

Fizyka

Optyka

Czym jest światło ?

1. Strumień cząstek ?
- przenoszenie energii
 - odbicie
 - załamanie



ale zmiany koloru (kryształy, warstwy, pryzmat) ☹️
polaryzacja, dyfrakcja, interferencja

2. Fale ? znane fale mechaniczne



ale te muszą mieć jakiś ośrodek (sprężysty)
→ nie rozchodzą się w próżni, a światło owszem!

Izaak Newton (1642-1727)
popierał koncepcję korpuskularną



Christian Hyughens (1629-1695)
sformułował koncepcję falową



Autorytet Newtona opóźnił rozwój
teorii falowej światła o ~ 100 lat



August Fresnel (1788-1827)
– słuszność koncepcji falowej
(interferencja i dyfrakcja)

**główna trudność – jakiego typu fale (co faluje?)
i jaki ośrodek (koncepcja eteru)**

 **Przełom – odkrycie fal elektro-magnetycznych (EM)**

teoria: J.C. Maxwell (1831 – 1879)

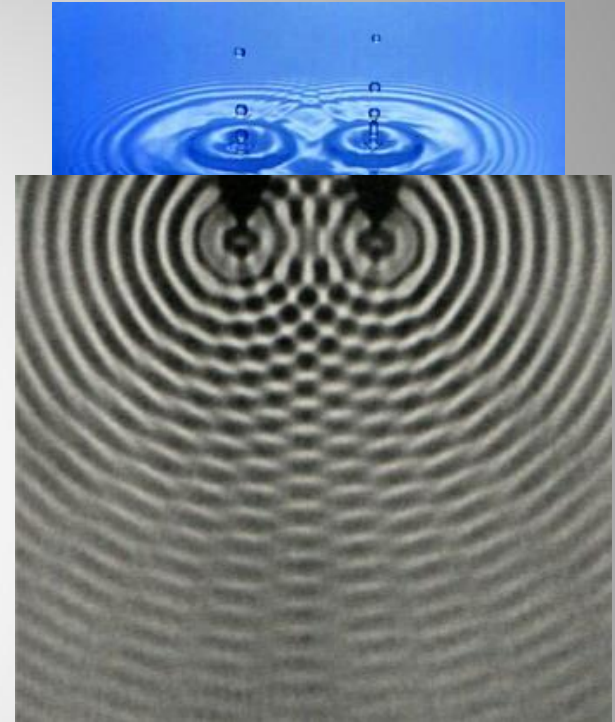
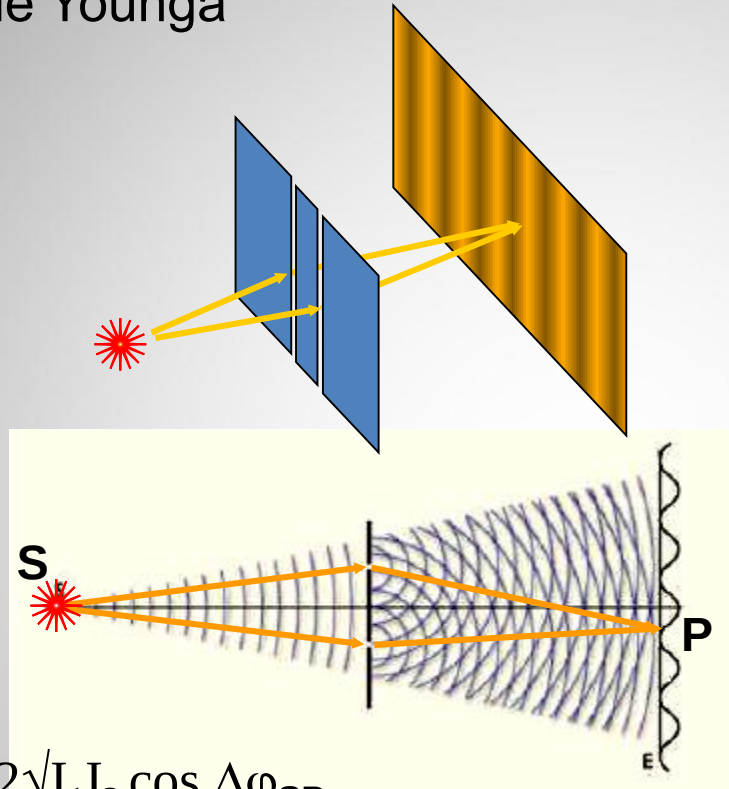


doświadczenie: F. Hertz (1857 – 1894)



Podstawowe doświadczenia nad interferencją światła

doświadczenie Younga



$$I(P) = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \cos \Delta\phi_{SP}$$

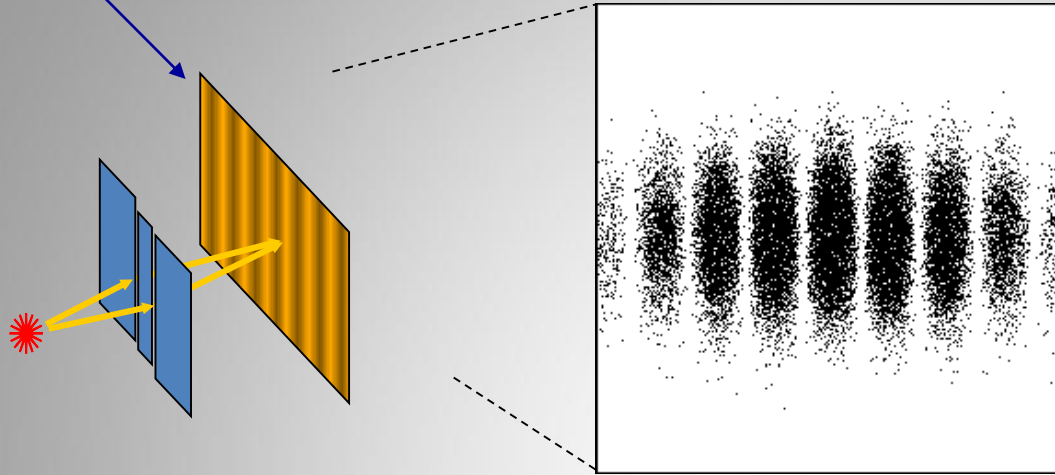
$$\text{gdy } I_1 = I_2 = I \quad I(P) = \begin{cases} I_{\max} = 4I & \text{interferencja konstruktywna} \\ I_{\min} = 0 & \text{interferencja destruktywna} \end{cases}$$

(światło + światło = ciemność !!!)

gdy tylko jedna droga – brak prążków

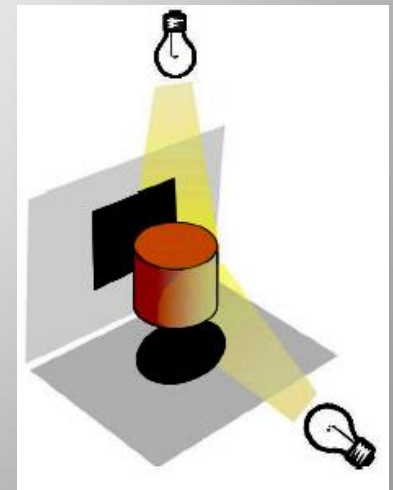
Interferencja z licznikami fotonów

ekran → macierz liczników fotonów

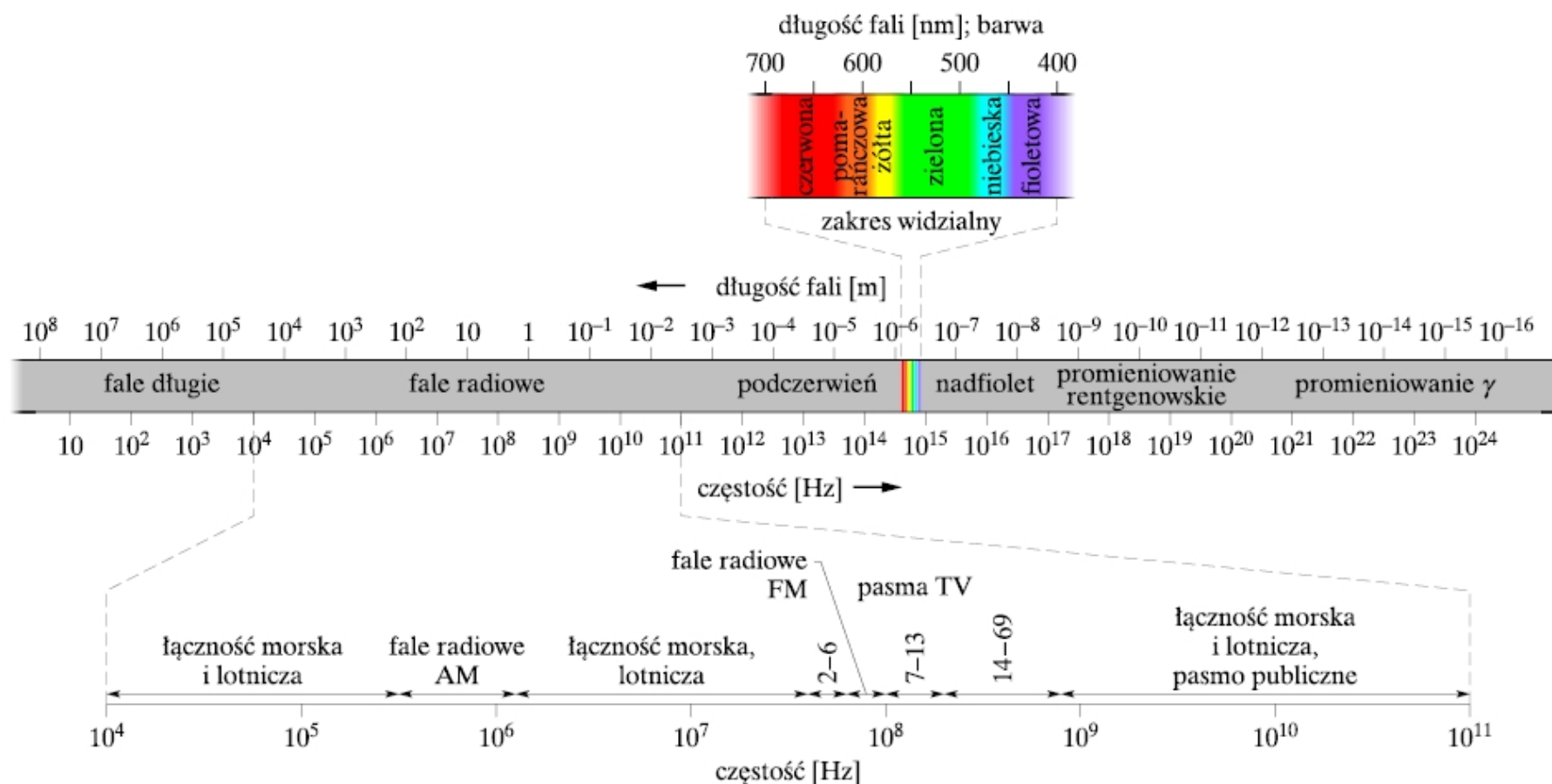


- poszczególne zliczenia
– rejestracja indywidualnych fotonów (**cząstki**)
- rozkład prawdopodobieństw pojawienia się fotonów
– **fala**

Dualizm: światło zachowuje się jak fala lub strumień cząstek (fotonów) w różnych warunkach doświadczalnych jest równocześnie i cząstką i falą



Widmo fal elektromagnetycznych



Rys. 34.1. Widmo promieniowania elektromagnetycznego

Promieniowanie gamma

Fale elektromagnetyczne o długości krótszej od 10^{-10} m

Źródła promieniowania gamma:

- procesy zachodzące w jądrze atomowym (np. rozpad pierwiastków promieniotwórczych zawartych w skorupie ziemskiej lub reakcje jądrowe)
- promieniowanie kosmiczne powstające podczas procesów jądrowych zachodzących w gwiazdach i galaktykach.

Błyski gamma

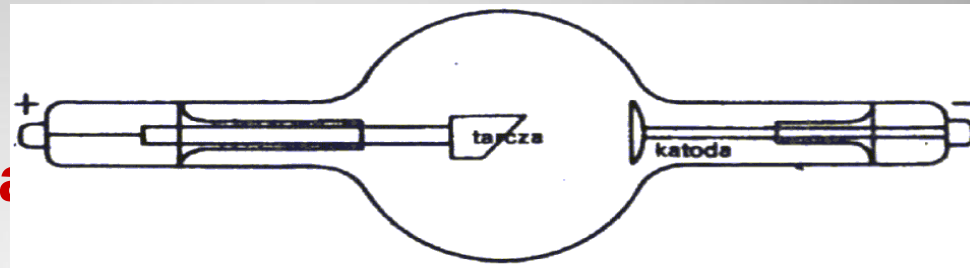
Promieniowanie rentgenowskie

Długości fali zawarta jest w przedziale
od 10^{-13} m do około 5×10^{-8} m



Promieniowanie rentgenowskie

Lampa rentgenowska



- Przyspieszone w polu elektrycznym elektrony hamowane są przez materiał anody, tracąc swoją energię, która zostaje wypromieniowana jako promieniowanie hamowania (**widmo ciągłe**)
- Na skutek wybicia (jonizacji) przez przyspieszone elektrony wewnętrznych elektronów w materiale anody, następuje przeskok elektronu z powłoki zewnętrznej na puste miejsce czemu towarzyszy emisja promieniowania o ściśle określonej długości fali (**promieniowanie charakterystyczne**).

Promieniowanie nadfioletowe (UV)

Długość fali od $4 \times 10^{-7} \text{m}$ do 10^{-8}m (od 400 do 10 nm)

Naturalnymi źródłami są ciała o dostatecznie wysokiej temperaturze. Znikome, ale zauważalne ilości tego promieniowania wysyłają już ciała o temperaturze **3000K** i ze wzrostem temperatury natężenie wzrasta. Silnym źródłem jest **Słońce**, którego temperatura powierzchni wynosi **6000K**.

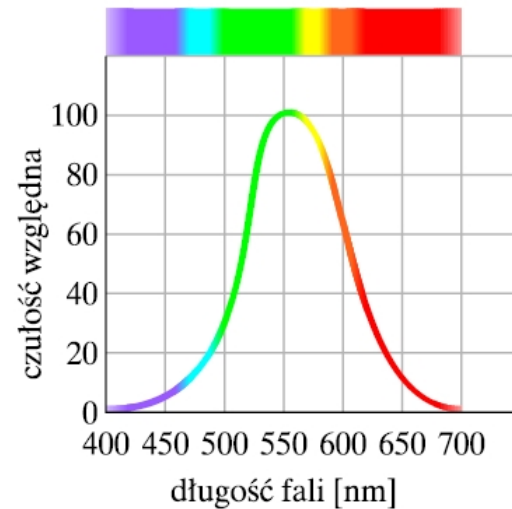
Promieniowanie nadfioletowe ma silne działanie fotochemiczne. Przy długości fali poniżej 300 nm wywołuje już jonizację i jest zabójcze dla organizmów żywych, wywołuje lub przyspiesza szereg reakcji chemicznych.

Światło widzialne



Długość fali od około 4×10^{-7} m do około 7×10^{-7} m.

Naturalnymi źródłami są ciała ogrzane do temperatury ponad 700°C . Na skutek ruchów cieplnych następuje wtedy wzbudzenie elektronów wewnątrz substancji i przy powrocie do niższych stanów energetycznych następuje emisja światła (żarówka).



Rys. 34.2. Względna czułość przeciętnego ludzkiego oka na fale elektromagnetyczne o różnej długości. Ta część widma promieniowania elektromagnetycznego, na którą czułe jest ludzkie oko, nosi nazwę *zakresu widzialnego*

Promieniowanie podczerwone

Długość fali od 7×10^{-7} m do 2×10^{-3} m

Emitowane jest przez rozgrzane ciała w wyniku wzbudzeń cieplnych elektronów wewnątrz substancji. Im niższa temperatura im mniejsze natężenie i dłuższe fale. Ciała w temperaturze pokojowej wysyłają długość 19 mm. Ciała o temperaturze do około 400°C wysyłają praktycznie tylko podczerwień.



Zdjęcie lotnicze w podczerwieni

Mikrofale

**Długość fali od 10^{-4} m do 0,3 m
(0,1 mm do 30 cm).**



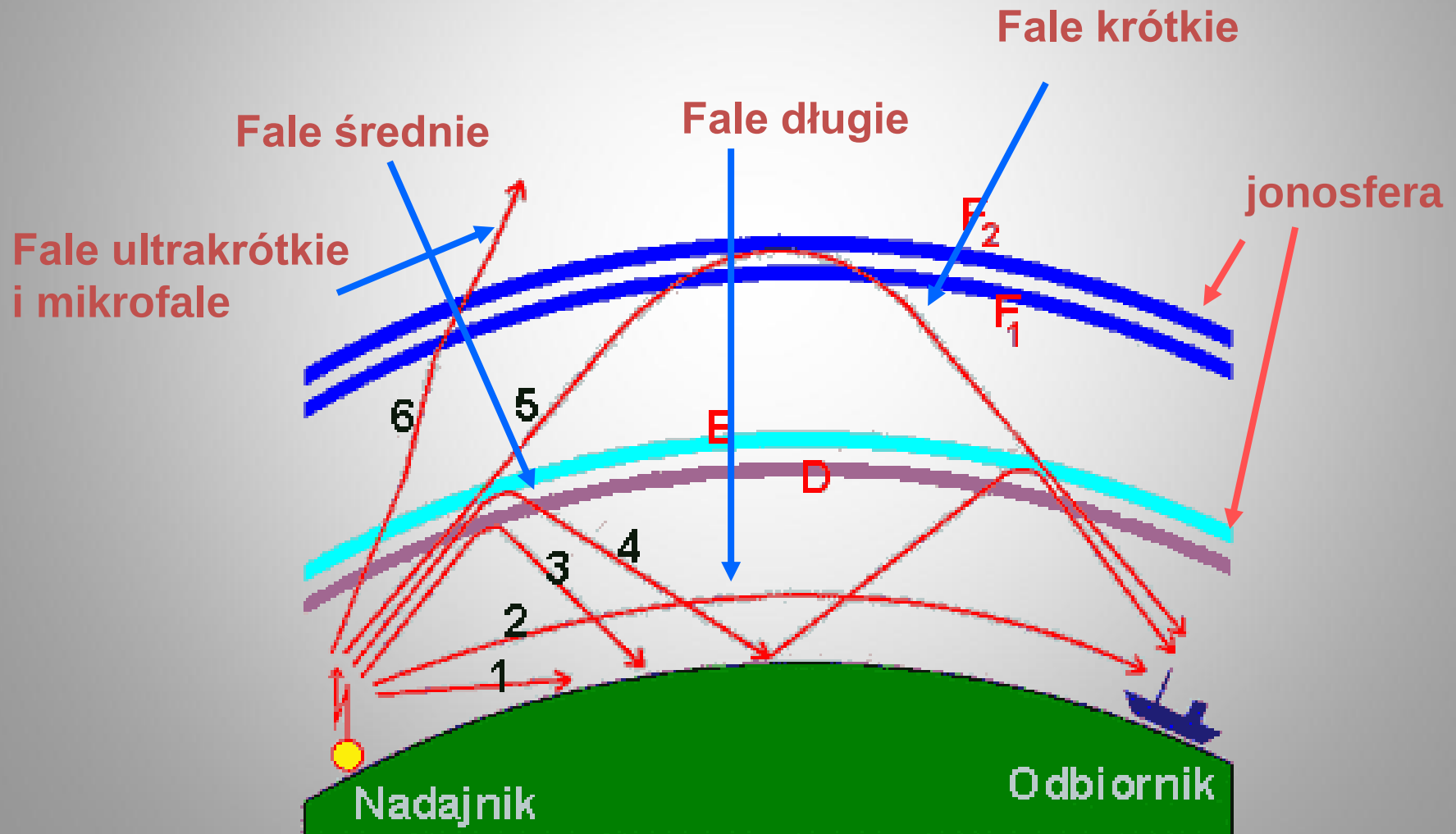
Radar

Mikrofale z górnego zakresu mogą powstawać w elektronicznych układach drgających podobnie jak fale radiowe.

Lampy mikrofalowe - elektrony krążąc w polu magnetycznym po spiralach emitują mikrofale.

Fale radiowe

Fale elektromagnetyczne o długości większej od 10^{-4} m (0,1 mm).



Superpozycja fal EM

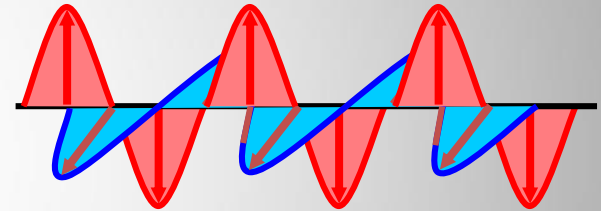
2 fale płaskie, te same częstotliwości, **różne kierunki**, ta sama polaryz.

$$E_1 = E_0 \cos(\omega t - k z), \quad E_2 = E_0 \cos(\omega t + k z),$$

$$E = E_1 + E_2 = 2E_0 \cos(k z) \cos(\omega t)$$

to nie jest fala biegnąca !

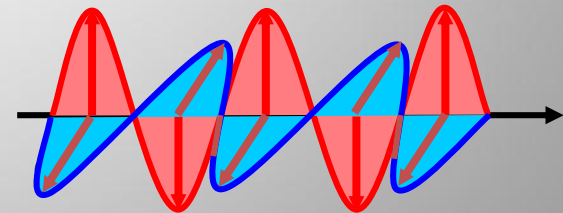
fala stojąca



$$B = B_1 + B_2 = 2B_0 \sin(k z) \sin(\omega t)$$

👉 przesunięcie fazowe $E(z,t)$ wzgl. $B(z,t)$

f. biegnąca



Superpozycja fal EM

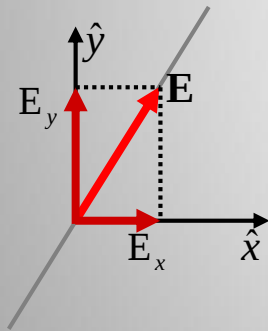
2 fale płaskie, te same częstotliwości, te same kierunki, **różna polaryzacja**

$$\mathbf{E}(z, t) = \hat{\mathbf{x}} E_x \cos(\varphi_x + \omega t - kz) + \hat{\mathbf{y}} E_y \cos(\varphi_y + \omega t - kz)$$

polaryzacja liniowa

$$E_x = E_y \text{ lub } E_x \neq E_y$$

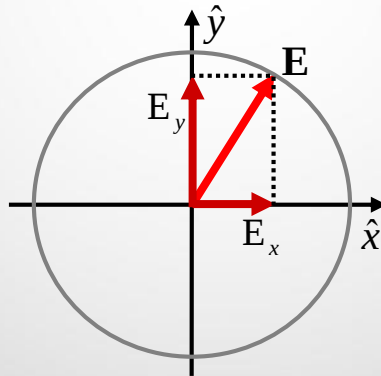
$$\varphi_x - \varphi_y = \pm n\pi$$



polaryzacja kołowa

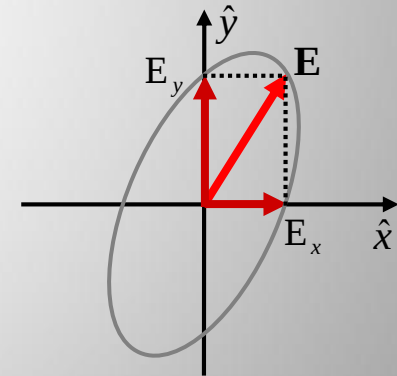
$$E_x = E_y$$

$$\varphi_x - \varphi_y = 2n\pi \pm \frac{\pi}{2}$$



polaryzacja eliptyczna

$$E_x = E_y \quad \left| \quad E_x \neq E_y \right. \\ \varphi_x - \varphi_y \neq \frac{n\pi}{2} \quad \left| \quad \varphi_x - \varphi_y \neq \pm n\pi$$



Prędkość fazowa

$$E(z, t) = E_0 \cos(\omega t - k_z z + \varphi)$$

$$\omega = \frac{k}{\sqrt{\epsilon\mu}} = k v_p$$

prędkość fazowa

Relacja dyspersji

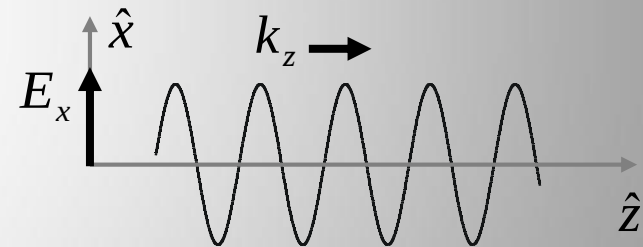
prędkość z jaką rozchodzą się powierzchnie stałej fazy

$$\omega t - k_z z + \varphi = \text{const.}$$

$$\omega dt - k_z dz = 0$$

$$v_p = \frac{dz}{dt} = \frac{\omega}{k_z}$$

prędkość fazowa



Propagacja światła w ośrodkach jednorodnych i niejednorodnych

**W ośrodkach jednorodnych światło rozchodzi się po linii
Prostej z prędkością v**

$$v_p = \frac{1}{\sqrt{\epsilon\mu_0}} = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_r\epsilon_0\mu_0}} = \frac{c}{\sqrt{\epsilon_r}} = \frac{c}{n} \quad \epsilon_r = \frac{\epsilon}{\epsilon_0} \quad n = \sqrt{\epsilon_r}$$

Przy przejściu do innego ośrodka następuje odbicie i załamanie. Wszystkie te zjawiska można wytłumaczyć w oparciu o zasadę Fermata:

Światło „wybiera” taką drogę, którą jest w stanie przebyć w najkrótszym czasie

Z zasady Fermata wynikają prawa odbicia i załamania

Prawa odbicia i załamania

Prawo odbicia światła:

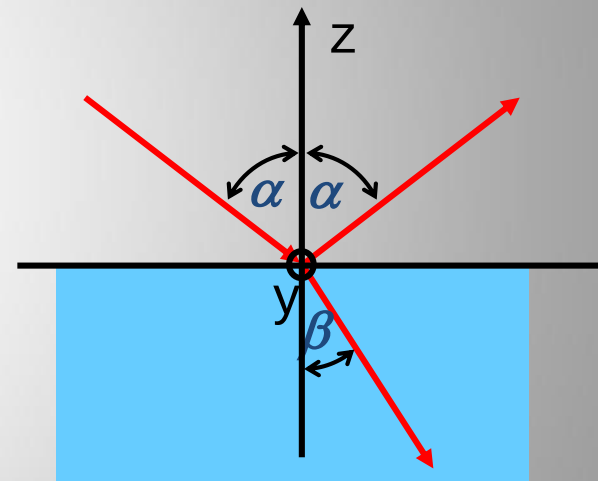
Promień padający promień odbity i prostopadła do płaszczyzny rozgraniczającej ośrodki leżą w jednej płaszczyźnie. Kąt padania jest równy kątowi odbicia

$$\alpha = \alpha'$$

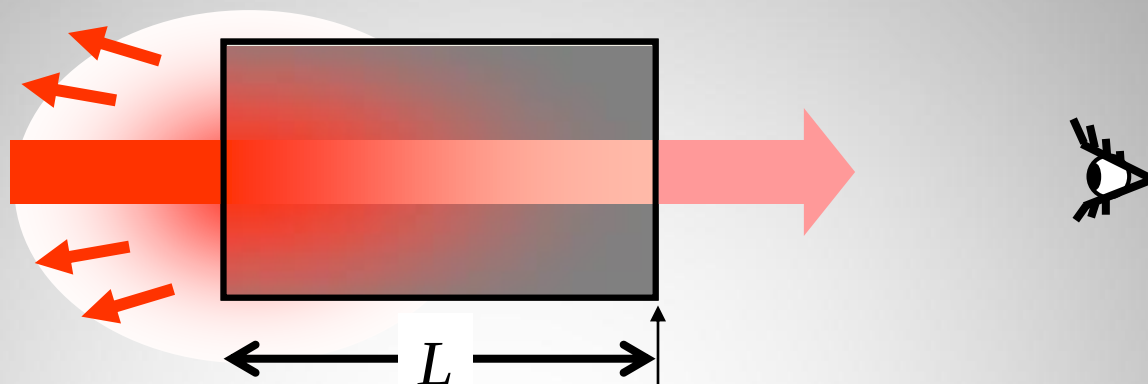
Prawo załamania światła:

Promień padający promień załamany i prostopadła do płaszczyzny rozgraniczającej ośrodki leżą w jednej płaszczyźnie. Stosunek sinusa kąta padania do sinusa kąta załamania jest równy stosunkowi współczynnika załamania w ośrodku drugim do współczynnika załamania w ośrodku pierwszym czyli prędkości światła w ośrodku pierwszym do prędkości światła w ośrodku drugim.

$$\frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = \frac{n_2}{n_1} = \frac{v_1}{v_2}$$



Optyczne własności materiałów



- Absorpcja

prawo Lamberta-Beera:

$$I(L) = I_0 e^{-\kappa L}$$

- Rozproszenie światła

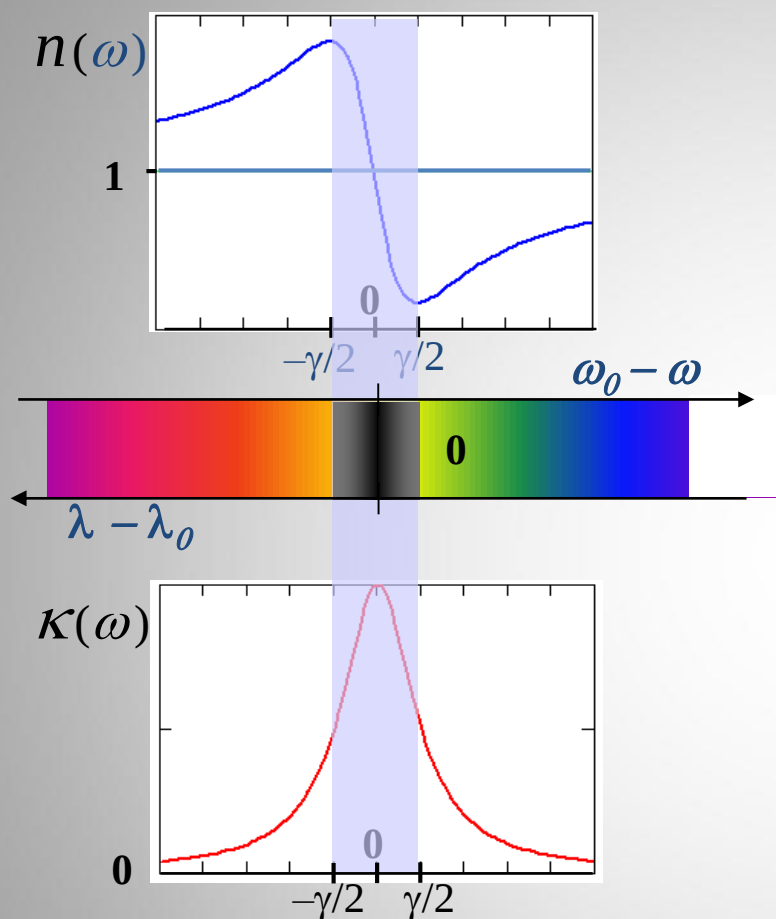
- Odbicie światła $I_R = I_0 R$

- Transmisja

zależy od odbicia i absorpcji
np. przez próbkę z dwiema
odbijającymi powierzchniami
(ten sam współczynnik R):

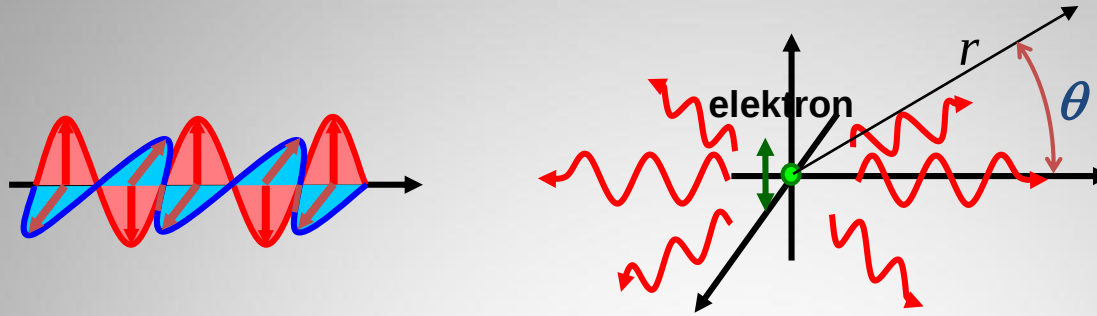
$$I_T = I_0 (1 - R)^2 e^{-\kappa L}$$

Dyspersja materiałów



- współczynnik załamania ma dużą wartość w pobliżu atomowej (molekularnej) częstości rezonansowej
- wówczas rośnie też współczynnik absorpcji
- $n(\omega)$, $n(\lambda)$ to **krzywa dyspersji materiałowej**
- rejon krzywej d., w którym $n(\omega) \nearrow$, gdy $\omega \nearrow$, to obszar **dyspersji normalnej**
- a taki, że $n(\omega) \searrow$, gdy $\omega \nearrow$ to **dyspersja anomalna**
- ze względu na absorpcję, dyspersja anomalna jest trudna do obserwacji (ośrodki nieprzezroczyste, większość mat. optycznych absorbuje w UV)
- materiały optyczne - duże n , małe κ

Rozpraszanie światła



- pole $E(r, t)$ wypromieniowane przez przyspieszany ładunek (przyspieszenie a):

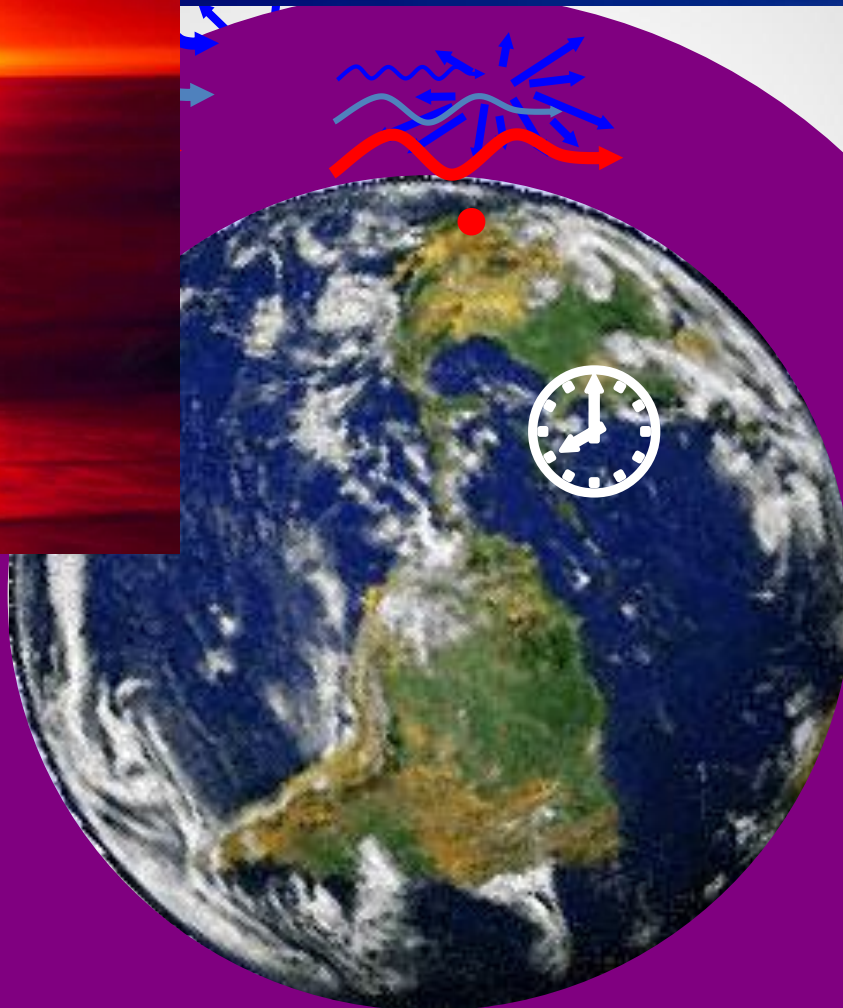
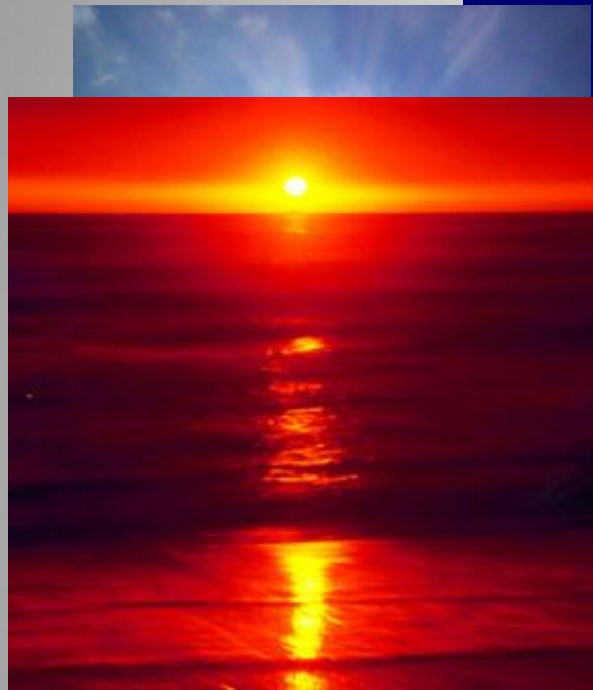
$$E(t) = -\frac{q}{4\pi\epsilon_0 c^2} \frac{a\left(t - \frac{r}{c}\right)}{r} \sin\theta$$

- dla oscylującego ładunku, $a(t) \propto \omega^2$
- energia promieniowania rozproszonego $\propto |E|^2 \propto \omega^4 \propto 1/\lambda^4$



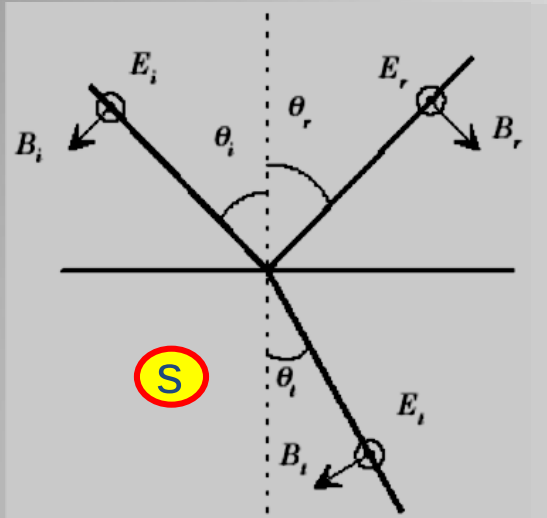
prawo Rayleigha i rozpraszanie rayleighowskie (kolor nieba)

Barwy nieba



Wzory Fresnela

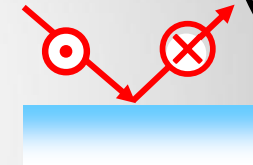
1. $\mathbf{E} \perp$ płaszczyzny padania (polaryzacja s, TE)



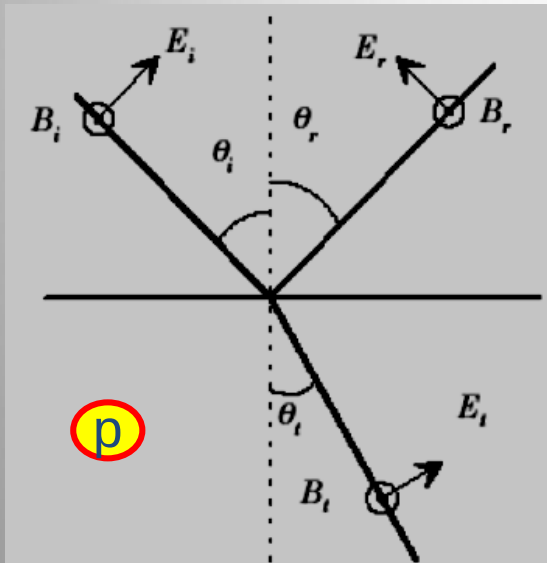
$$t \equiv \frac{E_t}{E_0}, \quad r \equiv \frac{E_r}{E_0}$$

$$t_{\perp} = \frac{2\cos\theta_i\cos\theta_t}{\sin(\theta_i + \theta_t)}$$

$$r_{\perp} = -\frac{\sin(\theta_i - \theta_t)}{\sin(\theta_i + \theta_t)}$$



2. $\mathbf{E} \parallel$ płaszczyzny padania (polaryzacja p, TM)



możliwość zmiany fazy fali odbitej



$$t_{\parallel} = \frac{2\cos\theta_i\cos\theta_t}{\sin(\theta_i + \theta_t)\cos(\theta_i - \theta_t)}$$

$$r_{\parallel} = -\frac{\operatorname{tg}(\theta_i - \theta_t)}{\operatorname{tg}(\theta_i + \theta_t)}$$

Szczególne przypadki:

$$\theta \approx 0$$

prawo Snella: $n_1 \theta_i = n_2 \theta_t$

$$r_{\perp} = -\frac{\sin(\theta_i - \theta_t)}{\sin(\theta_i + \theta_t)} \approx -\frac{\theta_i - \theta_t}{\theta_i + \theta_t} = -\frac{n_2 - n_1}{n_2 + n_1} = \frac{n_1 - n_2}{n_1 + n_2} = r_{\parallel}$$

- zawsze $r \neq 0$,
gdy $n_2 \neq n_1$
- zmiana fazy zal.
czy $n_2 \text{ ® } n_1$

$$\theta \approx 90^\circ$$

$$r_{\perp} = -1, \quad r_{\parallel} = +1$$

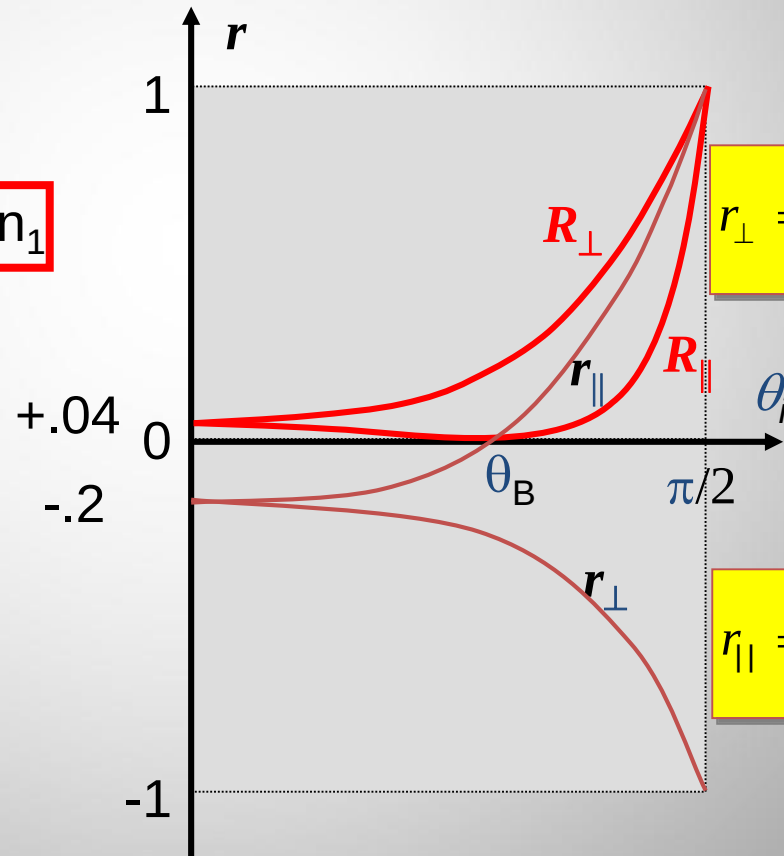
Przykład – szkło-powietrze:

$$n_1=1, n_2=1.5, \quad n_2 > n_1$$

$$r_{\perp} = r_{\parallel} = -0.2$$

Stosunki energetyczne
(natężeniowe):

$$R \equiv rr^*$$

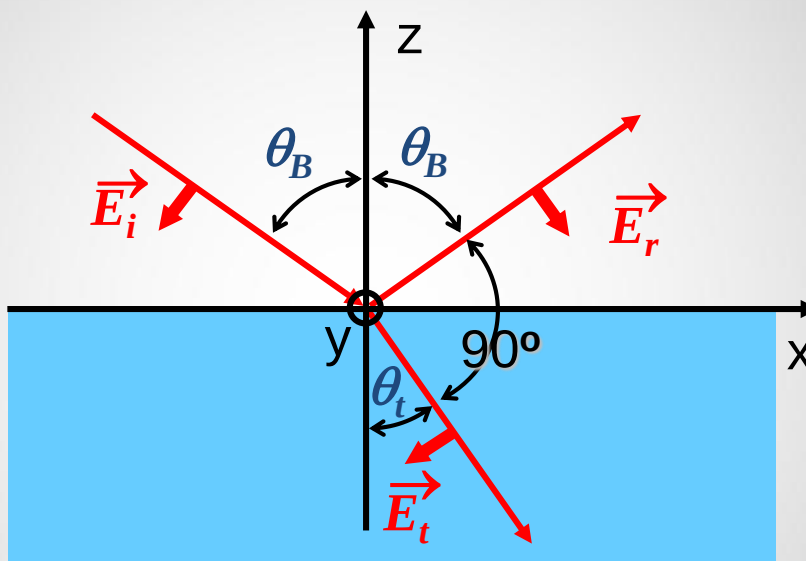


$$r_{\perp} = -\frac{\sin(\theta_i - \theta_t)}{\sin(\theta_i + \theta_t)}$$

$$r_{\parallel} = -\frac{\text{tg}(\theta_i - \theta_t)}{\text{tg}(\theta_i + \theta_t)}$$

Kąt Brewstera θ_B

- występuje tylko dla polaryzacji p ($E \parallel$ pł. padania)
- konsekwencja poprzeczności fal EM i tego, że odbicie to wynik oddziaływania fali z ładunkami w ośrodku, od którego jest dobiecie

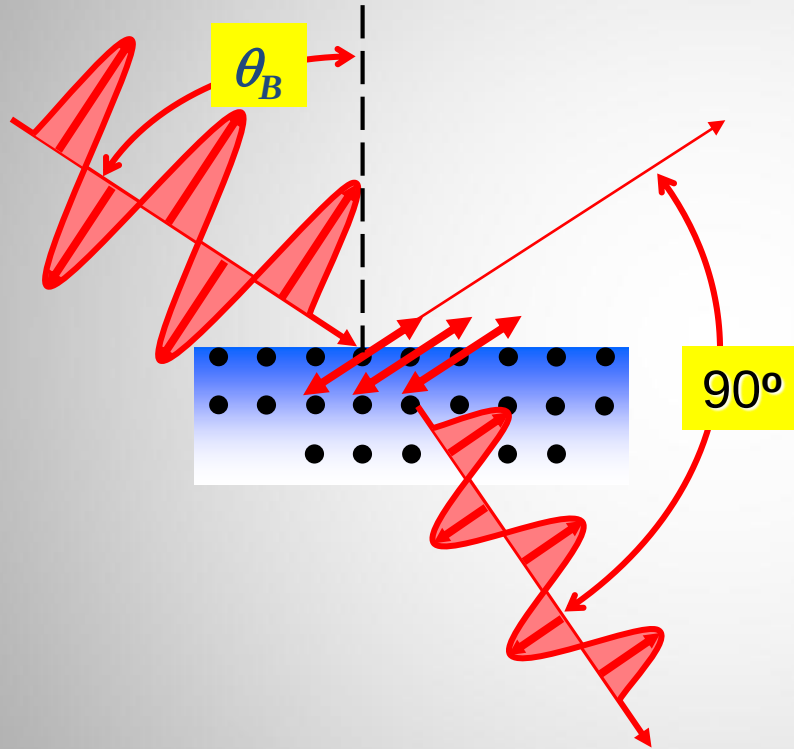


$$\text{gdy } \theta_i + \theta_t = \pi/2, \quad r_{\parallel} = 0 \quad \Rightarrow \quad \theta_{iB} = \pi/2 - \theta_t$$

$$\sin \theta_t = \cos \theta_{iB} \Rightarrow n_1 \sin \theta_{iB} = n_2 \sin \theta_t = n_2 \cos \theta_{iB} \quad \Rightarrow$$

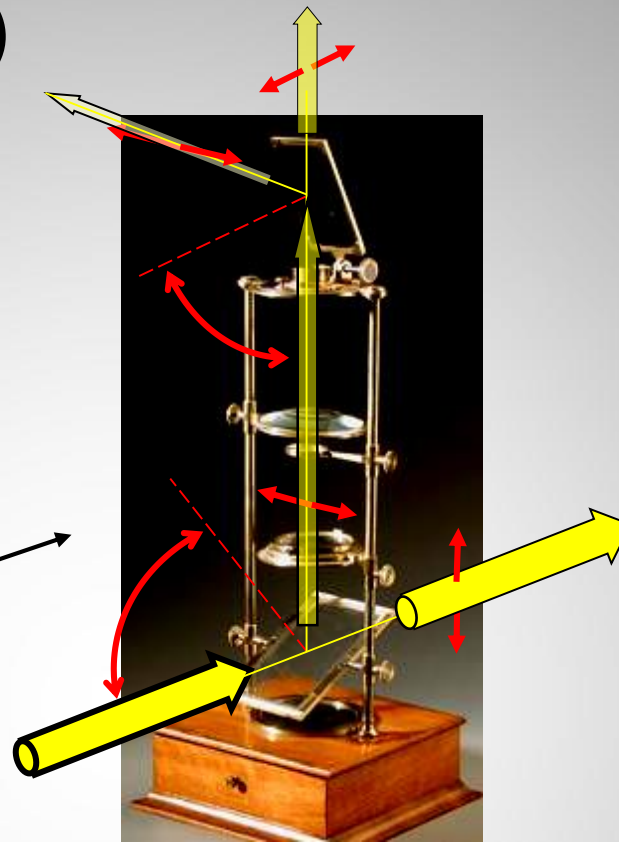
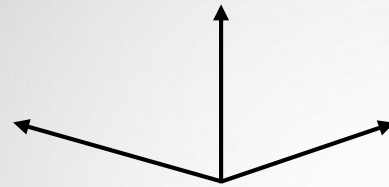
$$\boxed{\operatorname{tg} \theta_B = \frac{n_2}{n_1}}$$

Znikanie $r_{\parallel}$ (@ θ_B) to konsekwencja poprzeczności fal EM i ich oddziaływania z materią



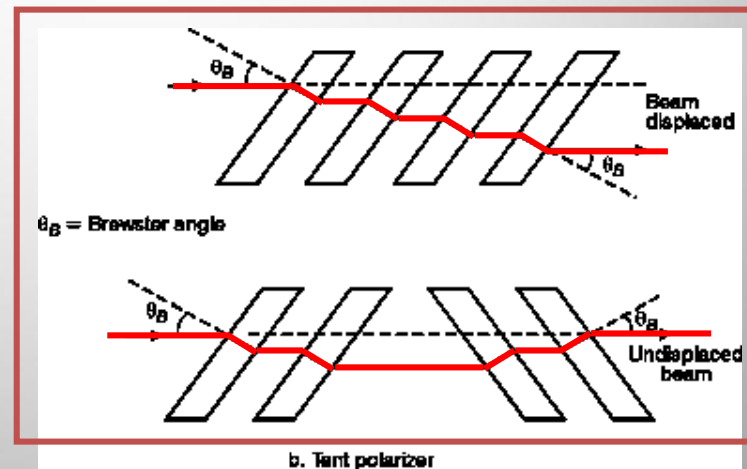
- fala odbita to wynik promieniowania całej objętości ośrodka
- przy polaryzacji p , $r_{\parallel}(\theta_i = \theta_B) = 0$,
- może się odbijać tylko fala o polaryzacji s

Przyrząd (polaryskop) Nörrenberga

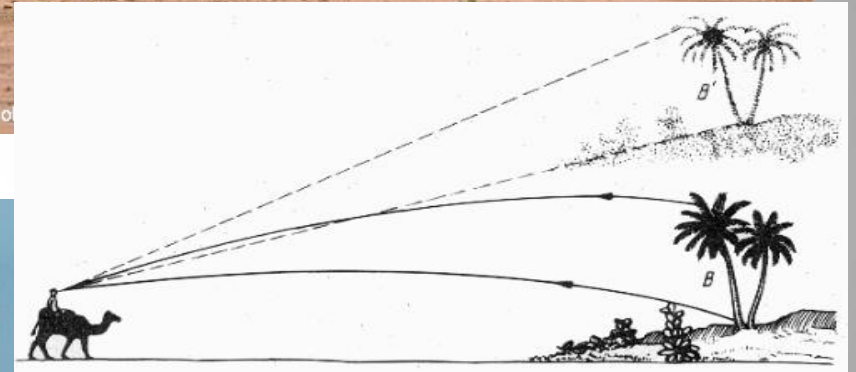
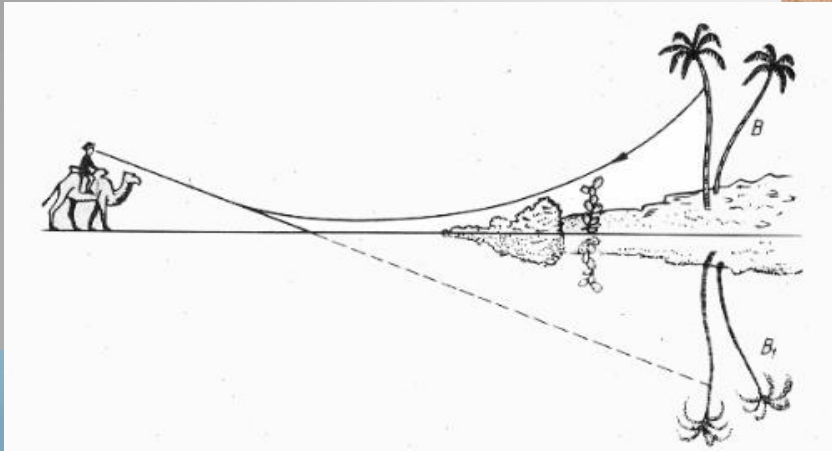


→ polaryzacja przez odbicie

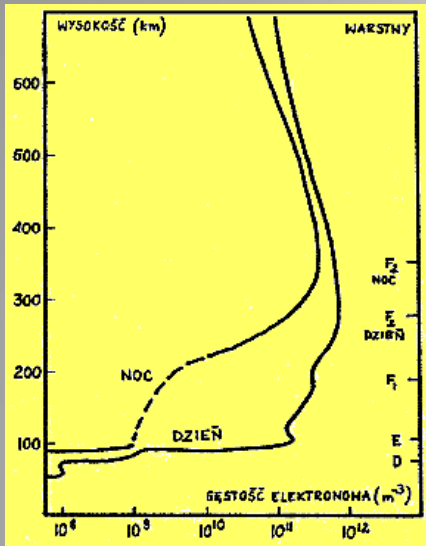
Polaryzatory płytkowe



Miraže

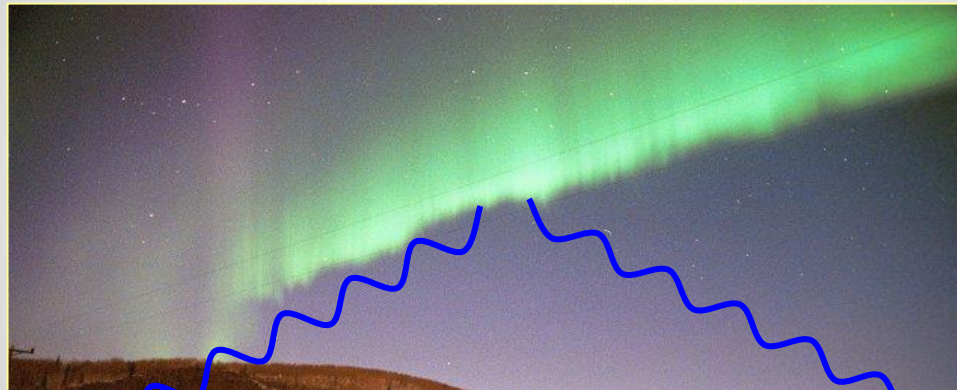


Daleki odbiór fal radiowych – odbicie od jonosfery



$$n(\omega \gg \omega_0) \approx 1 - \frac{e^2}{2\epsilon_0 m} \frac{N_{el}}{\omega^2}$$

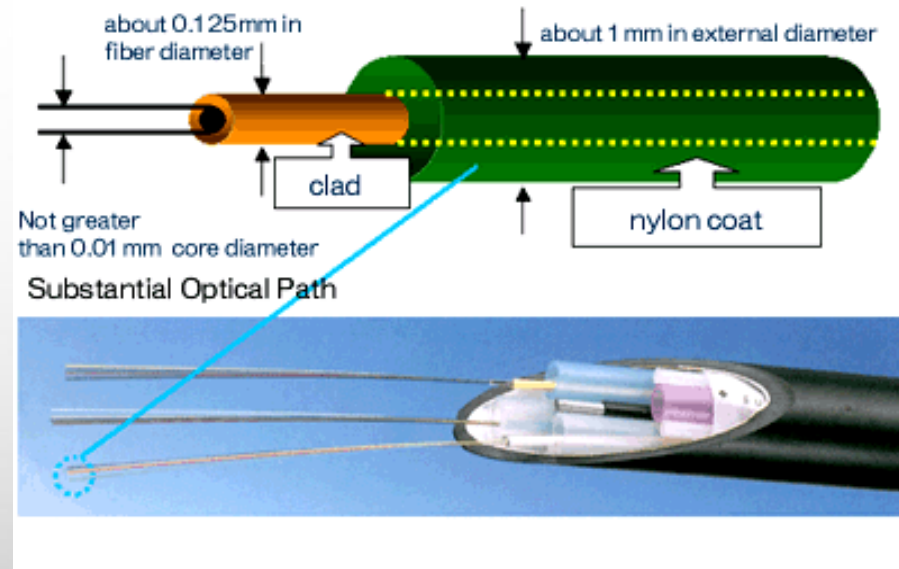
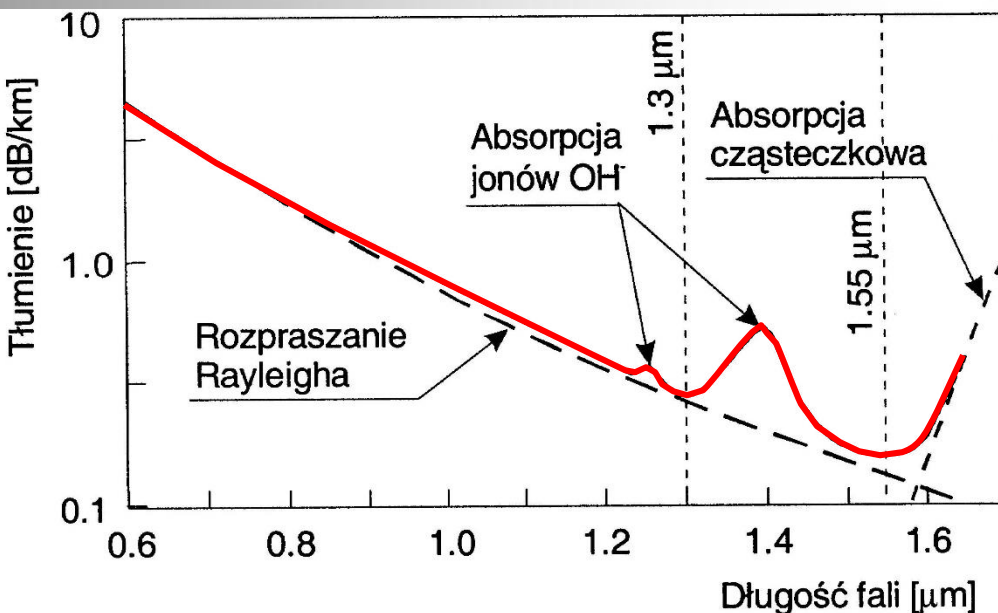
- silna zależność od aktywności Słońca
- $\exists$ częstość graniczna



Światłowody

- wykorzystują całkowite odbicie
- problemy

- wprowadzenie i wyprowadzenie wiązki
- fala zanikająca (specjalne konstrukcje, płaszczyz)
- absorpcję – specjalne materiały (kwarc) i odpowiednia dł. fali
- zginanie – minimalny kąt zgięcia
- zniekształcenia krótkich impulsów



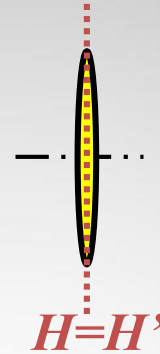
Cienkie soczewki $\Delta \approx 0$

$$b, c \approx 1$$

$$d \approx 0$$

$$a \approx k_1 + k_2$$

$$l_H \approx l'_H$$



gdy $f, f' > 0$

r. Gaussa:

$$\frac{1}{s} + \frac{1}{s'} = \frac{1}{f'}$$

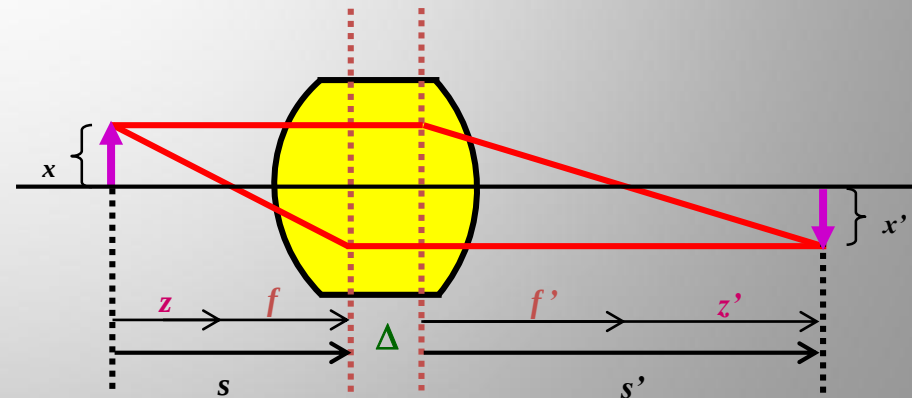
$$a = \frac{n_1}{f} = \frac{n'_2}{f'} \equiv k_1 + k_2 - k_1 k_2 \frac{\Delta}{n'_1}$$

$$k_{1,2} \equiv \frac{n'_1 - n_1}{r_1}, \frac{n_2 - n'_2}{r_2}$$

$$\Rightarrow \frac{1}{f'} = (n'_1 - 1) \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} + \frac{n'_1 - 1}{n_1 r_1 r_2} \Delta \right)$$

($\Delta \approx 0$)

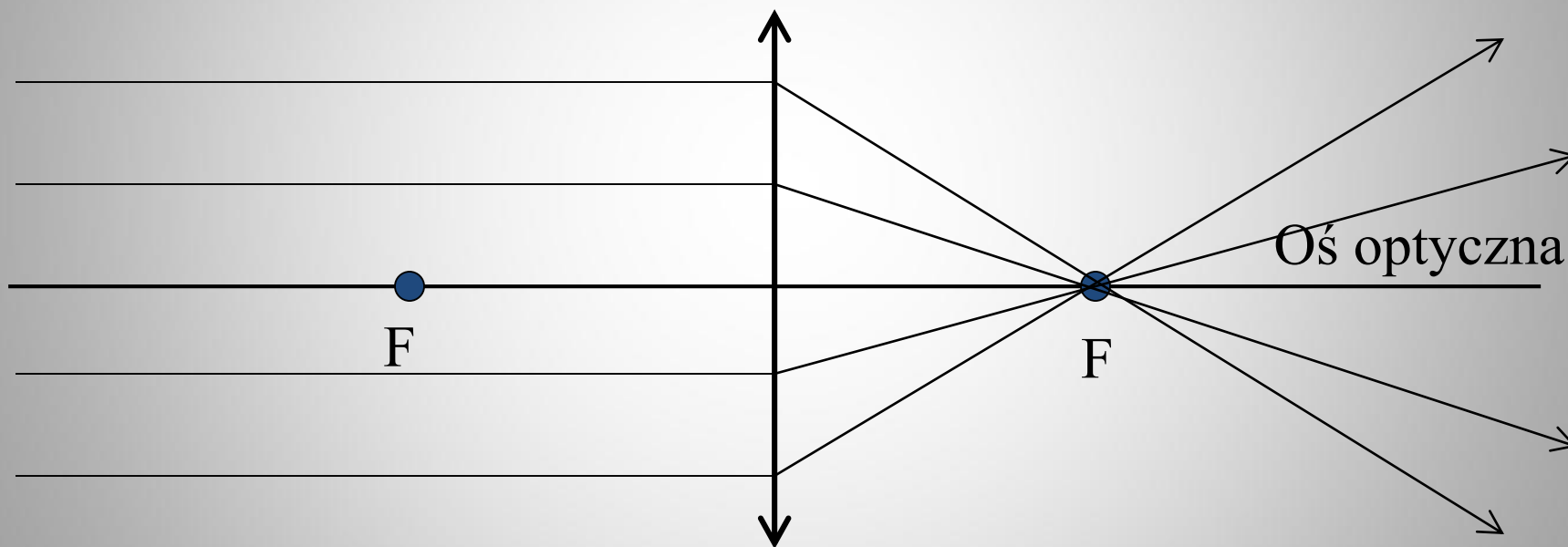
$$\frac{1}{f'} = (n'_1 - 1) \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right)$$



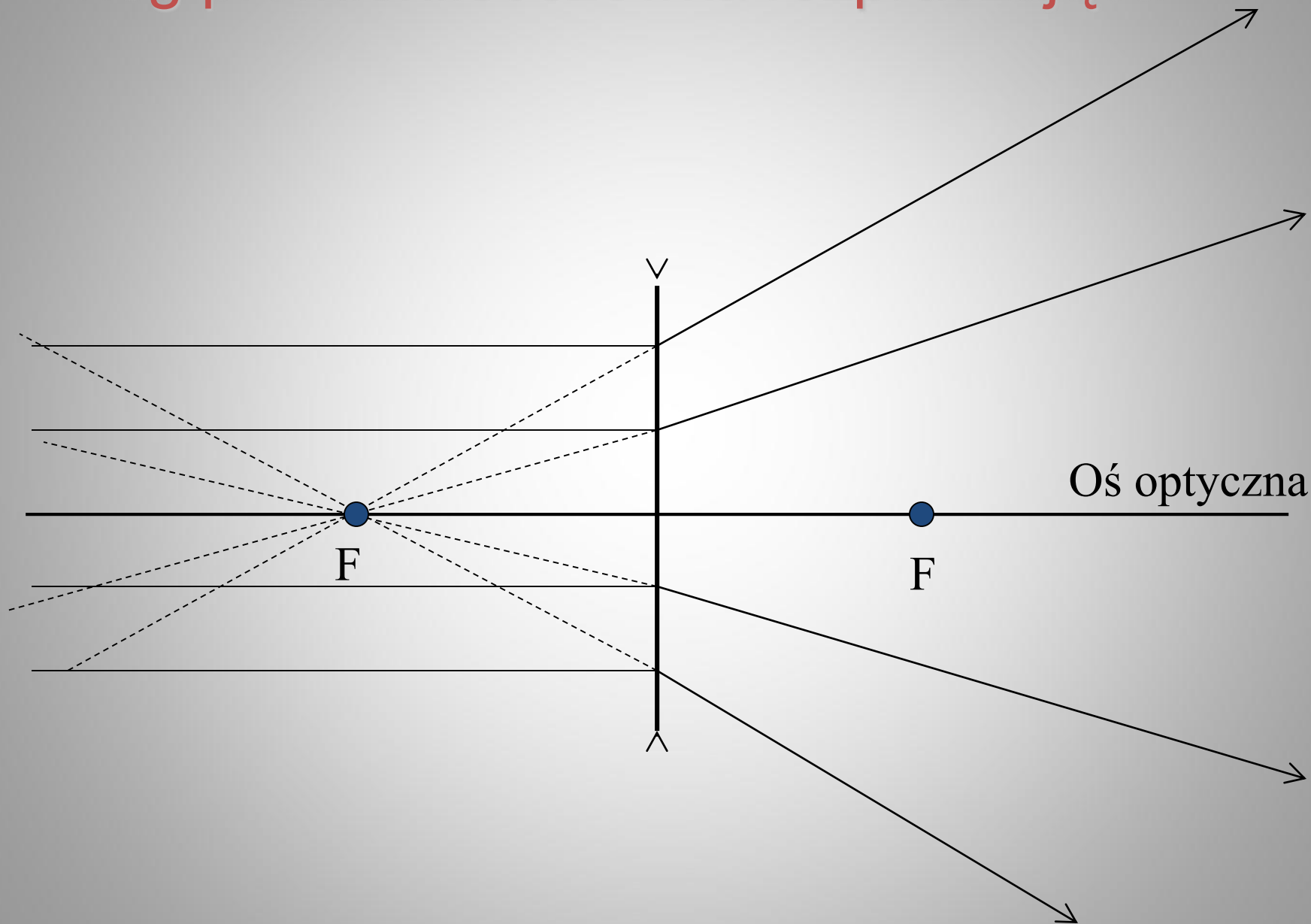
Powyższe wzory należy uzupełnić o konwencję znakową

1. Rzeczywisty przedmiot jest po stronie lewej, a rzeczywisty obraz po prawej; odwrotnie dla przedmiotu i obrazu pozornego.
2. Odległość przedmiotowa s jest dodatnia.
3. Odległość obrazowa s' jest dodatnia dla obrazu rzeczywistego a ujemna dla pozornego.
4. Obie ogniskowe (przedmiotowa i obrazowa) są dodatnie dla soczewek skupiających, a ujemne dla soczewek rozpraszających.
5. Promienie krzywizny dla powierzchni skupiających to znaczy skierowanych wybrzuszeniem w lewą stronę są dodatnie, a dla powierzchni rozpraszających - ujemne.

Bieg promieni: soczewka skupiająca



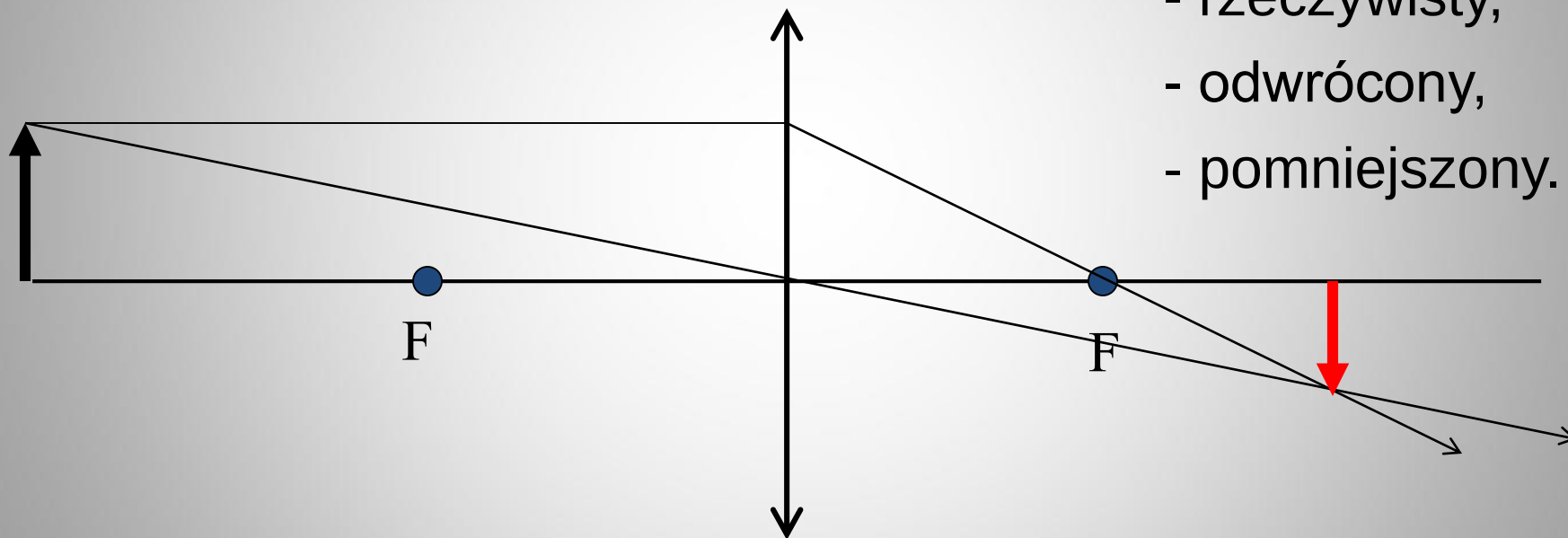
Bieg promieni: soczewka rozpraszająca



Soczewka skupiająca Dla $x > 2f$

Obraz:

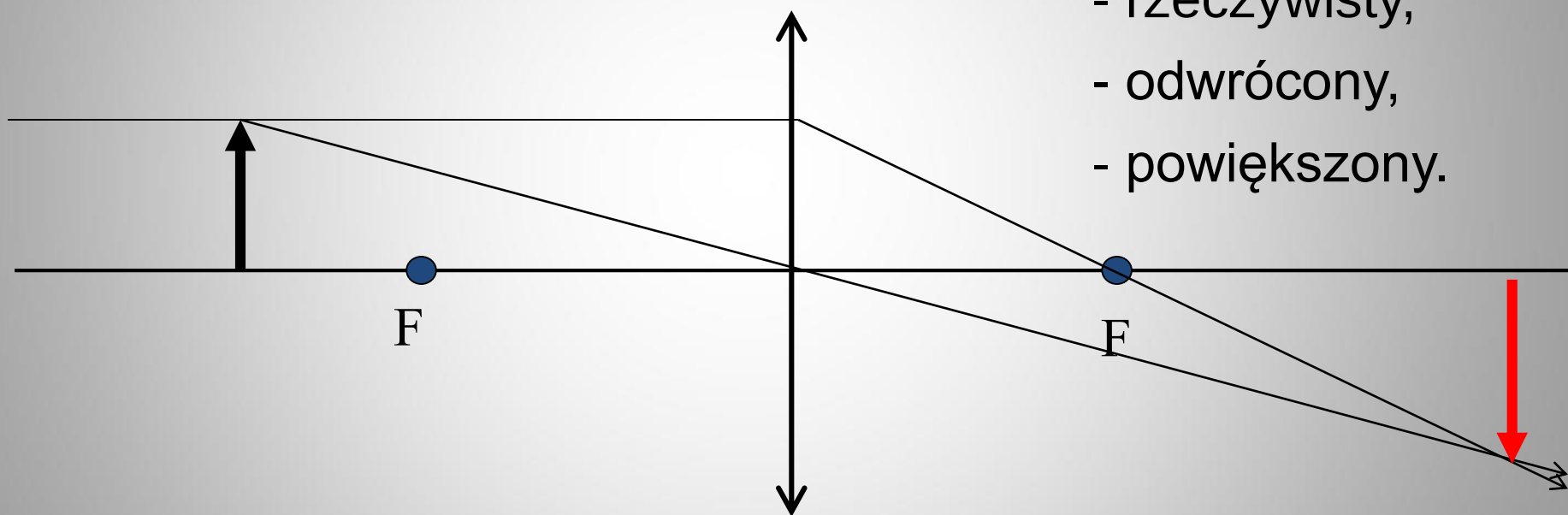
- rzeczywisty,
- odwrócony,
- pomniejszony.



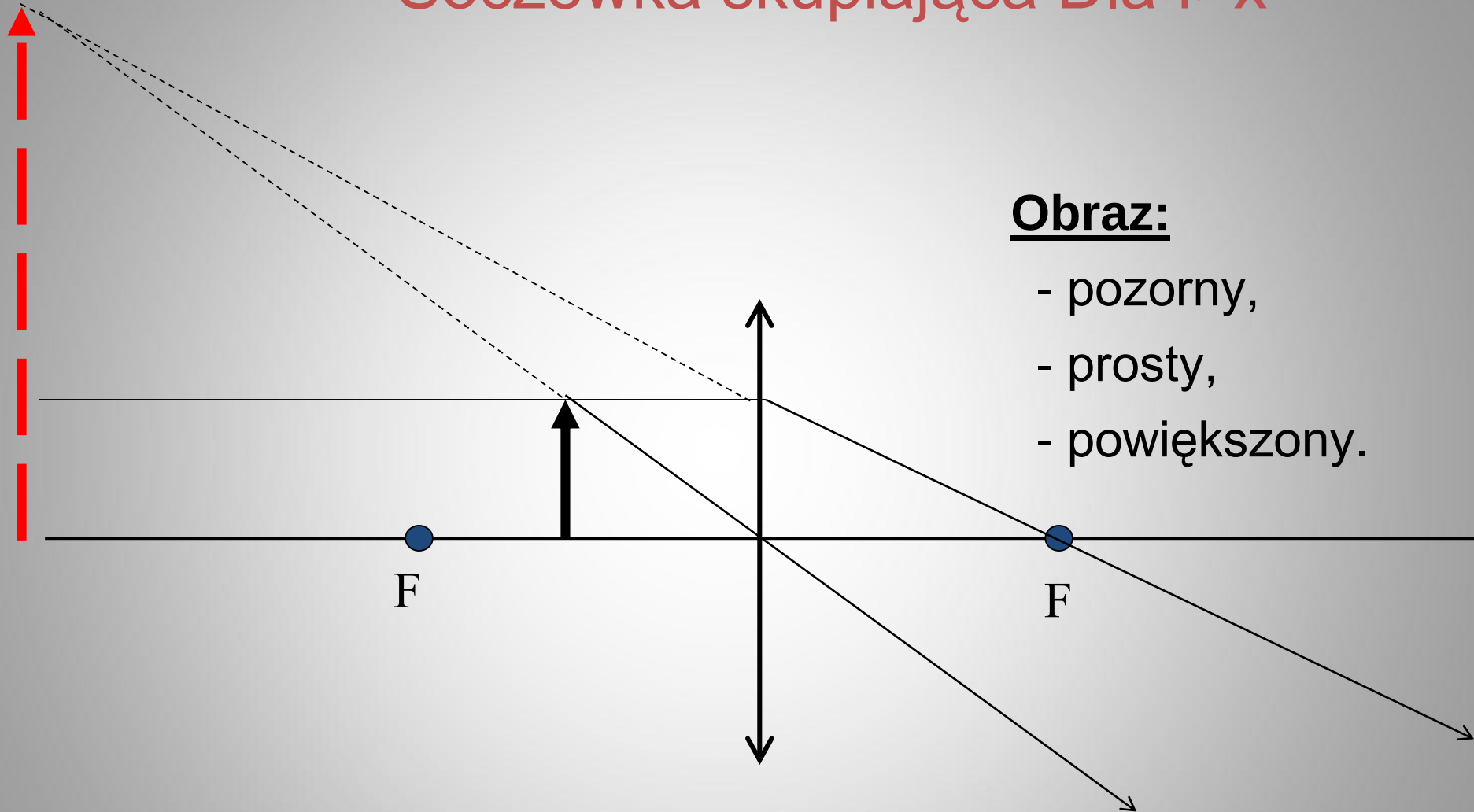
Soczewka skupiająca Dla $2f > x > f$

Obraz:

- rzeczywisty,
- odwrócony,
- powiększony.



Soczewka skupiająca Dla $f > x$

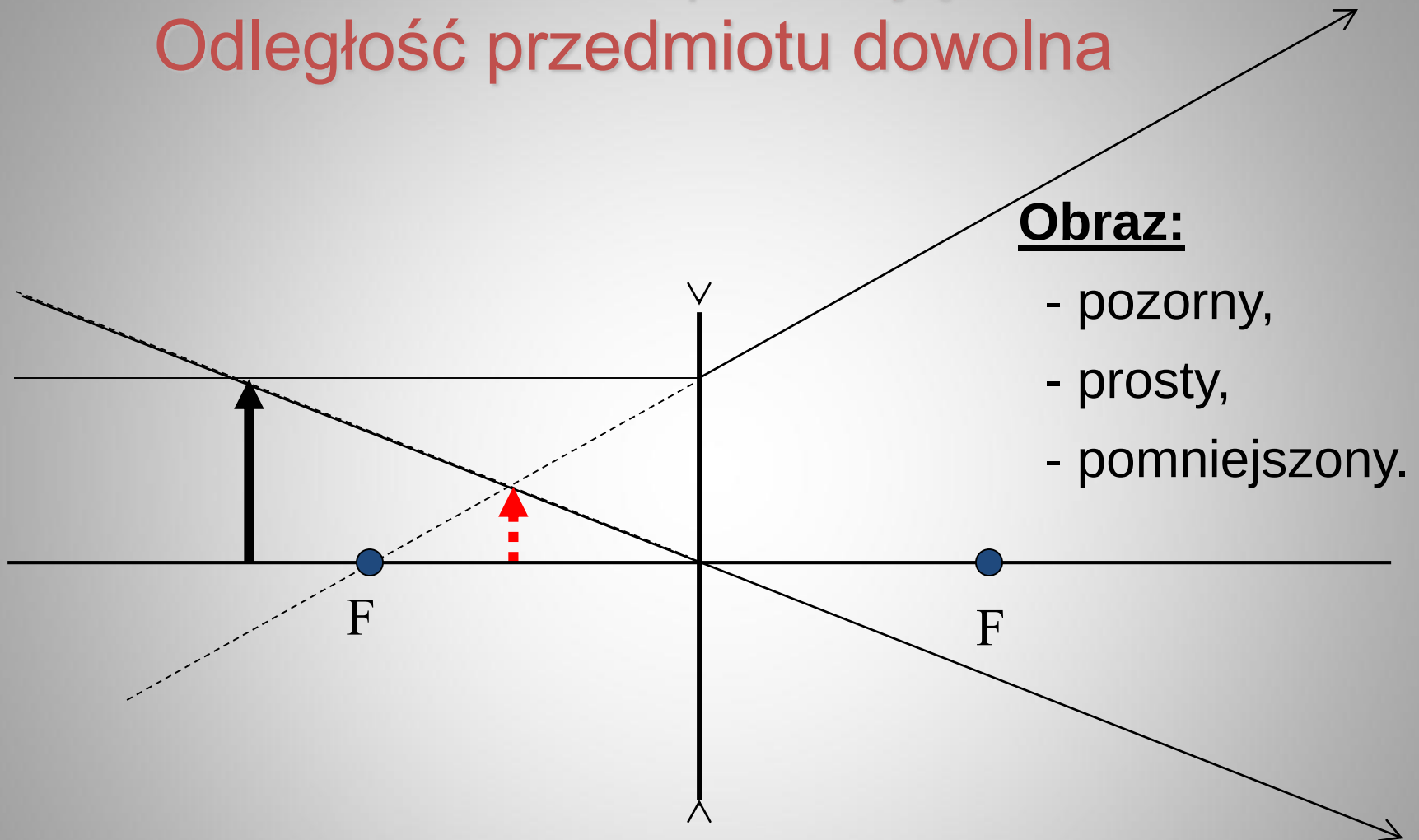


Obraz:

- pozorny,
- prosty,
- powiększony.

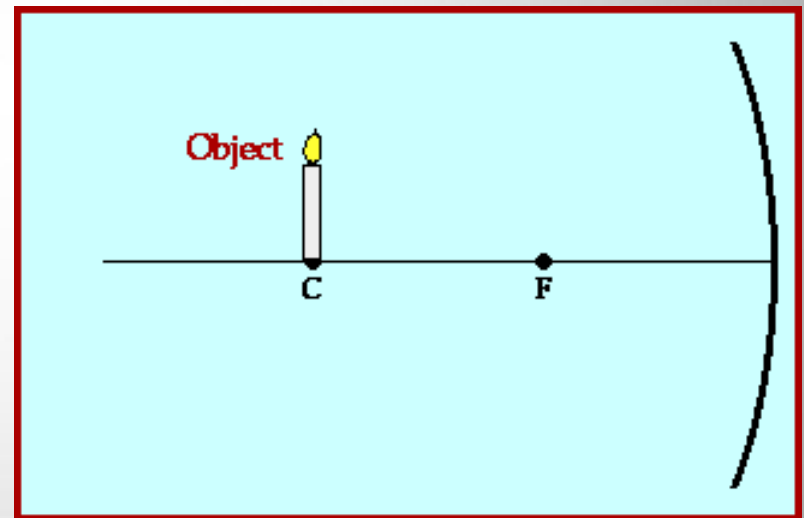
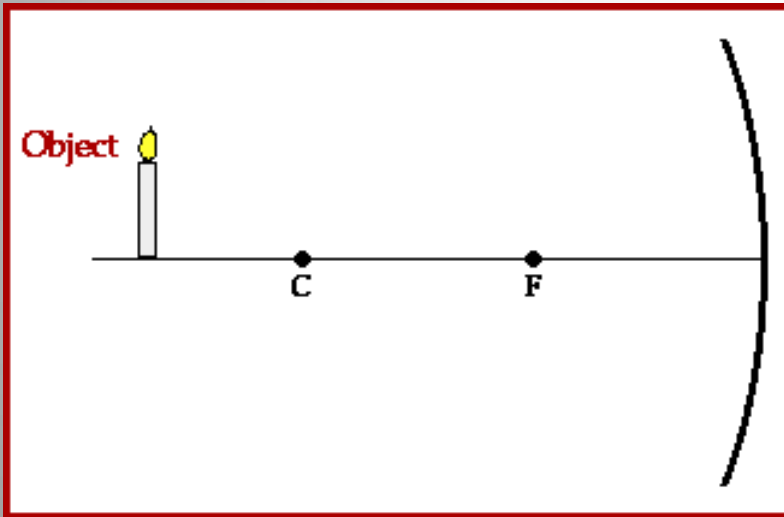
Soczewka rozpraszająca

Odległość przedmiotu dowolna

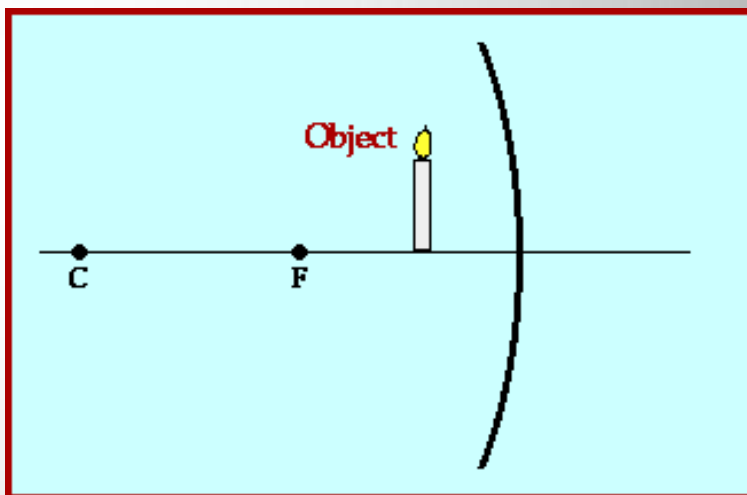
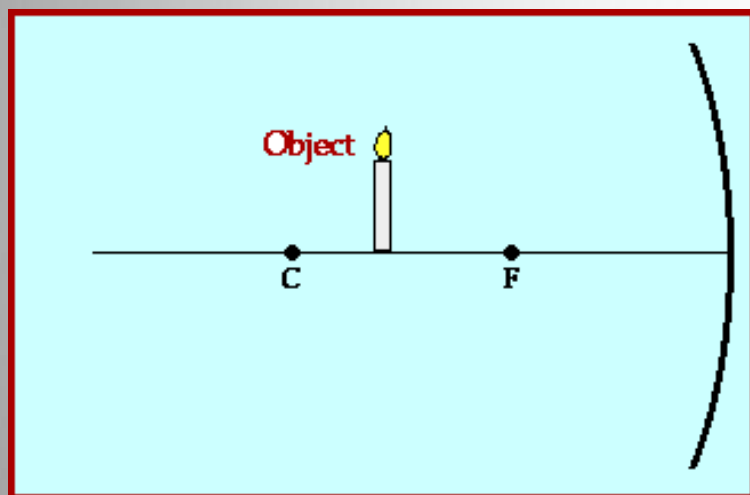


Obrazy w zwierciadłach

- Podobne konstrukcje można wykonać dla zwierciadeł przy założeniu, że $f=R/2$



Obrazy w zwierciadłach CD



Przyrządy optyczne

Aby ułatwić sobie życie ludzie zbudowali szereg przyrządów optycznych, które wspomagają wzrok w szczególnych sytuacjach te przyrządy to:

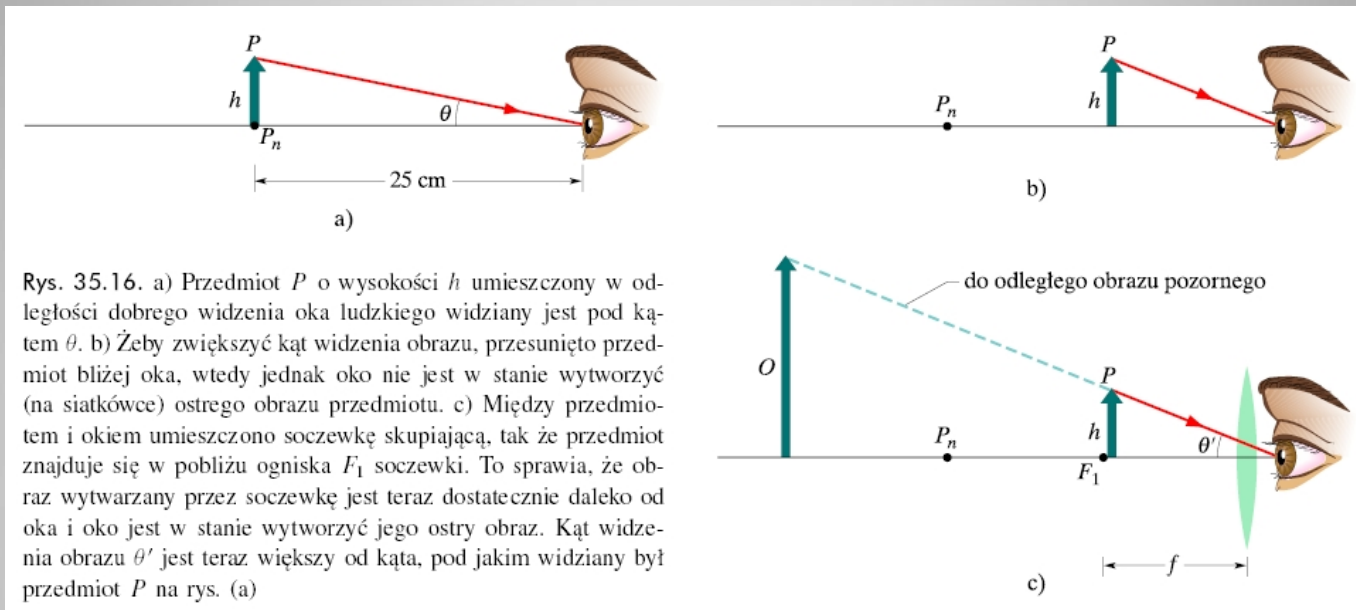
Lupa

Luneta astronomiczna (Keplera)

Luneta ziemna (Galileusza)

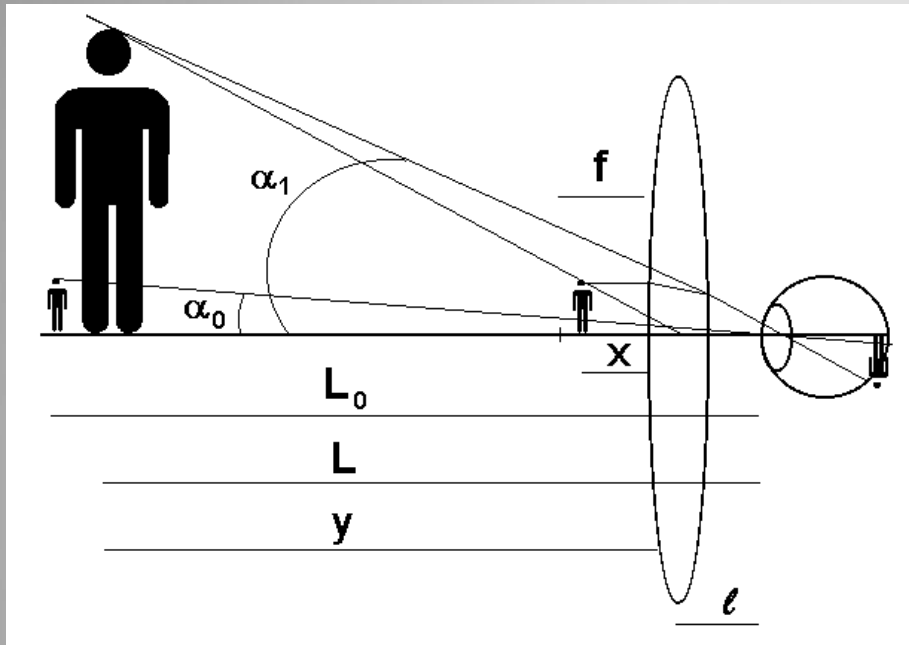
Mikroskop

Lupa



- a) przedmiot w odległości dobrego widzenia, ale zbyt mały
- b) przedmiot za blisko
- c) Dzięki soczewce oglądamy obraz pozorny powiększony w odległości dobrego widzenia

Lupa CD



Pojedyncza soczewka skupiająca o ogniskowej nie większej niż 25 cm może służyć jako szkło powiększające (lupa).

Powiększenie kątowe lupy zależy od jej mocy optycznej D (ogniskowa $f=1/D$) i wynosi od $0.25D$ do $0.25D+1$, zależnie od odległości lupa-oko. Wielkość 0.25 jest odległością dobrego widzenia wyrażoną w metrach.

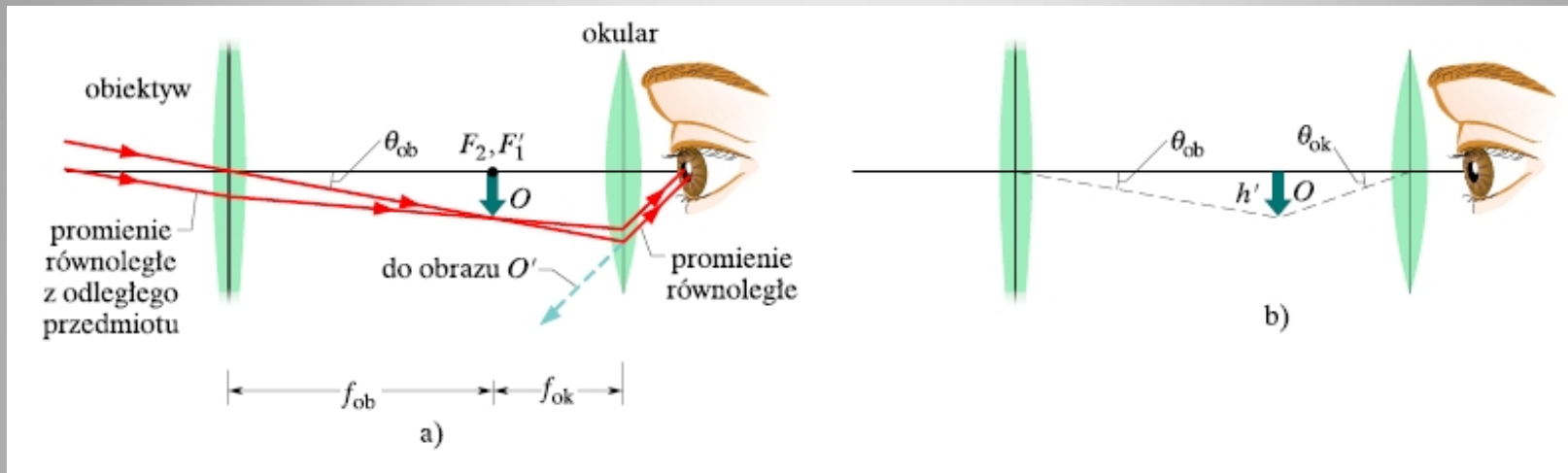
$$m_{\alpha} = \frac{\alpha_1}{\alpha_0}$$

powiększenie kątowe to stosunek odpowiednich kątów określających wielkość kątową przedmiotu i obrazu; decyduje o wielkości obrazu na siatkówce

$$m_{\alpha} \cong L_0 \cdot \left[\frac{1}{L} + D \right] = L_0 \cdot D + \frac{L_0}{L}$$

$$\frac{1}{f} = D$$

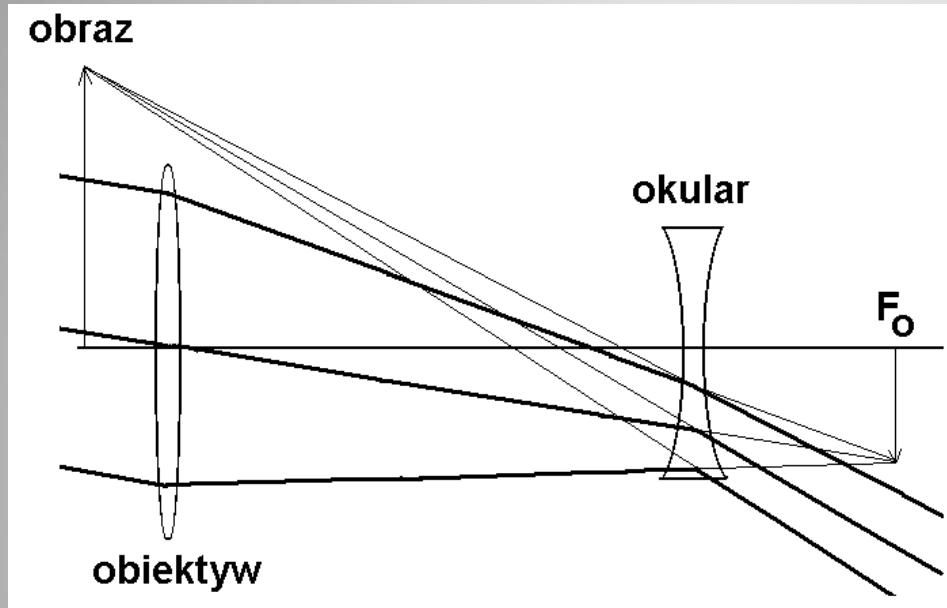
Luneta astronomiczna Keplera



Obiektyw, obraz rzeczywisty, pomniejszony, odwrócony. Okular pracuje jak lupa (obraz pozorny, prosty, powiększony).

$$m_{\alpha} = \frac{f_{ob}}{f_{ok}}$$

Luneta ziemiska Galileusza



Luneta ziemiska (Galileusza) służy do oglądania odległych przedmiotów.

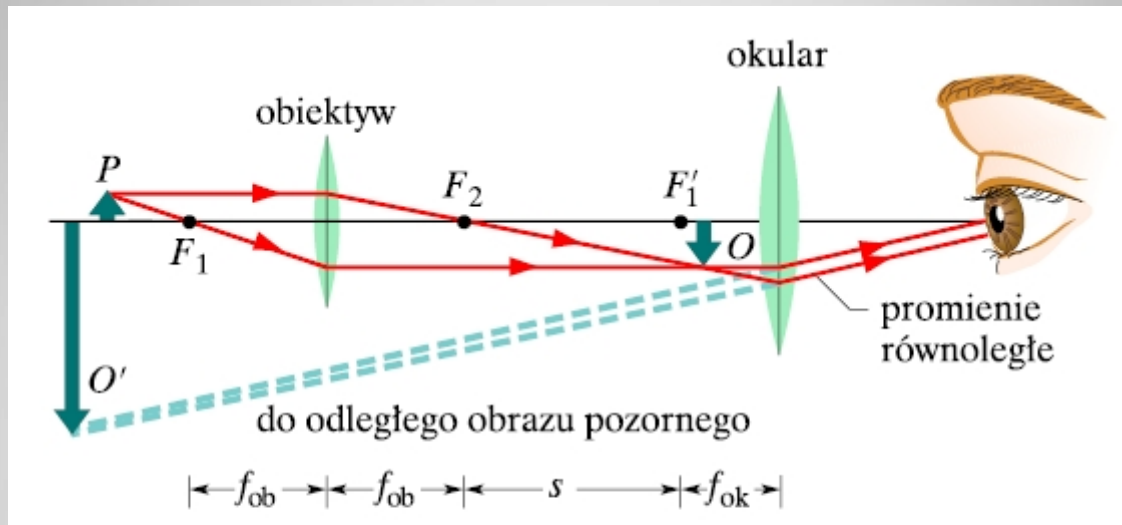
Składa się z dwóch soczewek, obiektywu (soczewka skupiająca) i okularu (soczewka rozpraszająca).

Okular służy jako lupa do oglądania obrazu pośredniego (pozornego) wytworzonego przez obiektyw.

Powiększenie kątowe lunety zależy od stosunku ogniskowych; długa ogniskowa obiektywu i krótka okularu sprzyja dużemu powiększeniu lunety.

$$m_{\alpha} = \frac{\alpha_1}{\alpha_0} = \frac{h}{f_{ok}} \cdot \frac{f_{ob}}{h} = \frac{f_{ob}}{f_{ok}}$$

Mikroskop



Obiektyw, obraz powiększony, odwrócony, rzeczywisty. Okular (lupa), obraz powiększony, pozorny, odwrócony

$$m_{mik} = \left(-\frac{s}{f_{ob}} \right) \cdot \left(\frac{25}{f_{ok}} \right)$$

Aberracje układów optycznych

konsekwencje:

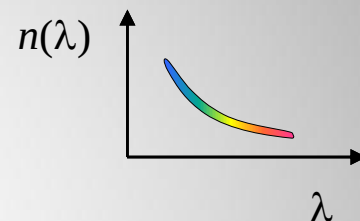
1) odstępstw od paraksjalności:

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

$$\begin{pmatrix} n\alpha \\ x \end{pmatrix} \rightarrow \begin{pmatrix} n' \sin \alpha \\ x \end{pmatrix}$$

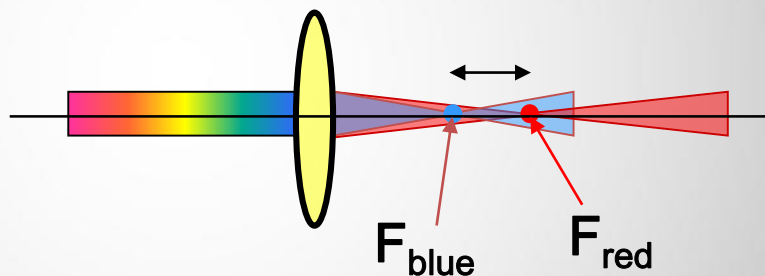
stałe Gaussa zależą od α

2) dyspersji materiałowej [zależności $n(\lambda)$]

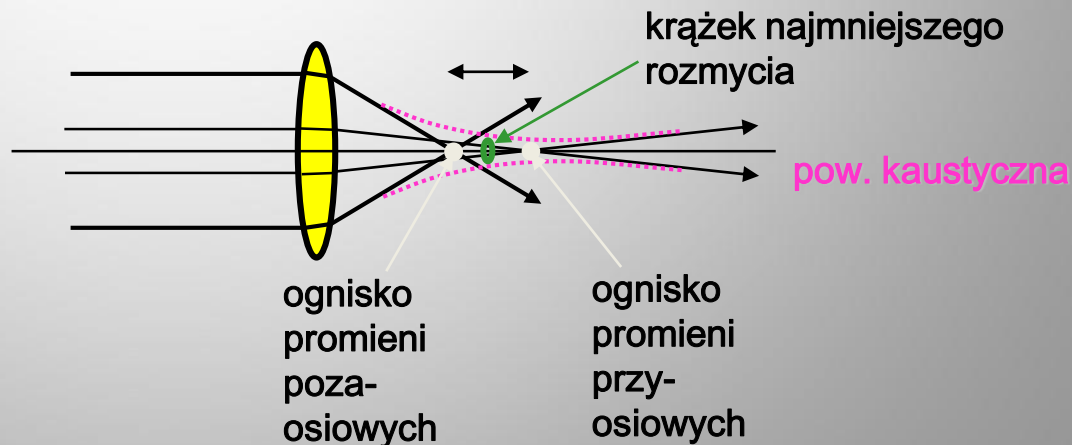


Ważne przykłady:

- Aberracja chromatyczna

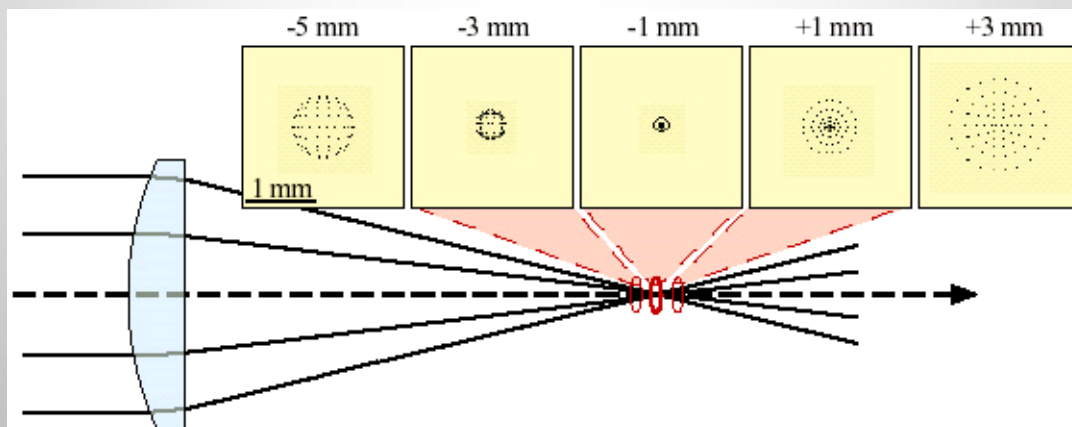
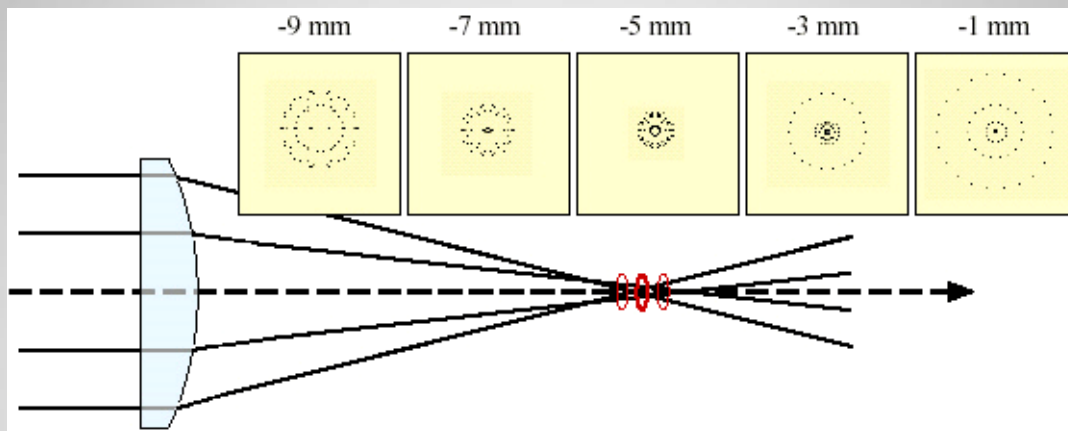


- Aberracja sferyczna

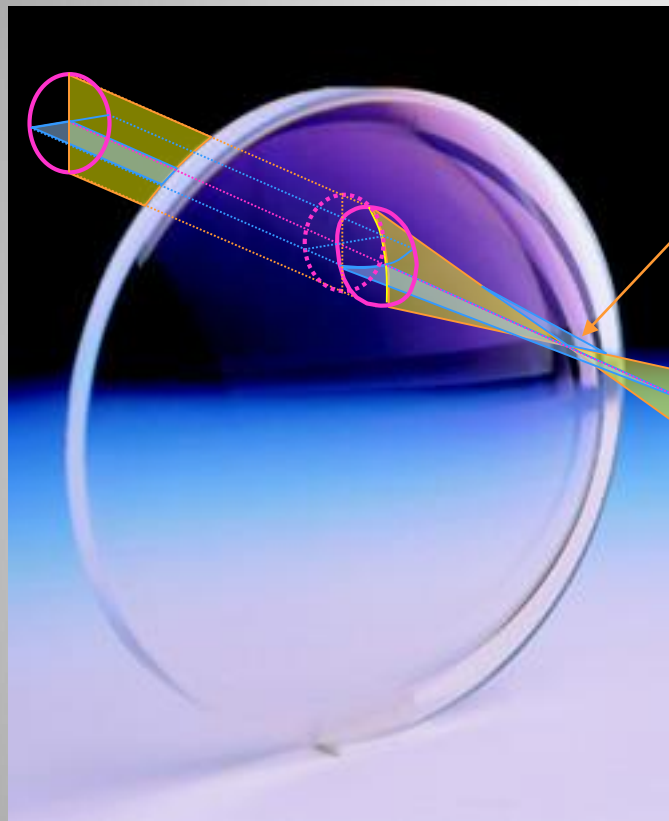




Orientacja soczewki

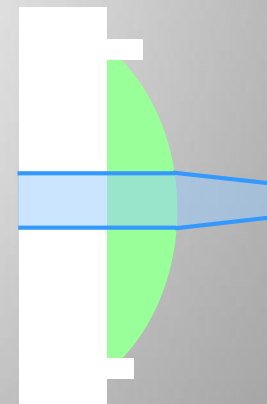
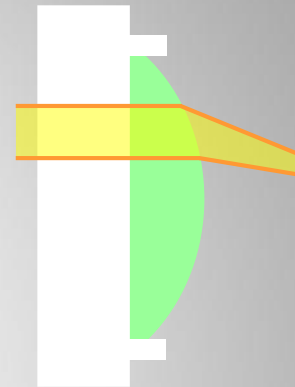


Astygmatyzm



ognisko promieni
radialnych
(południkowych)

ognisko promieni
sagitalnych
(równoleżnikowych)

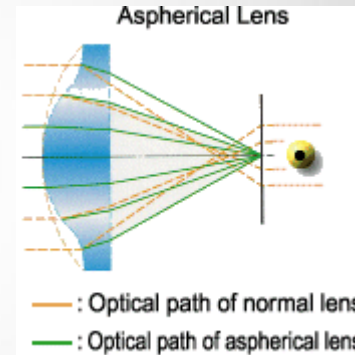


Uzupełnienia nt. optyki geometrycznej

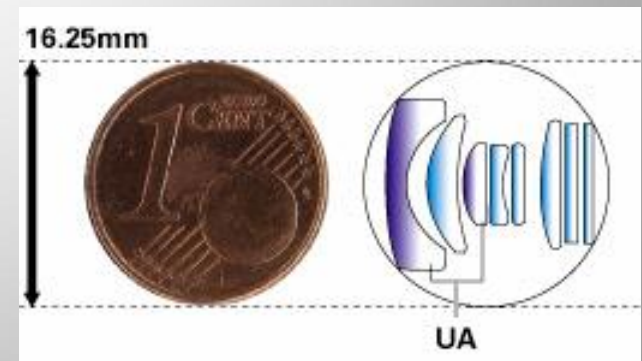
- zwierciadła są wolne od aberracji chromatycznej (odbicie nie zależy od λ)
- zwierciadła sferyczne mają silną aberrację sferyczną, ale zw. paraboliczne już jej nie mają
- aberracje soczewek są redukowane przez specjalne układy:

- achromaty

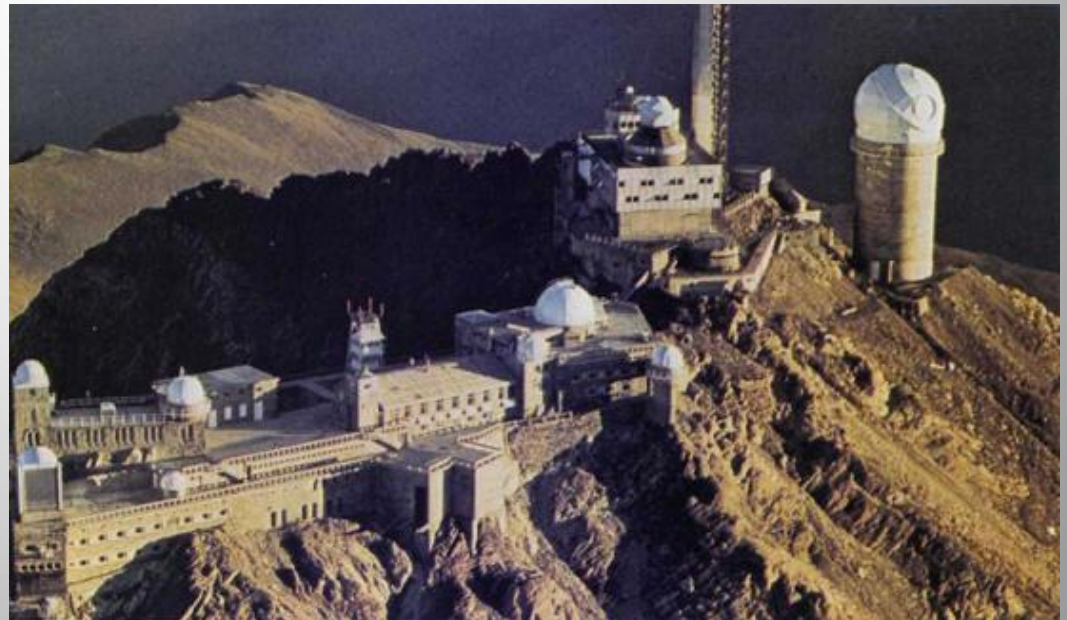
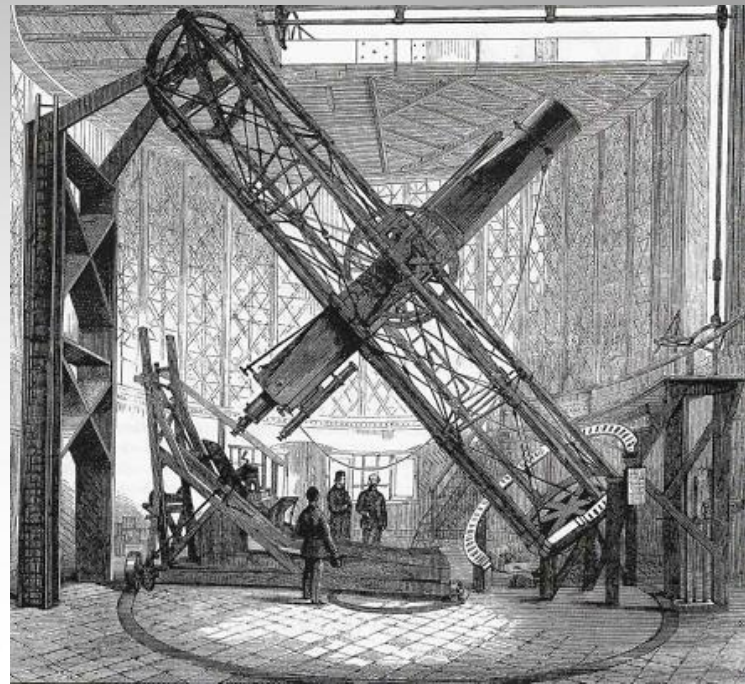
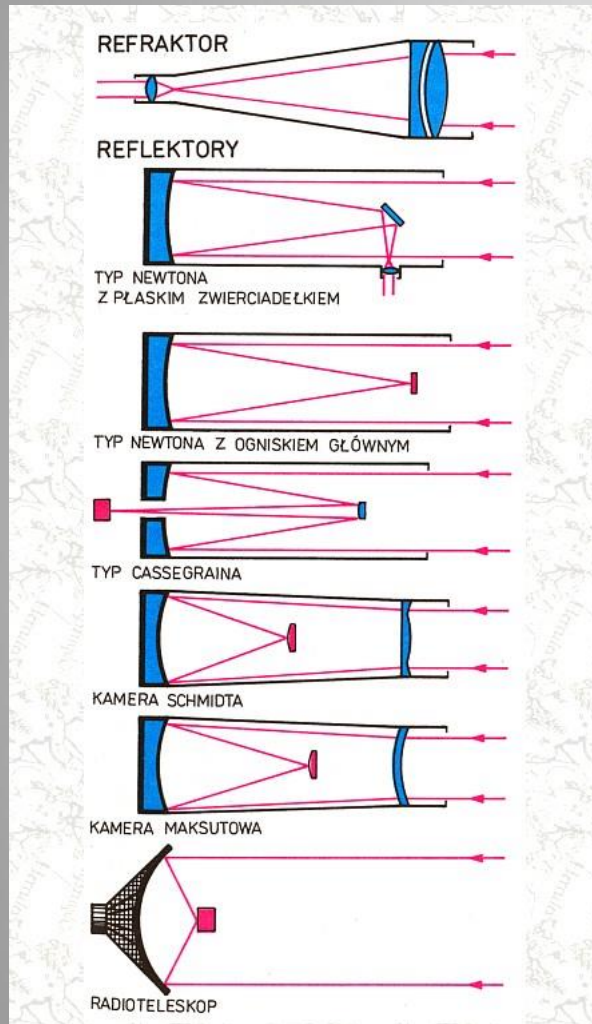
- soczewki asferyczne



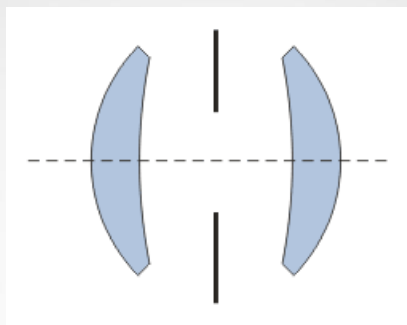
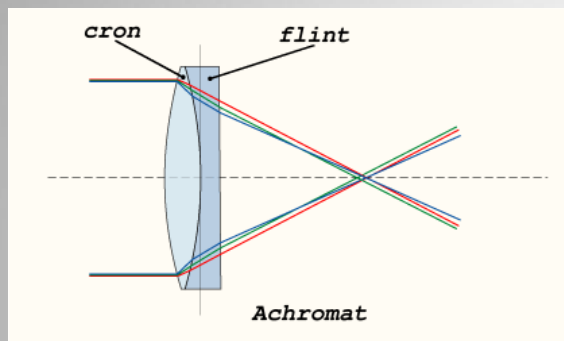
- wiele wad układów soczewek eliminuje konstrukcja soczewek z niejednorodnych materiałów, z odpowiednio kształtowanym gradientem współczynnika załamania
 - tzw. *grin lenses* (*graded-index lenses*)
 - bardzo małe rozmiary !
- (m.in. w okulistyce jako lekkie szkła optyczne o dużej „sile”)



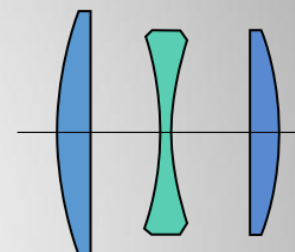
Teleskopy astronomiczne



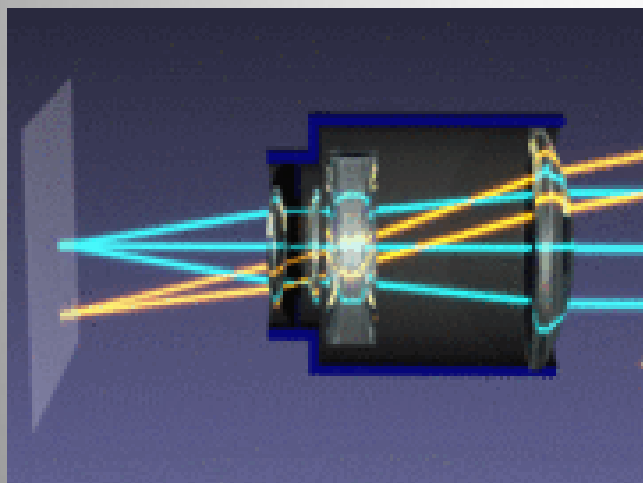
Obiektywy aparatów fotograficznych



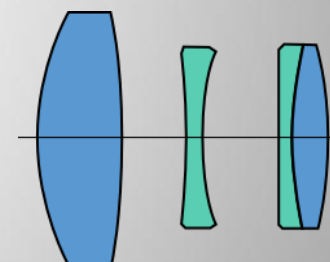
Peryskop



Tryplet cooka (anastygmat)



Obiektyw zmiennoogniskowy

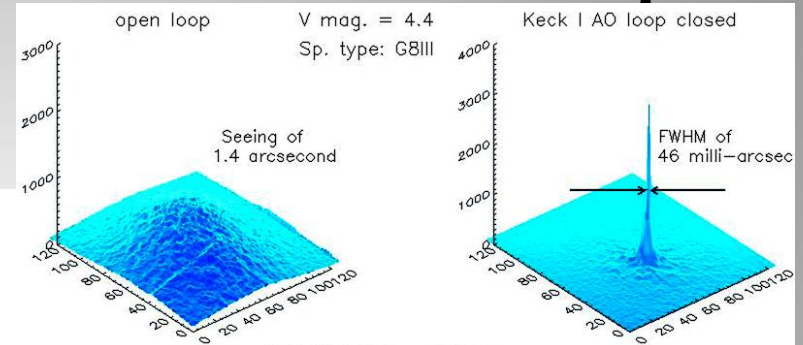
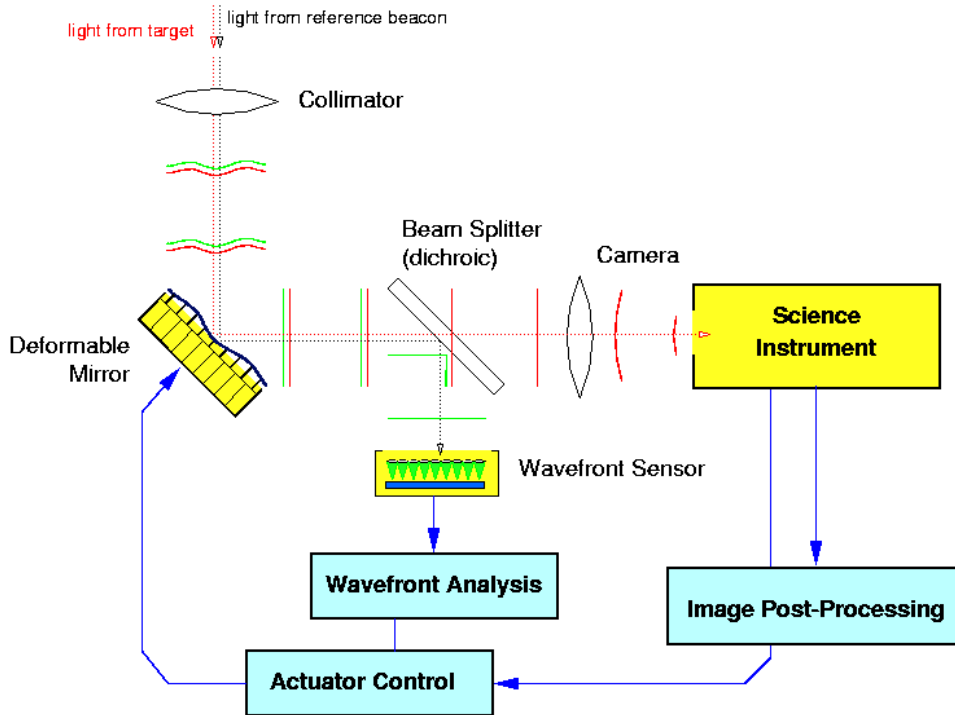


Aplanat (Tessar)

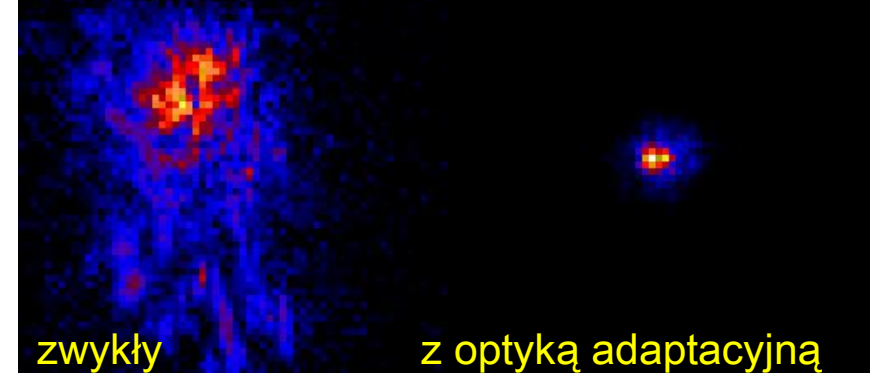
Rozwój nowoczesnej optyki instrumentalnej

- Optyka adaptacyjna

-kompensacja fluktuacji atmosferycznych psujących odwzorowanie



Obraz z W.M. Keck Observatory (Hawaje):

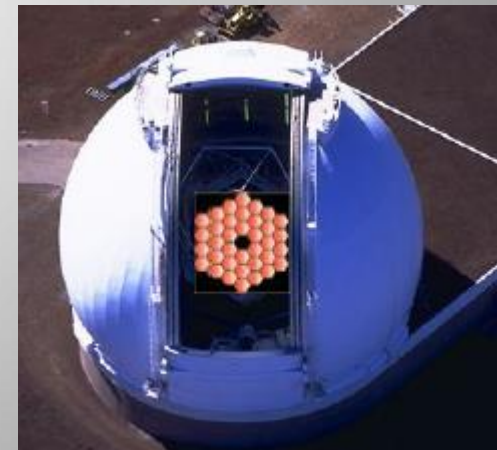


- Miniaturyzacja i sterowanie elektroniczne

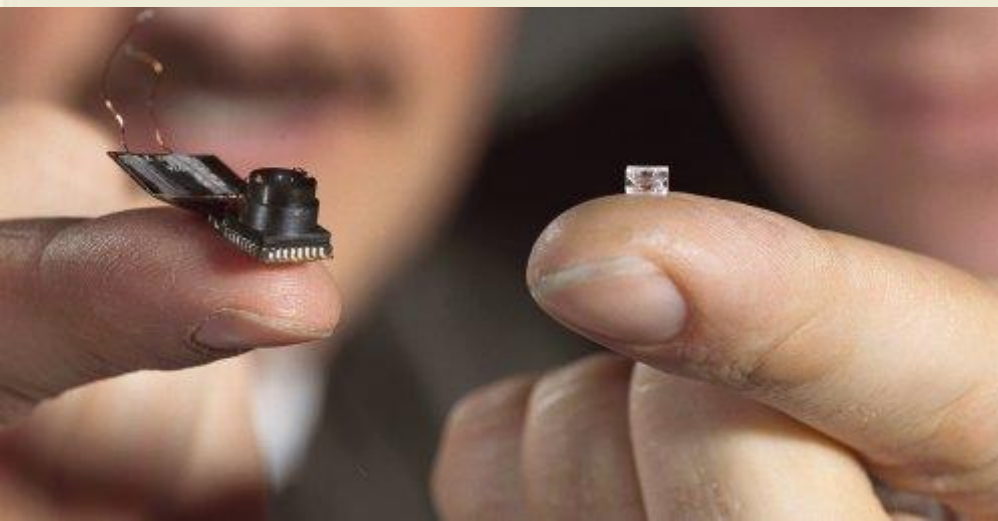
- np. MOEMs, soczewki cieczowe

- Nowe materiały

- „kryształy foniczne”, „*left-handed materials*”, itp.



Soczewki cieczowe

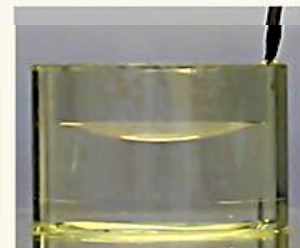


0 V

As the voltage on the electrode increases, the meniscus between the oil and water changes from convex to concave.

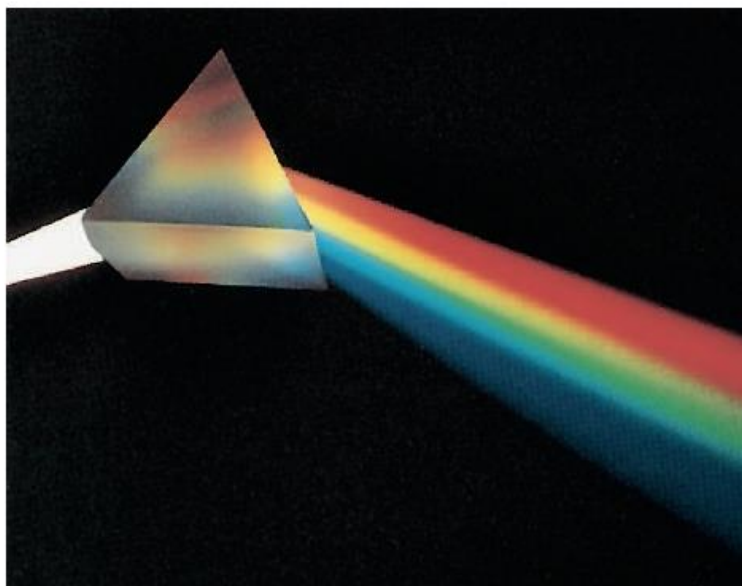


50 V

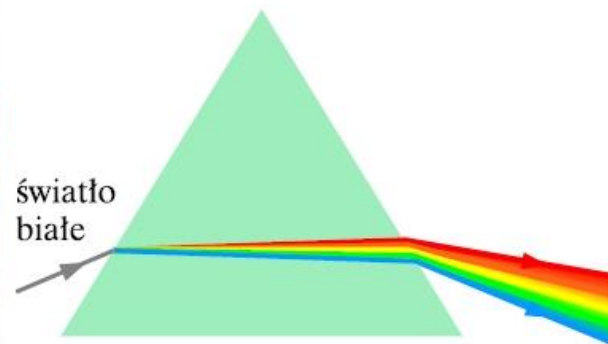


75 V

Przechodzenie światła przez pryzmat



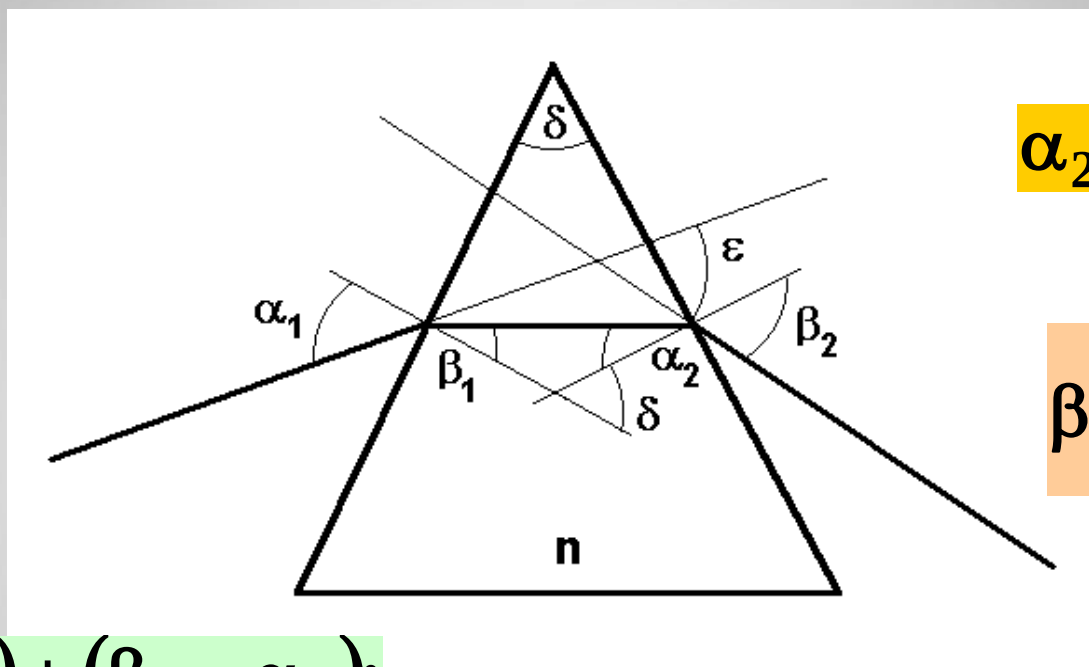
a)



b)

Rys. 34.21. a) Trójkątny pryzmat rozdzielający światło białe na barwy składowe. b) Rozszczepienie zachodzi na pierwszej powierzchni załamującej i jest zwiększane na drugiej powierzchni

Przechodzenie światła przez pryzmat



$$\alpha_2 + \beta_1 = \delta;$$

$$\beta_2 = \frac{\varepsilon + \delta}{2};$$

$$\varepsilon = (\alpha_1 - \beta_1) + (\beta_2 - \alpha_2);$$

$$\varepsilon = \alpha_1 + \beta_2 - \delta$$

$$\alpha_2 = \frac{\delta}{2}$$

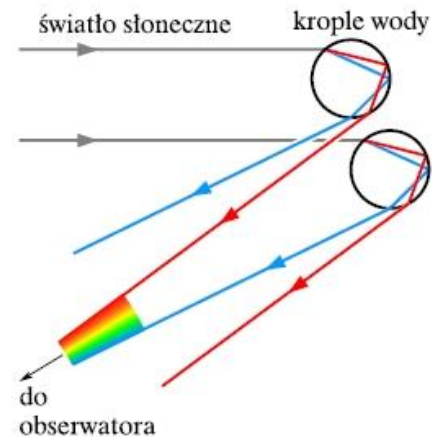
Dla symetrycznego przechodzenia promienia

$$\sin\left(\frac{\varepsilon + \delta}{2}\right) = n \sin\left(\frac{\delta}{2}\right)$$

Zjawisko tęczy



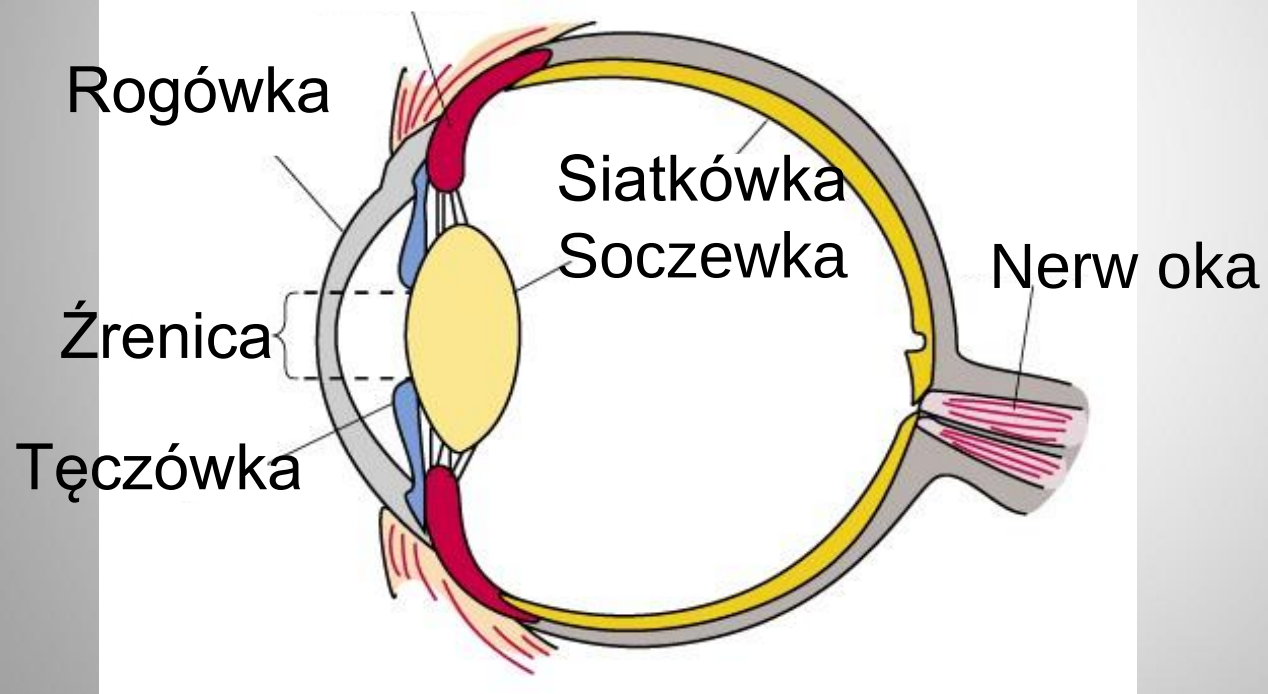
a)



b)

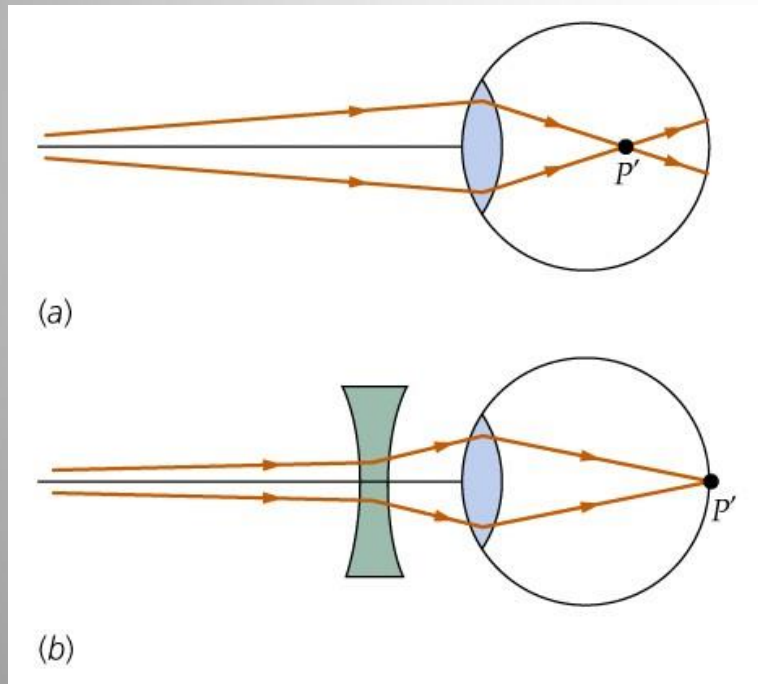
Rys. 34.22. a) Tęcza ma zawsze kształt kolistej łuku utworzonego wokół kierunku, w którym patrzyłbyś wtedy, gdybyś spoglądał prosto od strony Słońca. W zwykłych warunkach ogląda się zazwyczaj tylko niezbyt długi fragment łuku, ale jeśli obserwację prowadzi się z wysokości, to można zaobserwować nawet pełen okrąg. b) Rozdzielanie barw w wyniku załamania światła przy wnikaniu i wychodzeniu z kropli deszczu prowadzi do powstania tęczy. Na rysunku zilustrowano sytuację, w której Słońce jest na horyzoncie (promienie słoneczne są wówczas poziome). Pokazane są kierunki promieni niebieskich i czerwonych z dwóch kropli. Na obserwowane promienie niebieskie i czerwone składa się załamanie światła w wielu innych kroplach (i to samo dotyczy innych barw pośrednich)

Oko ludzkie

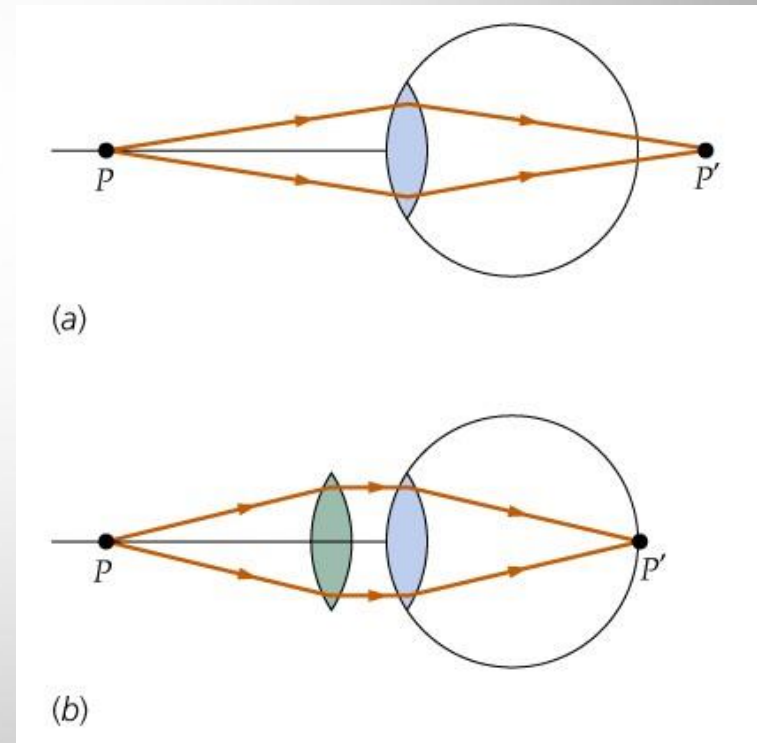


Krótko i dalekowzroczność

Krótkowzroczność

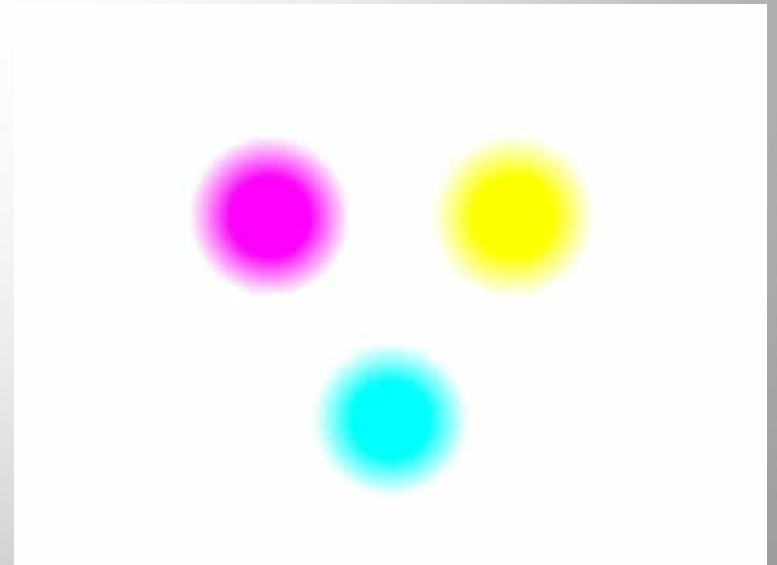
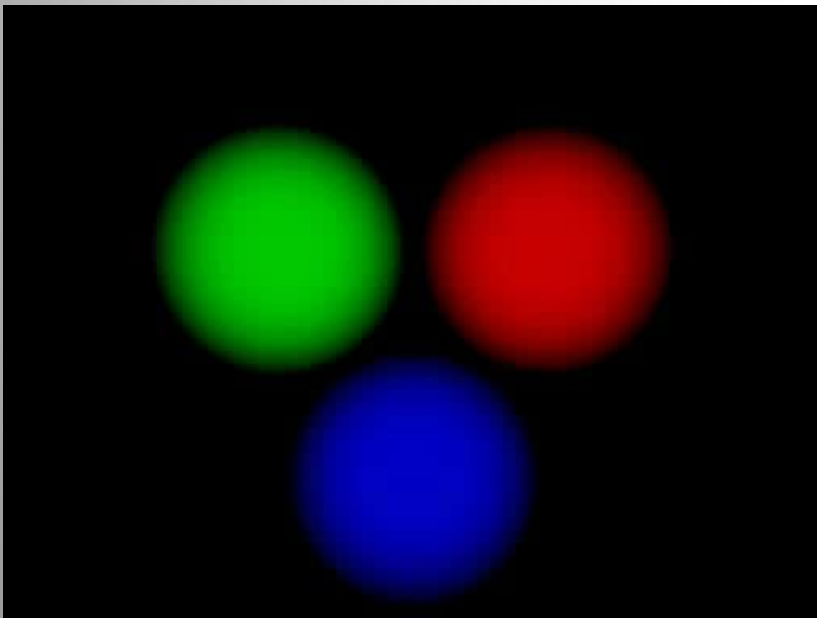


Dalekowzroczność



Widzenie barwne

Wszystkie barwy (kolory) których jesteśmy w stanie rozróżnić bardzo dużo powstają przez syntezę trzech barw podstawowych RGB (czerwony, zielony, niebieski) lub odejmowanie tzw. barw substraktywnych to znaczy niebieskozielonej, purpurowej i żółtej. W czasie tworzenia barwnych obrazów na kolorowych zdjęciach lub monitorach następuje synteza powyższych barw podstawowych



Interferencja

Superpozycja 2 fal monochromatycznych o tej samej częstotliwości
i dobrze określonej fazie

$$E_1 = E_{10} e^{-i(\omega t - \varphi_1)} \quad E_2 = E_{20} e^{-i(\omega t - \varphi_2)} \quad E = E_1 + E_2$$

$$\langle S \rangle_t = \frac{1}{2} c \epsilon_0 E^2$$

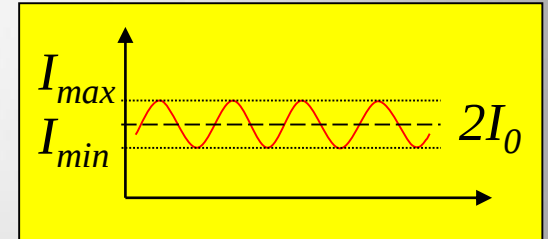
natężenie światła [W/m²]

$$I = \frac{1}{2} |E|^2$$

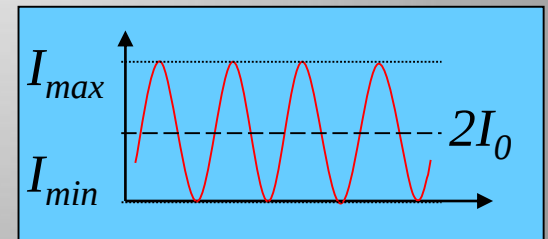
$$\begin{aligned} &= \frac{1}{2} \left[E_{10}^2 + E_{20}^2 + 2E_{10}E_{20} \cos(\varphi_1 - \varphi_2) \right] = \\ &= I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \cos \delta \quad \delta = \varphi_1 - \varphi_2 \end{aligned}$$

$$\text{gdy } I_1 = I_2 = I_0 \quad I = 2I_0(1 + \cos \delta) \quad I_{\min} = 0, I_{\max} = 4I_0$$

Uwaga! W optycznym zakresie fal EM, wciąż nie ma detektorów śledzących za oscylacjami $E(t)$



$$I_{\min, \max} = \left(\sqrt{I_1} \mp \sqrt{I_2} \right)^2 \quad \{ \cos \delta = \mp 1 \}$$



Konieczne ≥ 2 fale

- monochromatyczne
- o dobrze określonej fazie

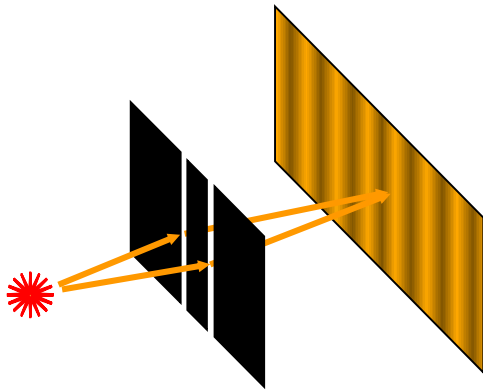
 problem spójności

Interferencja

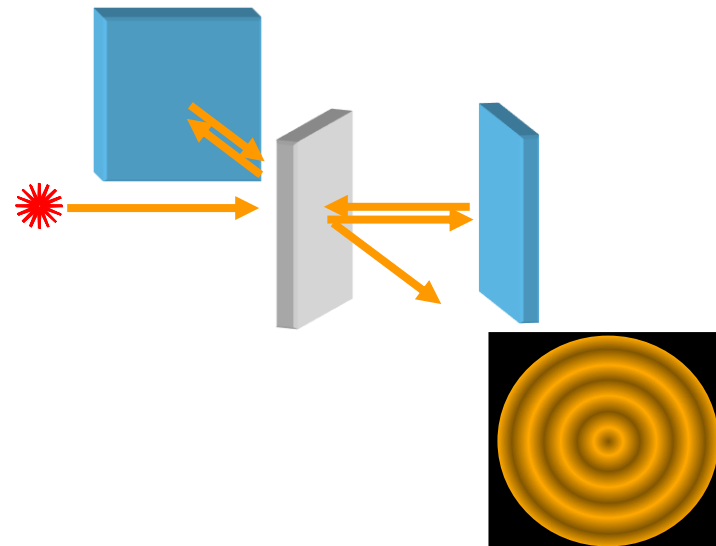
Otrzymywanie przez:

- dzielenie frontu falowego – np. szczeliny
- dzielenie natężeń (amplitud) – np. płytki światłodzielące

Ad a) doświadczenie Younga



Ad b) Interferometr Michelsona



Interferometr Younga:

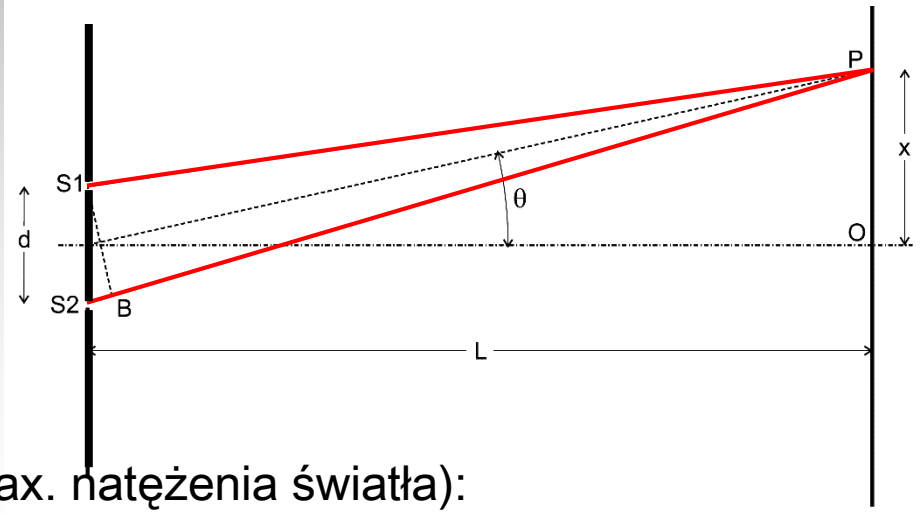
$$\overline{S_2P} - \overline{S_1P} = \overline{S_2B} = d \sin \theta$$

$$d \sin \theta_m = m\lambda$$

$$\sin \theta \approx \theta = x/L$$

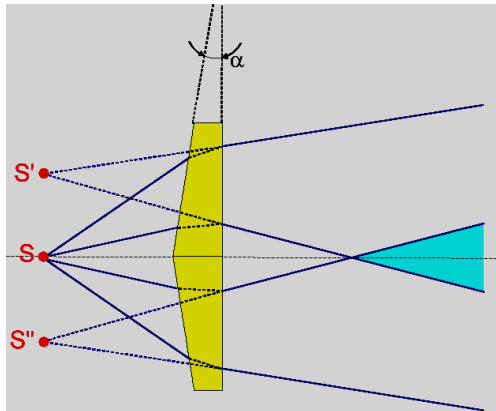
odległość sąsiednich jasnych prążków (max. natężenia światła):

$$x_{m+1} - x_m \approx \frac{L}{d}(m+1)\lambda - \frac{L}{d}m\lambda = \frac{L}{d}\lambda \quad \text{zależność od dł. fali}$$

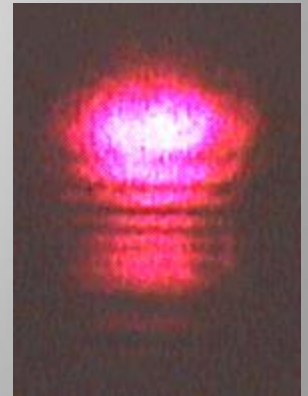
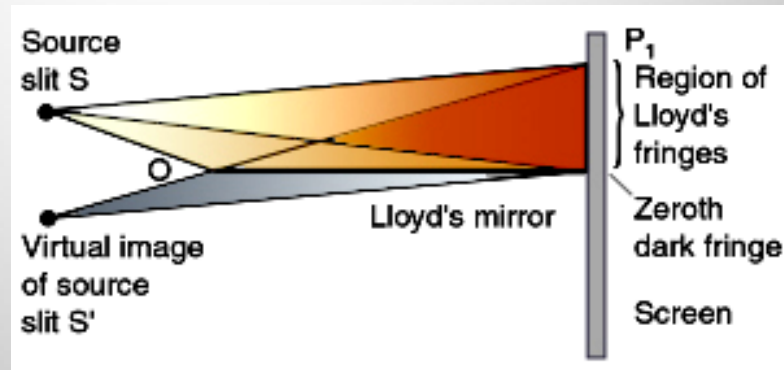


Inne przykłady:

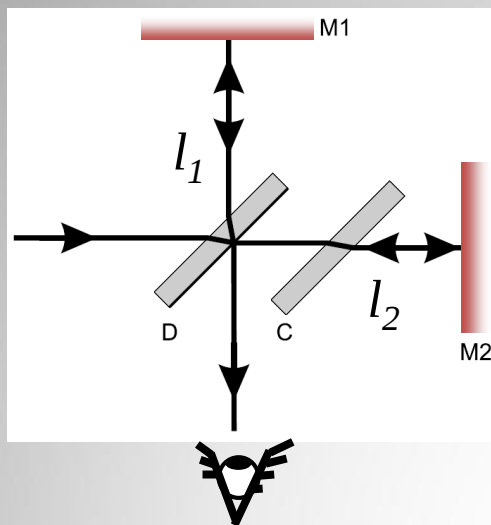
bipryzmat Fresnela,



zwierciadło Lloyd'a

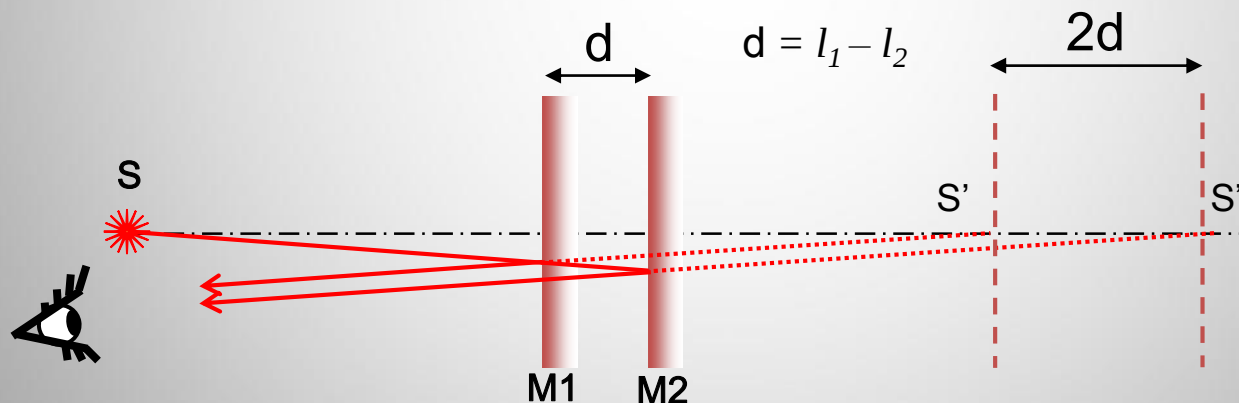


Interferometr Michelsona



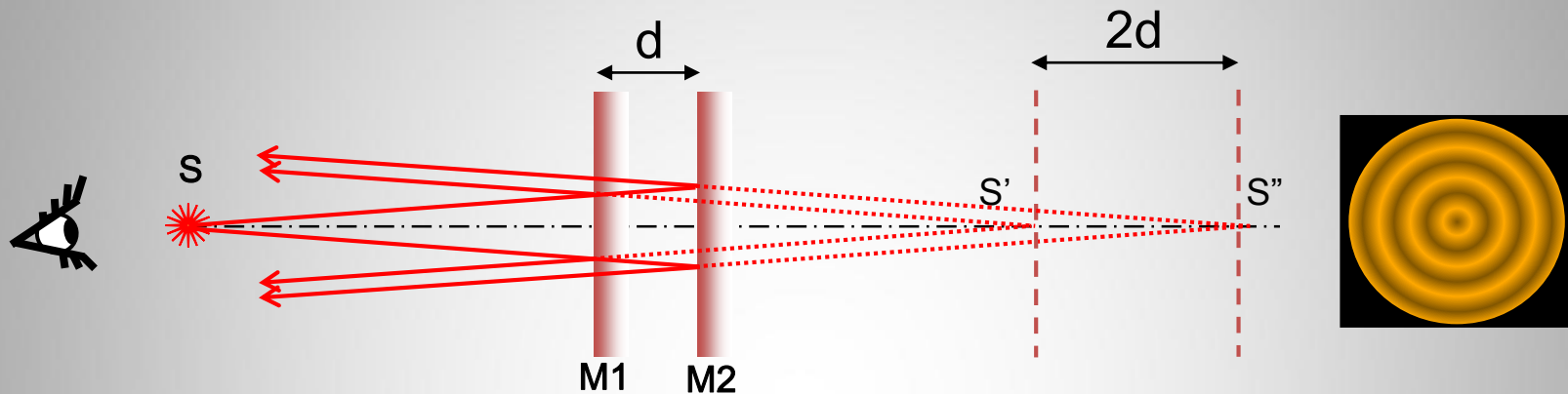
dodatkowa płytką C kompensuje przesunięcie fazy wiązki przechodzącej dwukrotnie przez lustro

Z perspektywy obserwatora układ równoważny 2 równoległym zwierciadłom:



Obserwator widzi 2 pozorne źródła S' i S'' , odległe o $2d$

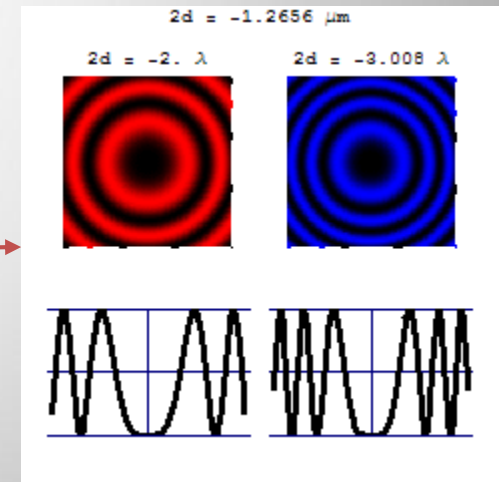
Gdy lustra dokładnie ||,
 z symetrii osiowej i rozbieżności wiązki $\Rightarrow$ pierścienie interferencyjne
 $\rightarrow$ **prążki jednakowego nachylenia** (zależne od kąta)



$$I = 2I_0(1 + \cos \delta) \quad \delta = 2\pi \frac{2(l_1 - l_2)}{\lambda}$$

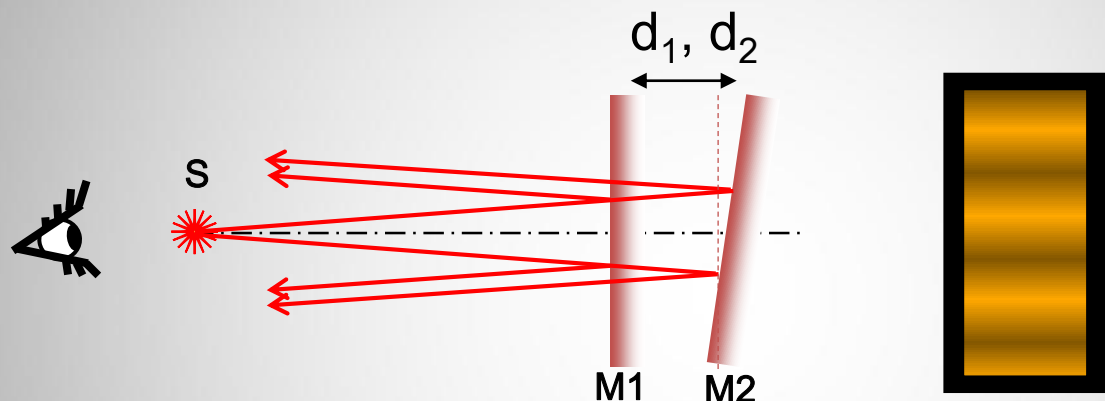
zależność od dł. fali:

($\lambda_1 = 632.8 \text{ nm}$, $\lambda_2 = 420 \text{ nm}$)

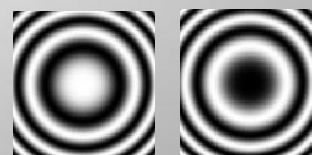
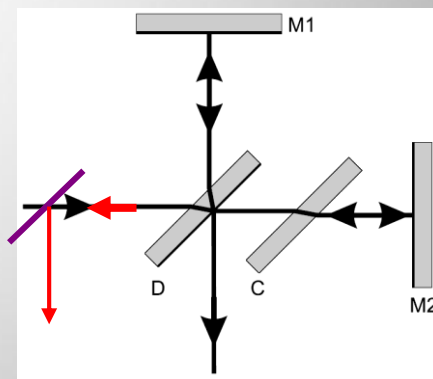


Gdy lustra nieco pochylone,
z symetrii osiowej i rozbieżności wiązki $\Rightarrow$ równoległe prążki

$\rightarrow$ prążki jednakowej grubości (zależne od lokalnej odl. luster)



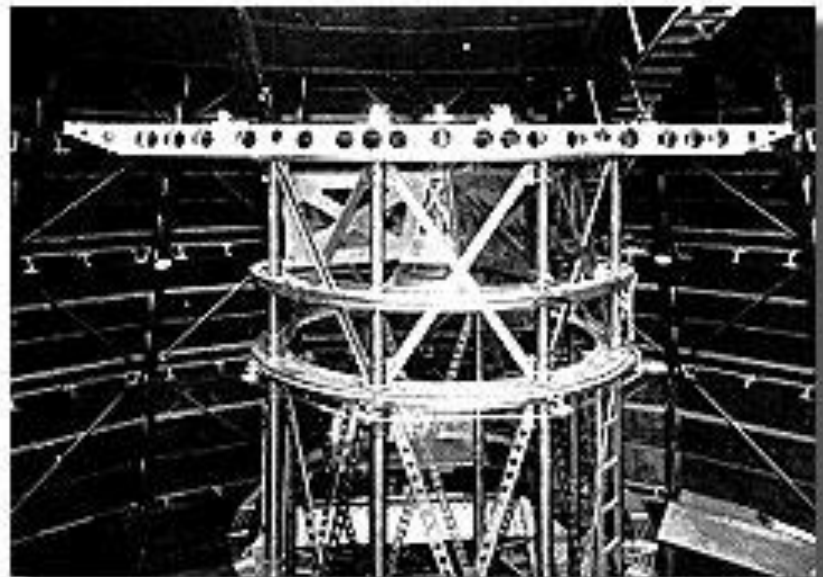
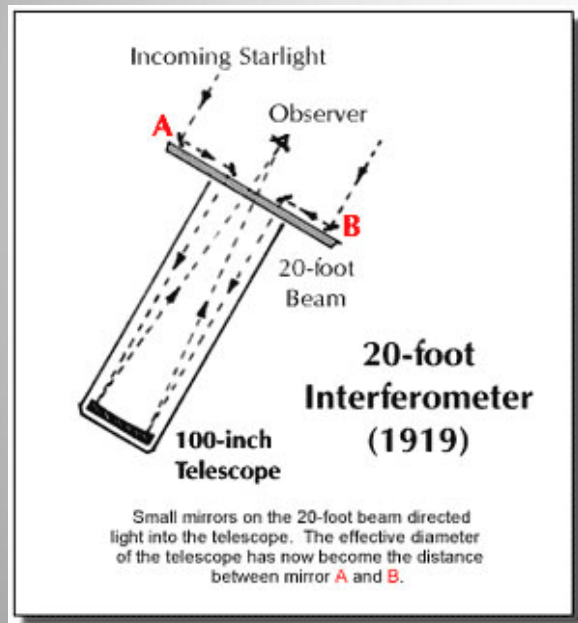
Uzupełniają się obrazy
interferencyjne w obu kanałach
interferometru



Zastosowania

bardzo wiele – pomiary interferometryczne „bezdotykowe”
(odległości, przemieszczenia, zmiany w czasie, ...)

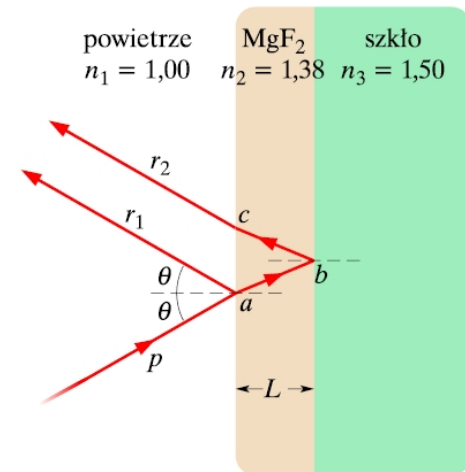
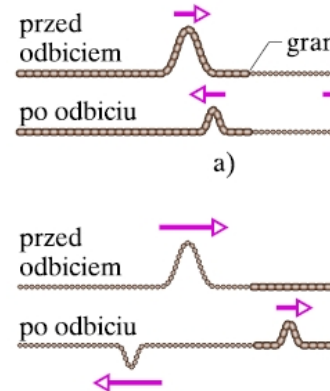
Np. **interferometr gwiazdny Michelsona** → pomiar rozmiarów gwiazd
(wykorzystuje ograniczoną spójności przestrzenną
rozciągniętego źródła → następny wykład)



The 20-foot beam on top of the 100-inch
Hooker Telescope on Mt. Wilson in
Southern California.

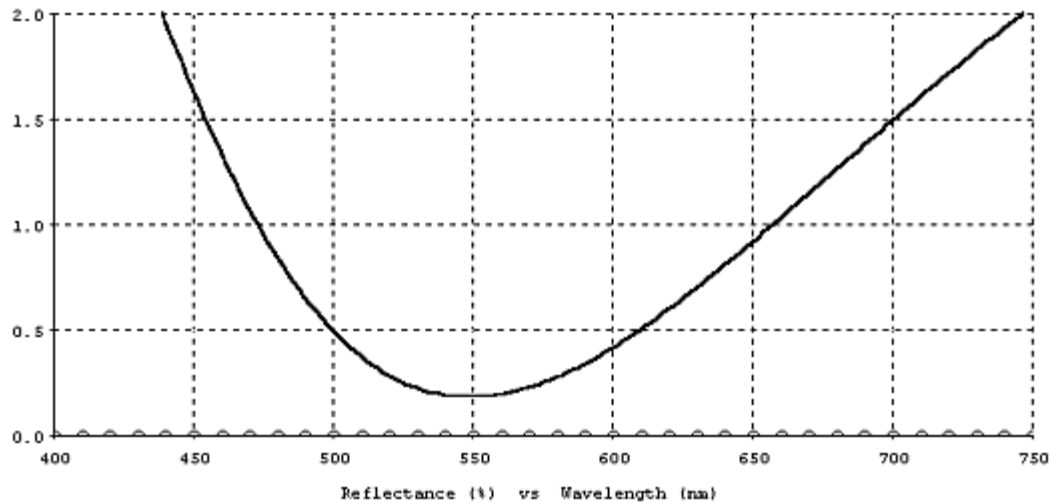
Warstwy antyrefleksyjne

- warstwy antyodblaskowe
(interferencja destruktywna
obu odbitych wiązek)



Współcz. odbicia od granicy powietrze-szkło z warstwą antyrefleksyjną
optymalizowaną dla światła widzialnego

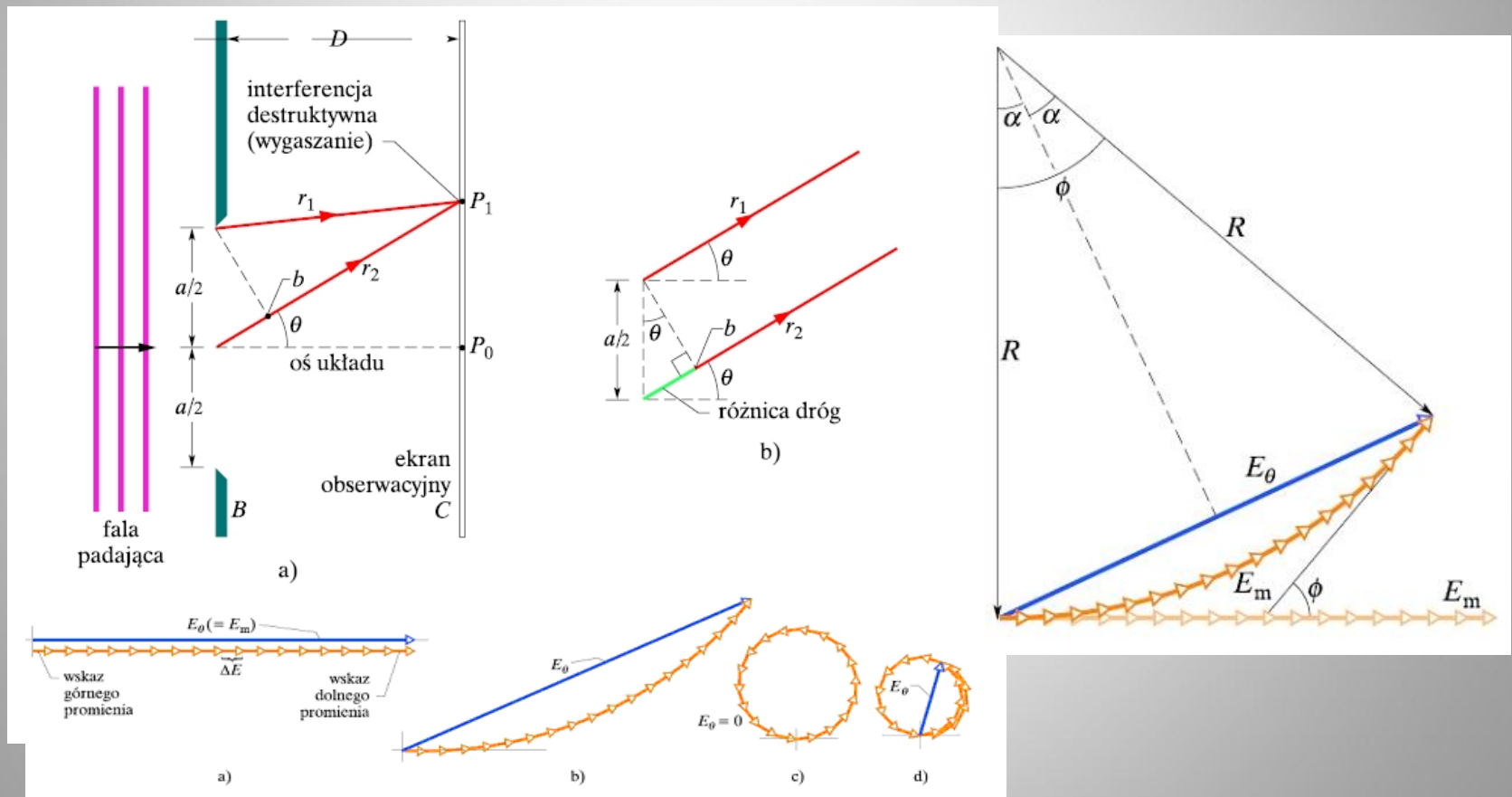
R [%]



Dyfrakcja

- Zasada Huyghensa: Każdy punkt czoła fali staje się źródłem wtórnej fali kulistej.
Amplituda fali w dow. punkcie wynika z superpozycji fal wtórnych

faza początkowa wtórnej fali identyczna z falą pierwotną
emitowane fale wtórne interferują – wpływ faz na natężenie



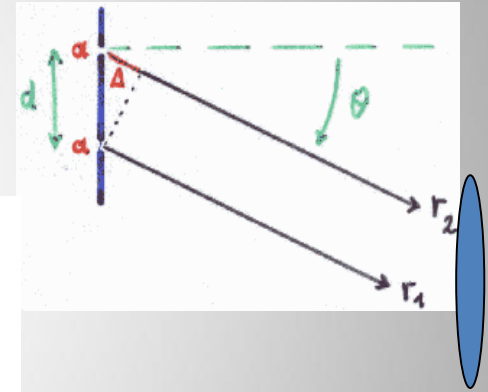
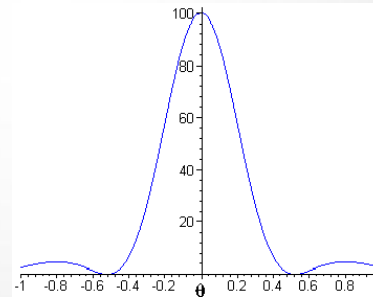
Dyfrakcja Fraunhofera i Fresnela

- **Dyfrakcja Fraunhofera**
(kryteria – fale płaskie, duże odległości – obraz w ∞)

- na szczelinie

$$I(\theta) = I_0 \frac{\sin^2\left(\frac{1}{2}ka \sin \theta\right)}{\left(\frac{1}{2}ka \sin \theta\right)^2} = I_0 \frac{\sin^2 \gamma}{\gamma^2}$$

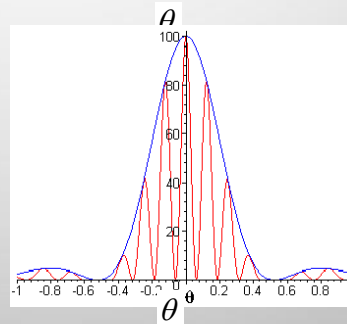
$$\gamma \equiv \frac{1}{2}ka \sin \theta$$



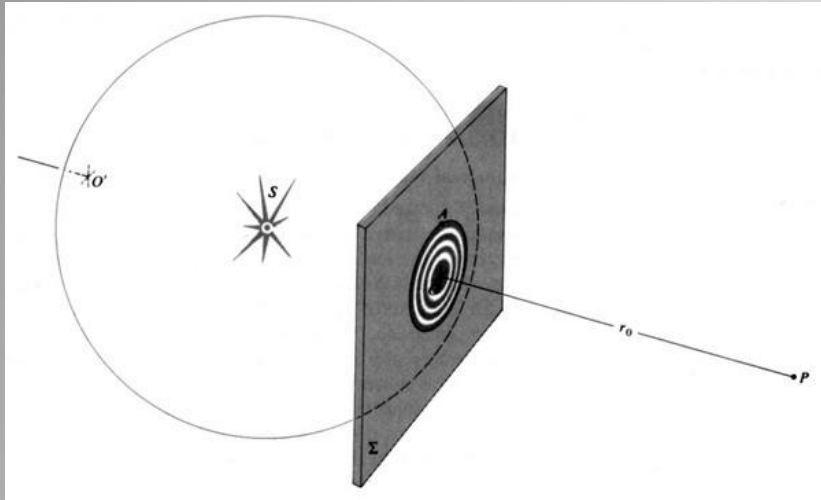
- na 2 szczelinach

$$I(\theta) = 4I_0 \cos^2 \delta \frac{\sin^2 \gamma}{\gamma^2}$$

$$\delta \equiv \frac{1}{2}kd \sin \theta$$



Dyfrakcja na otworze kołowym



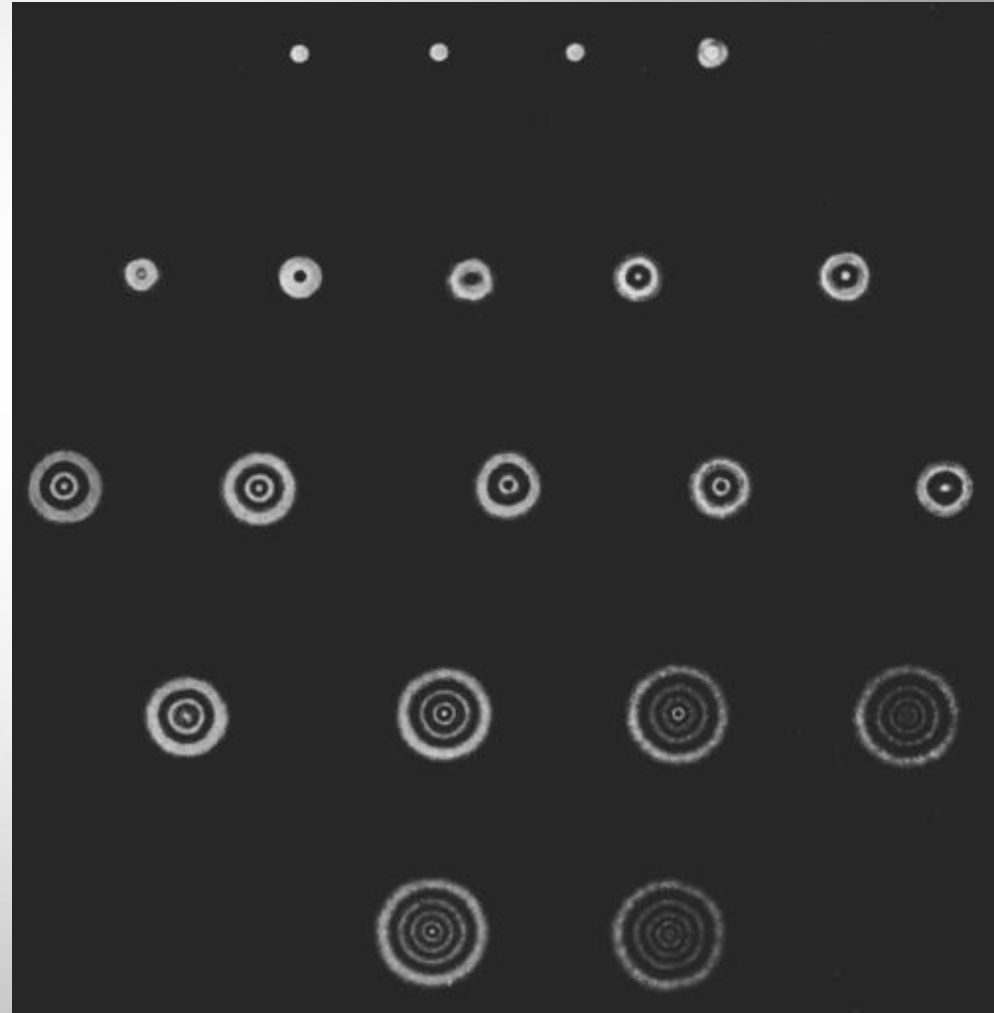
Oscylacje natężenia w zależności od wielkości otworu:

-przepuszczona parzysta I. stref

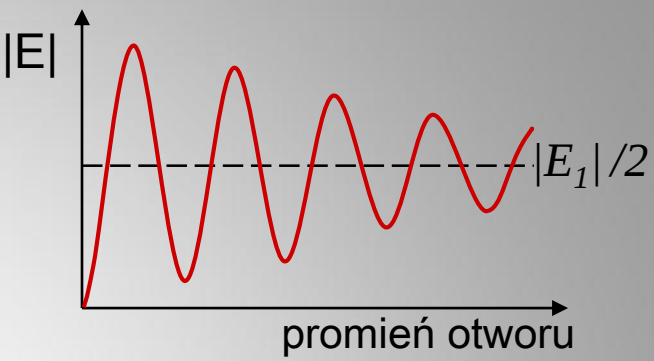
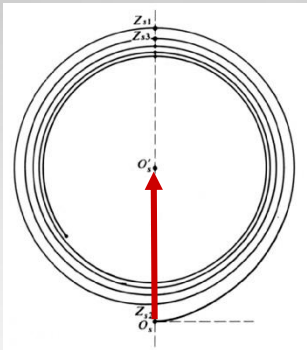
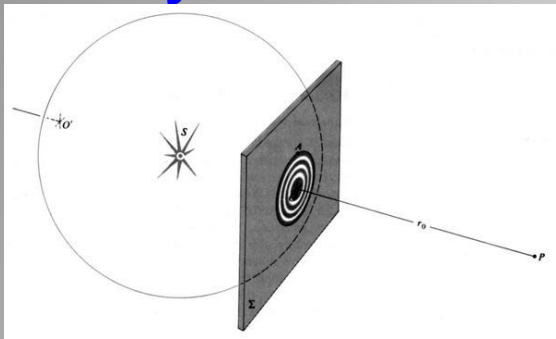
$$\begin{array}{cccc} \uparrow & \downarrow & \uparrow & \downarrow \\ \hline 0 & 0 & 0 & 0 \end{array} \approx 0$$

-przepuszczona nieparzysta I. stref

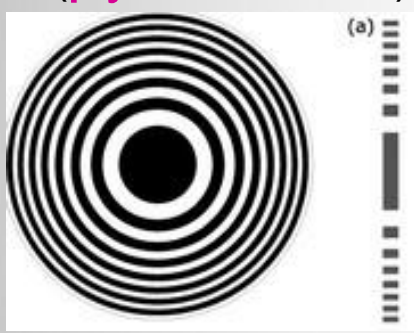
$$\begin{array}{cccc} \uparrow & \uparrow & \downarrow & \downarrow \\ \hline 0 & 0 & 0 & 0 \end{array} \approx E_1$$



Otwory kołowe – c.d.

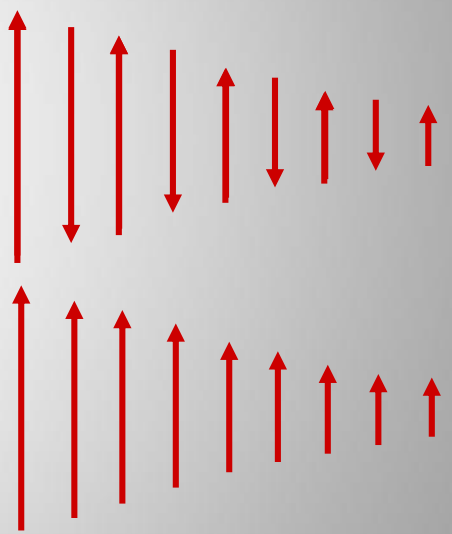


Płytką strefowa (płytką Fresnela) zasłonięte parzyste strefy

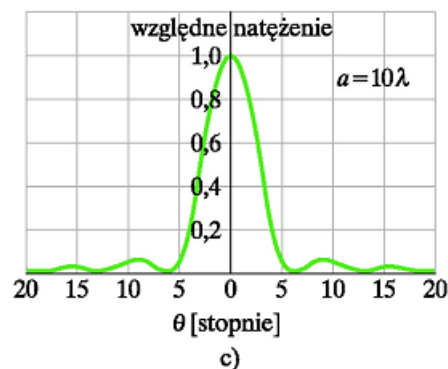
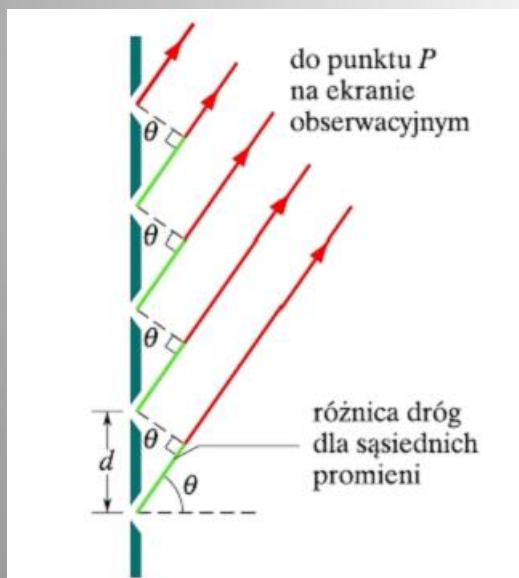
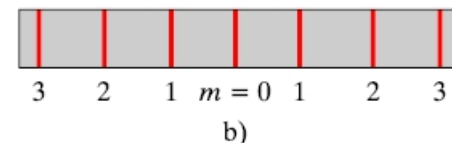
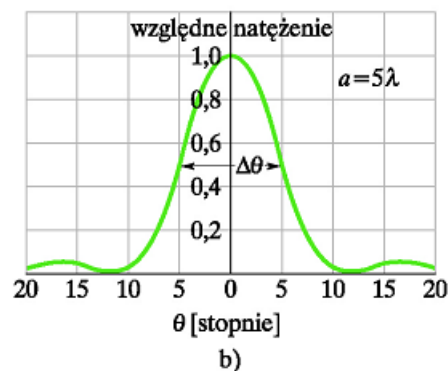
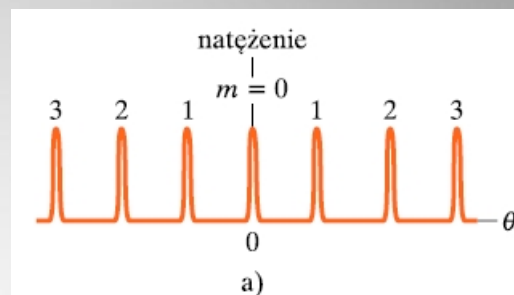
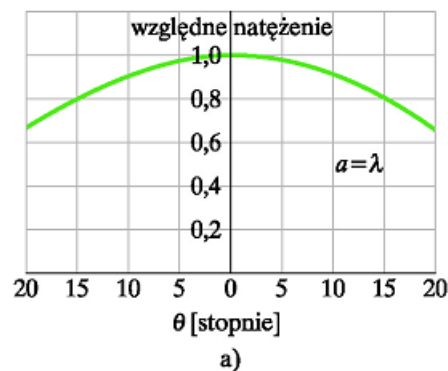
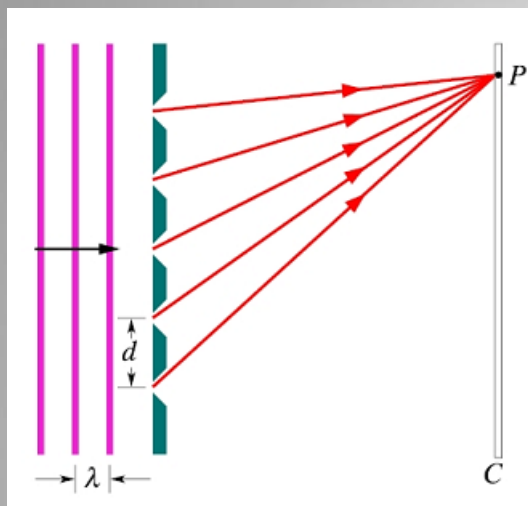


odwrócona faza parzystych stref - płytką fazowa →

Soczewki Fresnela



Siatki dyfrakcyjne

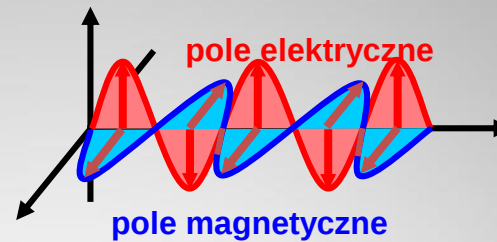


$$d \sin \theta = n\lambda$$

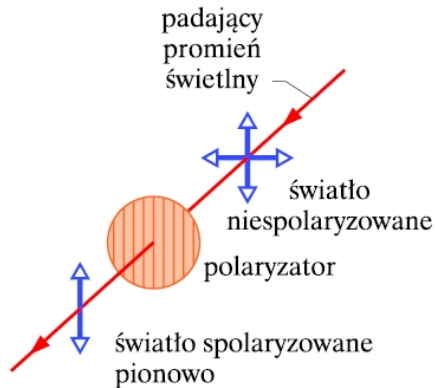
Siatki dyfrakcyjne umożliwiają uzyskanie bardziej równomiernego rozkładu natężenia światła na poszczególne rzędy dyfrakcji

Polaryzacja światła - przypomnienie

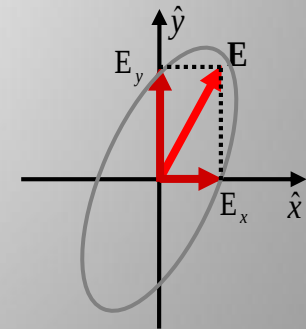
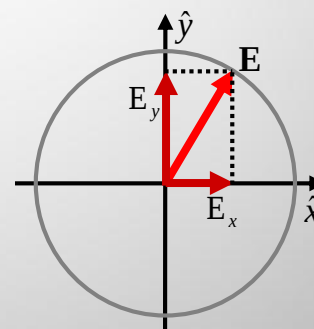
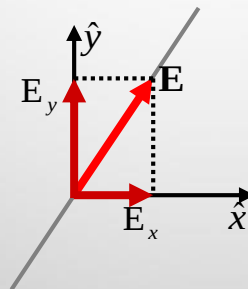
- $\mathbf{E}, \mathbf{B} \perp \mathbf{k} \longrightarrow$ fale poprzeczne



$$\mathbf{E}(z, t) = \hat{\mathbf{x}} E_x \cos(\varphi_x + \omega t - kz) + \hat{\mathbf{y}} E_y \cos(\varphi_y + \omega t - kz)$$



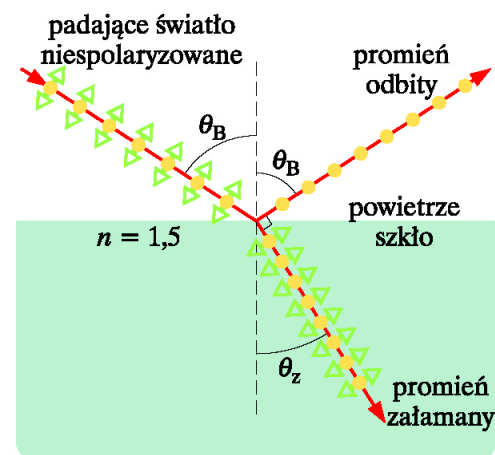
Rys. 34.12. Światło niespolaryzowane przepuszczone przez polaryzator (np. polaroid) zostaje spolaryzowane. Kierunek jego polaryzacji jest wówczas równoległy do kierunku polaryzacji polaryzatora (ten kierunek polaryzacji wskazują linie pionowe na polaryzatorze)



Sposoby polaryzowania światła

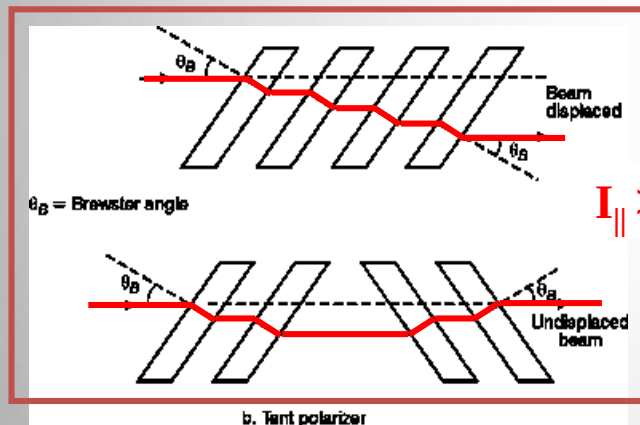
1. Polaryzacja przez odbicie

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



- składowa prostopadła do powierzchni kartki
- ◄► składowa równoległa do powierzchni kartki

2. Polaryzacja przez załamanie



$$I_{\parallel} \gg I_{\perp}$$

$$P = \frac{I_{\parallel} - I_{\perp}}{I_{\parallel} + I_{\perp}}$$

P = 67 %	10 płytek szklanych
80 %	20 płytek szkl.
90 %	45 płytek szkl.

...

3. Polaryzacja przez rozpraszanie →

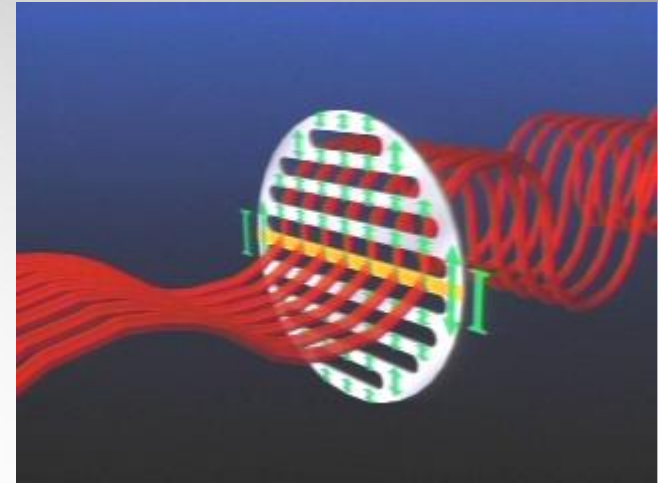
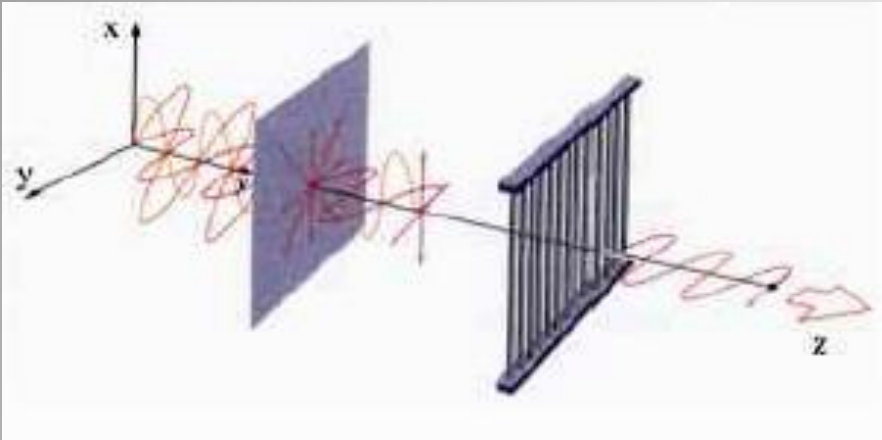
4. Anizotropia optyczna ciał – **dichroizm** (selektywna absorpcja) →

5. Anizotropia optyczna ciał – **dwójłomność** →

6. Oddziaływanie z zewn. polami - **efekt Zeemana** →

4. Dichroizm – selektywna absorpcja

dla mikrofal ($\lambda \approx 3 \text{ cm}$) – siatka z drutów:



dla światła ($\lambda \approx 0,5 \mu\text{m}$) – siatka z długich łańcuchów molekuł – polimerów:

np. folia polaryzacyjna
f-my Polaroid,
tzw. *polaroid*



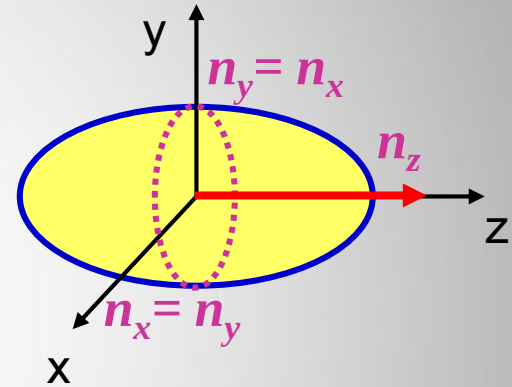
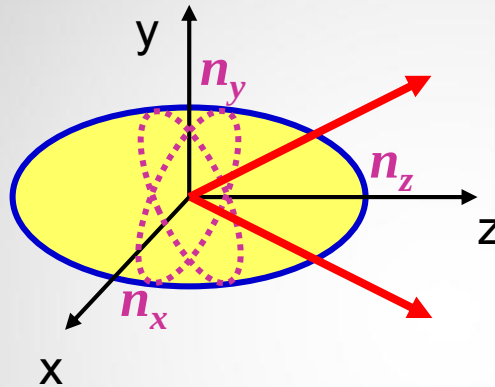
5. Dwójłomność

Anizotropia: $\vec{D} \nparallel \vec{E}$ $D_i = \sum_j \varepsilon_{ij} E_j$

$\Rightarrow$ różne prędkości fazowe dla różnych orientacji $\vec{E}$

$$n = \sqrt{\varepsilon}$$

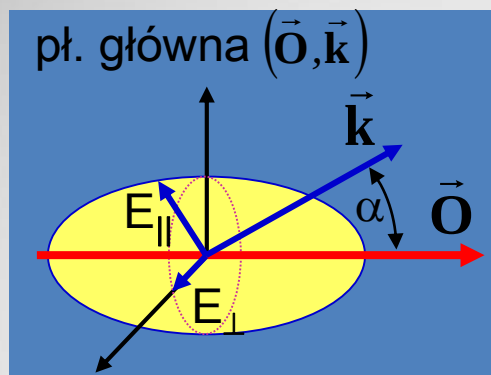
- elipsoida n



przekroje kołowe
elipsoidy

- gdy $n_x \neq n_y$, $\exists$ 2 przekroje kołowe i 2 **osie optyczne** (proste $\perp$ do tych przekrojów)
 $\rightarrow$ ośrodki dwuosiowe
- gdy $n_x = n_y$, $\exists$ 1 przekrój kołowy i 1 oś optyczna $\rightarrow$ ośrodki jednoosiowe

wiązki rozchodzące się wzdłuż osi optycznej mają v_f niezależną od polaryzacji dla innych kierunków propagacji – **dwójłomność**



promień **zwyczajny** $\vec{E}_o$; $\vec{E} \perp (\vec{O}, \vec{k})$

promień **nadzwyczajny** $\vec{E}_e$; $\vec{E} \parallel (\vec{O}, \vec{k})$

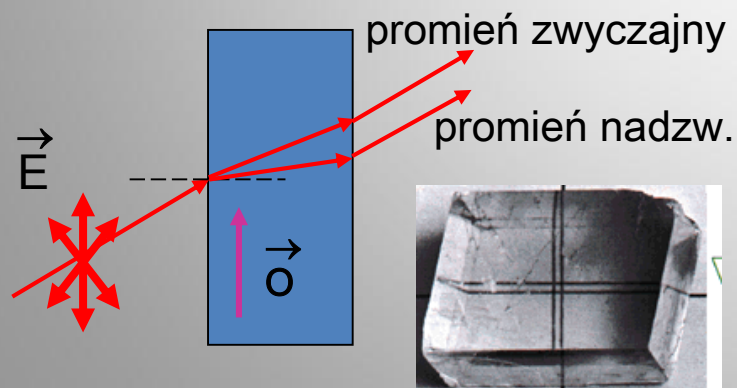
(prędkość v_f zależy od α)

propagacja w ośrodku dwójłomnym:

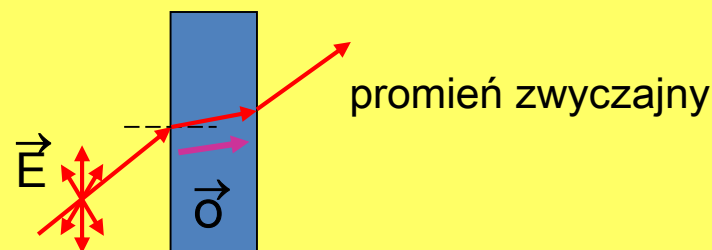
2 fale o różnych polaryzacjach rozchodzą się z różnymi prędkościami v_f

$\Rightarrow$ załamanie na granicy ośrodków (zależne od stosunku prędkości faz.)

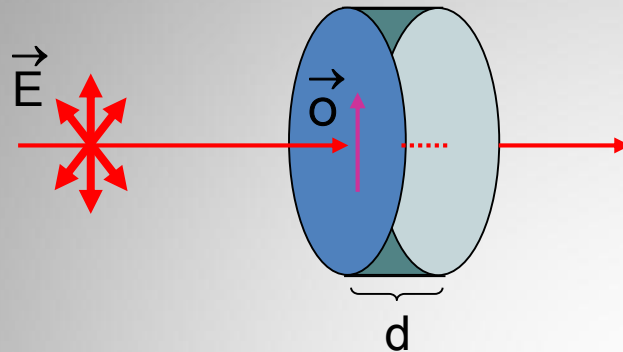
rozdzieli promień na dwa – podwójne załamanie = **dwójłomność**



Ale, gdy $\vec{k} \parallel \vec{O}$, każda składowa wiązki jest promieniem zwyczajnym, bo $\vec{E} \perp (\vec{O}, \vec{k})$

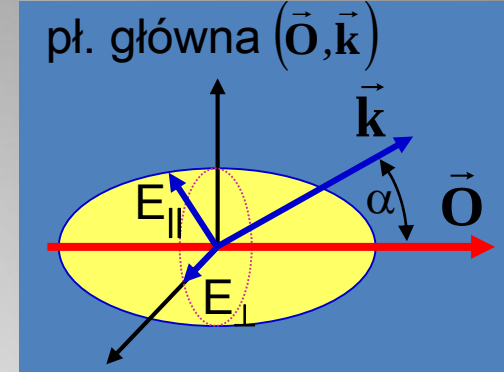


płytką fazową $\vec{k} \perp \vec{O}$



$$\vec{E} \parallel \vec{O} \quad \exists \text{ tylko } E_e$$

$$\vec{E} \perp \vec{O} \quad \exists \text{ tylko } E_o$$



- gdy kąt padania = 0 – nie ma załamania, promień zwyczaj. i nadzw. propagują w tym samym kierunku – nie ma ich przestrzennej separacji

- gdy $\angle(\vec{E}, \vec{O}) = 45^\circ$, $\exists E_e = E_o$
ale E_e i E_o propagują z różnymi prędkościami fazowymi

$$\Rightarrow \Delta\varphi = d(n_e - n_o)(2\pi/\lambda)$$

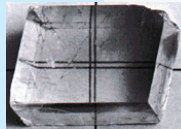
gdy $\Delta\varphi = \frac{\pi}{2}$ ćwierćfalówka – polaryzacja kołowa

gdy $\Delta\varphi = \pi$ półfalówka – polaryzacja liniowa,
ortogonalna do początkowej

Dwójłomność

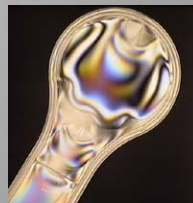
naturalna

- struktura krystaliczna
(kalcyt = *szpat islandzki*,
kwarc, ...)
- str. molekularna
(cukier, ciekłe kryształy,
polimery, ...)



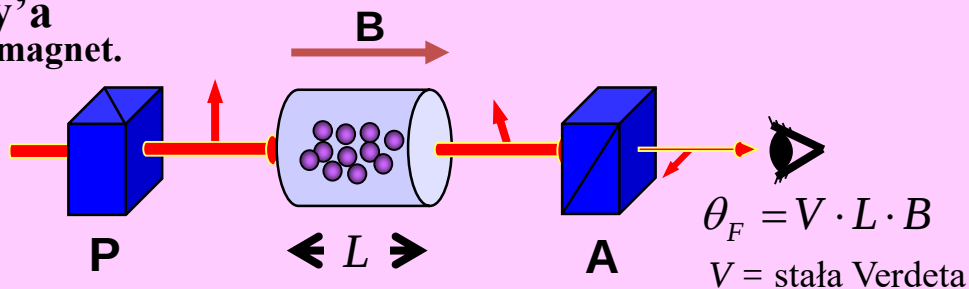
wymuszona

- mechanicznie (elastometria)
- zewn. pola:
 - elektryczne (DC, AC, laser)
 - ef. Pockelsa
 - ef. Kerra (LCD)
 - optyka nieliniowa
 - magnetyczne
 - ef. Faraday'a
 - ef. Voigta (Cottona – Moutona)

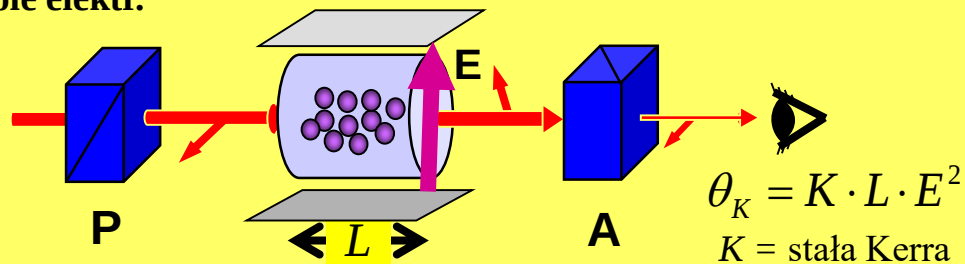


dwójłomność wymuszona przez zewn. pola

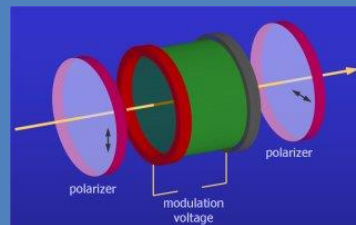
Efekt Faraday'a podłużne pole magn.



Efekt Kerra poprzeczne pole elektr.



Efekt Pockelsa podłużne pole elektr.



$$\theta_P = P \cdot L \cdot E$$