



OPTYKA INSTRUMENTALNA

Wykład 8: PRZYZRZĄDY OPTYCZNE III: mikroskopy – budowa, rodzaje oświetlenia i sposoby obserwacji (jasne i ciemne pole), bieg promieni charakterystycznych, zdolność rozdzielcza; elementy mikroskopów: kondensory, obiektywy, okulary (Huygensa, Ramsdena, Kellnera); rodzaje mikroskopów: biologiczny, stereoskopowy, projekcyjny, warsztatowy, autokolimacyjny, interferencyjny, polaryzacyjny, z kontrastem fazowym); goniometr, dynametr, ława optyczna;

Dr hab. inż. Władysław Artur Woźniak
Katedra Optyki i Fotoniki
Wydział Podstawowych Problemów Techniki
Politechnika Wrocławska

<http://www.if.pwr.wroc.pl/~wozniak/>

Pokój 18/11 bud. A-1



Wprowadzenie

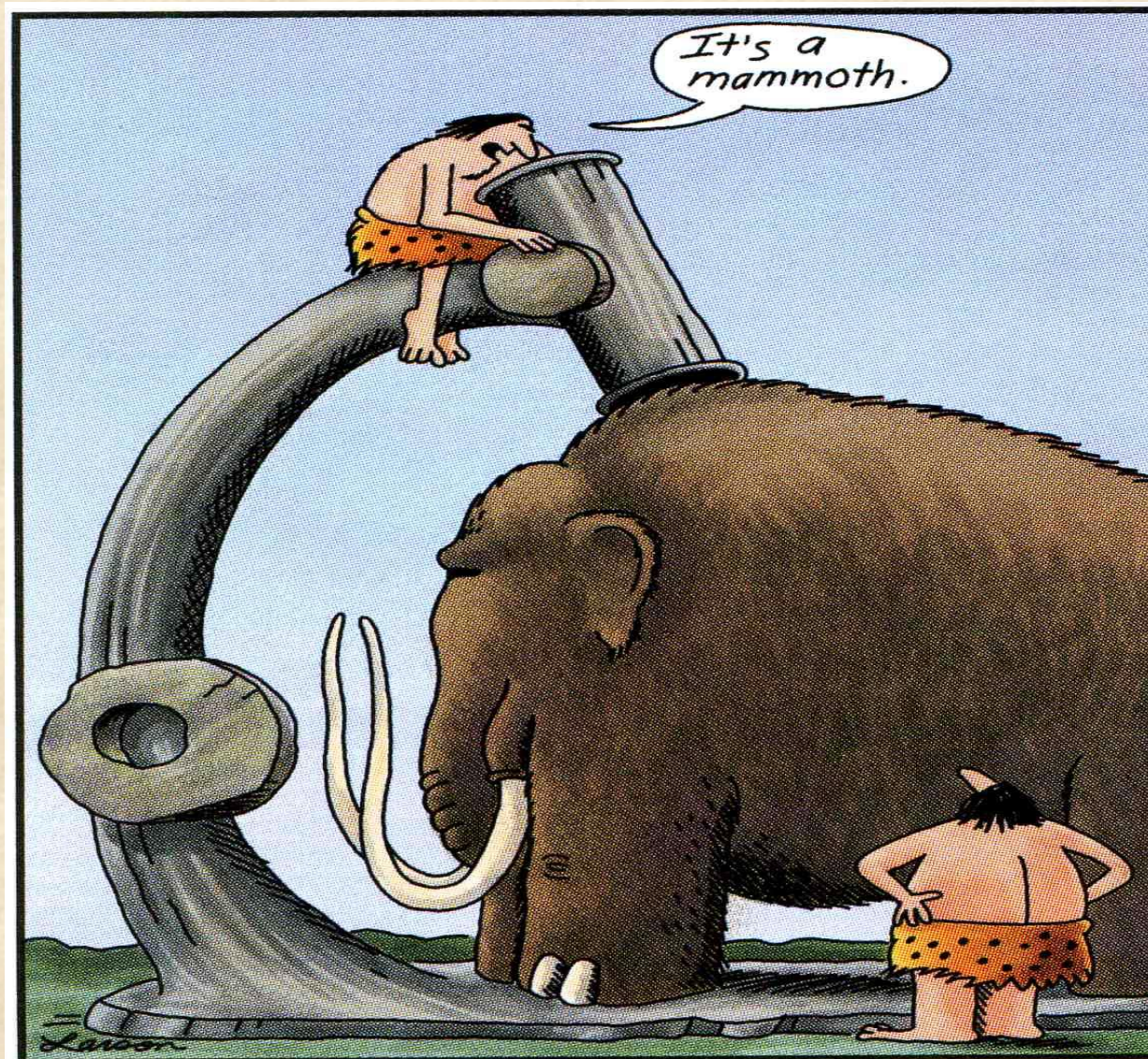
- W poprzednim odcinku:

- LUNETY
- Luneta autokolimacyjna
- Lunety celownicze
- Dalmierze, peryskopy
- Niwelatory, teodolity
- Teleskopy





Mikroskop



Early microscope



Mikroskop

- **Historia** – Hans i Zacharias Janssen (1590 r., ojciec i syn), twórcy pierwszego znanego mikroskopu

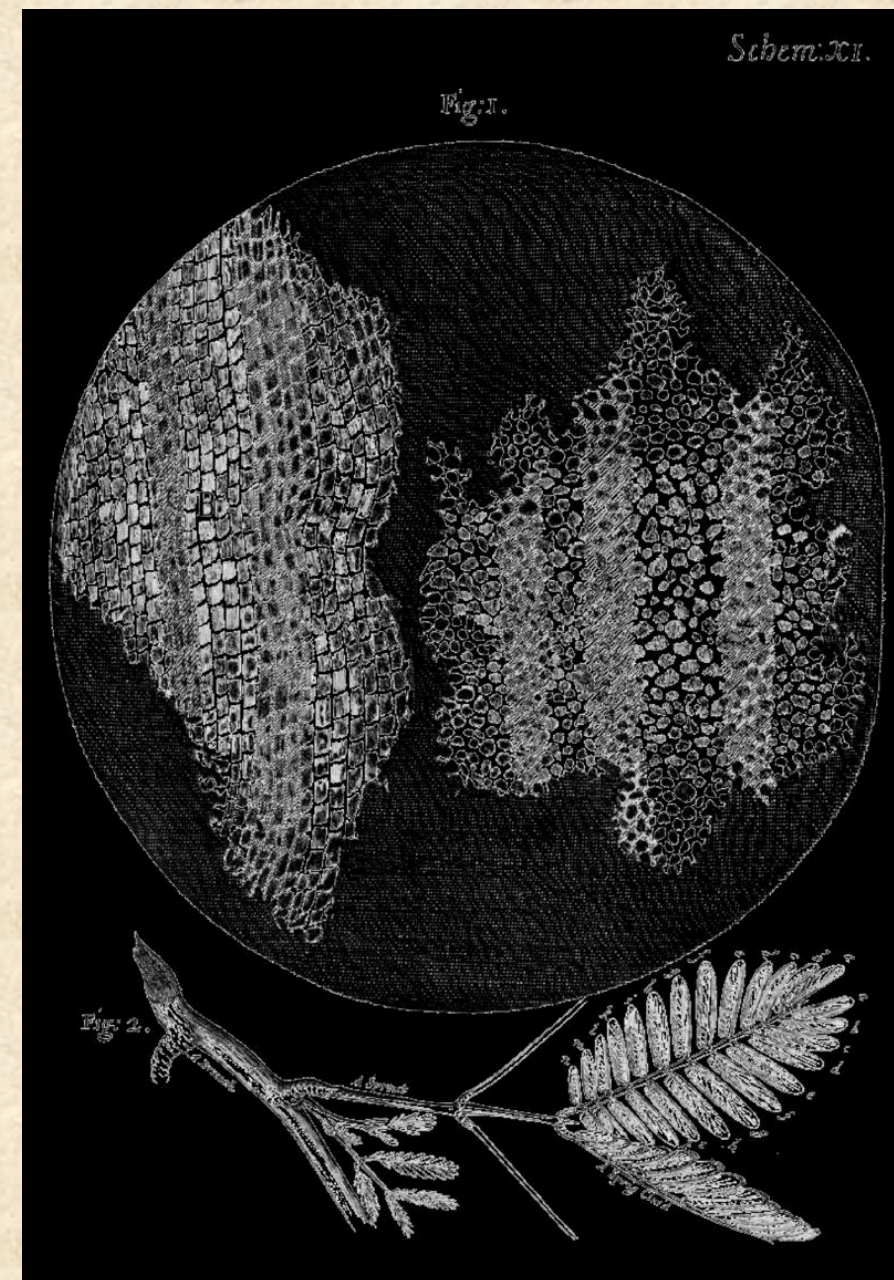


- **Historia** – pierwszy mikroskop opisany przed Towarzystwem Królewskim w Londynie przez Antonie van Leeuwenhoeką w 1674 r. Jego mikroskop powiększał 300 razy. Pierwszy obserwował żywe komórki, bakterie.



Mikroskop

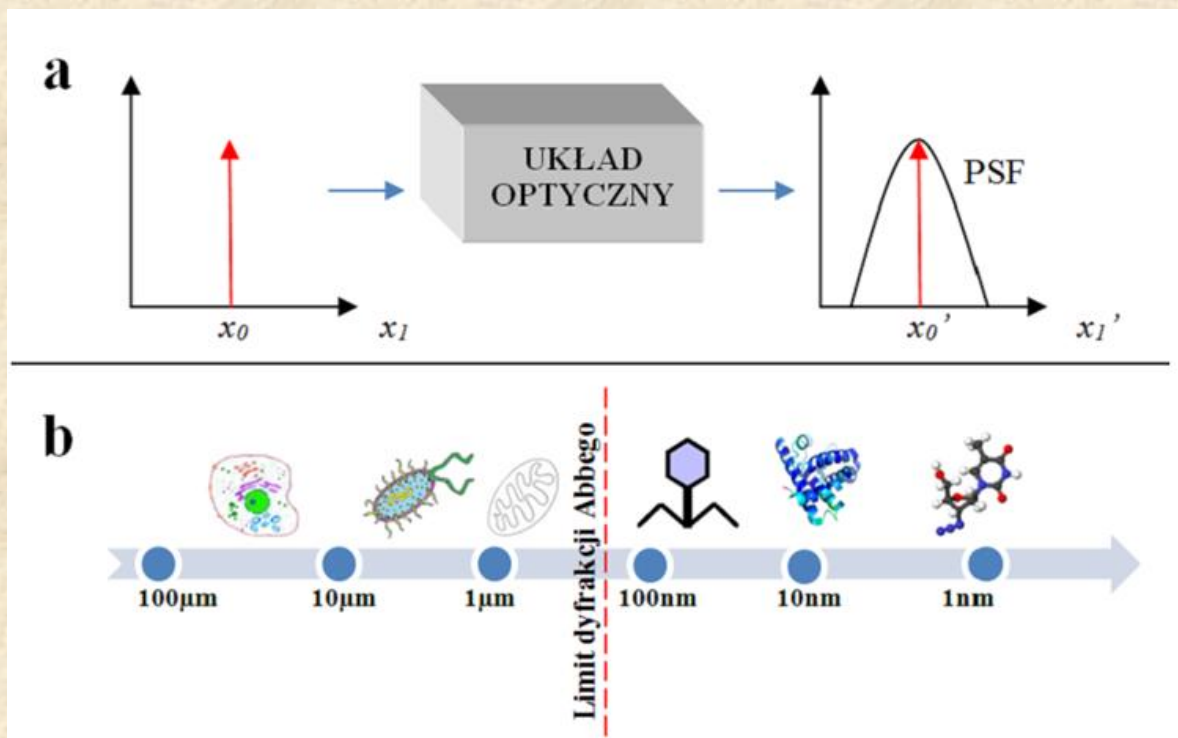
- Historia – Robert Hooke (1665 r.)





Mikroskop

- **Historia** – Ernst Abbé (1872 r.) – twórca skalarnej teorii dyfrakcji, podstawy teoretyczne działania mikroskopu



- wykazał limit dyfrakcji mikroskopii optycznej: obiekt może być widoczny, jeśli jego rozmiary są większe lub równe połowie długości fali:

$$d(x, y) = \frac{\lambda}{2n \sin \alpha}$$



Mikroskop

- **Historia** – Stefan W. Hell, William E. Moerner i Eric Betzig (2014), Nagroda Nobla za rozwój wysokorozdzielczej mikroskopii fluorescencyjnej.
- **Mikroskopy** to cała rodzina przyrządów o różnej konstrukcji mechanicznej i optycznej, w zależności od przeznaczenia:
 - Biologiczne;
 - Metalograficzne;
 - Mineralograficzne;
 - Interferencyjne;
 - Operacyjne (w tym dentystyczne);
 - Warsztatowe;
 - Narzędziowe;
 - Odczytowe;
 - Szkolne ;-)



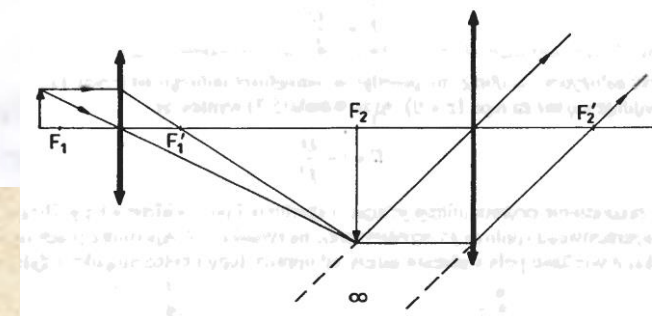
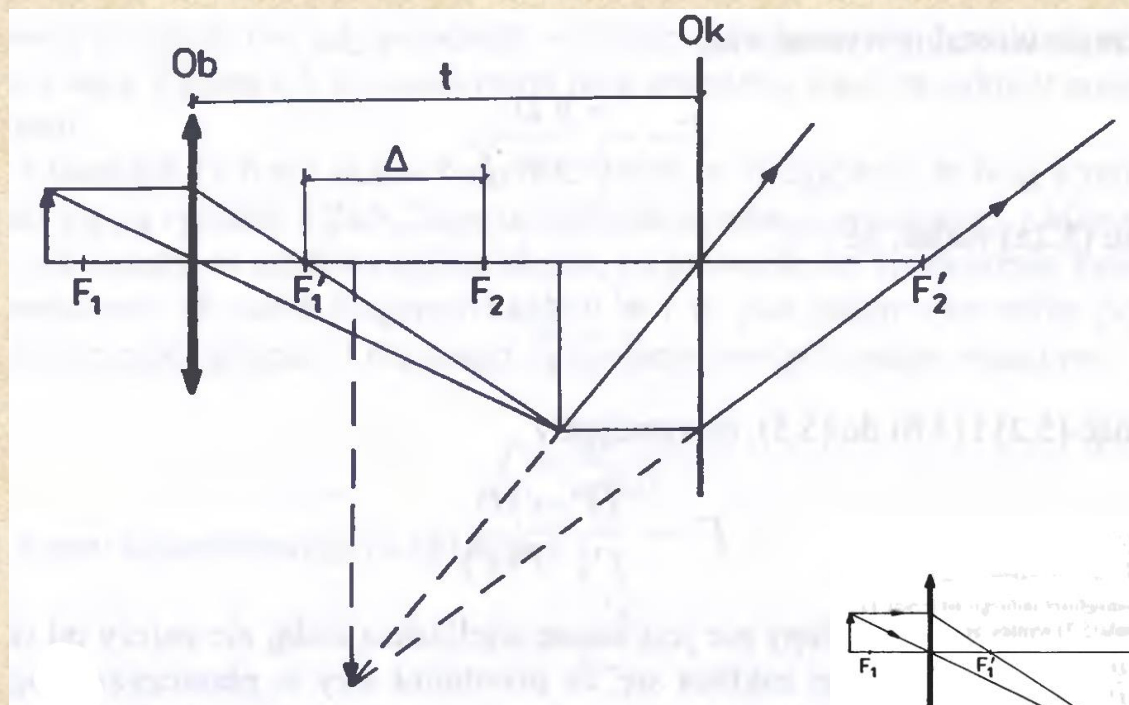
Mikroskop

- **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.

$$W = \frac{t \cdot D}{f'_{ob} \cdot f'_{ok}}$$

t - długość tubusu (tubusa) – ok. 16cm;
UWAGA! To jest odległość między płaszczyznami ogniskowymi, a nie FIZYCZNA długość „rury”!

A co to D , f'_{ob} , f'_{ok} ?

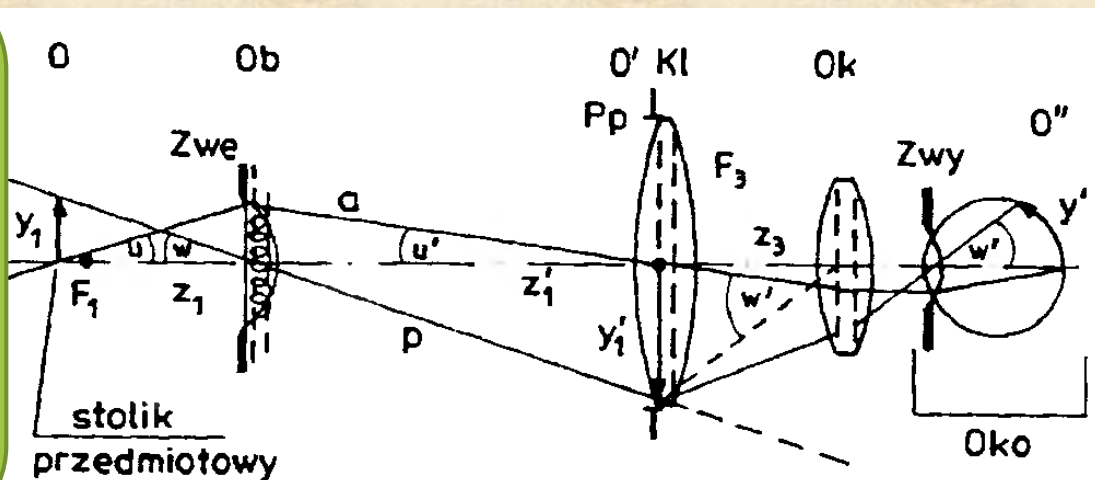




Mikroskop

- Bieg promieni w mikroskopie z oświetlaczem Köhlera

z_{we} – żrenica... wyjściowa obiektywu!



Z – źródło światła

Kn – kondensor

O – obserwowany przedmiot

Ob – obiektyw

O' – obraz pośredni

Kl – kolektyw

Ok – okular

O'' – obraz końcowy

a – promień aperturowy (UWAGA: CZYJ!)

p – promień polowy (UWAGA: CZYJ!)

y_1 – wysokość przedmiotu (max.)

z_1 – odległość przedmiotowa

F_1 – ognisko przedmiotowe obiektywu

y'_1 – wysokość obrazu pośredniego

z_3 – odległość przedmiotowa okularu

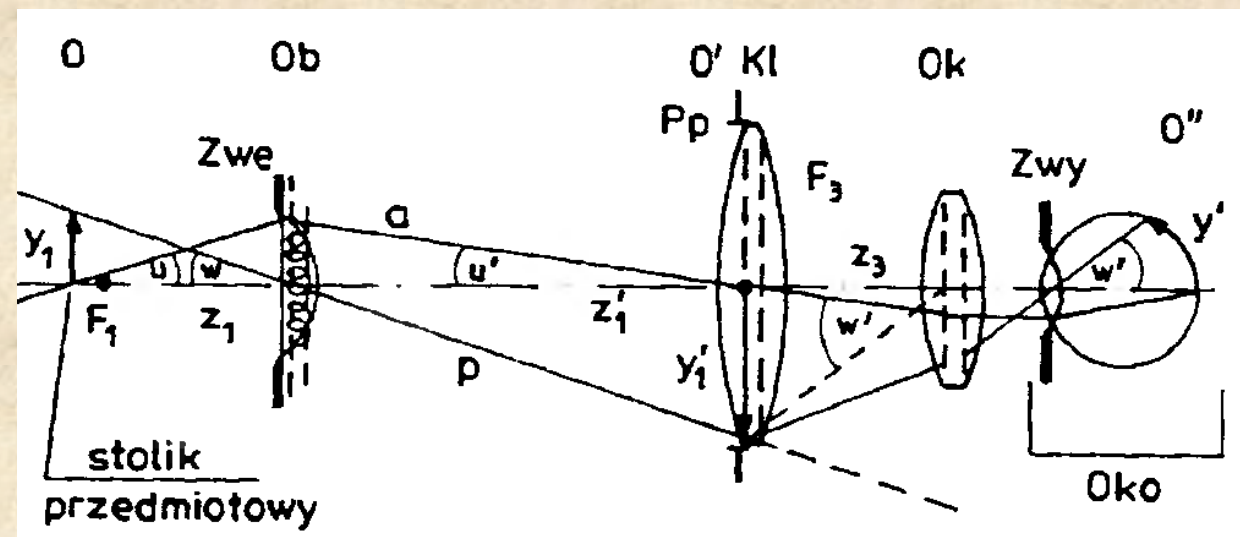
F_3 – ognisko przedmiotowe okularu

y' – wysokość obrazu końcowego



Mikroskop

- Powiększenie wizualne mikroskopu



Obserwacja bez mikroskopu: $\operatorname{tg} w = \frac{y_1}{d}$, d – odległość dobrego widzenia

Obserwacja z mikroskopem: $\operatorname{tg} w' = \frac{y_1'}{z_3}$, z_3 – odległość przedmiotowa okularu

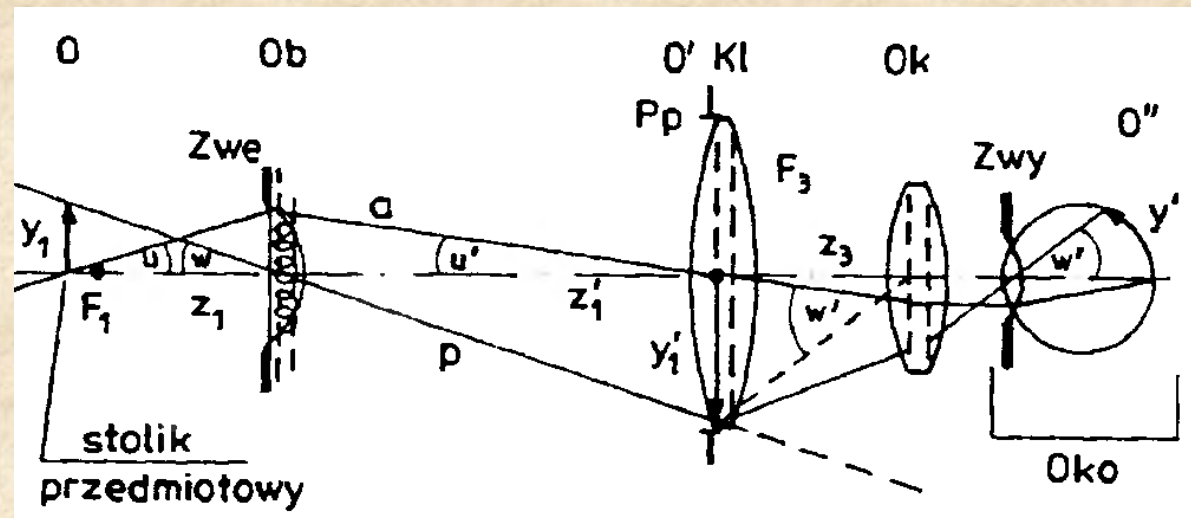
Powiększenie wizualne:

$$\Gamma = \frac{\operatorname{tg} w'}{\operatorname{tg} w} = \frac{dy_1'}{y_1 z_3} = \frac{dz_1'}{z_1 z_3}$$



Mikroskop

- Powiększenie wizualne mikroskopu



Powiększenie wizualne:

$$\Gamma = \frac{\operatorname{tg} w'}{\operatorname{tg} w} = \frac{dy'_1}{y_1 z_3} = \frac{dz'_1}{z_1 z_3}$$

Ponieważ: $z_1 \approx f_1 = -f'_1$

Ponieważ: $z'_1 \approx t$

Ponieważ: $z_3 \approx f_3 = -f'_3$

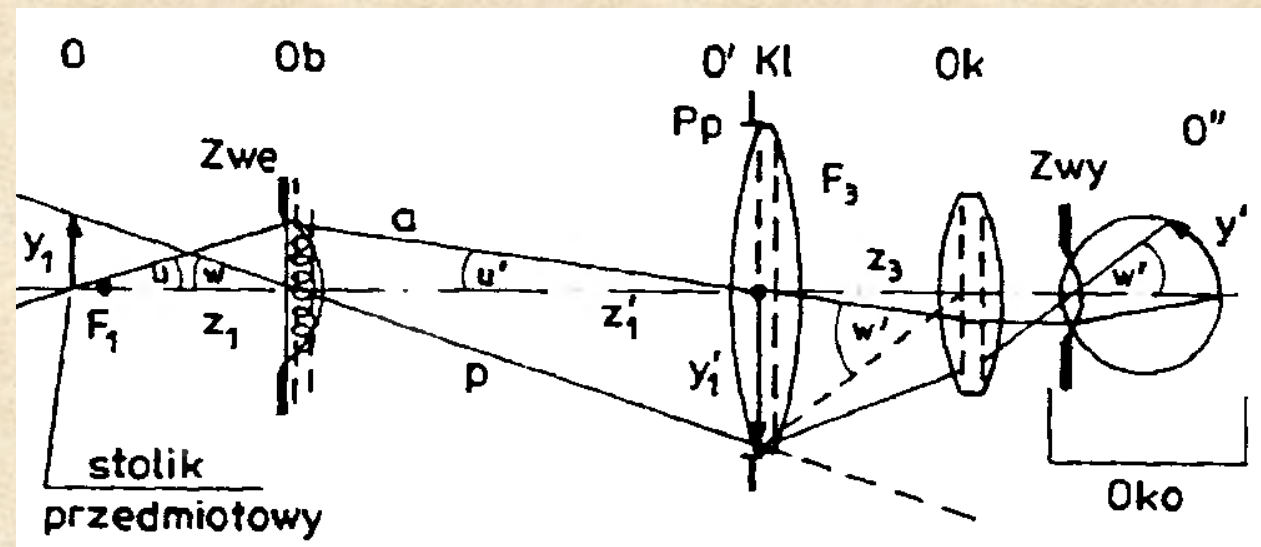
Wówczas powiększenie wizualne mikroskopu można wyrazić wzorem:

$$\Gamma = \frac{dt}{f'_1 f'_3} = \frac{-250\text{mm} \cdot 160\text{mm}}{f'_1 f'_3} = \frac{-4 \cdot 10^4 \text{mm}^2}{f'_1 f'_3}$$



Mikroskop

- Powiększenie wizualne mikroskopu



Ponieważ:

powiększenie poprzeczne obiektywu: $\beta_{Ob} = \frac{t}{f_1}$

powiększenie wizualne okularu: $\Gamma_{Ok} = \frac{250\text{mm}}{f'_3}$

Wówczas wzór na **powiększenie wizualne mikroskopu** przyjmuje postać:

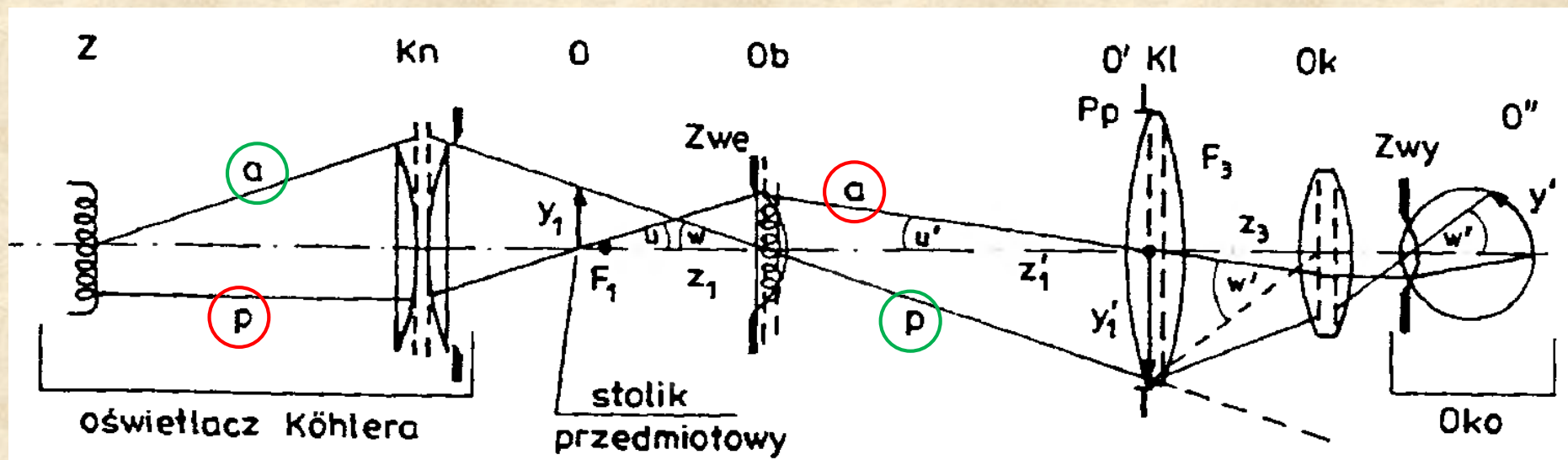
$$\Gamma = \Gamma_{Ok} \beta_{Ob}$$



Mikroskop

- Dwa typy oświetlenia w mikroskopie:

Oświetlacz Köhlera

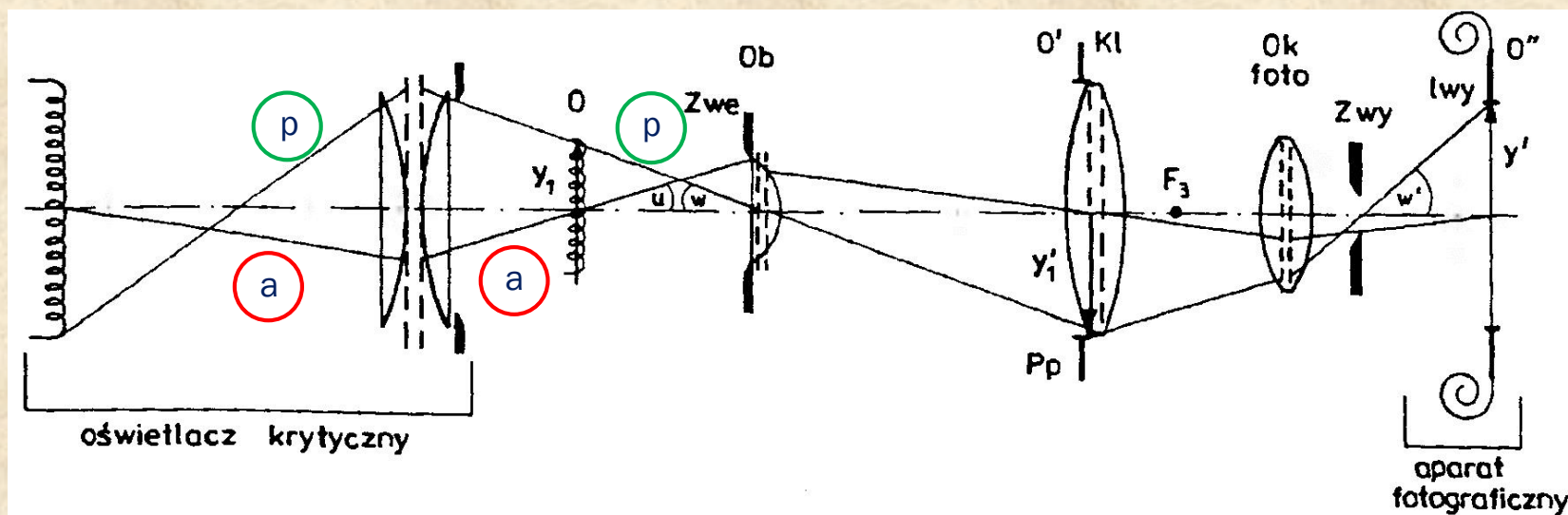


Źródło światła Z jest odwzorowane w źrenicy wejściowej obiektywu mikroskopu, co zapewnia jednorodne oświetlenie przedmiotu.

Mikroskop

- Dwa typy oświetlenia w mikroskopie:

Oświetlacz krytyczny

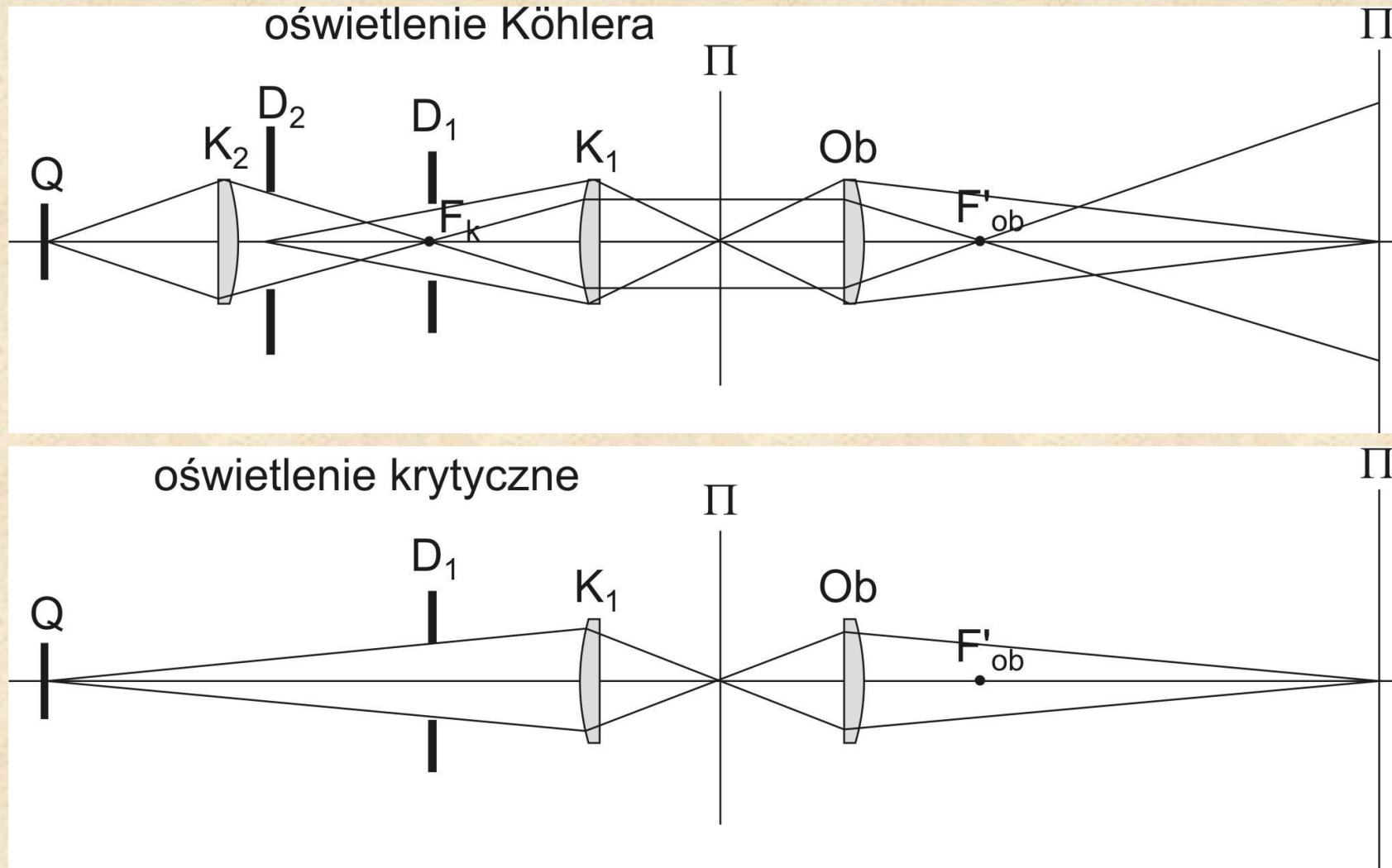


Źródło światła odwzorowane jest w płaszczyźnie przedmiotu – stąd musi być mocno jednorodne (raczej szkło mleczne, matówka).



Mikroskop

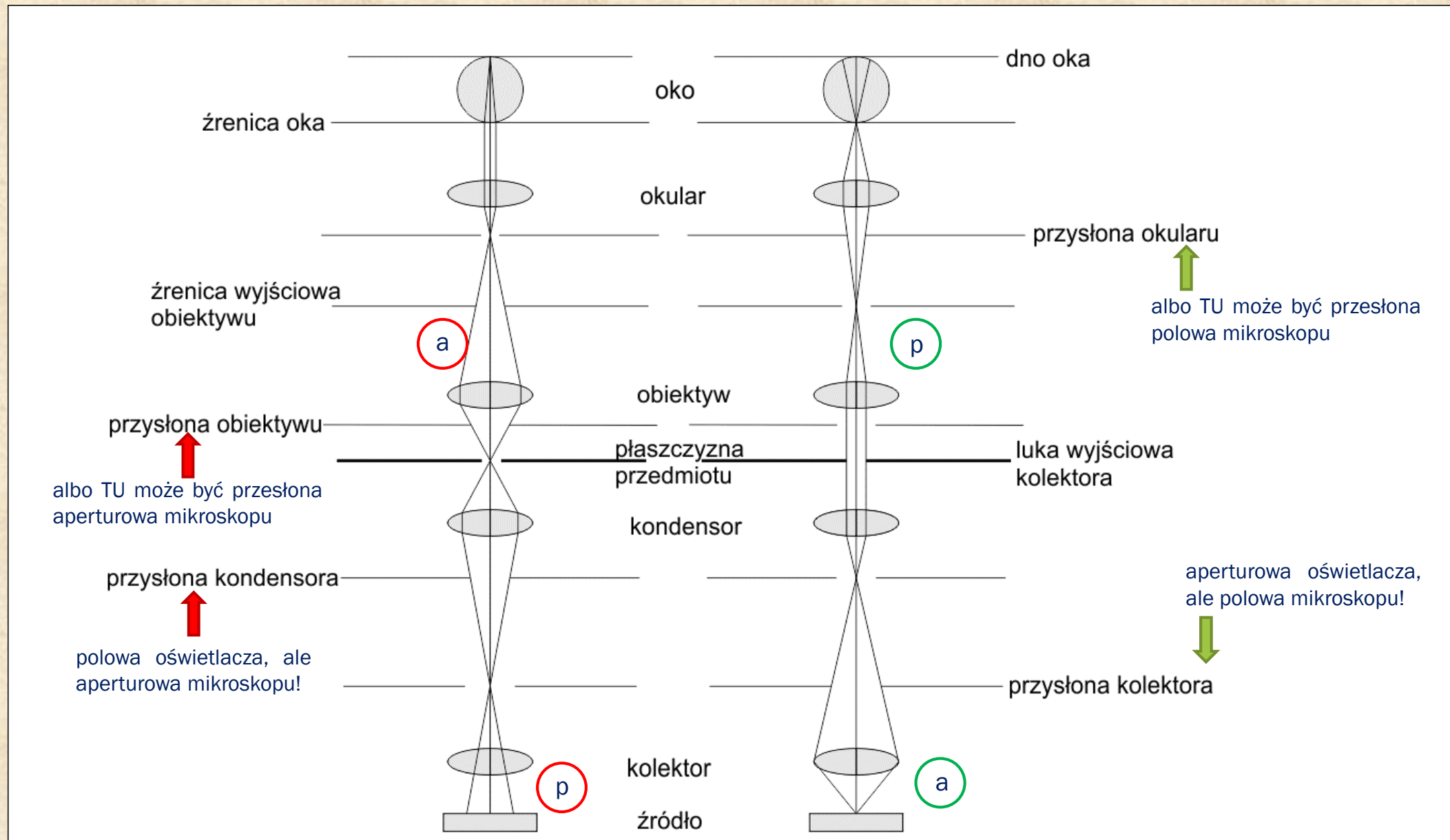
- Dwa typy oświetlenia w mikroskopie:





Mikroskop

- Przysłony, żrenice i luki w mikroskopie (oświetlenie Köhlera)





Mikroskop

- Powiększenie użyteczne mikroskopu wynika z kryterium **zdolności rozdzielczej** (dyfrakcyjna teoria odwzorowania!)



Obraz dyfrakcyjny
w płaszczyźnie
przedmiotowej
okularu

$$\rho = \frac{1,22\lambda}{2NA}$$

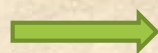
$$\rho' = \beta_{ob} \cdot \rho$$

$$\tan \varepsilon' = \frac{\rho'}{250}$$

$$\Gamma_{ok} = \frac{\tan \varepsilon'}{\tan \varepsilon''}$$

Oko
 $\varepsilon'' > 2'$

$$\Gamma = \beta_{ob} \cdot \Gamma_{ok} = \frac{250\varepsilon''}{\rho}$$

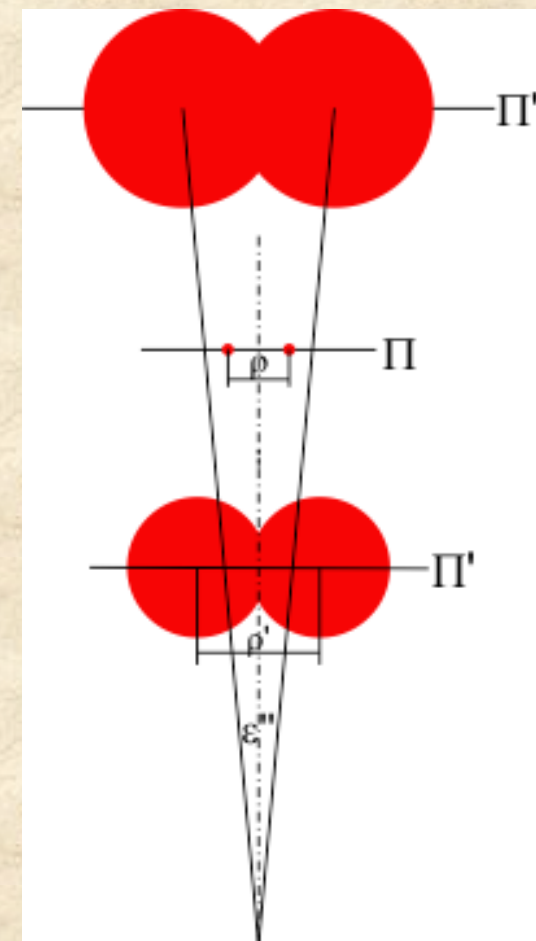


$$\Gamma_{uż} < \frac{0,29}{\rho}$$

$$\lambda = 550nm$$



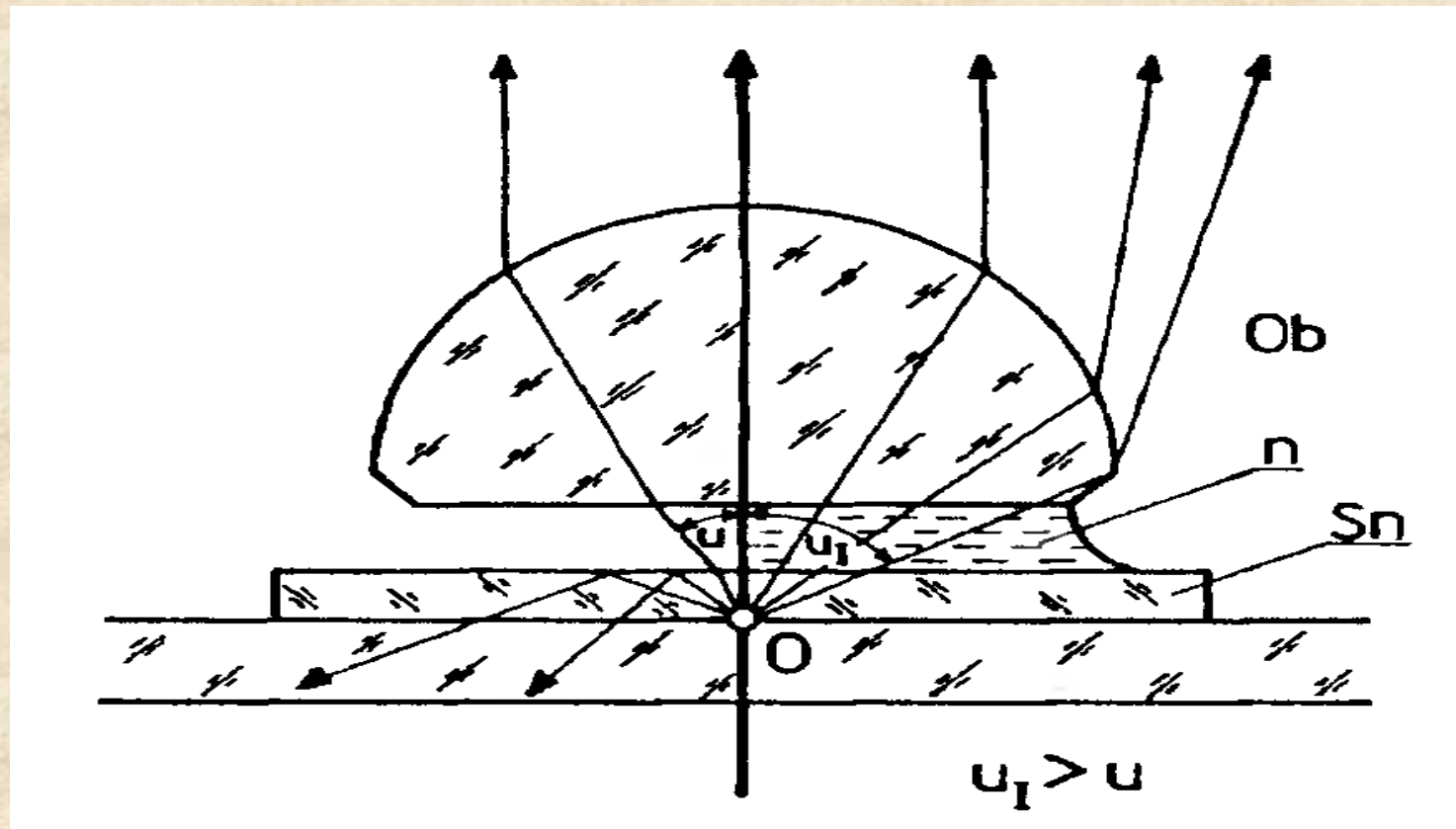
$$\Gamma_{uż} < 1000NA$$





Mikroskop

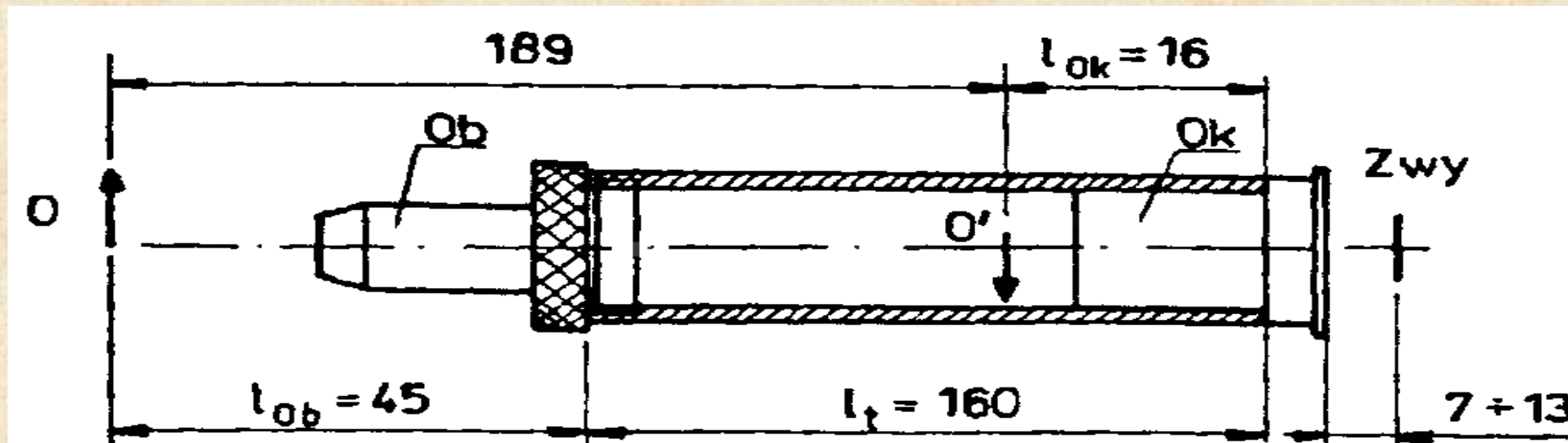
- Zwiększanie zdolności rozdzielczej mikroskopu – immersja (imersja; z łac: „*immergo*” = zanurzam)





Mikroskop

- Parametry konstrukcyjne mikroskopu



l_{ob} – długość obiektywu

$l_t(t)$ – długość tubusa (tubusu)

l_{ok} – długość okularu



Mikroskop

- Parametry konstrukcyjne mikroskopu
– wersja profesjonalna ;-)

t_m – długość tubusu

l_{ob} – długość obiektywu

l_{ok} – długość okularu

l_{PO} – odległość „przedmiot-obraz”

l_r – odległość robocza

$l_{Z'}$ – odległość między źrenicą wyjściową mikroskopu a czołem oprawy okularu

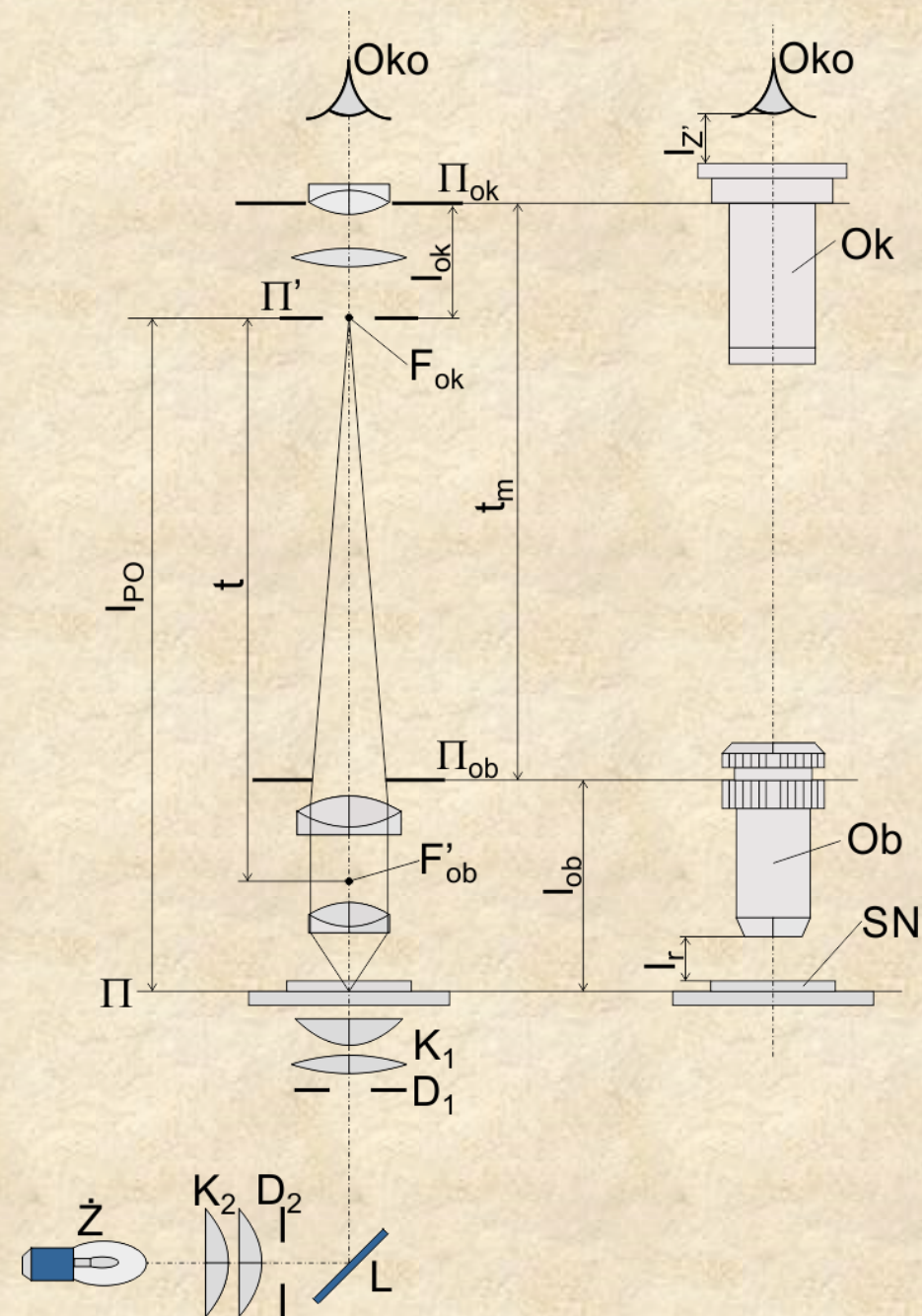
Przysłony

D_2 – polowa

D_1 – aperturowa

D_3 – polowa w okularze (nieuwidoczniona)

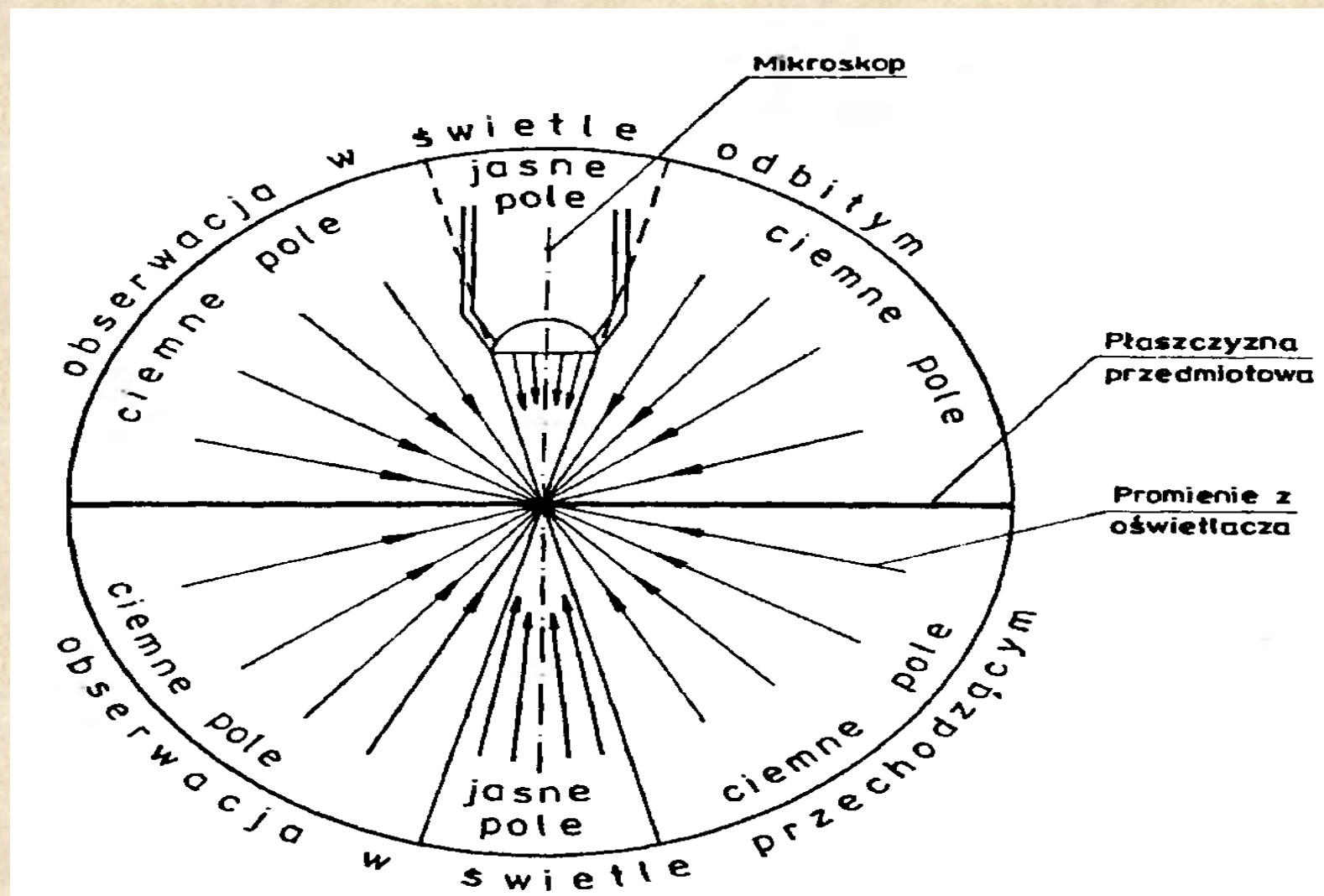
Przysłona aperturowa obiektywu (nieuwidoczniona)





Mikroskop

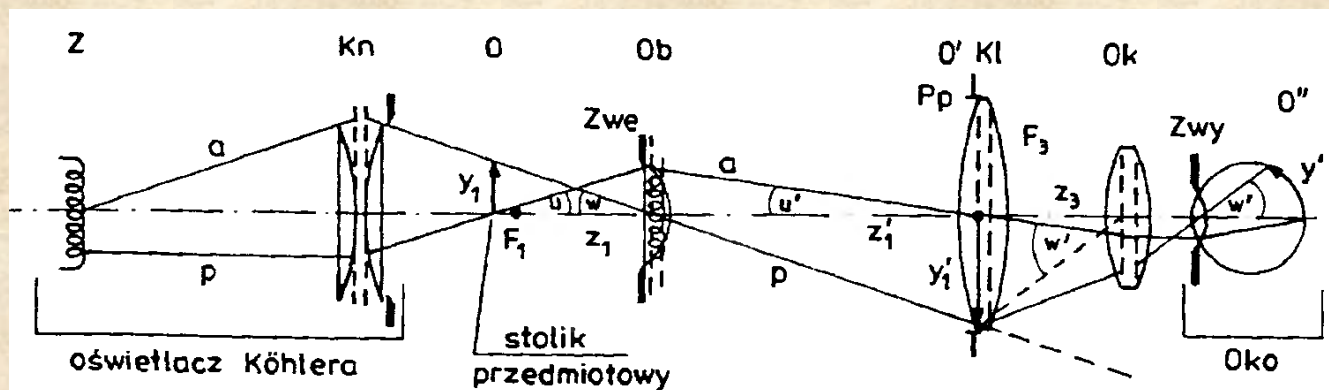
- Rodzaje oświetlenia i sposoby obserwacji



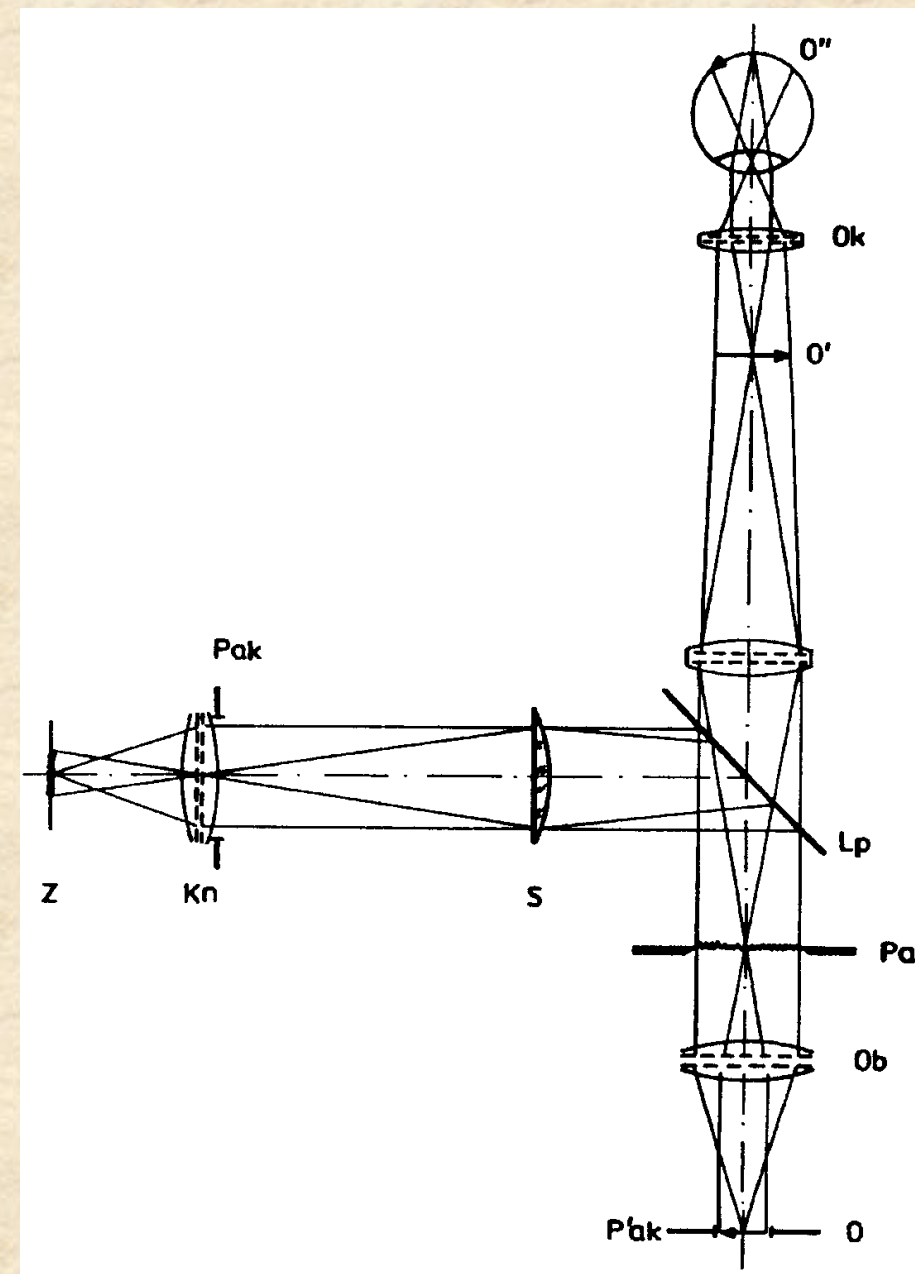


Mikroskop

- Obserwacja w jasnym polu widzenia w świetle przechodzącym**
Światło przechodzi przez przezroczysty przedmiot i trafia do obiektywu mikroskopu.
To BYŁO opisywane do tej pory!



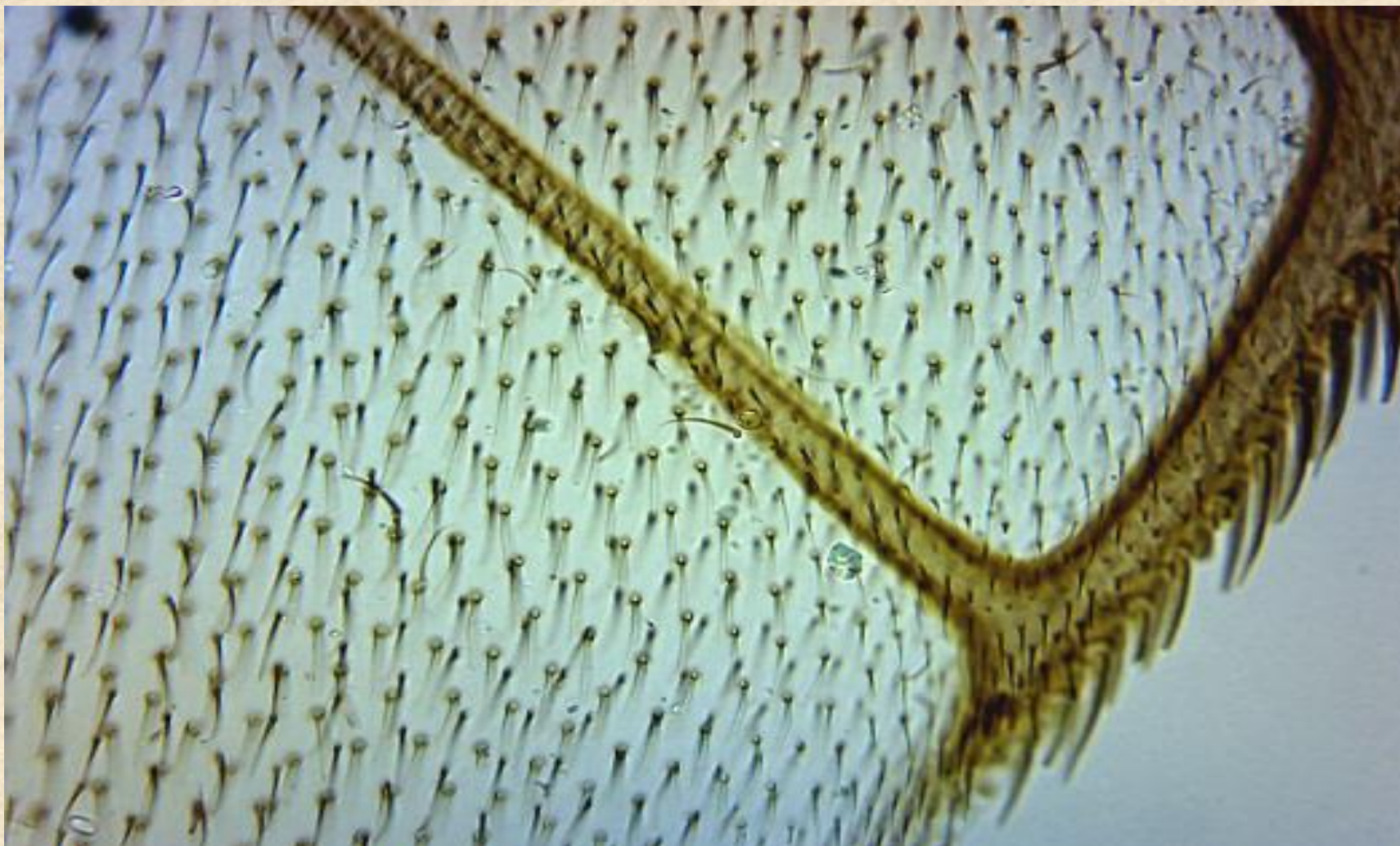
- Obserwacja w jasnym polu widzenia w świetle odbitym**
Półprzezroczyste zwierciadło kieruje światło z oświetlacza do wnętrza tubusa mikroskopu tak, że nieprzezroczysty przedmiot jest oświetlony od strony obiektywu. Źródło światła jest odwzorowane na przysłonie aperturowej Pa obiektywu. Przedmiot O pokrywa się z obrazem przysłony aperturowej Pak kondensora. Jest to więc wciąż oświetlenie typu Köhlera.





Mikroskop

- Jasne pole



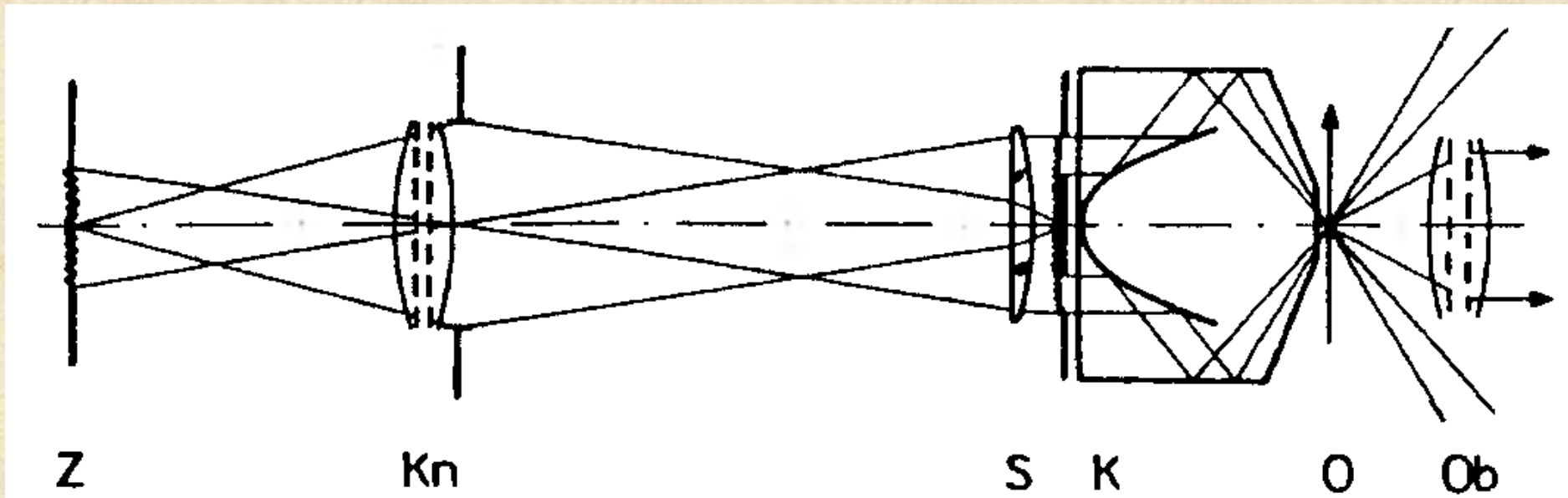


Mikroskop

- Obserwacja w ciemnym polu widzenia w świetle przechodzącym**

Światło padające na przezroczysty przedmiot jest tak skierowane, aby po przejściu przez niego NIE trafiało do obiektywu mikroskopu. Z tego powodu jednorodny przedmiot obserwowany przez mikroskop jest ciemny. Jeżeli jednak w polu widzenia znajdują się elementy rozpraszające światło, to widać je na ciemnym tle. To też jest oświetlenie typu Köhlera.

Na rysunku przykład kondensora kardiodoidalnego – cylindryczna wiązka światła przepuszczona przez pierścieniową przysłonę odbija się od zwierciadła i pada na przedmiot pod dużym kątem do osi optycznej.



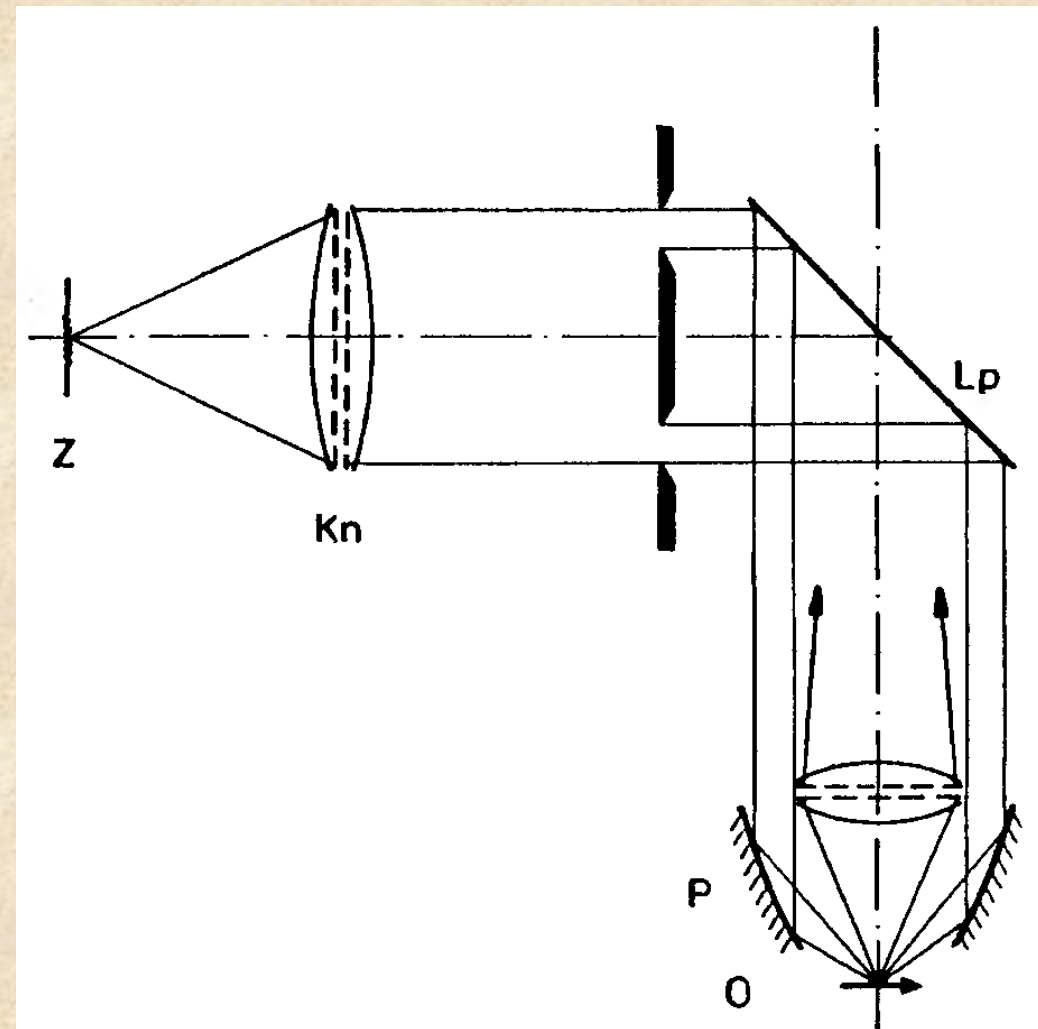


Mikroskop

- Obserwacja w ciemnym polu widzenia w świetle odbitym

(Na przykładzie oświetlacza krytycznego ty razem).

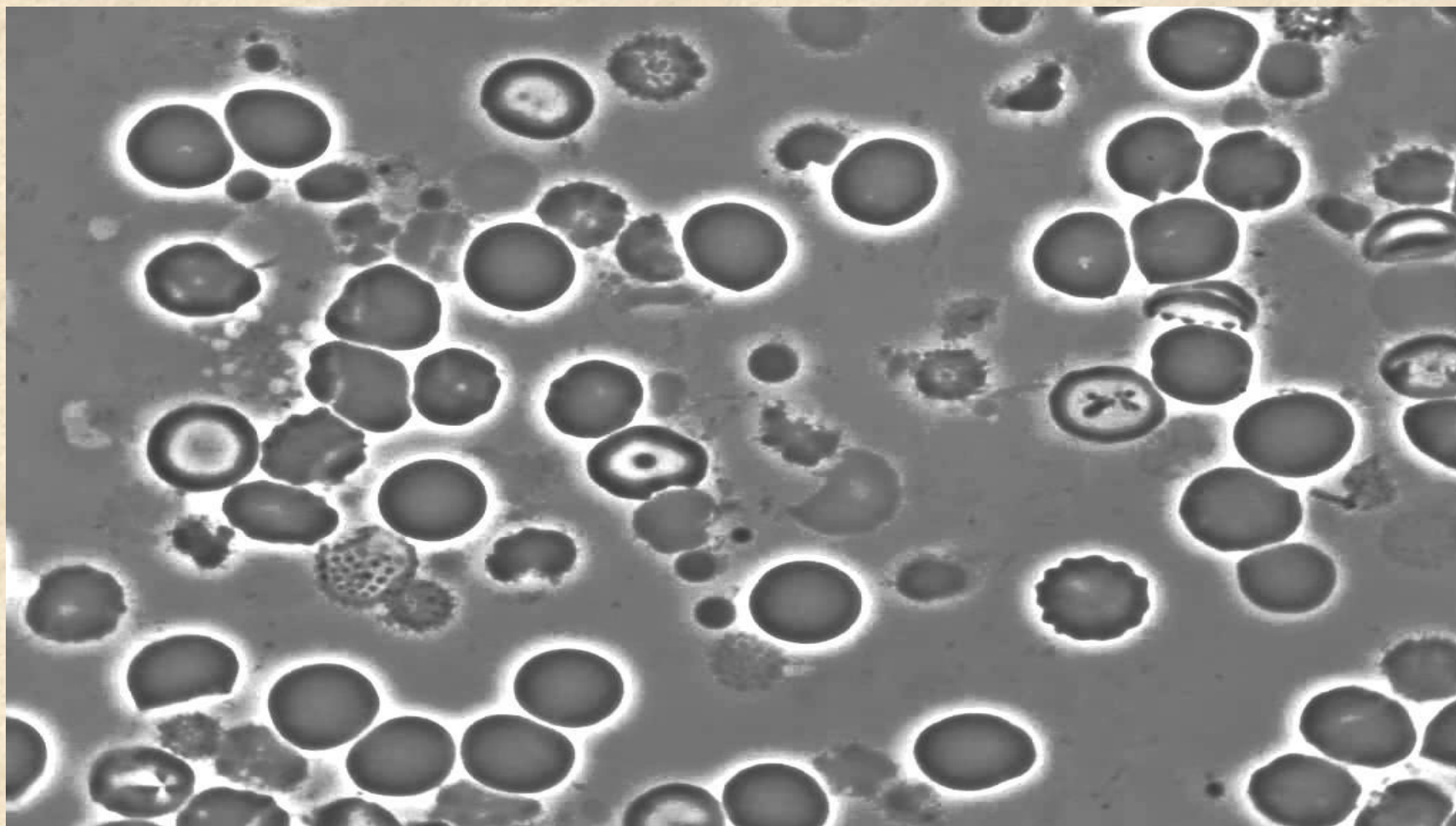
Owalne pierścieniowe zwierciadło Lp wprowadza równoległą wiązkę światła z oświetlacza do tubusa mikroskopu. Zwierciadło paraboloidalne P odbija wiązkę na przedmiot O – punkt skupienia wiązki leży na przedmiocie. Jeżeli powierzchnia przedmiotu jest gładka, światło odbite nie trafia do obiektywu (wraca do zwierciadła P). Jeżeli na powierzchni przedmiotu są elementy rozpraszające światło, widać je jako jasne w obiektywie (na ciemnym tle).





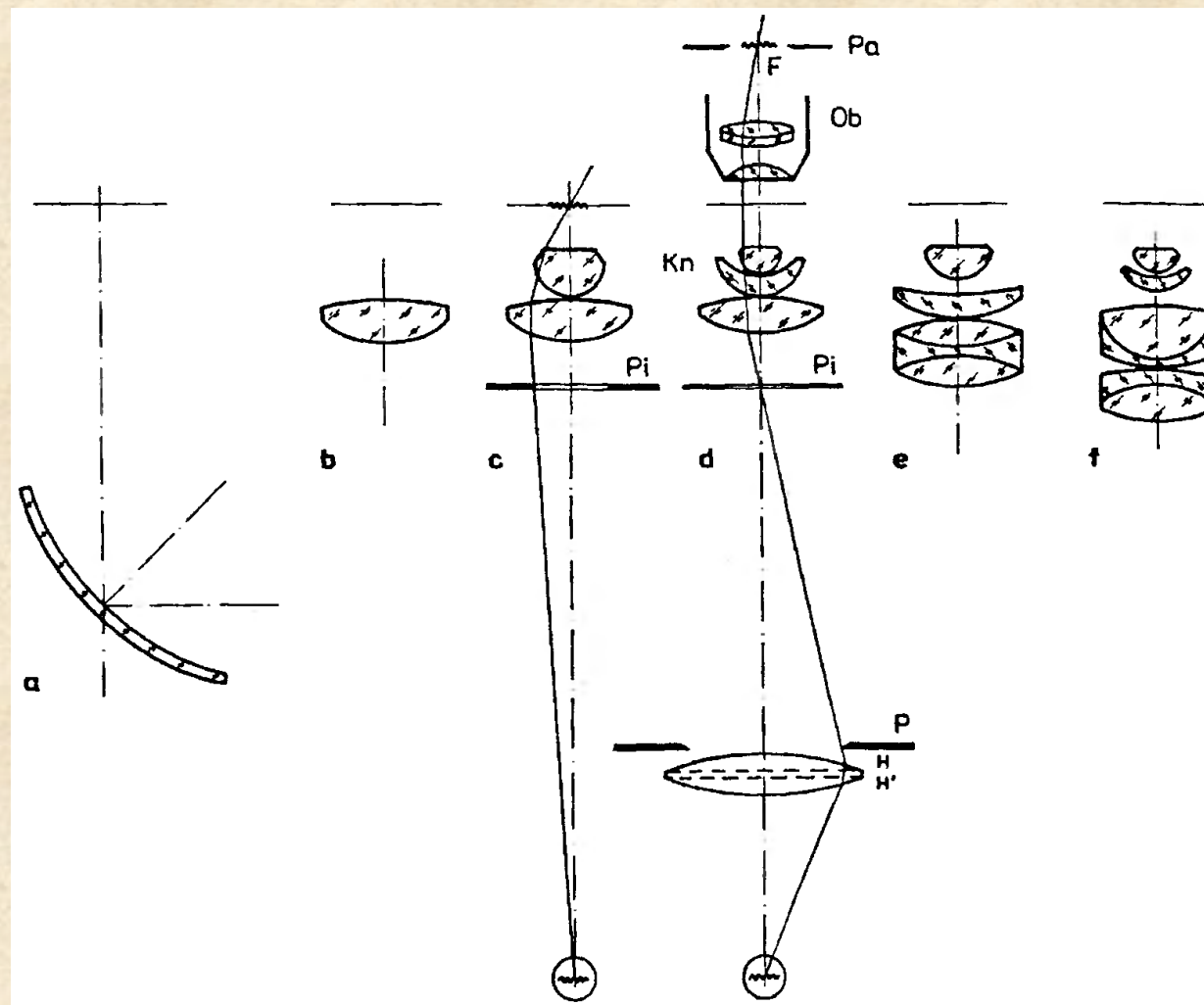
Mikroskop

- Ciemne pole





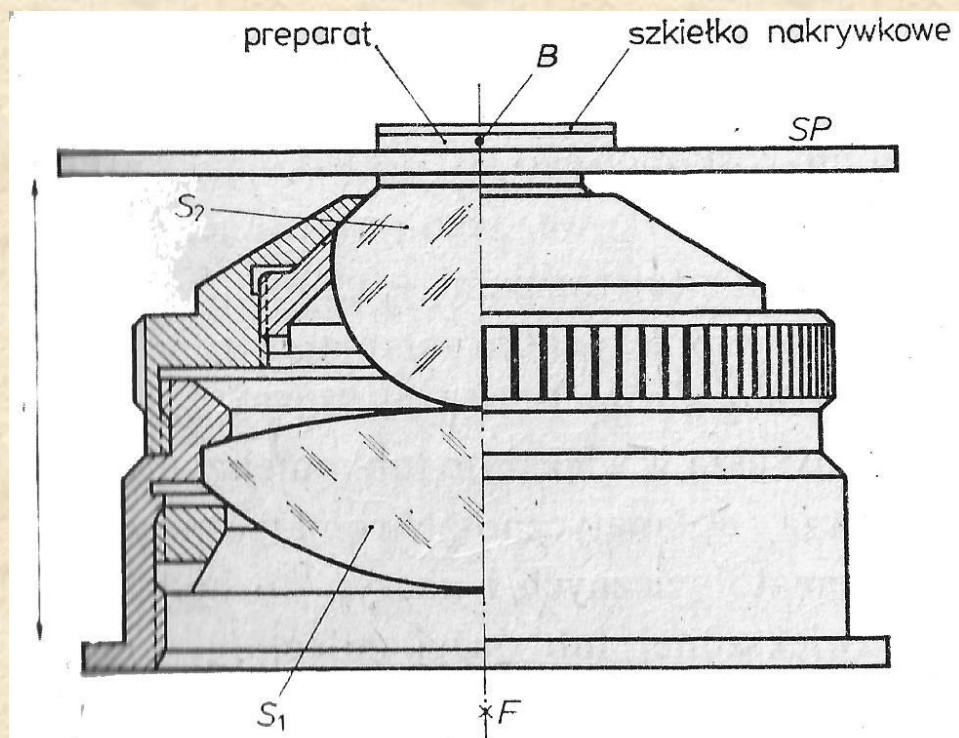
Kondensory



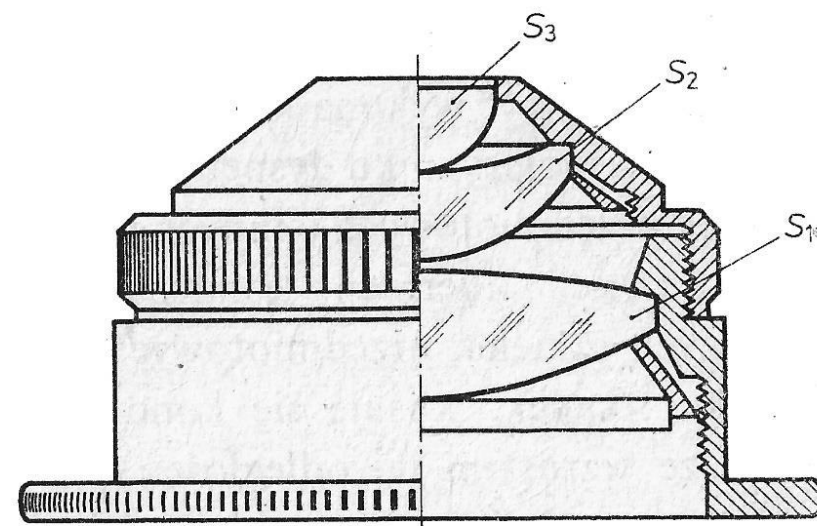
Rys. 4.7. Przykłady kondensorów mikroskopowych: a) zwierciadło wklęsłe zastępujące kondensor, b) kondensor niekorygowany o aperturze numerycznej $A \leq 0,6$, c) $A = 1,2$, d) $A = 1,3$, e) aplanatyczny achromat $A = 1$, f) aplanatyczny achromat $A = 1,4$



Kondensory



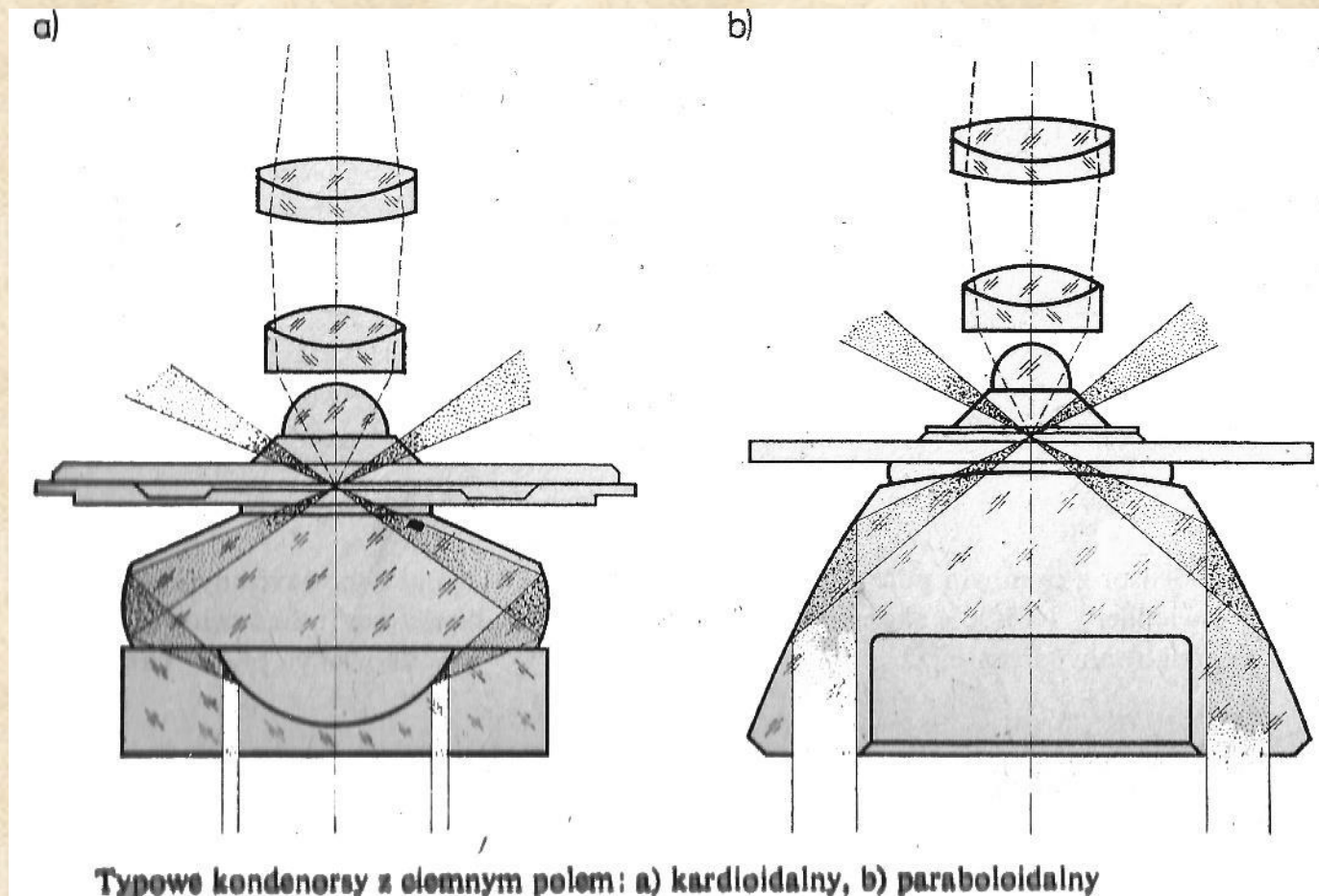
Kondensor dwusoczewkowy (Ab-



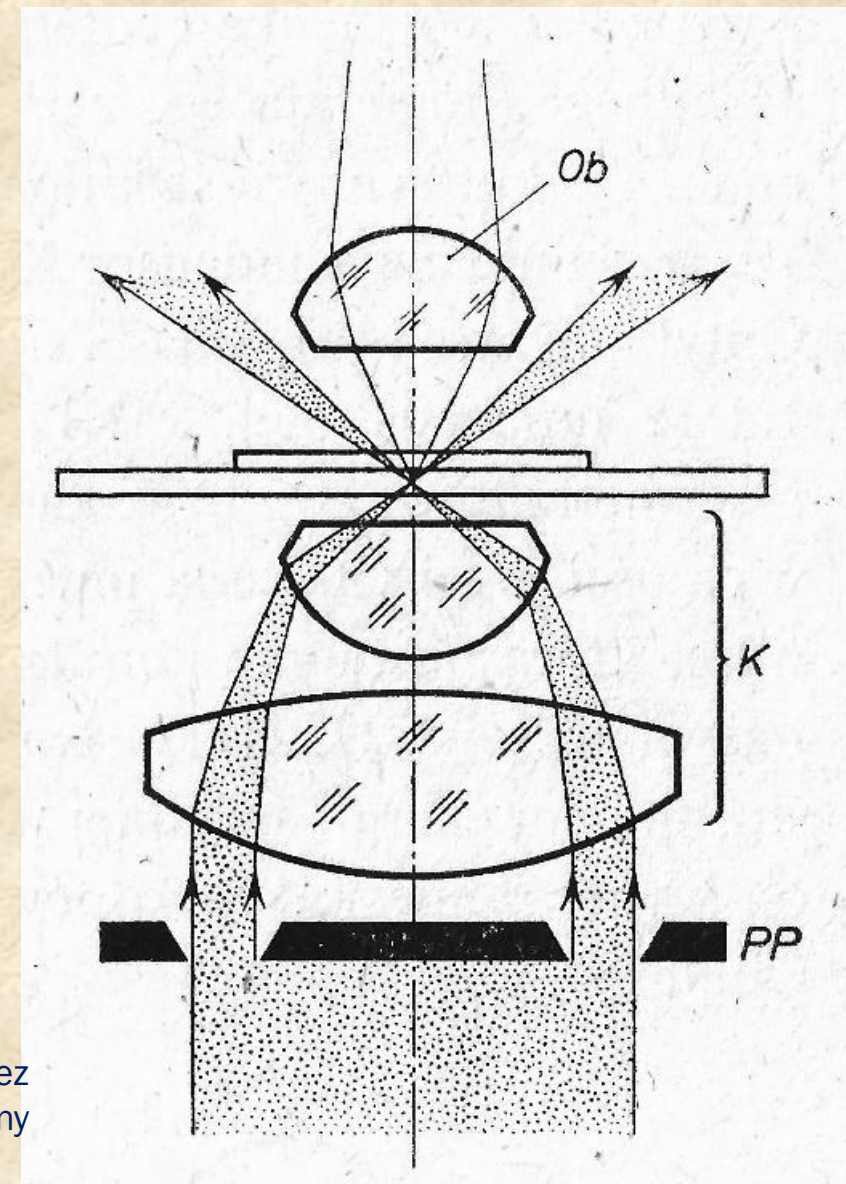
Kondensor trójsoczewkowy (aplanatyczny)



Kondensory

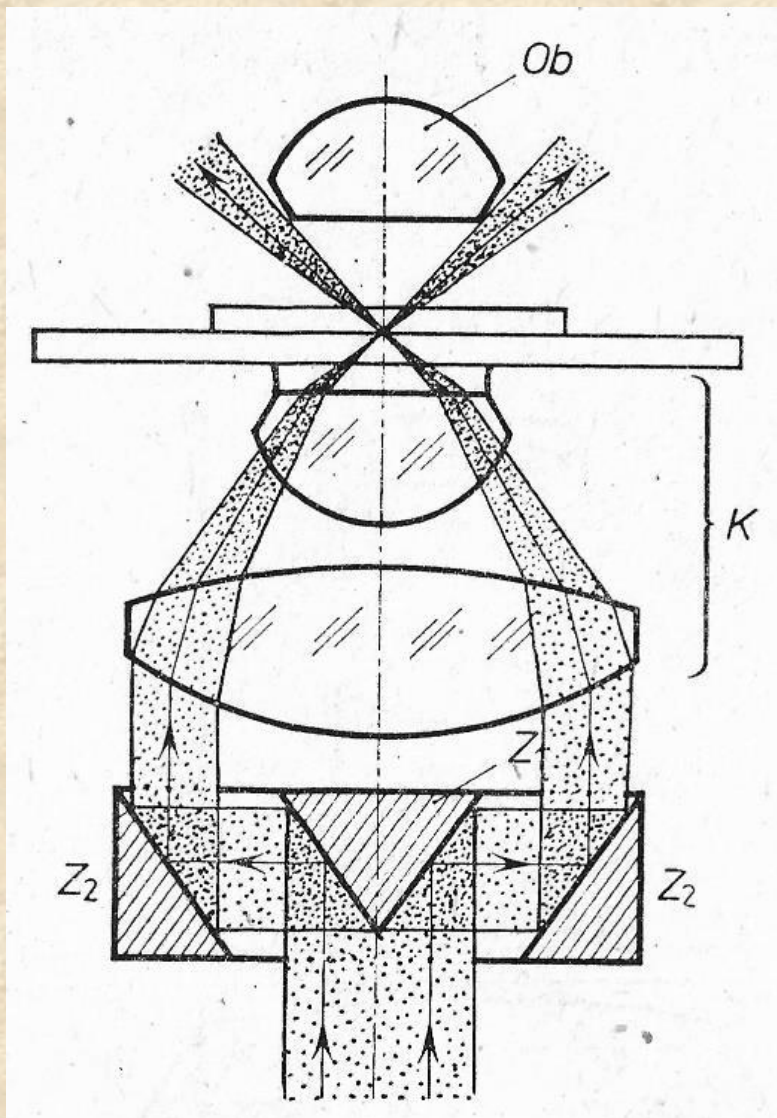


Kondensor z jasnym polem zamieniony w kondensor z ciemnym polem przez wstawienie w jego płaszczyznę ogniskową przedmiotową przysłony pierścieniowej PP

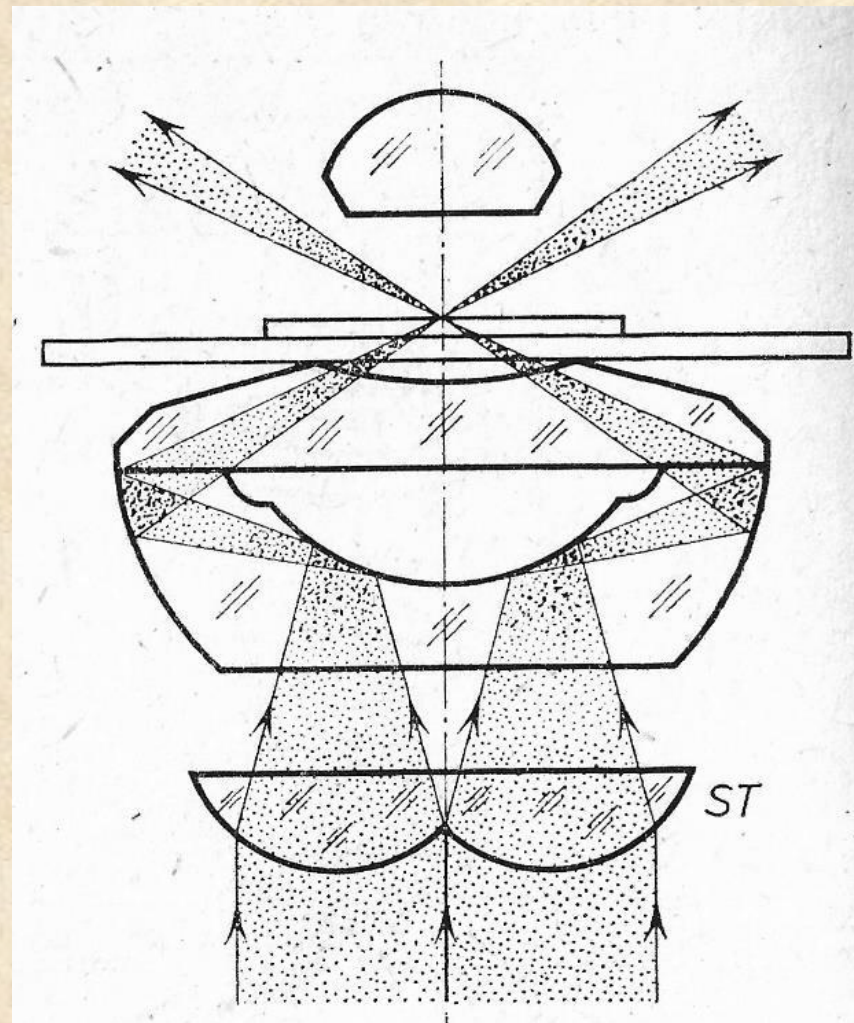




Kondensory



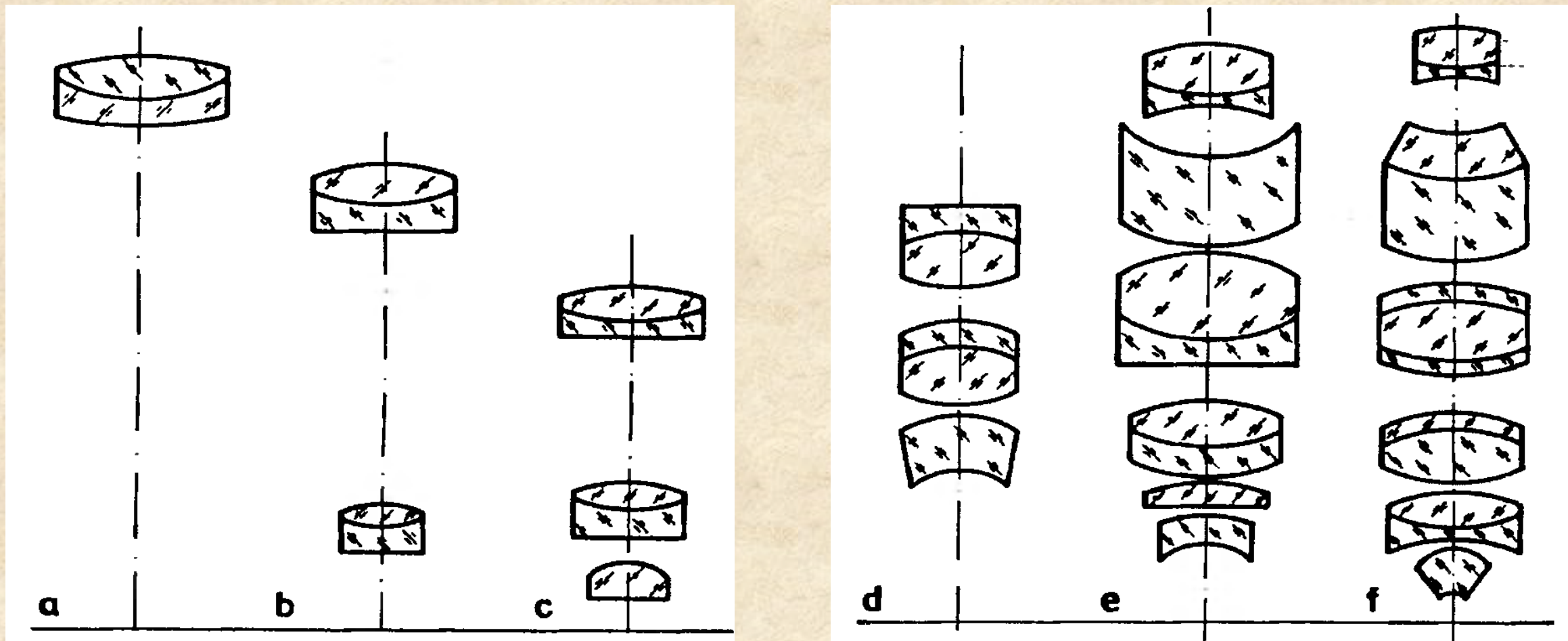
Kondensor CLO/PZO



Kondensor firmy Tiyoda o dużej wydajności świetlnej („Superwide Darkfield Condenser”)



Obiektywy mikroskopowe

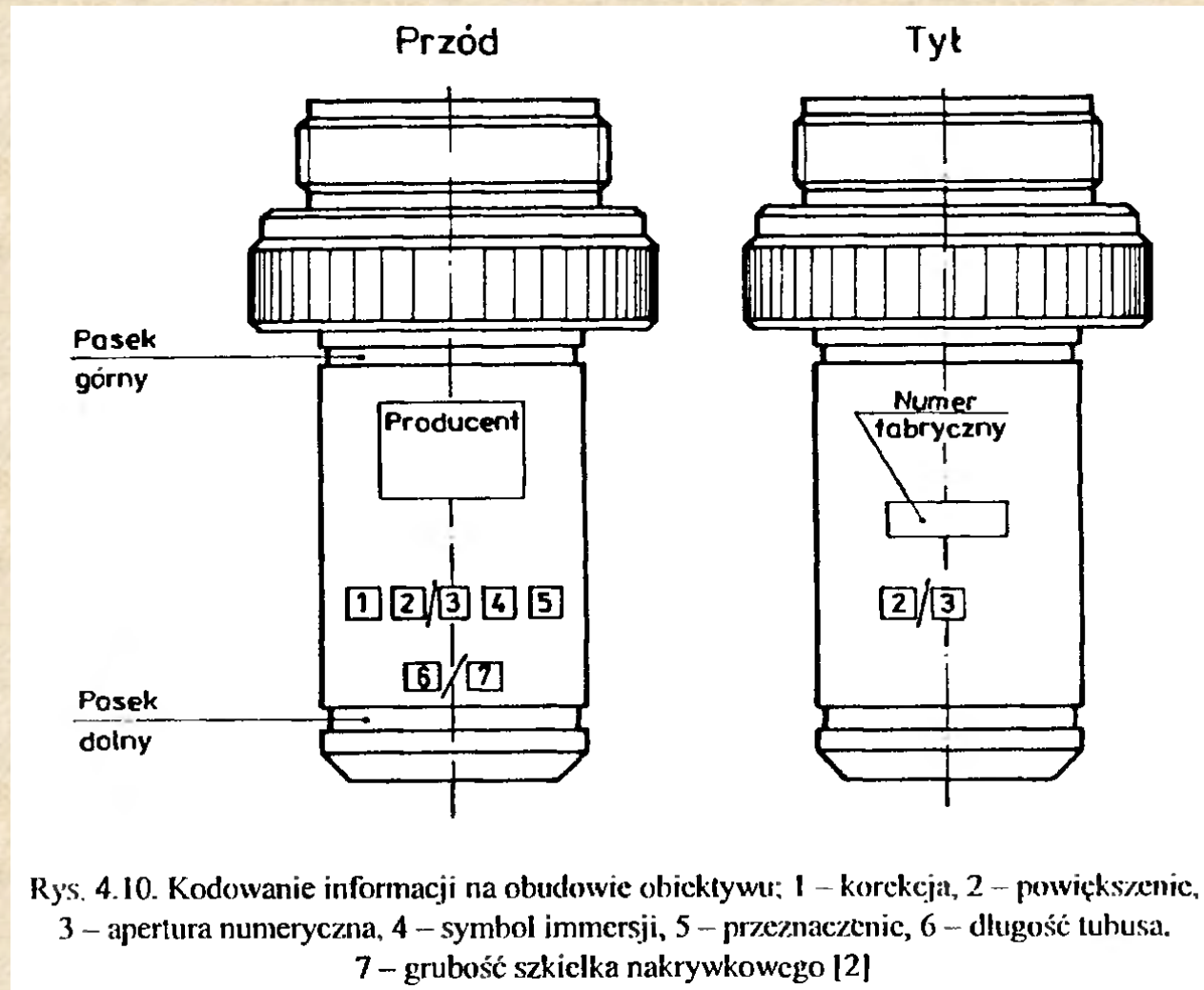


Rys. 4.9. Przykłady obiektywów mikroskopowych: a) achromat $5\times$, $A = 0,15$, b) achromat $10\times$, $A = 0,25$, c) achromat $20\times$, $A = 0,4$, d) planachromat $9\times$, $A = 0,2$, e) planachromat $40\times$, $A = 0,65$, f) planachromat $75\times$, $A = 0,9$ (a, b, c [2], d, e, f [3])



Obiektywy mikroskopowe

Oznaczenia





Obiektywy mikroskopowe

Oznaczenia





Obiektywy mikroskopowe

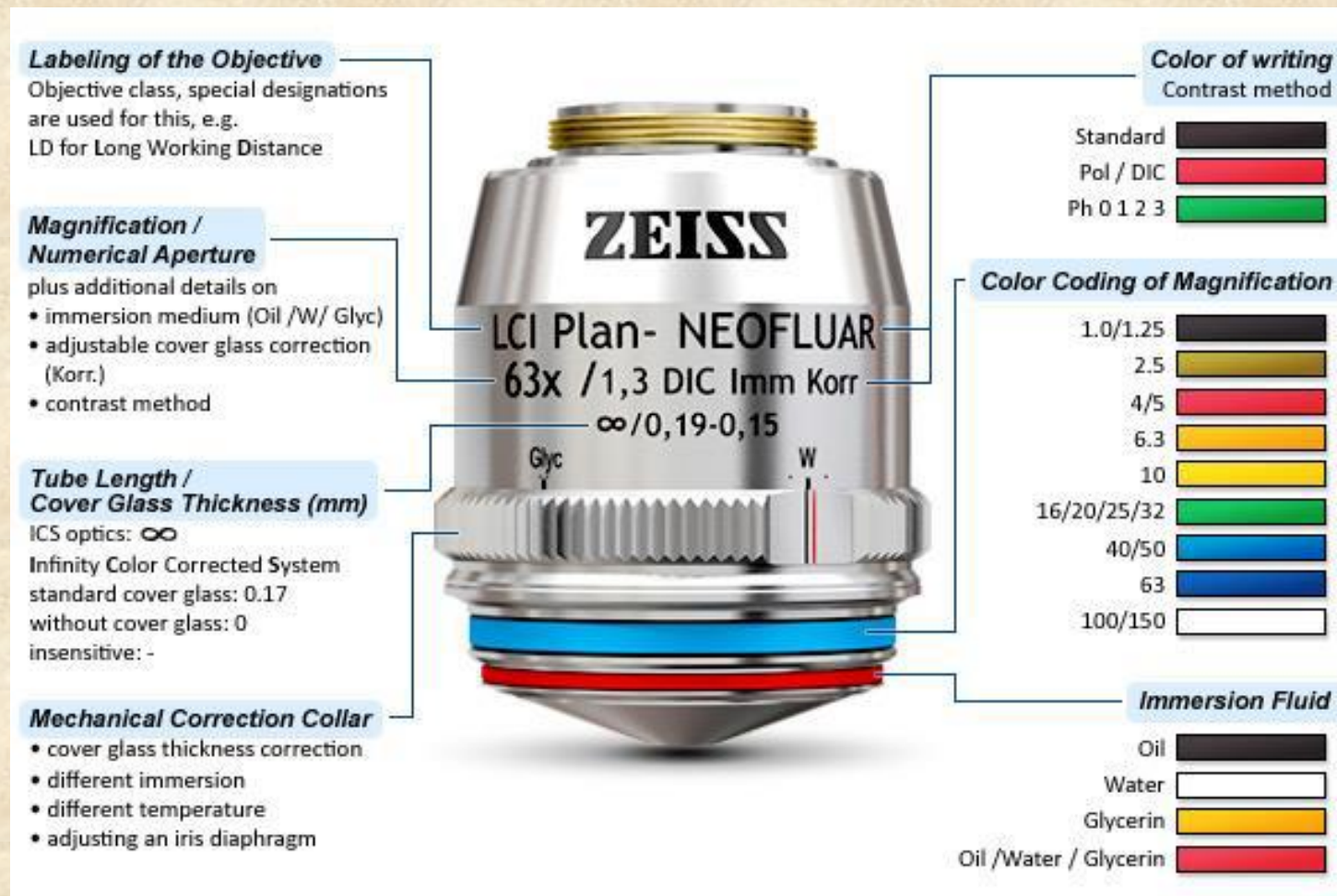
Obiektywy PZO





Obiektywy mikroskopowe

Obiektyw Zeissa





Okulary mikroskopowe

Okular Huygensa

Soczewki:

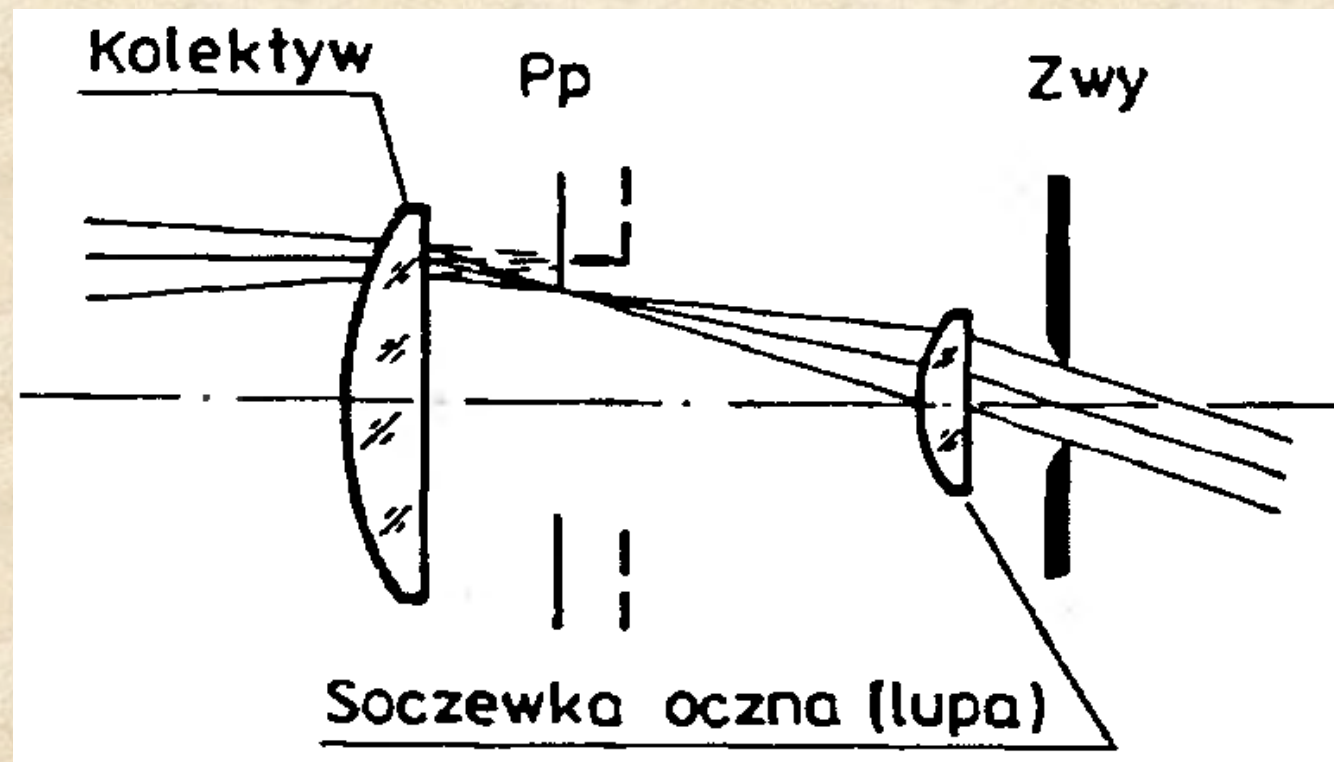
- S_1 kolektywowa (decyduje o odwzorowaniu źrenicy wyjściowej mikroskopu w odpowiedniej odległości od okularu)
- S_2 oczna (główna rola w powiększaniu obrazu pośredniego w mikroskopie)

Obie soczewki razem wzięte tworzą układ rozpraszający (ujemny).

Powiększenie wizualne $\Gamma < 15\times$

pole widzenia $2w = 45^\circ$

Stosowany do obserwacji wizualnej oraz mikrofotografii





Okulary mikroskopowe

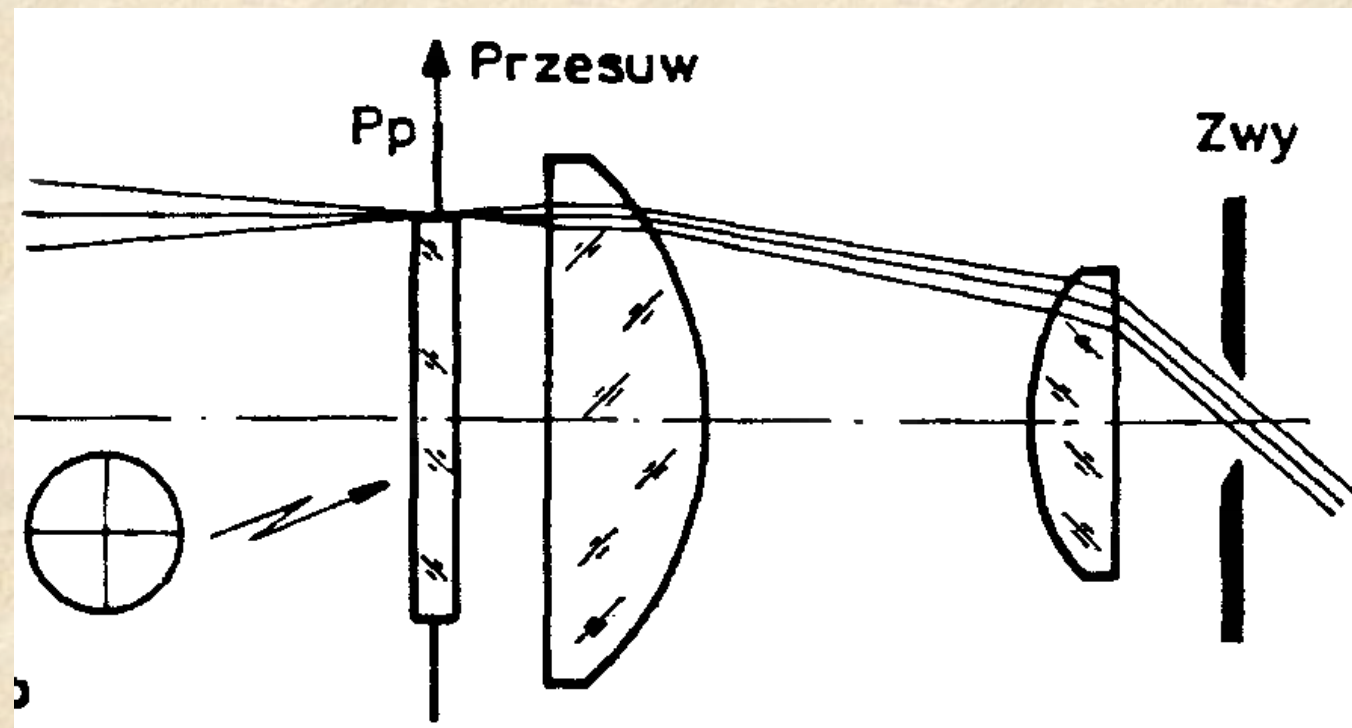
Okular Ramsdena

Również dwie płasko-wypukłe soczewki ale umieszczone tak, że płaszczyzna przedmiotowa mieści się przed okulem.

Jest to okular dodatni i można go używać jako lupy.

W płaszczyźnie ogniskowej umieszcza się płytkę ogniskową ze skalą.

Jeżeli płytkę ogniskową przesuwana jest śrubą mikrometryczną, taki okular nazywa się mikrometrycznym.

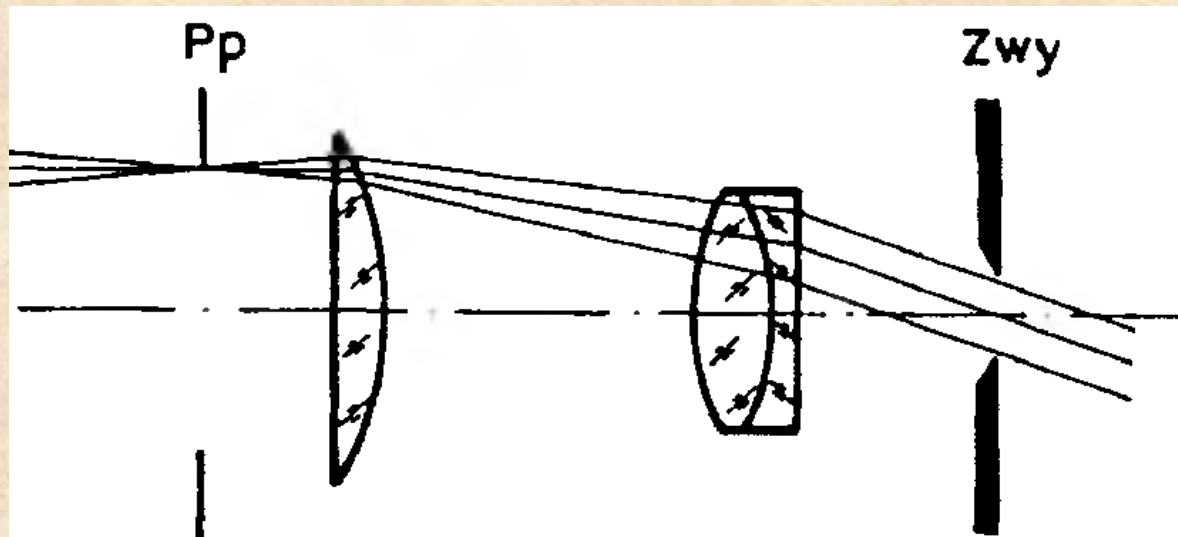




Okulary mikroskopowe

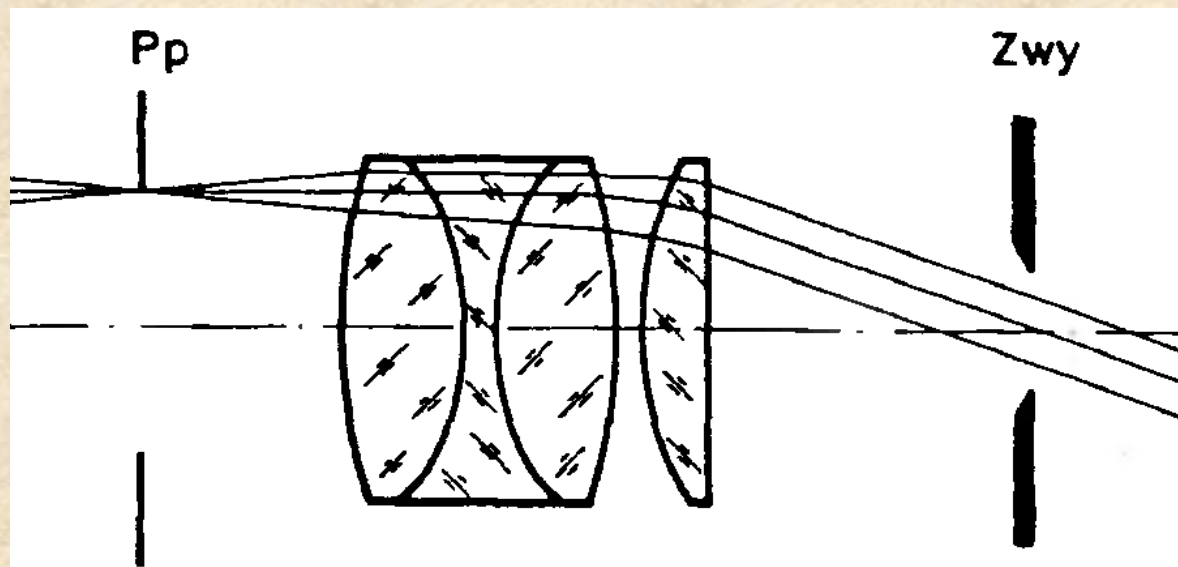
Okular Kellnera

Rozwinięcie układu Ramsdena – soczewka oczna jest sklejona z dwóch soczewek, co powoduje lepszą achromatyzację i mniejszą dystorsję.



Okular ortoskopowy

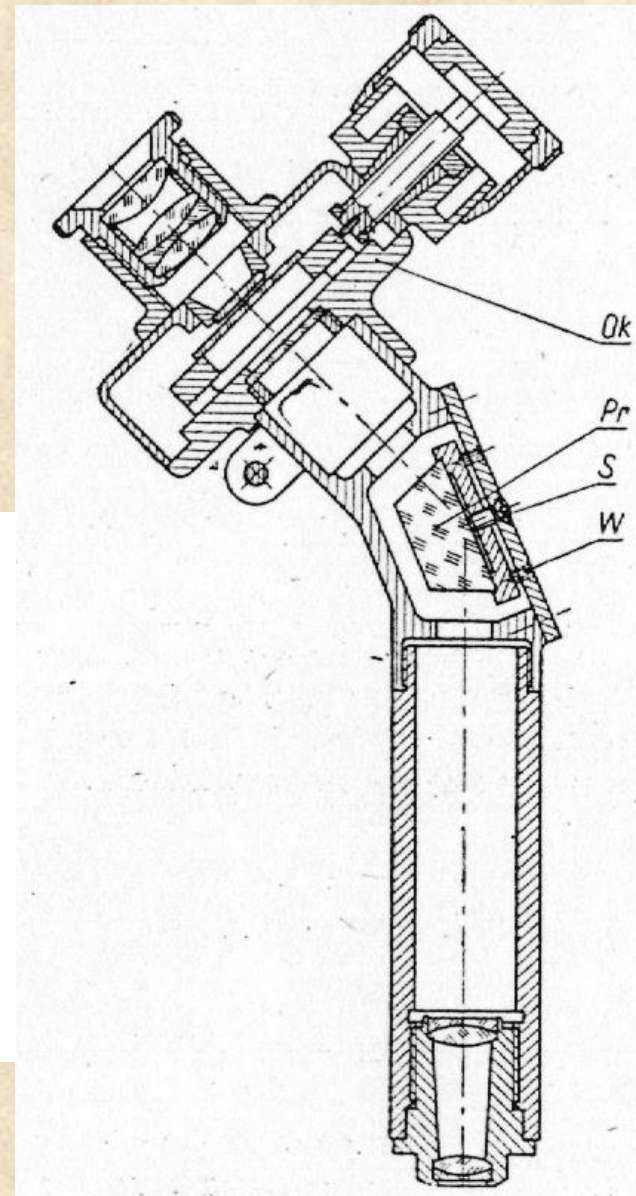
Odmiana układu Huygensa o większym polu widzenia oraz lepiej skorygowanych: aberracji chromatycznej powiększenia, astygmatyzmie i dystorsji.





Okulary mikroskopowe

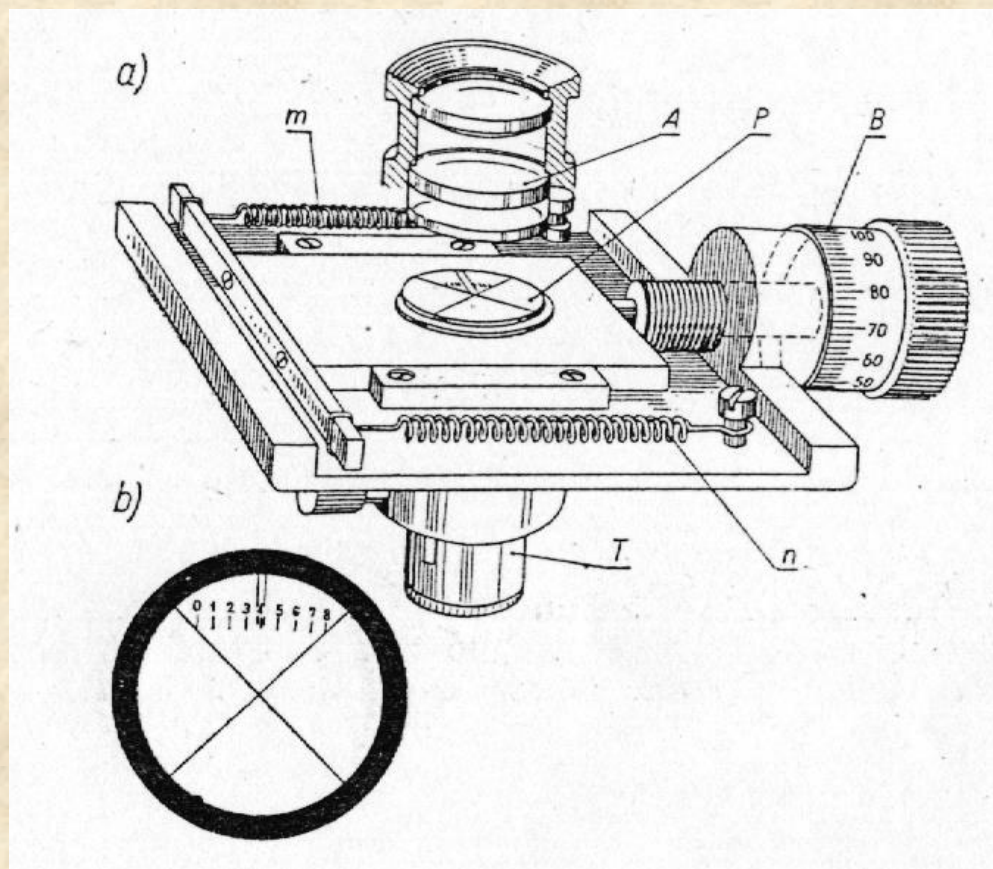
- Do mikroskopów przyrządów mierniczych stosuje się najczęściej okulary typu Ramsdena, Huygensa, Kellnera oraz kompensacyjne i mikrometryczne.
- W mikroskopach pomiarowych stosuje się **okulary mikrometryczne**. Cztery podstawowe typy okularów mikrometrycznych:
 - 1) Śrubowe;
 - 2) Spiralne;
 - 3) Klinowe;
 - 4) Okulary z podziałkami.





Okulary mikroskopowe

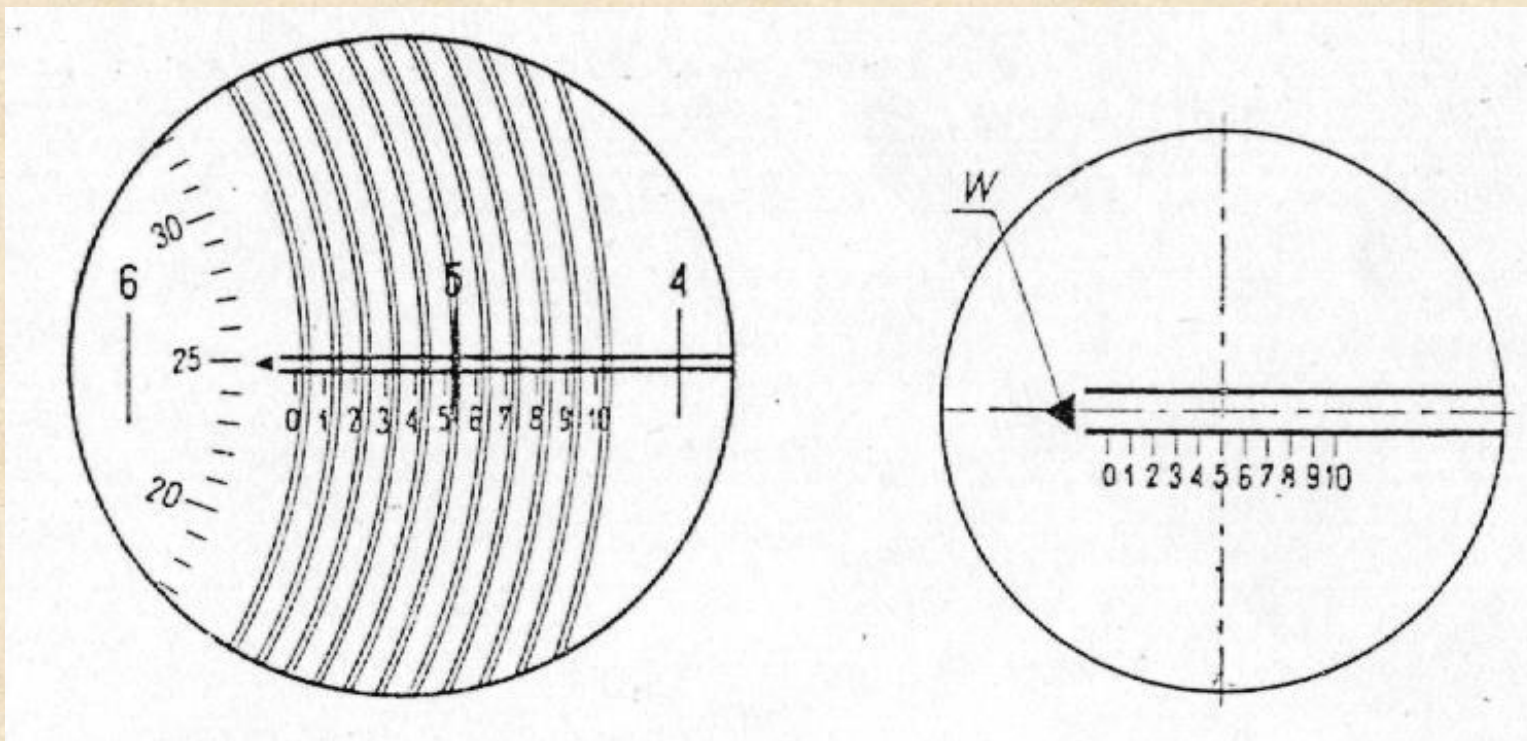
- **Śrubowe okulary mikrometryczne** stosuje się w tych przypadkach, w których konieczne jest wykonanie pomiarów liniowych oglądanych przez mikroskop przedmiotów. W okularach tych przesuwanie płytki z naniesionym bisektorem odbywa się za pomocą śruby mikrometrycznej.





Okulary mikroskopowe

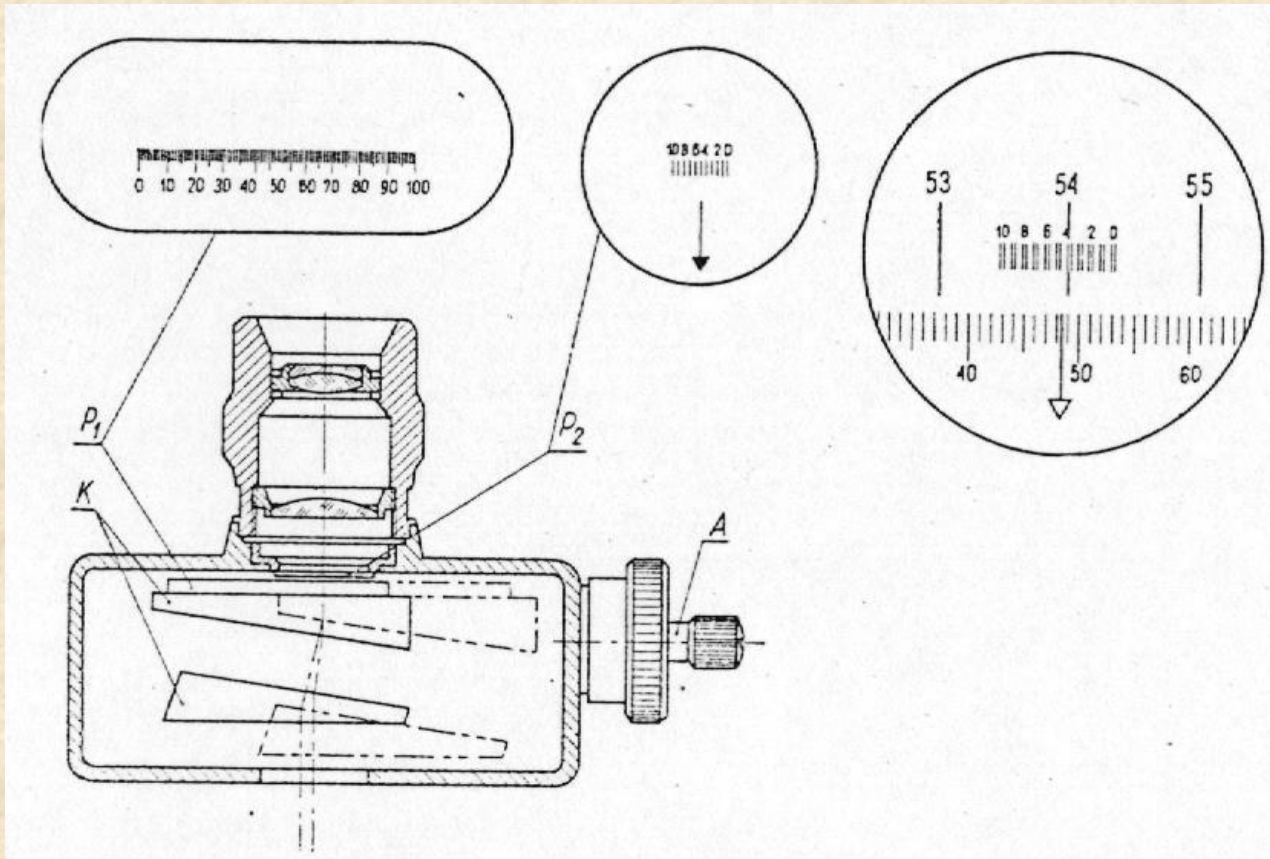
- **Spiralny okular mikrometryczny** firmy Zeiss posiada wewnątrz obudowy dwie płytki: obrotową i nieruchomą. Na płycie obrotowej naniesiona jest metodą fotograficzną spirala Archimedesesa oraz tarczka mikronowa podzielona na 100 działek elementarnych.









Okulary mikroskopowe

- Klinowy okular precyzyjny firmy Leitz:





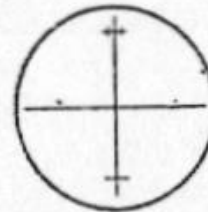



Płytki ogniskowe

Rysunek płytki ogniskowej	Zakres zastosowania
	Płytką ogniskową z krzyżem. Stosuje się w kolimatorach, lunetach i mikroskopach
	Podwójne (bisektorowe) skrzyżowanie. Krzyż podwójny można bardzo dokładnie naprowadzić na obraz krzyża pojedynczego. Nieraz odległość kresek określa dopuszczalną odchyłkę (np. paralaksy w kolimatorach). Stosuje się w kolimatorach, lunetach i mikroskopach.
	Przezroczyste skrzyżowanie na ciemnym tle (srebro lub zaczerniona emulsja fotograficzna). Stosuje się w kolimatorach i w lunetach autokolimacyjnych o dwóch płytkach ogniskowych (rys. 27) od strony oświetlacza.
	Skrzyżowanie z bisektorem i z kreskami tolerancyjnymi. Obraz, na który naprowadza się przedstawiony rysunek powinien stanowić taki sam krzyż, lecz obrócony o 180° .



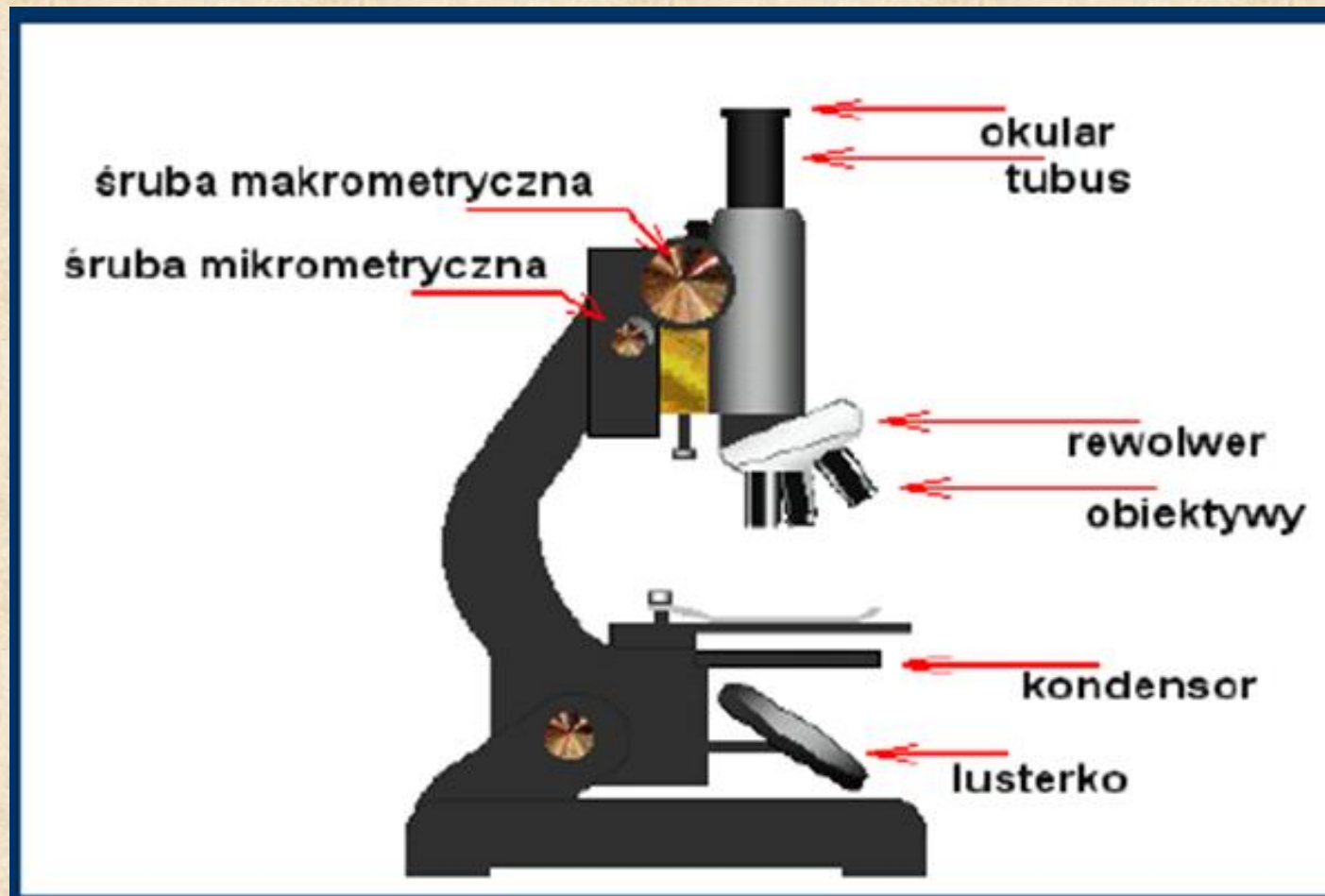
Płytki ogniskowe

	Skrzyżowanie z kółeczkami określającymi pola tolerancji. Stosuje się w kolimatorach i lunetach kontrolnych.
	Skrzyżowanie z podziałką. Stosuje się w lunetach i mikroskopach kontrolnych.
	Skrzyżowanie z kreskami tolerancyjnymi. Stosuje się w lunetach kontrolnych do sprawdzania nachylenia obrazu.
	Płytki ogniskowa z podziałką. Stosuje się w mikroskopach mierniczych i dynametrze Ramsdena.



Mikroskopy

- Prosty mikroskop biologiczno-laboratoryjny





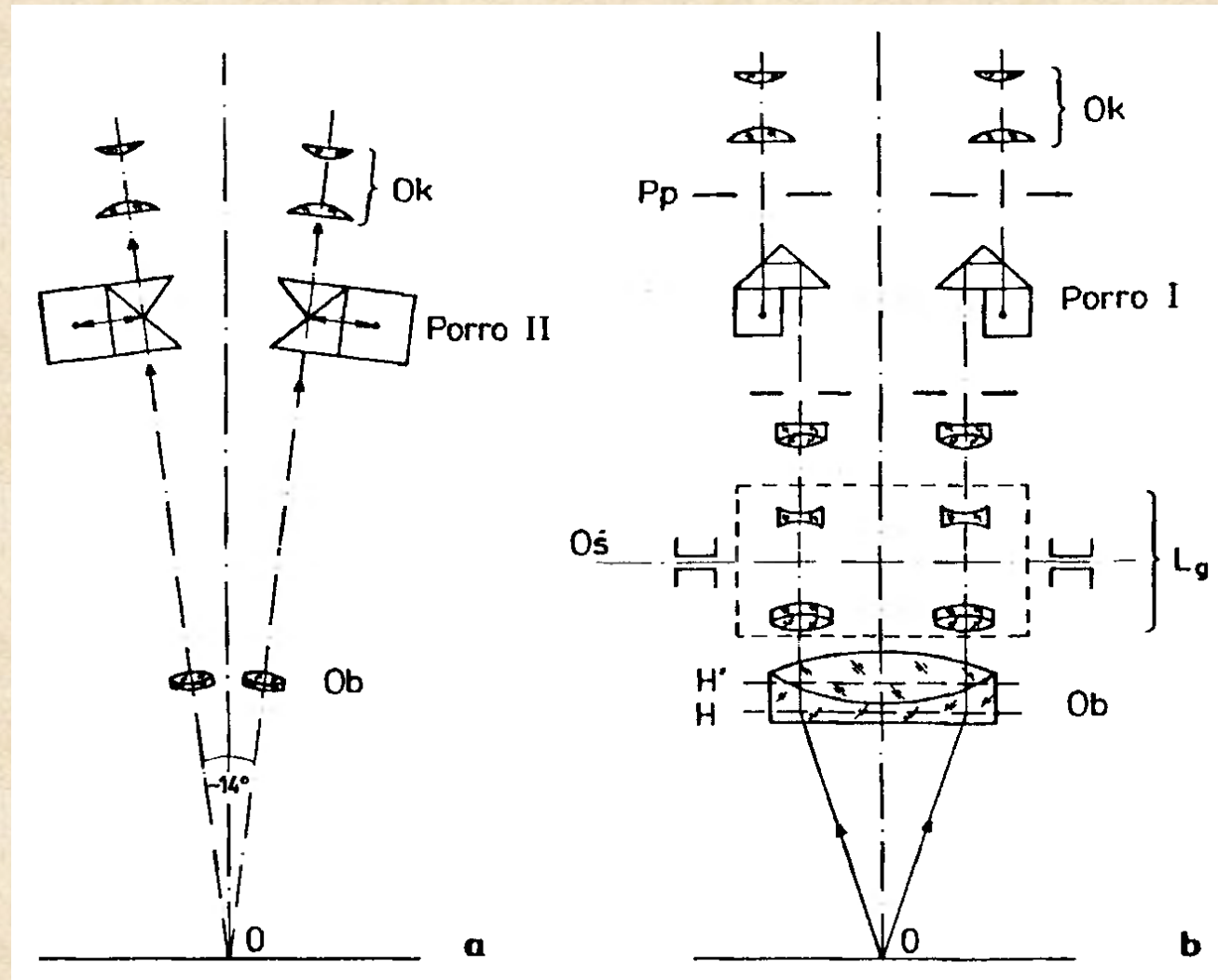
Mikroskopy

- Mikroskop stereoskopowy**

Warunkiem widzenia stereoskopowego jest to, aby każde oko obserwowało przedmiot pod innym kątem.

Proste mikroskopy stereoskopowe składają się z dwóch mikroskopów ustawionych zbieżnie na obserwowany obiekt pod kątem około 14° . Do odwracania obrazu stosuje się układ pryzmatów Porro lub dachowych Schmidta.

W nowszych mikroskopach stosuje się jeden wspólny achromatyczny obiektyw o dużej średnicy.



Mikroskop stereoskopowy: a) podwójny, b) jednoobiektywowy

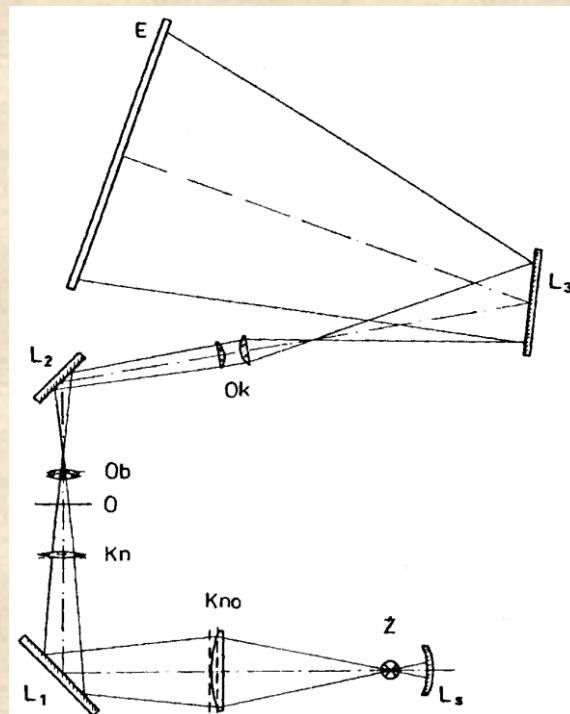


Mikroskopy

- **Mikroskop projekcyjny**

Tworzy obraz rzeczywisty na ekranie. Wygodniejsza obserwacja, możliwa dla wielu obserwatorów jednocześnie.

Na rysunku – **lanometr** (do obserwacji włókien).



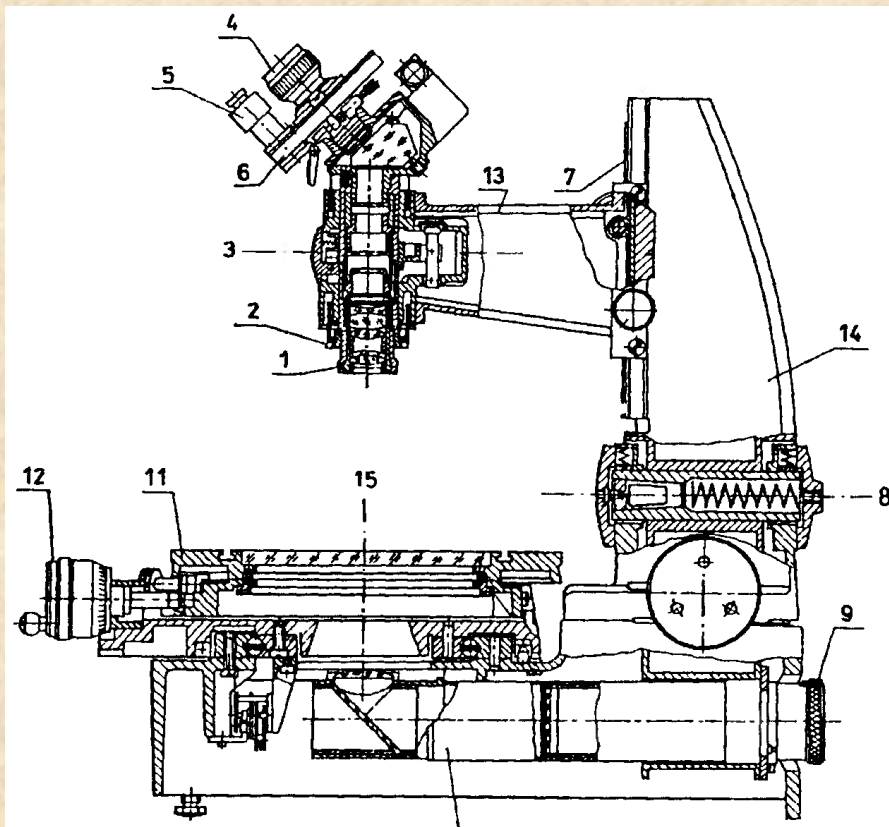


Mikroskopy

- Mikroskop warsztatowy

Obiektów ma duże, płaskie pole widzenia i nieduże powiększenie ($5\times$).

W głowicy okularowej mieszczą się szablony.

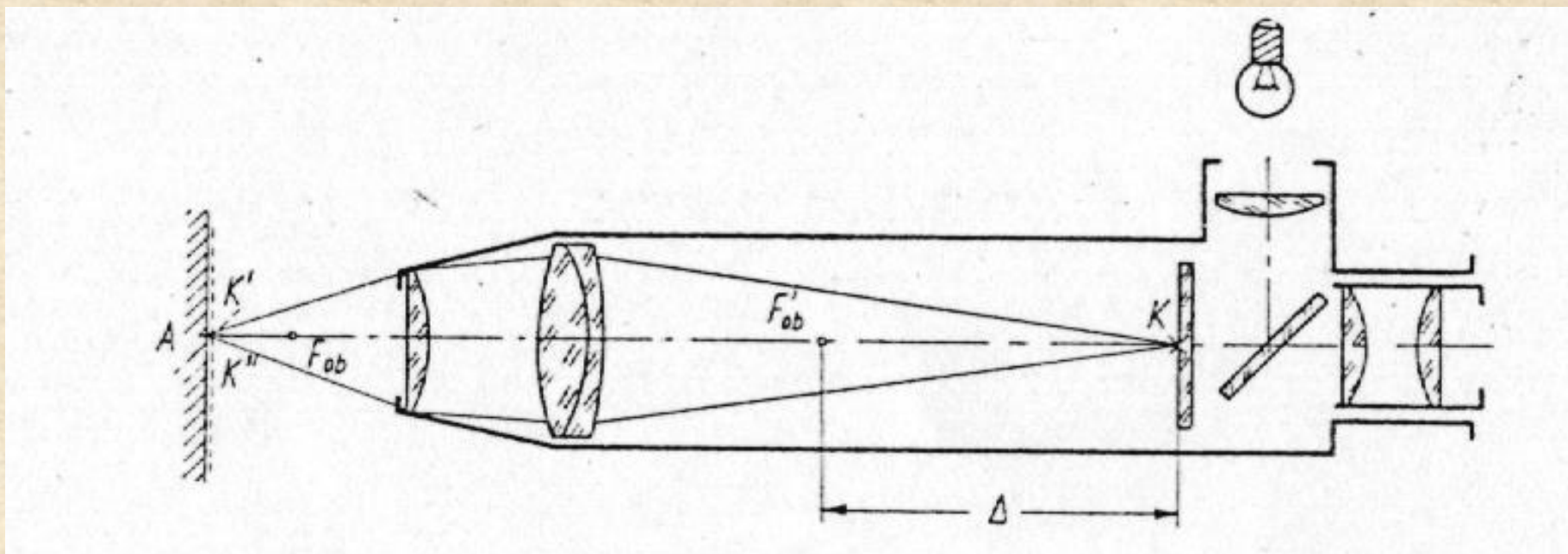


Stolik: dwa przesuw plus os obrotu.
Głowica: przesuw i obrót.



Mikroskopy

- **Mikroskop autokolimacyjny** pracuje na zasadzie podobnej jak luneta autokolimacyjna. Podobnej, ALE...Tym razem kolimacja oznacza wiązkę ZBIEŻNĄ! Służy m.in. do pomiaru krótkich promieni krzywizny soczewek.



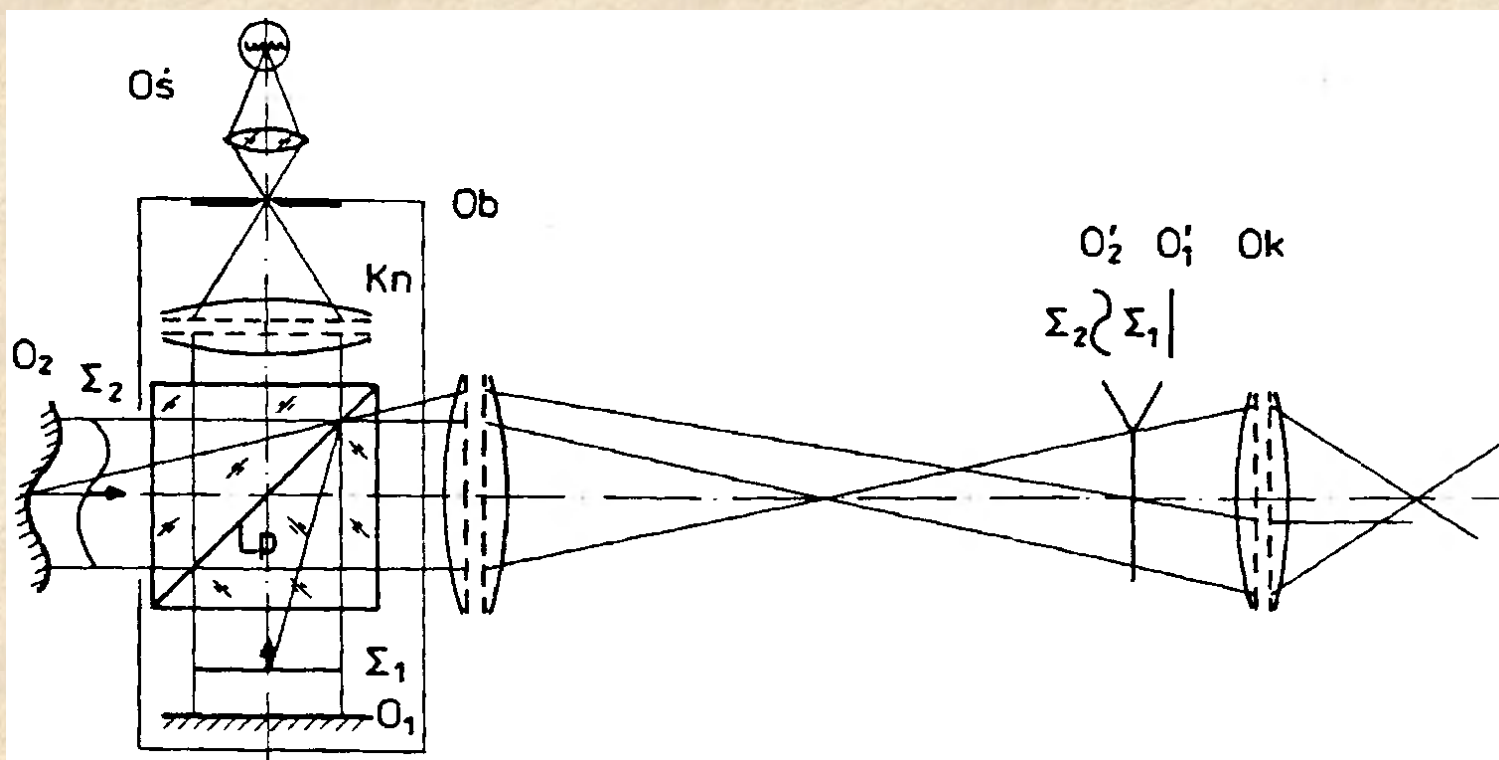


Mikroskopy

- Mikroskop interferencyjny**

Różne typy mikroskopów, realizujące różne układy interferencyjne.

Interferencja następuje pomiędzy dwiema falami, otrzymanymi ze źródła poprzez podział amplitudy. Specjalna nasadka interferencyjna, umieszczona przed obiektywem mikroskopu, dzieli fale świetlną wychodzącą z kondensatora na dwie: jedna pada na płaskie zwierciadło i jest falą odniesienia, druga odbija się od badanej powierzchni.

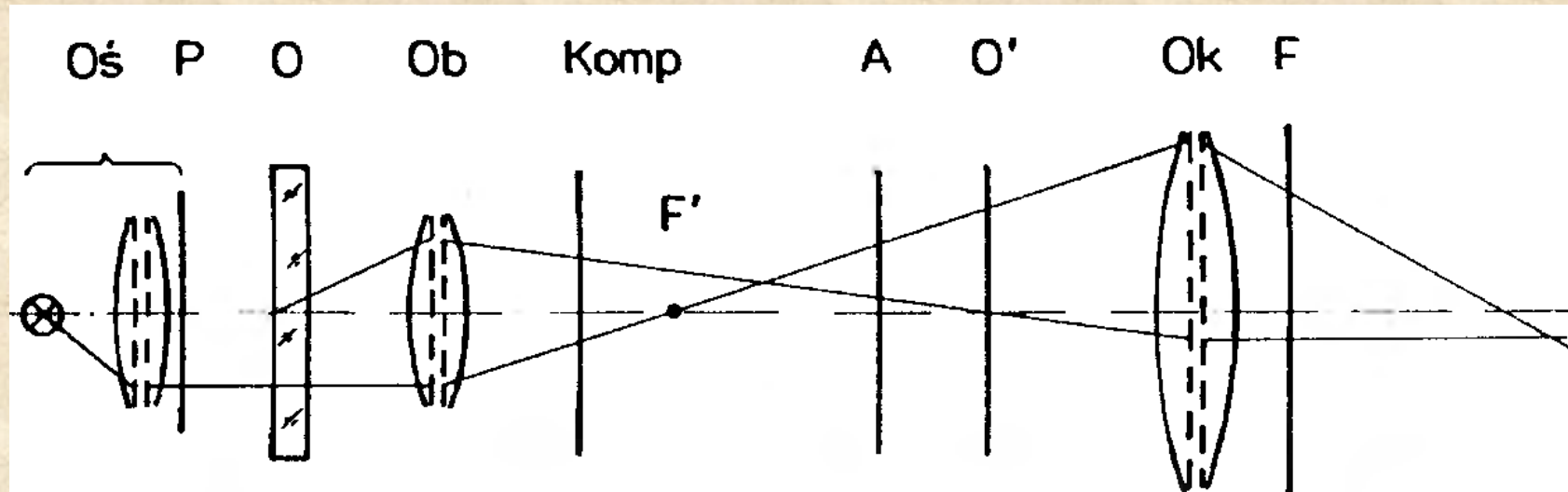




Mikroskopy

- Mikroskop polaryzacyjny ortoskopowy**

Pomiar dwójłomności oraz różnicy dróg optycznych między falami własnymi badanego ośrodka oraz pomiary kątów azymutu fal własnych. W najprostszej wersji wyposażony jest w liniowy **polaryzator** (zwykle umieszczony pod stolikiem przedmiotowym) oraz liniowy **analizator** (zwykle w tubusie). W wersji wzbogaconej między polaryzatorem i analizatorem (zwykle również w tubusie) umieszczona jest ćwierćfalówka (CO TO?) lub kompensator bezpośredni (A TO CO?).



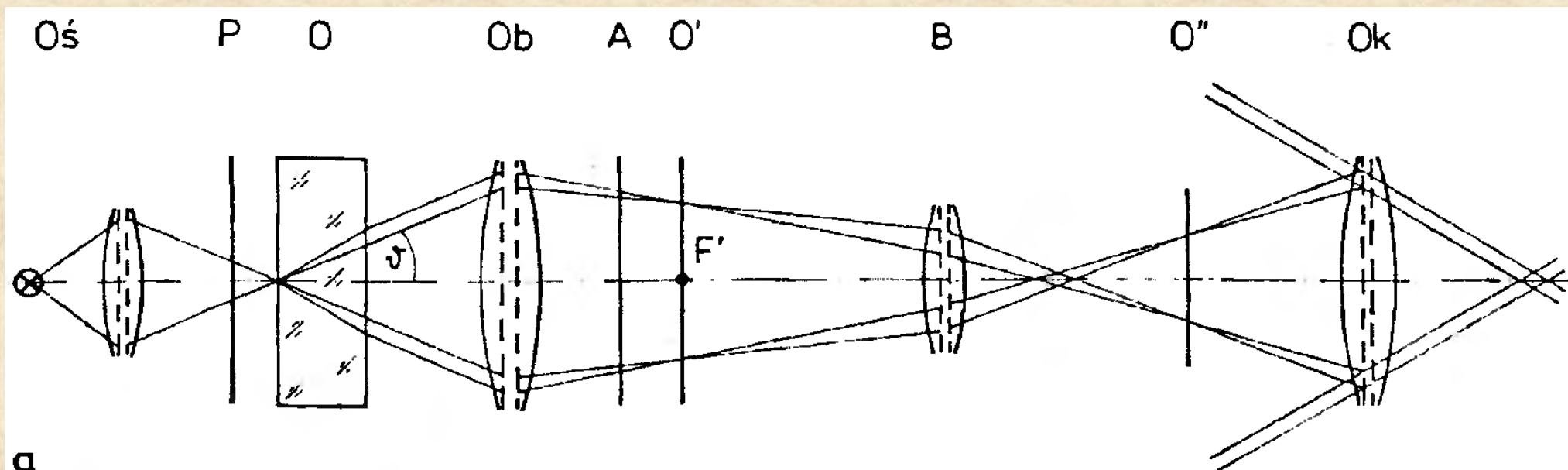
$$I = I_{\max} (\sin^2 2\alpha_1) \sin^2 \frac{\gamma}{2}$$



Mikroskopy

- **Mikroskop polaryzacyjny konoskopowy**

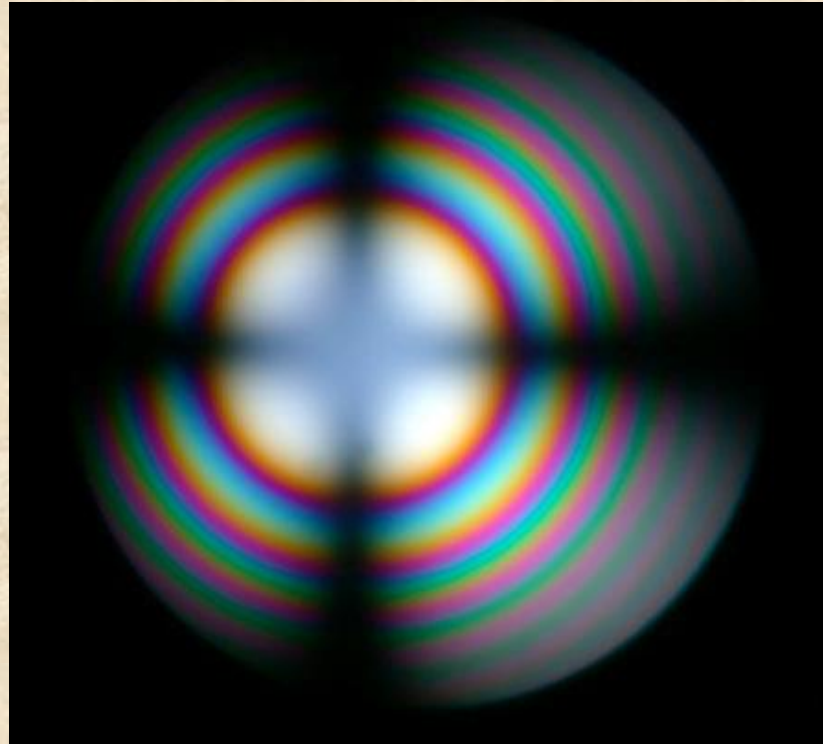
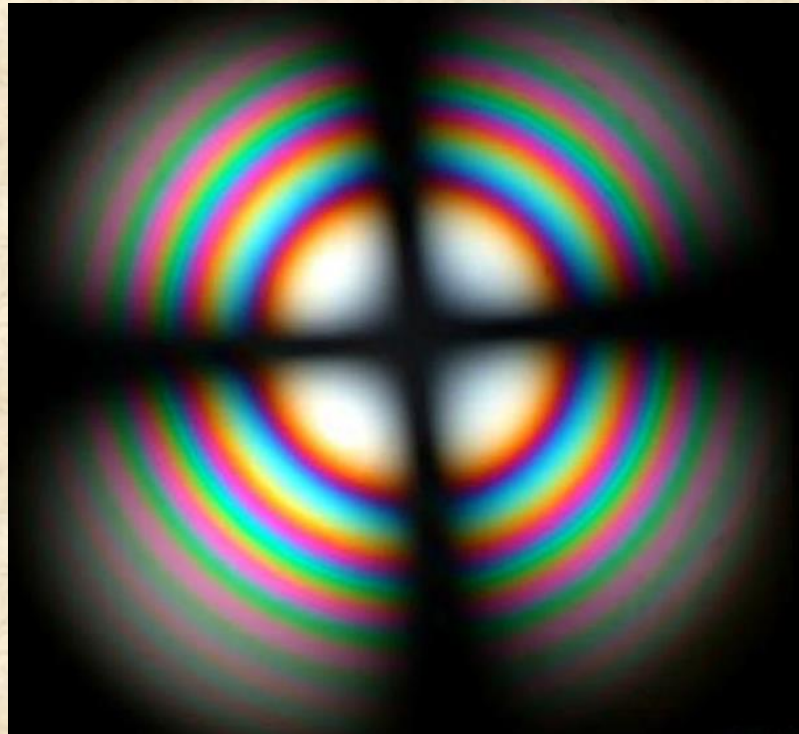
Tym razem wiązka promieni aperturowych wychodzących z oświetlacza jest skupiana **stożkowo** na badanym obiekcie. Również zawiera polaryzator i analizator (może też mieć elementy dodatkowe, ćwierćfalówkę, kompensator). Dodatkowa **soczewka Bertranda** przenosi obraz powstający w płaszczyźnie ogniskowej obiektywu mikroskopu do płaszczyzny przedmiotowej okularu. Można rozpoznać typ kryształu (typ dwójłomności), zmierzyć kąt między osiami binormalnymi (**CO TO JEST DO LICHA?**).





Mikroskopy

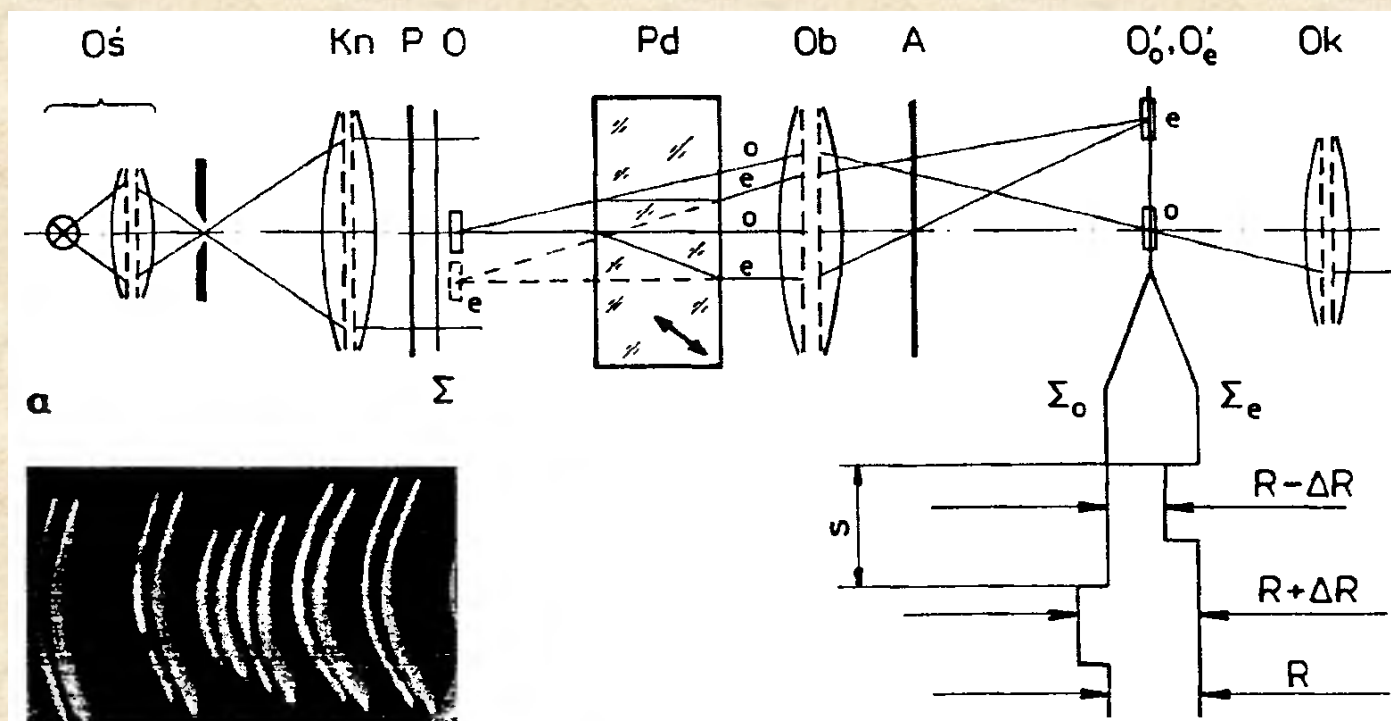
- Figury konoskopowe



Mikroskopy

- Mikroskop polaryzacyjno-interferencyjny**

Tym razem interferencja realizowana jest przed podział fali świetlnej przedmiotowej na kryształ dwójłomnym.



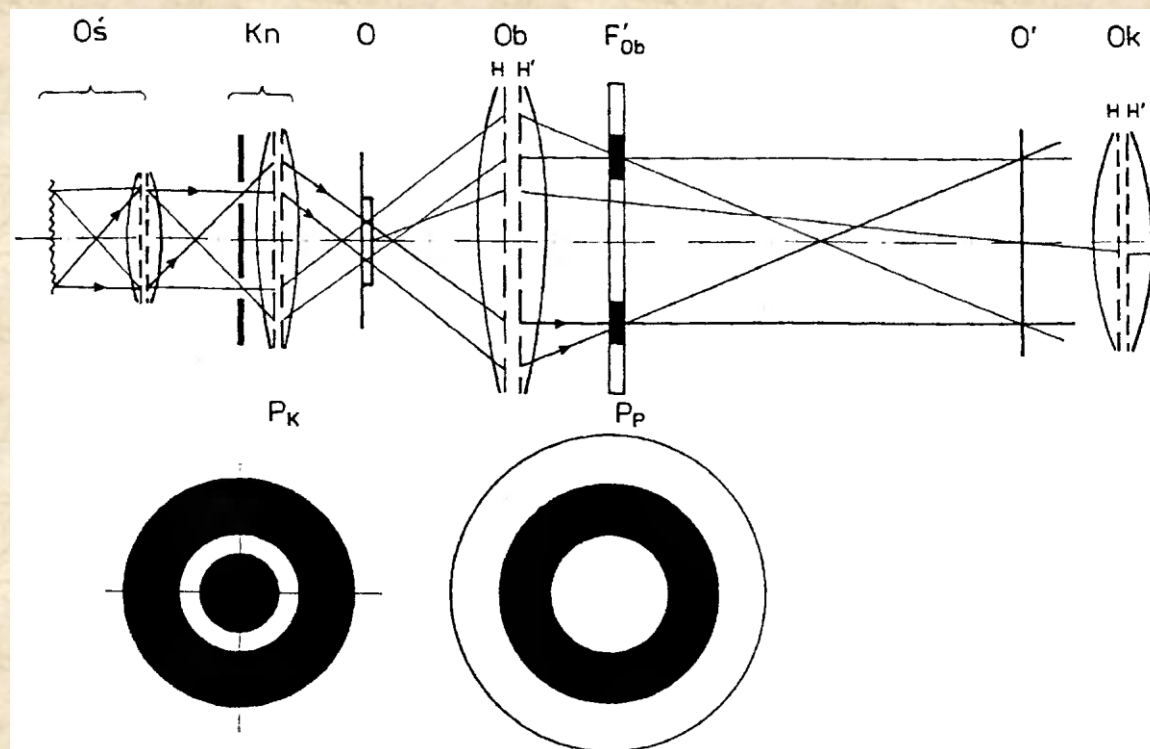
Inne możliwości podziału: układy polaryskopowe w okularze (np. Savarta).



Mikroskopy

- Mikroskop z kontrastem amplitudowo-fazowym**

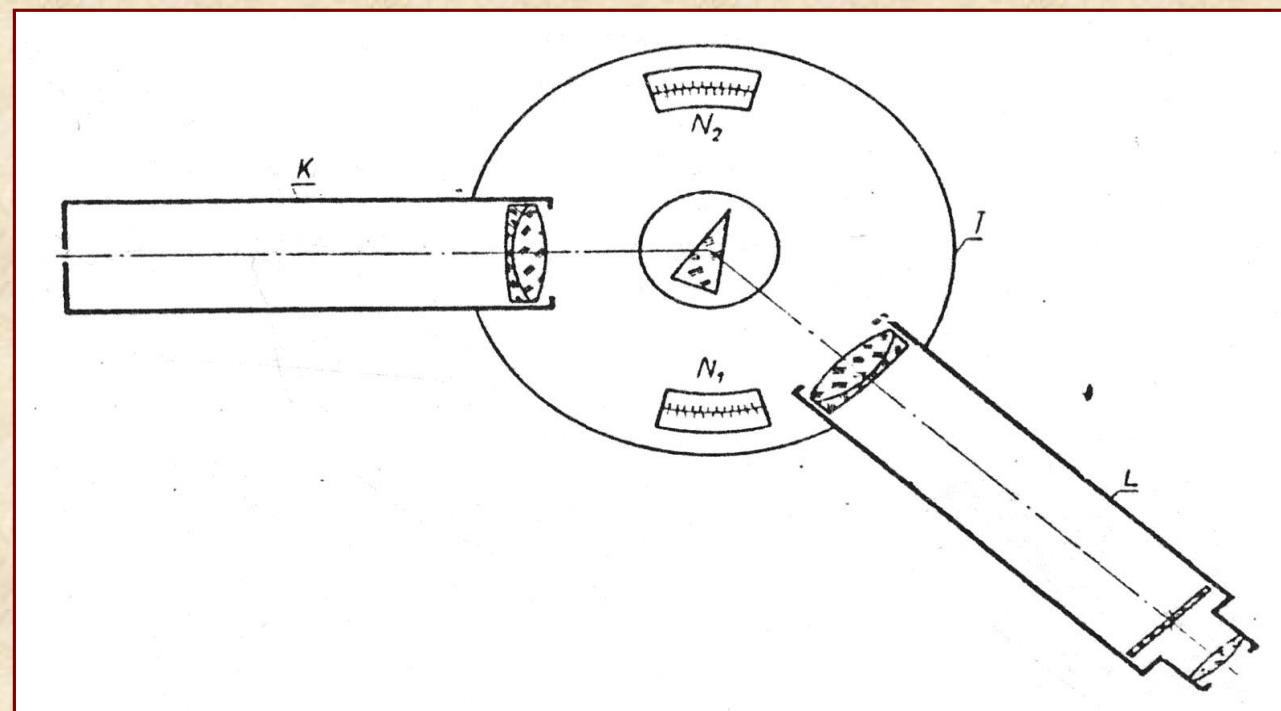
Przypomnienie: teoria falowa Abbego tworzenia obrazu w mikroskopie tłumaczy każdy przedmiot jako siatkę dyfrakcyjną. Jeżeli np. widmo nieugięte (tło) zostanie w obrazie fourierowskim osłabione i dodatkowo przesunięte w fazie o $\pm 90^\circ$, to nawet zupełnie „przezroczyste” przedmioty na przezroczystym tle zostaną uwidocznione jako jasne na tle ciemnym. TO TAK W DUŻYM SKRÓCIE...





Goniometr

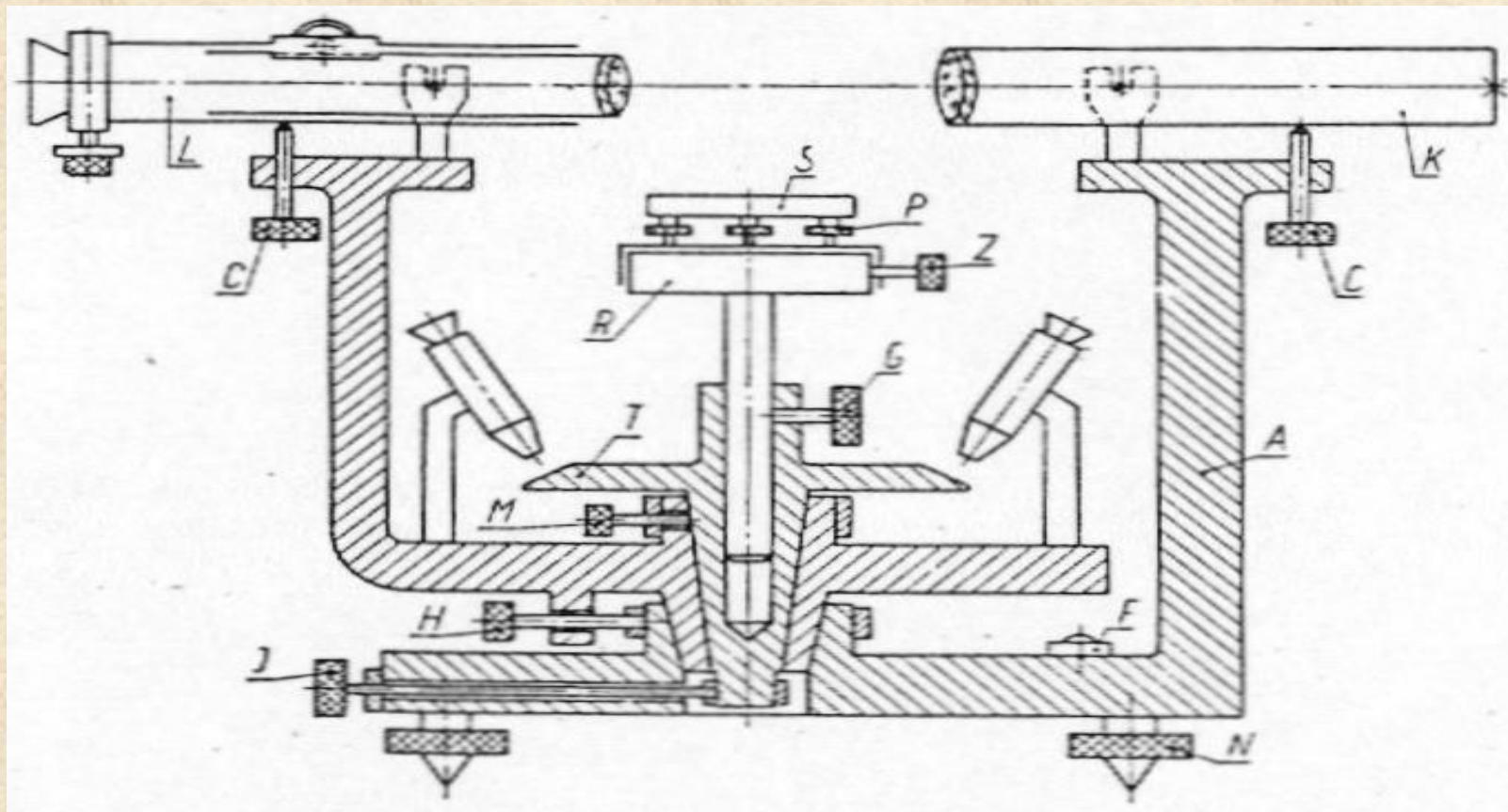
- **Goniometr** służy do pomiaru kątów dwuściennych pryzmatów i kryształów, do pomiaru kątowej odległości linii widmowych itp.
- **Goniometr** to cały zespół elementów, odpowiednio USTAWIONYCH!
 - Kolimator (może mieć własny oświetlacz);
 - Luneta (może być autokolimacyjna);
 - Stolik obrotowy (poziomowanie, wspólna oś obrotu!);
 - Precyzyjna skala kątowa;
 - Urządzenia odczytowe.





Goniometr

- Urządzenie odczytowe kręgu (dwa mikroskopy) ZWYKLE jest sztywno związane z ramieniem lunety. Stosuje się dwa przeciwległe układy odczytowe, które eliminują błędy niecentryczności podziału względem osi obrotu kręgu.





Goniometr

Goniometr z 1912 r.



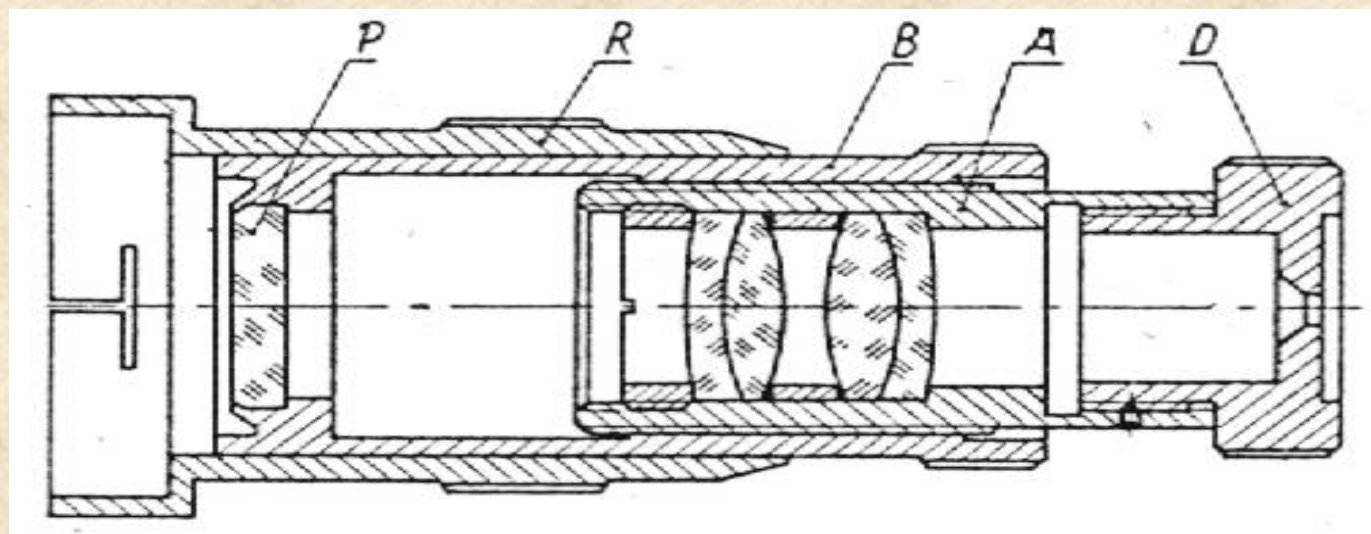
Współczesny goniometr





Dynametry

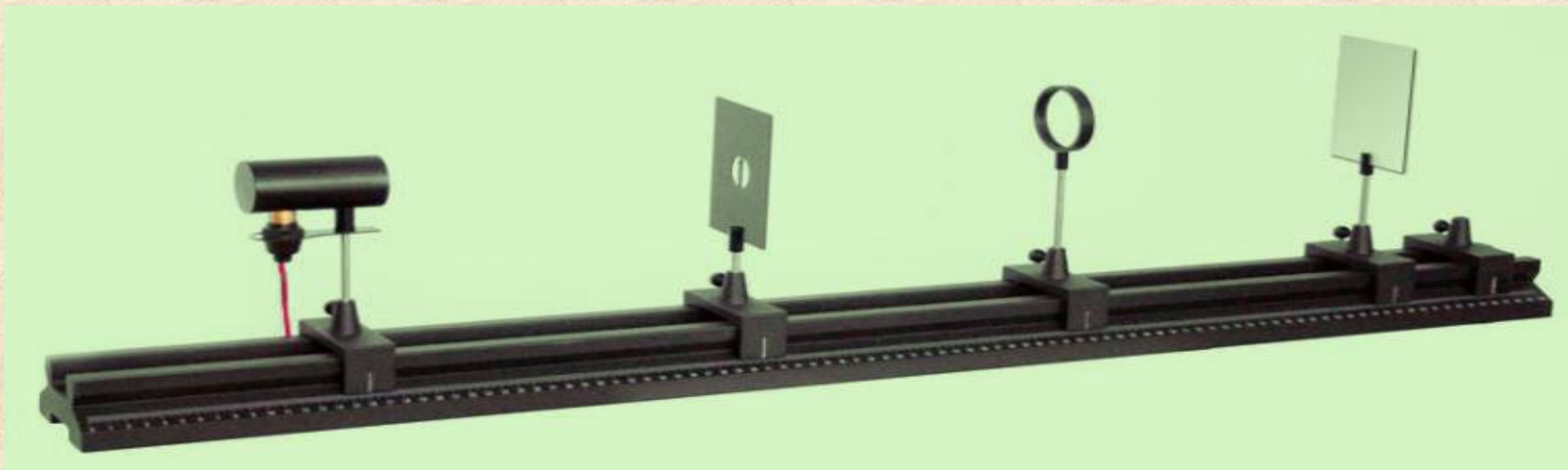
- **Dynametry** są to przyrządy stosowane przy pomiarach źrenic wyjściowych instrumentów optycznych, odległości źrenic od ostatniej powierzchni układu optycznego okularu, a także pośrednio do pomiaru powiększenia lunet.



- Dynametr Ramsdena – składa się z achromatycznej lupy o powiększeniu 10x umieszczonej w przesuwnej obudowie, na końcu której umieszczona jest diafragma z otworkiem. W stałej części obudowy umieszczona jest płytka ogniskowa z podziałką. ALE O NIM BĘDZIE POŹNIEJ!



Ława optyczna





Stoły optyczne

