



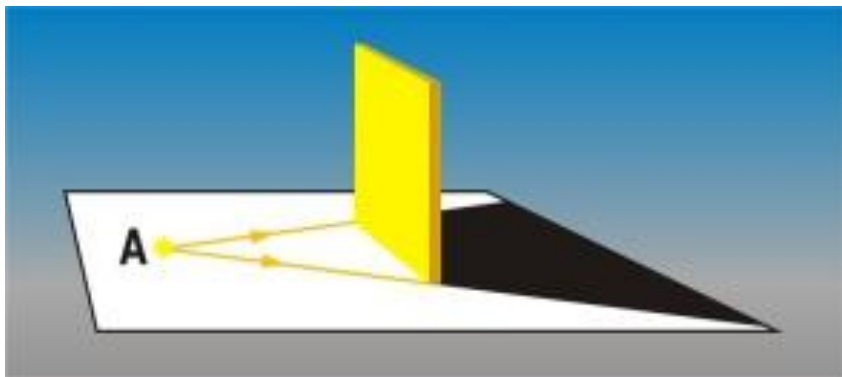
Temat: Optyka.

dr Krzysztof Rochowicz, UMK Toruń 2025

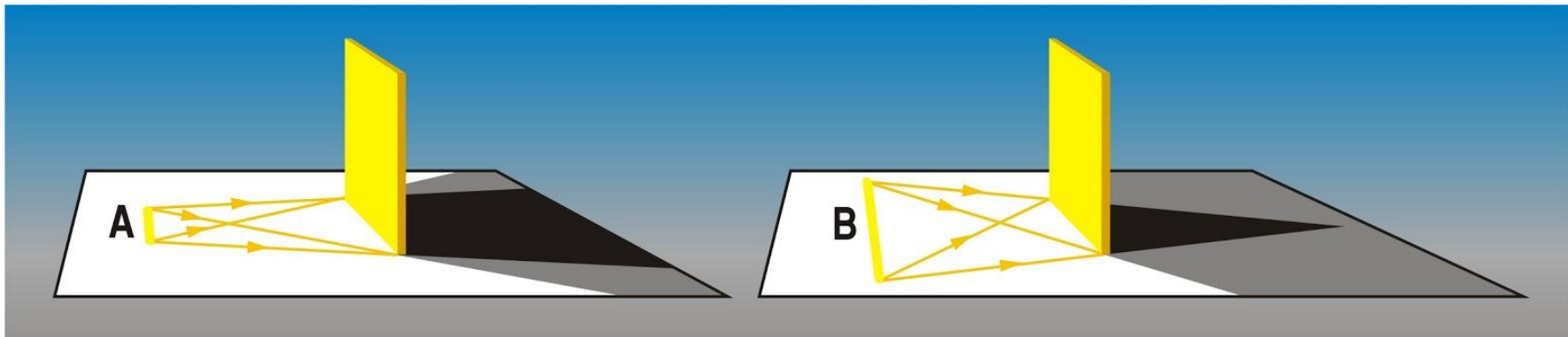


Rozchodzenie
się światła:
prostoliniowe

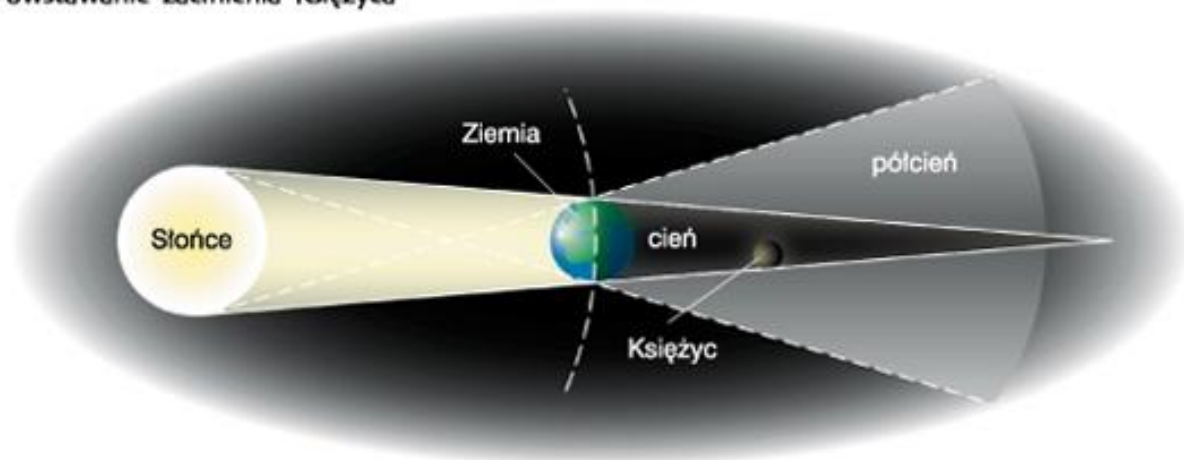




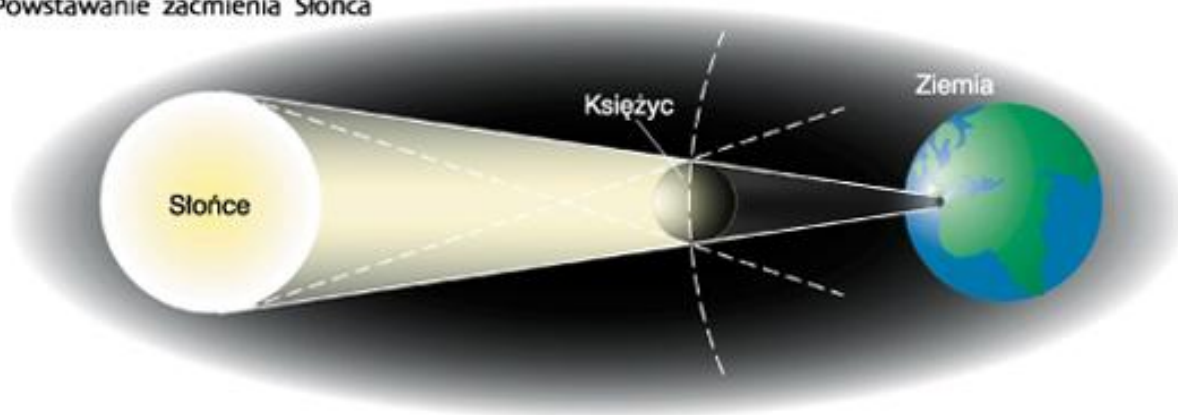
Źródła punktowe,
rozciąęte;
cień i półcień



Powstawanie zaćmienia Księżyca



Powstawanie zaćmienia Słońca



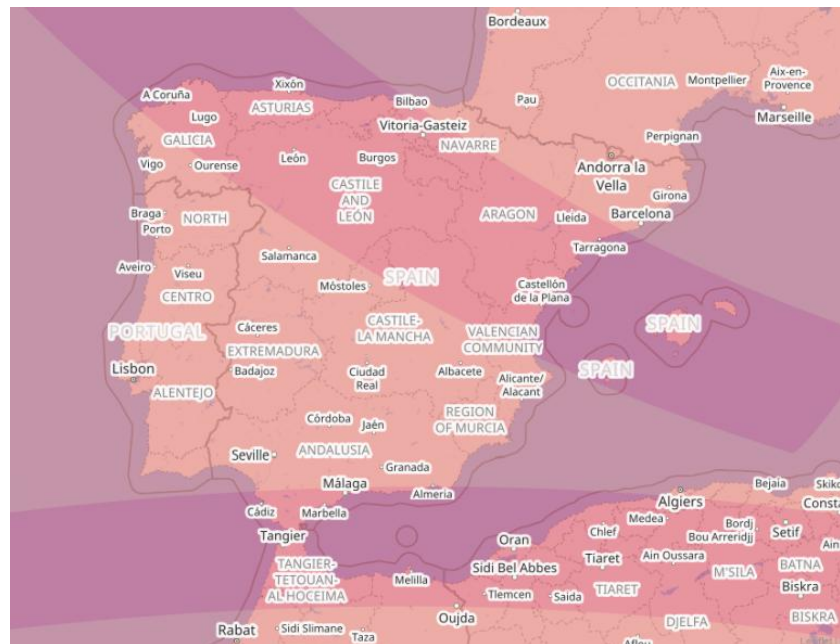
Zaćmienie Księżyca – 28.09.2015



Najbliższe 07.09.2025,
dobrze widoczne:
20.12.2029



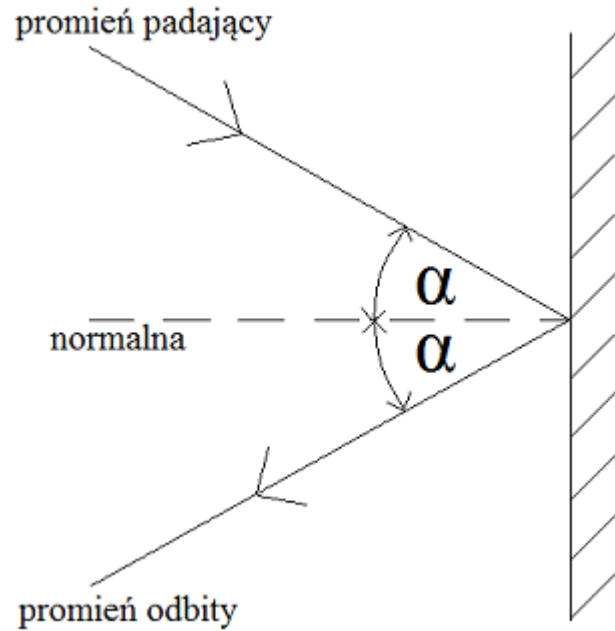
Całkowite zaćmienie Słońca



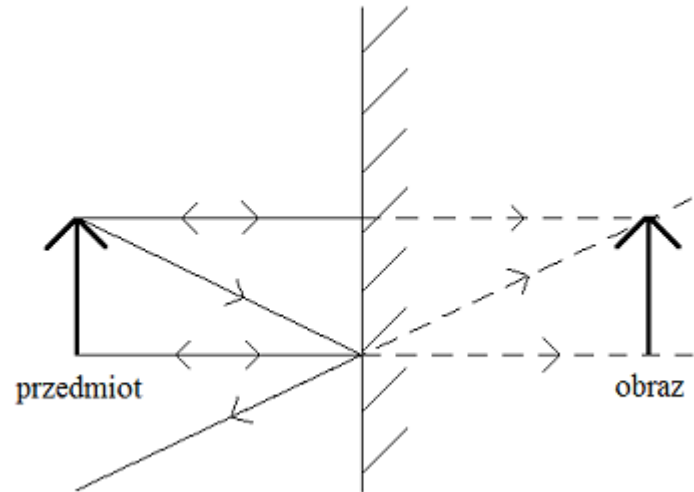
12.08.2026 i 02.08.2027

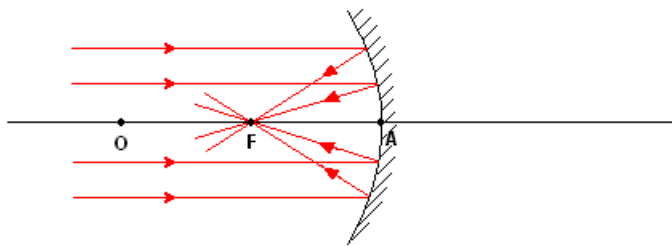


Odbicie światła



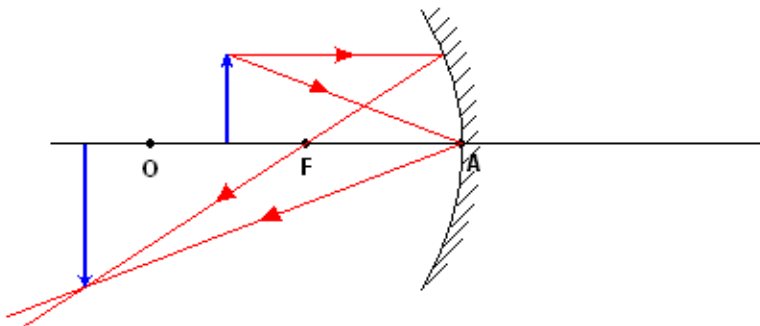
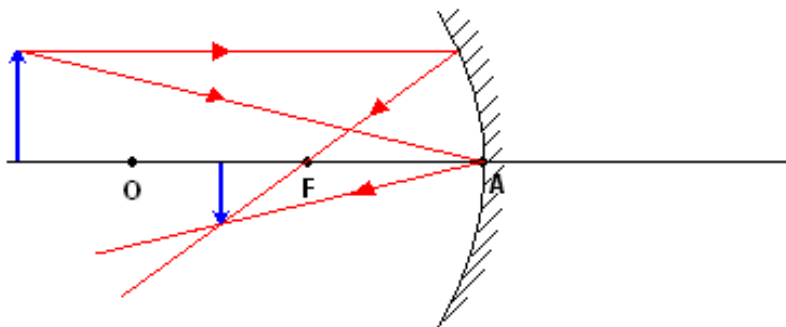
zwierciadło płaskie:
obraz pozorny, prosty



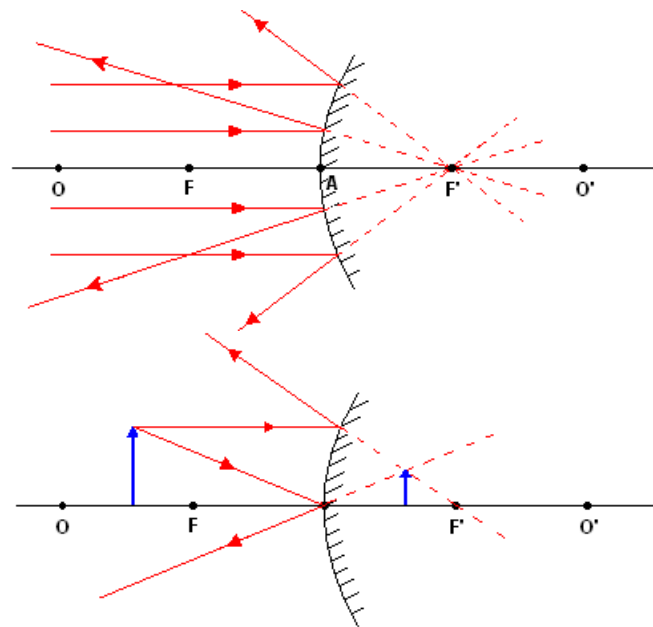
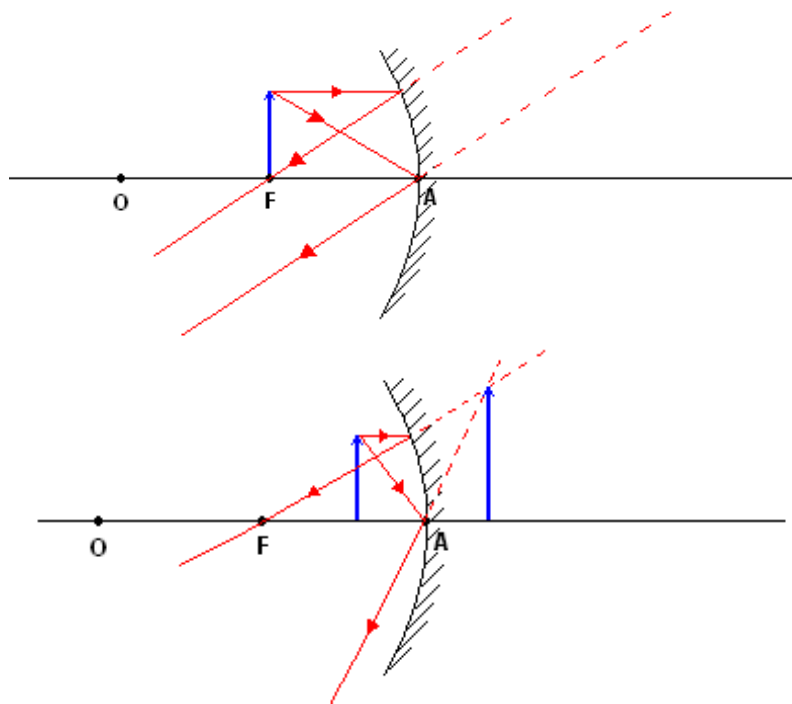


Zwierciadło wklęsłe

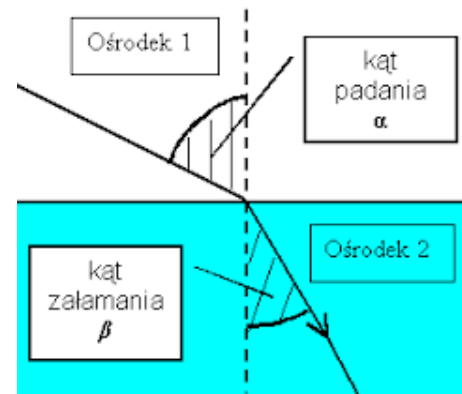
- skupia wiązkę w ognisku
- gdy przedmiot jest dalej niż ognisko, powstanie obraz rzeczywisty, odwrócony (pomniejszony, tej samej wielkości lub pomniejszony)



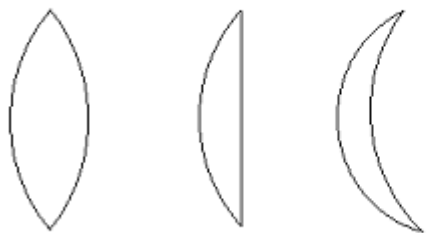
Zwierciadło wklęsłe – c.d. i wypukłe (łyżka)



Zjawisko załamania światła



Soczewki skupiające



dwuwypukła płaskowypukła wkłęsłowypukła



symbol soczewki skupiającej

Soczewki rozpraszające

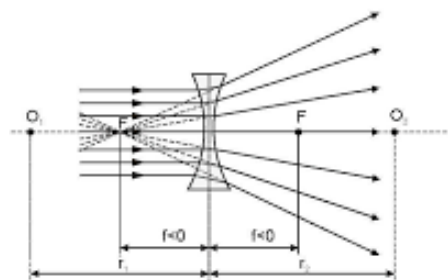
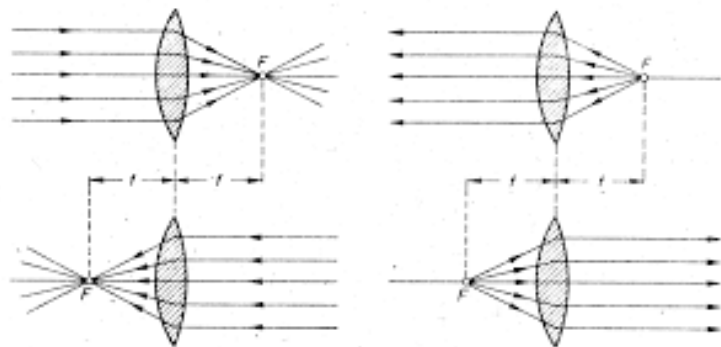


dwuwklęsła płaskowklęsła wypukłowlęsła

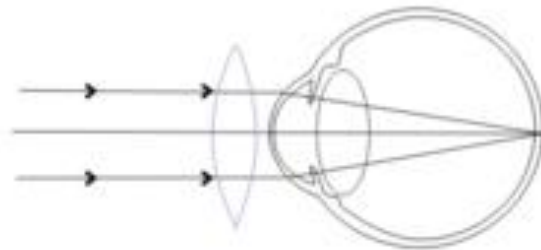
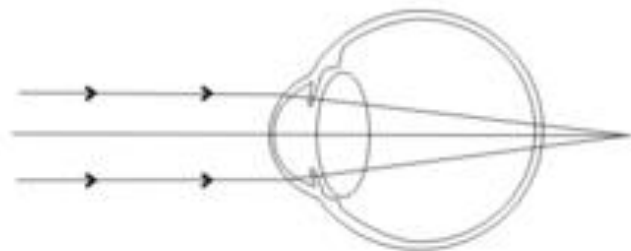
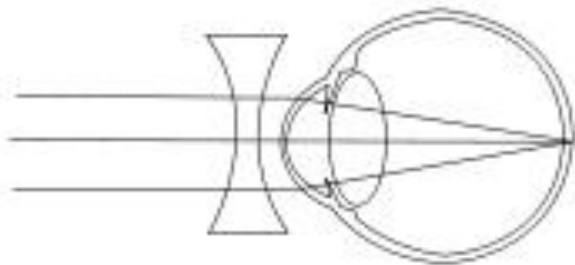
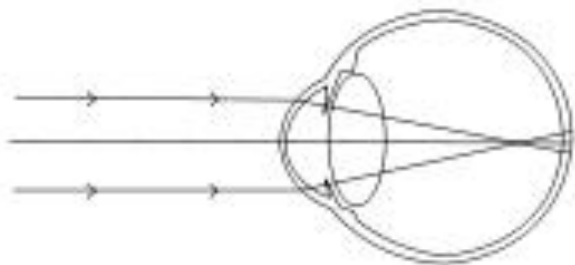
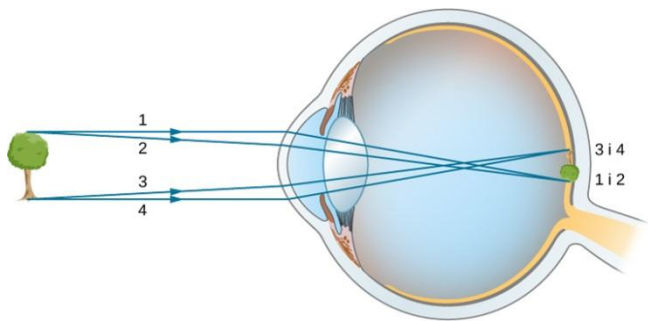


symbol soczewki rozpraszającej

Soczewki

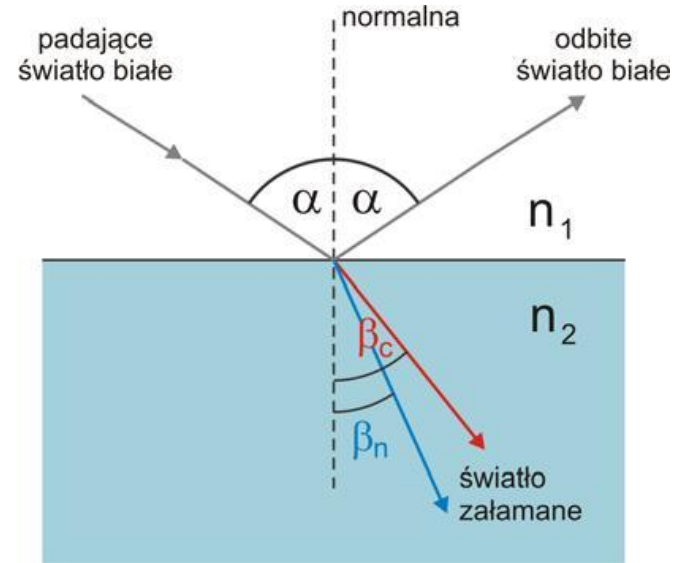
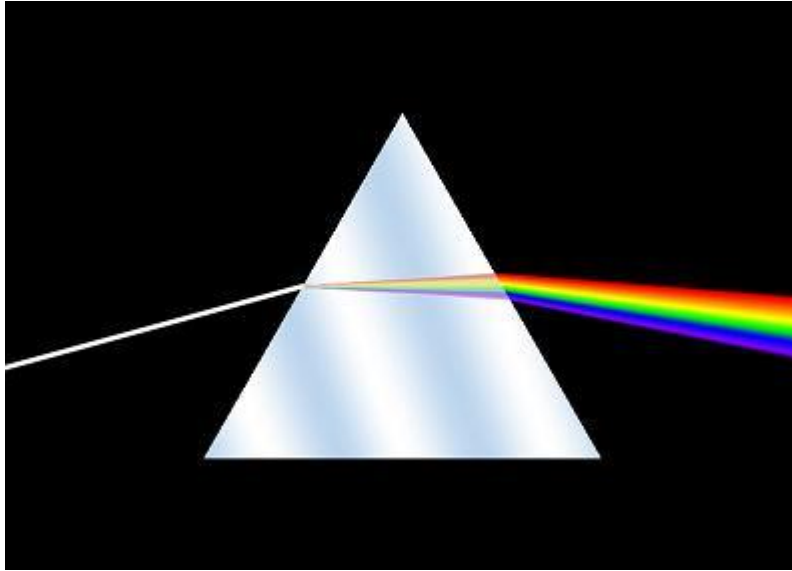


Oko i wady wzroku

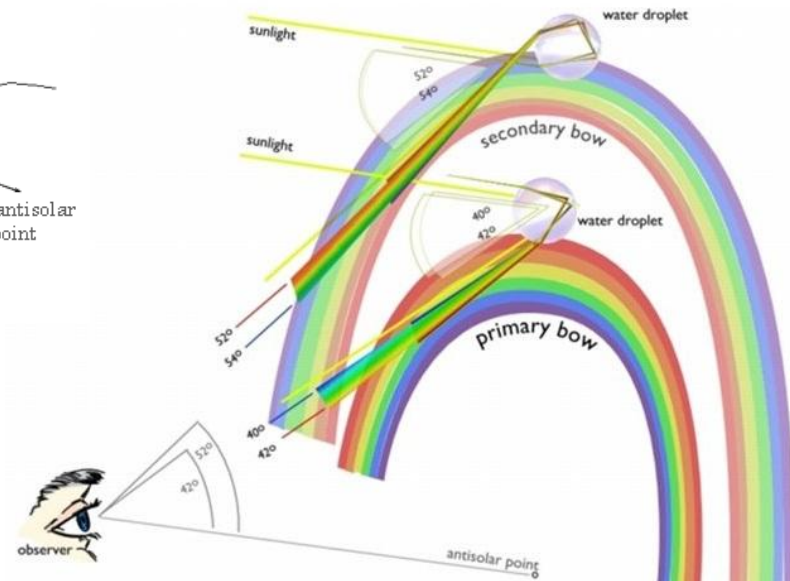
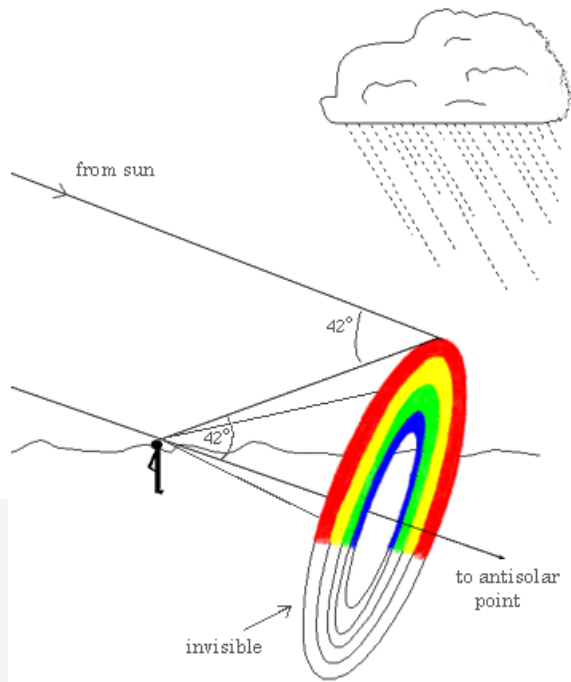
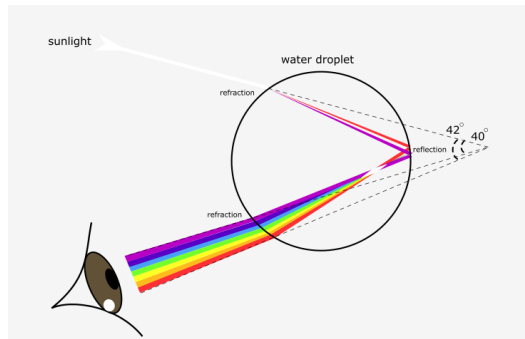


Rozszczepienie światła

- światło białe to mieszanina barw



Tęcza, a nawet dwie!



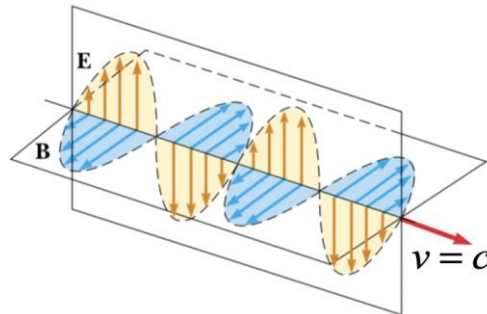
Własności fal elektromagnetycznych, optyka

$$\oint_{\text{zamknięta powierzchnia}} \vec{E} \cdot d\vec{A} = \frac{Q_{\text{wew}}}{\epsilon_0 \epsilon_r}$$

$$\oint_{\text{zamknięta powierzchnia}} \vec{B} \cdot d\vec{A} = 0$$

$$\oint_{\text{po konturze zamkniętej}} \vec{E} \cdot d\vec{l} = -\frac{d}{dt} \int_{\text{powierzchnia otwarta}} \vec{B} \cdot d\vec{A}$$

$$\oint_{\text{po konturze zamkniętej}} \vec{B} \cdot d\vec{l} = \mu_0 \mu_r \left(I + \epsilon_0 \epsilon_r \frac{d}{dt} \int_{\text{powierzchnia otwarta}} \vec{E} \cdot d\vec{A} \right)$$

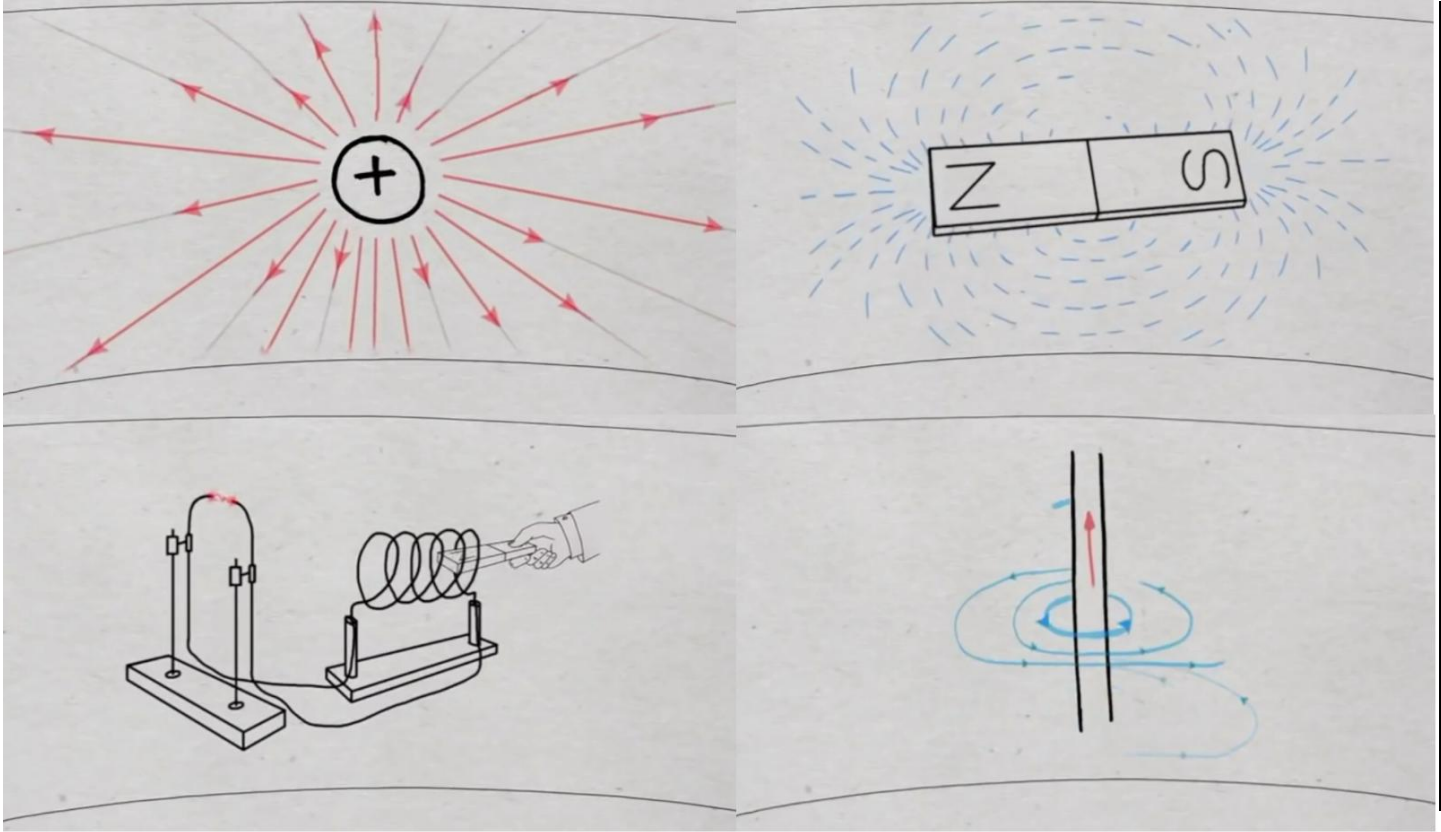


Fale elektromagnetyczne: równania Maxwella



<https://www.youtube.com/watch?v=O8OUH0pPyoI>

Równania Maxwella



Maxwell dowiódł, że światło to fala (zaburzenie, energia) rozchodząca się w polu elektromagnetycznym



równanie falowe:

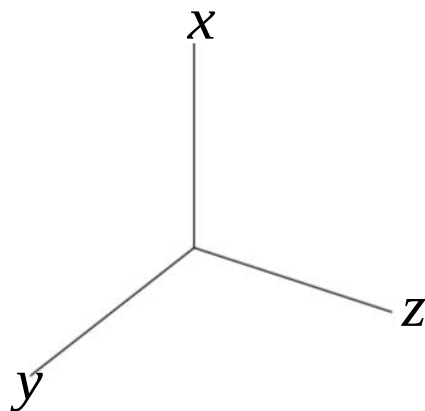
(dla fali poruszającej się wzdłuż osi z)

$$\frac{\partial^2 E}{\partial z^2} = \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 E}{\partial t^2}$$

W ten sposób powiązał elektryczność i magnetyzm z optyką – z dziedzinami, które uważano, że nie są ze sobą powiązane. W próżni prędkość fali elektromagnetycznej wynosi:

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

Fale elektromagnetyczne



Fale płaskie w próżni :

(opisują fale rozchodzące się w pustej przestrzeni w dużej odległości od źródła tych fal)

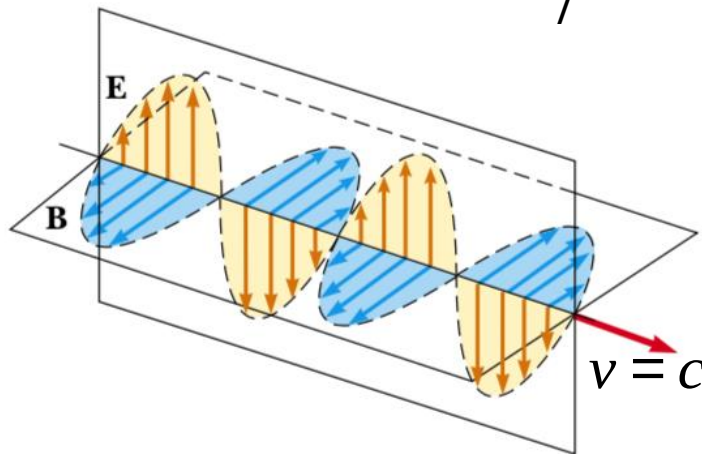
$$\vec{E} = E_0 \hat{x} \cos(kz - \omega t)$$

fale poprzeczne

$$\vec{B} = B_0 \hat{y} \cos(kz - \omega t)$$

$$k = \frac{2\pi}{\lambda}$$

$$\omega = 2\pi f = 2\pi \frac{c}{\lambda} = kc$$



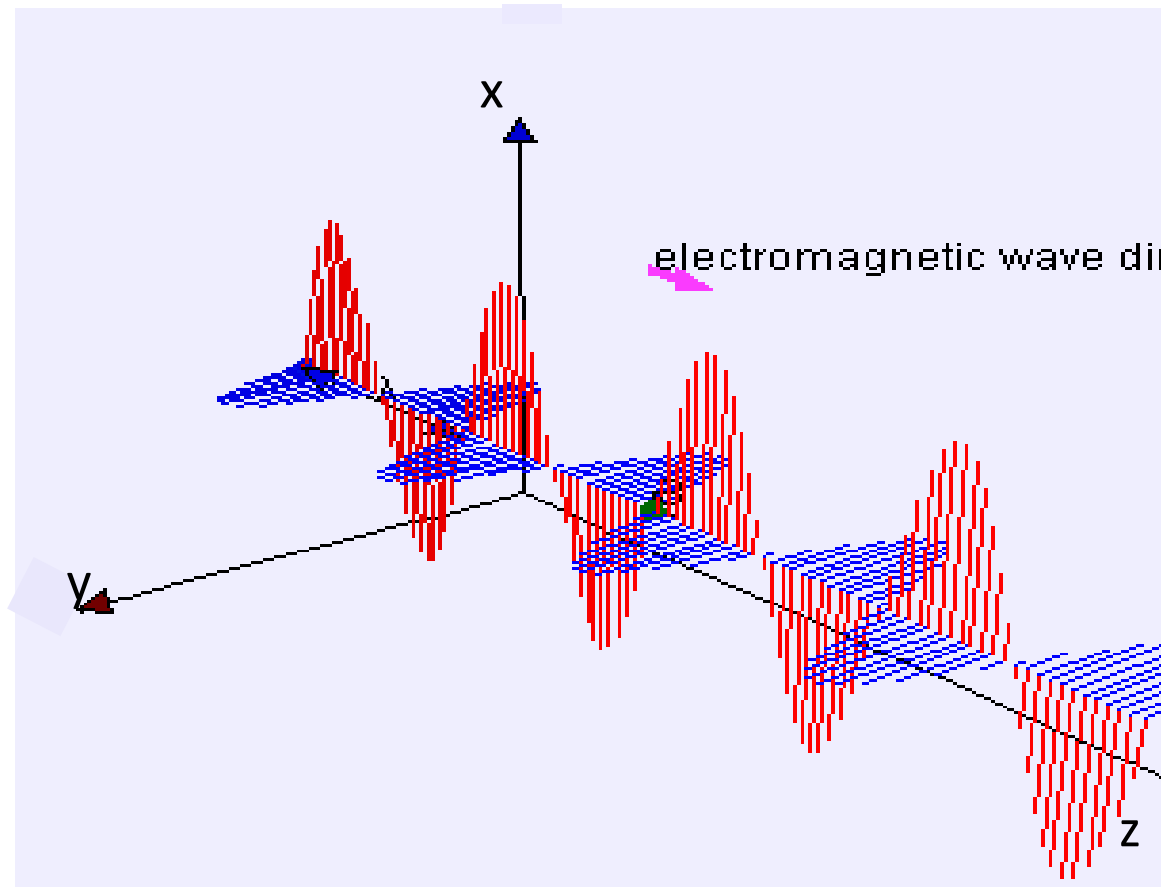
zdjęcie fali w konkretnej chwili

równania fal płaskich
spełniają równania
Maxwella gdy zachodzą dwa
warunki:

$$B_0 = \frac{E_0}{c}$$

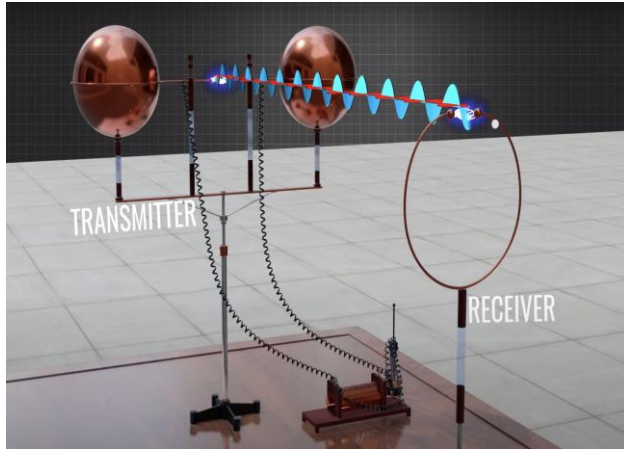
pole magnetyczne jest
znacznie „słabsze” od
pola elektrycznego

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

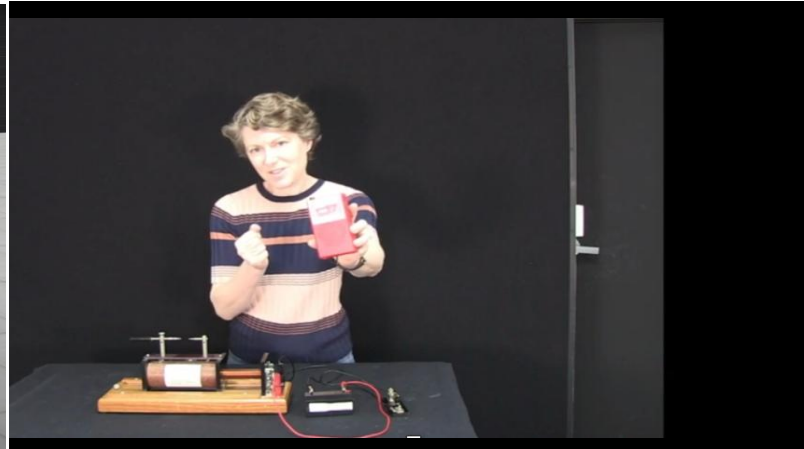


Eksperymentalne odkrycie niewidzialnych okiem ludzkim fal elektromagnetycznych (konkretnie fal radiowych)

Heinrich Hertz (1886 rok)



https://www.youtube.com/watch?v=FWCN_ul5ygY



<https://www.youtube.com/watch?v=qcRNG4KG6IA>

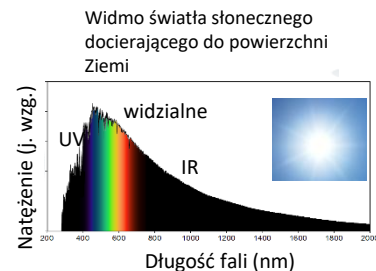
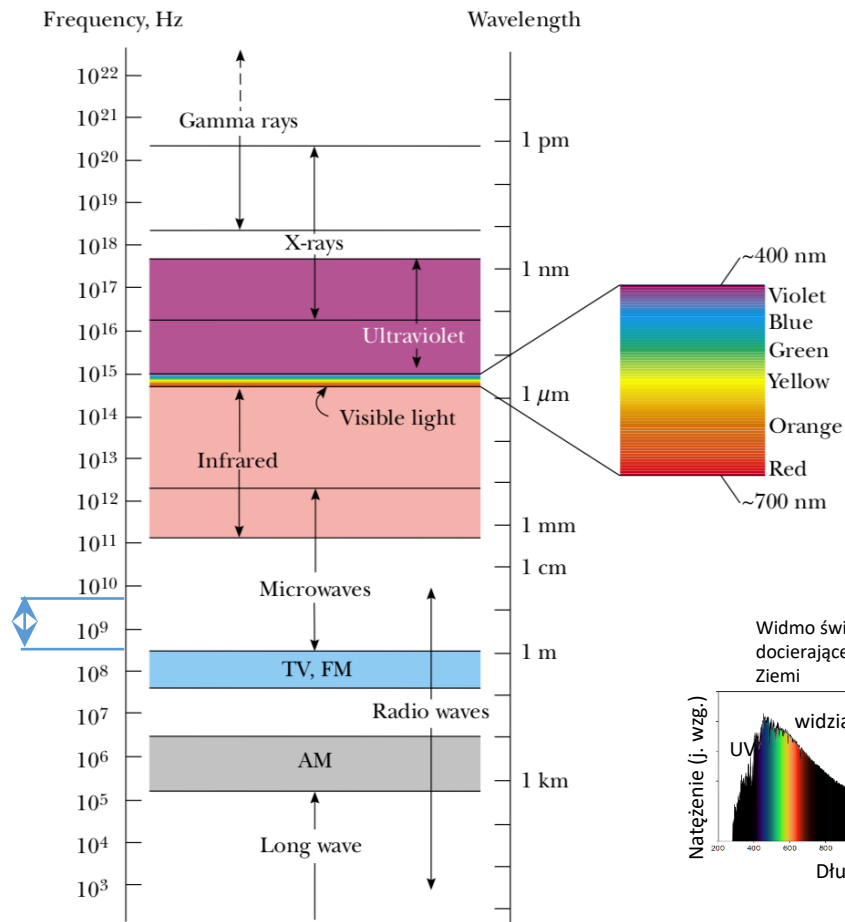
<https://www.youtube.com/watch?v=QZXYFr5YHew> (od 50 s)

Spektrum fal elektromagnetycznych

$$f = \frac{c}{\lambda}$$

- GSM (czyli telefonia komórkowa drugiej generacji – 2G) działa w paśmie częstotliwości 900 MHz i 1800 MHz.
- UMTS (lub 3G) działa w pasmach częstotliwości 900 MHz i 2 GHz.
- LTE (lub 4G) działa w pasmach częstotliwości 800 MHz, 1800 MHz oraz 2600 MHz.
- Technologia 5G: Jako pierwsze częstotliwości dla sieci 5G proponowane są zakresy 600-700 MHz, 3-4 GHz, 26-28 GHz i 38-42 GHz.

Częstotliwość rezonansowa wody wynosi 2,45 GHz i to zjawisko jest wykorzystywane w mikrofalówkach.



Ciśnienie fal elektromagnetycznych



Ciśnienie wywierane przez fale elektromagnetyczne:

$$P = \frac{\langle S \rangle}{c} = \frac{I}{c}$$

Przykład: ciśnienie wywierane przez światło słoneczne.

Średnie natężenie $\langle S \rangle = I = 1000 \text{ W/m}^2$

$$P \approx \frac{\bar{S}}{c} = \frac{1000 \text{ W/m}^2}{3 \times 10^8 \text{ m/s}} \approx 3 \times 10^{-6} \text{ N/m}^2.$$

Siła wywierana na dłoń o polu powierzchni $A = 0.02 \text{ m}^2$ (20 cm x 10 cm) :

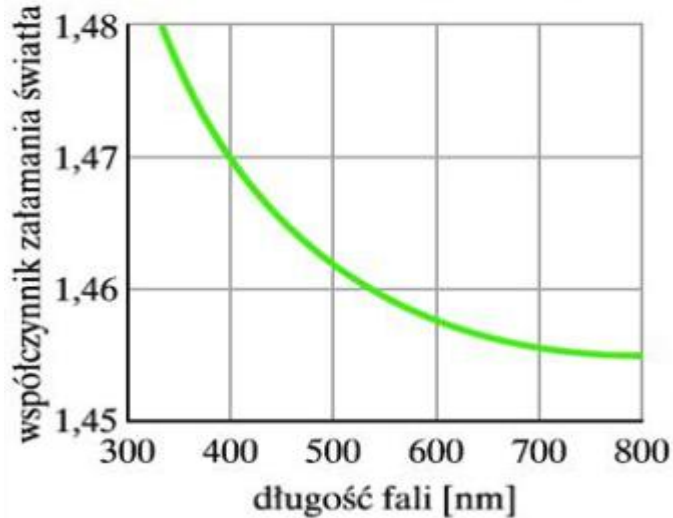
$$F = PA \approx (3 \times 10^{-6} \text{ N/m}^2)(0.02 \text{ m}^2) \approx 6 \times 10^{-8} \text{ N.} \quad \text{Bardzo mała!}$$

Rozszczepienie światła przez pryzmat

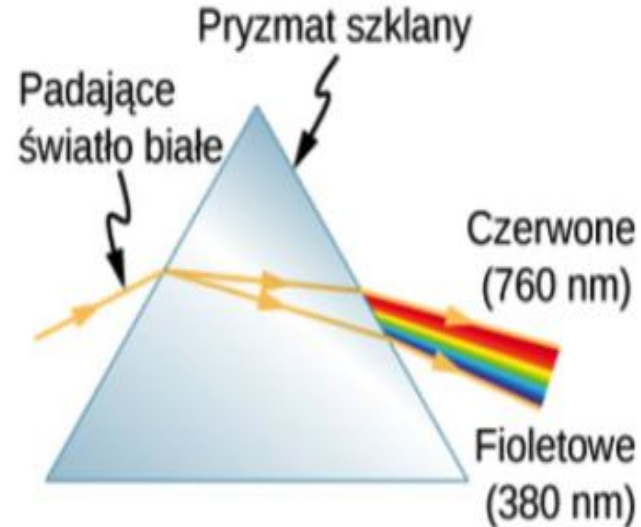


Rozszczepienie światła przez pryzmat

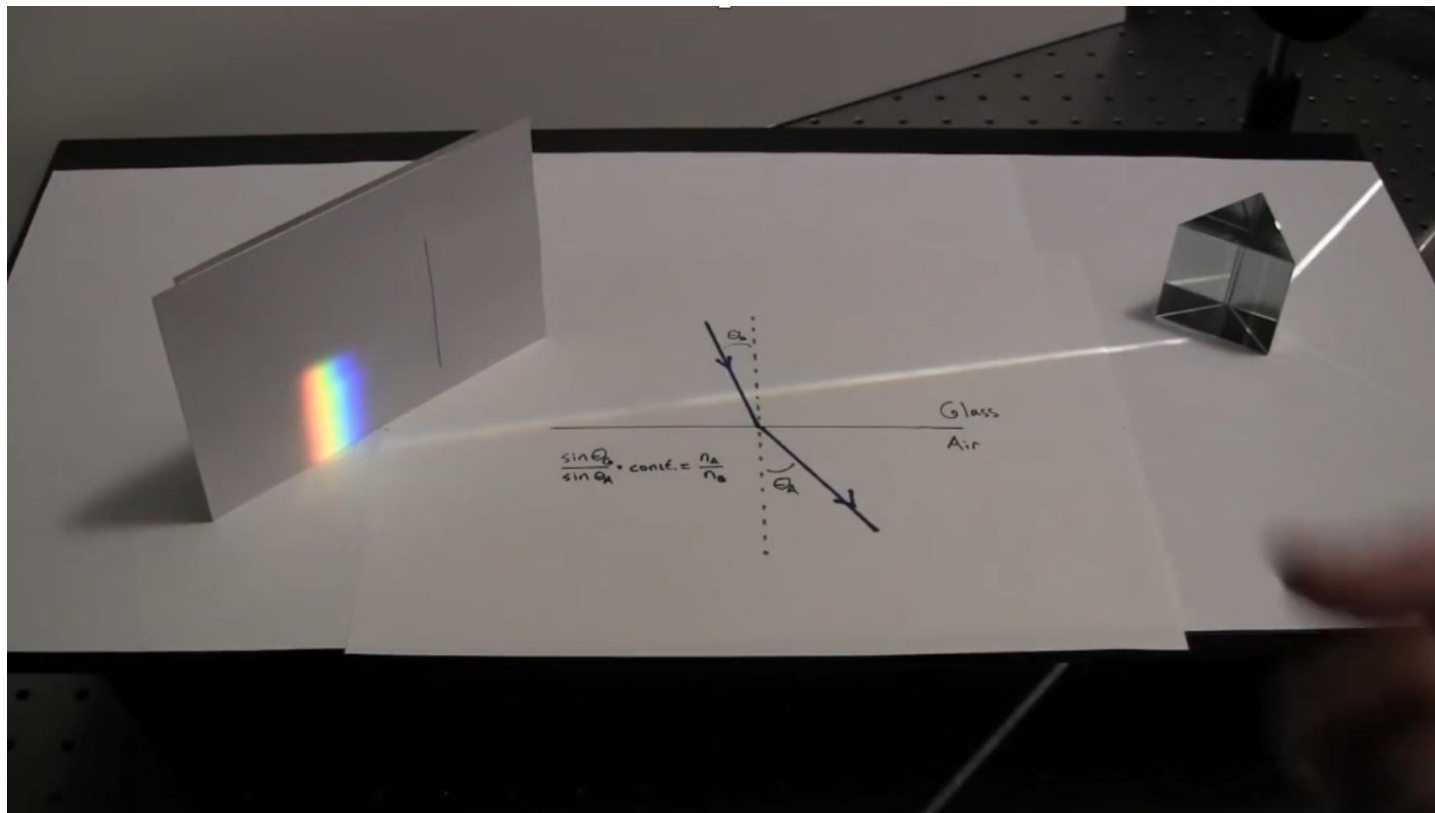
Współczynnik załamania zależy od długości fali elektromagnetycznej (zjawisko to nazywa się *dyspersją*). Dla materiałów przezroczystych w zakresie widzialnym, zależność ta wygląda następująco:



Dzięki istnieniu dyspersji oraz specyficznej geometrii pryzmat rozszczepia efektywnie światło białe na kolory.

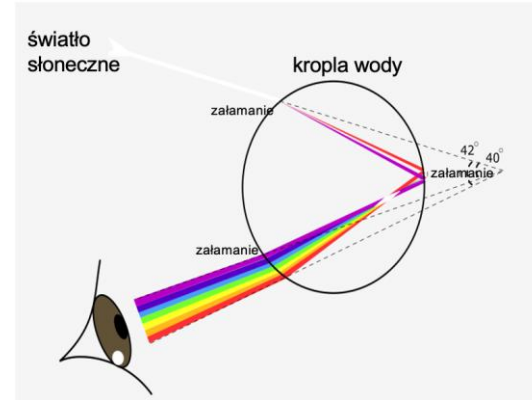


Rozszczepienie światła przez pryzmat

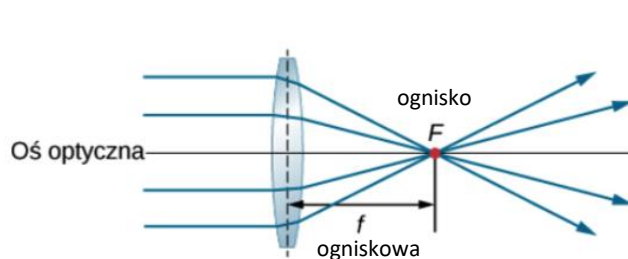


Rozszczepienie światła białego

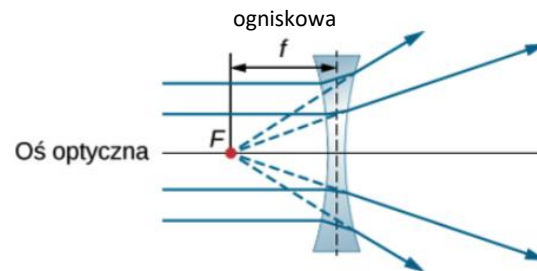
Kiedy promienie słoneczne przechodzą przez kroplę deszczu, powstaje tęcza.



Soczewki

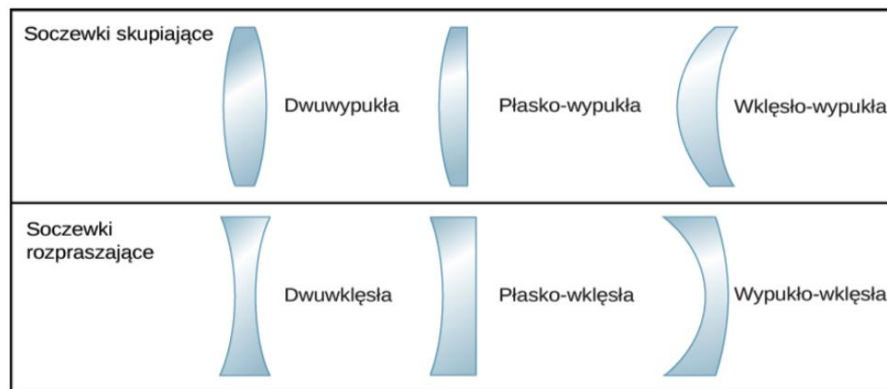


Soczewka skupiająca



Soczewka rozpraszająca

Odwrotność ogniskowej to dioptria (m^{-1}) określająca zdolność do ogniskowania światła.



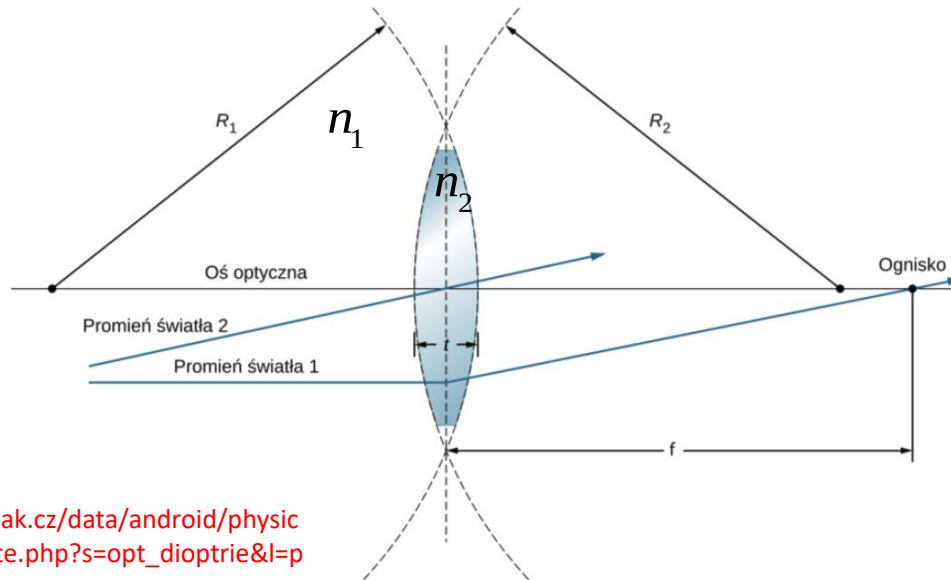
Równanie ciennej soczewki

Gdy grubość soczewki jest mała w porównaniu do krzywizn jej ścian, zachodzi następująca relacja:

$$\frac{1}{f} = \left(\frac{n_2}{n_1} - 1 \right) \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right)$$

Promień krzywizny R : (1) dodatnie dla powierzchni wypukłych, (2) ujemne dla powierzchni wklęsłych (patrząc z zewnątrz)

Ogniskowa f : (1) dodatnia dla soczewek skupiających, (2) ujemna dla soczewek rozpraszających



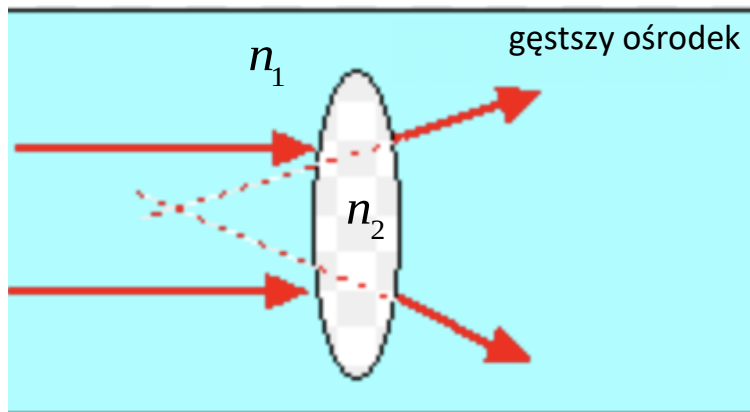
Zgadnij jaki to typ soczewki?

$$\frac{1}{f} = \left(\frac{n_2}{n_1} - 1 \right) \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right)$$



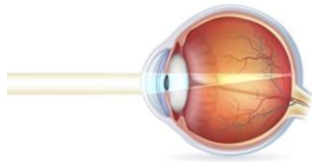
Wpływ ośrodka na właściwości soczewki?

$$\frac{1}{f} = \left(\frac{n_2}{n_1} - 1 \right) \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right)$$

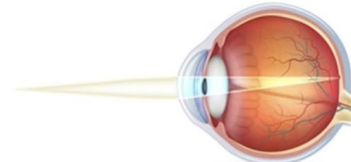


$$n_1 > n_2$$

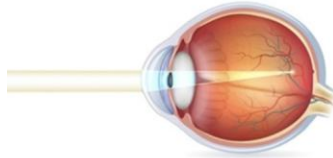
Oko: krótkowzroczność (miopia) i dalekowzroczność (hyperopia)



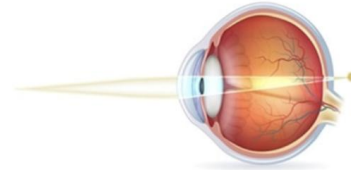
NORMAL VISION
FARAWAY OBJECT IS CLEAR



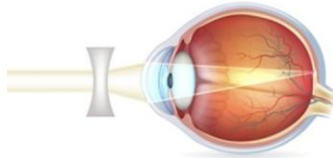
NORMAL VISION
NEAR OBJECT IS CLEAR



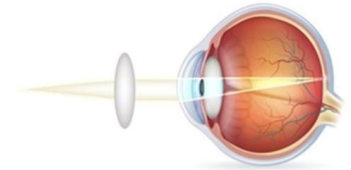
MYOPIA
NEARSIGHTED EYE
THE EYEBALL IS TOO LONG
FARAWAY OBJECT IS BLURRY



HYPEROPIA
FARSIGHTED EYE
THE EYEBALL IS TOO SHORT
NEAR OBJECT IS BLURRY



MYOPIA CORRECTED
CORRECTION WITH A MINUS LENS



HYPEROPIA CORRECTED
CORRECTION WITH A PLUS LENS

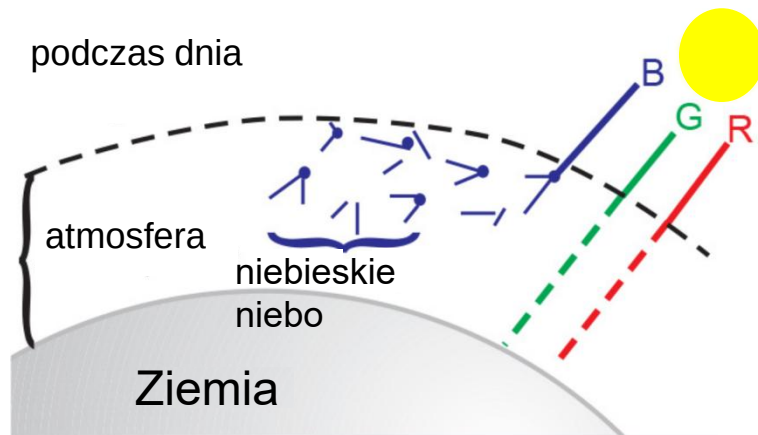
https://www.vascak.cz/data/android/physicssatchool/templateimg.php?s=opt_vady&l=pl&o=2

https://www.vascak.cz/data/android/physicsschool/template.php?s=opt_vady&l=pl

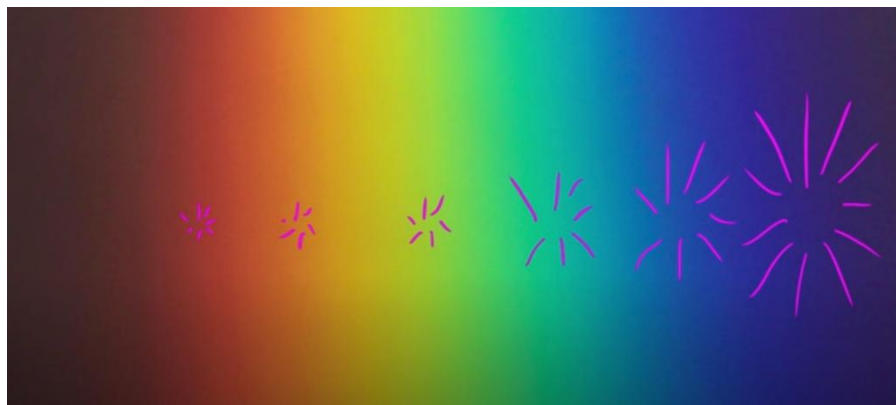
Dlaczego niebo jest niebieskie?



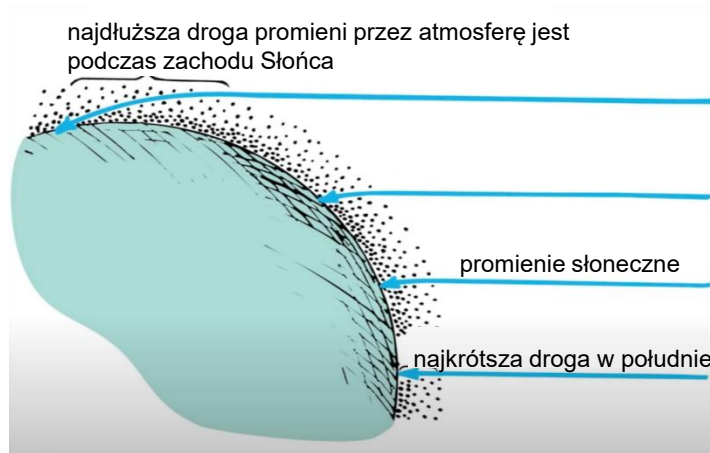
Rozpraszanie światła



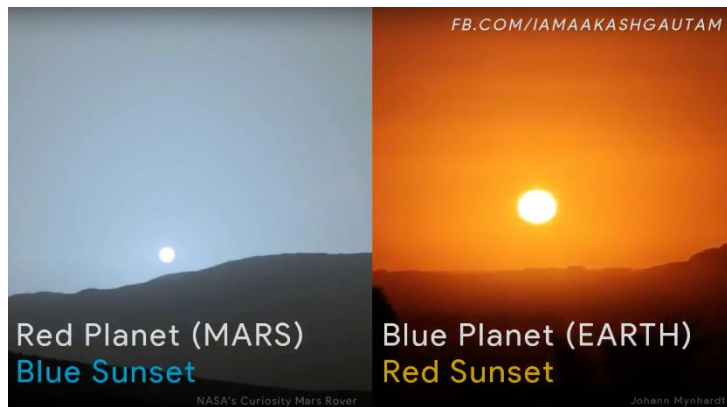
hasło do sprawdzenia: **rozpraszanie Rayleigha**



Dlaczego niebo jest czerwone podczas zachodu Słońca?

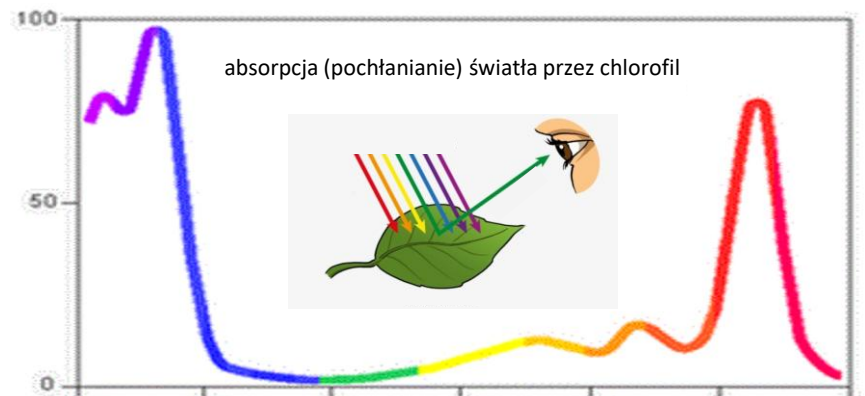


A na Marsie jest
odwrotnie: czerwone niebo
podczas dnia i niebieski
zachód Słońca

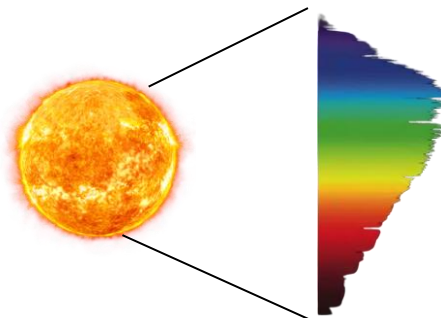


Dlaczego rośliny są zielone?

Światło odbite i absorbowane



krzywa promieniowania słonecznego



Na innych planetach kolor roślin zależałby od najbardziej intensywnego koloru emitowanego przez gwiazdę.

planeta wokół fioletowej gwiazdy (typu O)



planeta wokół czerwonej gwiazdy (typu M)



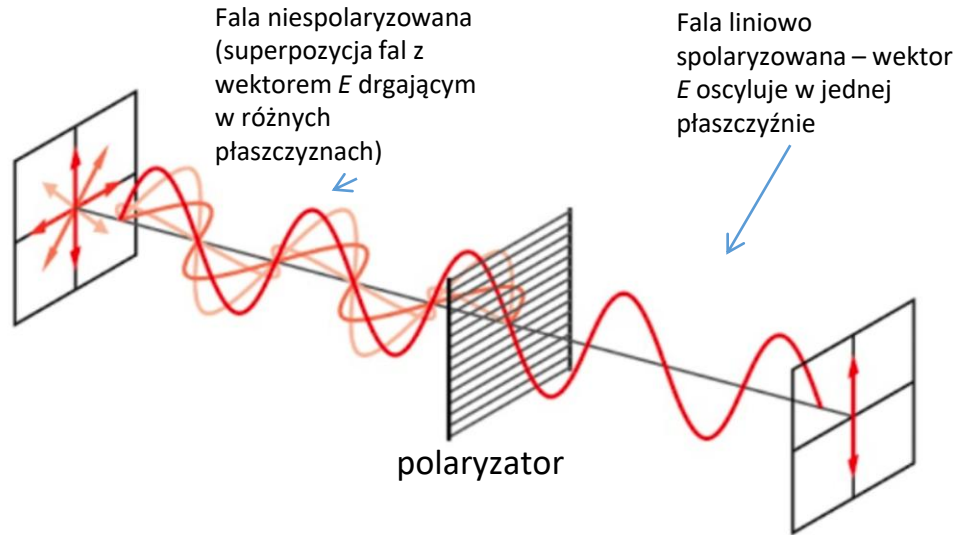
Polaryzacja fal elektromagnetycznych

Elektrony w antenie oscylują w jednym kierunku produkując falę liniowo spolaryzowaną



Elektrony w rozgrzanym włóknie żarówki przyspieszane są w sposób chaotyczny – produkując falę niespolaryzowaną

Falę niespolaryzowaną można spolaryzować za pomocą polaryzatora:

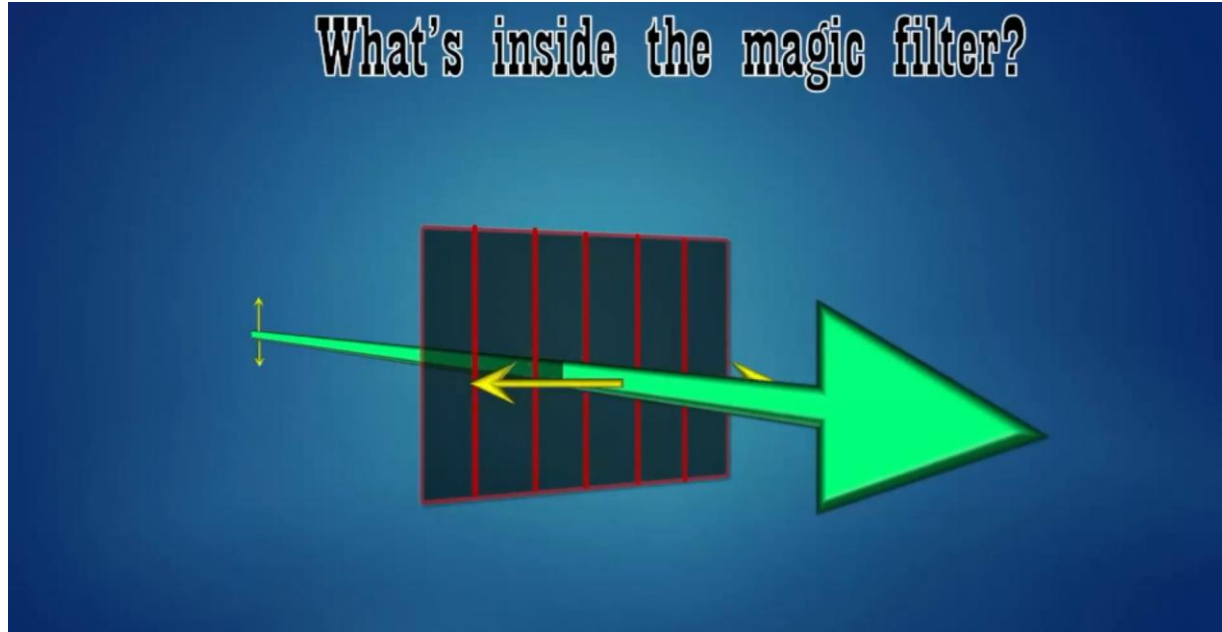


Polaryzacja na przykładzie fal radiowych



Jak działa polaryzator?

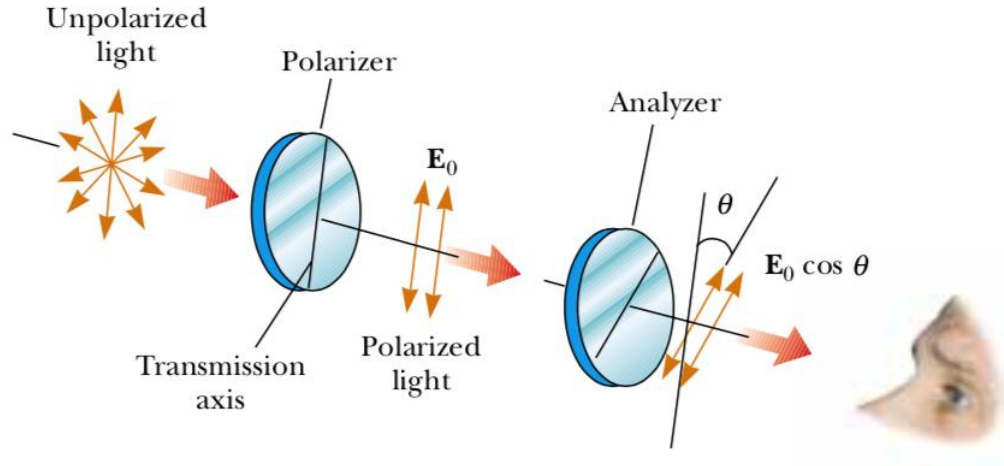
Każdy wektor elektryczny fali niespolaryzowanej możemy rozłożyć na dwie składowe w dowolnych kierunkach wzajemnie prostopadłych.



Po przejściu fali niespolaryzowanej przez polaryzator idealny, natężenie fali maleje o $1/2$.
W rzeczywistych polaryzatorach natężenie wyjściowe jest nieco mniejsze.

Układ polaryzator - analizator

Prawo Malusa



Natężenie fali elektromagnetycznej $I \sim E^2$. Jeżeli I_0 oznacza natężenie fali spolaryzowanej liniowo, to natężenie tej fali po przejściu przez drugi polaryzator (tzw. analizator) wynosi:

$$I = I_0 \cos^2 q$$

(Prawo Malusa)
(odkryte eksperymentalnie)

Ile spada natężenie światła wejściowego (niespolaryzowanego) po przejściu przez układ polaryzator – analizator dla $\theta = 45^\circ$?

Polaryzacja i polaryzatory



Układ polaryzator – analizator

Prawo Malusa



okulary
polaryzacyjne



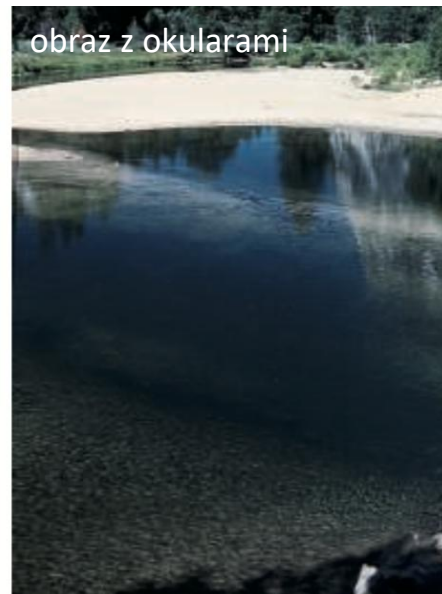
<https://www.youtube.com/watch?v=E9qpbt0v5Hw>

polaroid

https://www.vascak.cz/data/android/physicsatschool/template.php?s=opt_polarizacefiltr&l=pl

Polaryzacja przed odbicie

Światło widzialne odbite od powierzchni niemetalicznych jest częściowo spolaryzowane (wektor E drga w płaszczyźnie równoległej do powierzchni).

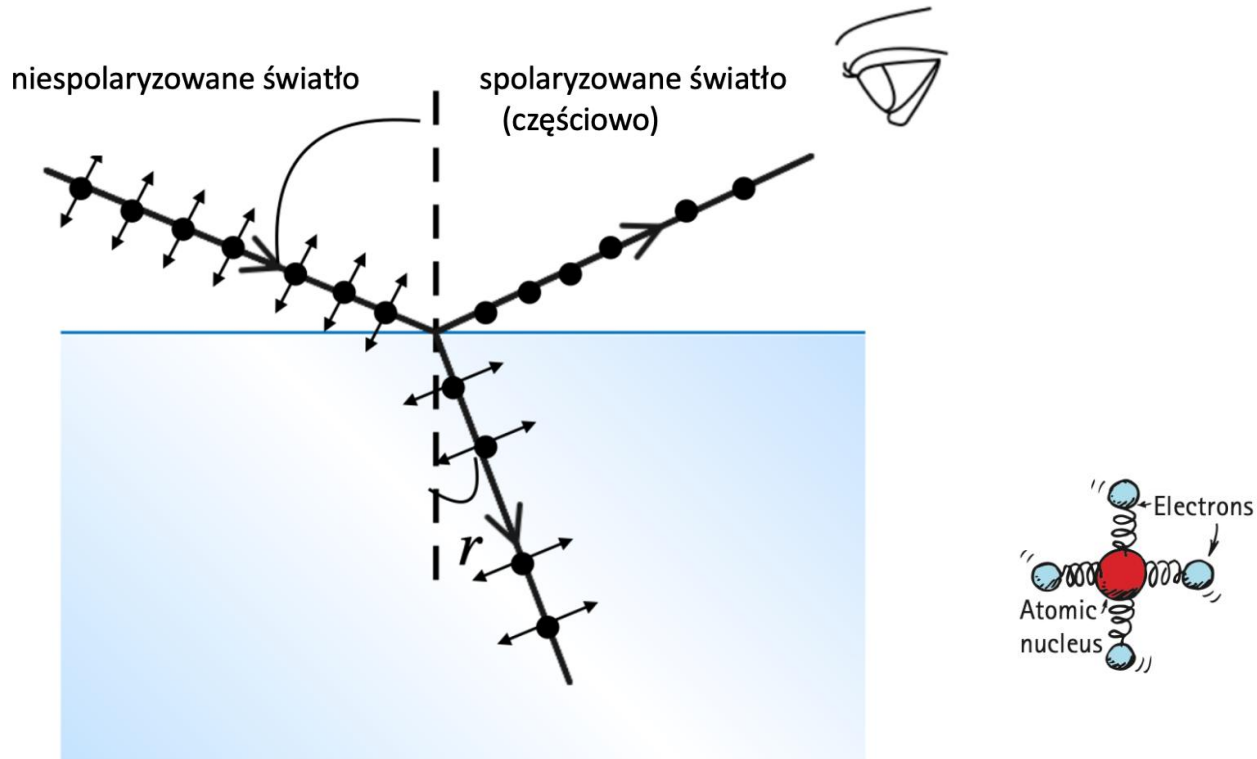


Częściowe usunięcie odbicia nieba w wodzie przy pomocy okularów polaryzacyjnych.

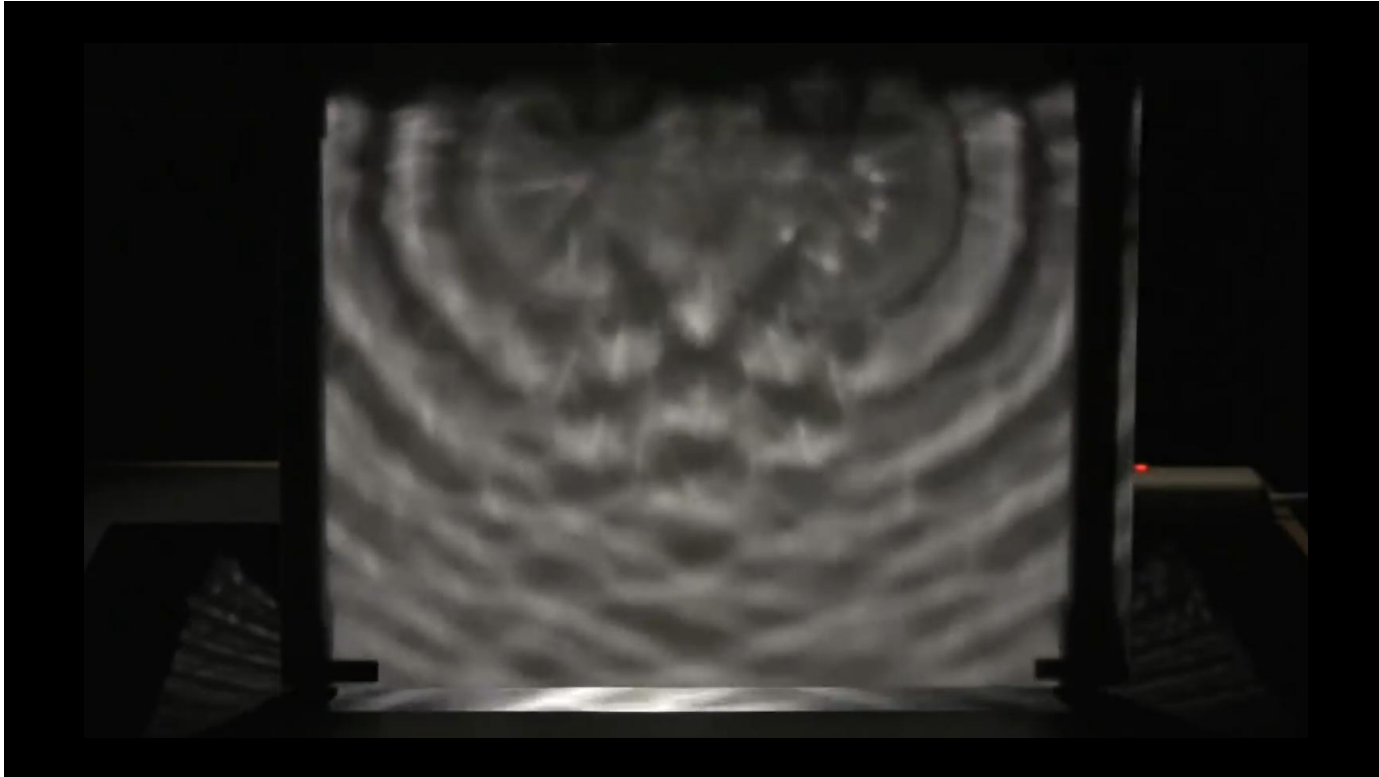
Obejrzyj:

<https://www.youtube.com/watch?v=x7VdsN1kA0k>

Polaryzacja przed odbicie



Interferencja fal na wodzie z dwóch źródeł punktowych

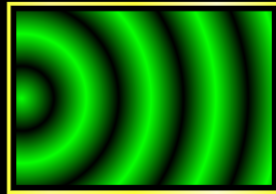


<https://www.youtube.com/watch?v=UMkAXvWIRY4>

Interferencja fal z dwóch źródeł punktowych

Privacy & Terms

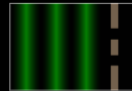
Wave Interference



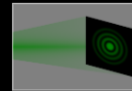
Waves



Interference



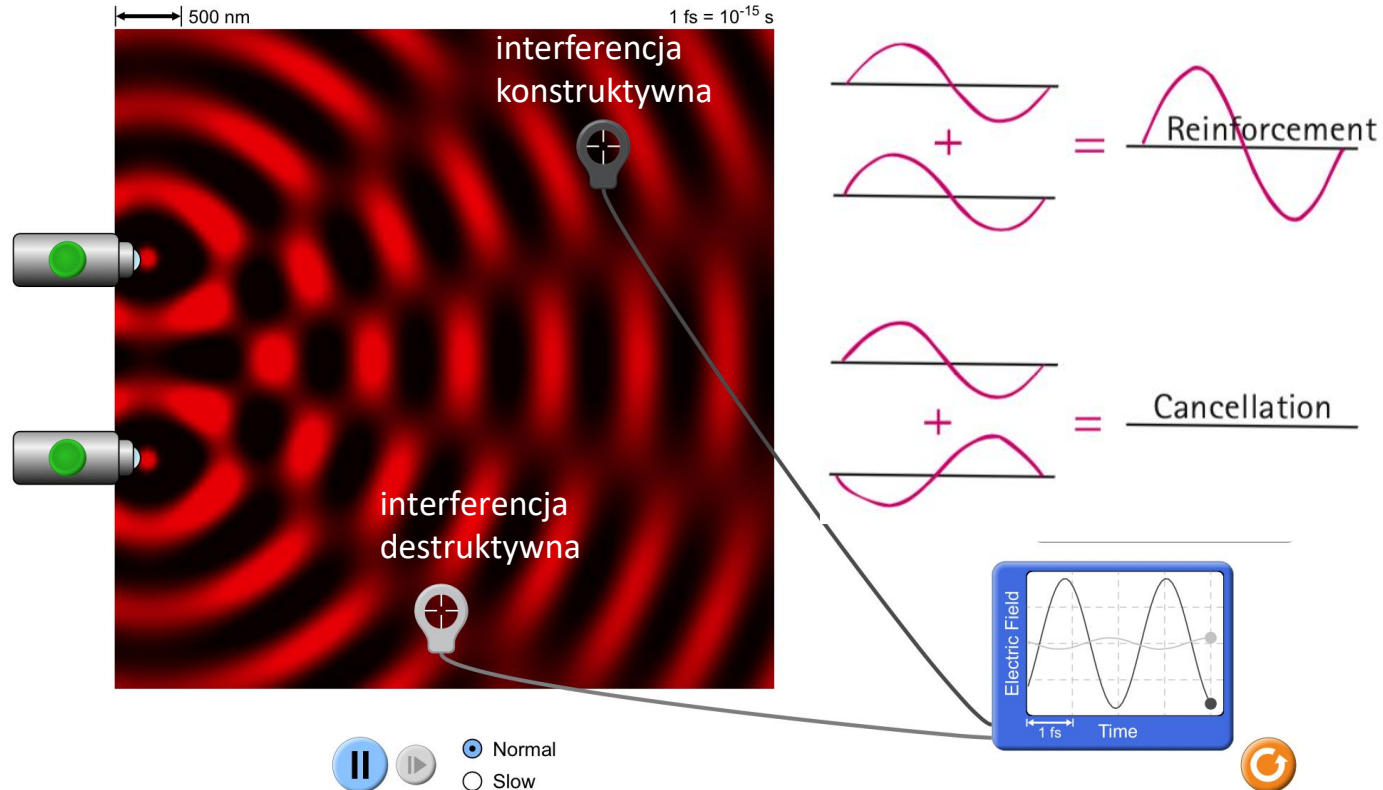
Slits



Diffraction

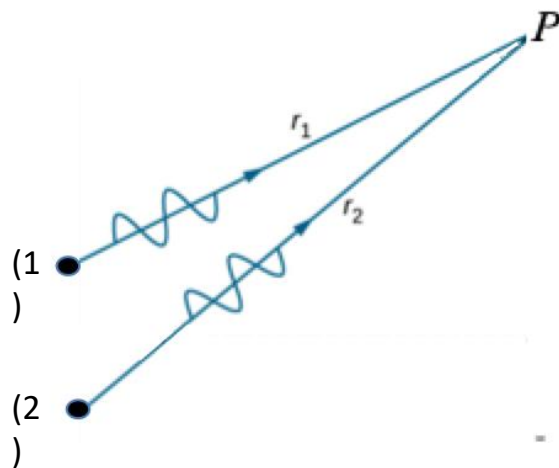
Interferencja fal z dwóch źródeł punktowych

https://phet.colorado.edu/sims/html/wave-interference/latest/wave-interference_en.html



Interferencja fal z dwóch źródeł

Dwa źródła punktowe emitujące fale o tych samych częstotliwościach (i fazie).

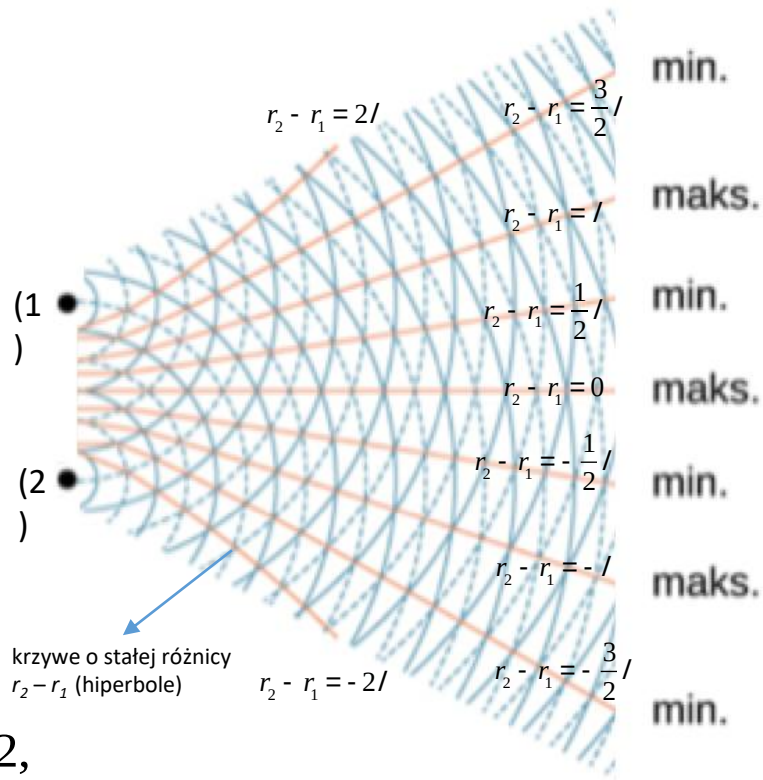


Interferencja konstruktywna, gdy:

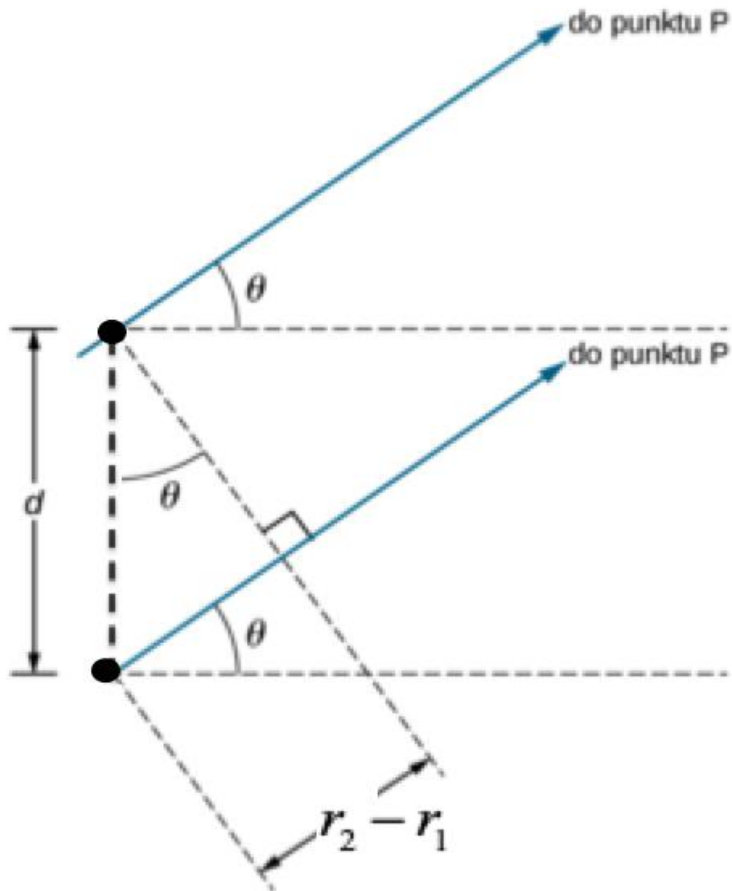
$$r_2 - r_1 = n\lambda, \quad n = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$$

Interferencja destruktywna, gdy:

$$r_2 - r_1 = (2n + 1)\lambda / 2, \quad n = 0, \pm 1, \pm 2,$$



Interferencja fal z dwóch źródeł punktowych



Interferencja konstruktywna, gdy:

$$r_2 - r_1 = d \sin \theta_n = n \lambda,$$

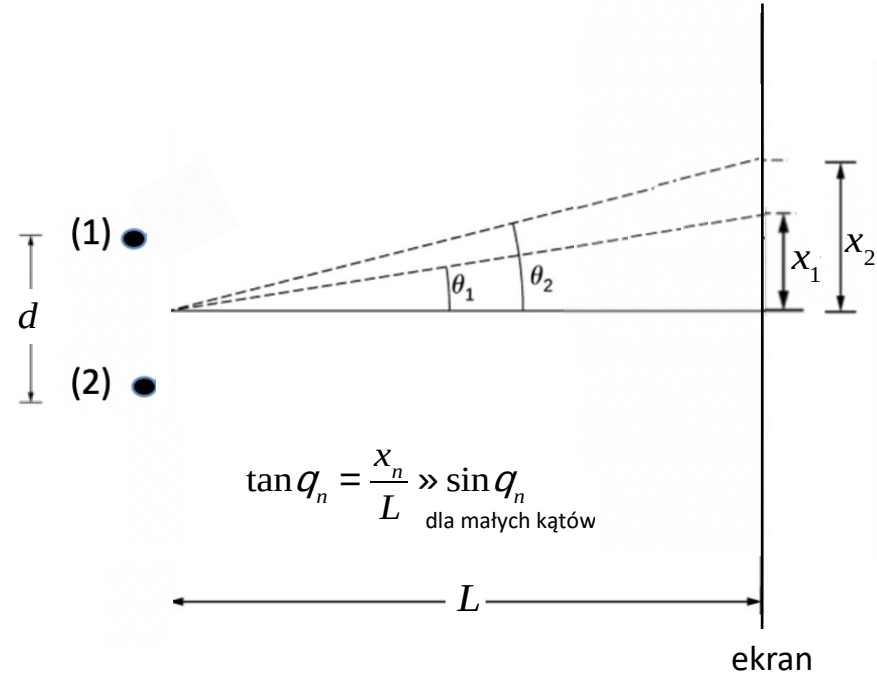
$$\sin \theta_n = n \frac{\lambda}{d},$$

Interferencja destruktywna, gdy:

$$r_2 - r_1 = d \sin \theta_n = (2n + 1) \lambda / 2,$$

$$\sin \theta_n = (2n + 1) \frac{\lambda}{2d},$$

Obserwacja wzoru interferencyjnego na dalekim ekranie

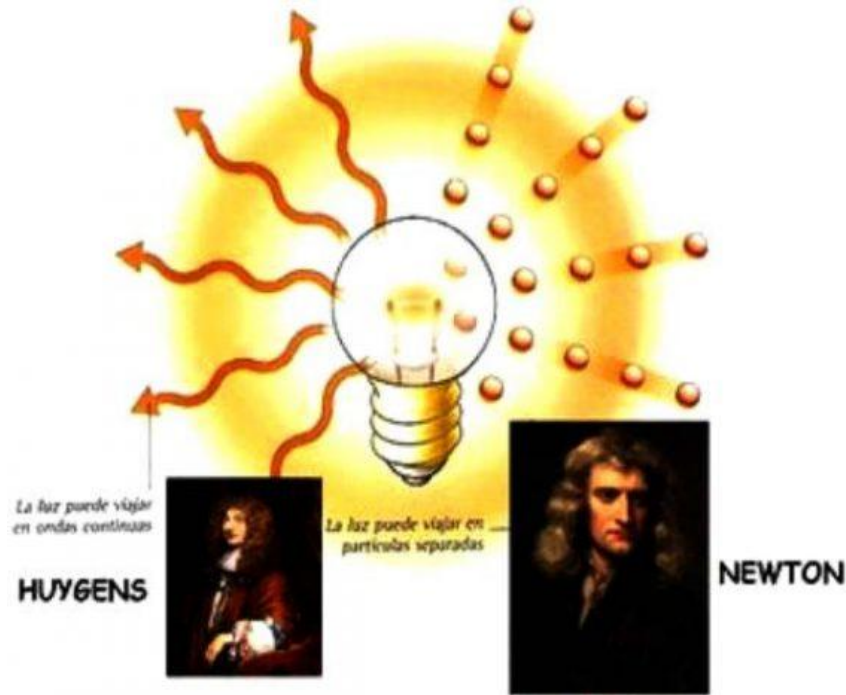


Położenia maksimów, gdy: $x_n = n \frac{L}{d},$

Położenia minimów, gdy: $x_n = \left(2n+1\right) \frac{L}{2d},$

Natura światła: Newton vs Huygens

Światło jest cząstką czy falą?



Thomas Young pokazał w 1801 roku w eksperymencie z dwiema szczelinami, że światło słoneczne interferuje – czyli musi być falą.

Interferencja fal radiowych z dwóch szczelin

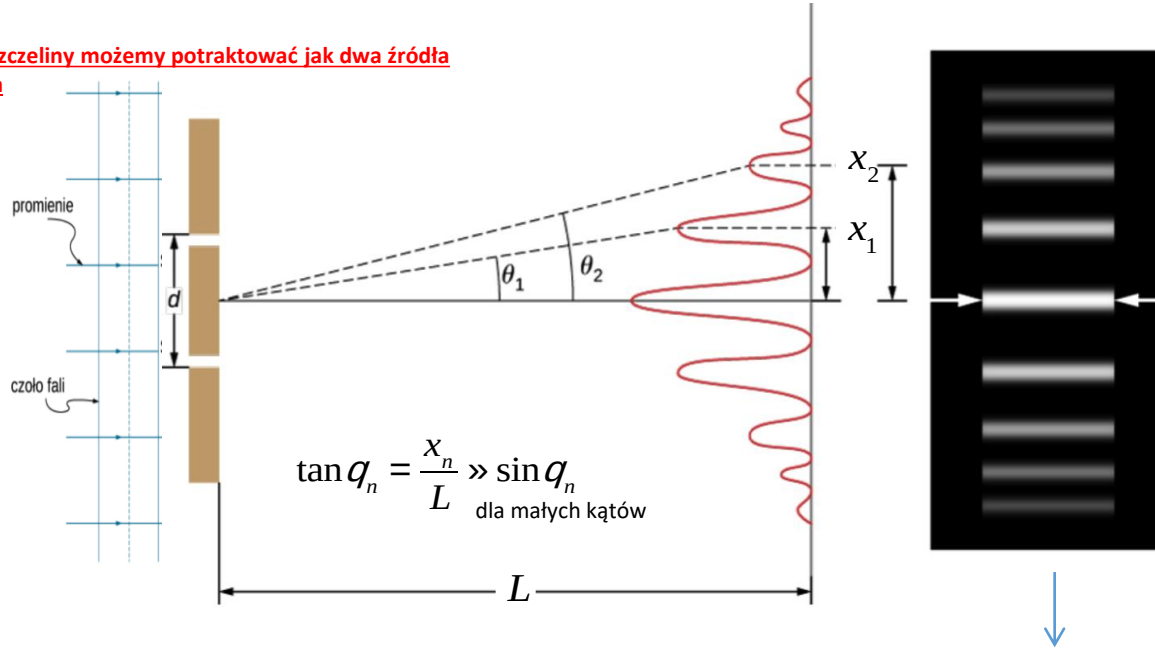


Interferencja fal świetlnych z dwóch szczelin



Interferencja na dwóch szczelinach – doświadczenie Younga

Dwie szczeliny możemy potraktować jak dwa źródła światła



$$\tan q_n = \frac{x_n}{L} \gg \sin q_n \quad \text{dla małych kątów}$$

Położenia maksimów, gdy: $x_n = n \frac{L}{d},$

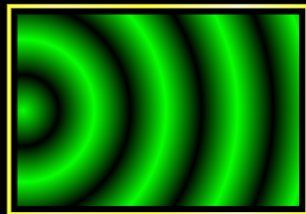
Położenia minimów, gdy: $x_n = (2n+1) \frac{L}{2d},$

za różnice w natężeniu
odpowiedzialne jest
zjawisko dyfrakcji (patrz
kolejne slajdy)

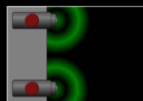
Interferencja fal z dwóch szczelin – doświadczenie Younga

[Privacy & Terms](#)

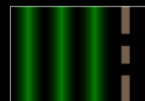
Wave Interference



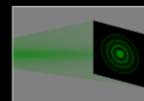
Waves



Interference



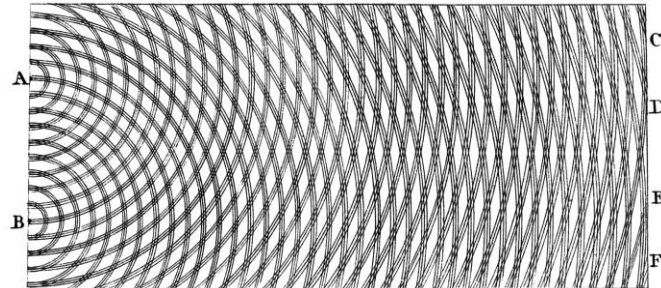
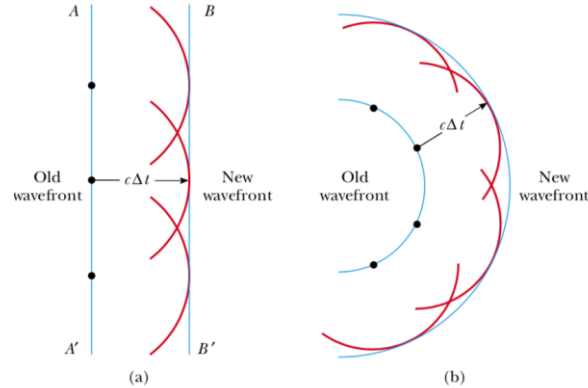
Slits



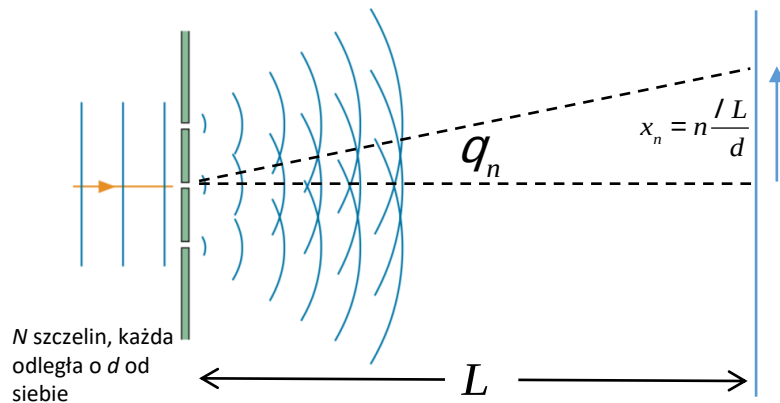
Diffraction

Zasada Huygensa

Każdy punkt ośrodka, do którego dotarło czoło fali, można uważać za źródło nowej fali kulistej. Zasada ta pozwala na geometryczne wyjaśnienie niektórych zjawisk związanych z falami. W oparciu o tę zasadę Thomas Young wyjaśnił swój eksperyment z interferencją na dwóch szczelinach.



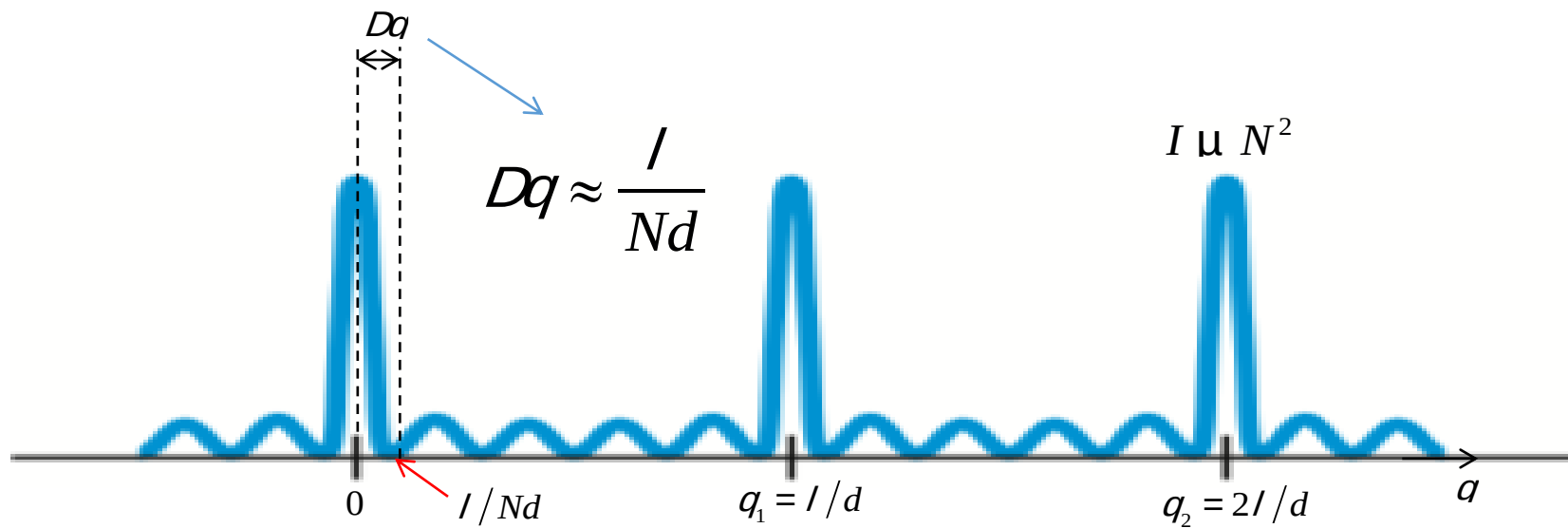
Interferencja na wielu szczelinach



Interferencja konstruktywna (maksima główne), gdy:

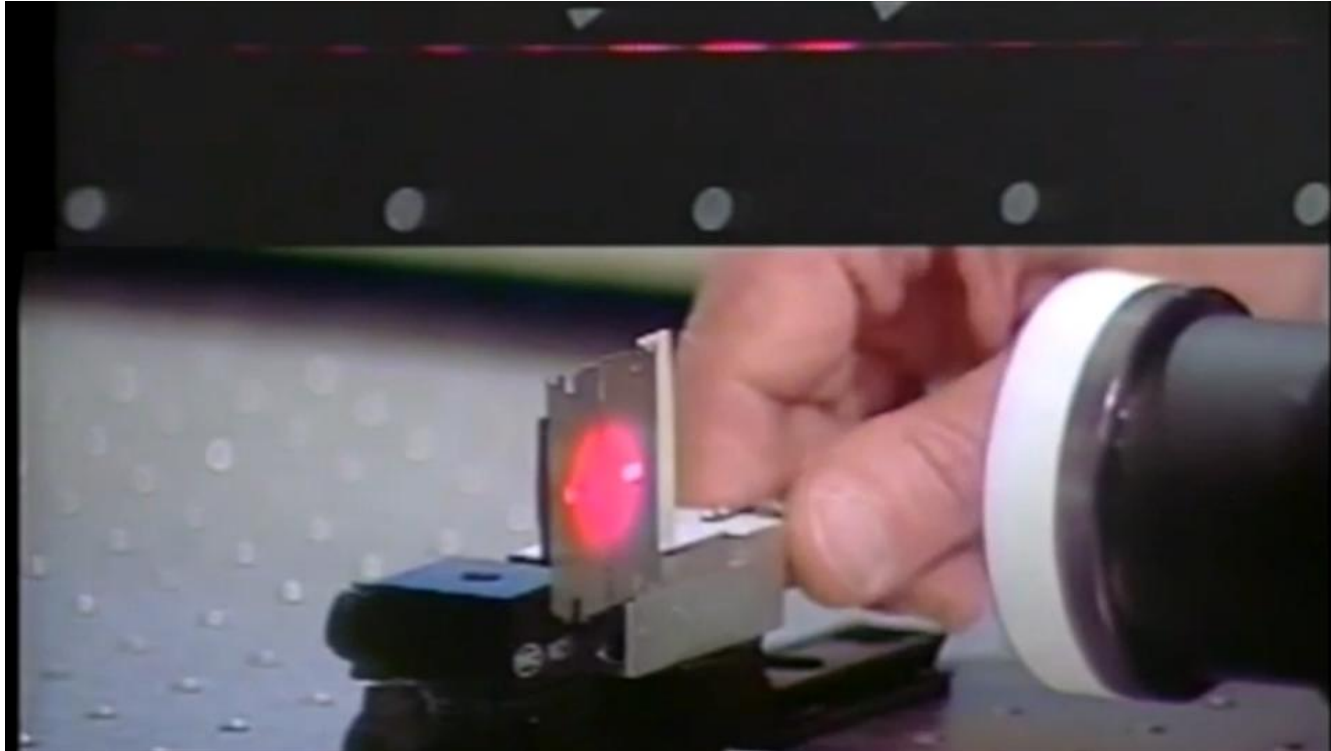
$$\sin q_n = n \frac{\lambda}{d} \gg q_n \quad \text{dla małych kątów}$$

Pomiędzy maksimami głównymi występuje $N-1$ maksimów wtórnych.



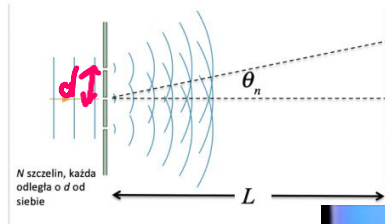
Interferencja z wielu szczelinach

- zależność od ilości szczelin (N)



Interferencja z wielu szczelinach

- zależność od separacji szczelin (d)



maksimum główne gdy:

$$x_n = n \frac{\lambda L}{d},$$

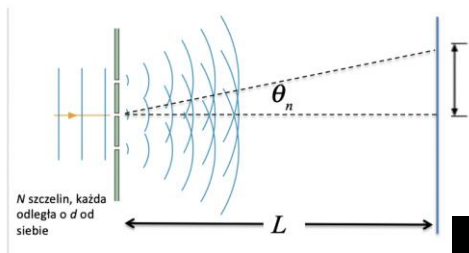
$$\Delta x = x_{n+1} - x_n = (n+1) \frac{\lambda L}{d} - n \frac{\lambda L}{d} = \frac{\lambda L}{d}$$

$$d \downarrow \rightarrow \Delta x \uparrow$$



Interferencja z wielu szczelinach

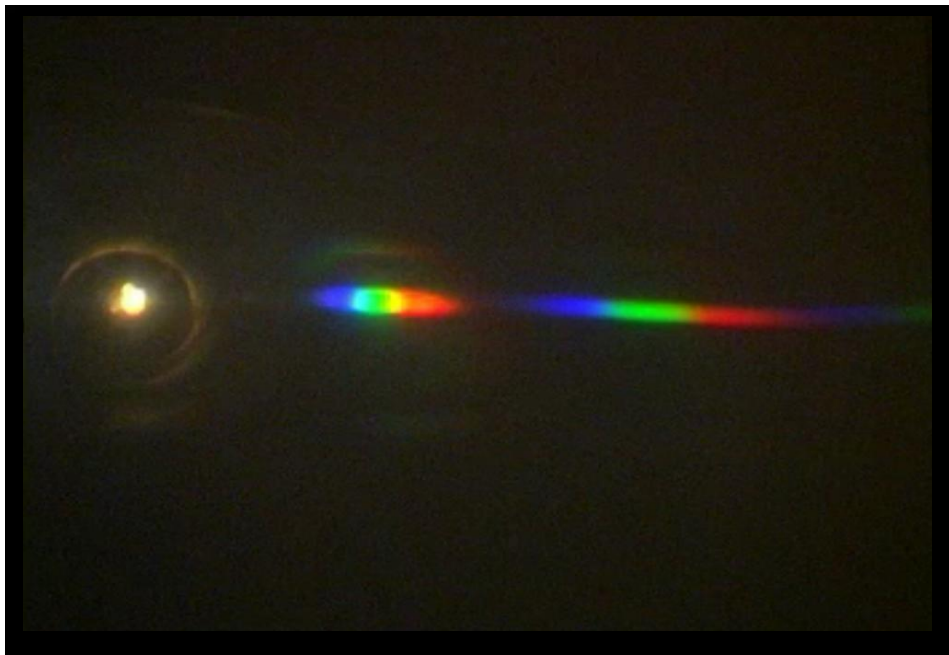
- zależność od długości fali (λ)



maksimum główne gdy:

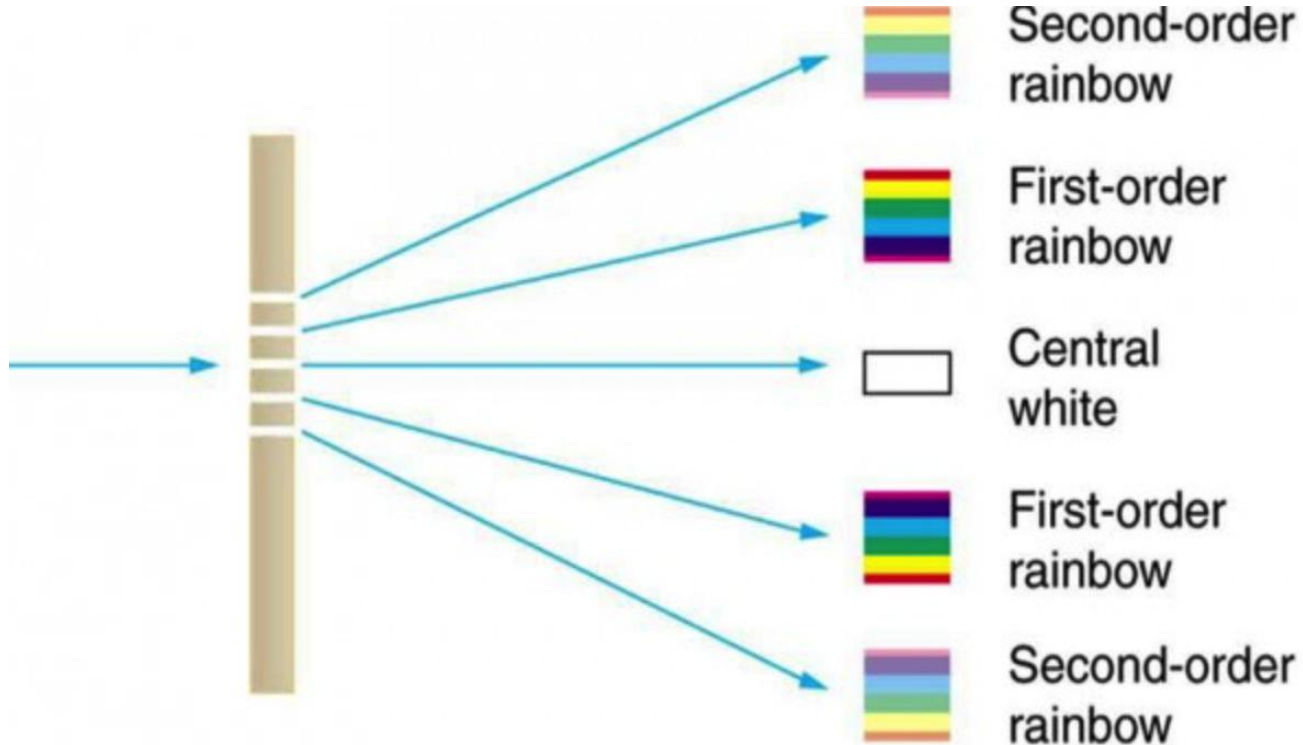
$$x_n = n \frac{\lambda L}{d},$$

$$\lambda \uparrow \rightarrow x_n \uparrow$$



Siatki dyfrakcyjne (z ang. *diffraction grating*)

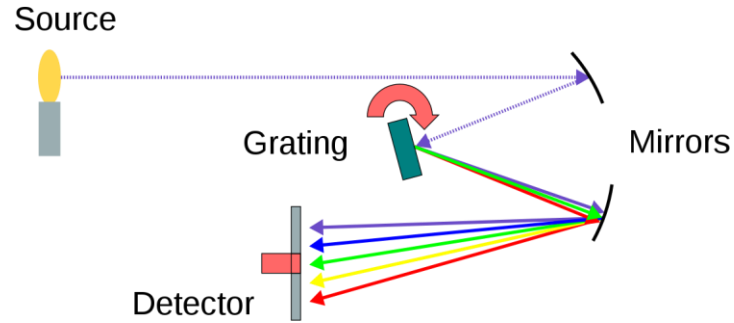
Rozczepienie światła białego na wielu szczelinach:



Spektrometry



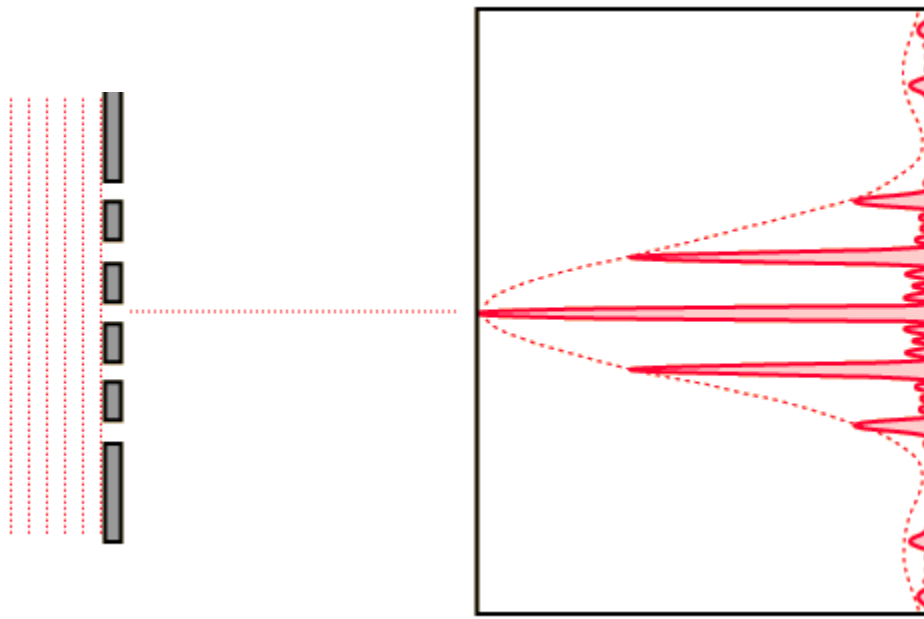
rowki na płycie CD działają jak wiele szczelin (tzw. odbiciowa siatka dyfrakcyjna)



W każdym spektrometrze rozszczepiającym światło na kolory musi istnieć tzw. element dyspersyjny np. siatka dyfrakcyjna lub pryzmat– rozszczepiający światło na poszczególne częstotliwości (długości fali). Poniżej link do przykładu symulacji spektrometru z pryzmatem:

https://www.vascak.cz/data/android/physicsatschool/template.php?s=atom_spektroskop&l=pl

Interferencja na wielu szczelinach

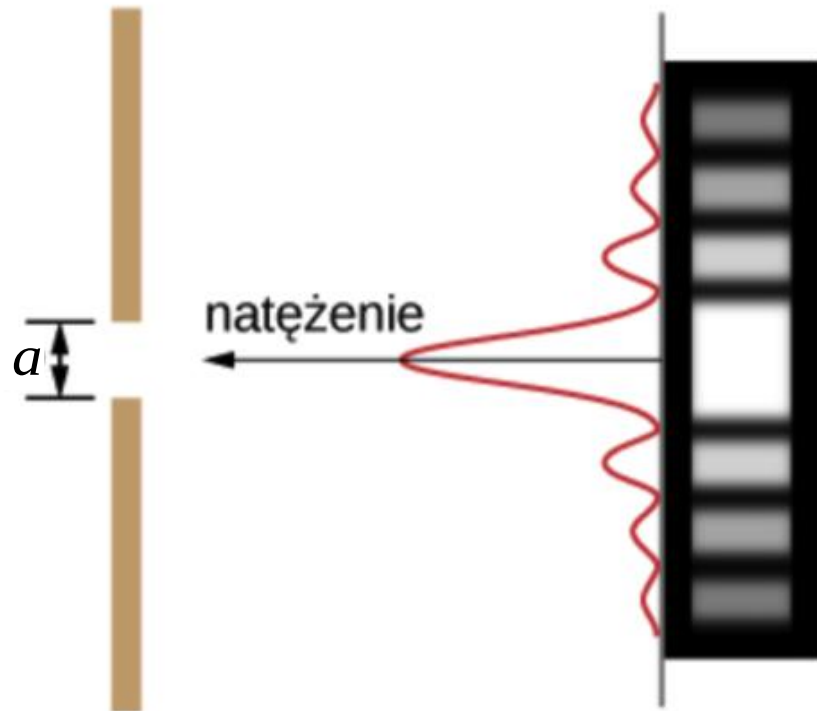


W rzeczywistych obrazach prążki wyższych rzędów charakteryzują się słabszym natężeniem. Za różnice w natężeniu odpowiedzialne **jest zjawisko dyfrakcji**

Dyfrakcja na pojedynczej szczelinie



Dyfrakcja na pojedynczej szczelinie

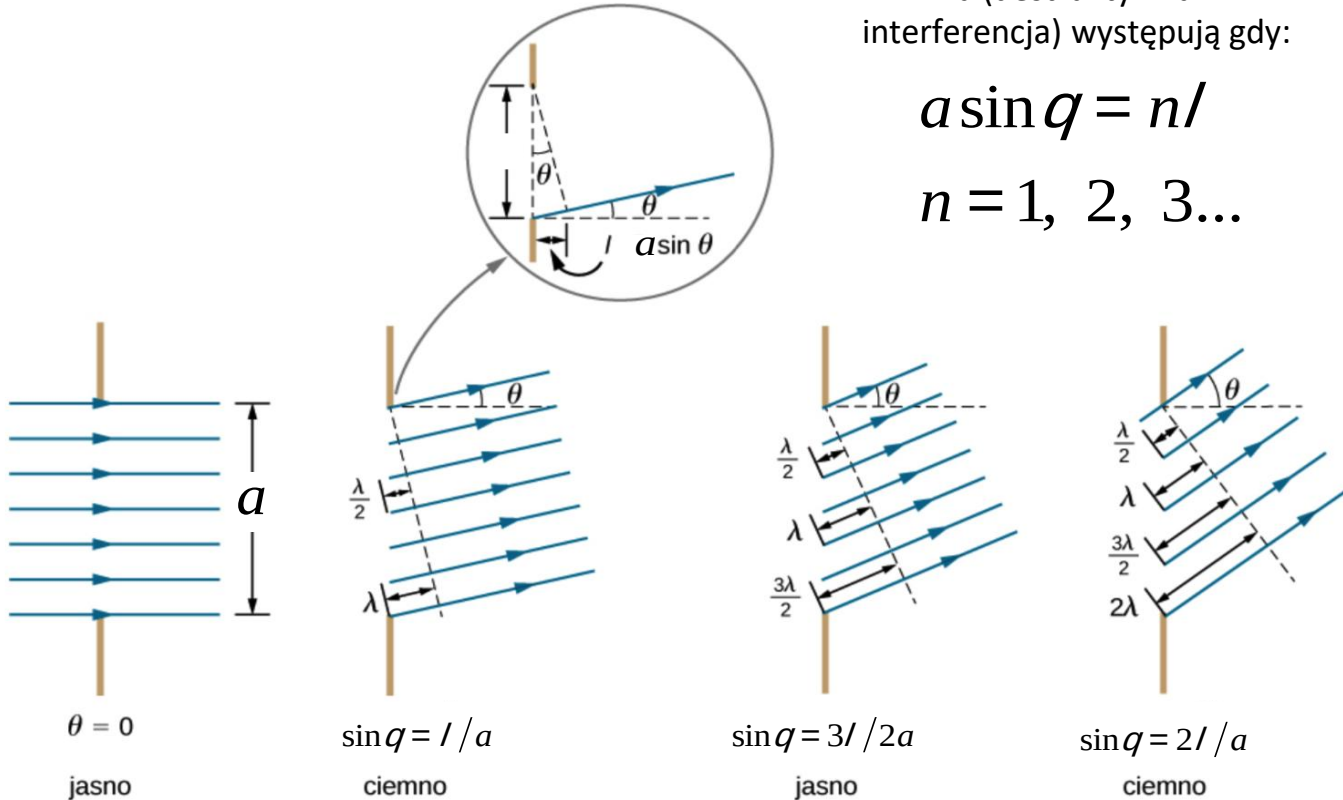


Dyfrakcja na pojedynczej szczelinie

Minima (destruktywna interferencja) występują gdy:

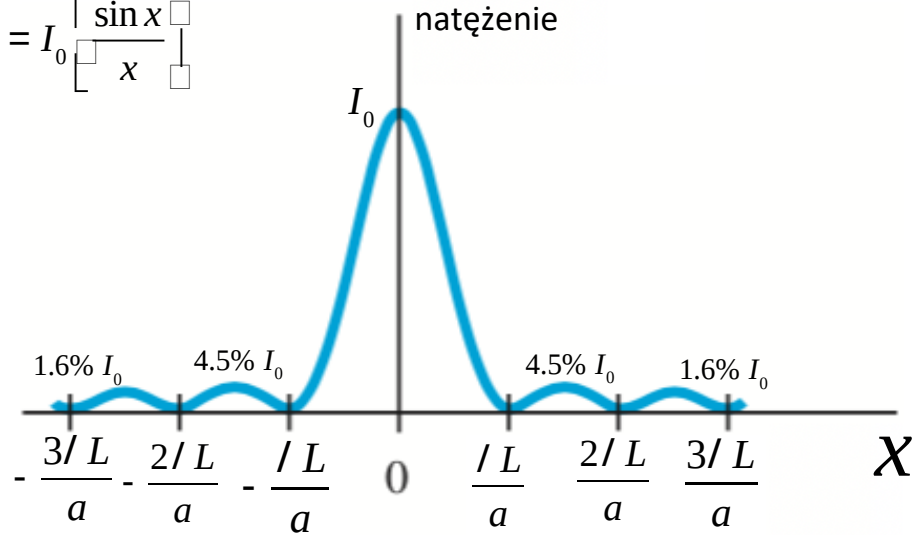
$$a \sin \theta = n\lambda$$

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

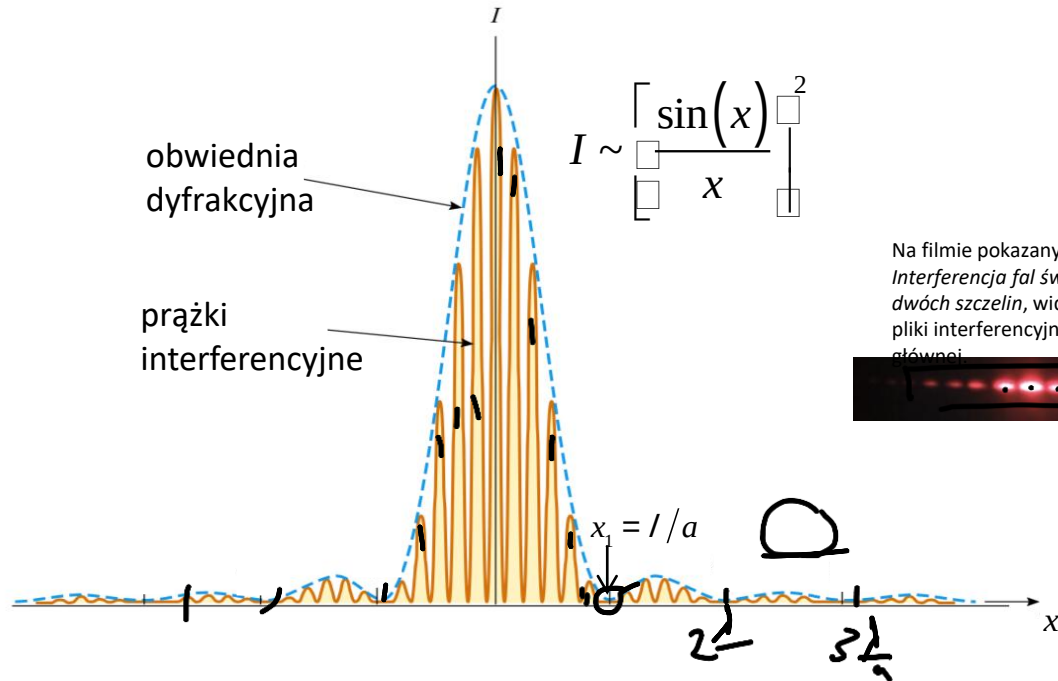


Natężenie obrazu dyfrakcyjnego z pojedynczej szczeliny (wzór dyfrakcyjny)

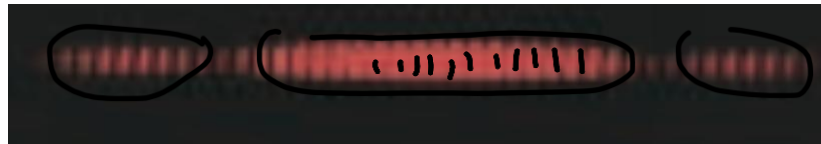
$$I = I_0 \left[\frac{\sin x}{x} \right]^2$$



Złożenie dyfrakcji i interferencji na dwóch szczelinach



Na filmie pokazanym wcześniej,
*Interferencja fal świetlnych z
dwóch szczelin*, widoczne były tylko
pliki interferencyjne z obwiedni
głównej.



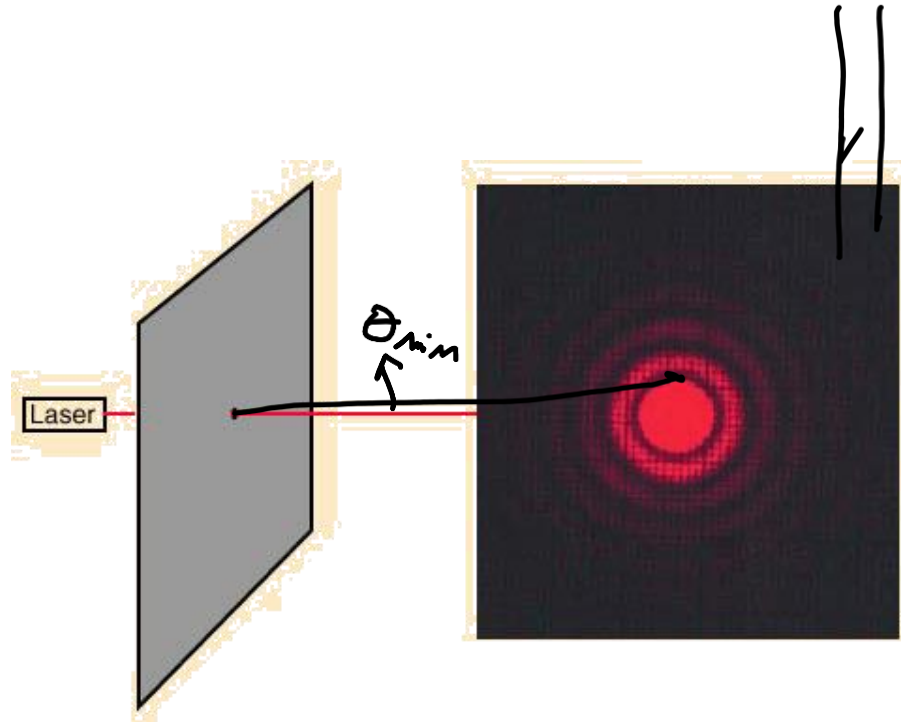
Dyfrakcja na szczelinie okrągłej



<https://www.youtube.com/watch?v=i-rn40Wbby4>

<https://phet.colorado.edu/sims/html/wave-interference/latest/wave->

Dyfrakcja na szczelinie okrągłej

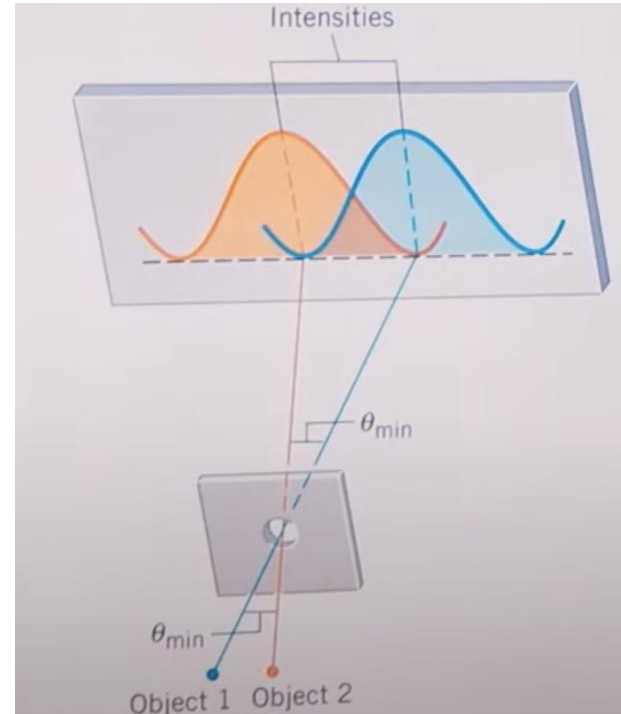
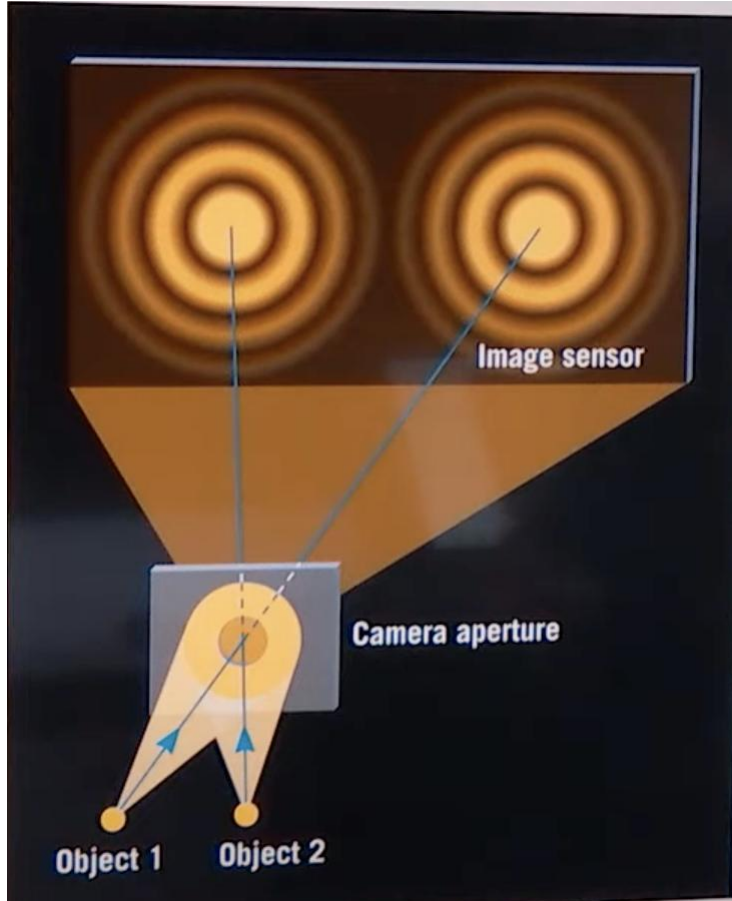


Kąt przy, którym pojawia się pierwsze minimum:

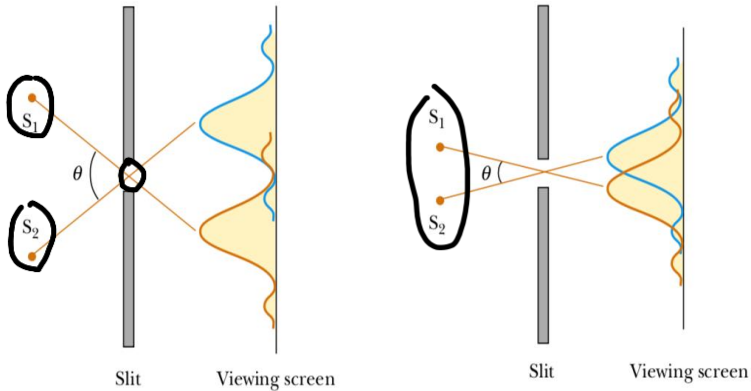
$$\theta_{\min} = 1.22 \frac{\lambda}{a}$$

a – średnica otworu

Kryterium Rayleigha na rozróżnienie dwóch źródeł punktowych (obiektów z dużej odległości)



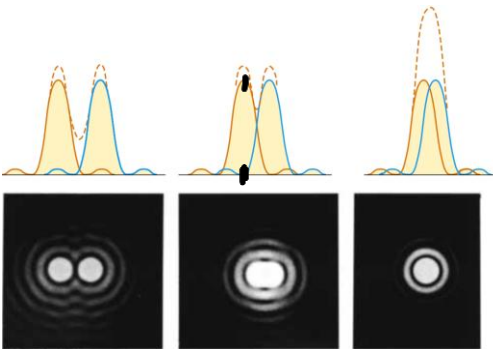
Kryterium Rayleigha na rozróżnienie dwóch źródeł punktowych



Kryterium Rayleigha:

Dyfrakcyjna granica rozdzielczości określa, że dwa punkty są rozróżnialne, gdy środek obrazu dyfrakcyjnego jednego z nich znajduje się w miejscu pierwszego minimum obrazu dyfrakcyjnego drugiego.

$$q^3 \approx 1.22 \frac{l}{a}$$



Jest to dyfrakcyjne ograniczenie rozdzielczości układów rejestrujących fale elektromagnetyczne.

Porównanie rozdzielczości kątowej dwóch przyrządów do detekcji fali elektromagnetycznej

Obserwatorium radioastronomiczne
Arecibo (Peurto Rico)

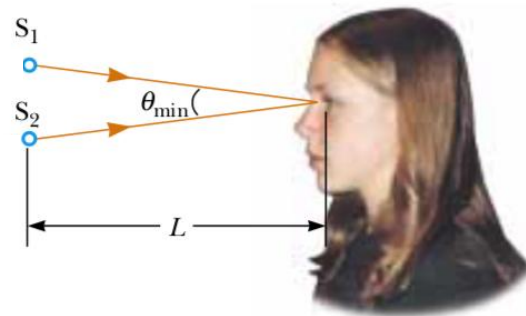


$$\lambda = 0.75 \text{ m}$$

$$a = 305 \text{ m}$$

$$\theta_{\min} = 1.22 \frac{\lambda}{a} = 3' \cdot 10^{-3} \text{ rad} \\ (\sim 0.17^\circ)$$

Źrenica oka ludzkiego



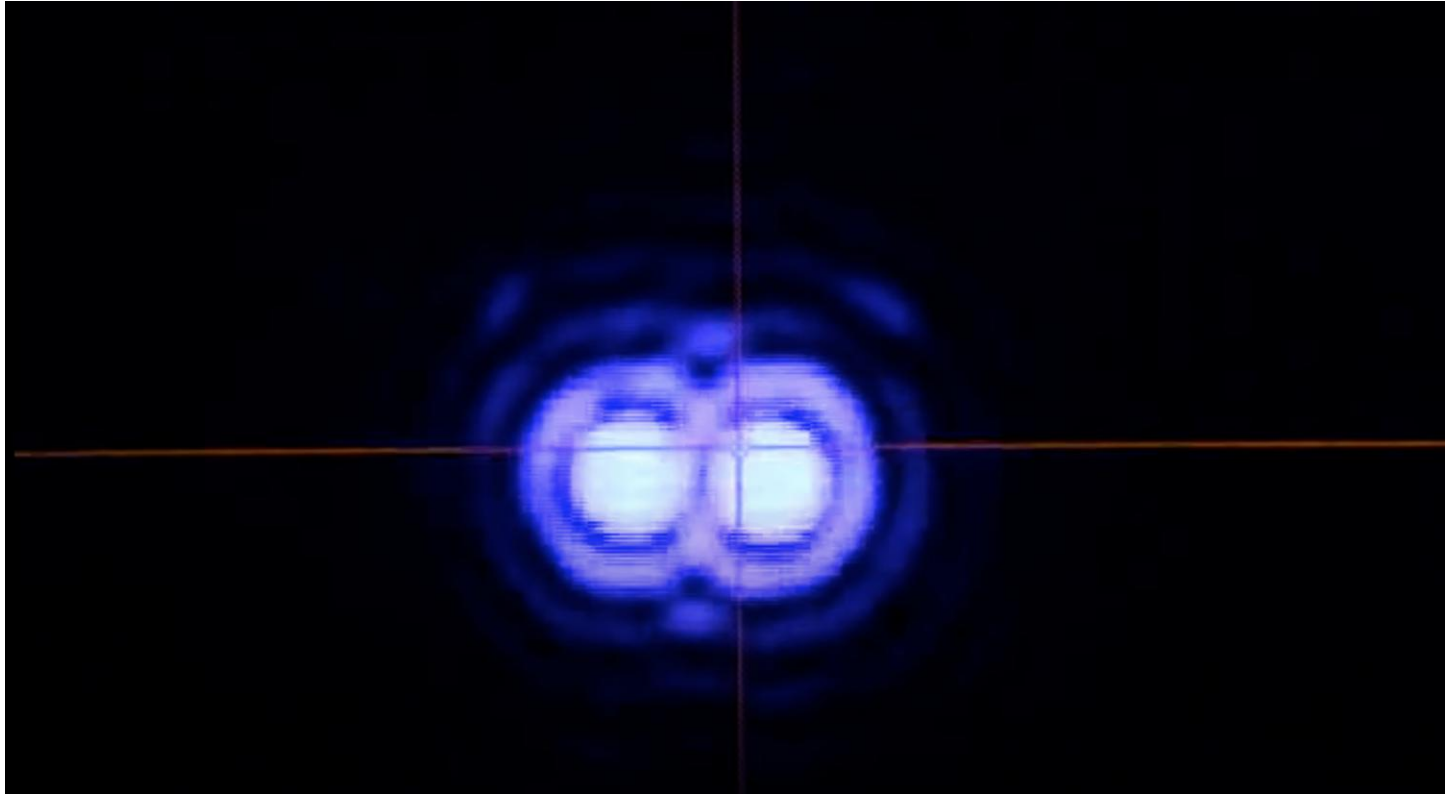
$$\lambda = 500 \text{ nm}$$

$$a = 2 \text{ mm}$$

$$\theta_{\min} = 1.22 \frac{\lambda}{a} = 3' \cdot 10^{-4} \text{ rad} \\ (\sim 0.017^\circ)$$

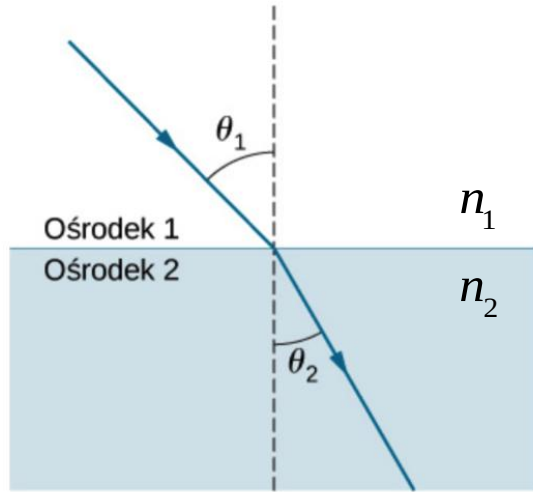
Kryterium Rayleigha

(dlaczego warto kupować teleskopy z dużą aperturą?)



<https://www.youtube.com/watch?v=Lal1Gs3LrWo>

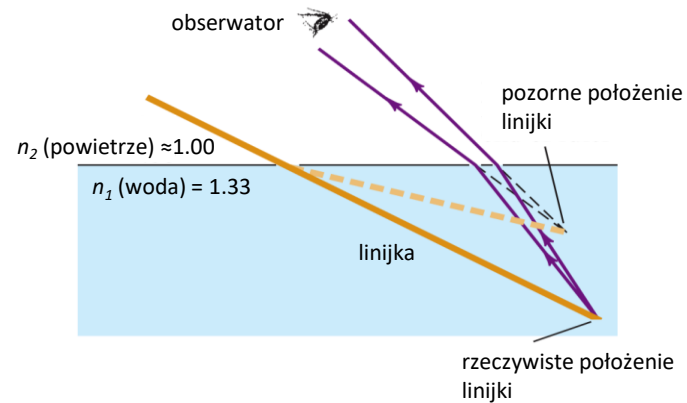
Załamanie światła na granicy ośrodków (prawo Snella)



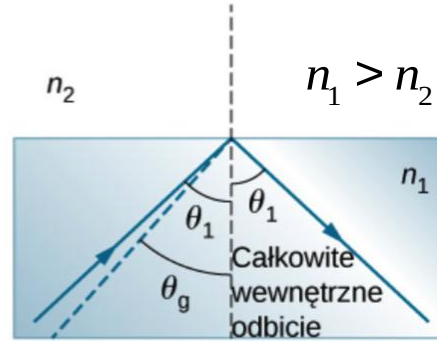
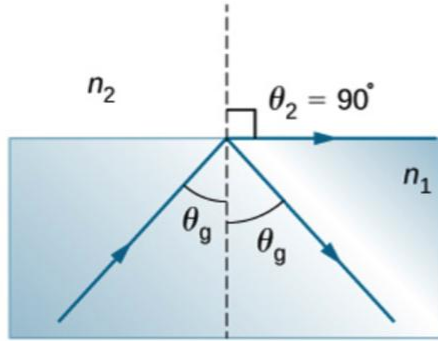
$$n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2$$

Współczynnik załamania n ośrodka wiąże się z prędkością światła w tym ośrodku, która jest zawsze mniejsza niż w próżni:

$$v = \frac{c}{n}$$



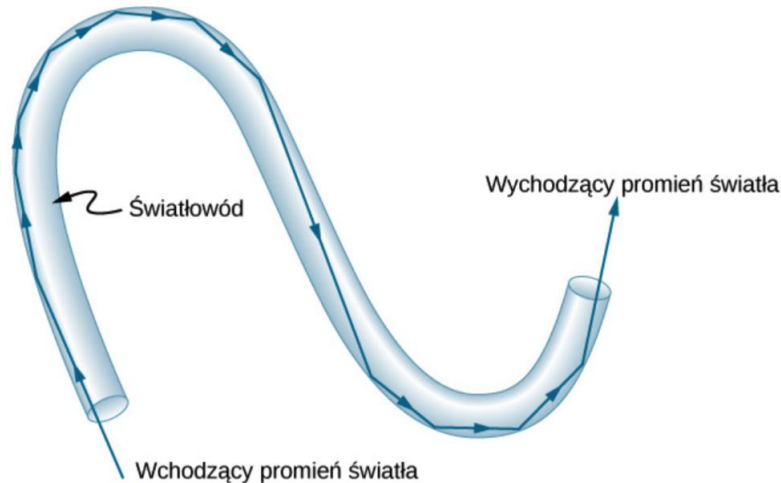
Całkowite wewnętrzne odbicie



$n_1 > n_2, \theta_2 = 90^\circ \Rightarrow \theta_1 = \theta_g$ kąt graniczny

$$n_1 \sin \theta_g = n_2 \sin 90^\circ$$

$$\theta_g = \arcsin(n_2/n_1)$$

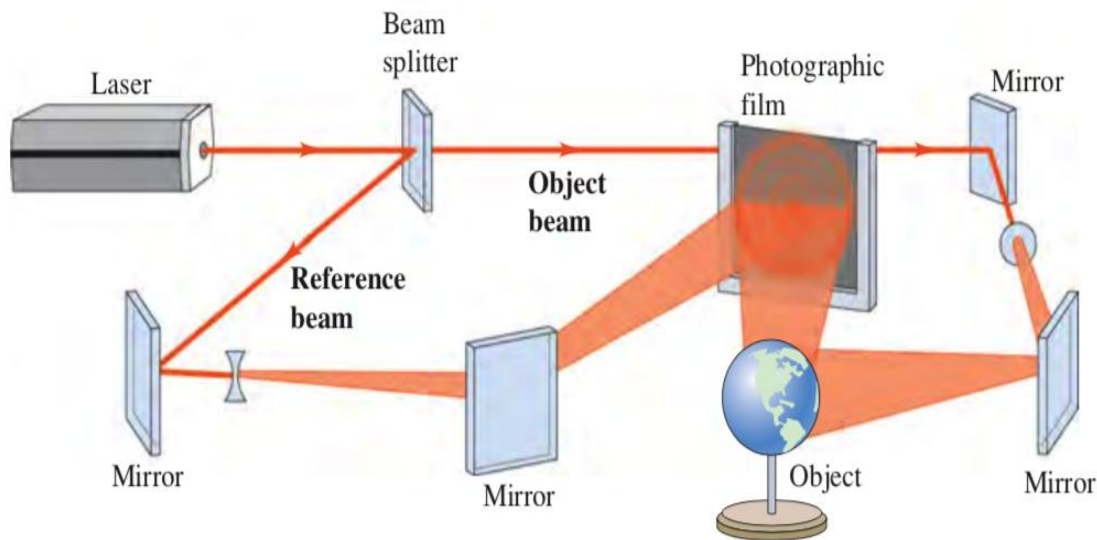


Dla $\theta_1 > \theta_g$

występuje całkowite
wewnętrzne odbicie

Hologramy

Hologramy są tworzone w wyniku interferencji światła rozproszonego przez „fotografowany” obiekt i światła bezpośrednio ze źródła (laser). Wzór interferencyjny można zapisać w światłoczułym materiale.



Ćwiczenia na platformie ZPE

- Zwierciadło kuliste wklęsłe – [1-5](#)
- Jak określić cechy obrazu na podstawie równania soczewki? [1-5](#)
- Widmo promieniowania cieplnego [1-5](#)
- Obserwacja widm atomowych za pomocą siatki dyfrakcyjnej [1-5](#)

Dziękuję za uwagę
i udział w zajęciach! ☺

- [Nauka. To lubię.](#)
- [Astronarium](#)
- [Lekcje fizyki](#)

