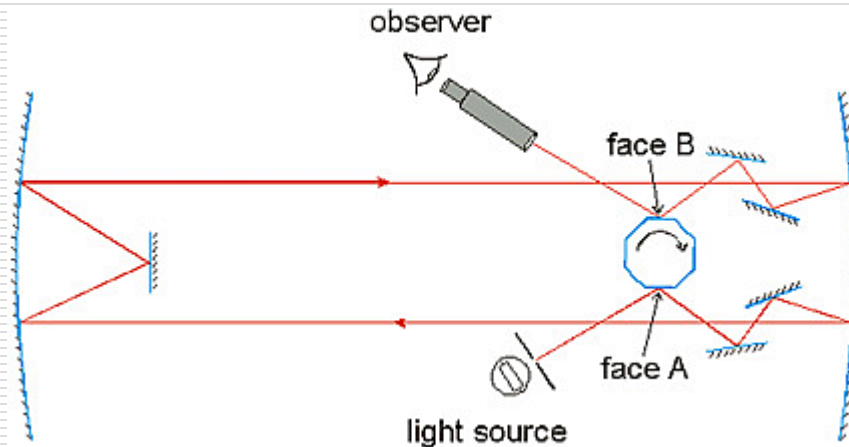
$$\frac{2l\omega_m}{c} = \left(m - \frac{1}{2}\right) \frac{2\pi}{N}$$

□ L.Foucault (1862r.) obracające się zwierciadło



**Wynik:**  
298 000 km/s

□ A.A.Michelson (1879r.) obracające się zwierciadło



**Wynik:**  
299 853 km/s



<b>Date</b>	<b>Author</b>	<b>Method</b>	<b>Result (km/s)</b>	<b>Error (km/s)</b>
1676	Olaus Roemer	Jupiter's satellites	214,000	
1726	James Bradley	Stellar Aberration	301,000	
1849	Armand Fizeau	Toothed Wheel	315,000	
1862	Leon Foucault	Rotating Mirror	298,000	+ -500
1879	Albert Michelson	Rotating Mirror	299,910	+ -50
1907	Rosa, Dorsay	Electromagnetic constants	299,788	+ -30
1926	Albert Michelson	Rotating Mirror	299,796	+ -4
1947	Essen, Gorden-Smith	Cavity Resonator	299,792	+ -3
1958	K. D. Froome	Radio Interferometer	299,792.5	+ -0.1
1973	Evanson et al	Lasers	299,792.4574	+ -0.001
1983		Adopted Value	299,792.458	

Od 1983 prędkość światła jest powiązana ze wzorcem metra i czasem 1 sekundy i wynosi (ex definitione):

$$c = 299\,792\,458 \text{ m/s}$$

Źródło: *Review of particle physics*, Physics Letters **B592**, 15 lipiec 2004

Jest to wartość dokładna, służy do definicji metra

1 metr to droga, którą światło przebędzie w próżni w czasie 1/299 792 458 sekundy

	Częstość (Hz)	c (km/s)	
fotony $\gamma$	$1,5 \cdot 10^{24}$	299790	$\pm 40$
widzialne	$5,4 \cdot 10^{14}$	299792,4562	$\pm 0,0011$
podczerwień	$2,5 \cdot 10^{12}$	299792,2	$\pm 0,6$
mikrofale	$10^{10}$	299792,5	$\pm 1$
radar	$3 \cdot 10^8$	299794,2	$\pm 1,9$
radio	$7,5 \cdot 10^7$	299795	$\pm 30$

[wniosek z obserwacji gwiazd rozblyskowych: światło widzialne i fale radiowe dobiegają do Ziemi jednocześnie  $\Rightarrow$  prędkość jednakowa z dokładnością  $10^{-7}$ ]

# Krótką historia światła

V w. pne – pitagorejczycy: bierne obserwacje przyrody + spekulacje filozoficzne, znano podstawy optyki geometrycznej, brak danych o naturze światła,

konieczny eter bo zjawiska nie mogą zachodzić „w niczym”

III w. pne – Ptolemeusz: **Kąt** załamania proporcjonalny do kąta padania,

Arystoteles – teoria barw: światło białe i czarne rozchodzi się w eterze

X/XI w. ne Arabowie: Al.-Hazen obalił prawo Ptolemeusza o kątach padania i załamania; sekcja oka

XIII w. Witelo (PL): odwracalność biegu światła, opis budowy oka, zebranie wiedzy optycznej w jednym dziele.

XVII w. Kartezjusz (F) i niezależnie Snellius (NL)

Od III w pne

**Prawo załamania**:  $\sin\alpha / \sin\beta = \text{const}$

Światło podobnie jak dźwięk jest **falą podłużną** rozchodzącą się w eterze.

XVIII w. Newton (GB) – **teoria cząsteczkowa** światła, rozszczepienie światła w pryzmacie – **nowa teoria barw**

Hook (GB) - **teoria falowa** (analogia dźwięku), brak wyjaśnienia polaryzacji

XIX w. 1817 Young (GB) – **światło jest falą poprzeczną**, rozchodzącą się w eterze

1864 Maxwell (GB) teoria fal elektromagnetycznych (w tym światła), eter nie jest niezbędny

1881 Michelson, Morley (USA) udowodnienie że **eter nie istnieje**

1899 Lenard (D) efekt fotoelektryczny **nie do wyjaśnienia** na gruncie **teorii falowej**

XX w. 1900 Planck (D) – teoria kwantów

1905 Einstein (D) – **teoria fotonów**

1923 Compton (USA) potwierdzenie, że foton, to kwant energii

1924 de Broglie (F) – cechy falowe wykazują wszystkie cząstki materialne

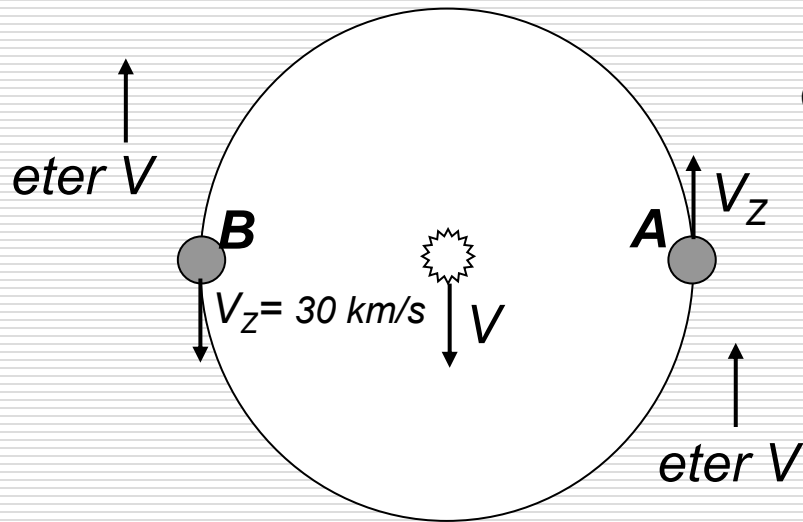
**A ZATEM ŚWIATŁO MA CECHY FALI I CZĄSTECZKI JEDNOCZEŚNIE**

20... ??? ( ?) - ....?

# 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)  $c + v_Z$

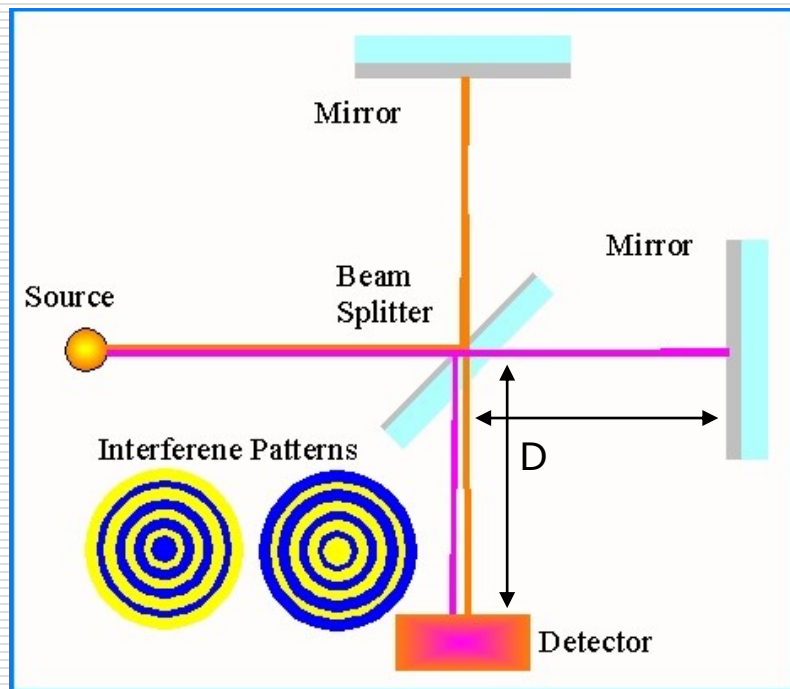
(B)  $c - v_Z$

prędkość światła  $c_R$  względem poruszającego się odbiornika:

$$c_R = c \pm v$$

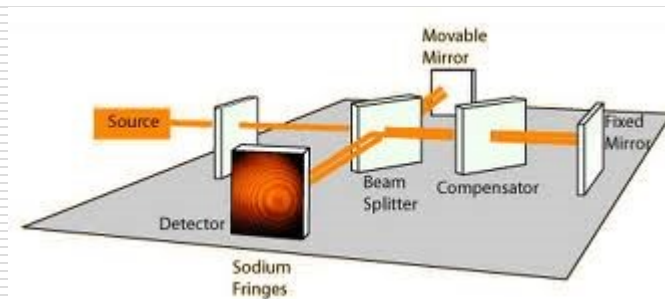
gdzie  $v$  – prędkość odbiornika.

# Doświadczenie Michelsona-Morley'a



*A.A. Michelson*  
1852 - 1931

*E.W. Morley*  
1838 - 1923



**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



# Optyka geometryczna: Światło - podstawy

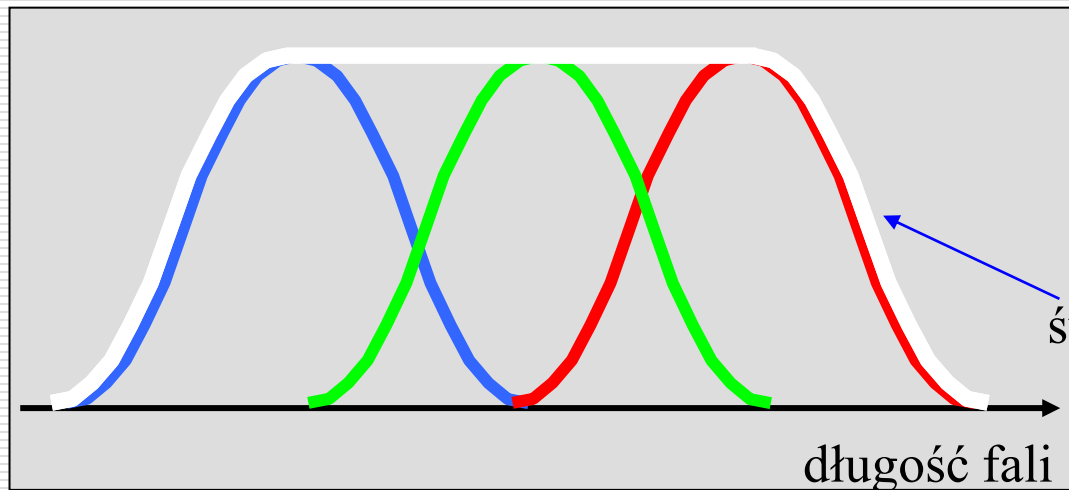
Color	Wavelength
violet	380–450 nm
blue	450–495 nm
green	495–570 nm
yellow	570–590 nm
orange	590–620 nm
red	620–750 nm

## □ Światło białe

Światło – fala elektromagnetyczna o długości od ok. 380 nm – 780 nm. Światło białe stanowi idealną mieszaninę barw.

Receptory w oku odbierają jedynie trzy długości fal, odpowiadające barwom: czerwonej, zielonej i niebieskiej. Zmieszane barwy:

niebieska, zielona i czerwona tworzą wrażenie światła białego



światło białe

# Zasada Fermata

---

Pierre de Fermat (1601-1665): „*Promień świetlny poruszający się (w dowolnym ośrodku) od punktu A do punktu B przebywa **najkrótszą** możliwie **drogę optyczną**, czyli taką, na której przebycie potrzebuje **minimalnego** czasu.*”

$$t = \int \frac{ds}{v} \quad \Rightarrow \quad t = \frac{1}{c} \int n ds = \frac{\text{droga optyczna}}{c}$$

Minimalizacja czasu to minimalizacja drogi optycznej

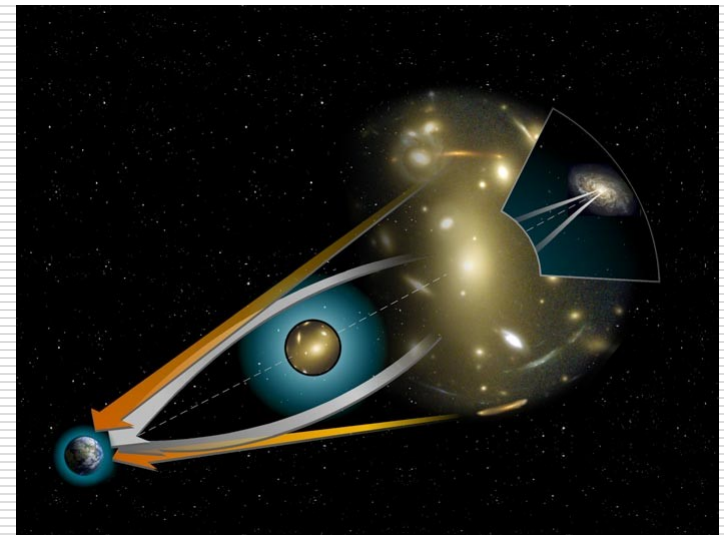
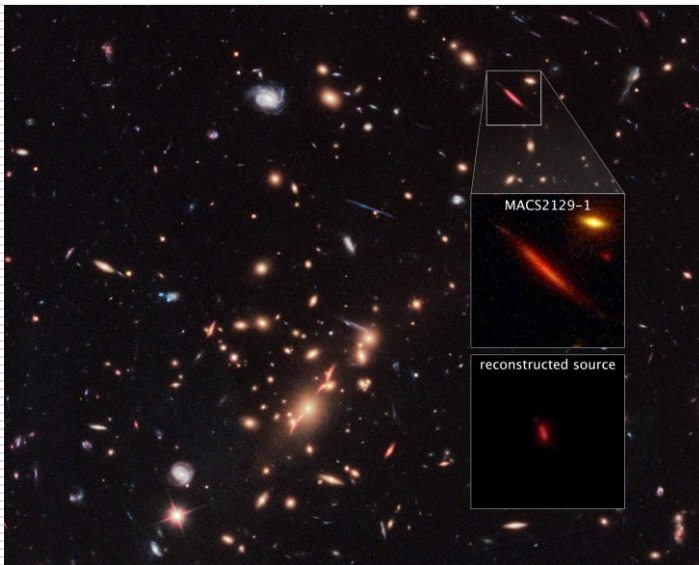
Zasada Fermata tłumaczy prostoliniowy bieg światła w ośrodku jednorodnym, można z niej wyprowadzić prawo odbicia i prawo załamania.

## Ogólniejsze sformułowanie:

Światło przebiegające między dwoma punktami wybiera drogę, na przebycie której trzeba zużyć minimum lub maksimum czasu (zazwyczaj minimum) w porównaniu z sąsiednimi drogami.

Klasycznie – odbicie, załamanie – przebyta przez światło droga jest minimalna.

W przypadku soczewkowania grawitacyjnego – przebywana przez światło droga jest maksymalna!

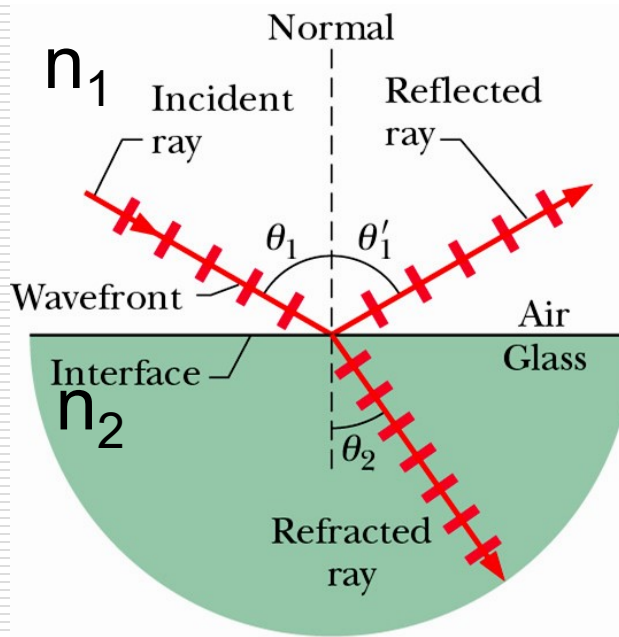


# Odbicie i załamanie światła

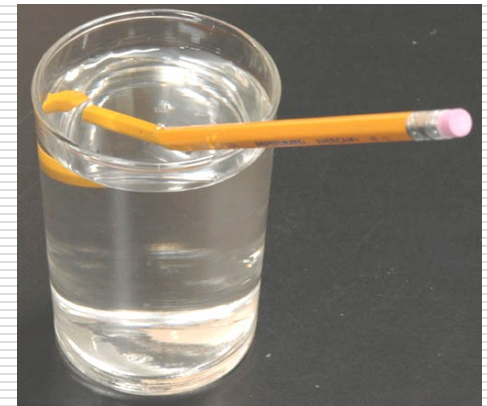
Prawo odbicia:

$$\theta_1 = \theta_1'$$

współpłaszcz-  
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  $n=c/v$

# Zasada Fermata a prawo załamania.

Światło przebywa drogę  $A \rightarrow P \rightarrow B$  w czasie:

$$t = \frac{l_1}{v_1} + \frac{l_2}{v_2} \quad \text{skoro} \quad n = \frac{c}{v} \Rightarrow t = \frac{n_1 l_1 + n_2 l_2}{c} = \frac{l}{c}$$

$$l = n_1 l_1 + n_2 l_2 = n_1 \sqrt{a^2 + x^2} + n_2 \sqrt{b^2 + (d-x)^2}$$

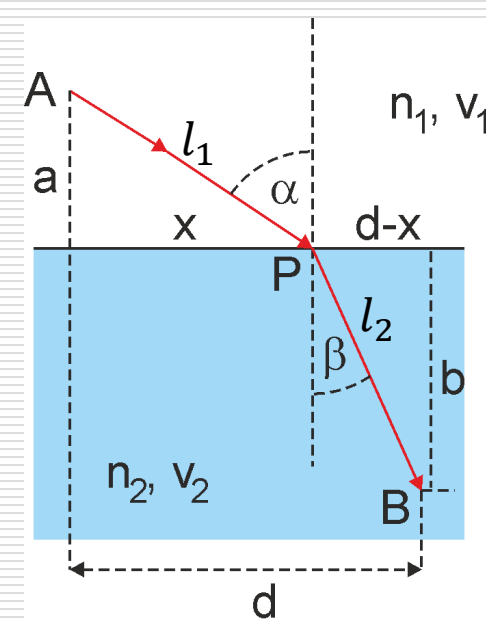
Jak dobrać  $x$  aby  $l$  była minimalna?

Warunek  $\frac{dl}{dx} = 0$  daje zależność:  $n_1 \frac{x}{\sqrt{a^2 + x^2}} = n_2 \frac{d-x}{\sqrt{b^2 + (d-x)^2}}$

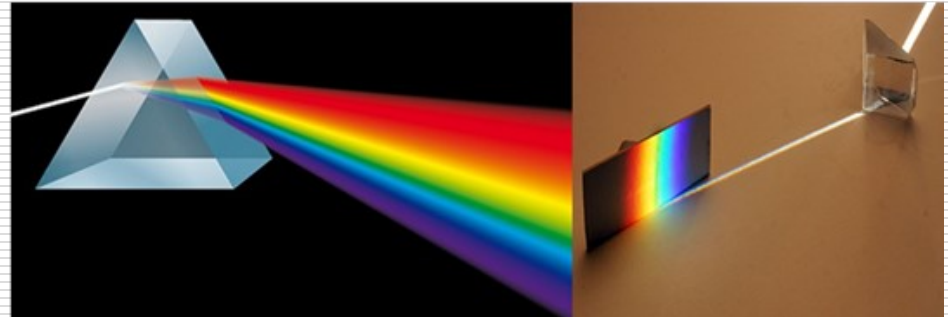
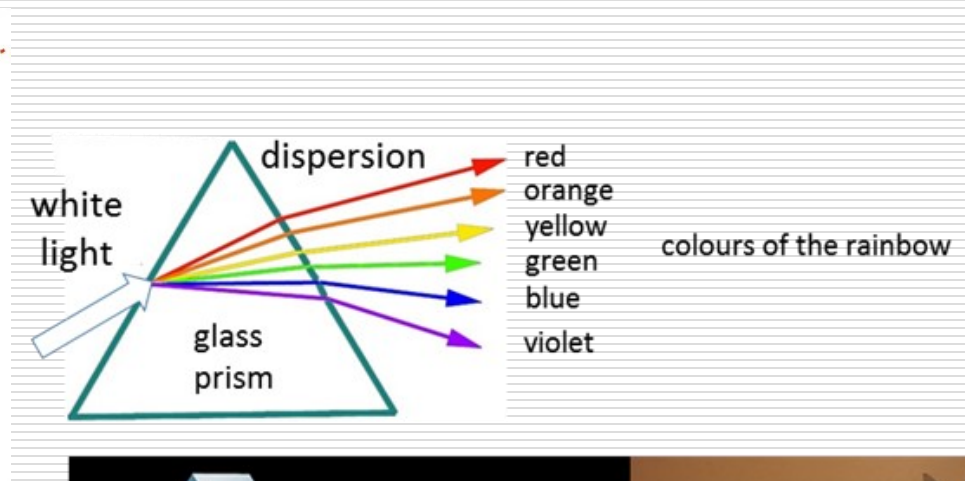
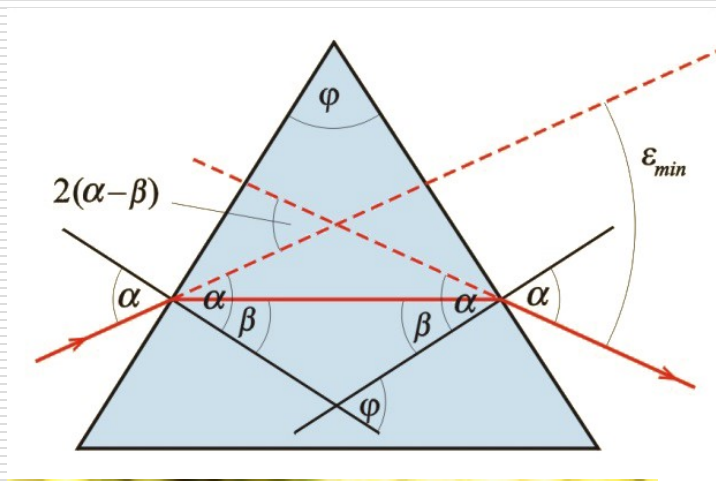
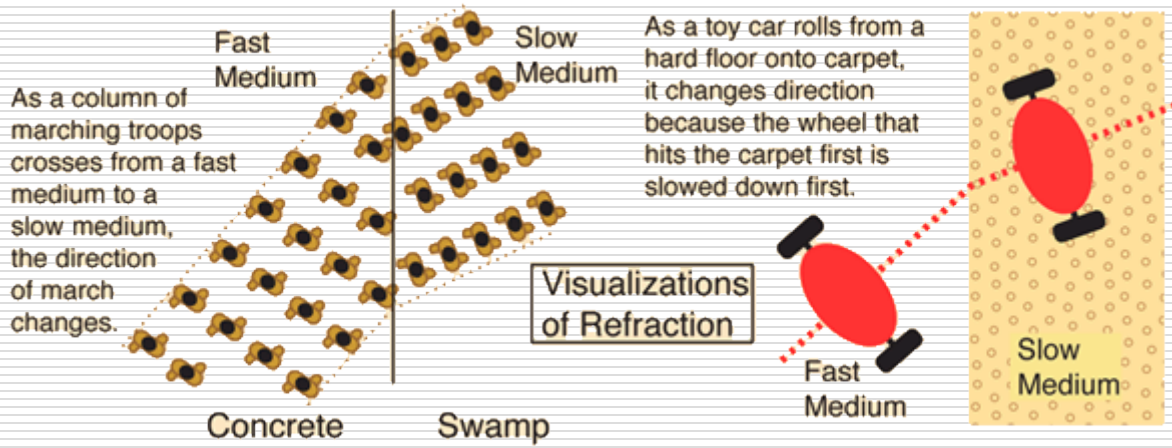
co zgodnie z rysunkiem oznacza:

$$n_1 \sin \alpha = n_2 \sin \beta$$

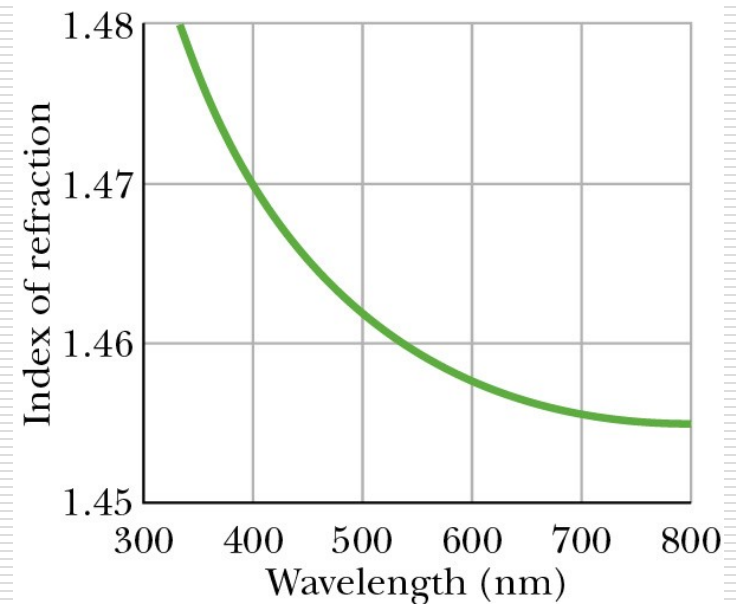
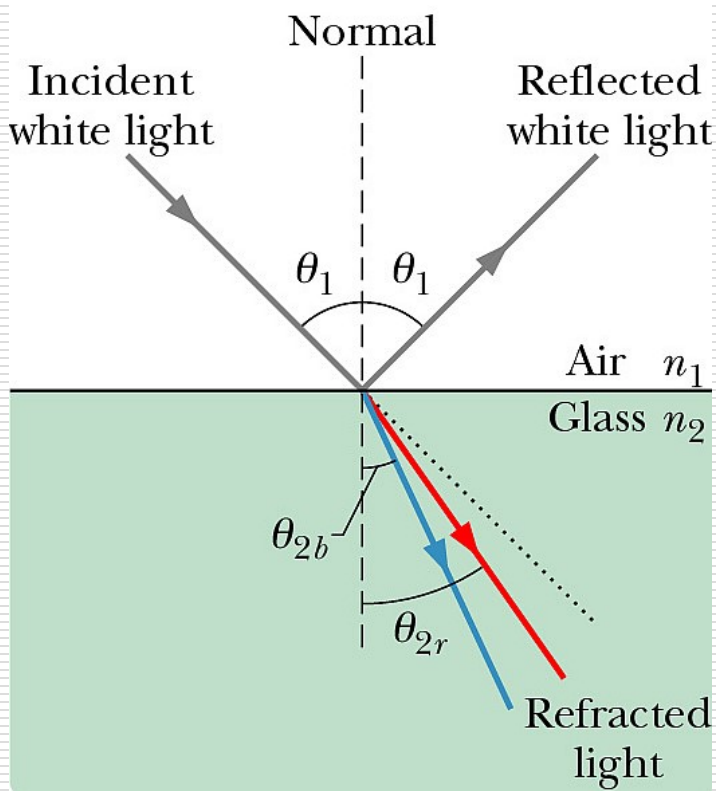
prawo Snella



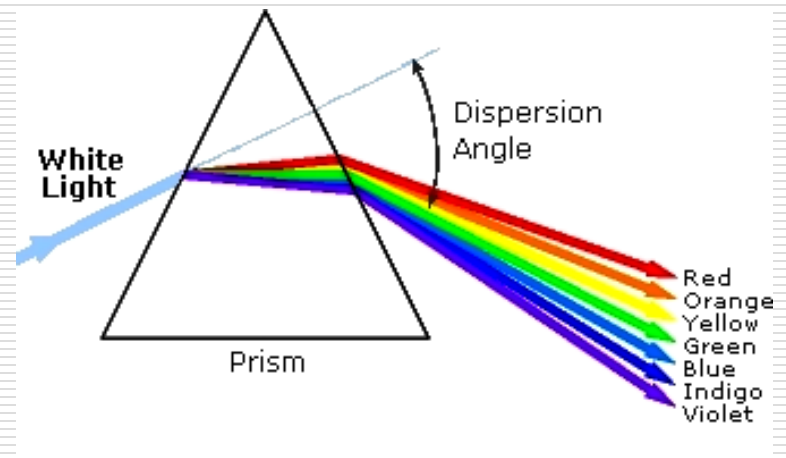
e-Fizyka © Zbigniew Kąkol, Jan Żukrowski

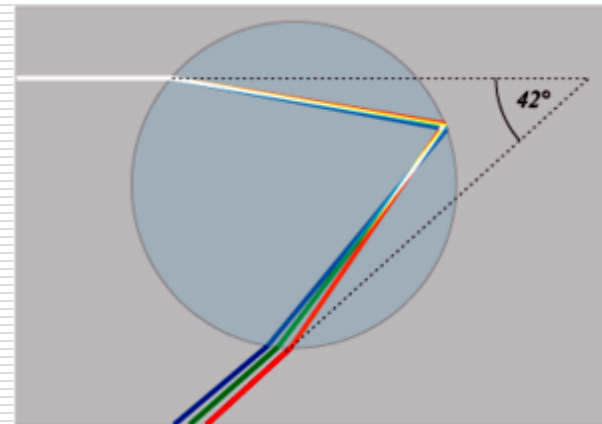


# □ Dyspersja



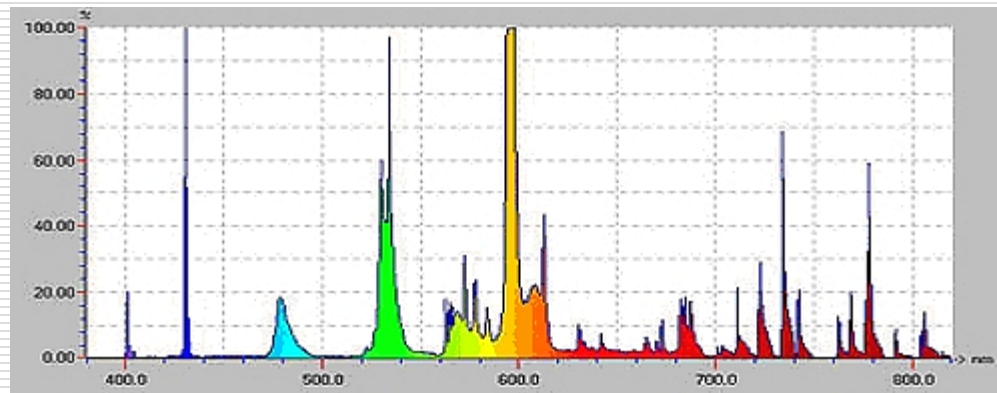
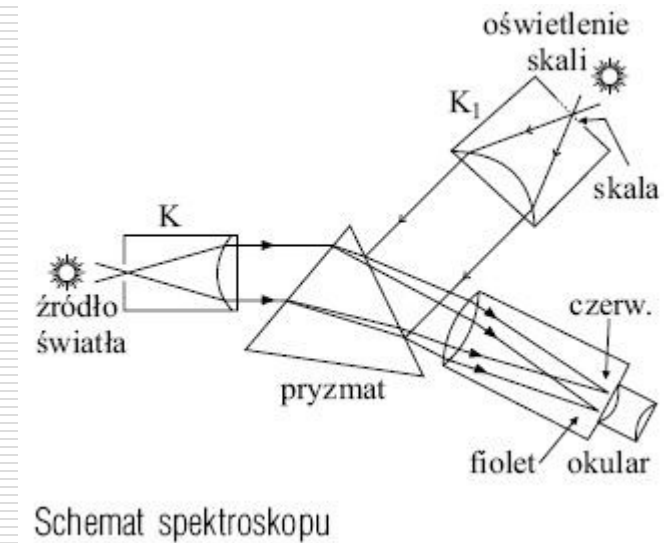
Światło monochromatyczne o określonej długości fali można utworzyć wykorzystując:  
dyspersję  $n(\lambda)$  – pryzmat  
ugięcie  $\theta(\lambda)$  – siatka dyfrakcyjna

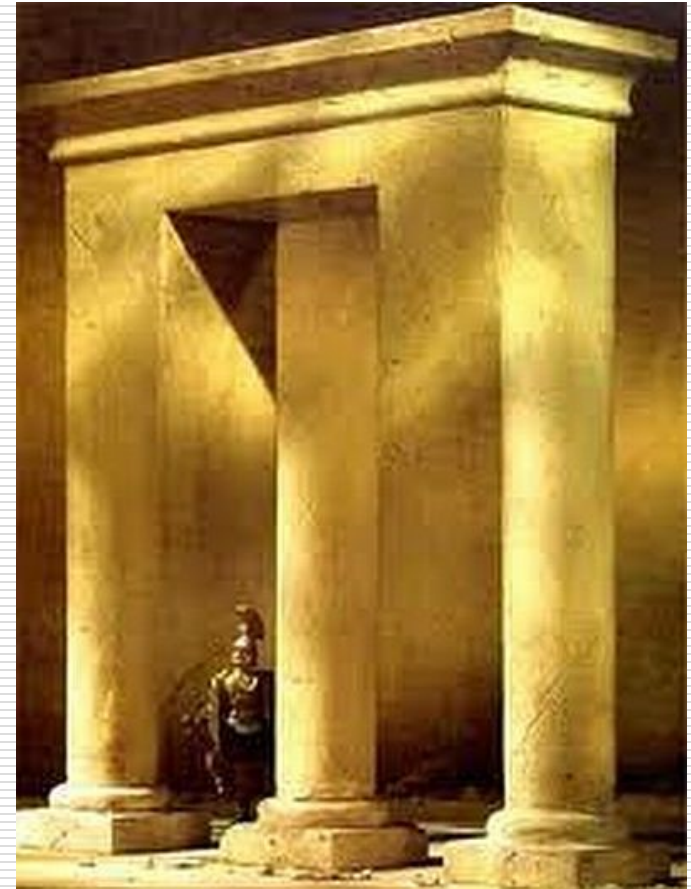


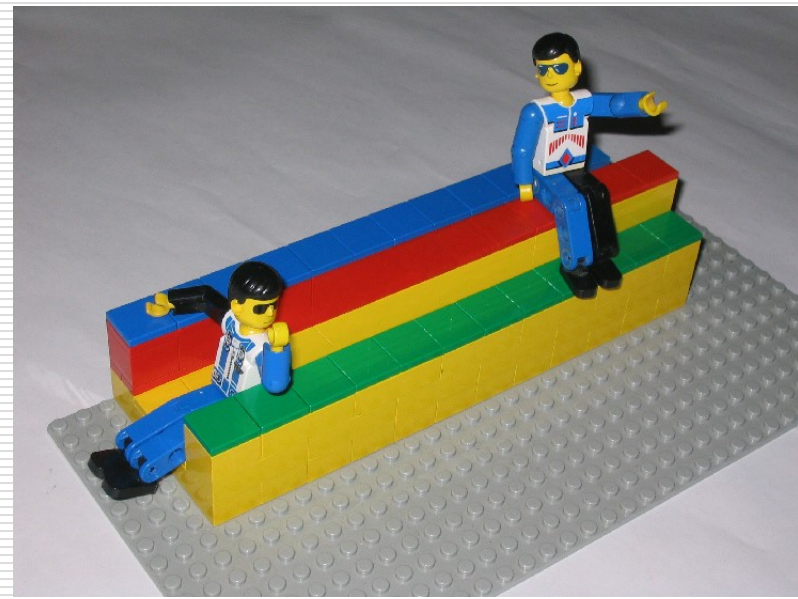


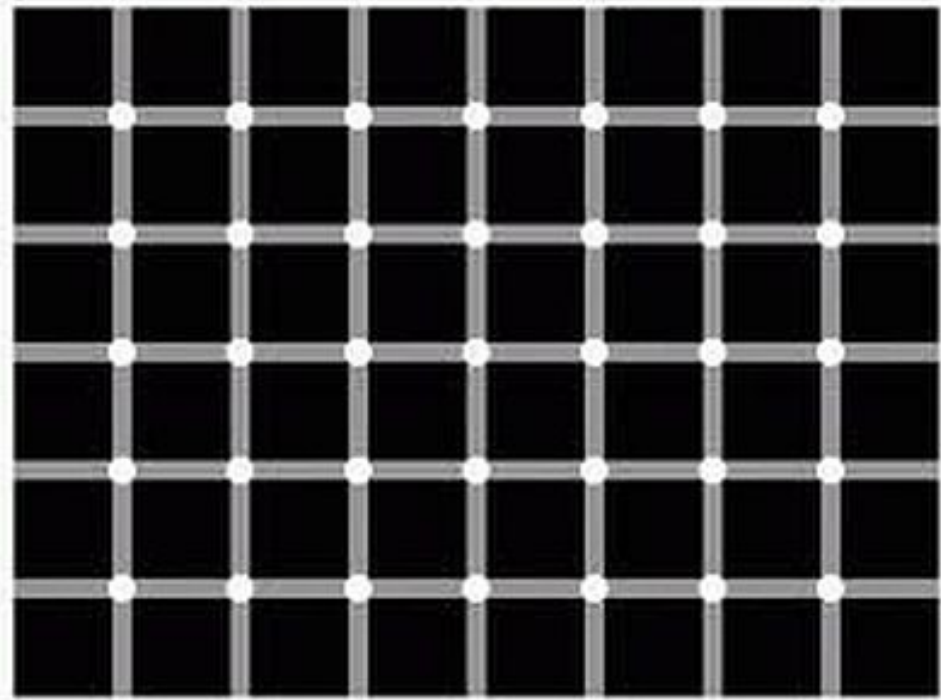
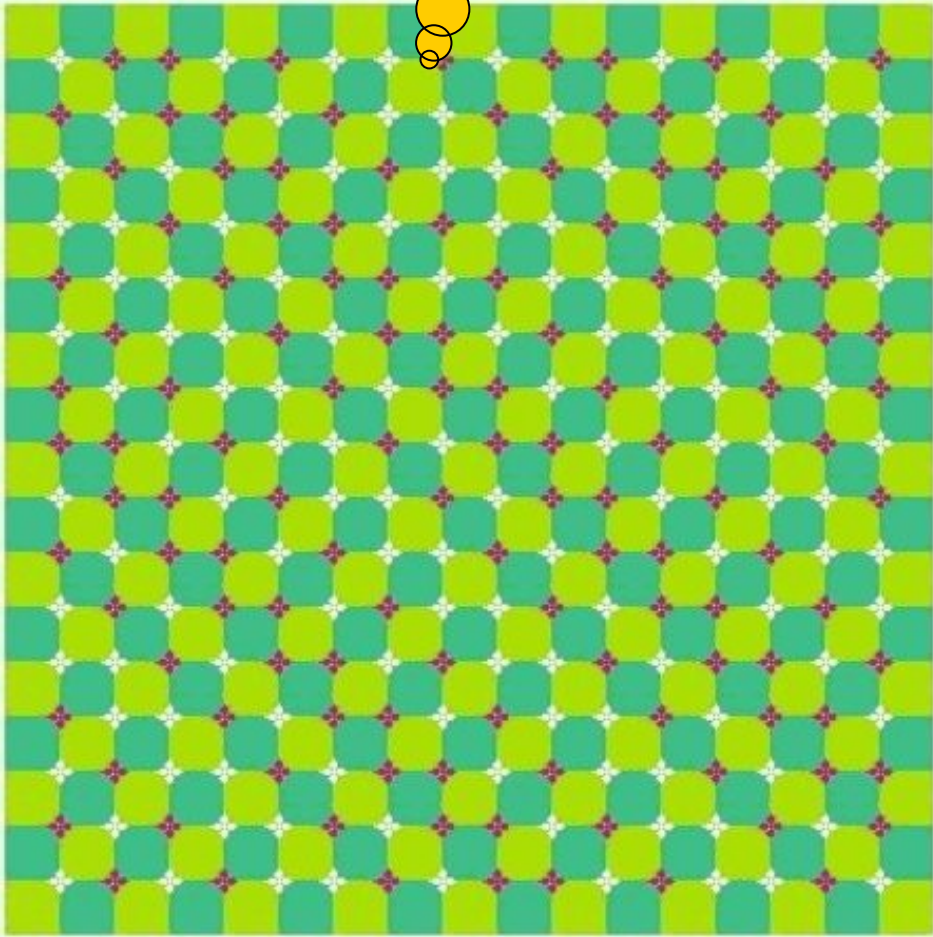


## □ Spektroskopia optyczna

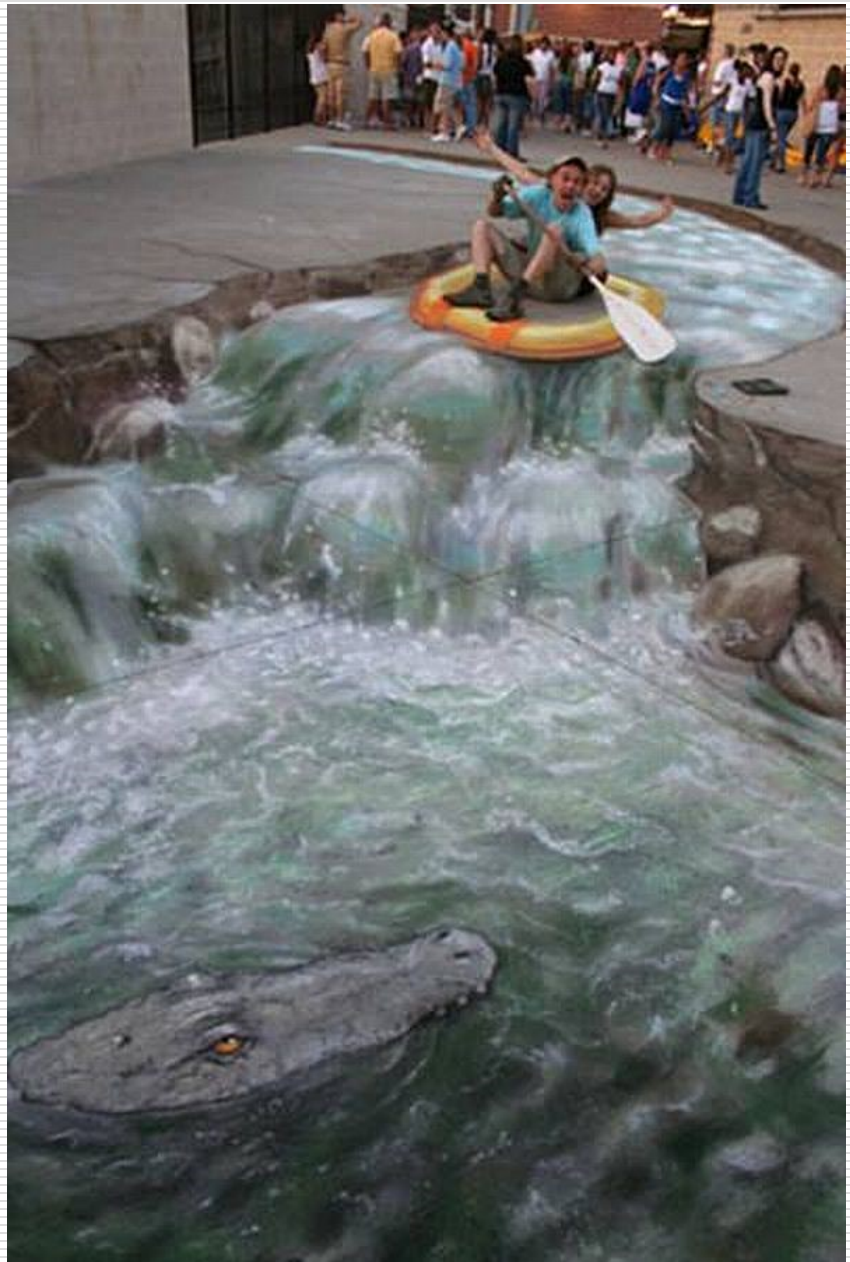








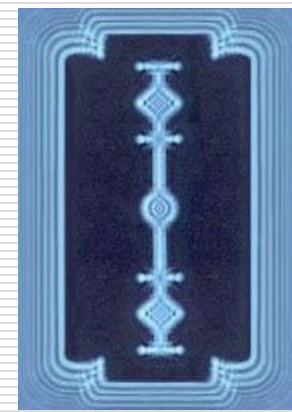
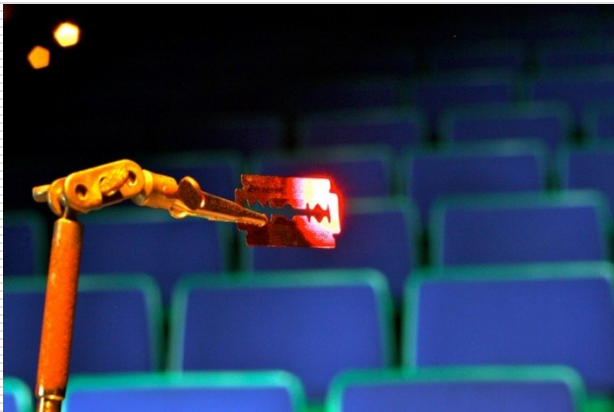
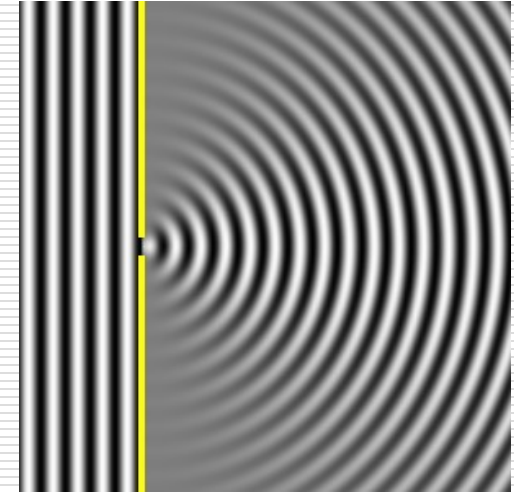
Policz czarne kropki...



# Optyka falowa: Dyfrakcja czyli ugięcie



To nie tylko rozprzestrzenianie się fali, ale w przypadku światła również powstawanie obrazu interferencyjnego.



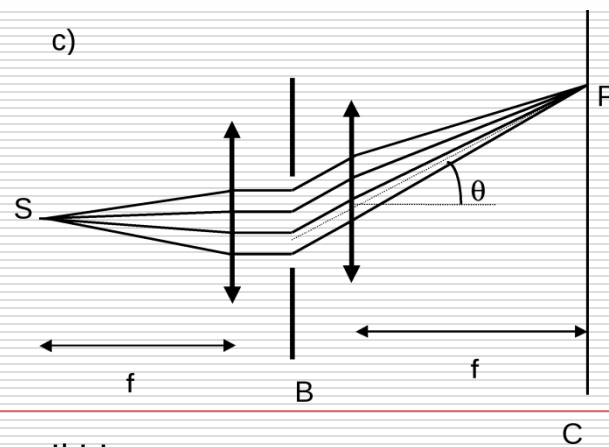
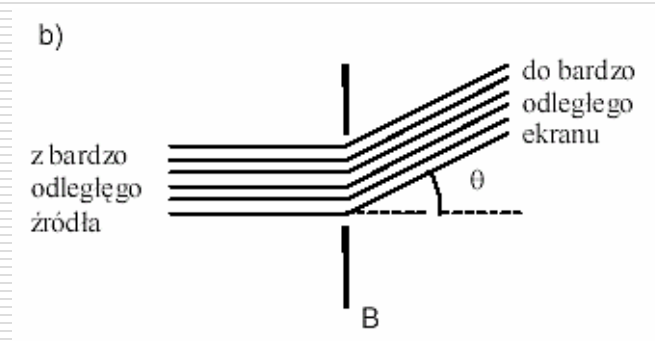
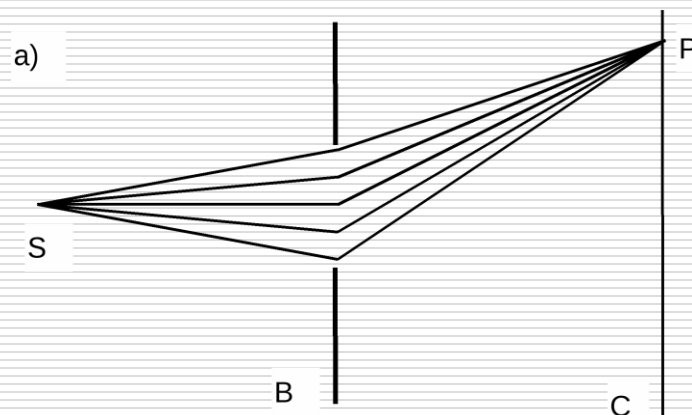
## □ Dyfrakcja Fresnela

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

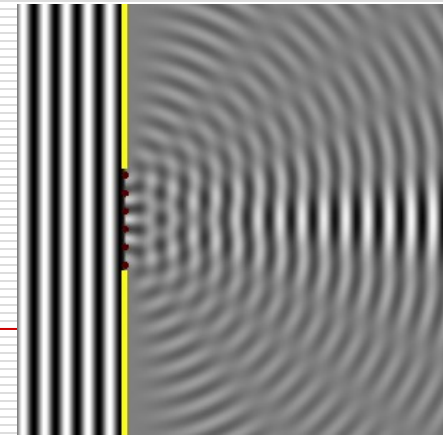
## □ Dyfrakcja Fraunhofera

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

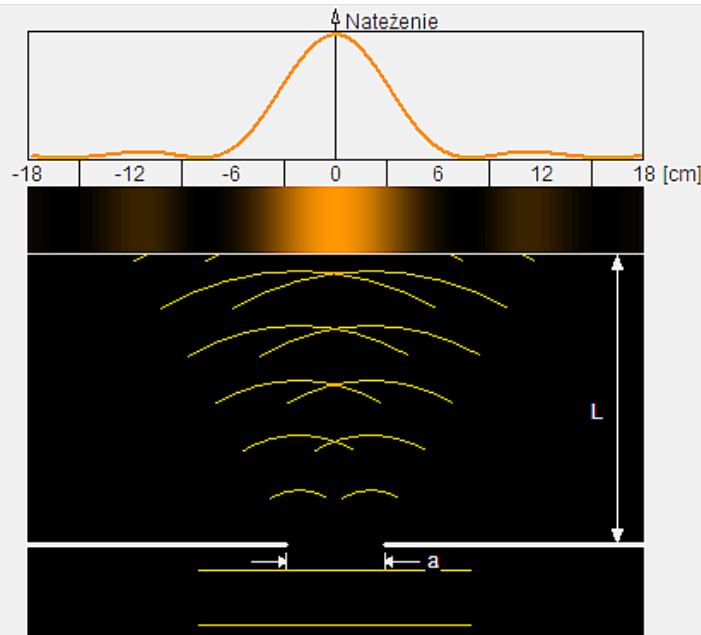
Praktyczna realizacja dyfrakcji Fraunhofera przy pomocy soczewek - przy niewielkiej odległości ekranu od szczeliny uginającej. Promienie padające i ugięte na szczeliny są równoległe.



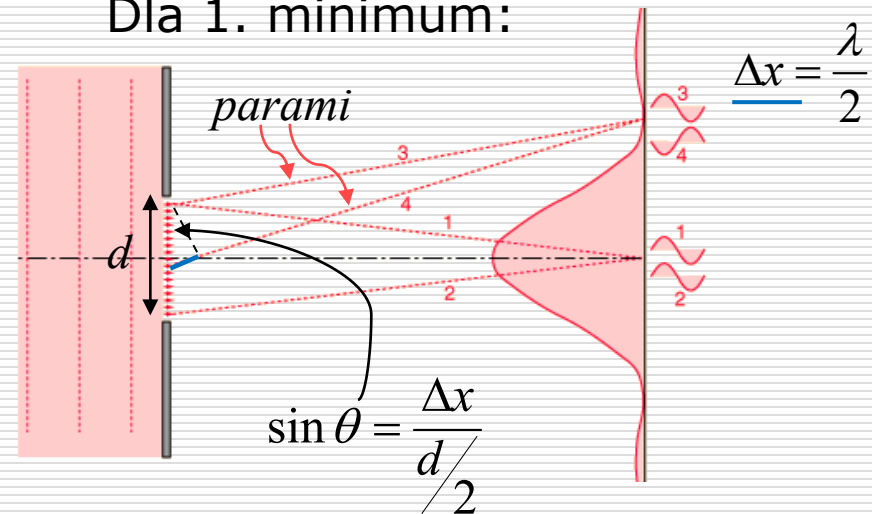
# Pojedyncza szczelina



Dyfrakcja Fraunchofera jest granicznym przypadkiem dyfrakcji Fresnela.



Dla 1. minimum:



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

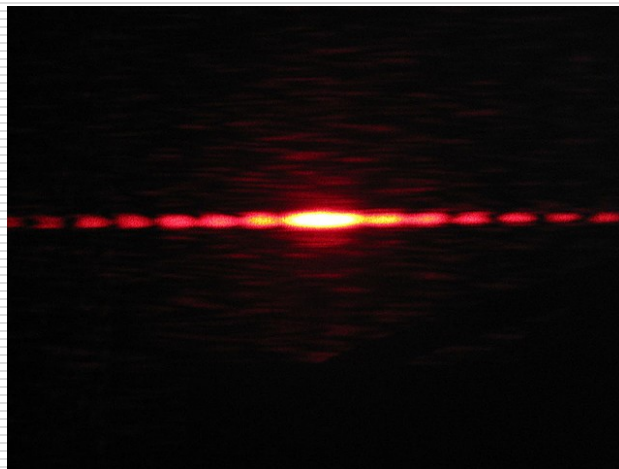
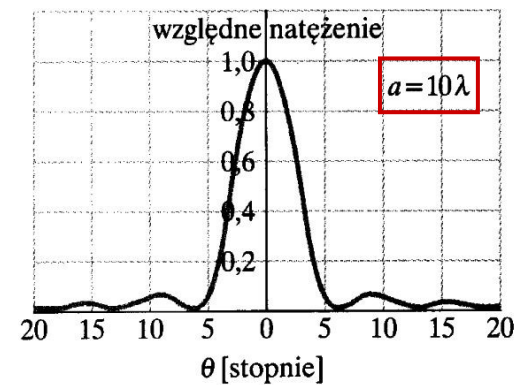
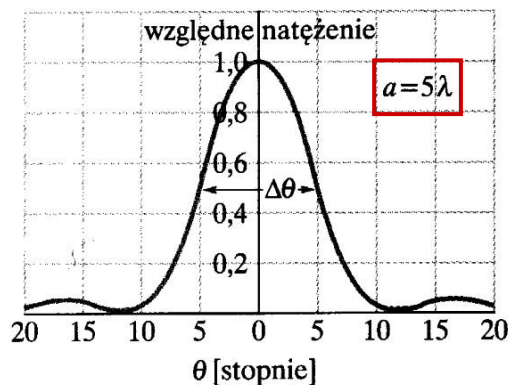
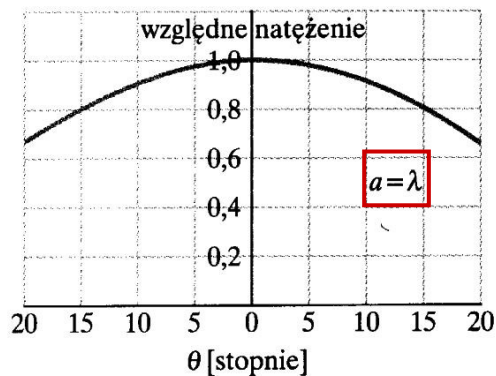
$$d \cdot \sin \theta = \lambda$$

Ogólny warunek na minimum

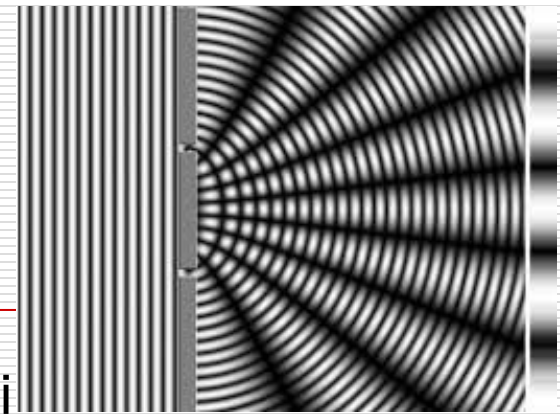
dla pojedynczej szczeliny:  $d \cdot \sin \theta = n\lambda$



# Względne natężenie w obrazie dyfrakcyjnym dla różnych szerokości szczeliny.

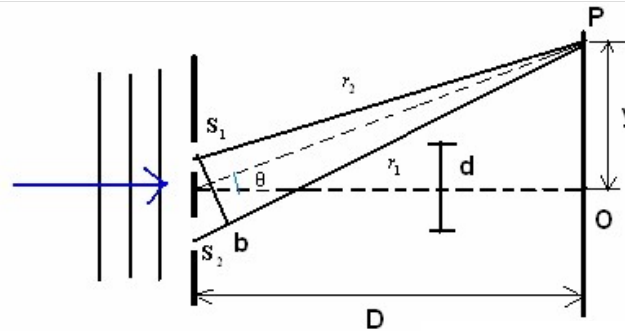


# Doświadczenie Younga



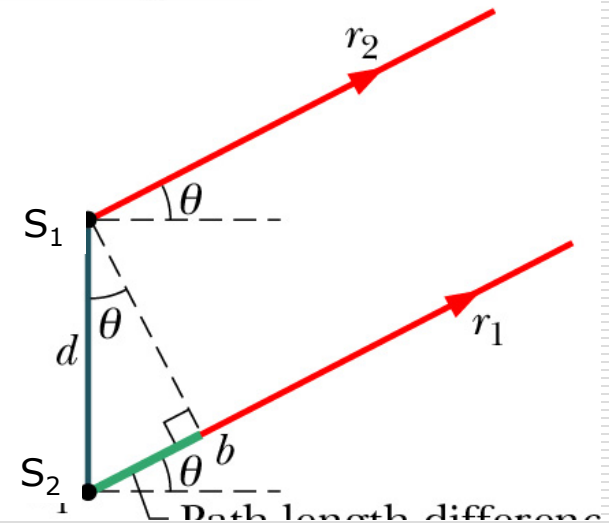
1801 r. – światło jest falą bo ulega interferencji

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



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

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



## □ 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)

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

**Odwrotnie niż przy jednej szczelinie !!**

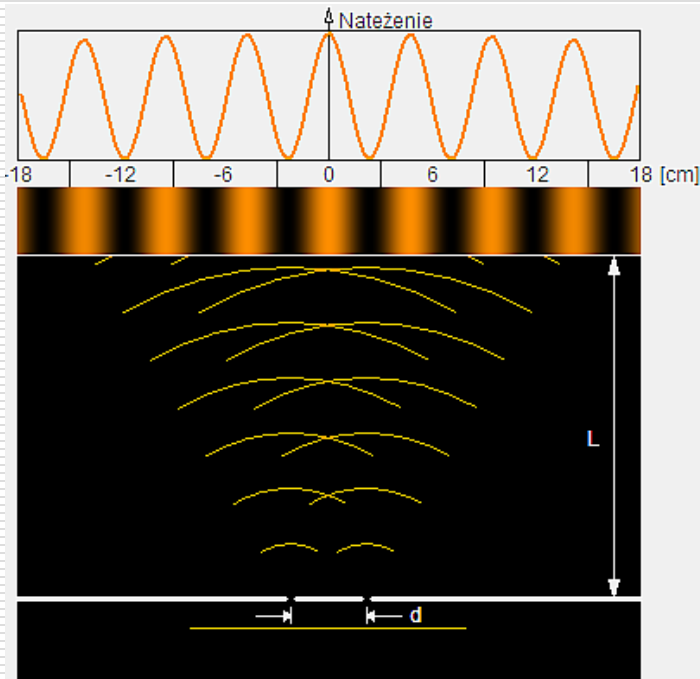
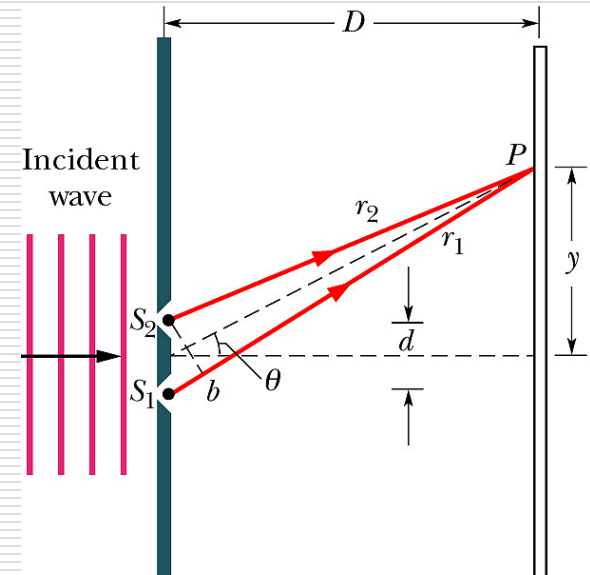
## □ Położenie prążków

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

Dla małych kątów  $\Theta$ :

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

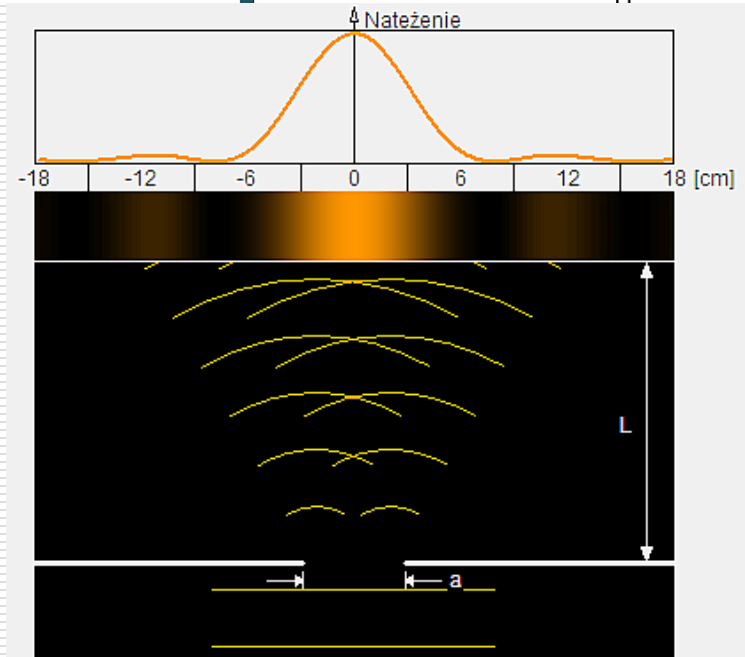
$$\text{tg } \theta = \frac{y}{D} \Rightarrow d \frac{y}{D} = m \lambda \quad y = \frac{m \lambda D}{d}$$

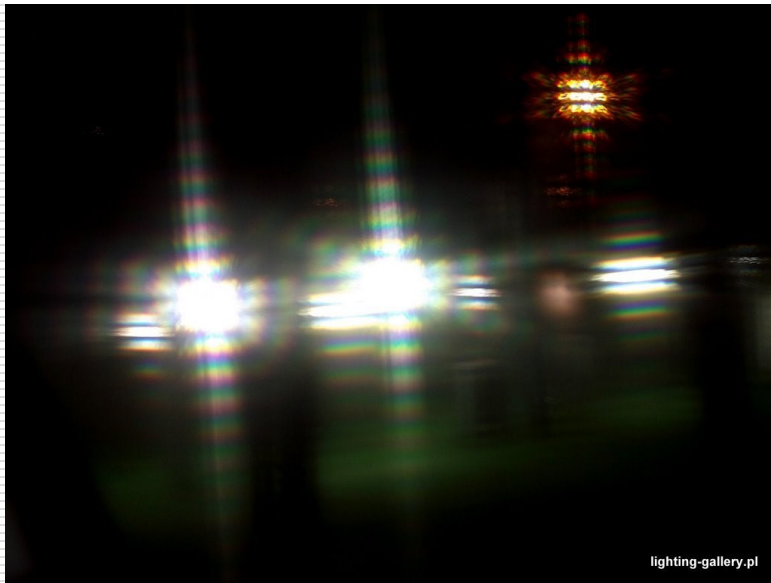
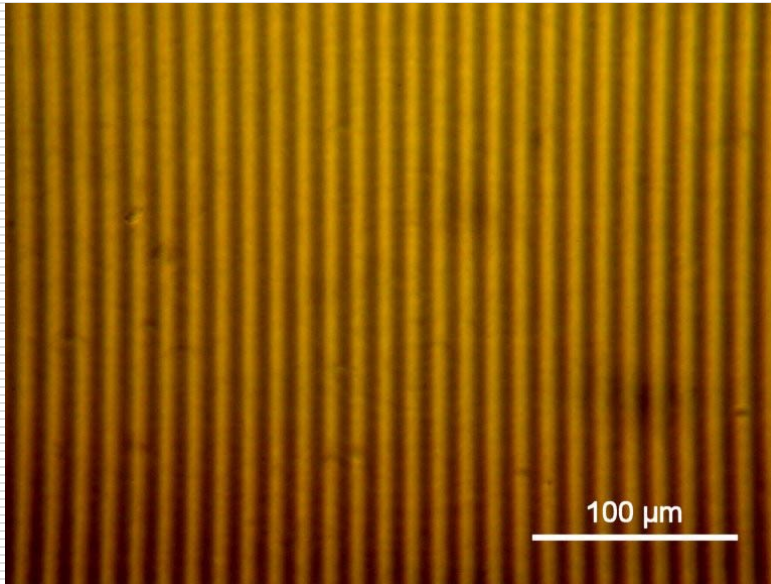


Obraz interferencyjny na 2 szczelinach



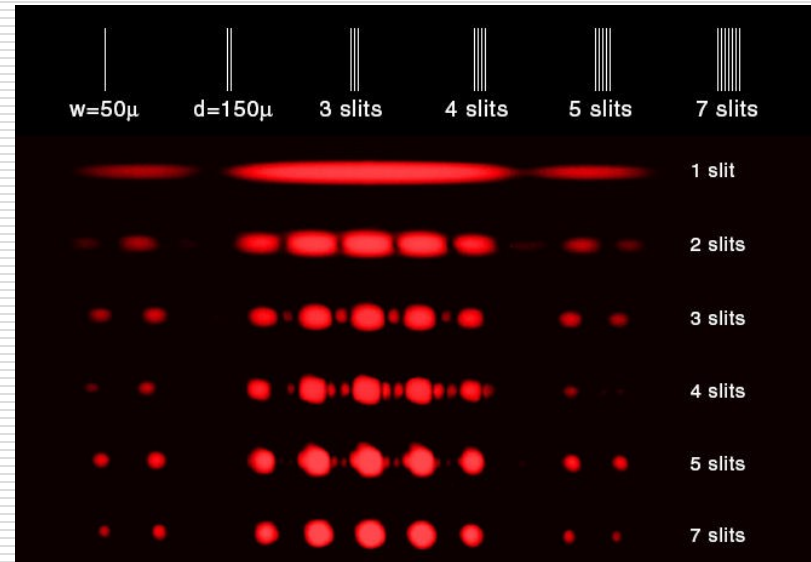
Obraz dyfrakcyjny na 1 szczelinie





## □ Siatka dyfrakcyjna

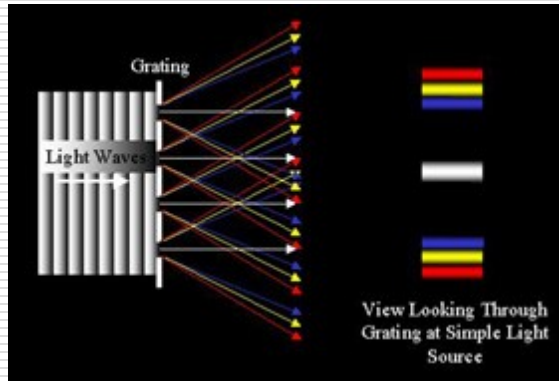
Układ  $N$  równoległych szczelin o szerokości  $a \ll \lambda$



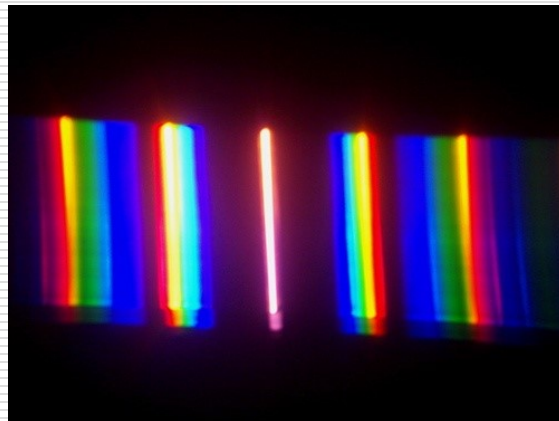
□ Zdolność rozdzielcza siatki dyfrakcyjnej  $R = \frac{\lambda}{\Delta\lambda}$

gdzie:  $\lambda$  jest średnią długością fali  
*2 linii widmowych ledwie rozróżnialnych*,  $\Delta\lambda$  jest różnicą długości tych fal.

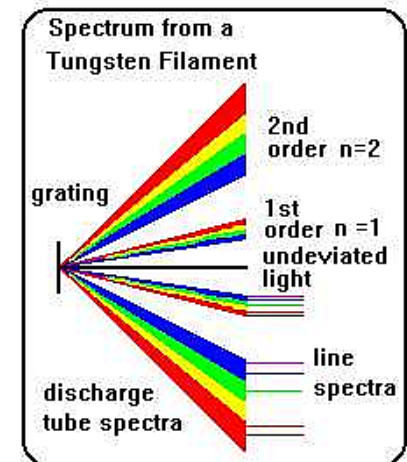
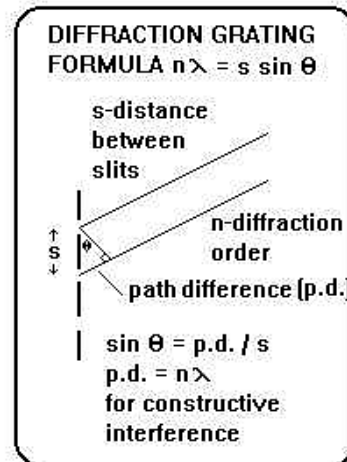
# □ Dyfrakcja światła białego



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



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



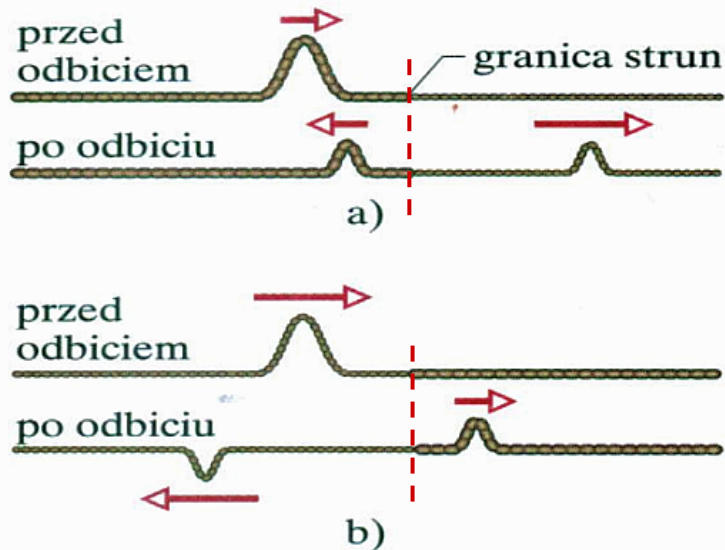
Robert Bunsen (1811-1899) and Gustav Kirchoff (1824-1887) observed in about 1859 that each element emits a light of characteristic wavelength, the beginnings of spectrum analysis and the key to unlocking the secrets of the atom

## □ 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?

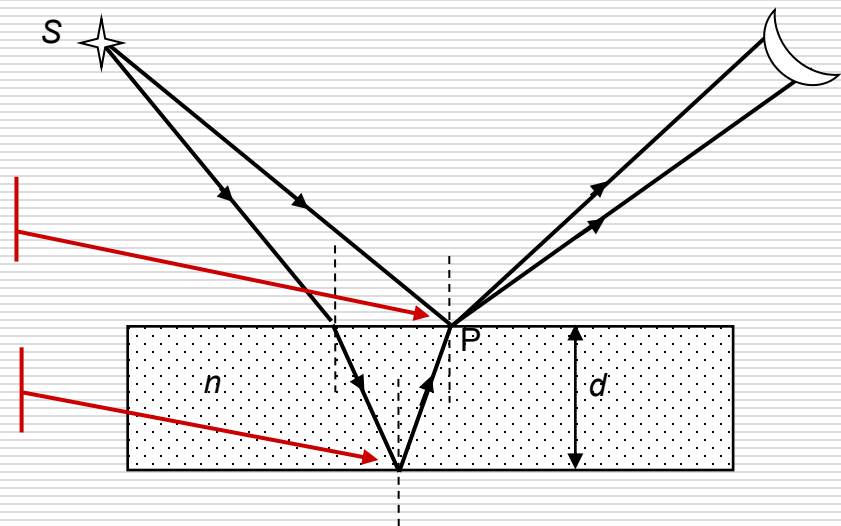
## □ Interferencja w cienkich warstwach



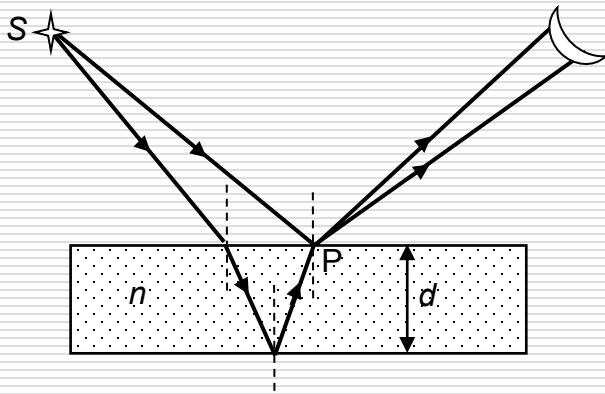
Załamanie na powierzchni rozgraniczającej dwa ośrodki nie powoduje zmiany fazy fali, natomiast odbicie od takiej powierzchni może spowodować zmianę fazy zależnie od współczynników załamania światła po obu stronach powierzchni

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

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

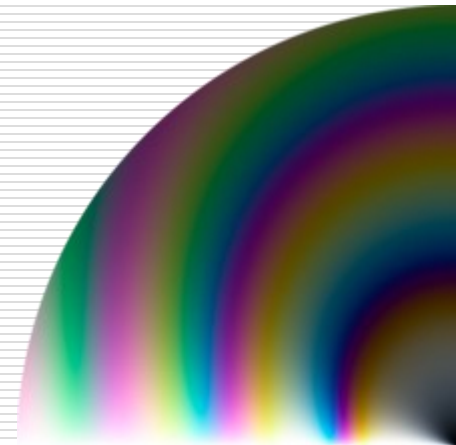
Różnica dróg optycznych promieni:  
załamane i odbite (od górnej  
powierzchni)

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

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

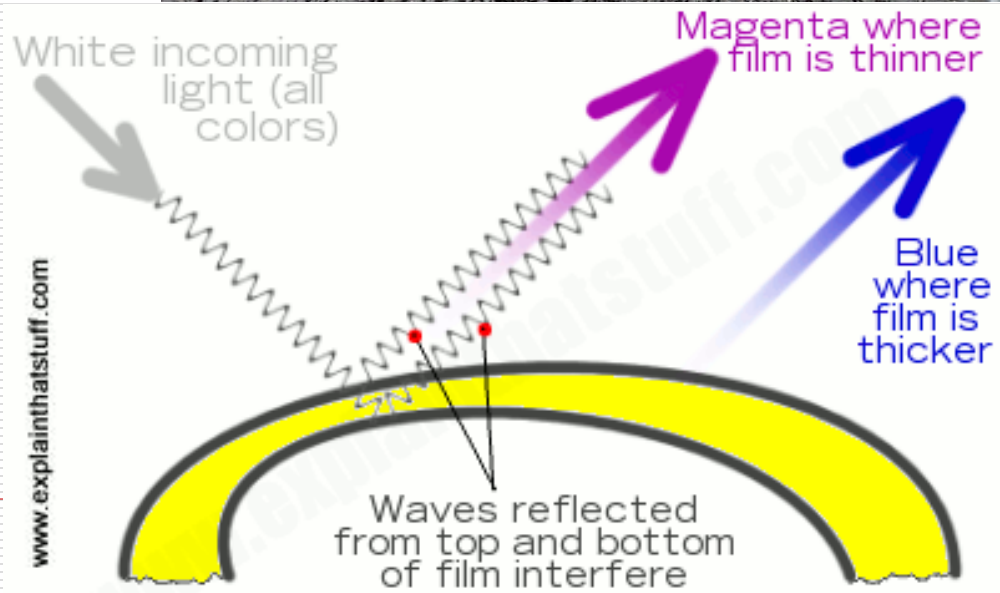
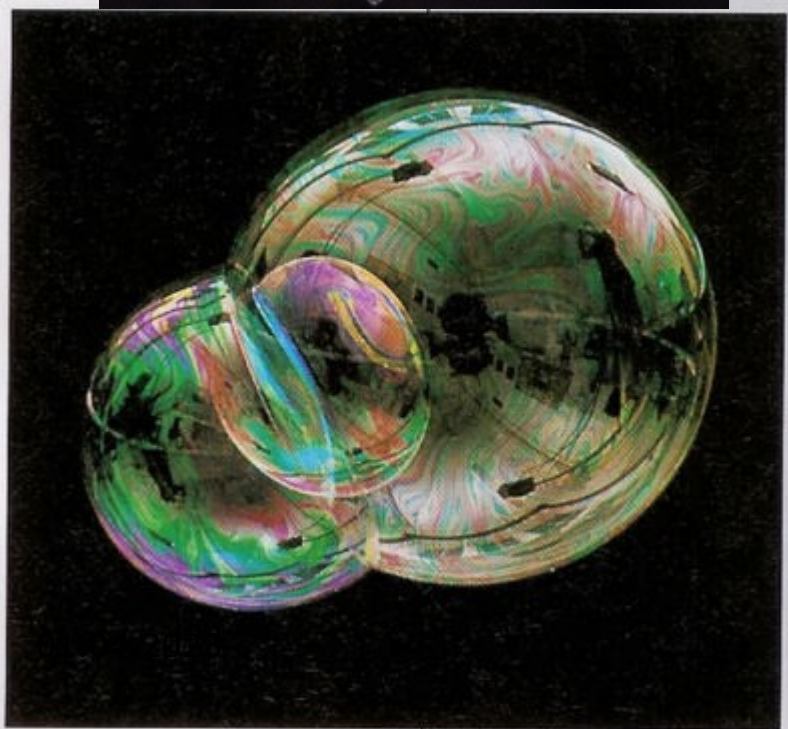
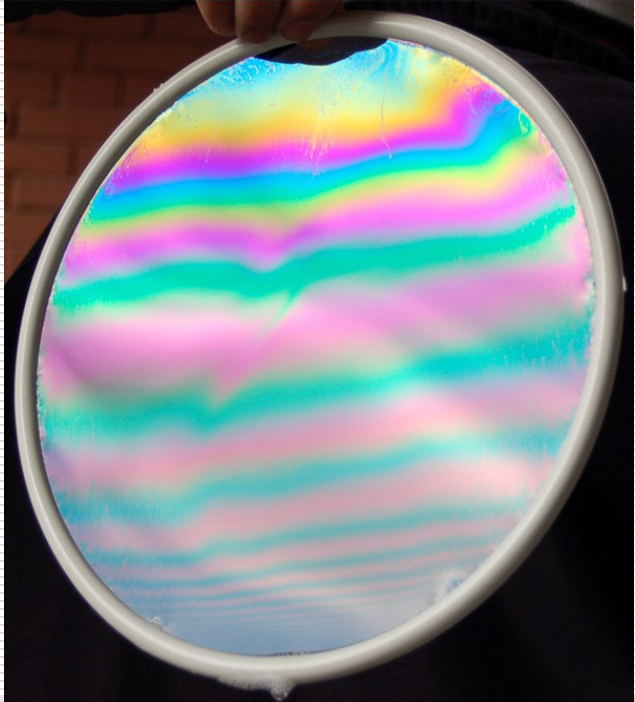
Maksimum interferencyjne: 
$$2dn = \lambda\left(m + \frac{1}{2}\right)$$

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

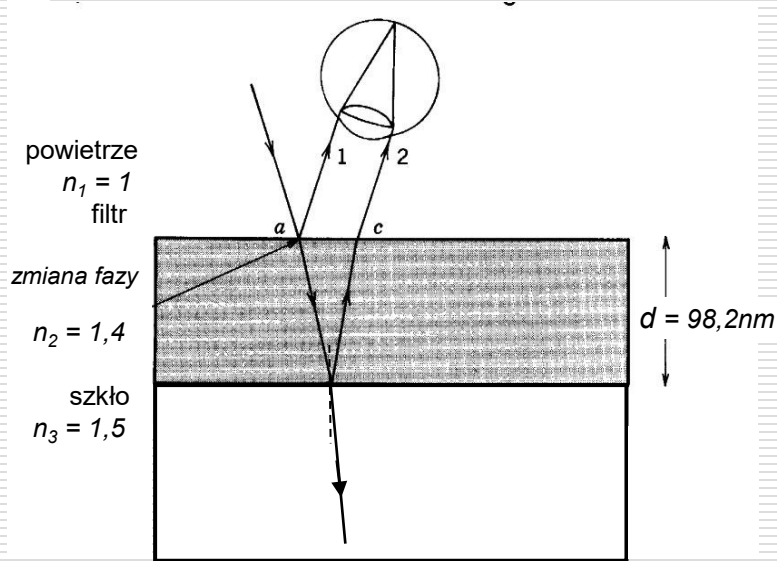


gdzie  $m = 0, 1, 2, \dots$  - rząd widma

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 .

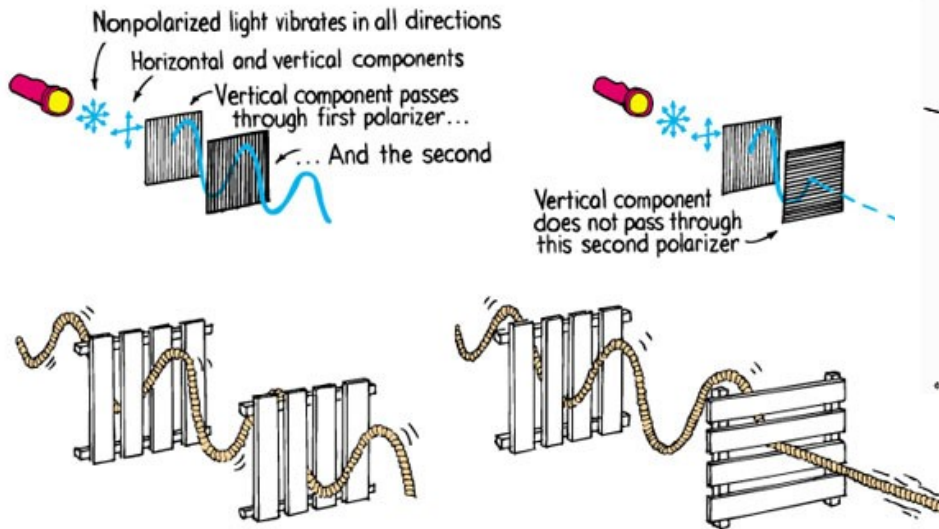
Jaka ma być grubość filtra, aby szkło pokryte filtrem nie odbijało światła (w środku widma widzialnego 550 nm)?

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

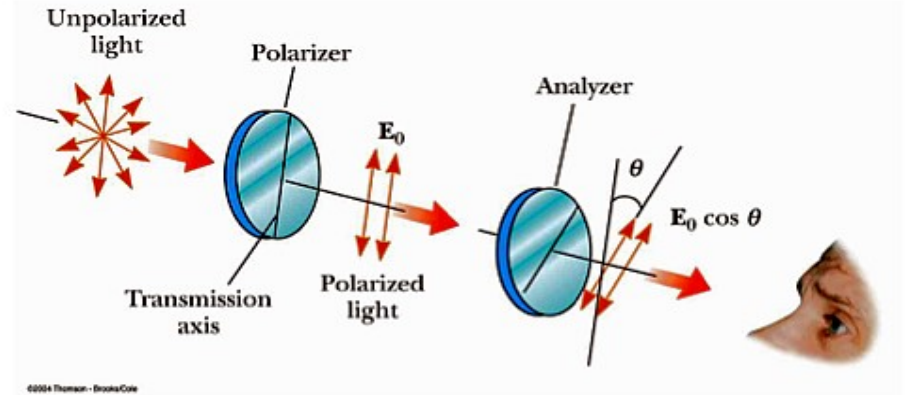
$$m = 0 \quad \Rightarrow \quad 2dn = \left(m + \frac{1}{2}\right)\lambda \quad d = \frac{\lambda}{4n} = \frac{550}{4 \cdot 1,4} = 98,2nm$$

# Polaryzacja

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



Hewitt, *Conceptual Physics*, Ninth Edition.  
Copyright © 2002 Pearson Education, Inc., publishing as Addison Wesley. All rights reserved.

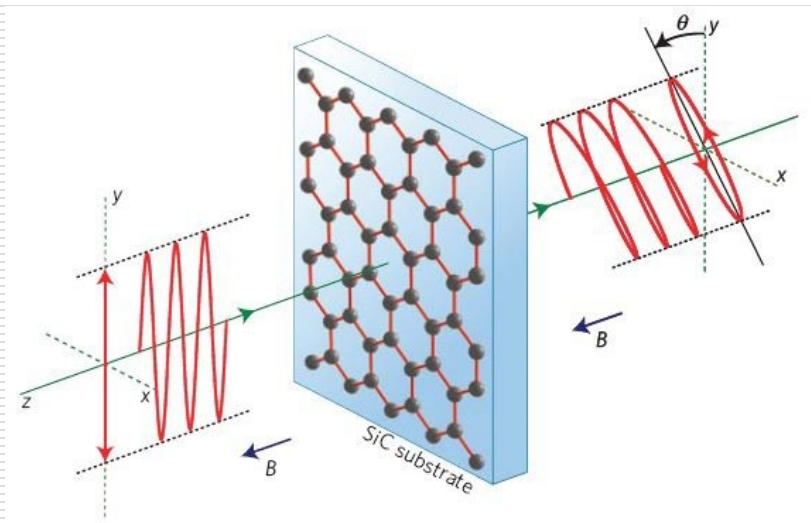
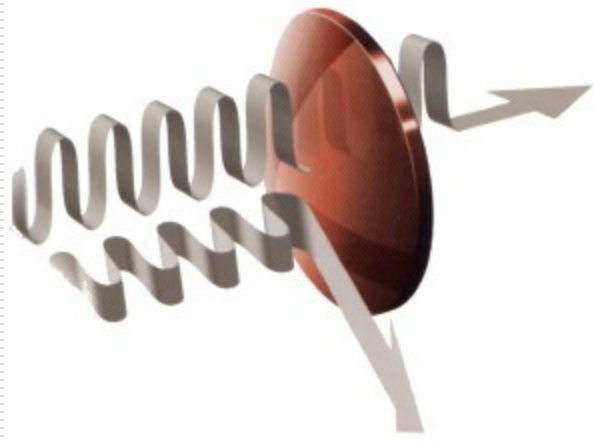


Prawo Malusa

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

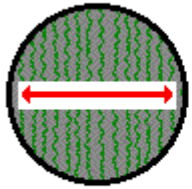
Dla fali spolaryzowanej liniowo oscylacje zaburzenia odbywają się w jednej płaszczyźnie, w kierunku prostopadłym do kierunku rozchodzenia się fali.

- Sposoby polaryzacji światła:
- polaryzatory



Filtrem polaryzacyjnym opatentowanym w 1929 r. w USA była płytka 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.

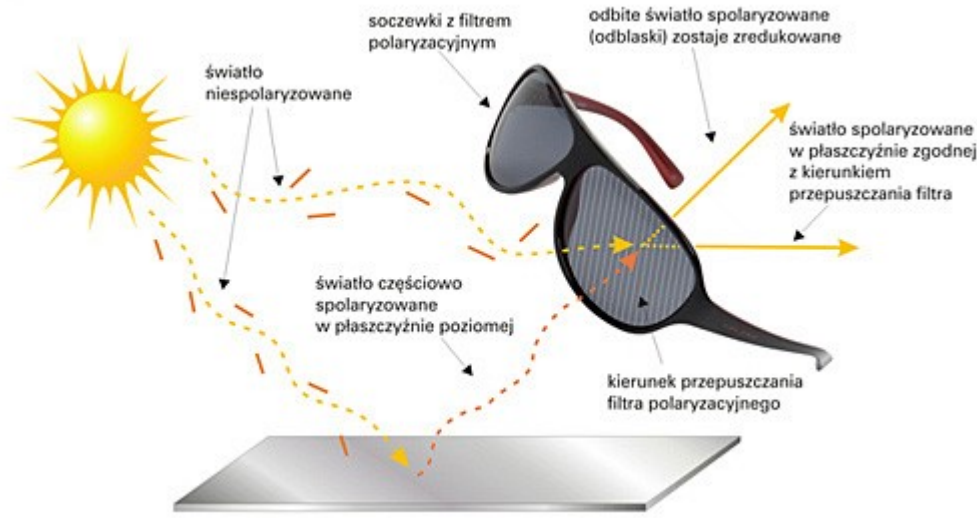
## Relationship Between Long-Chain Molecule Orientation and the Orientation of the Polarization Axis



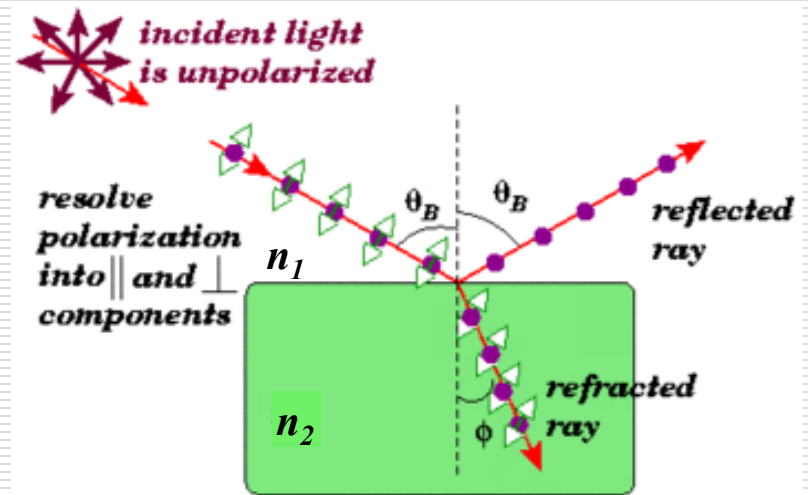
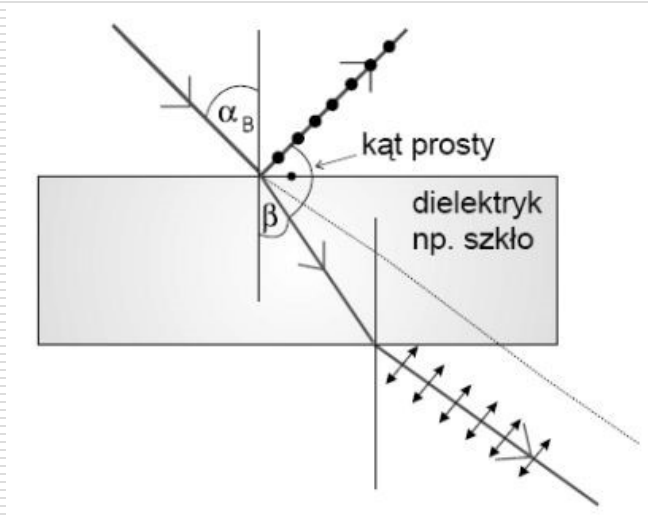
When molecules in the filter are aligned vertically, the polarization axis is horizontal.



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



- Sposoby polaryzacji światła:
- odbicie



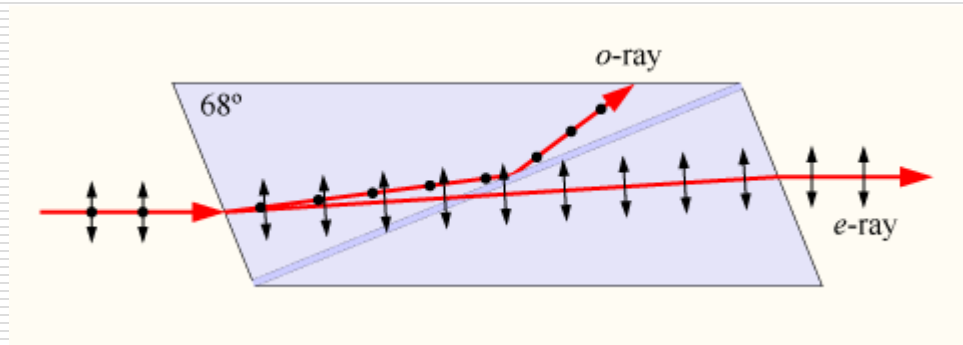
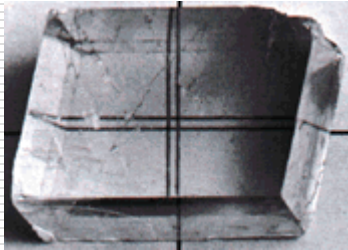
$$\operatorname{tg} \theta_B = \frac{n_1}{n_2}$$

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

Zjawisko polaryzacji przez odbicie zostało odkryte w 1809 r. przez [Malusa](#).

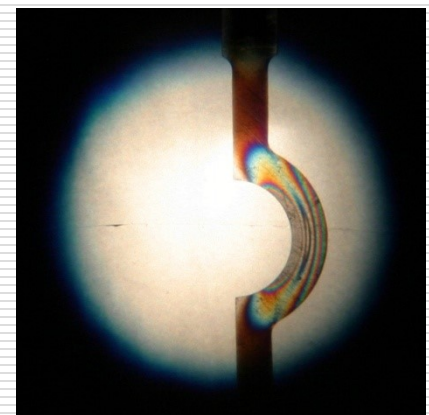
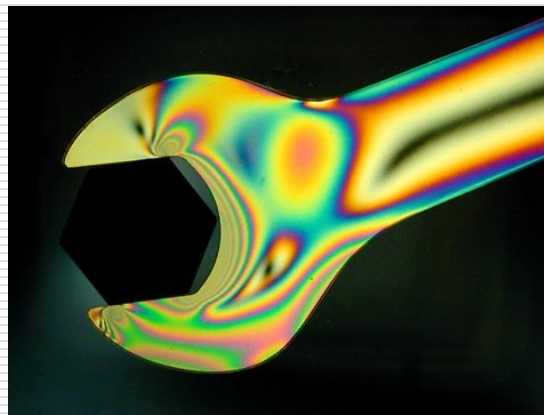
Dla innych kątów padania światła, światło odbite jest również spolaryzowane częściowo. Im kąt padania bardziej różni się od kąta Brewstera, tym stopień polaryzacji światła odbitego jest mniejszy.

- Sposoby polaryzacji światła:
- kryształy dwójłomne



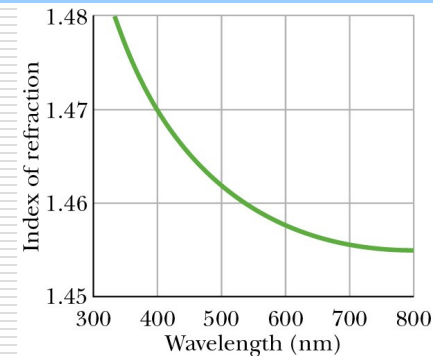
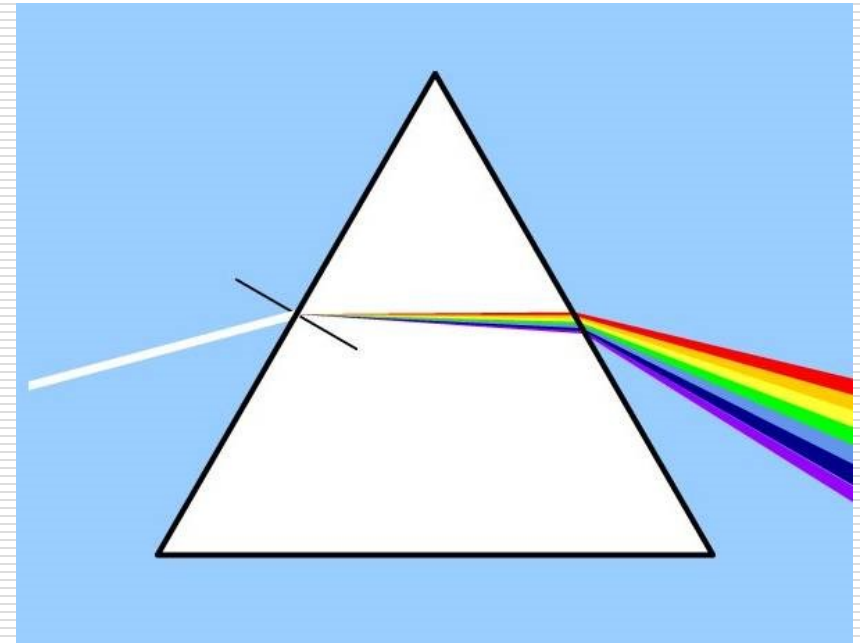
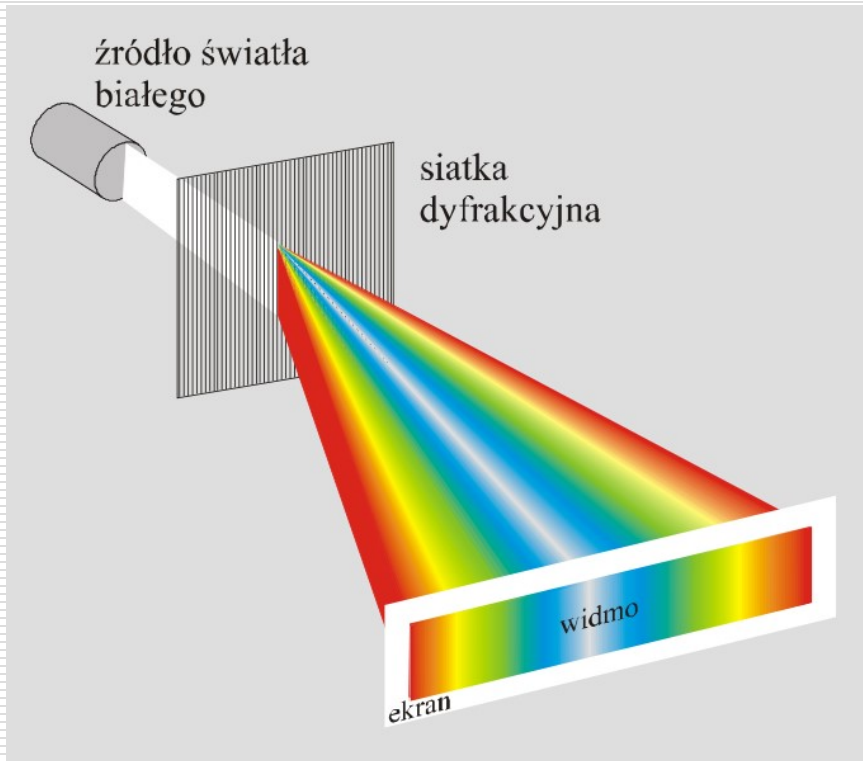
W kryształach (rutyl, kalcyt, wszystkie ciekłe kryształy) wykazujących anizotropię stałej dielektrycznej - różna prędkość światła w różnych kierunkach, a więc i współczynnik załamania zależy od kierunku.

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.



$$\sin\theta = \frac{m\lambda}{d}$$