



**Proszę o uwagę**

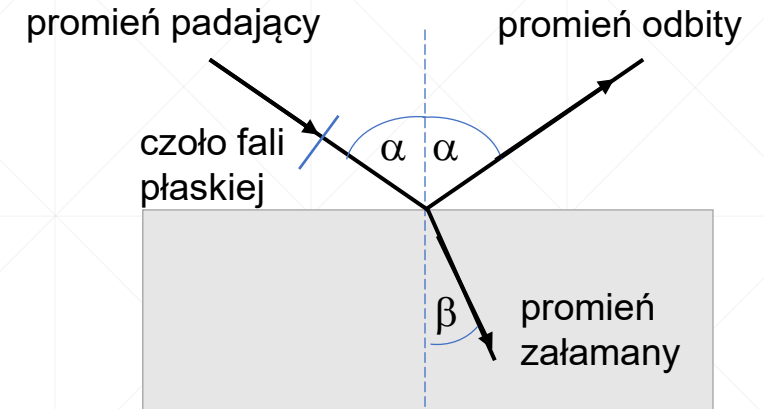
# 25. Optyka geometryczna

---

- optyka geometryczna jako graniczny przypadek optyki falowej,
  - zasada najmniejszego działania,
  - prawo odbicia i załamania światła,
  - elementy optyczne:
    - soczewki,
    - zwierciadła,
    - pryzmat,
    - mikroskop,
  - dyspersja światła.
29. Jakie są główne założenia optyki geometrycznej oraz rola zasady Fermata.
  30. Sformułuj prawo odbicia i załamania i jak z nimi wiąże się pojęcie całkowitego wewnętrznego odbicia.
  31. Rodzaje zwierciadeł oraz typy obrazów w nich powstających – od czego zależą.
  32. Jakie znasz rodzaje soczewek, wzór na tzw. soczewkę cienką oraz główne wady odwzorowania soczewek.
  33. Miraż a dyspersja światła ich praktyczne aspekty.
  34. Wymień co najmniej trzy proste przyrządy optyczne i omów jeden z nich.



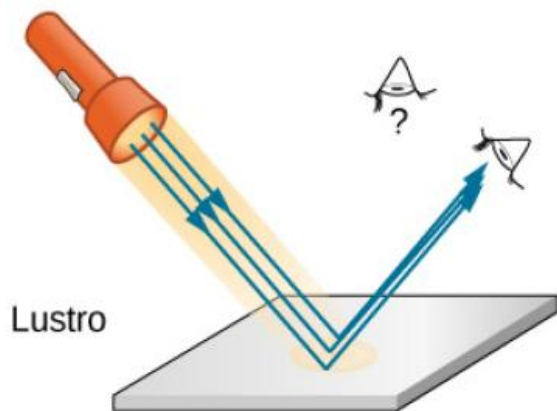
# Założenia optyki geometrycznej



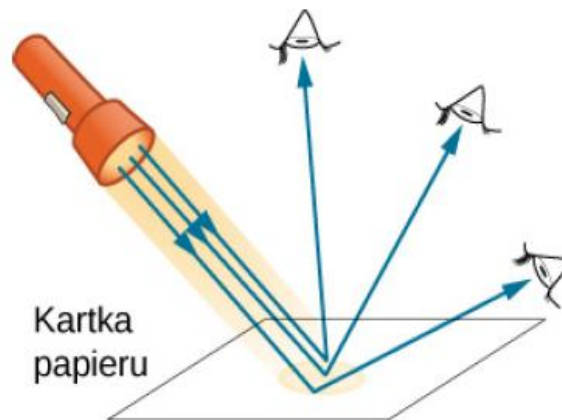
- długości fal świetlnych są małe w porównaniu z rozmiarami przyrządów optycznych ( $\lambda \ll f$ )
- energia rozchodzi się wzdłuż linii prostych zwanych promieniami świetlnymi
- promienie nie interferują ze sobą
- optyka geometryczna to matematyczny opis promieni świetlnych, uwzględniający zasady geometrii euklidesowej oraz **prawo odbicia i załamania**
- optyka geometryczna jest szczególnym (granicznym) przypadkiem optyki falowej
- **zasada Fermata** – światło przebiega między dwoma punktami po drodze do której przejścia potrzebny jest czas ekstremalny (minimalny)

# Przykłady zastosowania optyki geometrycznej

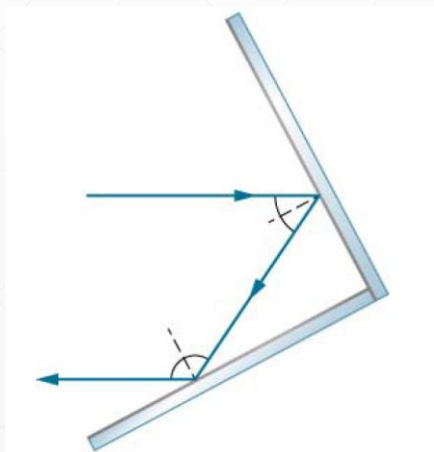
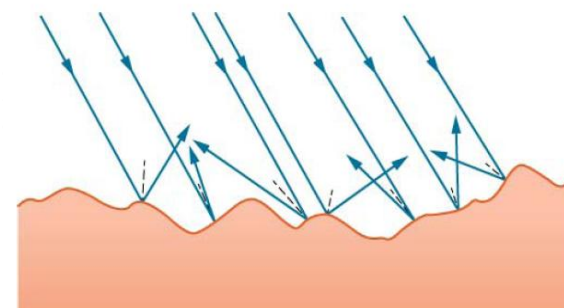
Światło odbija się od gładkiej powierzchni pod jednym kątem



Światło odbija się od chropowatej powierzchni pod wieloma kątami



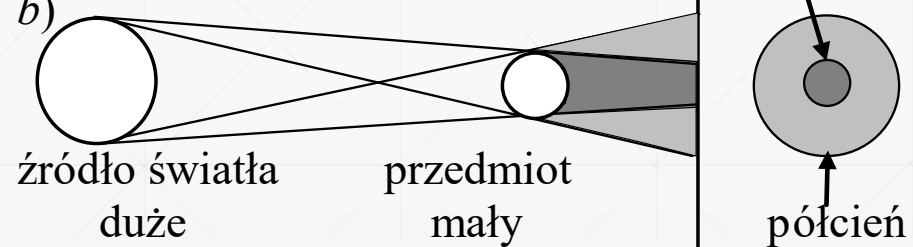
Rozpraszanie światła od chropowatej powierzchni



a)



b)



# Zasada Fermata

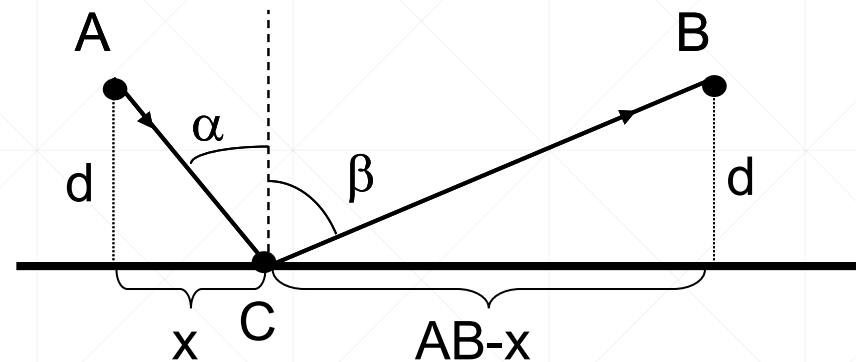
Wyprowadzimy prawo odbicia z zasady Fermata

Promień świetlny **AC** padający pod kątem  $\alpha$  odbija się od płaszczyzny pod kątem  $\beta$ . Obliczmy czas  $t$  potrzebny na przebycie drogi **ACB**

$$t = \frac{ACB}{c/n} = \left( \sqrt{d^2 + x^2} + \sqrt{d^2 + (AB - x)^2} \right) \frac{n}{c}$$

$$\frac{dt}{dx} = \left( \frac{2x}{2\sqrt{d^2 + x^2}} + \frac{-2(AB - x)}{2\sqrt{d^2 + (AB - x)^2}} \right) \frac{n}{c} = 0$$

$$x = \frac{1}{2} AB \Rightarrow \alpha = \beta$$



lub

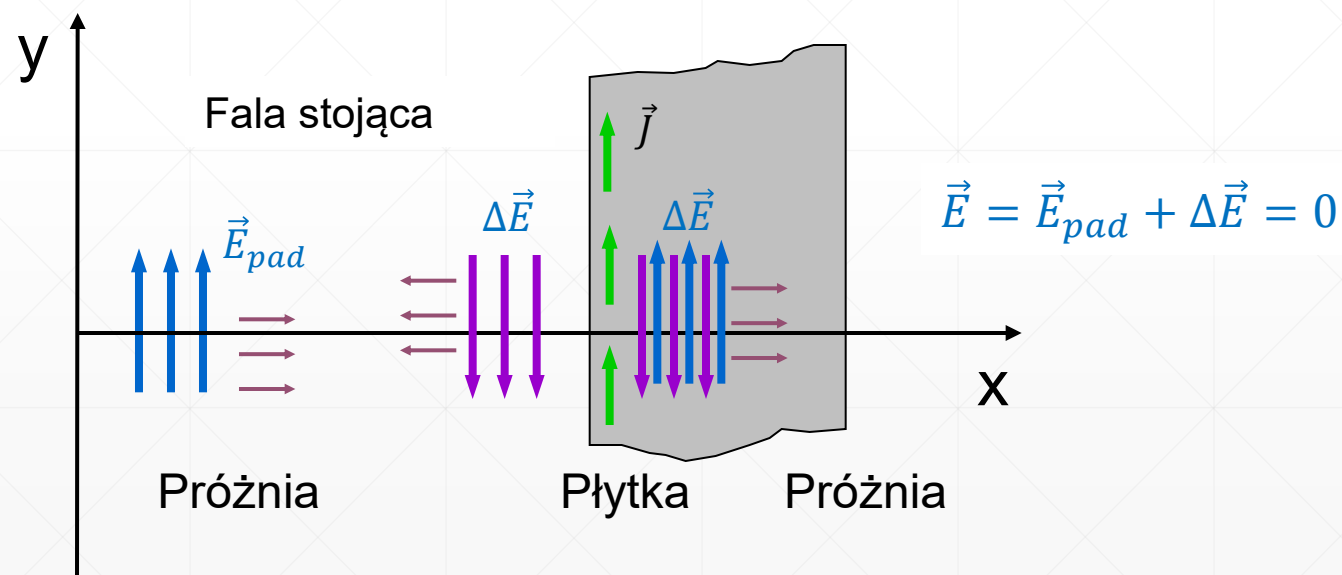
$$(\sin\alpha - \sin\beta) \frac{n}{c} = 0$$
$$\alpha = \beta$$

Promień porusza się najszybciej między punktami A i B odbijając się od płaszczyzny, gdy **kąt padania jest równy kątowi odbicia**

# Dlaczego światło się odbija?

Na płytkę z idealnego przewodnika (np. nadprzewodnika) pada fala elektromagnetyczna. Indukowany prąd powierzchniowy daje pole promieniowania równe natężeniu fali padającej (bo nie ma strat).

$$\Delta E = -E_{pad}$$



Fala odbita interferuje z padającą dając falę stojącą. Za płytką indukowane pole znosi się z polem fali padającej.

# Prawo odbicia

- padające promieniowanie indukuje w przewodniku prąd powierzchniowy  $J$
- promieniowane przez prąd pole na prawo powinno kompensować  $E_{\text{pad}}$

$$E'_R = -E_{\text{pad}} \quad \theta'_R = \theta_{\text{pad}}$$

- warunki symetrii wymagają

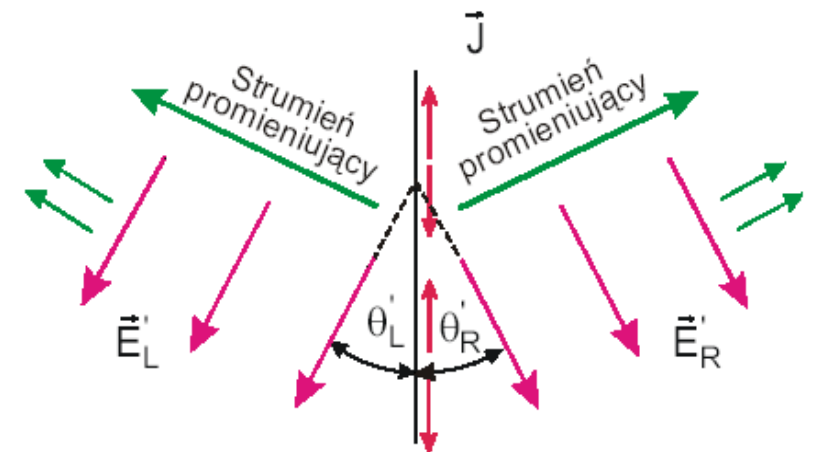
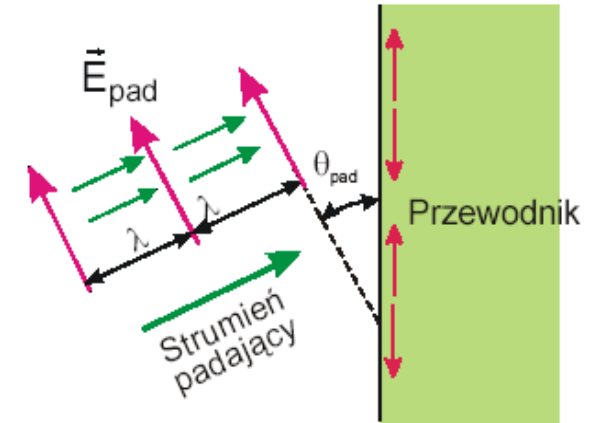
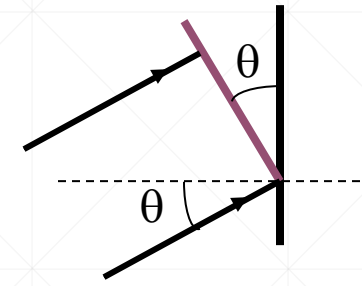
$$E'_L = E'_R \quad \theta'_L = \theta'_R$$

- czyli kąt odbicia jest równy kątowi padania

$$\theta'_L = \theta_{\text{pad}}$$

- kąty padania i odbicia definiuje się jako kąt pomiędzy promieniem świetlnym a normalną do powierzchni odbijającej – równy kątowi pomiędzy czołem fali a powierzchnią odbijającą

- **Prawo odbicia mówi, że kąt padania jest równy kątowi odbicia, przy czym promień padający, promień odbity i prosta prostopadła do płaszczyzny padania leżą w tej samej płaszczyźnie**



# Zwierciadło

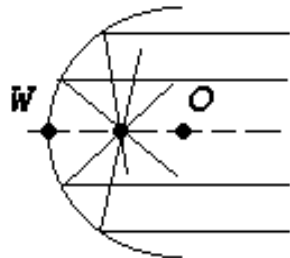
**Zwierciadło** - idealnie gładka powierzchnia odbijająca promienie świetlne

**Zwierciadła płaskie** odbijają promienie selektywnie (dwa różne promienie równoległe po odbiciu nadal są równoległe), wszystkie inne się rozpraszają

Przy odbiciach prawo odbicia jest zachowane (**kąt odbicia = kąt padania**)

W zwierciadłach płaskich otrzymujemy obraz **pozorny, prosty, tej samej wielkości** co przedmiot.

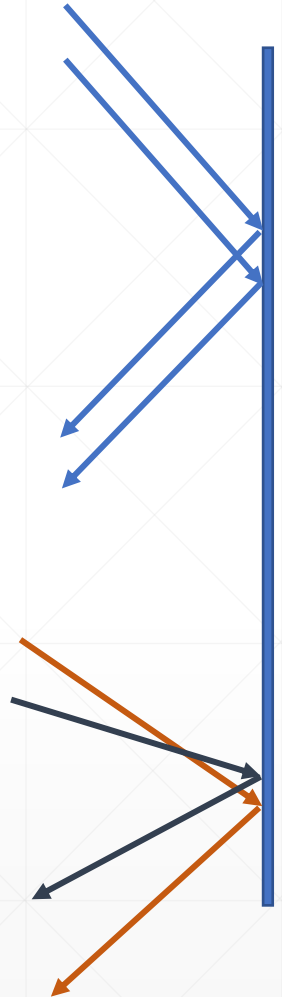
**Zwierciadła kuliste** to część wypolerowanej sfery. Jeżeli jest to część wewnętrzna, to zwierciadło nazywamy **wklęsłe**, a jak zewnętrzna - to **wypukłe**



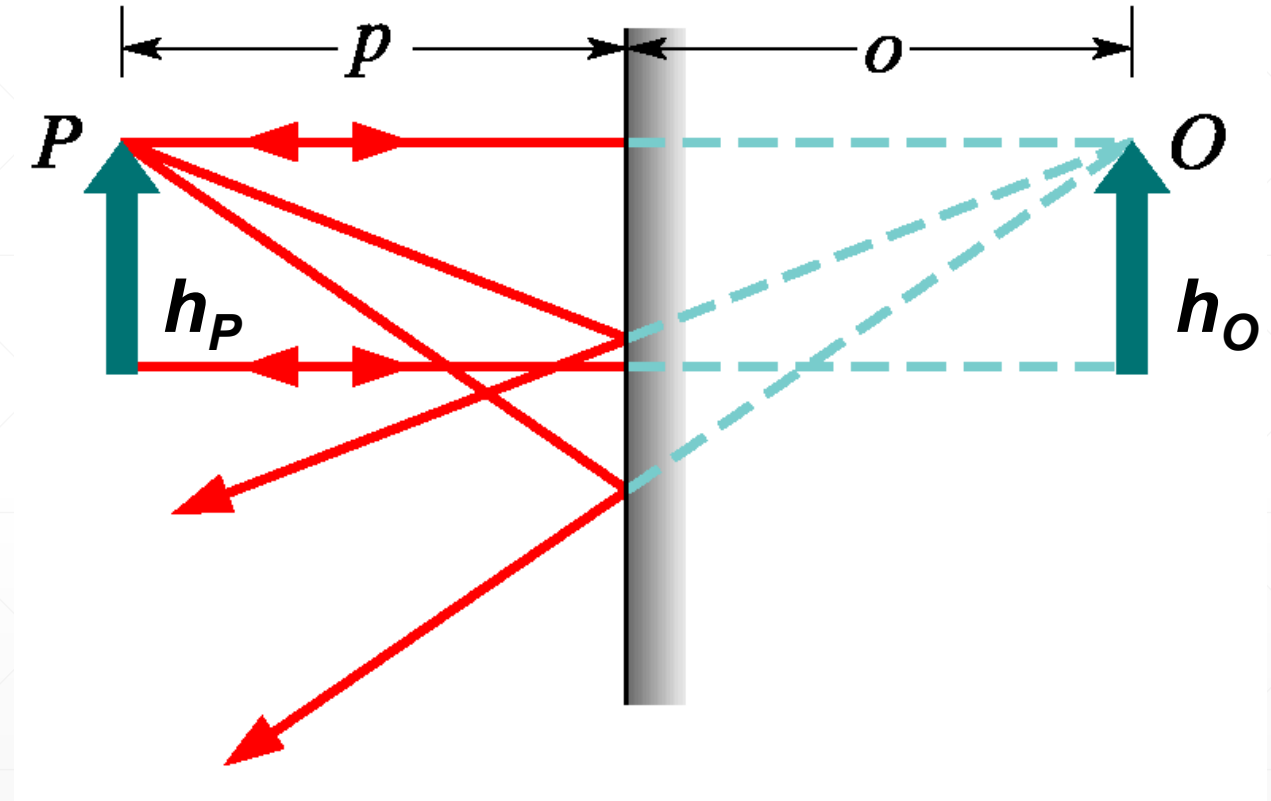
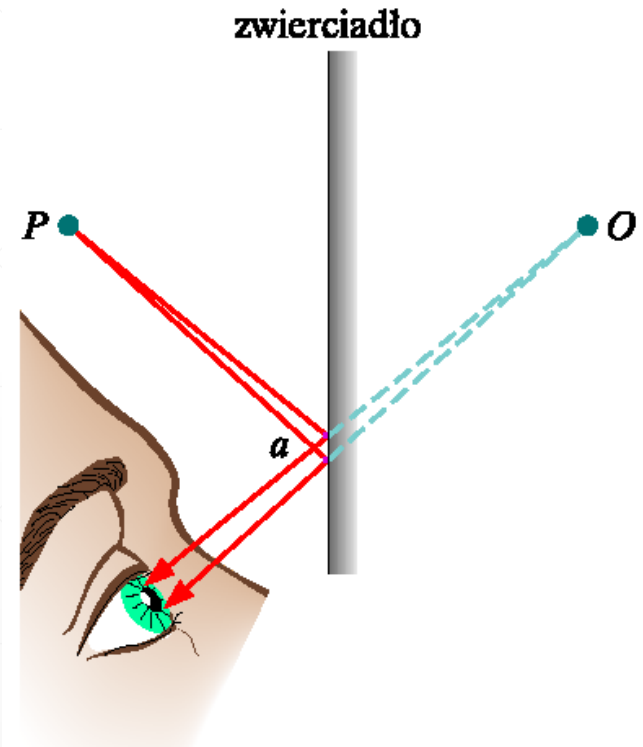
O – środek krzywizny (sfery)

W – wierzchołek

W połowie drogi pomiędzy wierzchołkiem a środkiem krzywizny znajduje się **ognisko** zwierciadła ( $F$ ). Odległość między ogniskiem a wierzchołkiem to **ogniskowa** ( $f$ )



# Obraz pozorny w zwierciadle płaskim

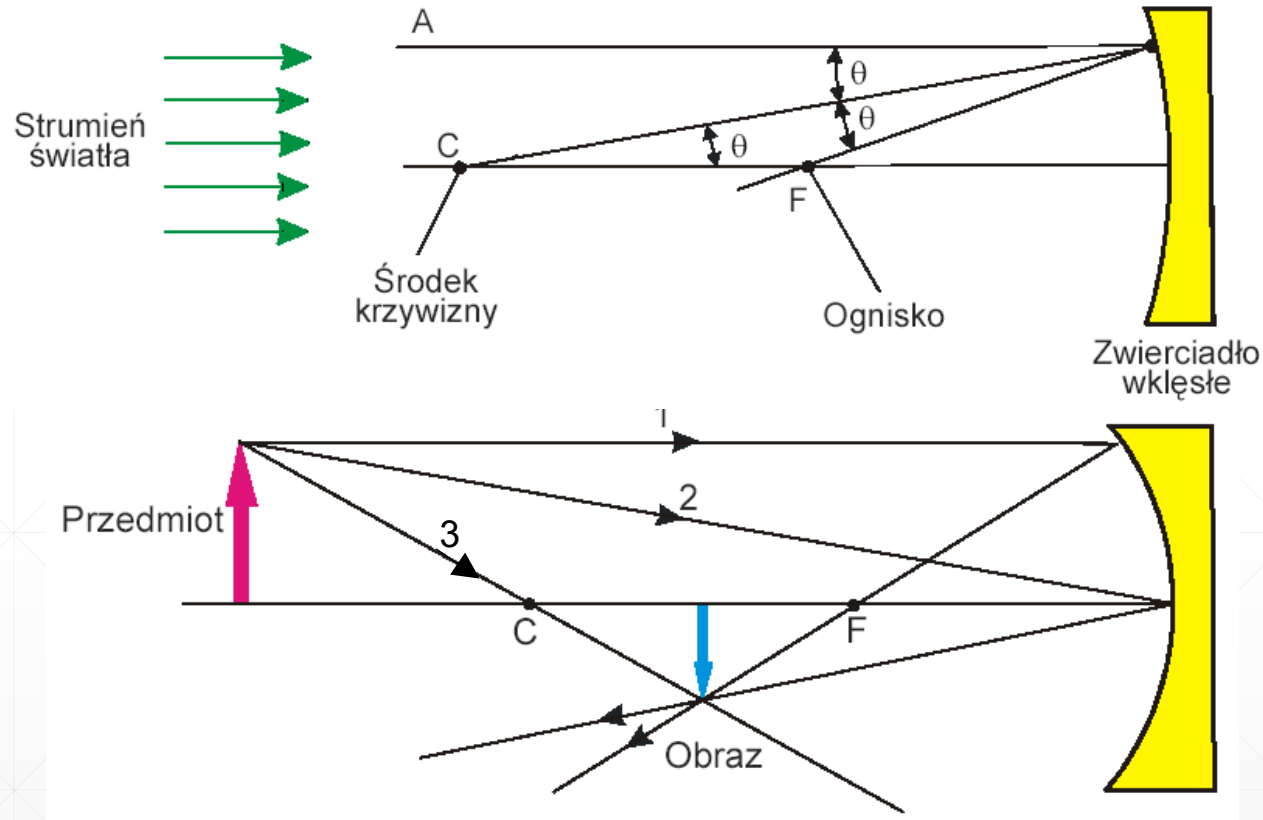


$$o = -p, \quad h_P = h_O$$

dla obrazów pozornych odległość obrazu „o” od zwierciadła jest wielkością ujemną

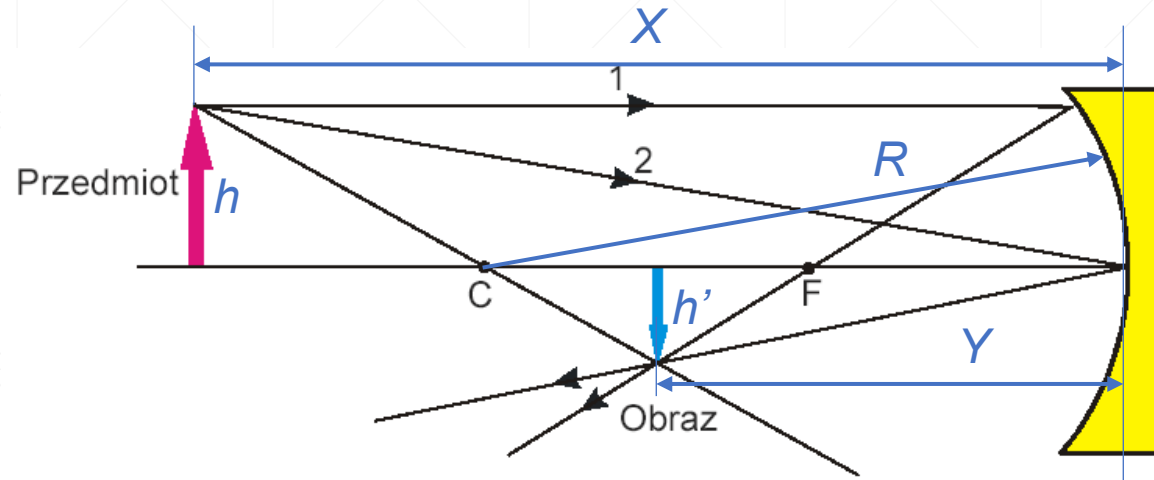
# Zwierciadło wklęsłe

ogniskowa równa połowie promienia krzywizny – z prawa załamania



- promień 1 padający równoległy do głównej osi optycznej a po odbiciu przechodzący przez ognisko zwierciadła;
- promień 2 padający na środek zwierciadła odbija się symetrycznie do głównej osi optycznej zwierciadła;
- Promień 3 przechodzący przez środek krzywizny zwierciadła odbija się wzdłuż tej samej prostej.

# Równanie zwierciadła



**Powiększenie zwierciadła** – jest to stosunek wysokości obrazu do wysokości przedmiotu

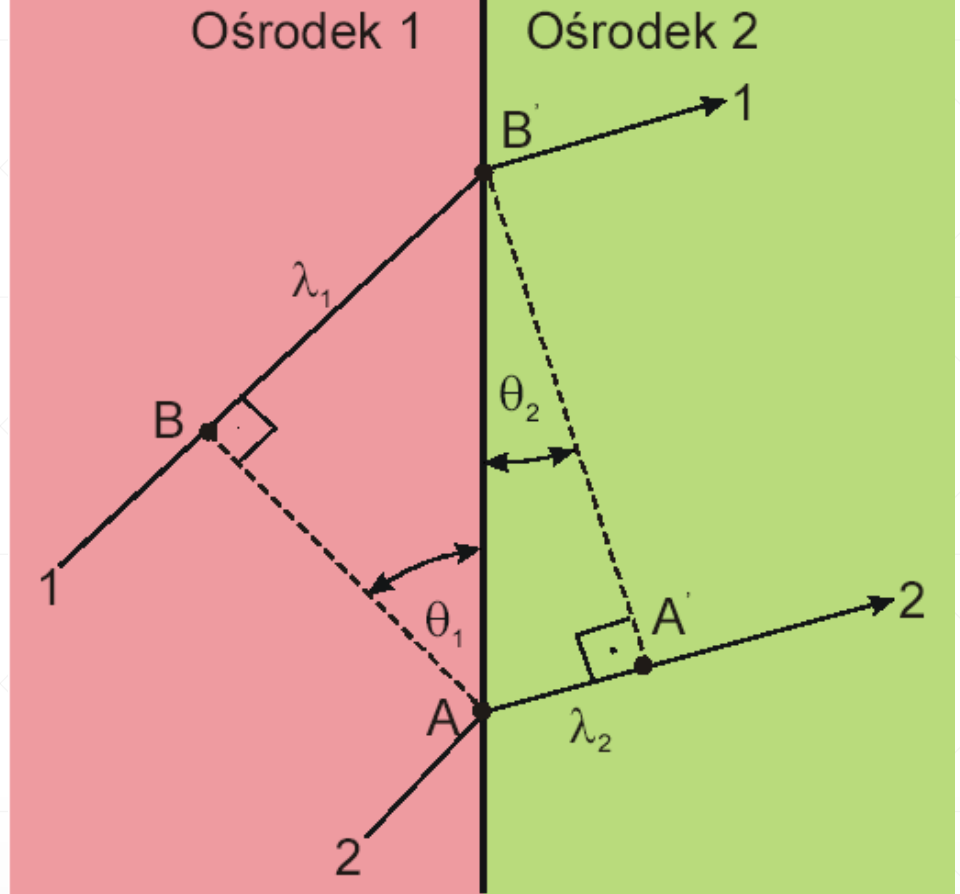
$$p = \frac{h'}{h} = \frac{Y}{X}$$

$p$  - powiększenie;  $h'$  - wysokość obrazu;  $h$  - wysokość przedmiotu;  $Y$  - odległość obrazu od wierzchołka zwierciadła;  $X$  - odległość przedmiotu od wierzchołka zwierciadła;  $R$  - promień krzywizny zwierciadła (odległość wierzchołek-środek zwierciadła  $C$ ),  $f$  - ogniskowa zwierciadła

**Równanie zwierciadła**

$$\frac{2}{R} = \frac{1}{f} = \frac{1}{X} + \frac{1}{Y}$$

# Prawo załamania



$$\frac{\sin \theta_1}{\sin \theta_2} = \frac{\lambda_1}{\lambda_2} = \frac{u_1}{u_2} = \frac{c/n_1}{c/n_2}$$

est

$$\frac{\sin \theta_1}{\sin \theta_2} = \frac{n_2}{n_1}$$

# Prawo załamania z zasady Fermata

Wyprowadzimy prawo załamania z zasady Fermata

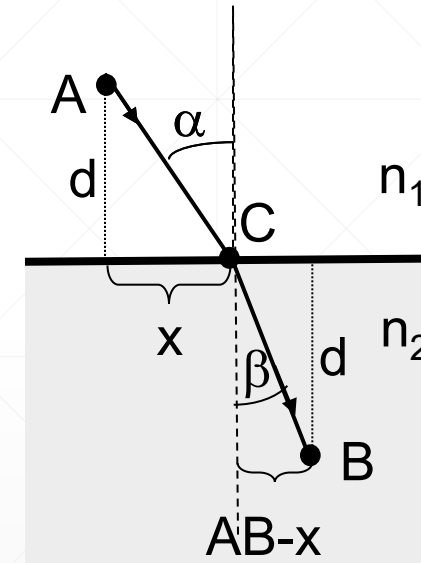
Promień świetlny AC padający pod kątem  $\alpha$  załamuje się na granicy ośrodków pod kątem  $\beta$ . Obliczmy czas  $t$  potrzebny na przebycie drogi ACB

$$t = \frac{AC}{c/n_1} + \frac{CB}{c/n_2} = \frac{n_1}{c} \sqrt{d^2 + x^2} + \frac{n_2}{c} \sqrt{d^2 + (AB - x)^2}$$

$$\frac{dt}{dx} = \frac{2x}{2\sqrt{d^2 + x^2}} \frac{n_1}{c} + \frac{-2(AB - x)}{2\sqrt{d^2 + (AB - x)^2}} \frac{n_2}{c} = 0$$

$$\frac{n_1}{c} \sin \alpha - \frac{n_2}{c} \sin \beta = 0$$

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



Promień porusza się najszybciej między punktami A i B załamując się pod kątem określonym prawem Snella.

# Elementy optyczne - soczewki

Soczewki skupiające



Dwuwypukła



Płasko-wypukła



Wklęsło-wypukła

Soczewki rozpraszające



Dwuwkłęsa

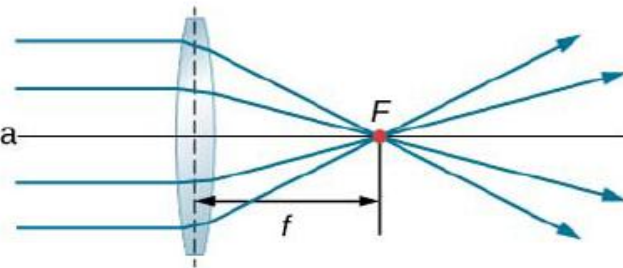


Płasko-wklęsa



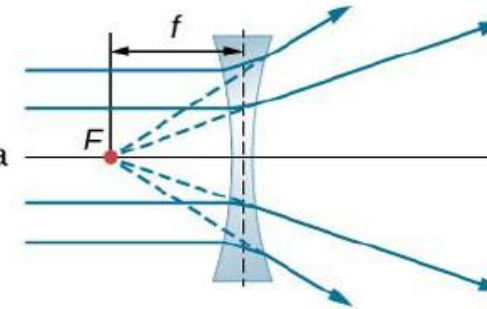
Wypukło-wklęsa

Oś optyczna



Soczewka skupiająca

Oś optyczna

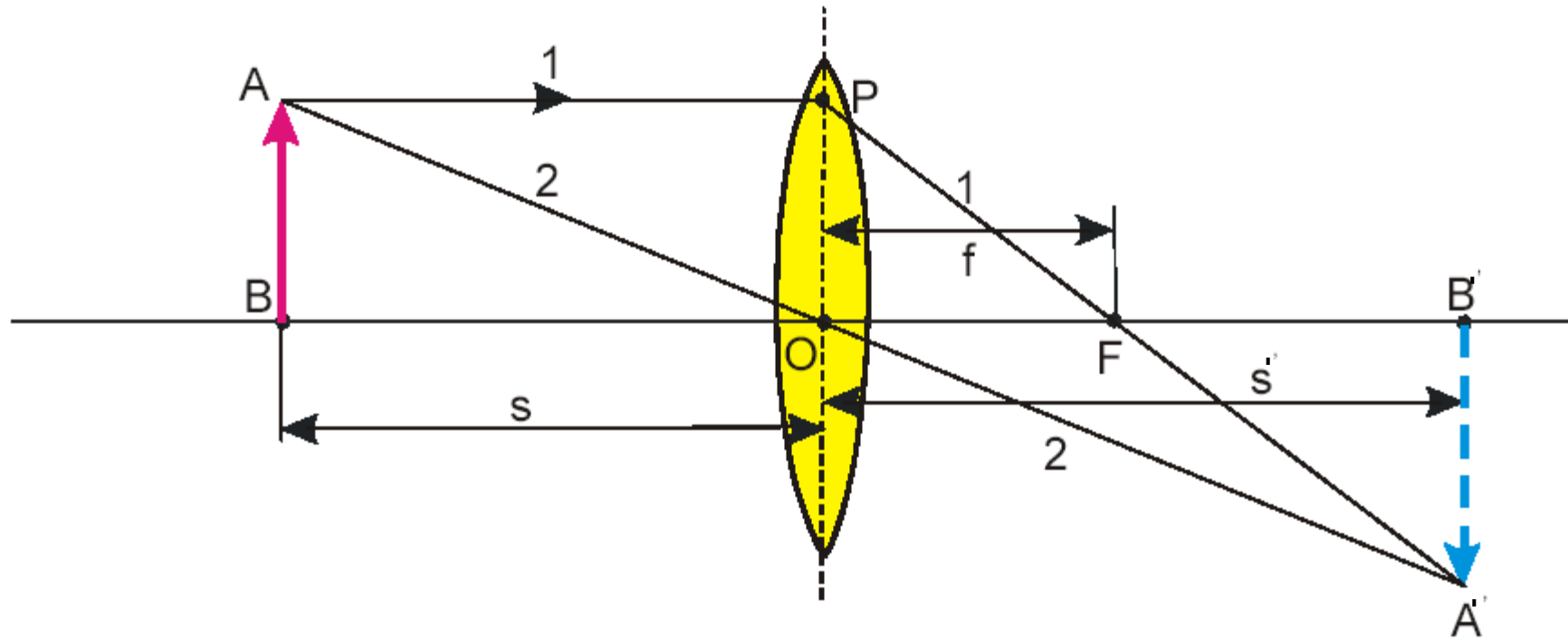


Soczewka rozpraszająca

[„Fizyka dla szkół wyższych – tom 3”, [www.openstax.pl](http://www.openstax.pl)]

Równoległe do osi optycznej promienie padające na soczewkę **skupiającą** skupiane są w ognisku  $F$ , zaś padające na soczewkę **rozpraszającą** są rozbieżne – ich przedłużenia przecinają się w punkcie będącym ogniskiem pozornym soczewki.  $f$  – to odległość ogniskowa soczewki.

# Cienkie soczewki



$$\frac{A'B'}{AB} = \frac{s'}{s}$$

$$\frac{A'B'}{PO} = \frac{s' - f}{f}$$

$$PO = AB$$

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

wzór soczewki cienkiej

obraz pozorny –  $s' < 0$

soczewka rozpraszająca –  $f < 0$

# Zdolność skupiająca soczewki

W przypadku soczewki grubej o różnych promieniach krzywizny jej ogniskowa zależy od tych promieni i współczynników załamania soczewki i otoczenia

$$\frac{1}{f} = \left( \frac{n_s}{n_o} - 1 \right) \left( \frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2} \right)$$

**Zdolność skupiająca soczewki** jest to odwrotność ogniskowej

$$D = \frac{1}{f} \quad [1/m = \text{dioptria}]$$

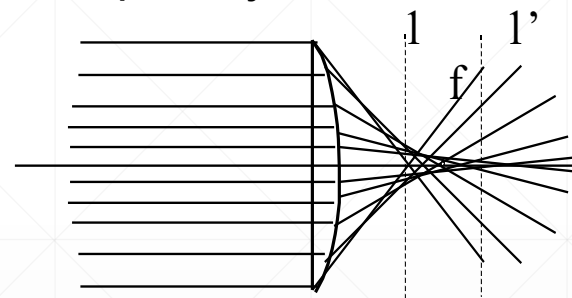
Dodatnie liczby określają soczewki skupiające, a ujemne – soczewki rozpraszające

$$D = D_1 + D_2 + \dots + D_n$$

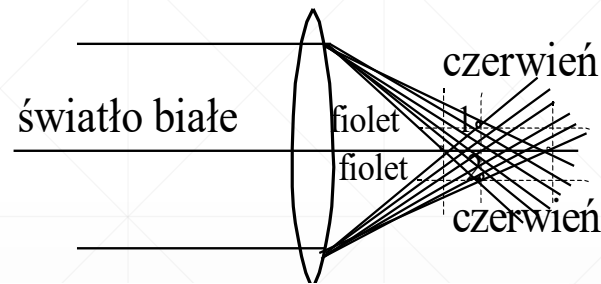
**Aberracja sferyczna** - rozmyte ognisko jest wadą dużych soczewek. Z tego powodu używa się zwykle układów soczewek. Soczewki muszą być połączone klejem o bezwzględnym współczynniku załamania soczewki. Zdolność skupiającą układu wyznacza się przez sumowanie dioptrii.

# Wady odwzorowania soczewek

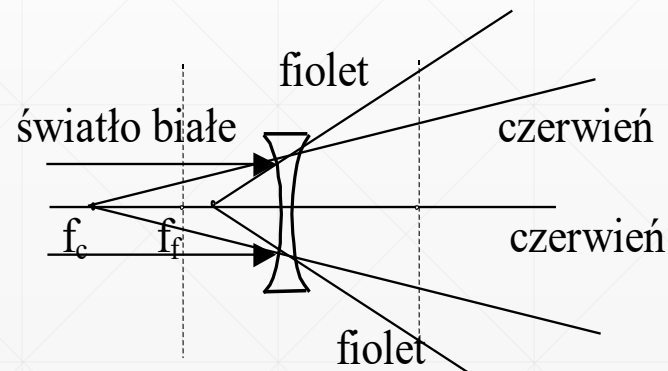
- **Aberracja sferyczna** – wiązka promieni wychodząca z jednego punktu po przejściu przez soczewkę nie schodzi się dokładnie w jednym punkcie wskutek czego obraz punktu jest rozmyty do plamki w kształcie koła.
- **Aberracja chromatyczna** – wynika z rozszczepienia światła białego przez soczewkę co również psuje ostrość obrazów.
- **Astygmatyzm** – jeśli wiązka promieni pada ukośnie na soczewkę to promienie te po przejściu przez soczewkę nie spotykają się w jednym punkcie lecz spotykają się na dwóch oddalonych od siebie, wzajemnie prostopadłych odcinkach prostej.



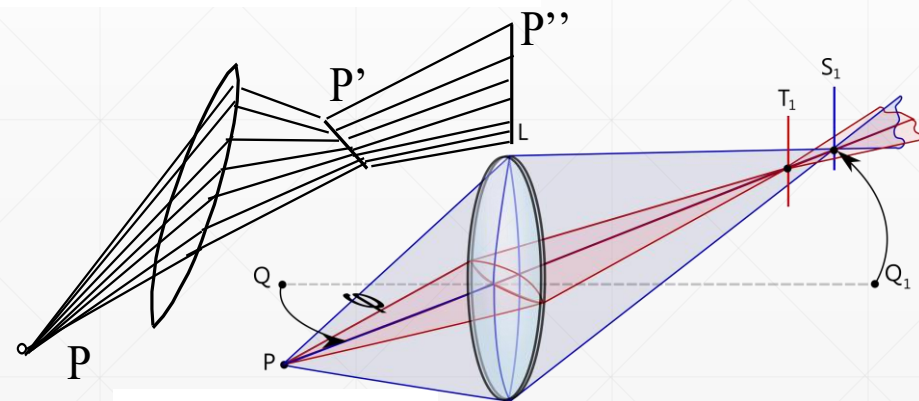
aberracja sferyczna



aberracja chromatyczna



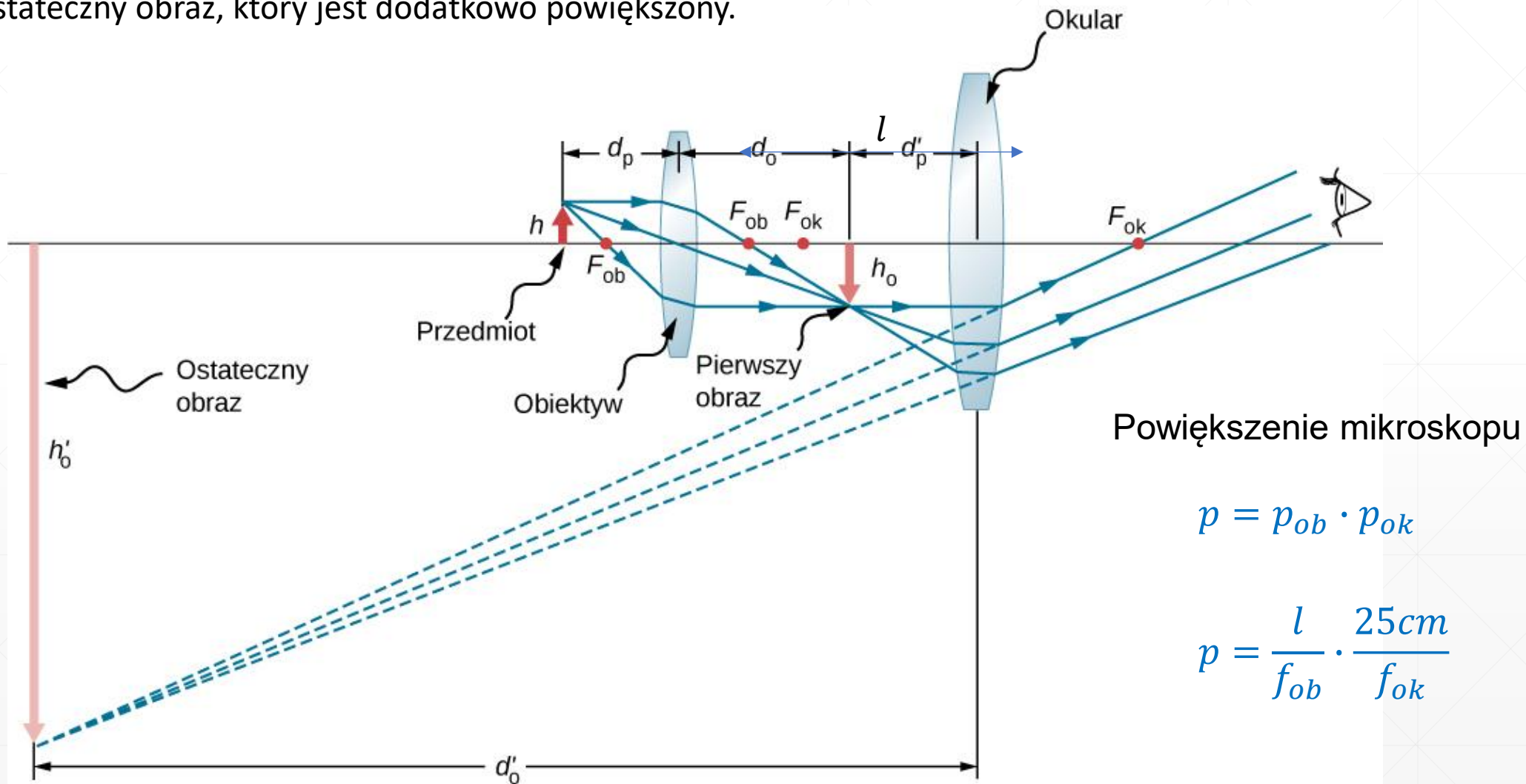
aberracja chromatyczna



astygmatyzm

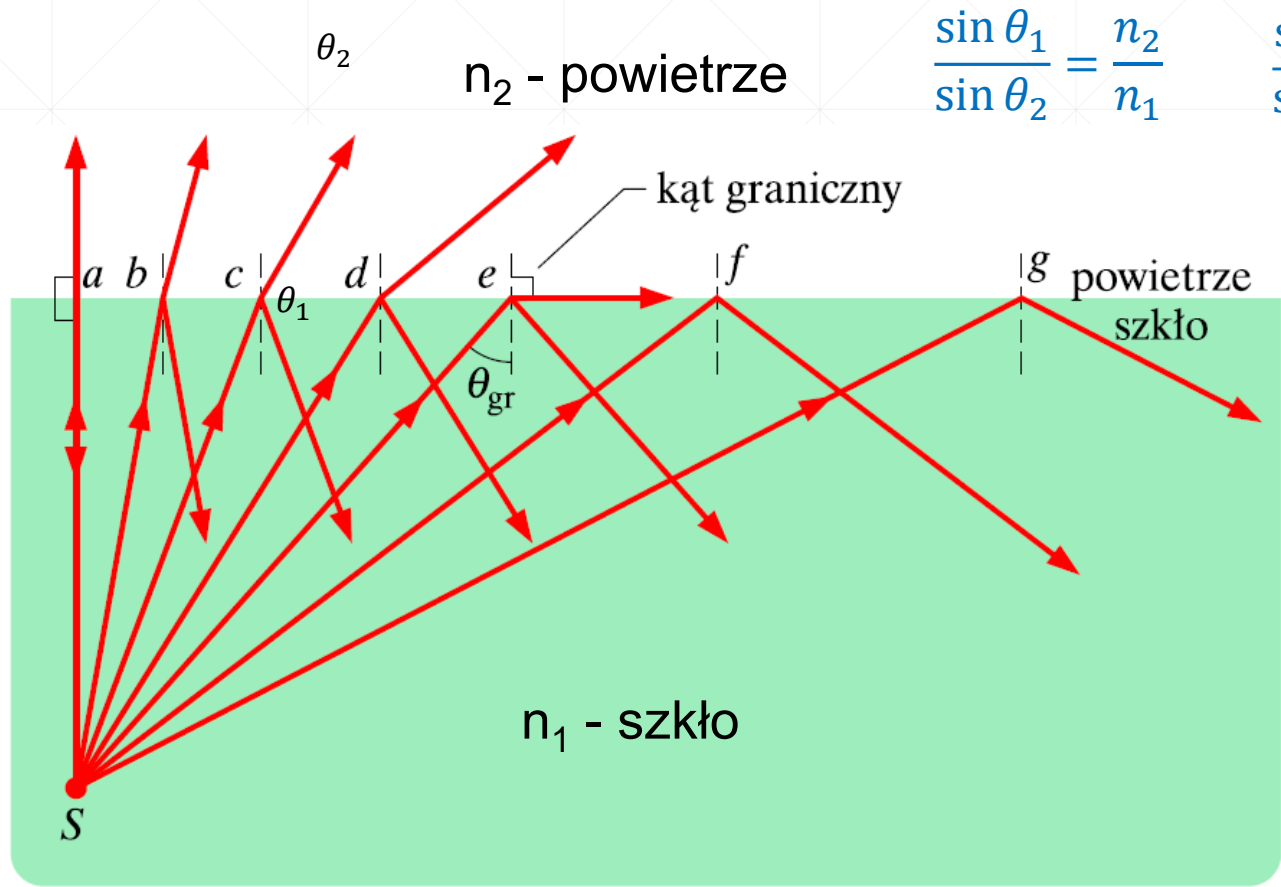
# Mikroskop

Mikroskop optyczny składa się z dwóch soczewek: obiektywu i okularu. Obiektyw tworzy pierwszy obraz, który jest większy niż przedmiot. Ten pierwszy obraz znajduje się w zasięgu ogniskowej okularu i jest przedmiotem dla jego soczewki. Okular tworzy ostateczny obraz, który jest dodatkowo powiększony.



# Całkowite wewnętrzne odbicie

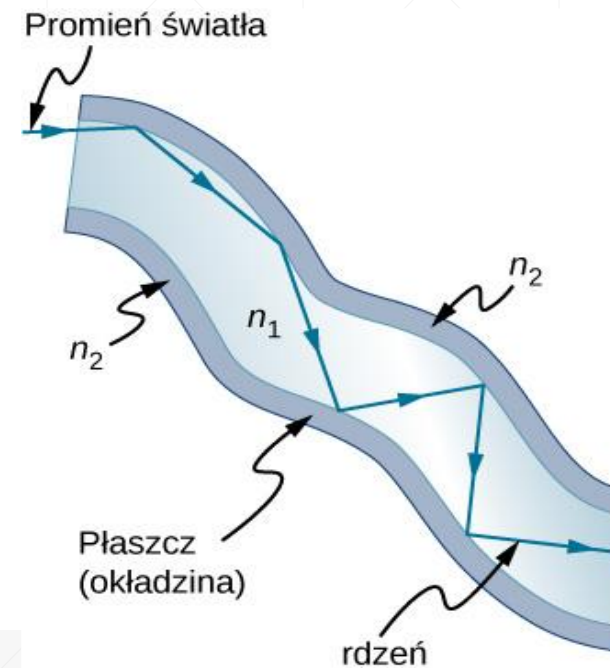
Przy przechodzeniu wiązki światła z ośrodka o większym  $n_1$  do ośrodka o mniejszym  $n_2$  kąt załamania jest większy od kąta padania. Dla  $\theta_1 = \theta_{gr}$  kąt załamania  $\theta_2 = 90^\circ$



$$\frac{\sin \theta_1}{\sin \theta_2} = \frac{n_2}{n_1}$$

$$\frac{\sin \theta_{gr}}{\sin 90^\circ} = \frac{n_2}{n_1}$$

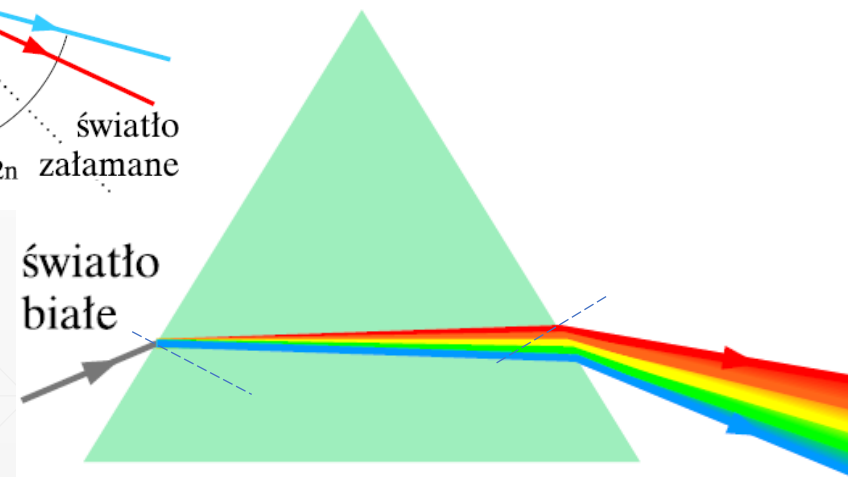
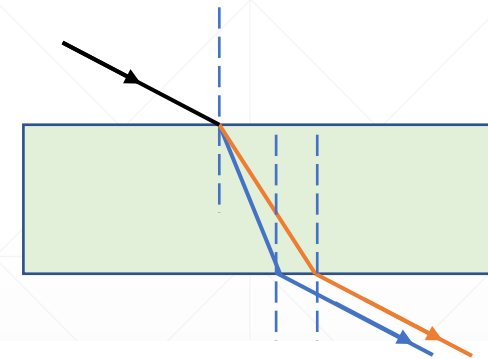
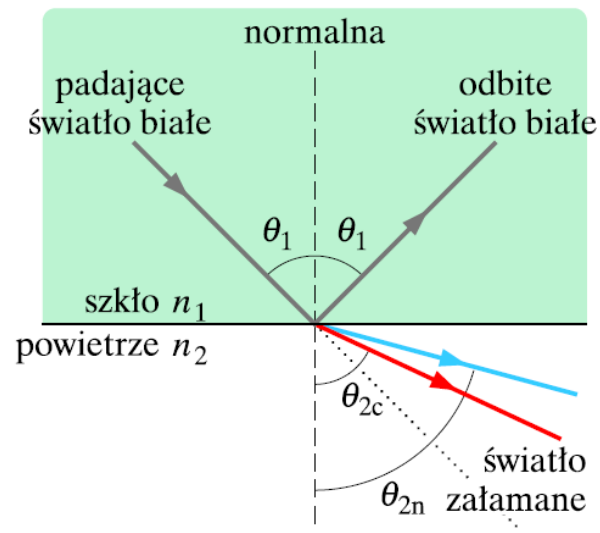
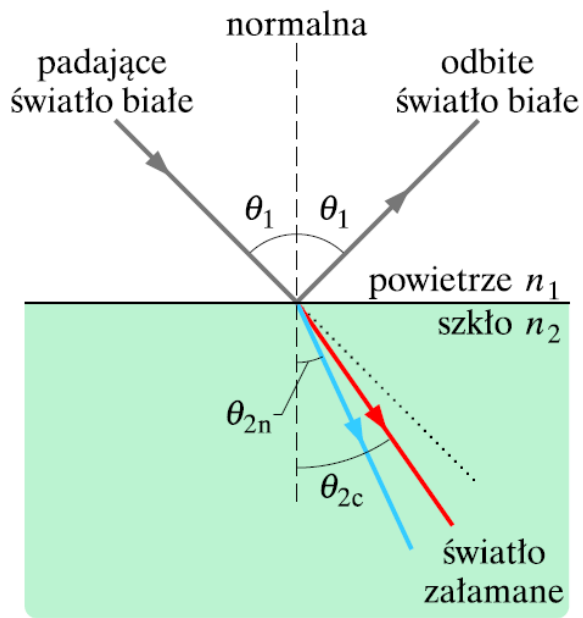
$$\theta_{gr} = \arcsin \frac{n_2}{n_1}$$



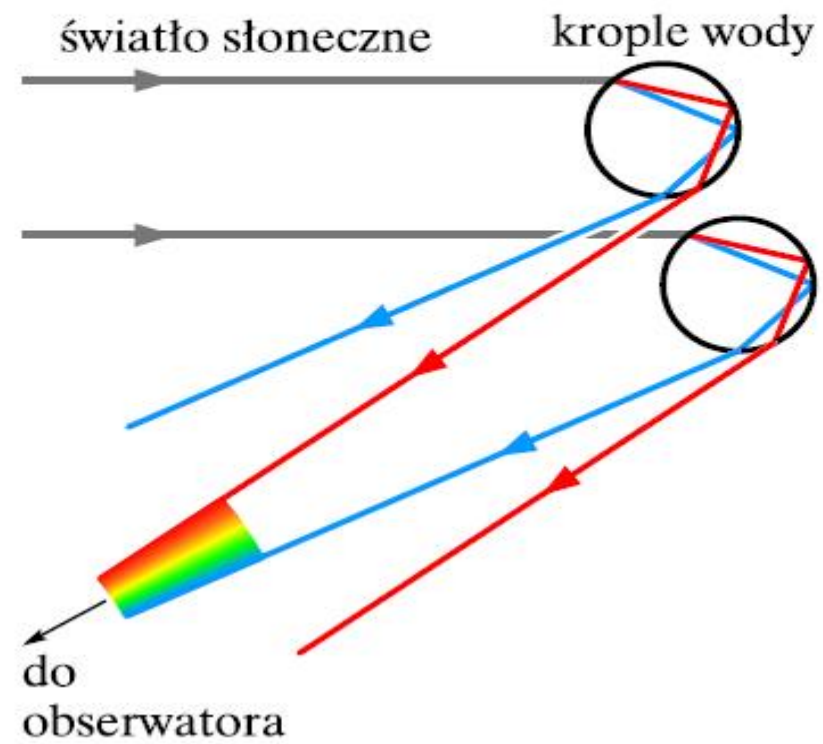
wykorzystywane w światłowodach do prowadzenia wiązki światła

# Rozszczepienie światła (dyspersja chromatyczna)

Zarówno przy wejściu wiązki światła jak i przy wychodzeniu ze szkła światło niebieskie jest silniej odchylane od kierunku prostoliniowego niż czerwone. Dla płytki płasko równoległej rozszczepienia światła nie zachodzi bo promienie są równoległe.

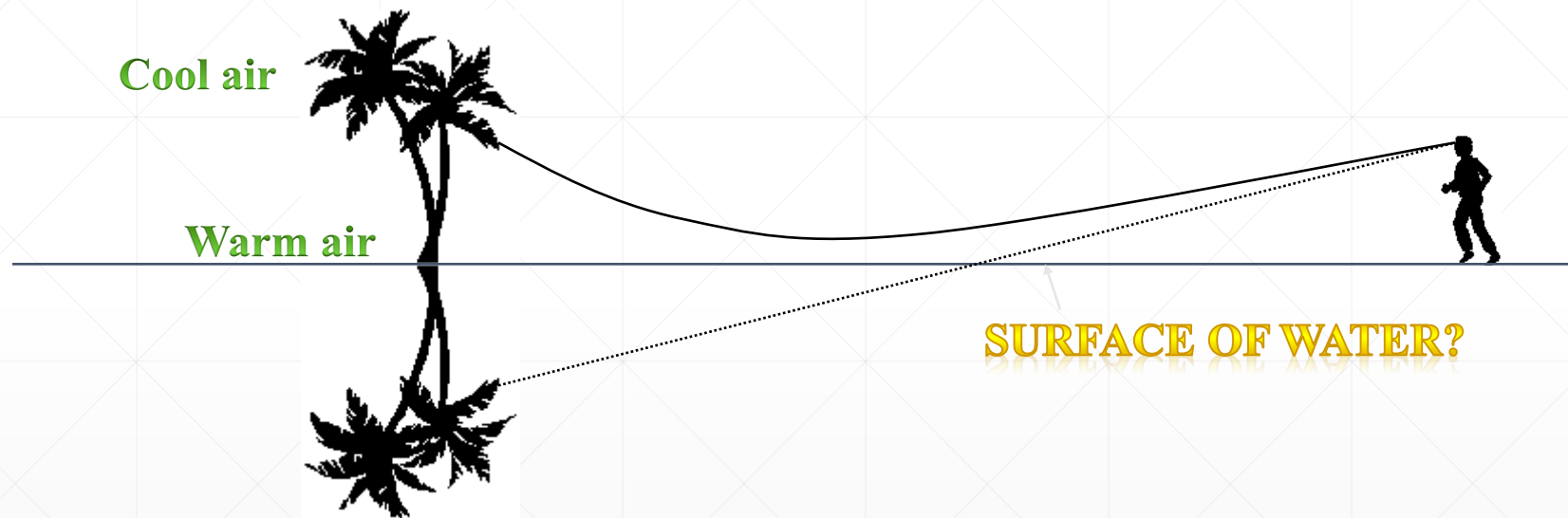


# Tęcza





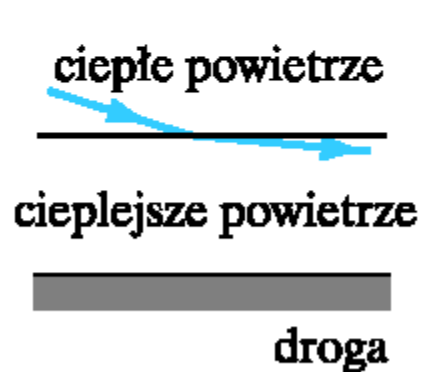
# Mirage



# Miraże – fatamorgany



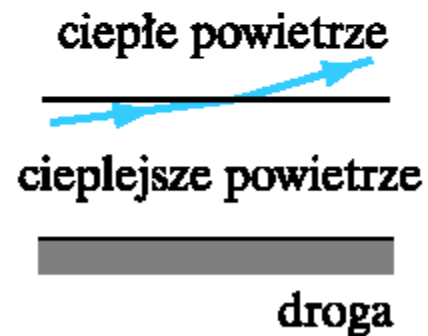
a)



b)



c)

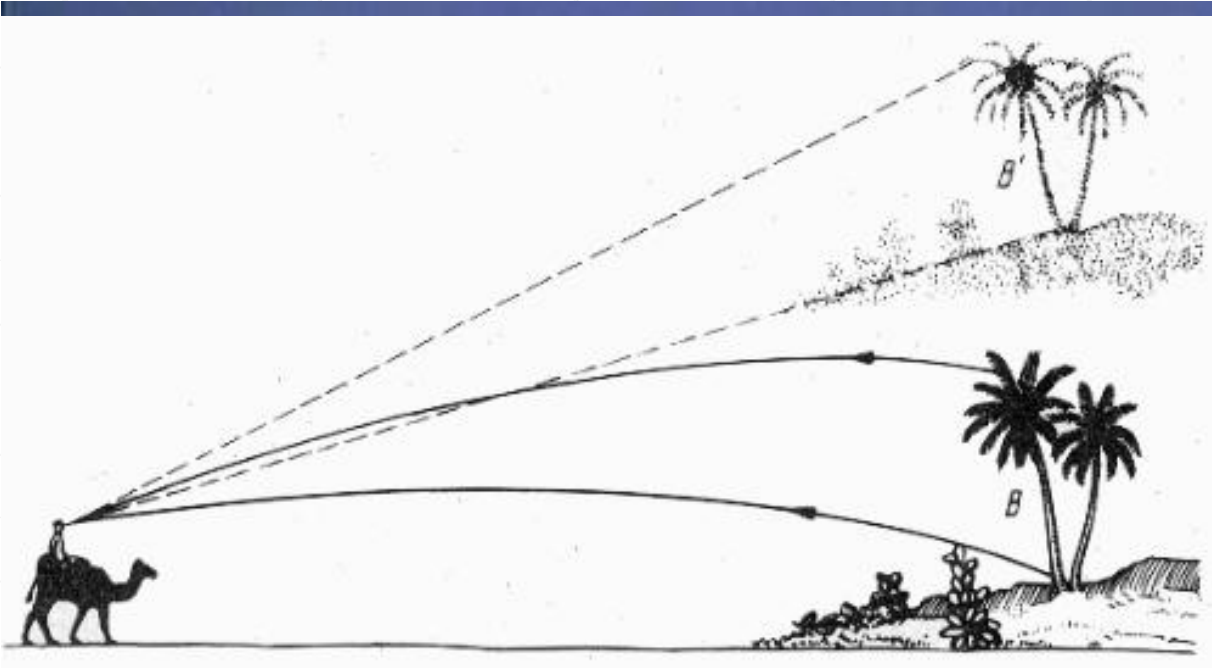


d)

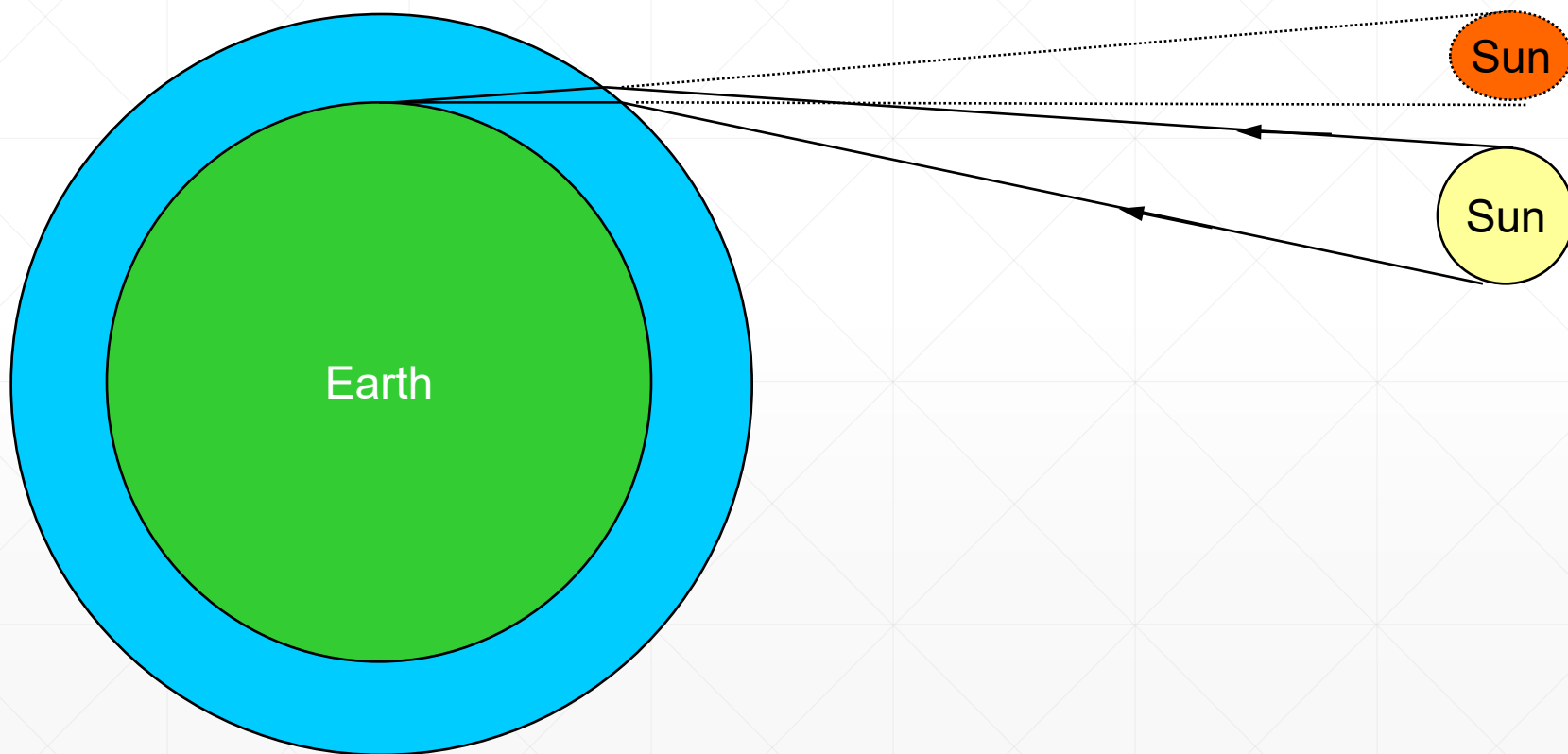
Promień świetlny biegnący z dolnego obszaru nieba ulega załamaniu przy przechodzeniu przez warstwy powietrza ogrzane przez powierzchnię drogi. Obserwator widzi niebieską barwę nieba, która nadchodzi jakby z powierzchni drogi i migocze (turbulencje).







Załamanie światła w warstwach atmosfery  
powoduje eliptyczne zniekształcenie słońca





# Podsumowanie

- Zasada Fermata – światło porusza się po najszybszej drodze
- Prawo odbicia – kąt padania równy kątowi odbicia
- Prawo załamania – związek między kątem padania a kątem załamania określa prawo Snella  $\sin \theta_1 / \sin \theta_2 = n_2 / n_1$
- Zasady powstawania obrazów w układach optycznych: soczewka, zwierciadło, mikroskop
- Dyspersja światła – rozczepienie przez pryzmat



**Dziękuję za uwagę**