



Światło

Dr hab. Maciej Czapkiewicz
Instytut Elektroniki, paw. C-1, pok.321
czapkiew@agh.edu.pl
<http://layer.uci.agh.edu.pl/Fizyka>

Z praw Maxwella wynika równanie falowe



$$\mu_0 \varepsilon_0 \frac{\partial^2 \mathbf{E}}{\partial t^2} = \nabla^2 \mathbf{E}$$

- Prędkość światła w próżni jest stała

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

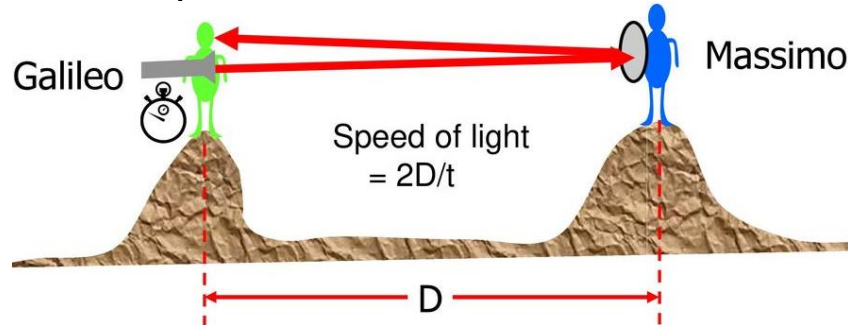
- Długość fali $\lambda = 2\pi/k$

- Okres fali $T = 2\pi/\omega$

Pomiar prędkości światła



- ~1600, Galileusz: bardzo duża



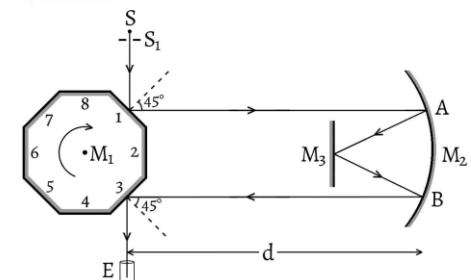
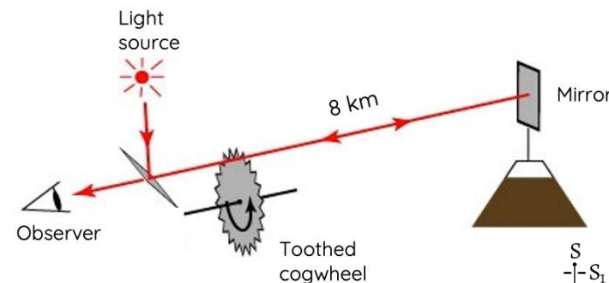
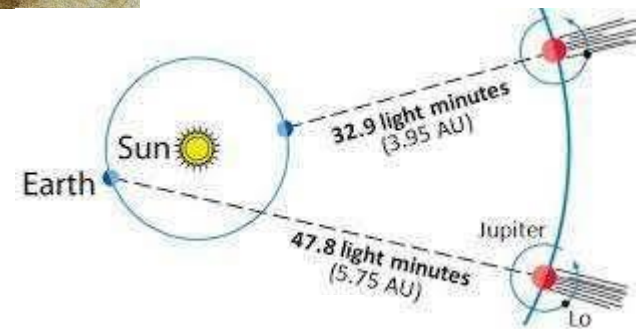
- 1675, Roemer: ~215000 km/s

- 1726, Bradley: 304000 km/s

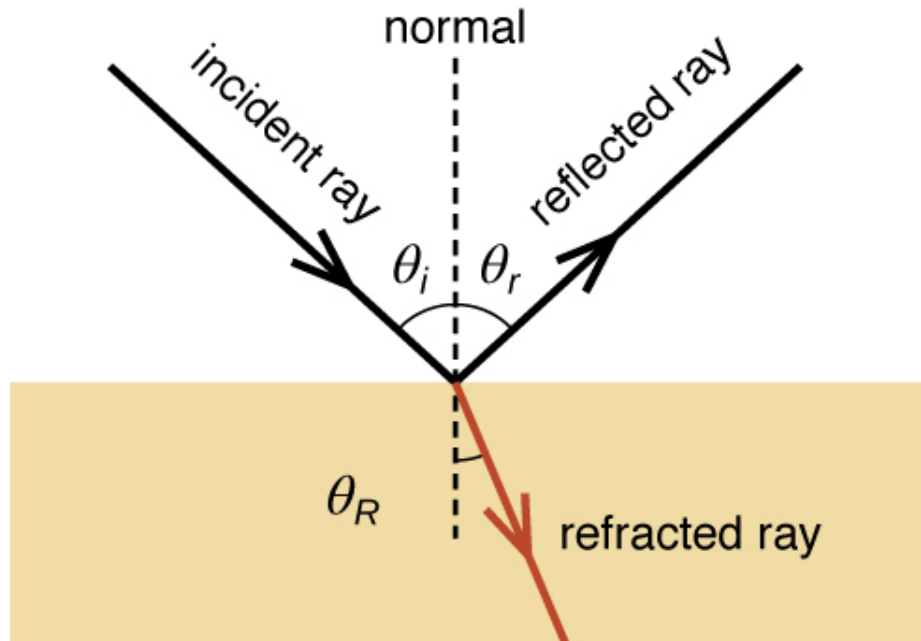
- 1849, Fizeau: 298000 km/s

- 1926, Michelson: 299798 km/s

- 1983: c jako wzorzec



Prawo odbicia i załamania

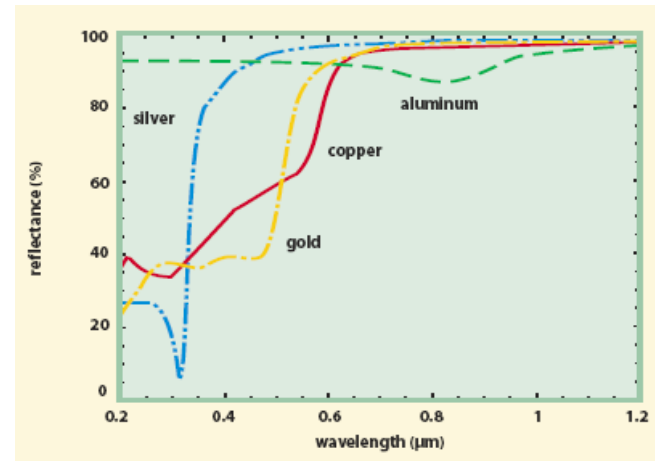
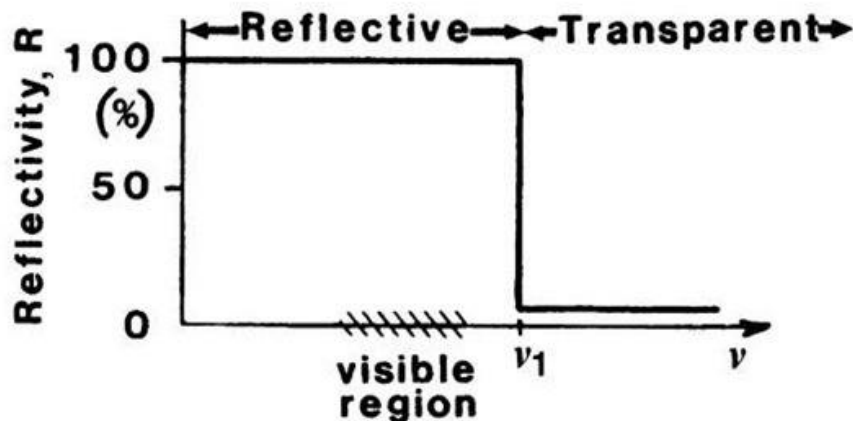


- Prawo odbicia $\theta_i = \theta_r$
- Prawo załamania $\sin\theta_R = 1/n \sin\theta_i$
- albo $\sin\theta_i / \sin\theta_R = n = v_1/v_2$



Dlaczego światło się odbija?

- Współczynnik odbicia:
$$R = \frac{(n - 1)^2 + k^2}{(n + 1)^2 + k^2}$$
- W metalu, elektrony swobodne pobudzone falą E-M wytwarzają taką samą falę, ale (dla małych częstości) z przesunięciem fazowym π - całe światło się odbija
- Model Drudego → wzór Hagensa-Rubena:
$$R = 1 - 4 \sqrt{\frac{\pi f \epsilon_0}{\sigma}}$$



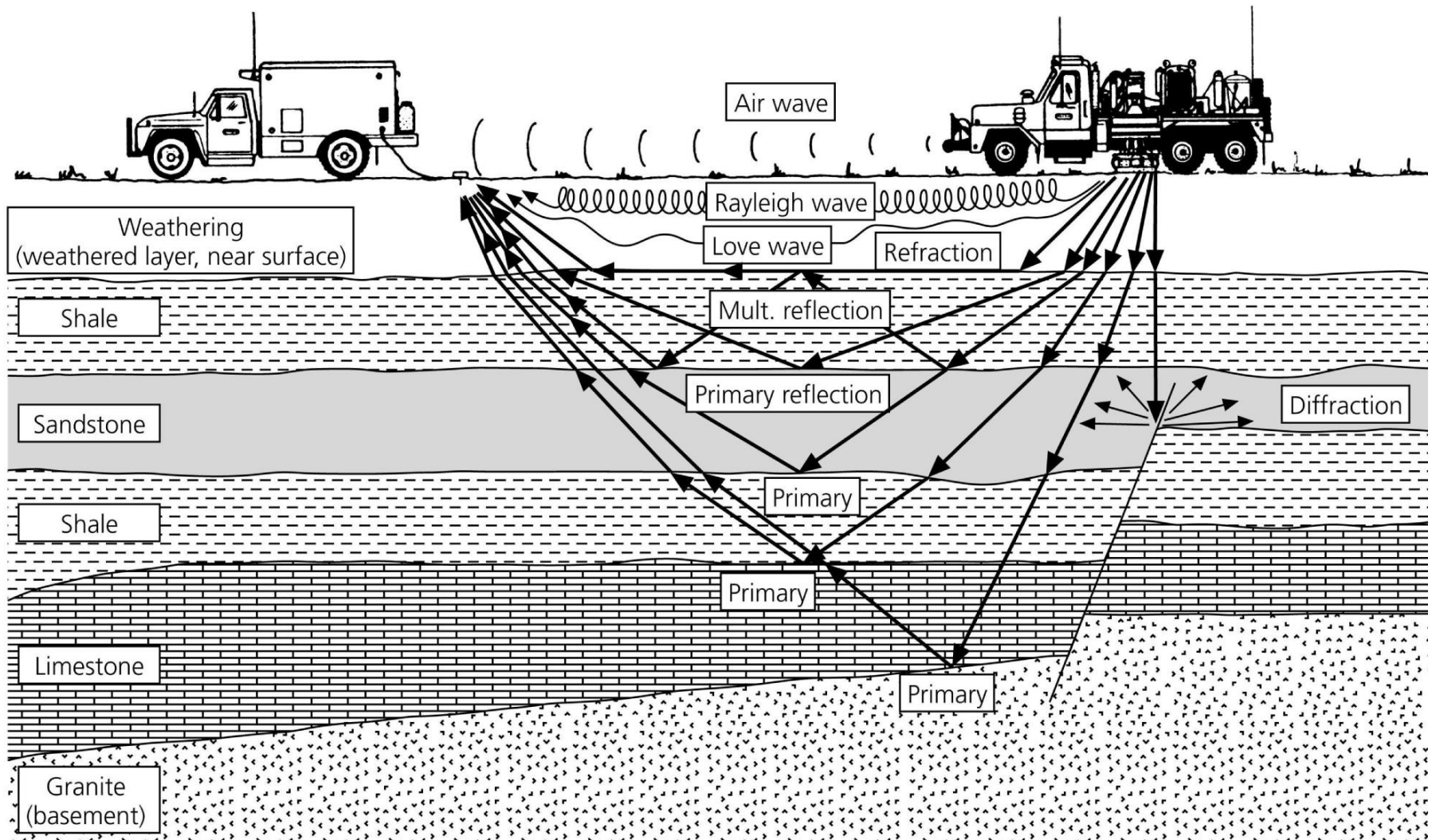
Dlaczego światło się załamuje?



- Bo jest falą, ciągłość czoła fali musi być zachowana, a długość fali maleje z prędkością. Zjawisko załamania to zjawisko falowe:



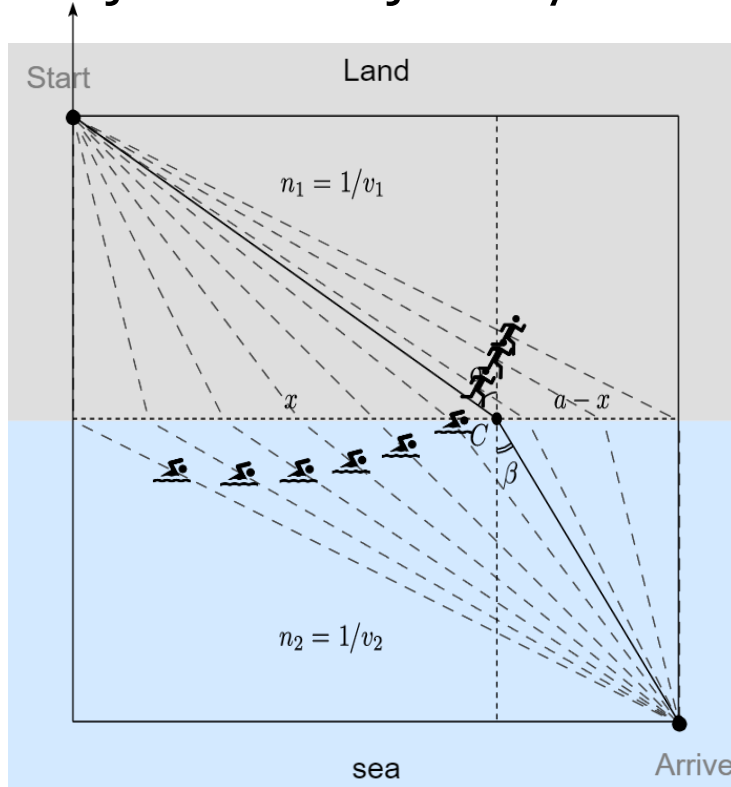
Zmiana prędkości: załamanie (każdej) fali



Dlaczego światło się załamuje?



- Bo czoło fali porusza się po najkrótszej optycznie drodze (po trajektorii o najkrótszym czasie) - zasada Fermata



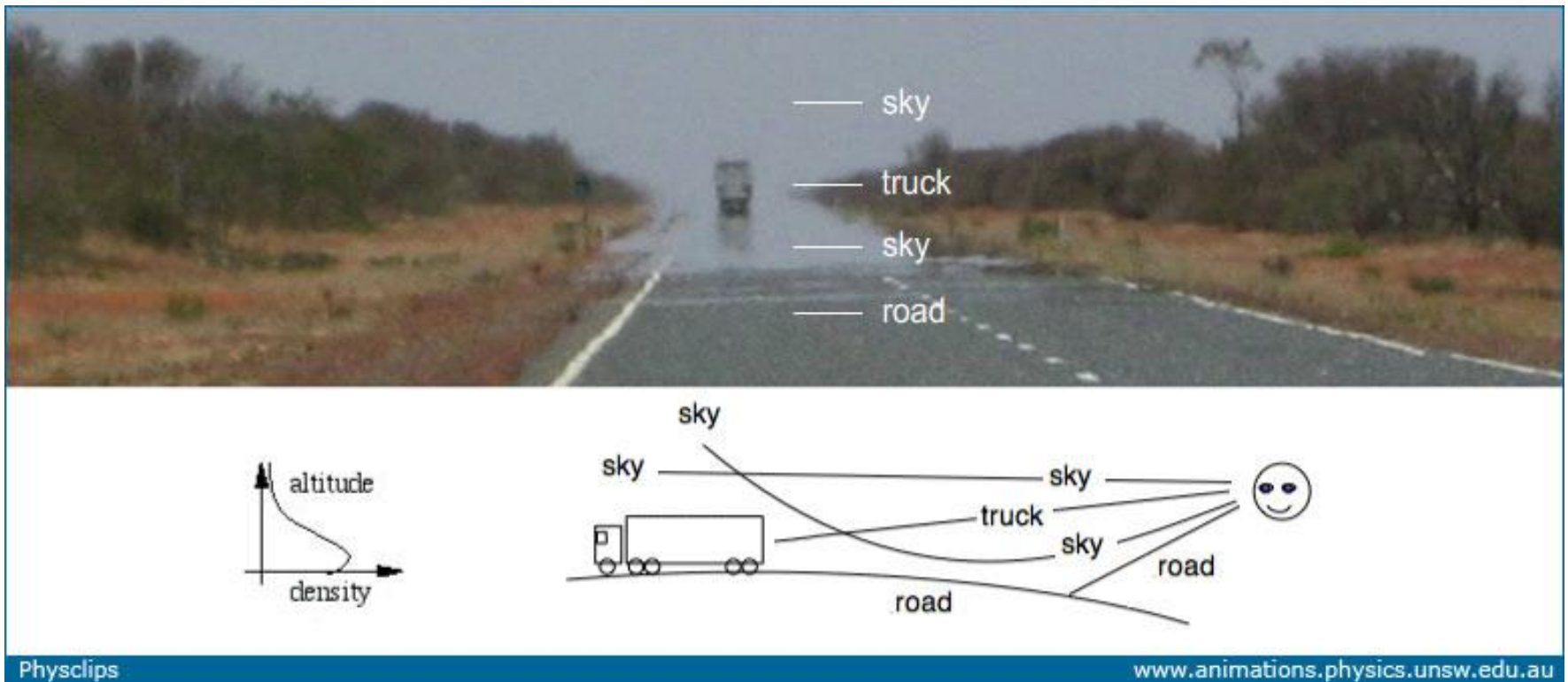
$$t = \frac{\sqrt{x^2 + d^2}}{v_1} + \frac{\sqrt{(a-x)^2 + d^2}}{v_2}$$

https://javab.org/en/principle_of_least_time_en/

Gradient współczynnika załamania



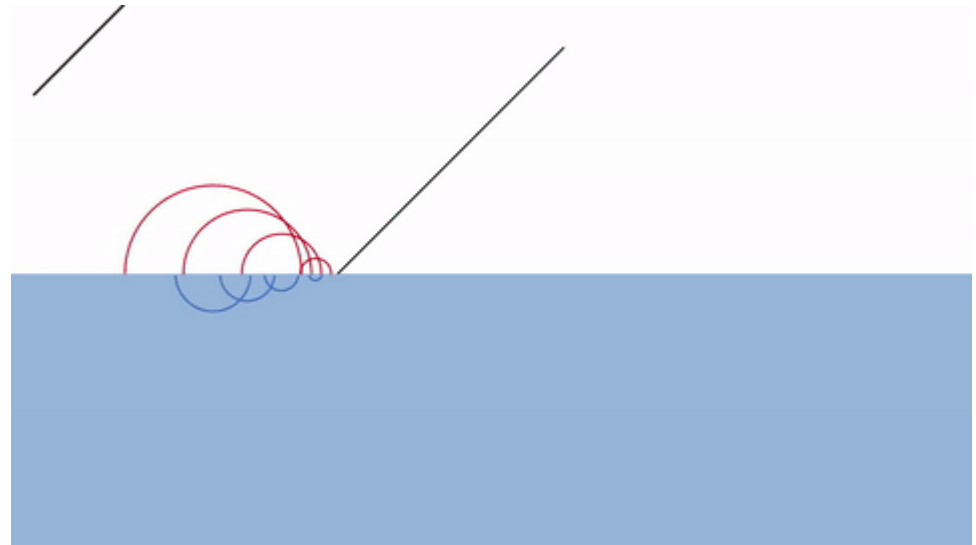
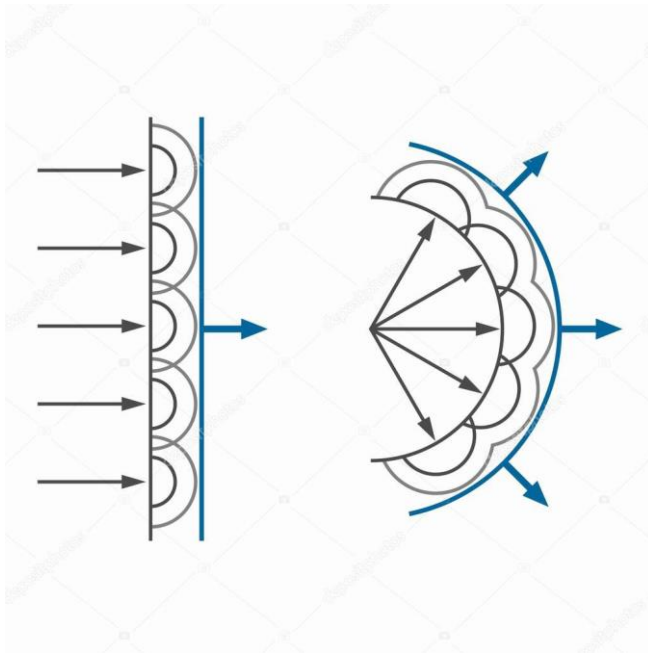
- Gradient współczynnika załamania (np. zmienna gęstość ośrodka) powoduje, że światło nie porusza się w linii prostej. Dlaczego?



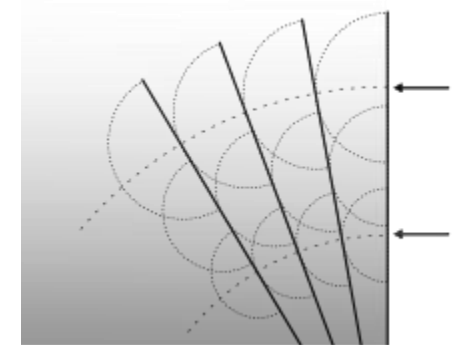
Dlaczego, tak naprawdę, światło się załamuje?



- Zasada Huygensa–Fresnela: każdy punkt czoła fali jest źródłem nowej fali półkolistej, a każda fala jest superpozycją tych falek.



Zaginanie wiązki światła padającej prostopadłe do gradientu współczynnika załamania:



Współczynnik załamania różnych materiałów



Material	n [j.u.]
ice	1,31
diamond	2,42
cubic zirconia	2,15
table salt	1,52
fused silica	1,46
sapphire	1.77
potassium glass	1,6
Boron- silicate glass	1,45
Sodium calcium glass	1,51
Lead glass	1,8
flint glass	1,66
plexiglass	1,49...1,53
quartz	1,46

Material	n [j.u.]
water	1,33
ethanol	1,36
hexane	1,38
olive oil	1,46
carbon disulfide	1,63
iodomethane	1.74
kerosene	1,39
glucose, 10% aq.sol.	1,3477
glucose, 20% aq.sol.	1,3635
glucose, 60% aq.sol.	1,4394
carbon dioxide	1,00045
air	1,00029
vacuum	1



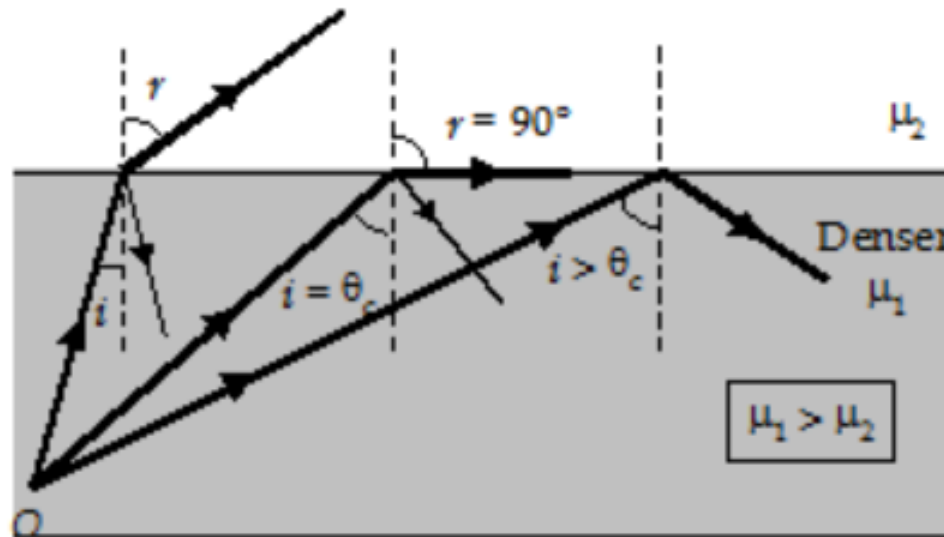
Całkowite wewnętrzne odbicie

- Światło przechodzi z ośrodka optycznie gęstszego (mniejsza prędkość v_2 np. woda, szkło) do rzadszego (np. powietrze)
- Prawo załamania:

$$\sin \theta_R = v_1 / v_2 \sin \theta_i$$

- Ale $\sin \leq 1$, więc graniczny kat padania:

$$\sin \theta_c = v_2 / v_1 \cdot 1 = 1/n$$

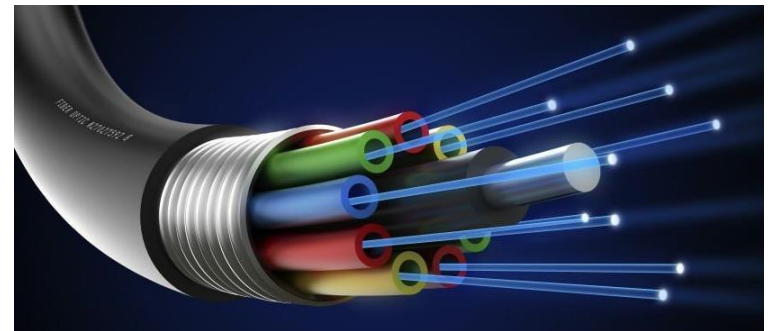
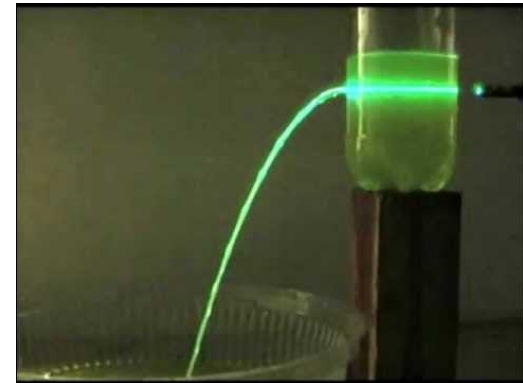
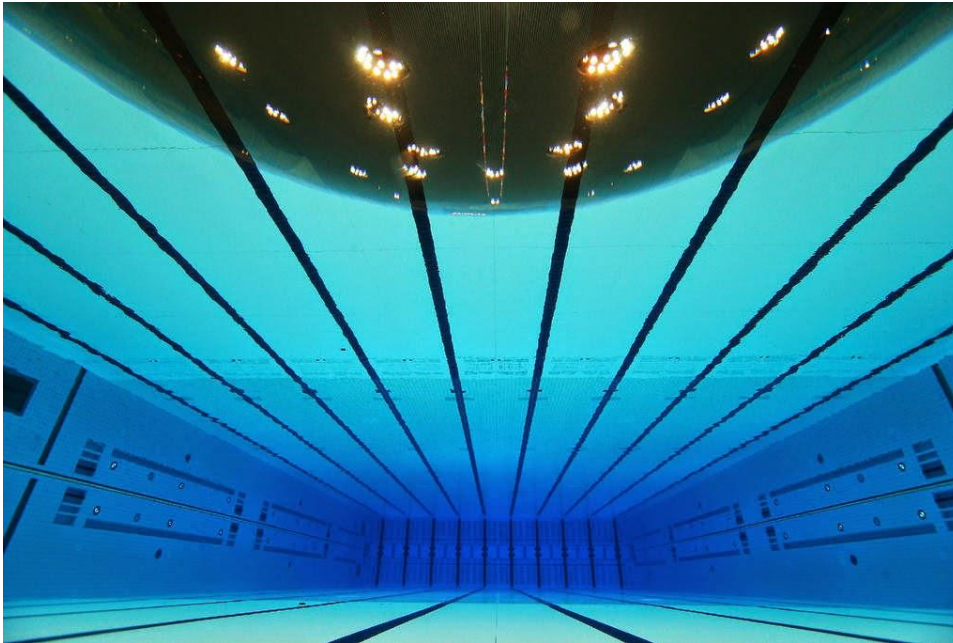


Całkowite wewnętrzne odbicie



- Światło padając na granicę ośrodka optycznie gęstszego, pod kątem większym niż kąt graniczny, ulega całkowitemu wewnętrznemu odbiciu.

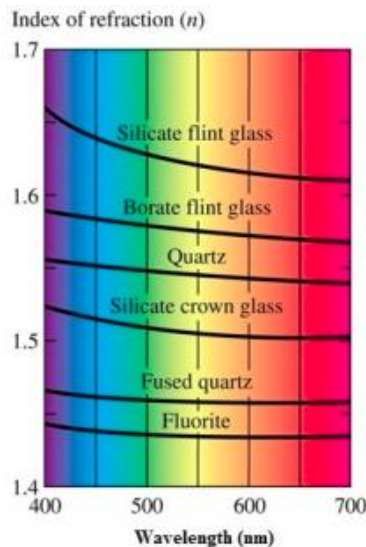
$$\sin \theta_c = 1/n$$



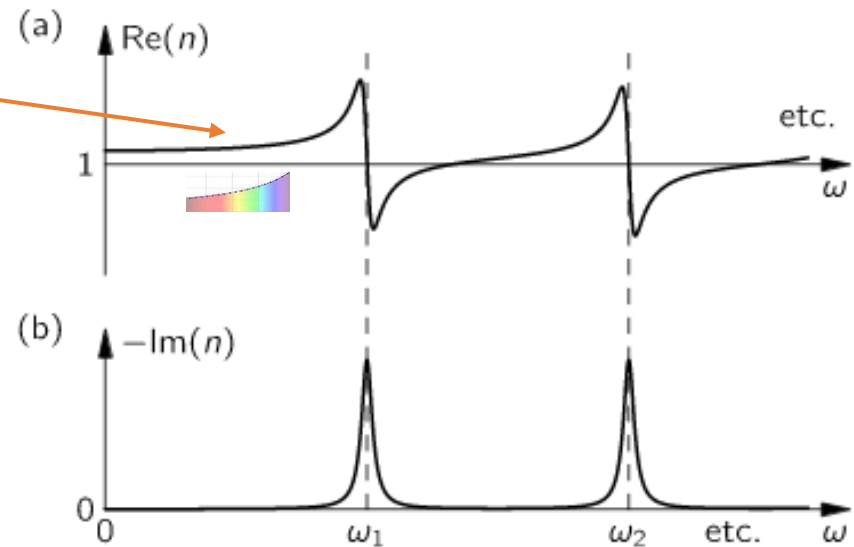
Dyspersja współczynnika załamania



- Współczynnik załamania zależy od długości, dla światła widzialnego maleje z długością fali, czyli rośnie z częstotliwością, tzw. dyspersja normalna:

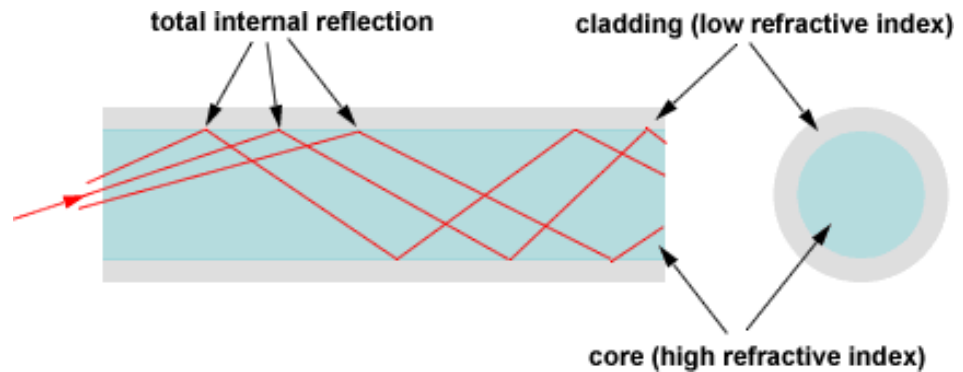
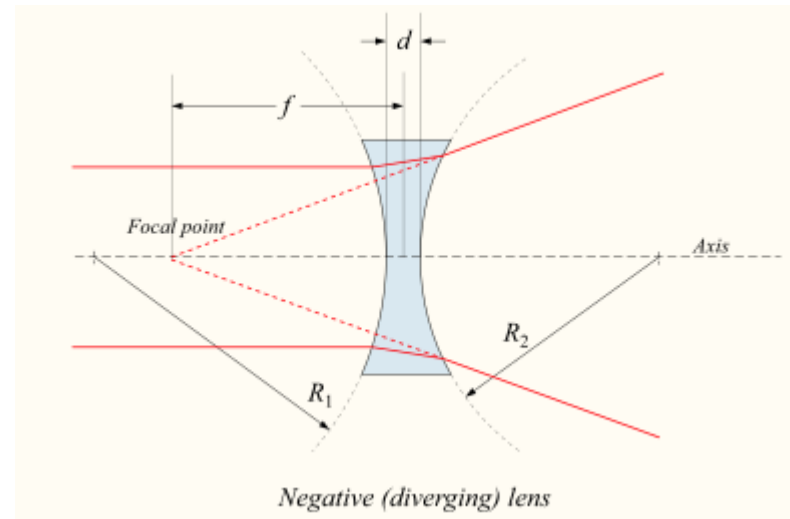
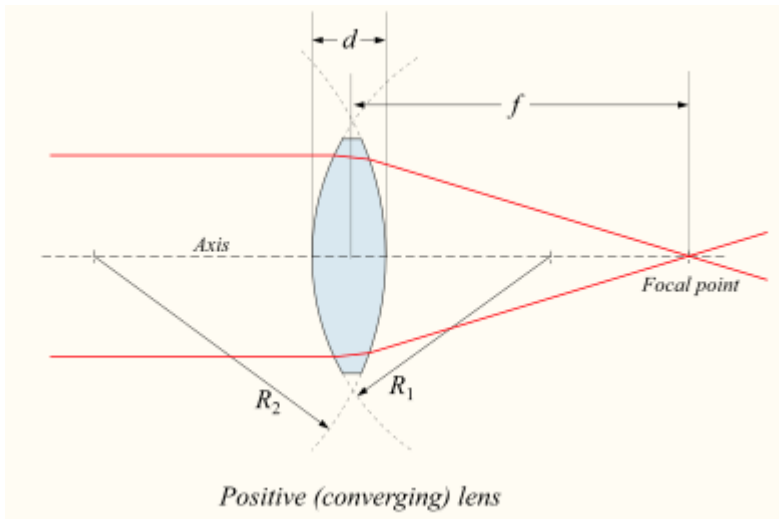


$$\frac{\partial n}{\partial \omega} > 0$$



- Dla szerszego zakresu widma, współczynnik załamania a) i współczynnik absorpcji b) zależy od rezonansu przy oddziaływania promieniowania E-M z materią

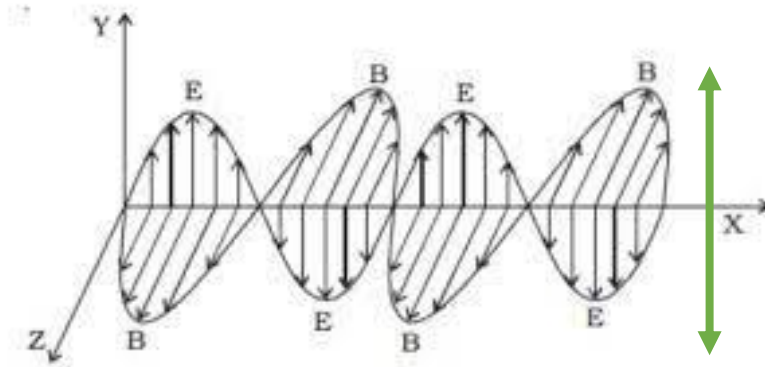
Zastosowanie współczynnika załamania



Polaryzacja światła

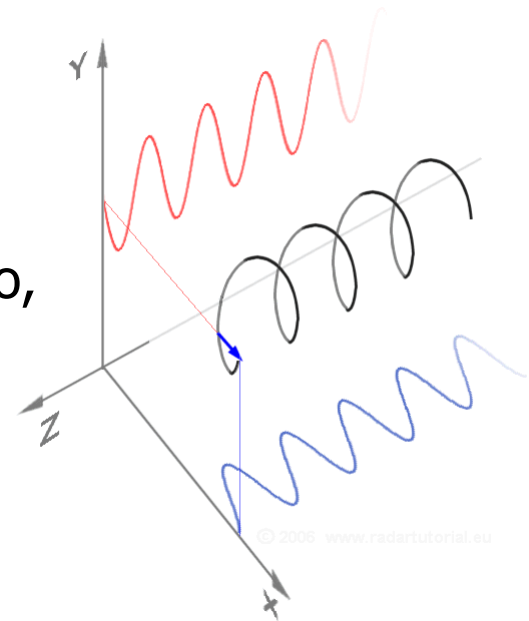


- Fala E-M to fala poprzeczna
- Za kierunek polaryzacji liniowej przyjmuje się kierunek ***E***



polaryzacja liniowa
wzdłuż osi Y

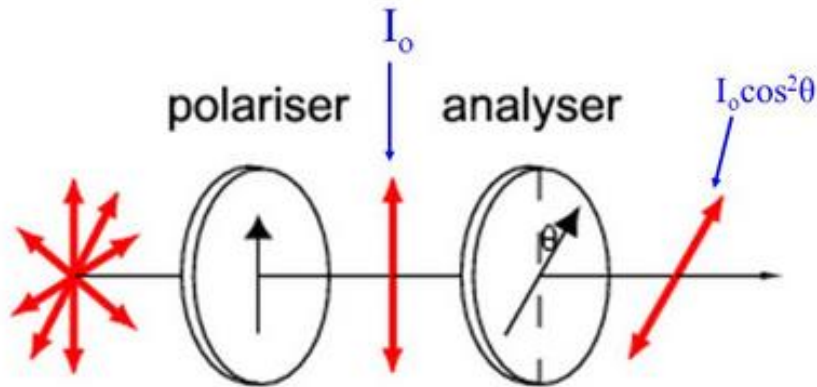
- Polaryzacja kołowa:
złożenie dwóch fal spolaryzowanych liniowo,
z przesunięciem fazowym $\pi/2$



Prawo Malusa

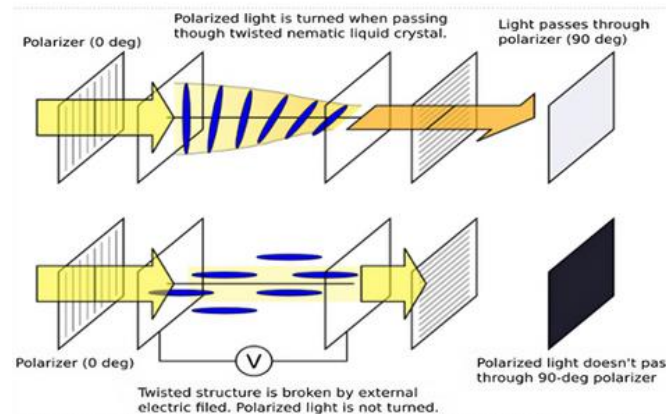


- Natężenie światła zależy od kąta między kierunkiem polaryzacji światła i kierunkiem polaryzatora



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

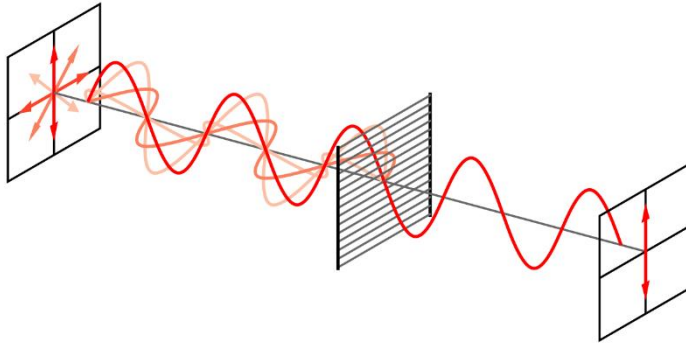
- Skrzyżowane polaryzatory – zero natężenia światła



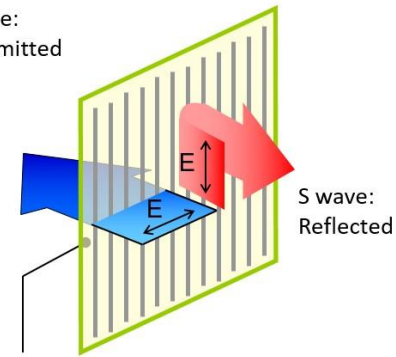
Skąd się bierze światło spolaryzowane?



- Płot z przewodzących drutów:

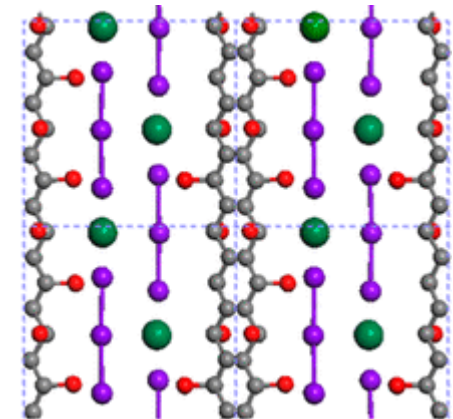


P wave:
Transmitted



Substrate:
TAC(Triacetyl Cellulose) or
COP(Cyclo Olefin Polymer)

- Polaroid – tworzywo sztuczne preparowane tak, aby łańcuchy polimerów z domieszkami, np. jodu, były ukierunkowane

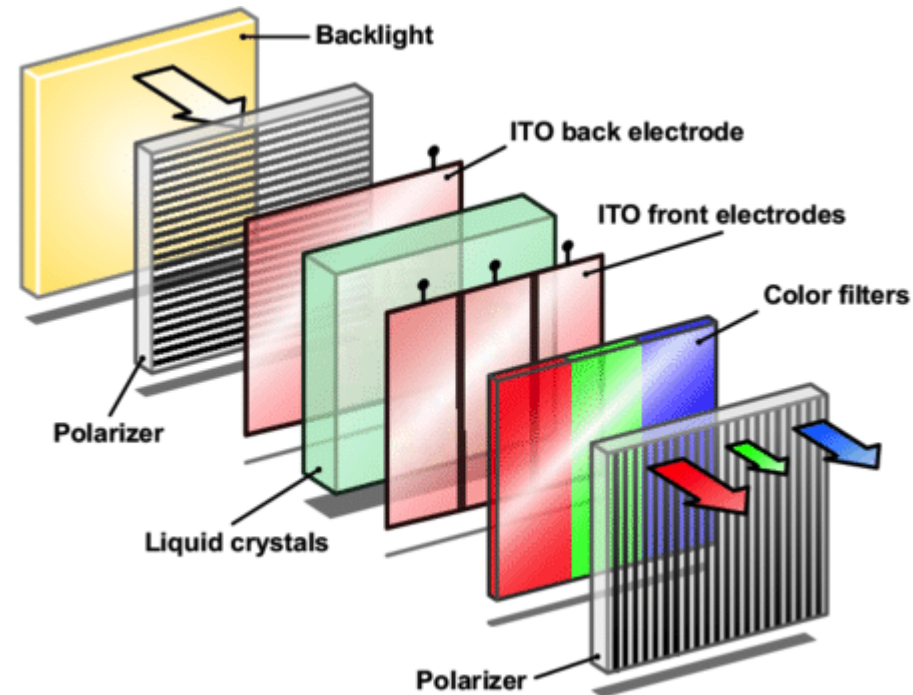
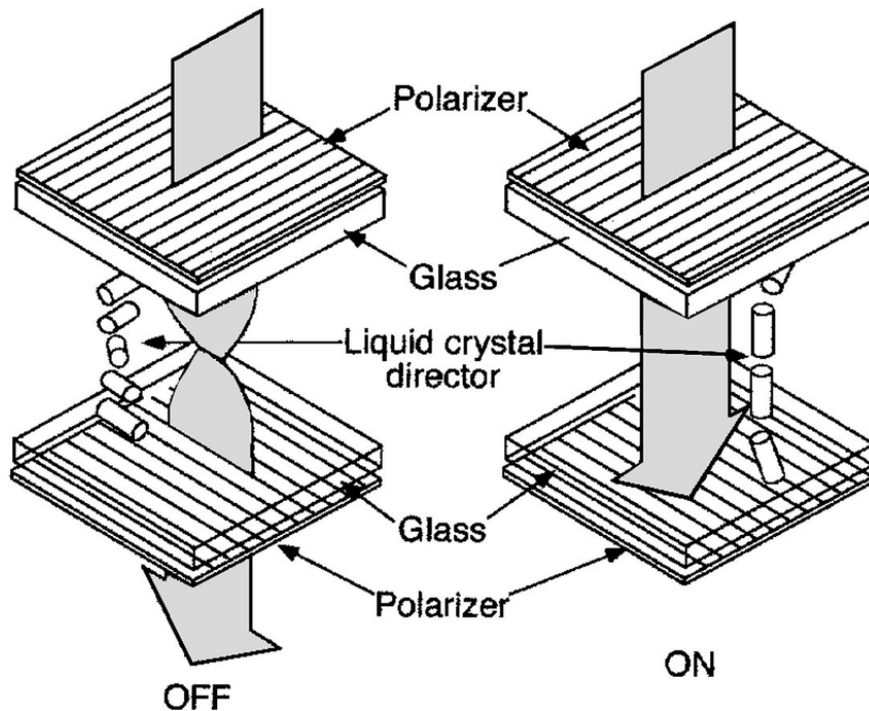


- Niektóre lasery generują światło spolaryzowane

Wyświetlacz Liquid Crystal Display



- Ciekłe kryształy: ciecz, która wykazuje dalekozasięgowe uporządkowanie cząsteczek, jak w kryształach.



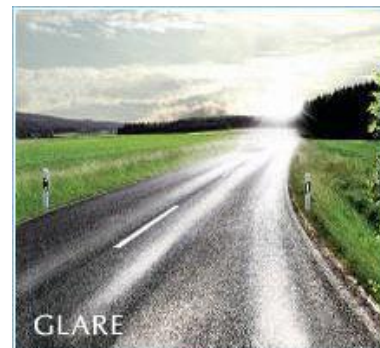
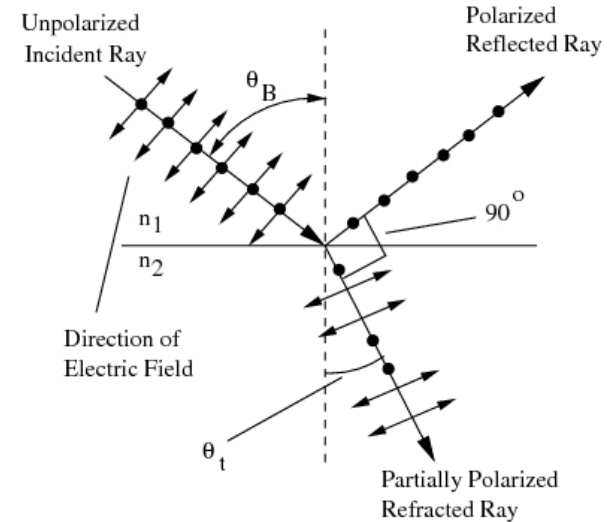
Scheffer, Terry & Nehring, Jürgen, Supertwisted nematic (STN) liquid crystal displays. Annual Review of Materials Science, 2003

Skąd się bierze światło spolaryzowane?

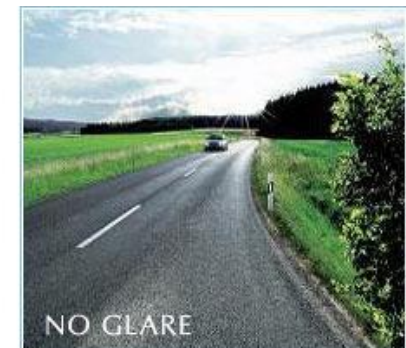


- W naturze:
- Odbicie światła od dielektryka
kątem Brewstera:

$$\theta_B = \arctan\left(\frac{n_2}{n_1}\right)$$



Non Polarised Lenses

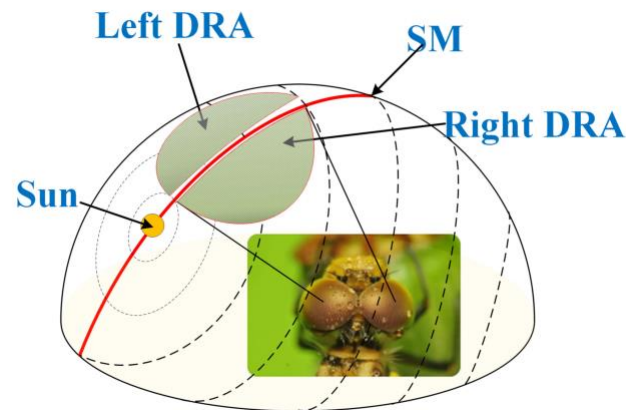
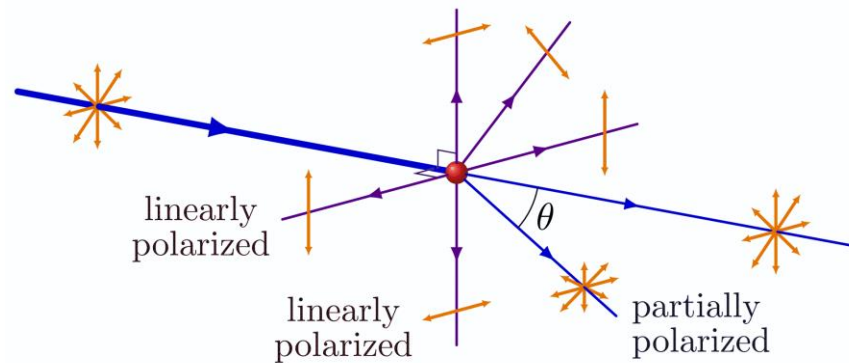
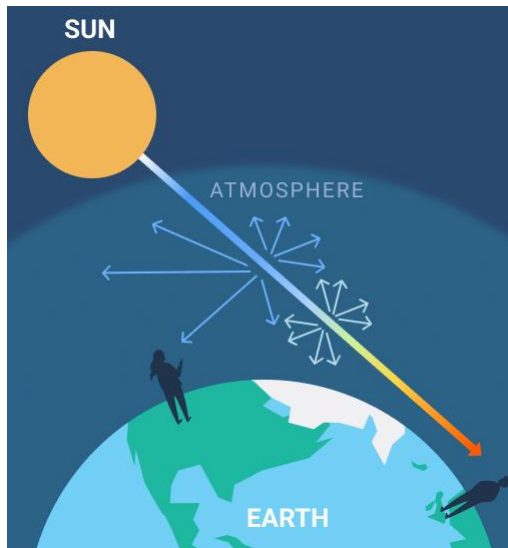


Polarised Lenses

Skąd się bierze światło spolaryzowane?



- W naturze:
- Rozpraszanie Rayleigh'a – światło rozproszone na niebie jest niebieskie i częściowo spolaryzowane



Skąd się bierze światło spolaryzowane?

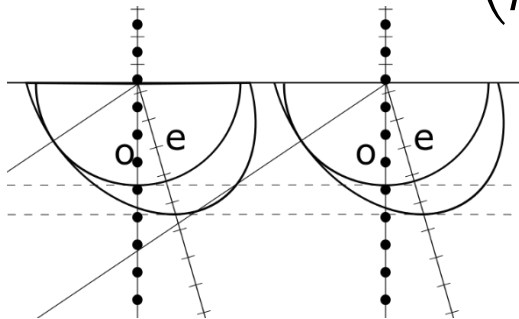


- Zjawisko dwójłomności, np. kryształ CaCO_3
- Anizotropia przenikalności dielektrycznej, a co za tym idzie, współczynnika załamania

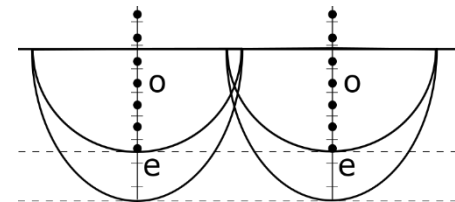
$$\epsilon = \epsilon_0 \begin{bmatrix} n_x^2 & 0 & 0 \\ 0 & n_y^2 & 0 \\ 0 & 0 & n_z^2 \end{bmatrix}$$

- Dla kryształu o jednoosiowej anizotropii $n_x = n_y = n_o$, $n_z = n_e$, rozwiązanie równań Maxwella dla fali E-M o wektorze falowym $\mathbf{k}$ daje warunek:

$$\left(\frac{k_x^2}{n_o^2} + \frac{k_y^2}{n_o^2} + \frac{k_z^2}{n_o^2} - \frac{\omega^2}{c^2} \right) \left(\frac{k_x^2}{n_e^2} + \frac{k_y^2}{n_e^2} + \frac{k_z^2}{n_o^2} - \frac{\omega^2}{c^2} \right) = 0$$



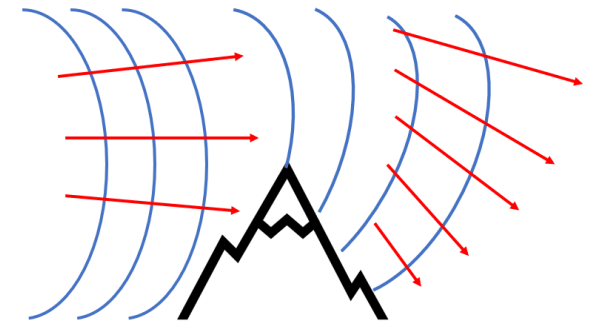
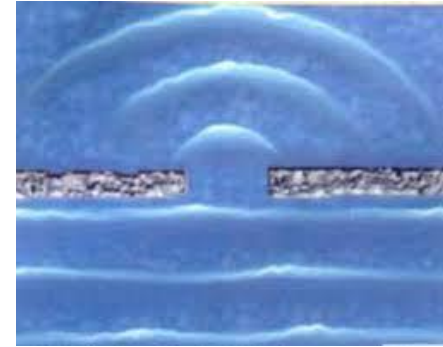
gdy światło pada
wzdłuż osi optycznej:
polaryzacja kołowa -
ćwierćfalowka



Dyfrakcja



- Wszystkie fale uginają się na przeszkodach
- Dyfrakcja jest zauważalna, gdy przeszkody są porównywalne z długością fali...
- Fale radiowe uginają się na obiektach o wymiarach kilku...kilkudziesięciu metrów
- Fale świetlne uginają się na obiektach o rozmiarach mikro...nanometrów

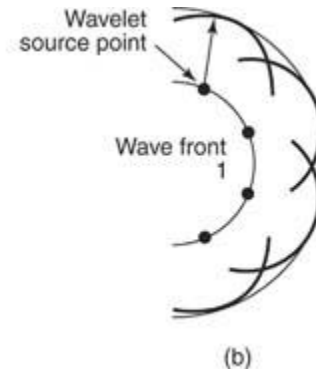
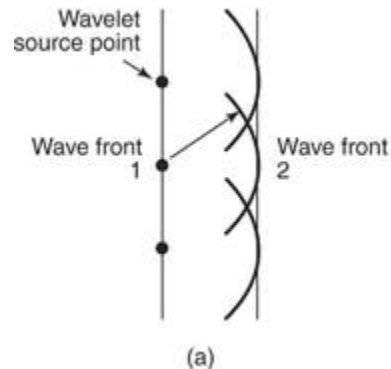


- Promieniowanie X ugina się na obiektach o rozmiarach atomowych
- Dyfrakcja światła ogranicza rozdzielczość mikroskopu

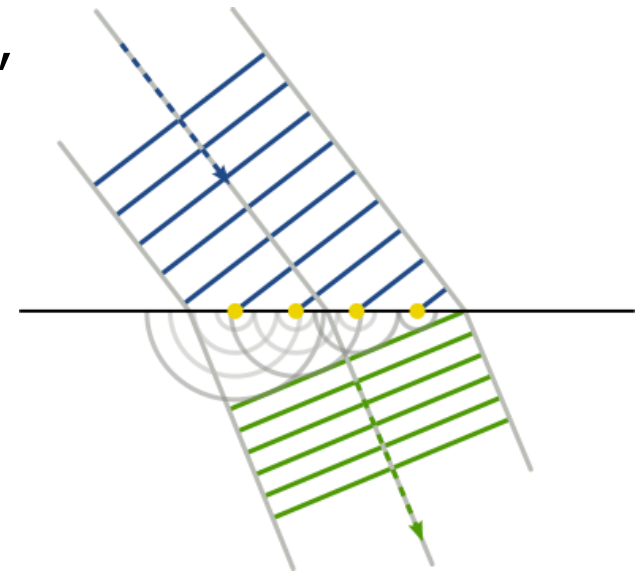
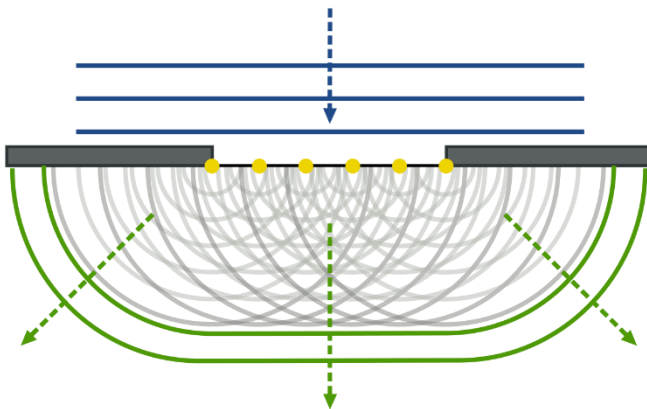


Zasada Huygensa-Fresnela

- Każdy punkt czoła fali jest źródłem nowej falki półkulistej
- Nowe czoło fali powstaje przez interferencję tych nowych falek



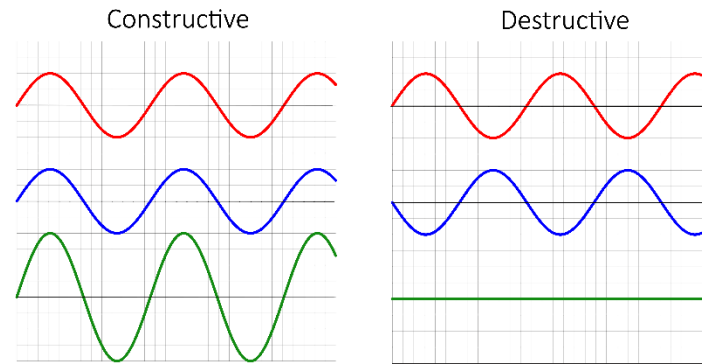
- Zasada ta tłumaczy zarówno efekt dyfrakcji, jak też załamania



Interferencja fal



- Nakładanie się dwóch fal o tej samej częstotliwości może być konstruktywne lub destruktywne (lub pośrednie)

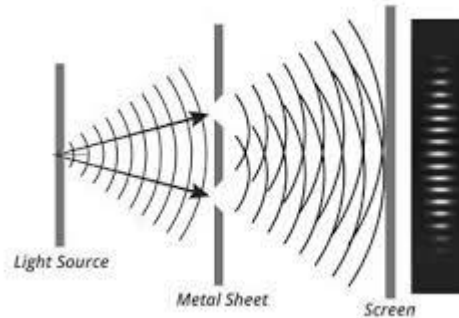


- Efekt interferencji zależy od fazy między jedną falą a drugą
- Różnica fazy może wynikać np. z różnicy czasu
- Warunek: obydwie fale muszą być fazowo spójne (koherentne)
- Generatorem światła o stabilnej fazie i dobrze określonej częstotliwości fali jest laser
- Większość źródeł światła (słońce, żarówka, dioda LED) generuje chaotyczną mieszaninę różnych fal.
Ale takie fale lokalnie mogą być spójne.

Doświadczenie Younga



- T. Young, 1801: interferencja na dwóch szczelinach światła, które przeszło przez pojedynczą szczelinę:



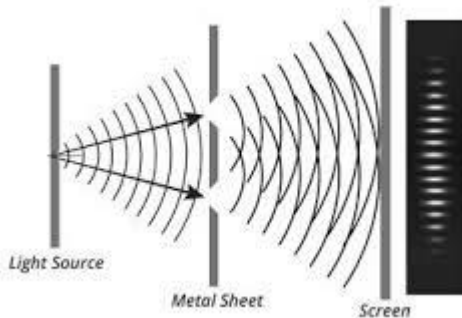
https://javalab.org/en/youngs_double_slit_en/

- Pojedyncza szczelina daje spójną falę kulistą
- Dwie szczeliny są źródłem dwóch nowych fal kulistych
- Różnica dróg optycznych: różnica faz: interferencja
- Wniosek: światło jest falą (a nie cząstkami, jak myślał Newton)



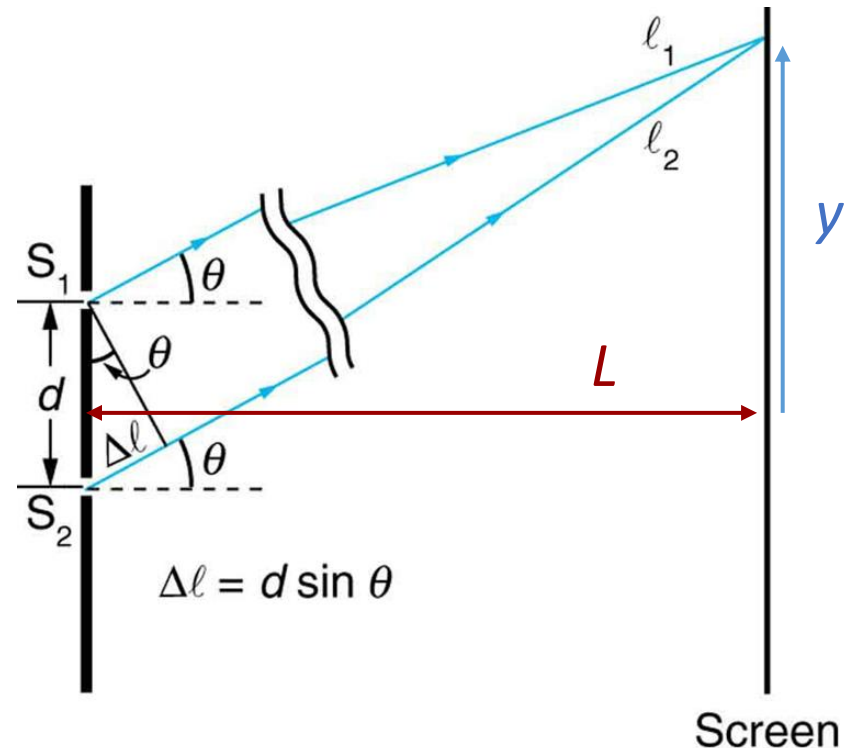
Doświadczenie Younga

- Różnica dróg optycznych: różnica faz: interferencja
- Interferencja konstruktywna dla różnicy dróg równej wielokrotności długości fali $\Delta l = n\lambda$
- Interferencja destruktywna dla różnicy dróg równej nieparzystej wielokrotności połowy długości fali $\Delta l = (2n+1)\lambda/2$



$$y_{max} = \frac{n\lambda L}{d}$$

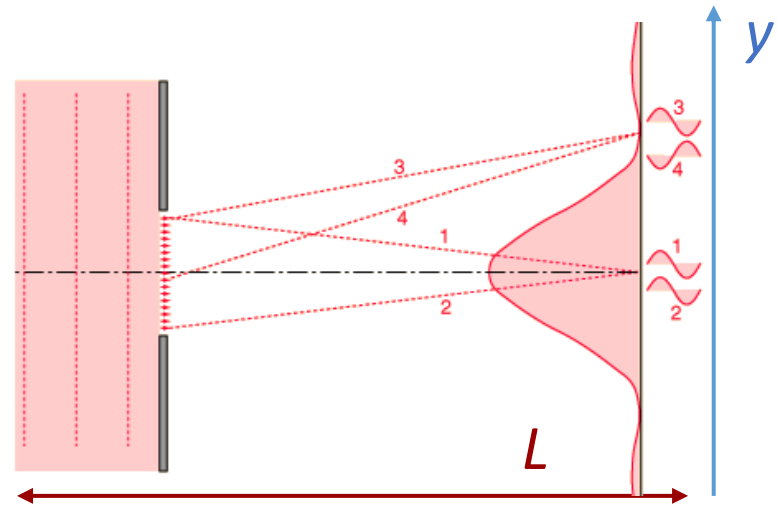
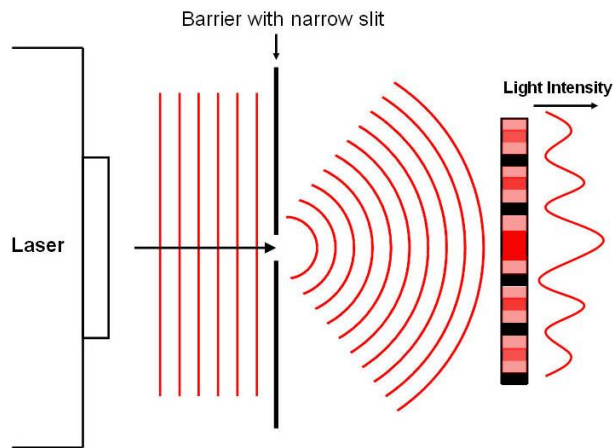
$$y_{min} = \frac{(n + 1/2)\lambda L}{d}$$



Interferencja światła na pojedynczej szczelinie



- Potrzebne spójne źródło światła
- Rozmiar szczeliny na tyle duży, że nie jest „punktowym” źródłem fali kulistej



$$a \cdot \sin \theta = (2m + 1) \frac{\lambda}{2}$$

max, $m=1,2,\dots$

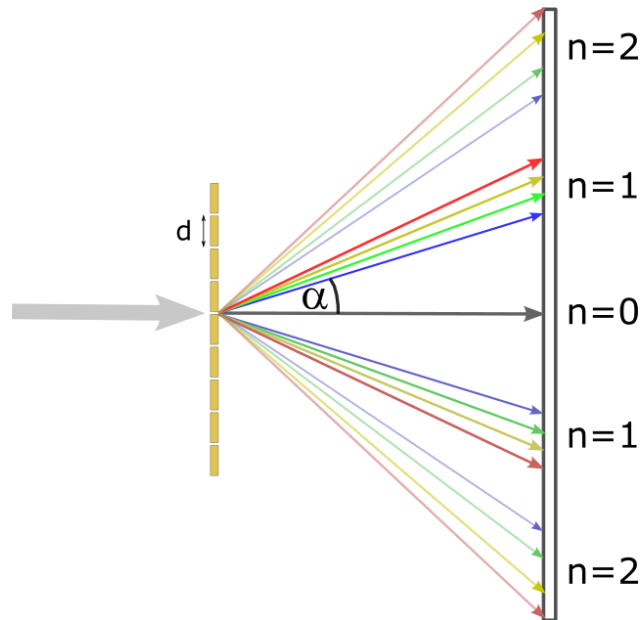
$$a \cdot \sin \theta = m\lambda$$

min, $m=1,2,\dots$

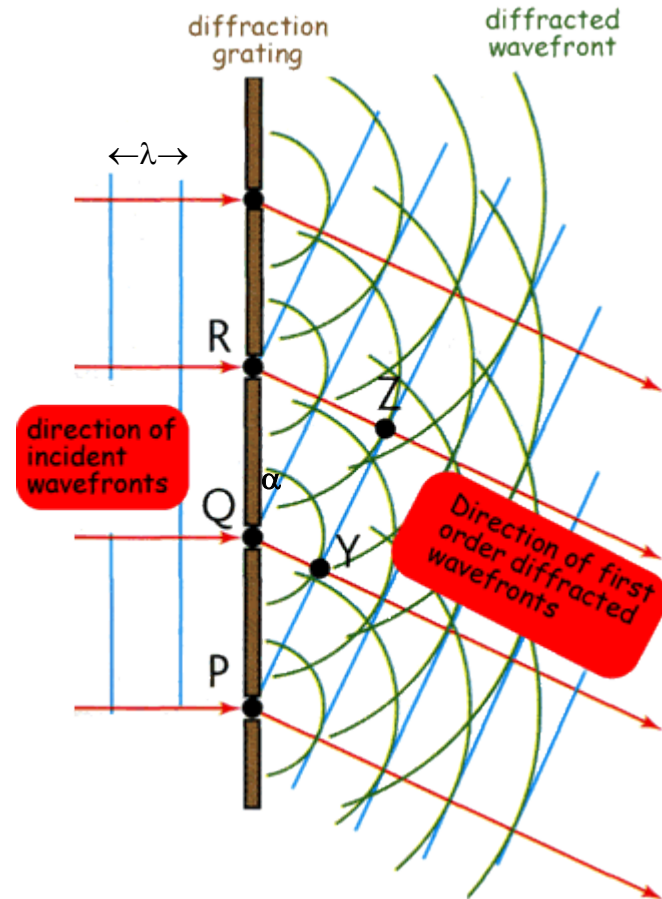


Siatka dyfrakcyjna

- Wiele regularnych szczelin
- Stała siatki determinuje kąt wzmocnienia interferencyjnego



$$\sin \alpha = \frac{n\lambda}{d}$$





Interferencja na cienkiej warstwie

- Odbicie od granicy ośrodków
- Interferencja konstruktywna lub destruktywna zależy od grubości warstwy, długości fali i zmiany fazy przy odbiciu

Constructive Interference

n_1
 $n_2 > n_1$

Phase Shift

Phase Shift

Path length = whole # multiple of λ

$$2t = m\left(\frac{\lambda}{n}\right)$$
$$2nt = m\lambda$$

Destructive Interference

Phase Shift

Phase Shift

t

Path length = multiple of $\frac{1}{2}\lambda$

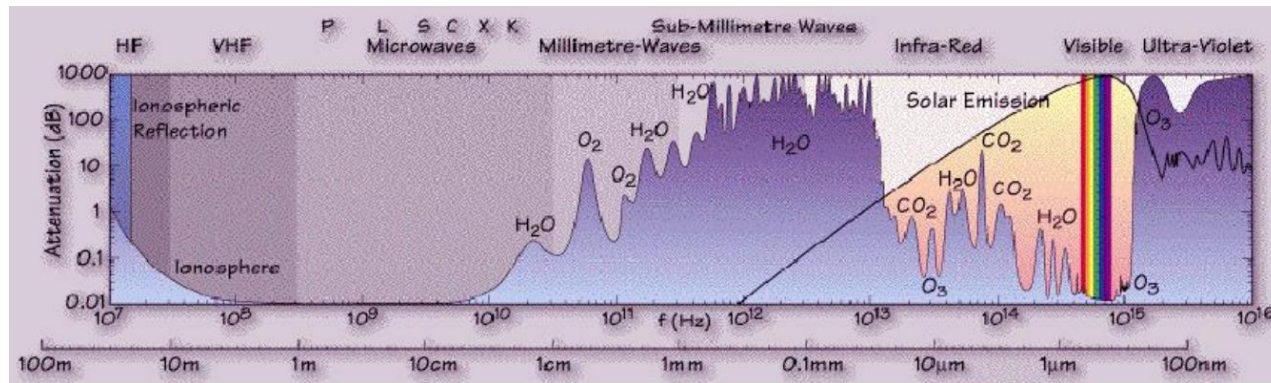
$$2t = \left(m + \frac{1}{2}\right)\left(\frac{\lambda}{n}\right)$$
$$2nt = \left(m + \frac{1}{2}\right)\lambda$$





Podsumowanie

- Światło to fala elektromagnetyczna. Jak każda fala, ulega zjawiskom falowym takim jak odbicie, załamanie, dyfrakcja, interferencja.
- Odbicie i załamanie fali świetlnej wynika z oddziaływania fali elektromagnetycznej z ładunkami/dipolami, opisywane przez tensor przenikalności dielektrycznej materiału.
- Współczynnik załamania, pochłaniania i transmisji zależy od częstotliwości/długości fali elektromagnetycznej.



- Światło jest falą poprzeczną, może być spolaryzowane.