

Optyka

- **OPTYKA – dział fizyki, zajmujący się ŚWIATŁEM.**
 - Źródła światła;
 - Propagacja (rozchodzenie się) światła;
 - Tworzenie obrazu (odwzorowanie);
 - Oddziaływanie światła z materią;
 - Detekcja (wykrywanie, obserwacja, pomiar) światła.

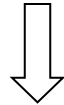
Dualizm cząsteczkowo-falowy

ŚWIATŁO



Teoria cząsteczkowa

(korpuskularna)



zbiór cząstek – bez masy, ale o
skwantowanej energii, pędzie

(*Newton,* *Planck,*
Einstein)

- zjawisko fotoelektryczne wewnętrzne
- zjawisko fotoelektryczne zewnętrzne
- zjawisko Comptona

Teoria falowa



fala elektromagnetyczna

(*Huygens, Young,*
Fresnel, Maxwell)

- dyfrakcja;
- interferencja;
- polaryzacja.

Równania Maxwella

- Równań Maxwella – różniczkowe (lokalne) i całkowe (globalne):

$$\begin{array}{lll} \varepsilon_0 \oint \vec{E} \cdot d\vec{S} = q_{wewn} & \operatorname{div} \vec{D} = \rho & \sigma - \text{gęstość ładunku swobodnego} \\ \oint \vec{B} \cdot d\vec{S} = 0 & \operatorname{div} \vec{B} = 0 & \\ \oint \vec{E} \cdot d\vec{s} = -\frac{d\Phi_B}{dt} & \operatorname{rot} \vec{E} + \dot{\vec{B}} = 0 & \\ \oint \vec{B} \cdot d\vec{s} = \mu_0 \varepsilon_0 \frac{d\Phi_E}{dt} + \mu_0 I & \operatorname{rot} \vec{H} - \dot{\vec{D}} = \sigma \vec{E} & \rho - \text{przewodnictwo właściwe} \end{array}$$

- Równania materiałowe: $\vec{D} = \varepsilon \varepsilon_0 \vec{E}$ $\varepsilon, \varepsilon_0$ - przenikalność elektryczna ośrodka (względna) i próżni (bezwzględna)
 $\vec{B} = \mu \mu_0 \vec{H}$ μ, μ_0 - przenikalność magnetyczna ośrodka (względna) i próżni (bezwzględna)

Równania Maxwella

- **James Clark Maxwell** (1864) pokazał, że przyspieszony ładunek elektryczny musi promieniować pole elektryczne i magnetyczne oddalające się od źródła z prędkością (w próżni):

$$v = 1/\sqrt{\epsilon_0\mu_0} \equiv c$$

- Za czasów Maxwella znanymi falami elektromagnetycznymi były: **światło widzialne** oraz **promieniowanie podczerwone** i **nadfioletowe**. Wkrótce po opublikowaniu prac Maxwella odkryto (opisano!) inne fale: **radiowe**. One też okazały się falami elektromagnetycznymi

Równanie falowe

- Stosując pewne tożsamości wektorowe możemy otrzymać:

$$\Delta \vec{E} - \mu\mu_0\varepsilon_0 \ddot{\vec{E}} = 0$$

$$\Delta \vec{H} - \mu\mu_0\varepsilon_0 \ddot{\vec{H}} = 0$$

- PRZYPOMNIENIE: Równanie falowe:

$$\frac{\partial^2 \Psi}{\partial r^2} = \frac{1}{v^2} \frac{\partial^2 \Psi}{\partial t^2}$$

$$\Psi = E, H \qquad v = 1/\sqrt{\varepsilon\varepsilon_0\mu\mu_0}$$

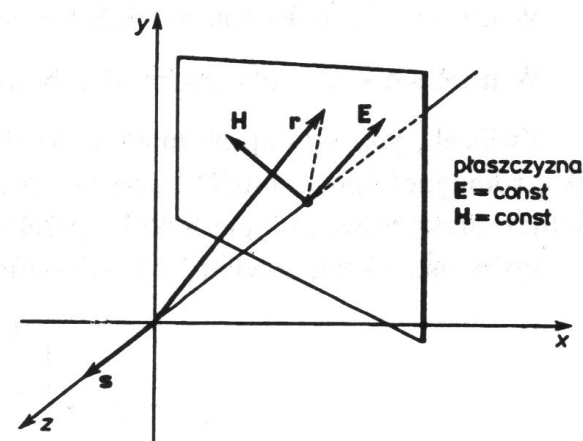
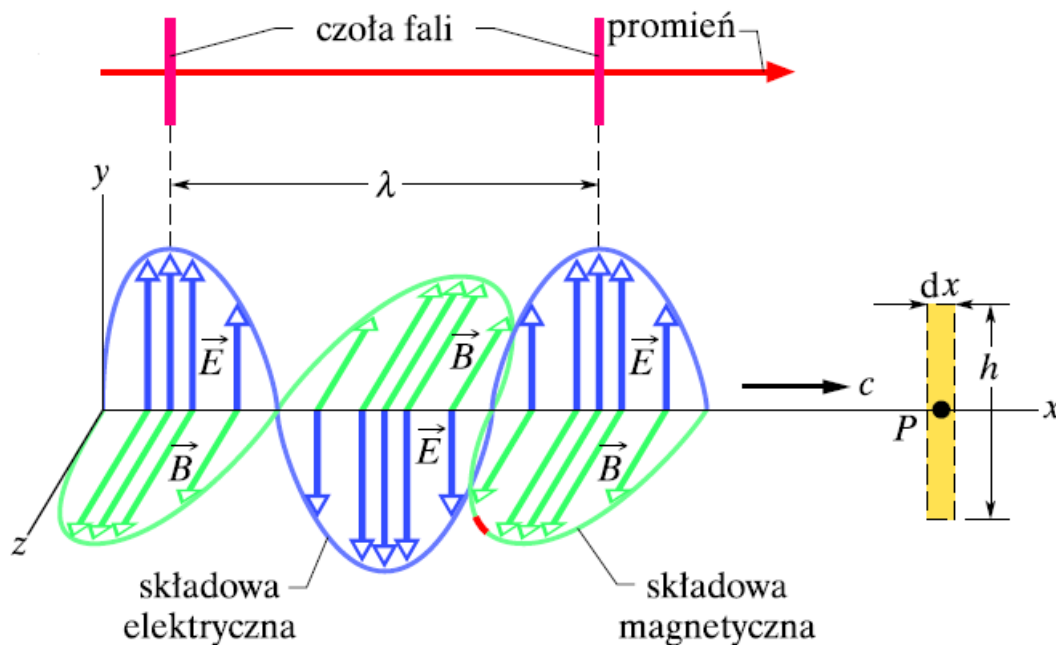
Fala elektromagnetyczna

- **WNIOSKI** z poprzednich rozważań (i równań):

1) Wektory E i H są zgodne w fazie;

2) Wektory E i H są wzajemnie prostopadłe i tworzą układ prawoskrętny;

3) Fala elektromagnetyczna jest falą poprzeczną.



Fala elektromagnetyczna

- Fala elektromagnetyczna niesie **energię**. Szybkość przepływu tej energii przez jednostkową powierzchnię opisana jest przez **wektor Poyntinga**:

$$\vec{S} = \vec{E} \times \vec{H} \qquad \vec{S} = \frac{1}{\mu_0} \vec{E} \times \vec{B}$$

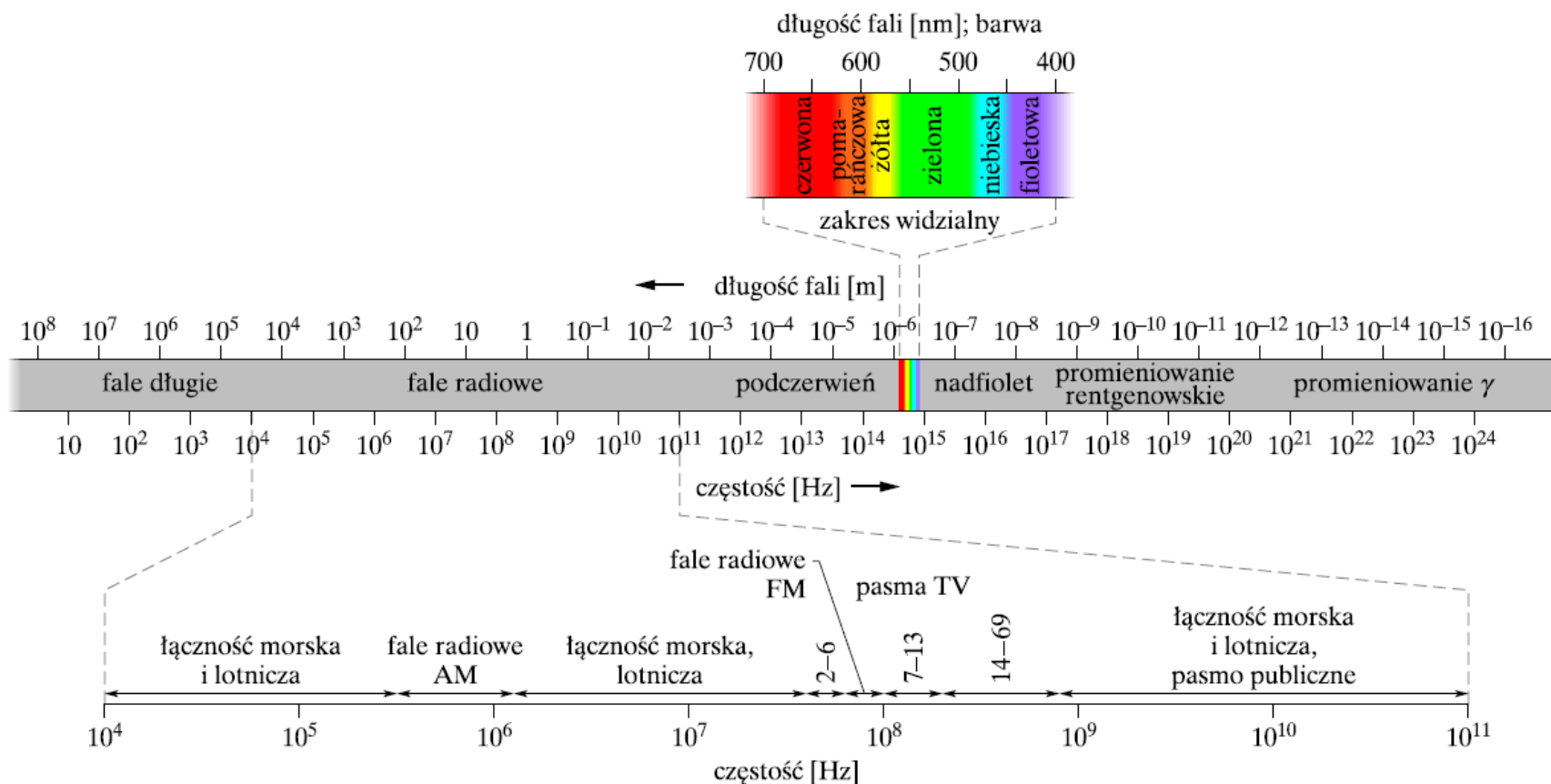
$$|\vec{S}| = \frac{\text{energia / czas}}{\text{pole powierzchni}} = \frac{\text{moc}}{\text{pole powierzchni}} = \left[\frac{\text{W}}{\text{m}^2} \right]$$

- Wektor Poyntinga** opisuje chwilową **gęstość mocy** niesionej przez falę EM. Jego kierunek wskazuje kierunek transportu energii fali i **nie** musi być tożsamy z kierunkiem rozchodzenia się fazy.
- Uśredniony w czasie wektor Poyntinga** opisuje średnią gęstość mocy – wielkość ta nazywana jest **natężeniem** fali:

$$I = S_{sr} = \frac{1}{c\mu_0} E_{sr}^2$$

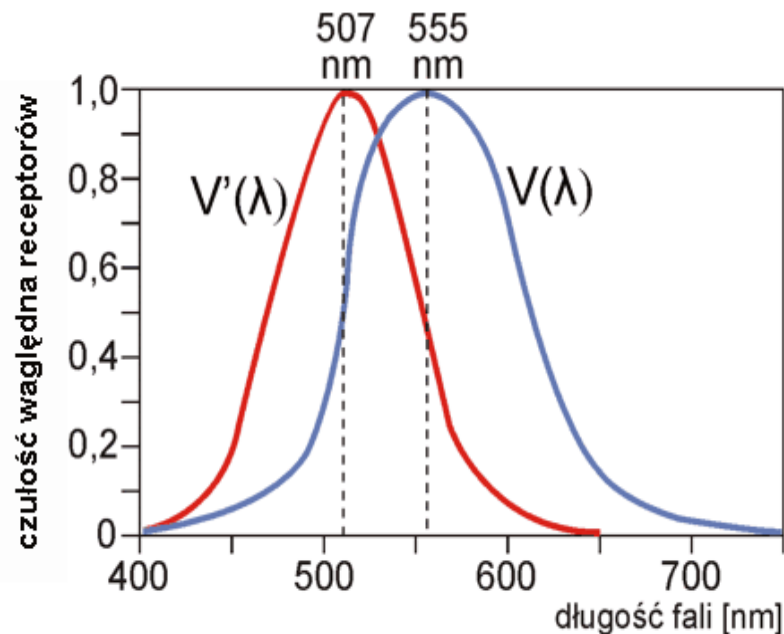
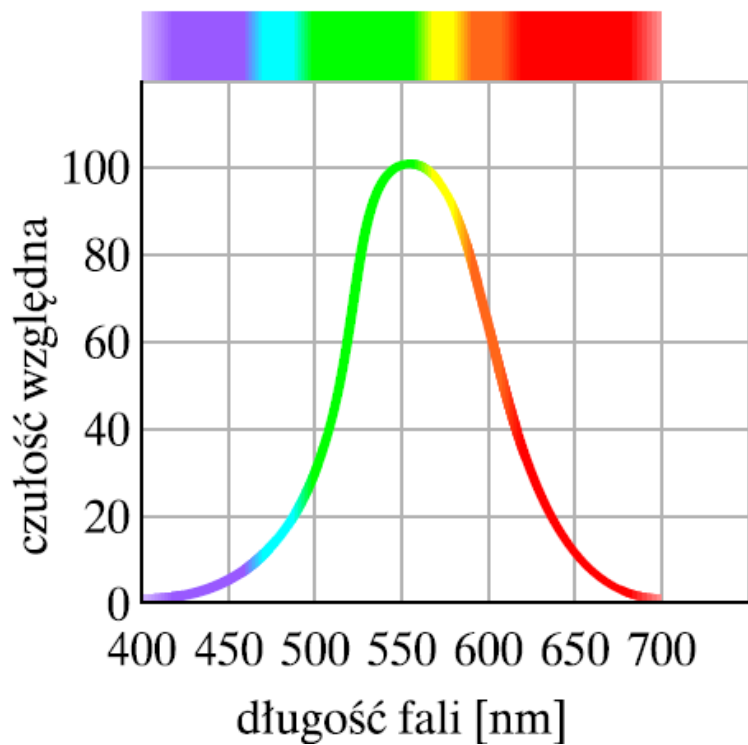
Widmo promieniowania elektromagnetycznego

- **Człowiek** jest w stanie zaobserwować swoimi zmysłami jedynie niewielki fragment **widma** promieniowania elektromagnetycznego.



Widmo promieniowania elektromagnetycznego

- **Zakres widzialny** pasma fal elektromagnetycznych, czyli część widma obserwowana przez człowieka, jest bardzo wąski.
- **Czułość** ludzkiego oka w tym paśmie również nie jest stała (i zależy np. od ilości światła – efekt Purkyniego).

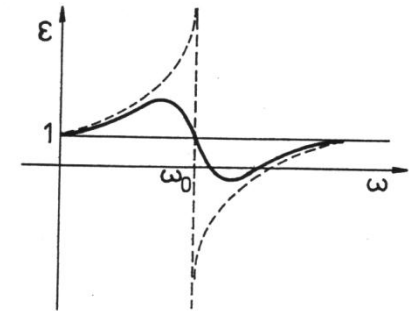


Oddziaływanie fali EM z materią

- **Oddziaływanie światła z materią** = pobudzanie drgań elektronów ośrodka;

1) przypadek elektronów związanych z jądrami, drgania bez tłumienia (dielektryk):

$$\varepsilon = 1 + \frac{Ne^2}{m\varepsilon_0(\omega_0^2 - \omega^2)}$$



2) Przypadek elektronów swobodnych (przewodnik, gaz zjonizowany):

$$\varepsilon = 1 - \frac{Ne^2}{m\varepsilon_0\omega^2}$$

(dla wystarczająco niskich częstości: ε staje się UROJONY = odbicie fali!)

Współczynnik załamania

- Prędkość fali elektromagnetycznej (światła) w próżni:

$$v = 1/\sqrt{\epsilon_0\mu_0} \equiv c$$

- **Współczynnik załamania** ośrodka opisuje **zmianę prędkości** fali w ośrodku:

$$n \equiv \frac{c}{v} = \sqrt{\epsilon\mu}$$

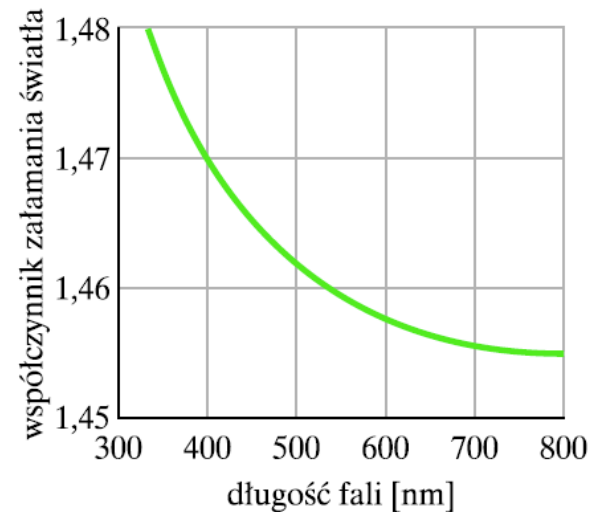
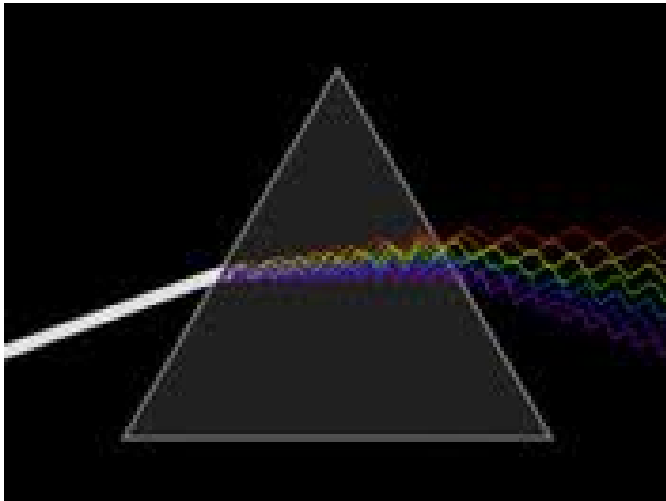
c – prędkość światła w próżni; v – prędkość światła w ośrodku;

ϵ, μ - względne przenikalności: elektryczna i magnetyczna ośrodka.

- W ogólnym przypadku współczynnik załamania można traktować jako **wielkość zespoloną**: część rzeczywista odpowiada m.in. za załamanie, część urojona za tłumienie.

Dyspersja

- **Dyspersja** – właściwość materiału: zależność prędkości fazowej fal (a więc również współczynnika załamania) od częstotliwości, długości fali albo wektora falowego;
- Efektem jest **dyspersja** – zjawisko rozszczepienia światła polichromatycznego na monochromatyczne;
- Wreszcie **dyspersja** to liczba – parametr, określający liczbowo dyspersję materiału.



Dyspersja względna:
$$\Delta = \frac{n_F - n_C}{n_D - 1}$$

Propagacja fal EM

- PRAWA SNELIUSA [Snella]
(odbicia i załamania):

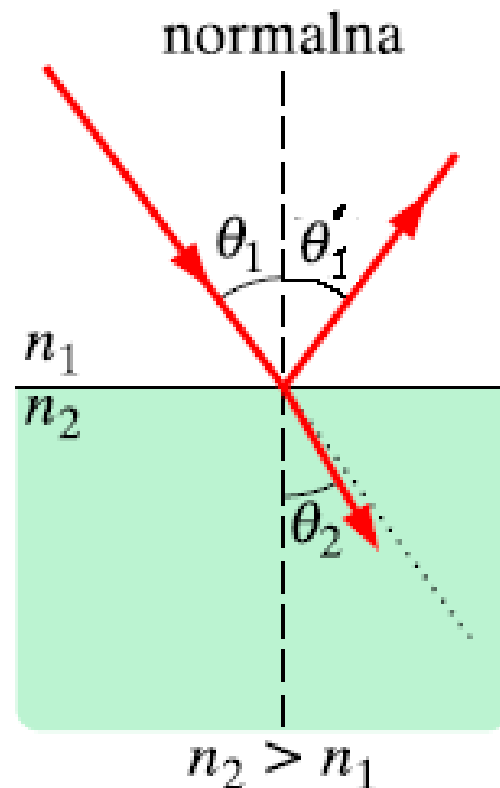
1) promienie: padający, odbity i załamany leżą w tej samej płaszczyźnie;

2) kąt odbicia równa się kątowi padania;

$$\theta_1 = \theta_1'$$

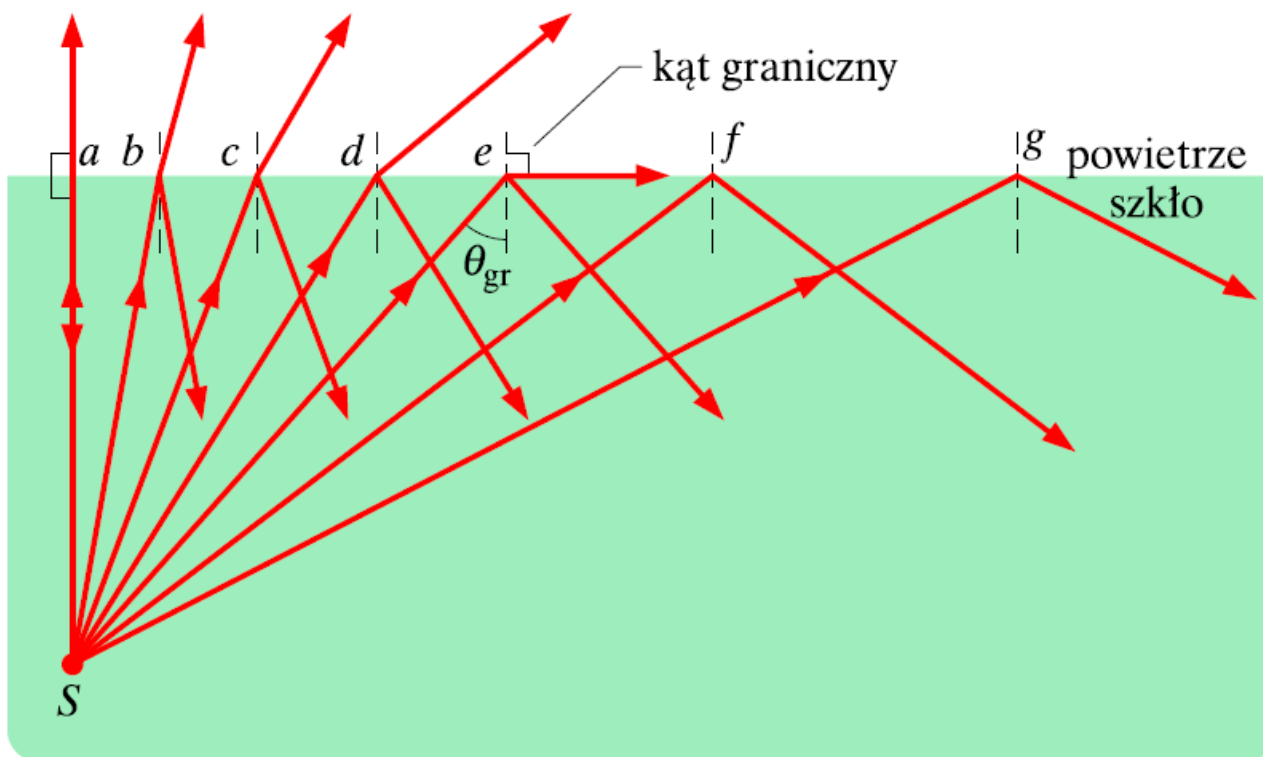
3) między kątem załamania i kątem padania zachodzi związek:

$$\frac{\sin \theta_1}{\sin \theta_2} = \frac{v_1}{v_2} = \frac{n_2}{n_1} \equiv n_{21}$$



Propagacja fal EM

- Jednym z wniosków z PRAWA SNELIUSA jest zjawisko **całkowitego wewnętrznego odbicia**.



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

Propagacja fal EM

- **Zasada Fermata** – światło porusza się pomiędzy dwoma punktami po takiej drodze, na której pokonanie zużywa ekstremalną (minimalną) ilość czasu:

$$\delta \int_A^B dt = 0$$

(zwykle jest to najmniejszy czas przejścia; ale np. w ośrodkach dwójłomnych fala zwyczajna ma ten czas najkrótszy, a fala nadzwyczajna najdłuższy!)

- Dla **światła (fali elektromagnetycznej)** można zapisać tę zasadę również jako:

$$\delta \int_A^B n ds = 0$$

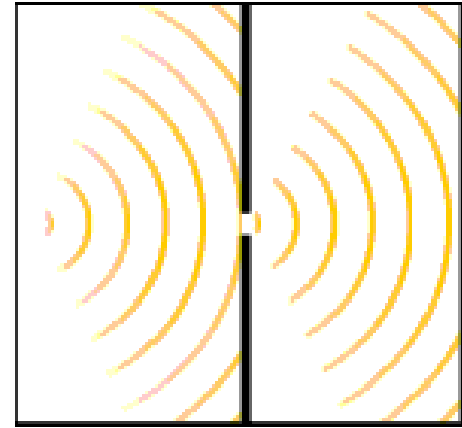
Jest to zasada minimum **drogi optycznej** $n ds$

(fatamorgana = miraż)

Propagacja fal EM

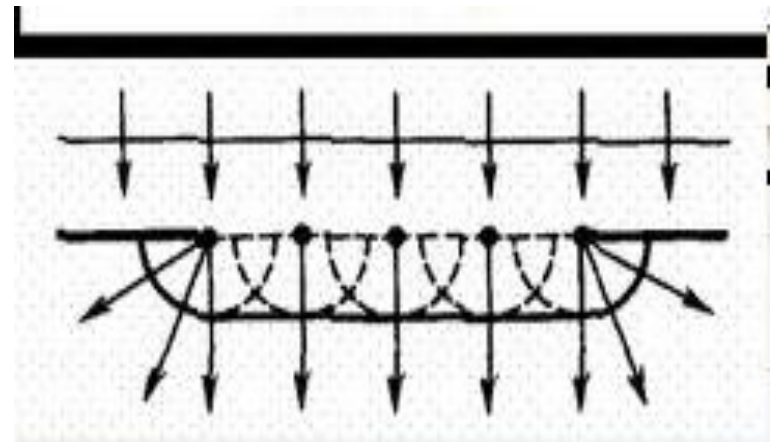
- **Zasada Huygensa** – każdy punkt ośrodka, do którego dociera fala, staje się źródłem nowej fali kulistej.

(Christian Huyg[h]ens, XVIII w)



- **Zasada Huygensa-Fresnela:** Nowe czoło fali odtwarza się w wyniku nakładania się fal cząstkowych pochodzących z sąsiadujących ze sobą punktów ośrodka.

! Równoważność zasad Fermata i Huygensa – choć ta druga wyraźnie podkreśla **falową naturę światła**.

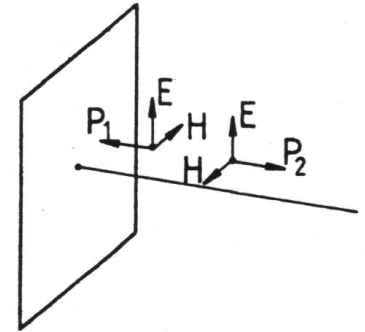


Odbicie fal EM od granicy ośrodków

- Fala elektromagnetyczna pada prostopadle na granicę, dzielącą dwa ośrodki dielektryczne. Założenia:

- Składowe styczne pól E i H są ciągłe;
- Występuje skok fazy składowej prostopadłej (o π).

$$\frac{E_0}{H_0} = \frac{E_r}{H_r} = Z_1 \quad \frac{E_t}{H_t} = Z_2$$



(„0” oznacza falę padającą; „r” odbitą; „t” przechodzącą)

$$Z_1 = n_1 \quad Z_2 = n_2$$

- Współczynnik odbicia:
$$R = \left(\frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1} \right)^2$$
- Współczynnik transmisji:
$$T = \frac{4Z_1Z_2}{(Z_1 + Z_2)^2}$$

Optyka geometryczna

- Codzienne obserwacje:
 - światło rozchodzi się po liniach prostych;
 - jeśli na drodze światła ustawimy przeszkodę, powstanie za nią cień;
 - obserwujemy wiązkę światła np. w zadymionym pomieszczeniu.
- Promieniem świetlnym nazywamy bardzo „smukłą” wiązkę światła, której rozmiary poprzeczne możemy w danym zjawisku pominąć.

• Przybliżenie nieskończenie krótkich długości fal = optyka geometryczna.

- Prawa optyki geometrycznej:
 - promienie rozchodzą się po liniach prostych;
 - wszelkie promienie są od siebie całkowicie niezależne (nie ma interferencji...);
 - zwrot biegu promieni świetlnych jest odwracalny;
 - spełnione są prawa załamania i odbicia Snelliusa.

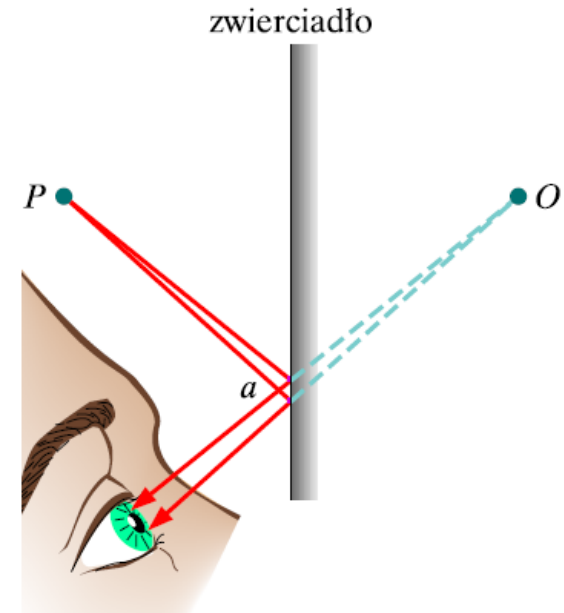
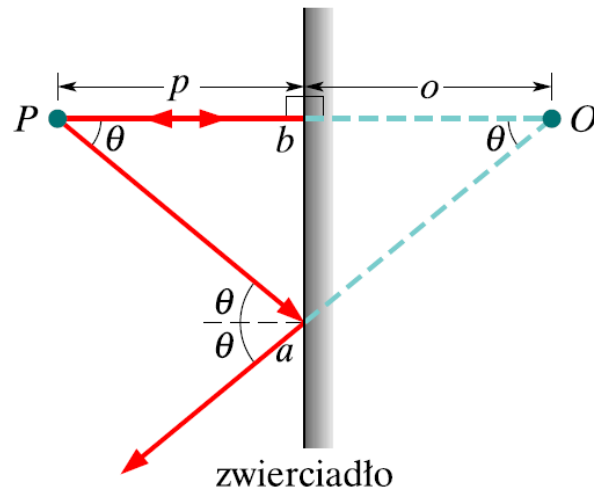
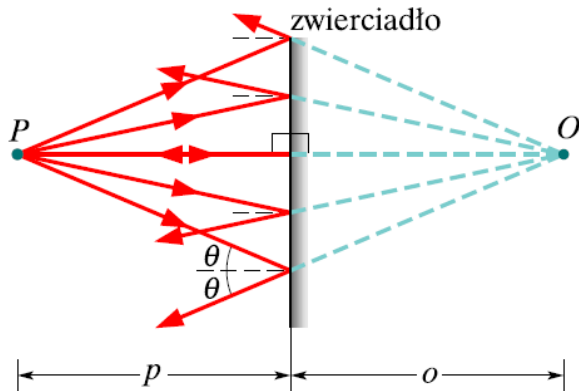
Zwierciadła

- **Zwierciadła** to powierzchnie, które (*niemal*) całkowicie odbijają padające na nie promieniowanie (światło) w jednym kierunku, nie rozpraszając go ani nie absorbując.
- **Obraz rzeczywisty** to obraz, który otrzymamy, gdy przetną się promienie świetlne po przejściu przez układ optyczny (odbiciu).
- **Obraz pozorny** to obraz, który otrzymamy, gdy przedłużenia promieni świetlnych po wyjściu z układu optycznego (odbiciu). **[OKO!]**

Zwierciadło płaskie

- Zwierciadło płaskie to odbijająca płaska powierzchnia (np. powierzchnia metalu, szkła).

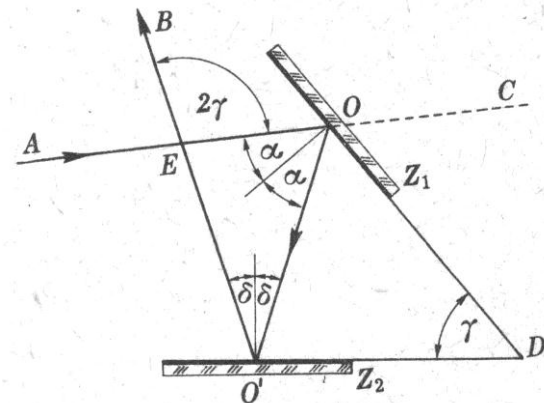
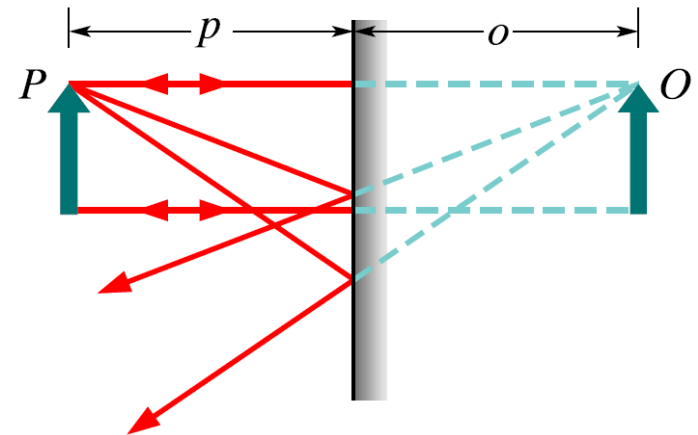
Zwierciadło płaskie daje obraz pozorny, położony symetrycznie do przedmiotu względem zwierciadła.



Zwierciadło płaskie

- Dla przedmiotów przestrzennych nie można doprowadzić do pokrycia obrazu otrzymanego w zwierciadła z przedmiotem przez obrót i translację – obraz jest **symetryczny** względem płaszczyzny zwierciadła.

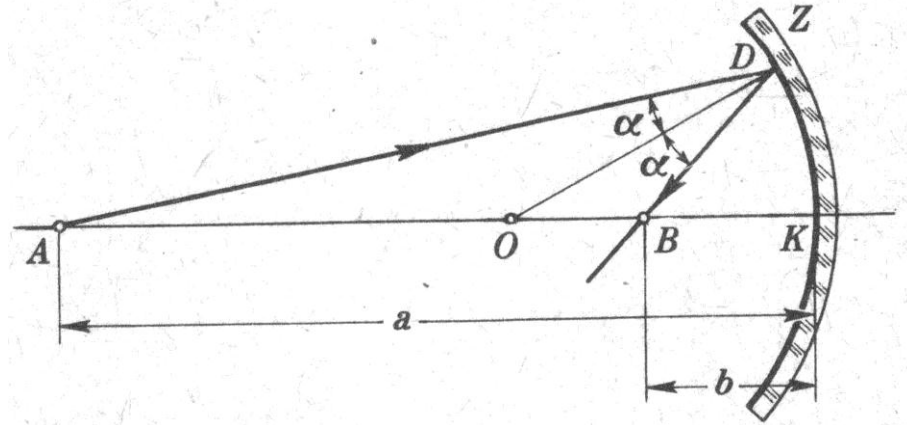
- **Zastosowania** zwierciadeł płaskich:
 - zmiana kierunku promieni świetlnych (biegu wiązki) - np. peryskopy;
 - pomiar małych kątów (np. galwanometr, waga skręceń);
 - pomiar kątów w urządzeniach typu sekstans, teodolit.



Zwierciadła sferyczne

- Zwierciadło kuliste (sferyczne) wklęsłe to odbijająca wewnętrzna powierzchnia czaszy kulistej.

$$\frac{1}{a} + \frac{1}{b} = \frac{2}{R} = \frac{1}{f}$$



f to odległość ogniskowa zwierciadła

- **Ognisko** to punkt skupienia promieni równoległych, padających na dany element optyczny (zwierciadło, soczewkę).

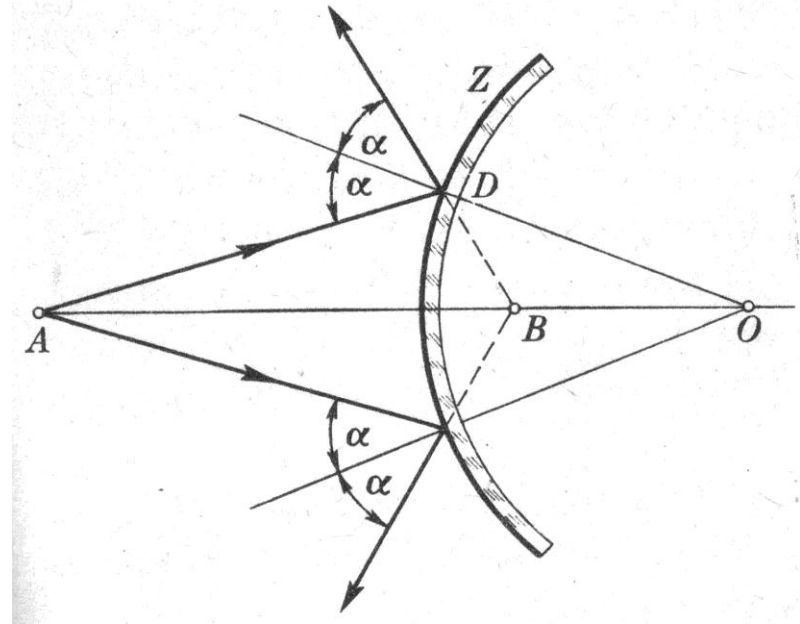
Powiększenie liniowe zwierciadła wklęsłego:

$$w = \frac{b}{a} = \frac{1}{\frac{a}{f} - 1}$$

Zwierciadła sferyczne

- Zwierciadło kuliste (sferyczne) wypukłe to odbijająca zewnętrzna powierzchnia czaszy kulistej.

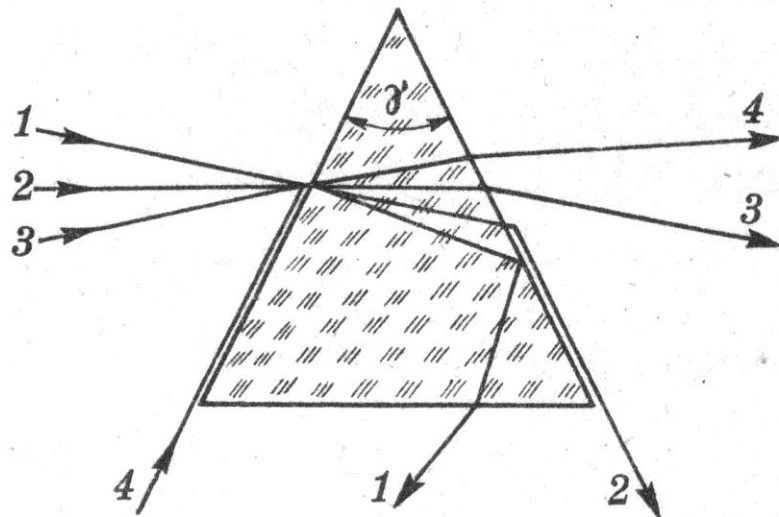
$$\frac{1}{a} + \frac{1}{b} = \frac{2}{R} = \frac{1}{f}$$



- Wzór wiążący położenie przedmiotu, obrazu i ogniskową tego zwierciadła jest podobny, jak dla wklęsłego, ale musimy przyjąć formalnie, że ogniskowa ma wartość **ujemną**!

Pryzmat

- **Pryzmat** to bryła przezroczysta, której dwie ograniczające płaszczyzny tworzą ze sobą kąt γ , zwany **kątem łamiącym** pryzmatu.



$$n = \frac{\sin \frac{\gamma + \epsilon_{\min}}{2}}{\sin \frac{\gamma}{2}}$$

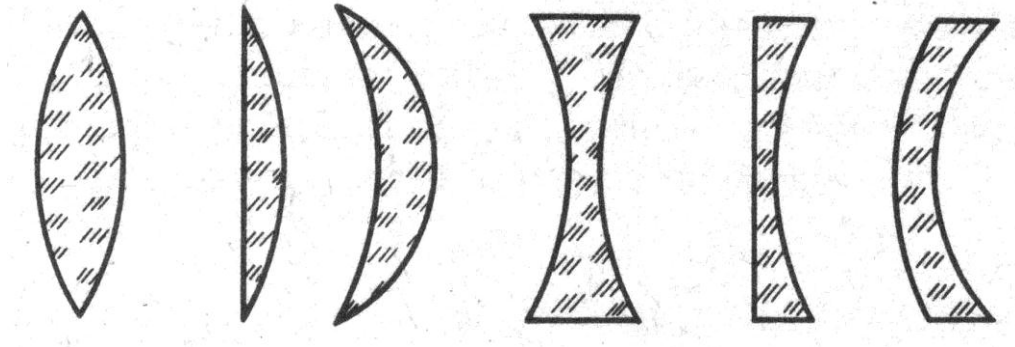
$\epsilon_{\min}$

to kąt minimalnego odchylenia

- **Zastosowania** pryzmatów:
 - pomiar współczynnika załamania na goniometrach (spektrometrach);
 - odchyłanie biegu wiązki w przyrządach optycznych (jak zwierciadła);
 - rozszczepienie wiązki światła białego na widmo.

Soczewki

- **Soczewką** nazywamy bryłę z przezroczystego materiału, ograniczoną powierzchniami kulistymi, parabolicznymi lub walcowymi. (W praktyce najczęściej powierzchnie kuliste).



Oś optyczna – prosta, przechodząca przez środki krzywizn soczewki.

- **Soczewki skupiające** są w środku grubsze, niż na zewnątrz; **soczewki rozpraszające** – przeciwnie.
- Zastosowania soczewek:
 - transformacja obrazu;
 - uzyskiwanie obrazu powiększonego lub przybliżonego.

Soczewki

- Wzór soczewkowy:

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

gdzie:

s - odległość od soczewki do przedmiotu (ujemna w lewo!);

s' - odległość od soczewki do obrazu;

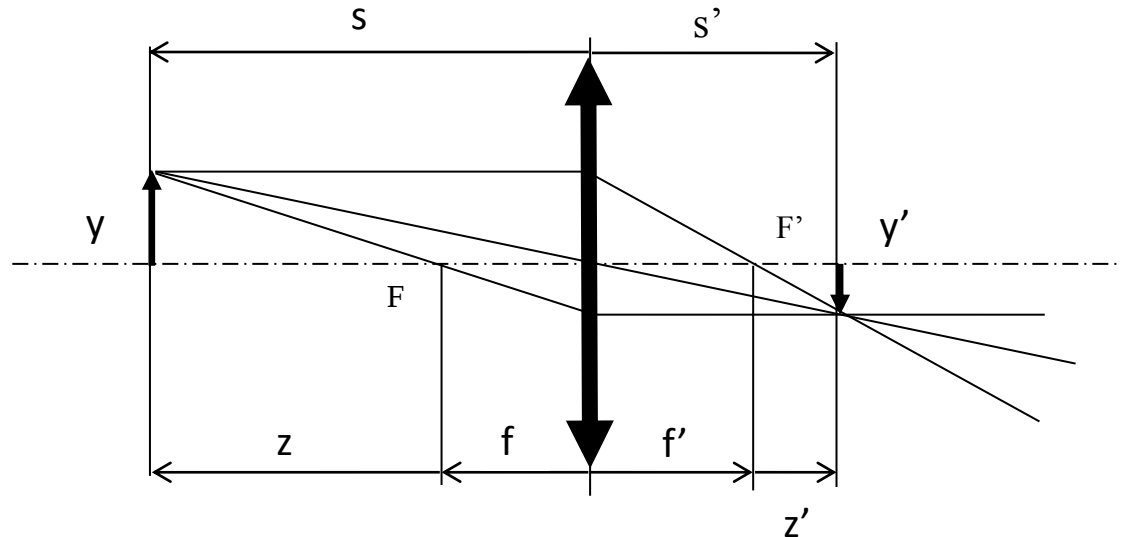
f' - odległość od soczewki do ogniska obrazowego (ogniskowa obrazowa);

n - względny współczynnik załamania materiału soczewki;

R_1, R_2 - promienie krzywizn soczewki.

Reguła znaków:

- odległości zgodnie z biegiem promieni świetlnych (w prawo) przyjmujemy z plusem;
- odległości od osi optycznej w górę – z plusem;



Soczewki

- Wzór konstrukcyjny soczewki cienkiej:

$$\frac{1}{f'} = (n - 1) \left(\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2} \right)$$

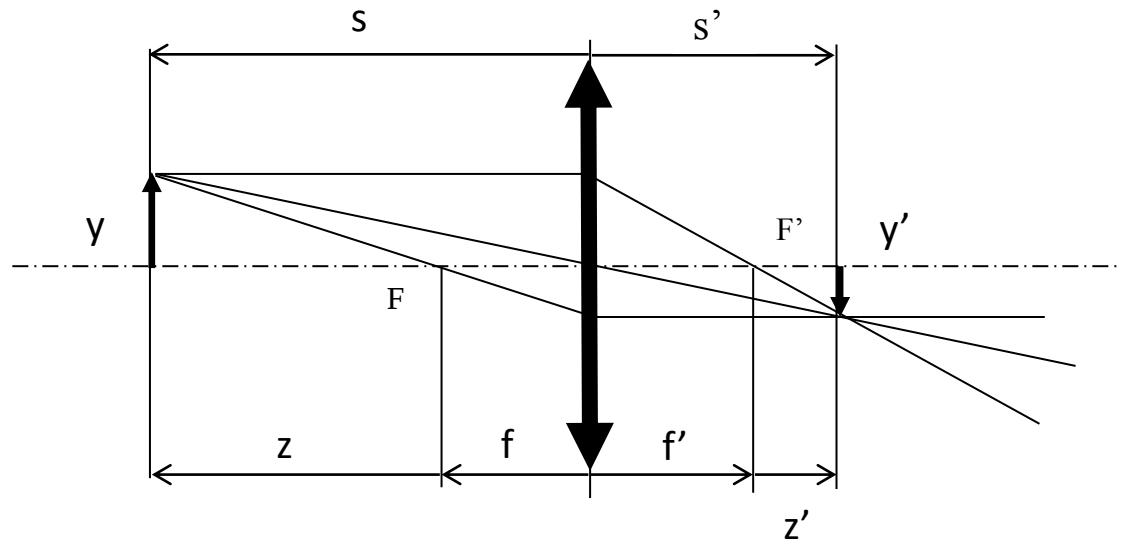
- Wzór Newtona:

$$zz' = (f')^2$$

- Zdolność zbierająca soczewki:

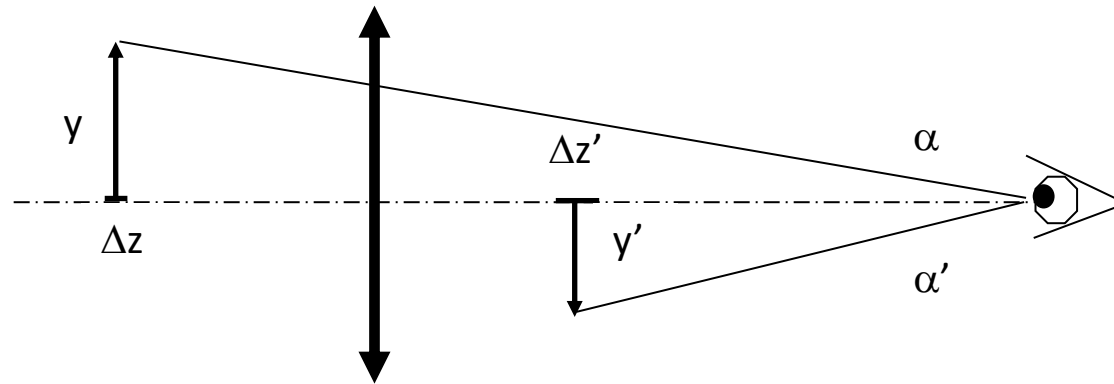
$$\Psi = \frac{1}{f'}$$

(mierzona w **dioptriach** jako odwrotność metra).



Powiększenie

- Powiększenie soczewki (układu optycznego):



- Powiększenie **poprzeczne**:

$$p = \frac{y'}{y}$$

- Powiększenie **podłużne**:

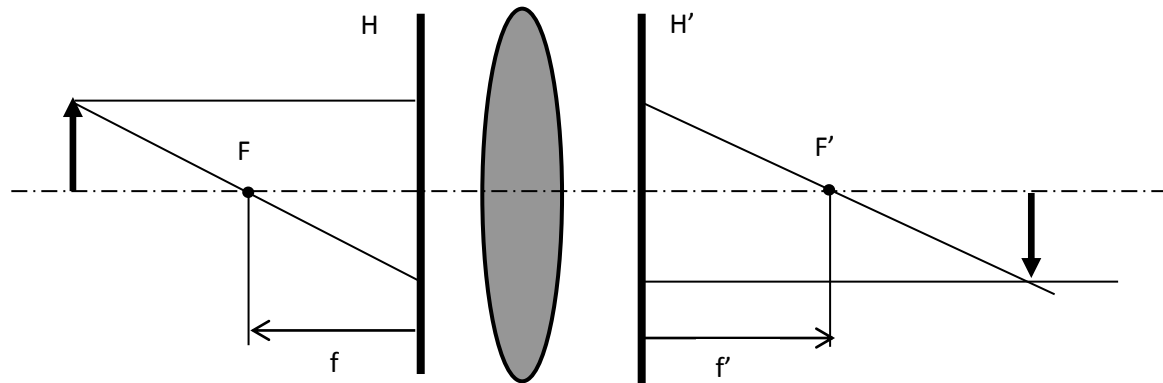
$$\beta = \frac{\Delta z'}{\Delta z}$$

- Powiększenie **wizualne (kątowe)**:

$$w = \frac{\alpha'}{\alpha}$$

Soczewki grube

- **Płaszczyzny główne** – płaszczyzny prostopadłe do powierzchni optycznej, dla których powiększenie równe jest **1** (obraz tych samych rozmiarów, nie odwrócony!).



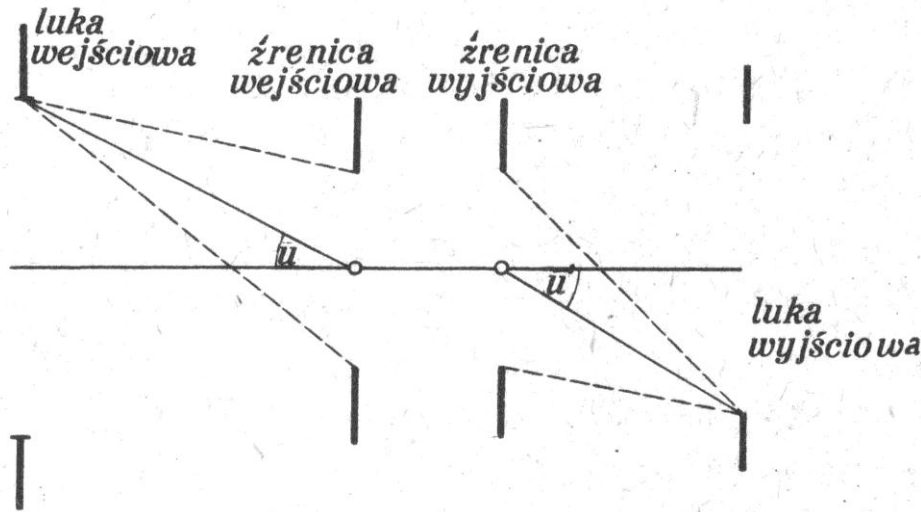
- **Płaszczyzny węzłowe** – płaszczyzny, przechodzące przez **punkty węzłowe** – punkty przecięcia z osią układu tych promieni, które przechodzą przez układ bez zmiany kierunku (doznają przesunięcia równoległego) (= powiększenie kątowe równe jest **1**).

Przysłony

- **Przysłony** to elementy układu optycznego, które ograniczają i formują wiązkę światła, przechodzącego przez układ:
 - ograniczają wady związane z odległością promienia od osi (astygmatyzm, częściowo koma);
 - wprowadzają wady związane z kątem wiązki z osią optyczną (astygmatyzm, krzywizna pola) i ograniczeniami dyfrakcyjnymi (zdolność rozdzielcza!).
- **Promień aperturowy** – promień, który wychodzi z osiowego punktu przedmiotu.
- **Promień polowy** – promień, który wychodzi ze skrajnego (najdalszego od osi) punktu przedmiotu.
- **Przesłona aperturowa** – to ta przesłona fizyczna, która najbardziej ogranicza pęk promieni aperturowych.
- **Przesłona polowa** – to ta przesłona fizyczna, która najbardziej ogranicza pęk promieni polowych.

Przysłony – c.d.

- Obrazy przesłón w przestrzeni przedmiotowej i obrazowej to:
 - **żrenice** (obrazy przesłony aperturowej);
 - **luki** (obrazy przesłony polowej).

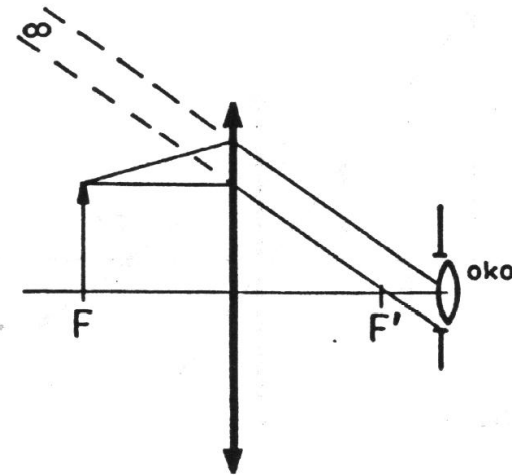
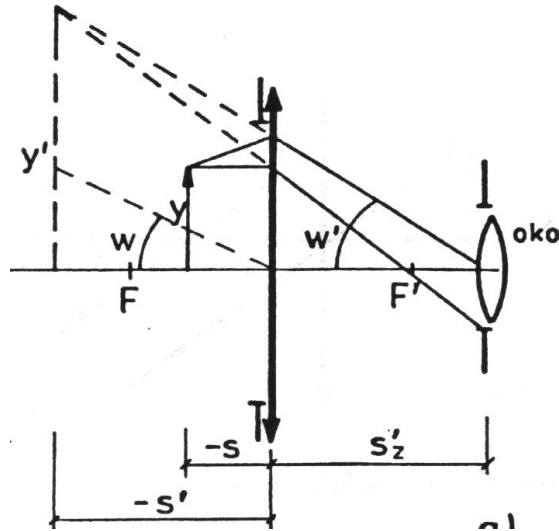


- Apertura numeryczna układu:

$$A = n \sin u$$

Przyrządy optyczne - lupa

- **Lupa** – najprostszy przyrząd, dający obraz pozorny, powiększony, prosty – pojedyncza soczewka zbierająca (skupiająca).



$$w = \frac{D}{f'}$$

Powiększenie kątowe lupy:

$$w = 1 + \frac{s'}{f'} \quad s' \rightarrow D$$

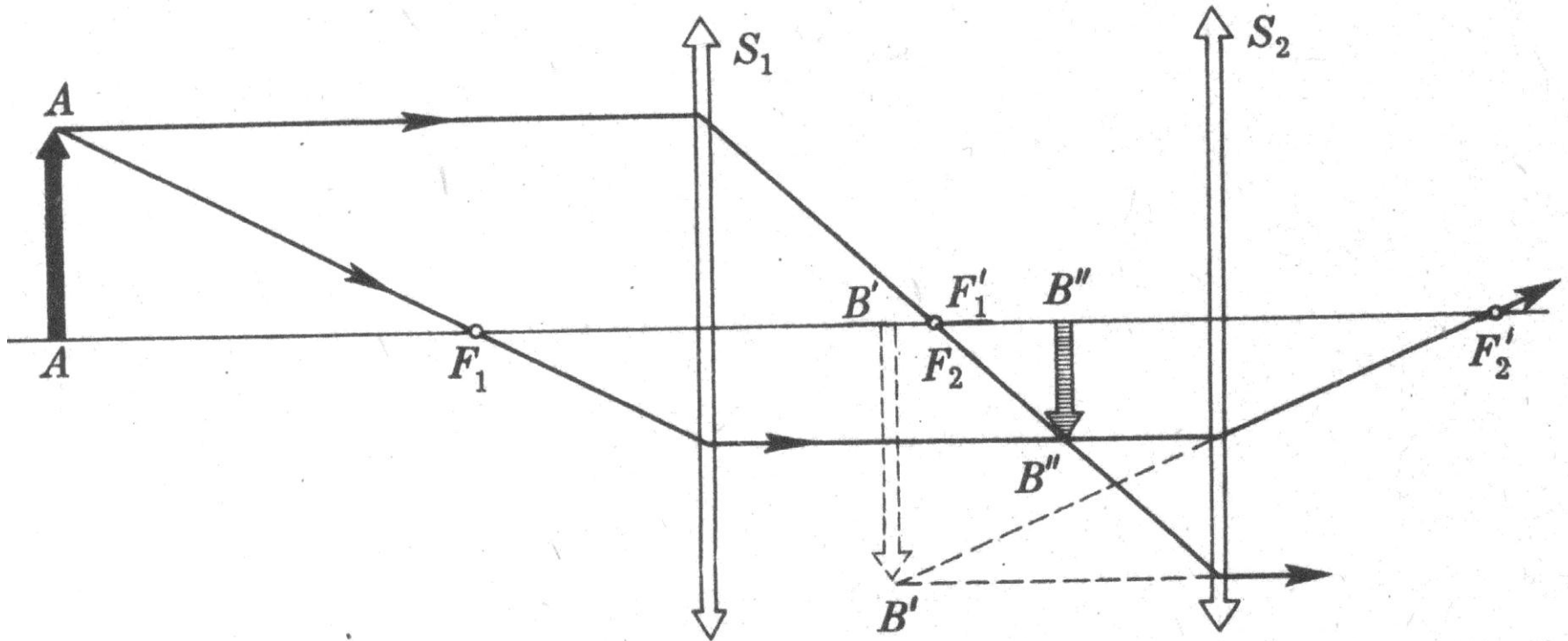
Odległość dobrego widzenia - odległość, dla której oko ludzkie widzi ostry obraz o maksymalnie dużym powiększeniu, ale nie musi akomodować („przystosowywać się”) do widzenia w odległości innej, niż wynika z „fizjologicznego” ustawienia mięśni oka.

$$D = 25\text{cm}$$

- **Aperturę** lupy ogranicza źrenica oka. Pole widzenia zależy od położenia oka względem lupy.

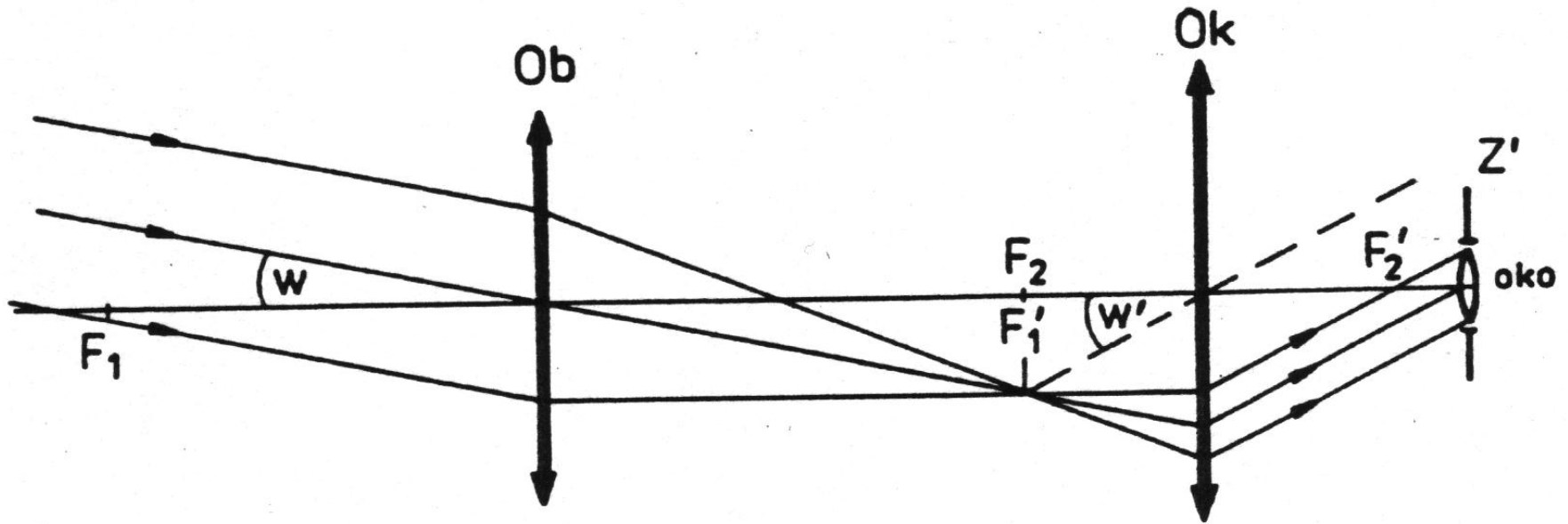
Przyrządy optyczne - luneta

- **Luneta** to przyrząd, służący do obserwacji przedmiotów dużych, ale odległych – luneta tworzy obraz tego przedmiotu **pomniejszony**, ale w **bliższej** odległości od oka. Składa się z **obiektywu** (układ o dużej ogniskowej i dużej średnicy) i **okularu** (układ o małej ogniskowej i małej średnicy).



Przyrządy optyczne - luneta

- Układ lunety jest **układem teleskopowym** = bezogniskowym (ognisko obrazowe obiektywu pokrywa się (niemal) z ogniskiem przedmiotowym okularu).

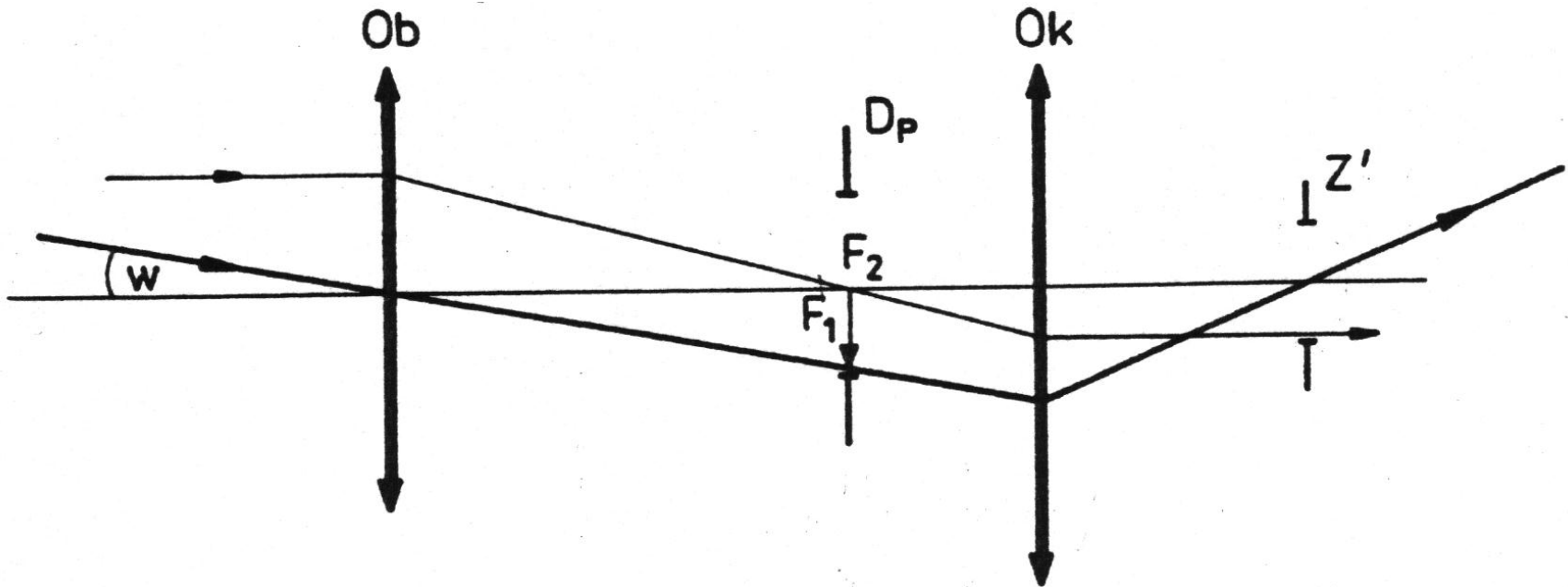


Powiększenie wizualne lunety określa wzór:

$$\Gamma = \frac{f_{ob}'}{f_{ok}'}$$

Przyrządy optyczne - luneta

- Bieg promieni polowych i aperturowych w lunecie Keplera:



- Powiększenie wizualne lunety równe jest stosunkowi średnic źrenic: **wejściowej**, którą tworzy zwykle **przesłona aperturowa**, będąca **oprawą obiektywu** i **wyjściowej**, którą jest **żrenica oka**. Wielkość źrenicy oka (2-8 mm) decyduje więc o aperturze i jasności lunety.

Przyrządy optyczne - luneta

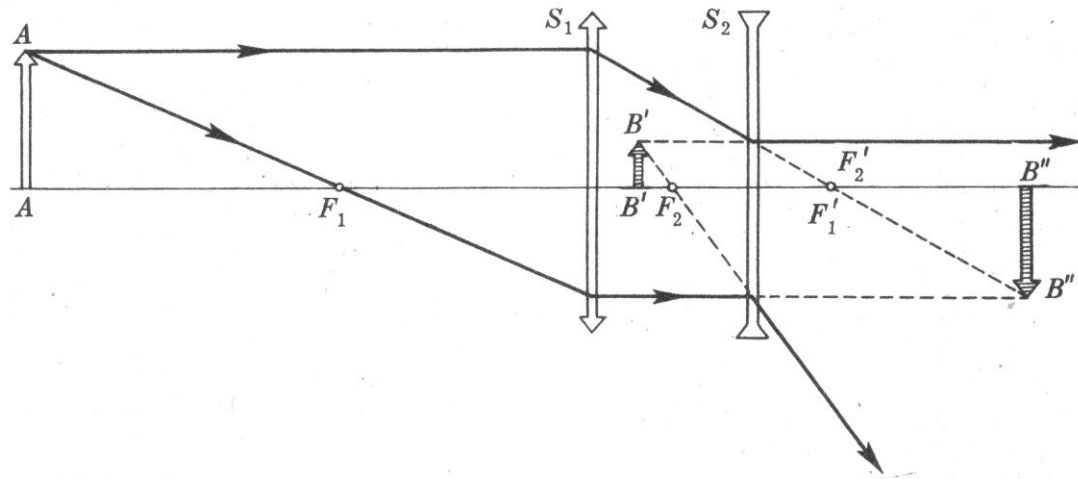
- **Typy lunet:**

- astronomiczne refraktory (Keplera) – dwa układy soczewkowe, zbierające;
- astronomiczne reflektory – układy zwierciadlane;
- ziemskie (nieodwracające) – z dodatkową soczewką pomocniczą, - odwracającą obraz (też: lornetki);
- ziemskie (holenderskie) Galileusza – z okulem rozpraszającym.

- **Luneta ziemska typu Galileusza:**

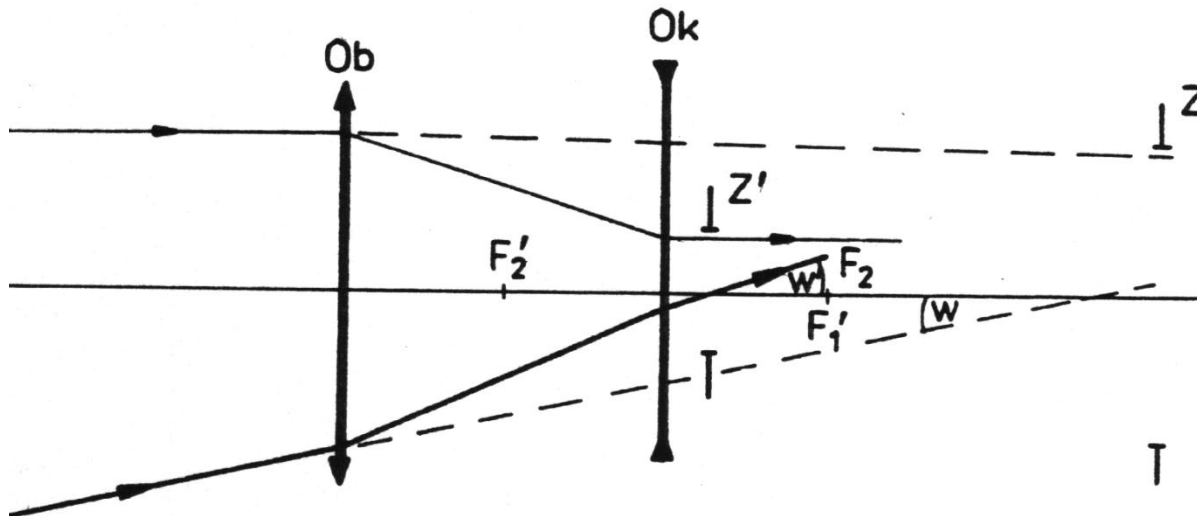
Dwa układy:

- skupiający obiektyw (jak w astronomicznej);
- rozpraszający okular (dzięki temu obraz jest urojony, ale nie odwrócony).



Przyrządy optyczne - luneta

- Bieg promieni aperturowych i polowych w lunecie Galileusza:



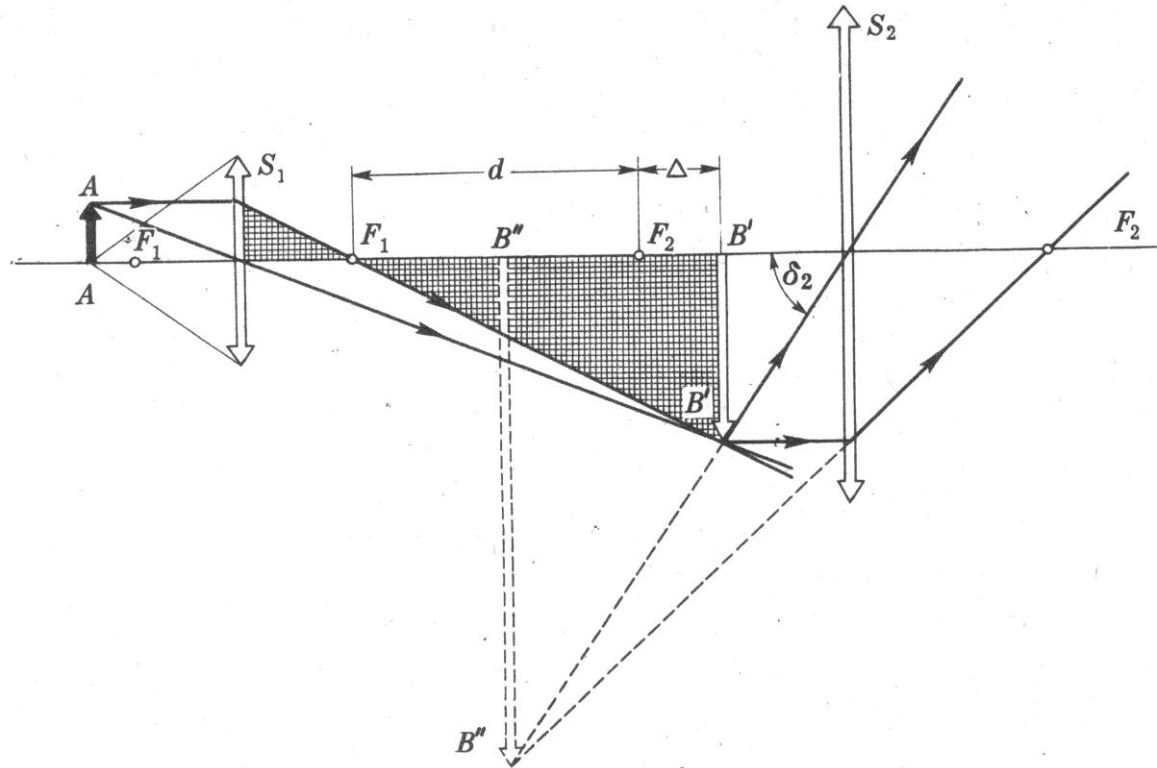
- W lunecie tej nie można ograniczać apertury oprawą obiektywu. Obraz tej oprawy jest urojony i powstaje pomiędzy obiektywem i okulem. **Jedynym ograniczeniem jest więc zawsze źrenica oka!** Oprawa obiektywu pełni teraz rolę przysłony polowej.
- Ze względów konstrukcyjnych (korekcja aberracji dla układów rozpraszających jest trudniejsza) lunety ziemskie mają zwykle dużo mniejsze powiększenia od astronomicznych.

Przyrządy optyczne - mikroskop

- **Mikroskop** to przyrząd do obserwacji przedmiotów małych, znajdujących się blisko obserwatora. Składa się ze skupiającego **obiektywu** o krótkiej ogniskowej, który daje rzeczywisty, powiększony i odwrócony obraz przedmiotu i **okularu**, również skupiającego, który pełni rolę lupy, przez którą oglądamy obraz dawany przez obiektyw.

$$W = \frac{d \cdot D}{f_{ob}' \cdot f_{ok}'}$$

d - długość tubusu
(ok. 17cm)



Przyrządy optyczne - mikroskop

- **Obiektyw** daje obraz rzeczywisty, odwrócony, powiększony:

$$\beta_{ob} = -\frac{d + \Delta}{f'_{ob}}$$

- **Okular** działa jak lupa. Jego powiększenie wizualne wynosi:

$$w_{ok} = \frac{D}{f'_{ok}}$$

- Całkowite powiększenie typowego mikroskopu jest równe:

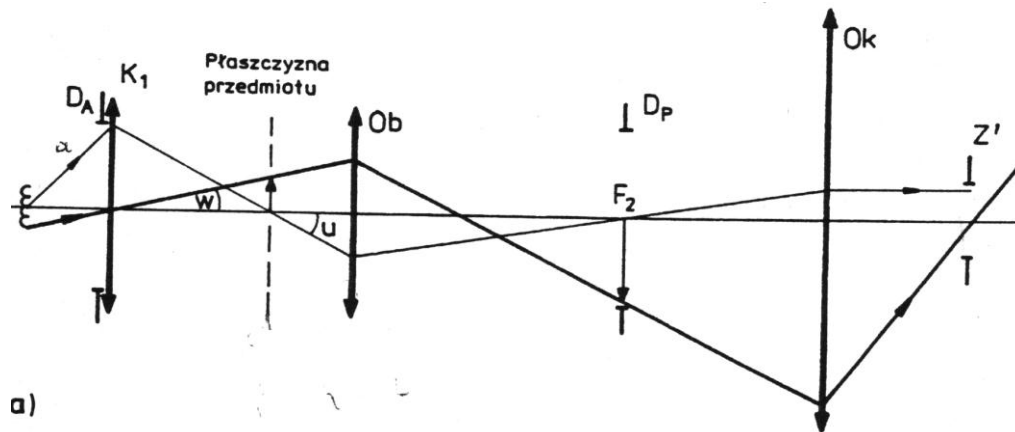
$$w = \beta_{ob} w_{ok} = -\frac{(d + \Delta)D}{f'_{ob} f'_{ok}} \approx -\frac{dD}{f'_{ob} f'_{ok}}$$

- W typowym mikroskopie maksymalne powiększenia są nie większe niż 2000 (obiektyw x100, okular x16). Większe powiększenia uzyskać trudno ze względu na dyfrakcję światła na soczewkach. W przypadku dużych obiektywów (x100) stosuje się **ciecze immersyjne** w celu zwiększenia kąta aperturowego. **Apertura numeryczna** obiektywu:

$$NA = n \sin u$$

Przyrządy optyczne - mikroskop

- Ważnym elementem mikroskopu jest jego układ oświetlający. Elementem odpowiedzialnym za geometrię wiązki oświetlającej jest **kondensor**.
- Stosowane są powszechnie dwa typy oświetlenia przedmiotu:
 - przy **oświetleniu krytycznym** obraz źródła światła (włókno żarówki oświetlacza) odwzorowany jest w płaszczyźnie przedmiotu.

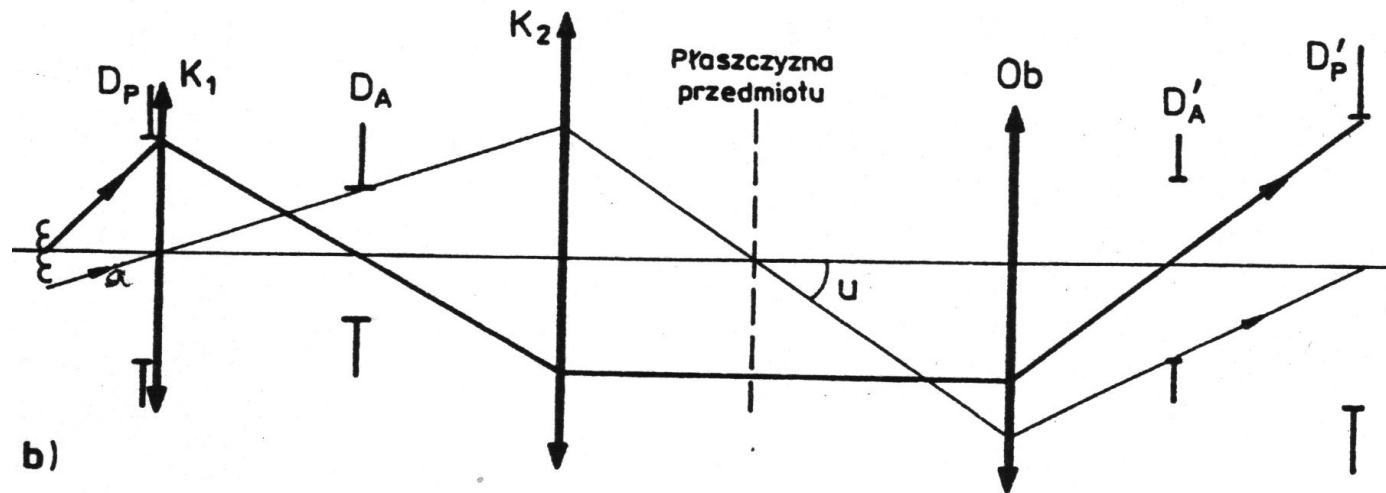


Oświetlenie krytyczne umożliwia zmianę apertury mikroskopu poprzez zmianę apertury kondensora.

Aby preparat był oświetlony równomiernie, włókno żarówki oświetlacza musi być rozciągnięte i mieć stałą luminancję na całej powierzchni.

Przyrządy optyczne - mikroskop

- Przy oświetleniu **typu Köhlera** źródło światła odwzorowane jest w płaszczyźnie przesłony aperturowej obiektywu.

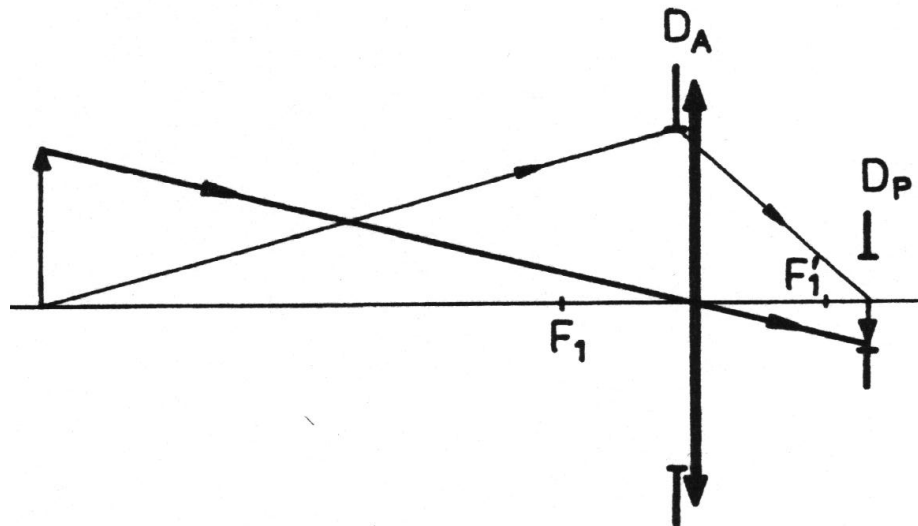


Układ Köhlera pozwala na równomierne oświetlenie przedmiotu. Dodatkowy kolektor K_1 odwzorowuje źródło światła na płaszczyznę aperturową kondensora. Obie przesłony – aperturowa i polowa – znajdują się w układzie kolektor-kondensor.

Przyrządy optyczne

– aparat fotograficzny

- Aparat fotograficzny służy do odwzorowania przedmiotu na kliszy fotograficznej za pomocą obiektywu. Przedmiot zwykle znajduje się daleko (tzn. odległość przedmiotowa jest dużo mniejsza niż ogniskowa obiektywu) więc obraz powstaje tuż za ogniskiem obrazowym.



- Aperturę obiektywu fotograficznego ogranicza regulowana **przesłona irysowa** w obiektywie. O polu widzenia decyduje wielkość kliszy.

Przyrządy optyczne

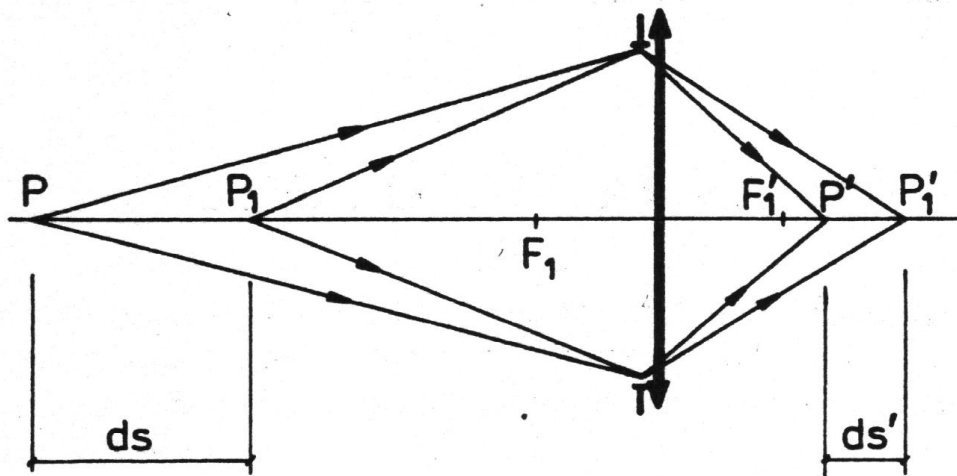
– aparat fotograficzny

- W procesie rejestracji obrazu ważna jest **wielkość oświetlenia** w płaszczyźnie kliszy. Oświetlenie to jest proporcjonalne do kwadratu odwrotności liczby otworowej $N=f/D$:

$$E = k \left(\frac{D}{f} \right)^2$$

Odwrotność liczby otworowej nazywana jest **otworem względnym** (jasnością) i zapisywana w postaci: $1: f / D$

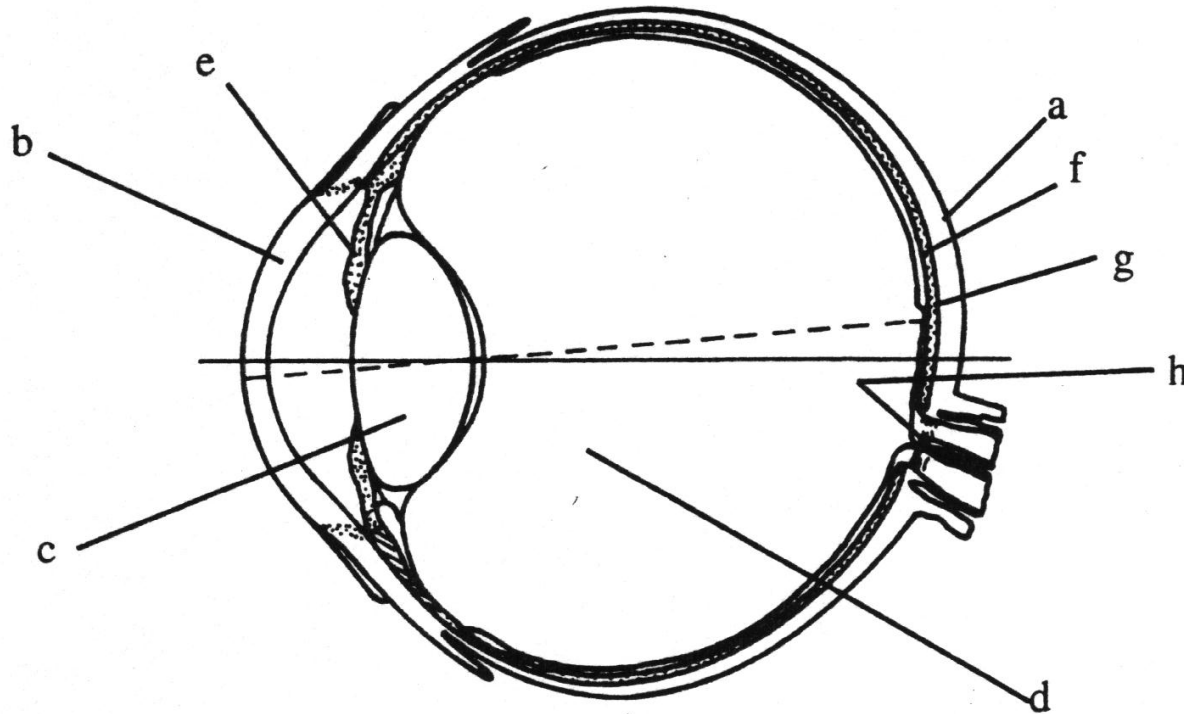
- Obiektyw fotograficzny powinien charakteryzować się dużym polem widzenia. Ważna jest też tzw. **głębina ostrości**.



Im krótsza ogniskowa obiektywu, tym większa głębina ostrości.

Oko

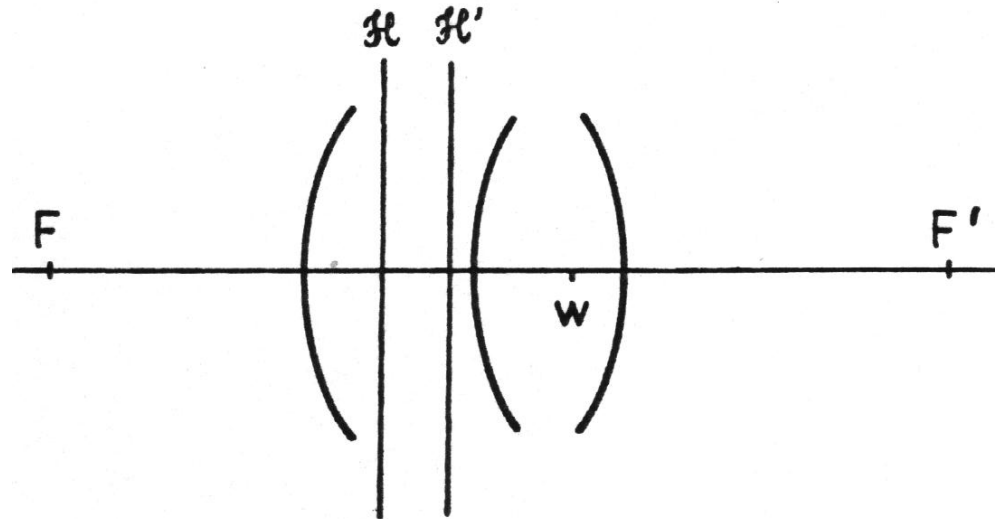
- Oko ma kształt kuli o średnicy ok. 25 mm.



a – twardówka; b – rogówka; c – soczewka oczna (dwuwypukła) zbudowana z materiału o zmiennym współczynniku załamania, średnio równym 1,437; d - ciało szkliste (bezbarwny płyn); e - tęczówka z otworem źrenicy; f – siatkówka; g – żółta plamka; h – plamka ślepa i nerw wzrokowy.

Oko

- Układ optyczny oka składa się z trzech powierzchni załamujących: jednej rogówki i dwóch soczewki. Uproszczony schemat optyczny oka:

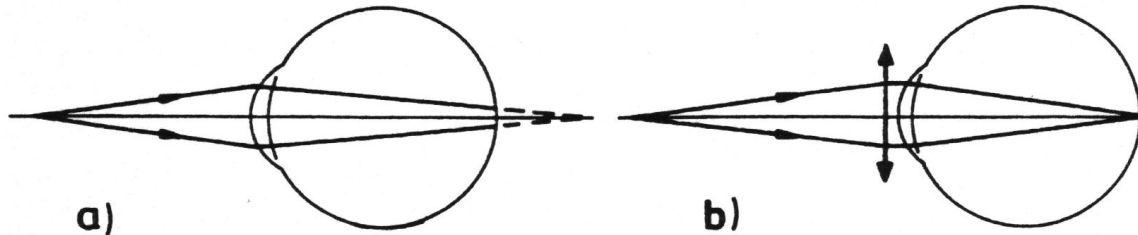


- Zdolność zbierająca soczewki ocznej standardowego oka wynosi 21,8 dioptrii a rogówki – 59,9 dioptrii.
- Zmiana ogniskowej układu optycznego oka odbywa się przy pomocy odpowiednich mięśni dzięki zmianie promieni krzywizn soczewki – **akomodacji**.

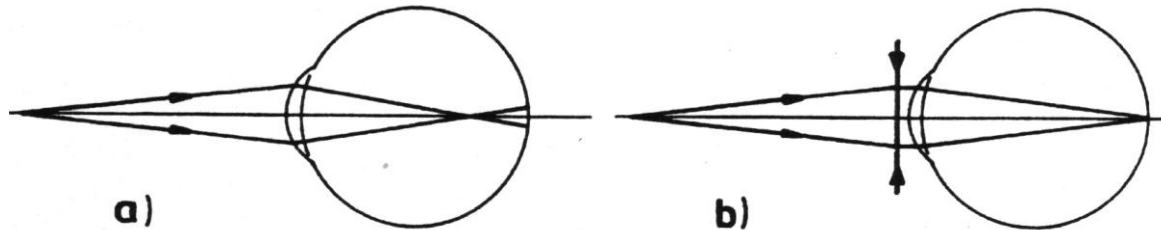
Oko

- Oko **nieakomodowane** przystosowane jest do obserwacji przedmiotów w nieskończoności. Akomodacja pozwala standardowemu oku obserwować przedmioty od nieskończoności do ok. 10 cm. Najmniejsza odległość, przy której oko nie odczuwa zmęczenia mięśni napinających soczewkę nazywa się **odległością dobrego widzenia** – $D=25\text{ cm}$.

- **Dalekowzroczność** – wada, polegająca na tym, że długość gałki ocznej jest za mała w stosunku do zdolności zbierającej nieakomodującego oka.



- **Krótkowzroczność** – wada, polegająca na tym, że długość gałki ocznej jest za duża w stosunku do zdolności zbierającej nieakomodującego oka.

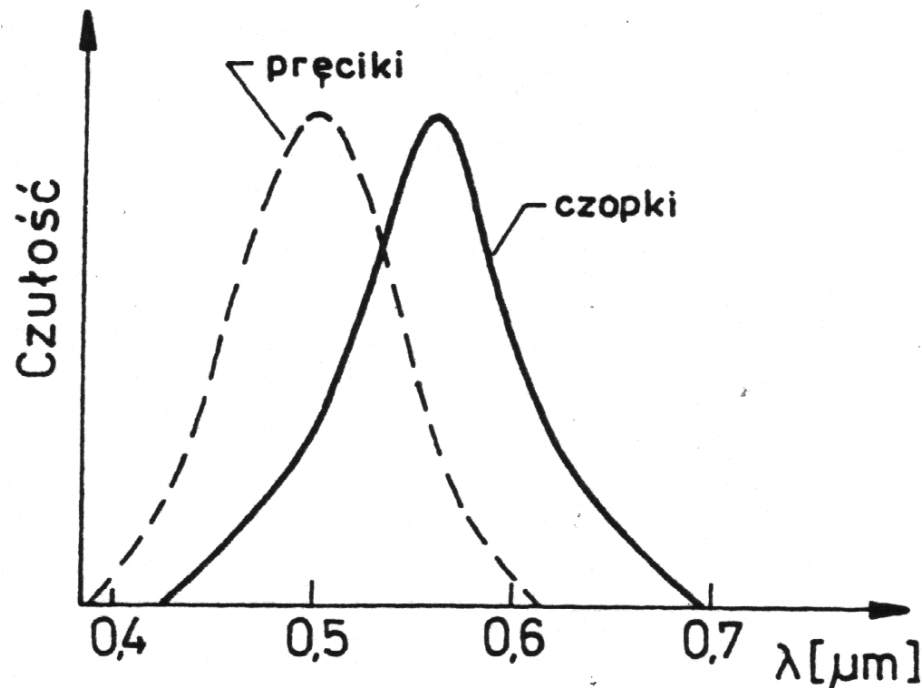


- **Starczowzroczność** – z wiekiem soczewka traci elastyczność, maleje siła mięśni akomodujących, więc zmniejsza się zakres akomodacji oka.

Oko

- **Siatkówka** jest odbiornikiem światła. Zbudowana jest z komórek światłoczułych zwanych **czopkami** i **pręcikami**, połączonych poprzez nerwy wzrokowe z ośrodkiem widzenia w mózgu.

Czułość pręcików jest kilkadziesiąt tysięcy razy większa od czułości czopków. Czułość zarówno czopków, jak i pręcików, zależy od długości fali odbieranego promieniowania.



Zdolność rozdzielcza oka

- Oko, patrząc na dwa przedmioty, rozróżnia je jako dwa punkty pod warunkiem, że widzi je pod wystarczająco dużym kątem. Graniczna wartość kąta zdolności rozdzielczej zależy od indywidualnych właściwości oka obserwatora, wielkości czynnej źrenicy oka, rodzaju obserwowanych przedmiotów, ich oświetlenia i kontrastu. Wynosi ona średnio 60'' (sekund) – inaczej 1' (minuta).

- Przy normalnej, długotrwałej pracy oka, jego zdolność rozdzielczą wyrażoną w minutach można określić jako:

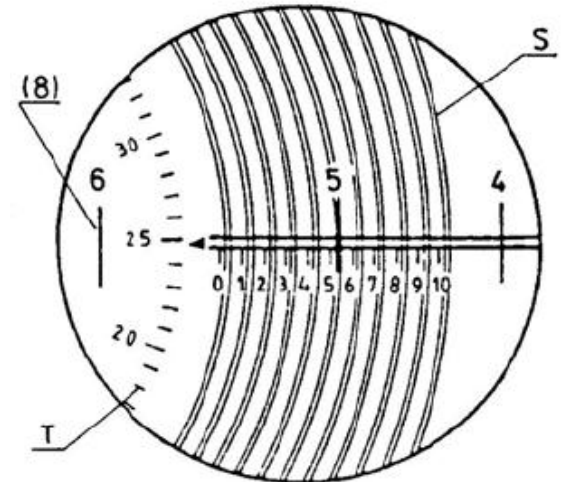
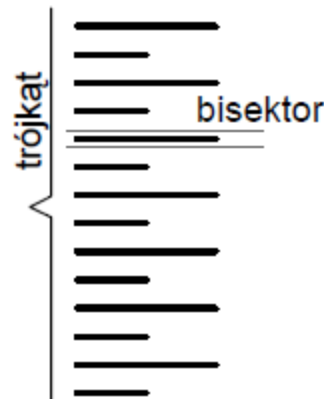
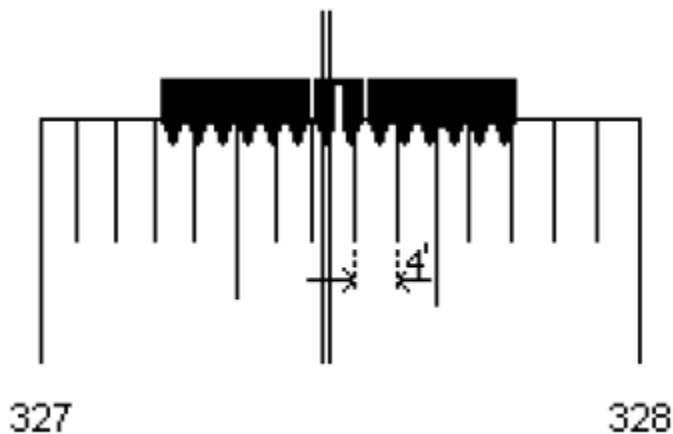
$$\varphi = \frac{1}{0,62 - \frac{0,13}{d_z}}$$

gdzie d_z jest średnicą czynną źrenicy oka, wyrażoną w milimetrach.

- Przy zbyt słabym lub zbyt silnym oświetleniu zdolność rozdzielcza oka pogarsza się. Należy zwracać uwagę, aby oświetlenie obrazów obserwowanych podziałek i przedmiotów wynosiło 50-250 luksów.

Zdolność rozdzielcza oka

- Pokrywając końce dwóch kresek pomiarowych (o jednakowej grubości) tak, aby tworzyły jedną linię, nie popełnia się błędu większego niż 10-15". Z odległości dobrego widzenia $D=250$ mm odpowiada to niezgodności ok. 0,02 mm.
- Przy wprowadzaniu pojedynczej kreski pomiarowej pomiędzy dwie kreski tzw. bisektora odchylenie to jest mniejsze i wynosi ok. 6-10" od symetrycznego ustawienia kreski między kreskami bisektora. Podobna dokładność otrzymamy przy naprowadzaniu pojedynczej kreski na szczelinę lub pojedynczej kreski na skrzyżowanie kresek w ten sposób, że pojedyncza kreska stanowi dwusieczną kąta między skrzyżowanymi kreskami.



Zdolność rozdzielcza oka

- Jeśli oko patrzy przez **lunetę** o powiększeniu Γ wówczas zdolność rozdzielcza układu oko-luneta (o ile nie nastąpi jej pogorszenie na wskutek dyfrakcji na oprawie obiektywu lunety) wynosi:

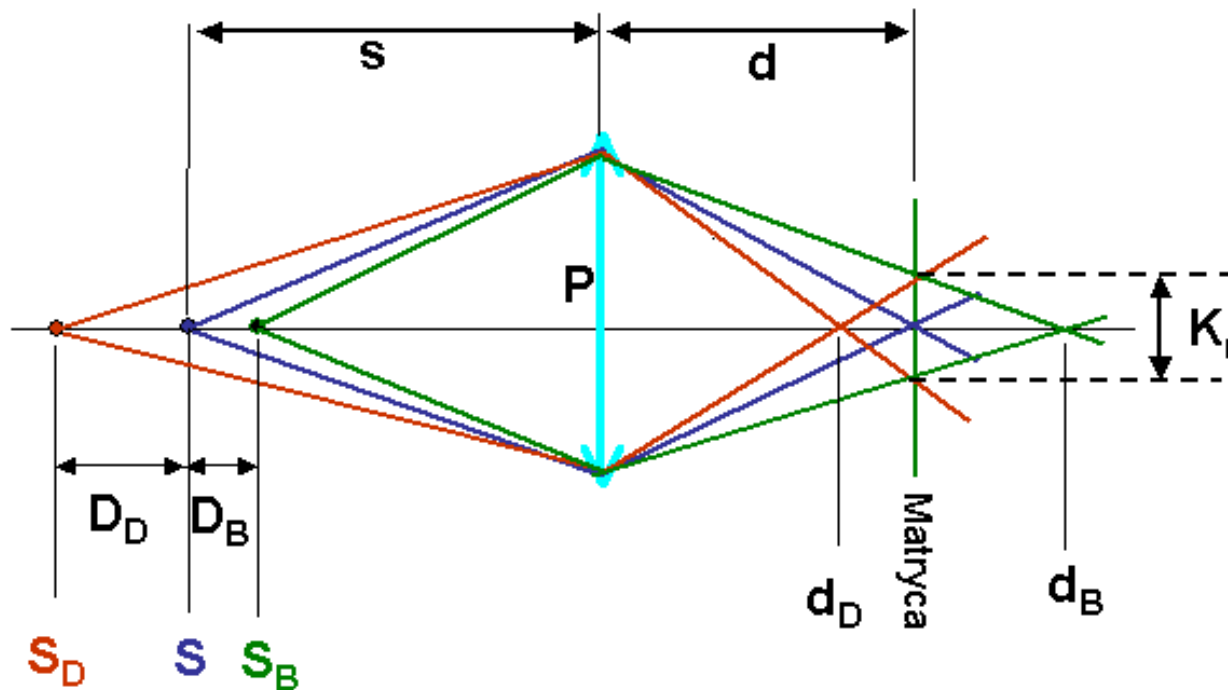
$$\Phi = \frac{\varphi}{\Gamma}$$

- W przestrzeni przedmiotowej **mikroskopu** lub **lupy** o powiększeniu **w liniowa** zdolność rozdzielcza (wyrażona w mm) wynosi:

$$w \approx 73 \cdot 10^{-3} \cdot \frac{\varphi}{\Gamma}$$

Głębia ostrości

- Siatkówka oka składa się z oddzielnych komórek, będących elementami światłoczułymi. Ostrość widzenia punktu nie zostaje naruszona nawet wtedy, gdy obraz tego punktu powstaje nie na samej siatkówce, lecz przed lub za nią, jeśli tylko wymiary plamki dyfrakcyjnej nie przekraczają wymiarów elementu światłoczułego oka (czopka lub pręcika).



Głębia ostrości

...the scales on a lens barrel
hyperfocal distance opposite
you are using. If you then
the depth of field will
ce to infinity. ◁ For
amera has a hyperfo
e focus at 18 feet.

Głębia ostrości

- Przy fotografowaniu z małej odległości głębia ostrości ulega zmniejszeniu. Można ją rozszerzyć zmniejszając średnicę otworu przysłony, jednak poniżej pewnego rozmiaru otworu dalsza poprawa głębi nie jest już możliwa z uwagi na zjawiska dyfrakcyjne. Dyfrakcja powoduje rozmycie całego obrazu, niezależnie od odległości odwzorowywanych obiektów.
- Dzięki komputerowej obróbce obrazu możliwe jest sztuczne zwiększenie głębi ostrości makrofotografii poprzez złożenie ze sobą fragmentów zdjęć wykonanych z różnymi nastawami ostrości. Stos uzyskanych w ten sposób zdjęć poddaje się obróbce cyfrowej, polegającej na wyborze najostrzejszych odwzorowań poszczególnych obszarów. Głębia ostrości obrazu wynikowego rozciąga się od strefy ostrości pierwszego do ostatniego zdjęcia. Dzięki procesowi składania zdjęć można otrzymać makro- i mikrofotografie o głębi ostrości całkowicie nieosiągalnej metodami czysto optycznymi.