

TECHNIKI OBSERWACYJNE ORAZ METODY REDUKCJI DANYCH

Arkadiusz Olech, Wojciech Pych

wykład dla doktorantów Centrum
Astronomicznego PAN

luty – maj 2006 r.

Plan wykładu

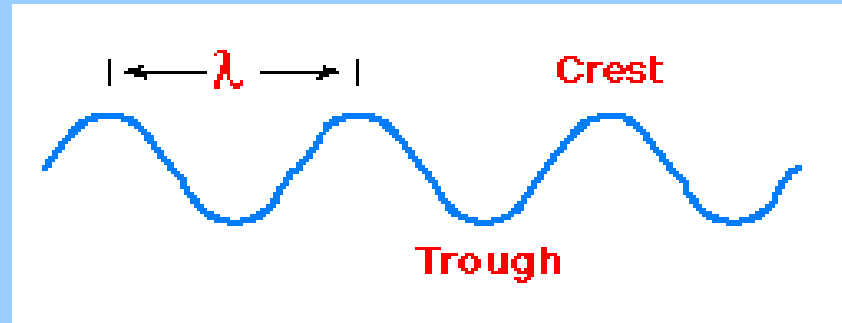
- Optyka w astronomii
- Detektory promieniowania
- SALT
- Fotometria w zakresie widzialnym
- Redukcja danych fotometrycznych
- Obserwacje poza zakresem widzialnym
- Wprowadzenie do spektroskopii
- Redukcja widm typu long-slit
- Redukcja widm typu Echelle
- Wyznaczanie prędkości radialnych

Informacje z Wszechświata

- MATERIA: promieniowanie kosmiczne, meteoryty, przywieziona przez misje kosmiczne
- NEUTRINA: słoneczne, powstające podczas wybuchów supernowych (SN 1987A)
- FALE GRAWITACYJNE: emisja na skutek zmiany rozkładu masy
- FALE ELEKTROMAGNETYCZNE: I tym właśnie będziemy się zajmować

Fale elektromagnetyczne

Dualizm korpuskularno-falowy: fale, fotony

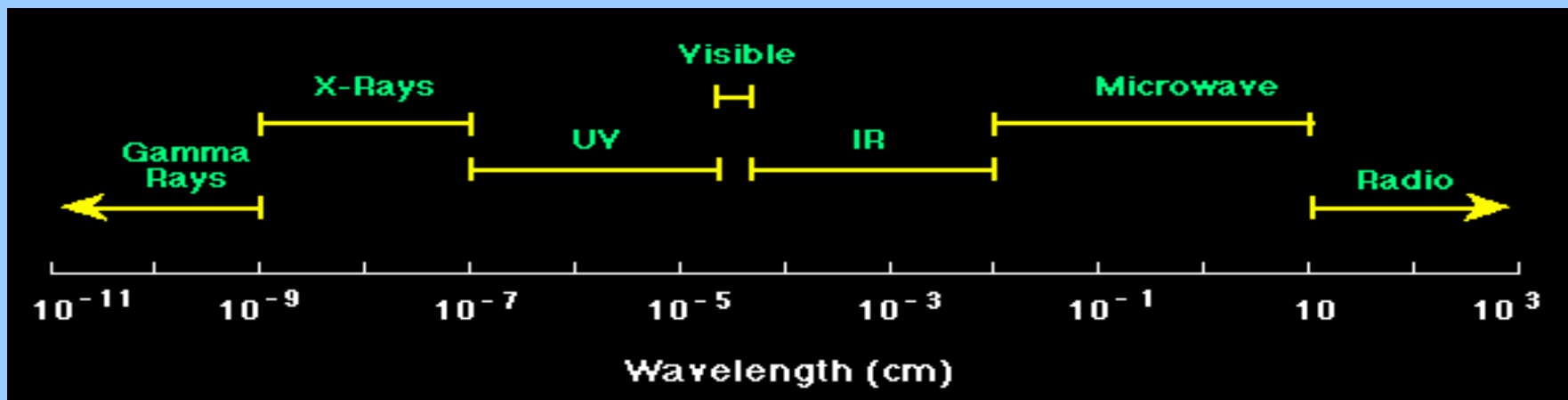


$$\lambda = \frac{c}{\nu}$$

$$E = h\nu = \frac{hc}{\lambda}$$

$$c = 3 \times 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$$

$$h = 4.135 \times 10^{-15} \text{ eV} \cdot \text{s} = 6.625 \cdot 10^{-27} \text{ erg} \cdot \text{s}$$



Spectrum of Electromagnetic Radiation

Region	Wavelength (Angstroms)	Wavelength (centimeters)	Frequency (Hz)	Energy (eV)
Radio	$> 10^9$	> 10	$< 3 \times 10^9$	$< 10^{-5}$
Microwave	$10^9 - 10^6$	$10 - 0.01$	$3 \times 10^9 - 3 \times 10^{12}$	$10^{-5} - 0.01$
Infrared	$10^6 - 7000$	$0.01 - 7 \times 10^{-5}$	$3 \times 10^{12} - 4.3 \times 10^{14}$	$0.01 - 2$
Visible	$7000 - 4000$	$7 \times 10^{-5} - 4 \times 10^{-5}$	$4.3 \times 10^{14} - 7.5 \times 10^{14}$	$2 - 3$
Ultraviolet	$4000 - 10$	$4 \times 10^{-5} - 10^{-7}$	$7.5 \times 10^{14} - 3 \times 10^{17}$	$3 - 10^3$
X-Rays	$10 - 0.1$	$10^{-7} - 10^{-9}$	$3 \times 10^{17} - 3 \times 10^{19}$	$10^3 - 10^5$
Gamma Rays	< 0.1	$< 10^{-9}$	$> 3 \times 10^{19}$	$> 10^5$

Promieniowanie ciała doskonale czarnego

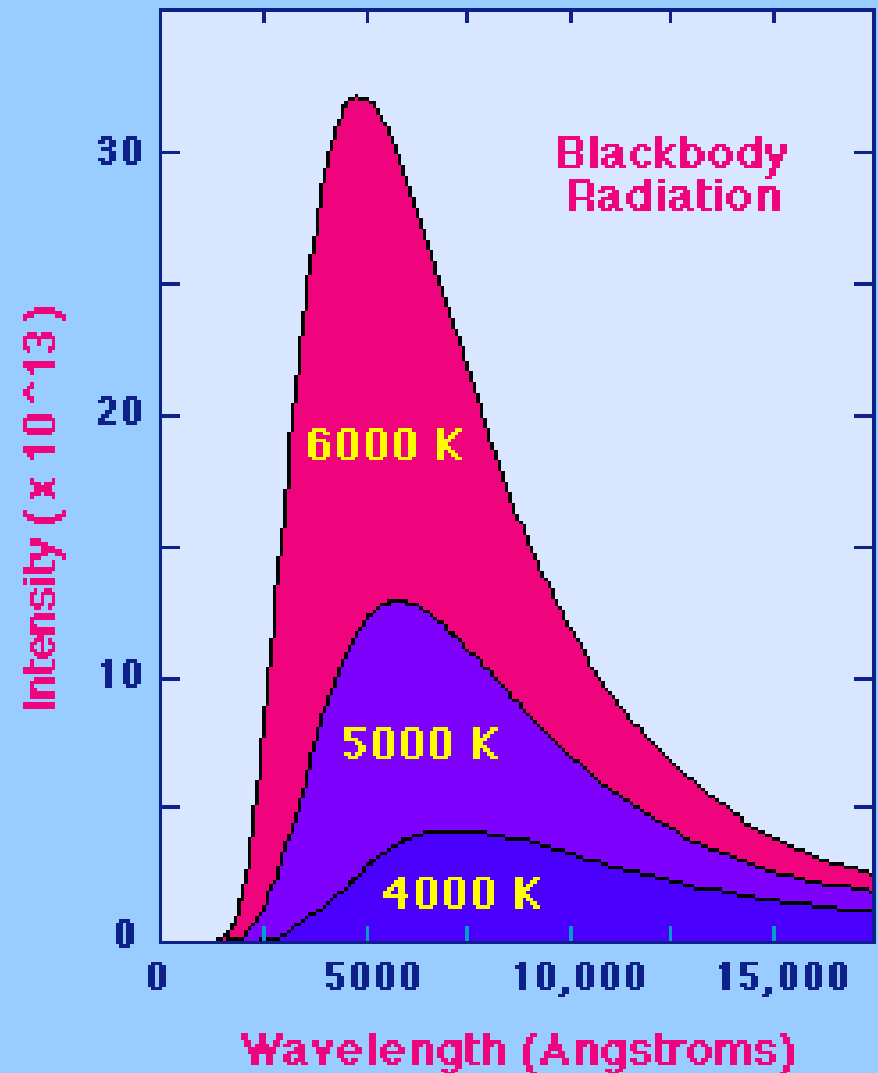
$$E(\lambda, T) = \frac{2hc^2}{\lambda^5} \frac{1}{\exp\left(\frac{hc}{\lambda kT} - 1\right)}$$

Prawo Stefana-Boltzmannna:

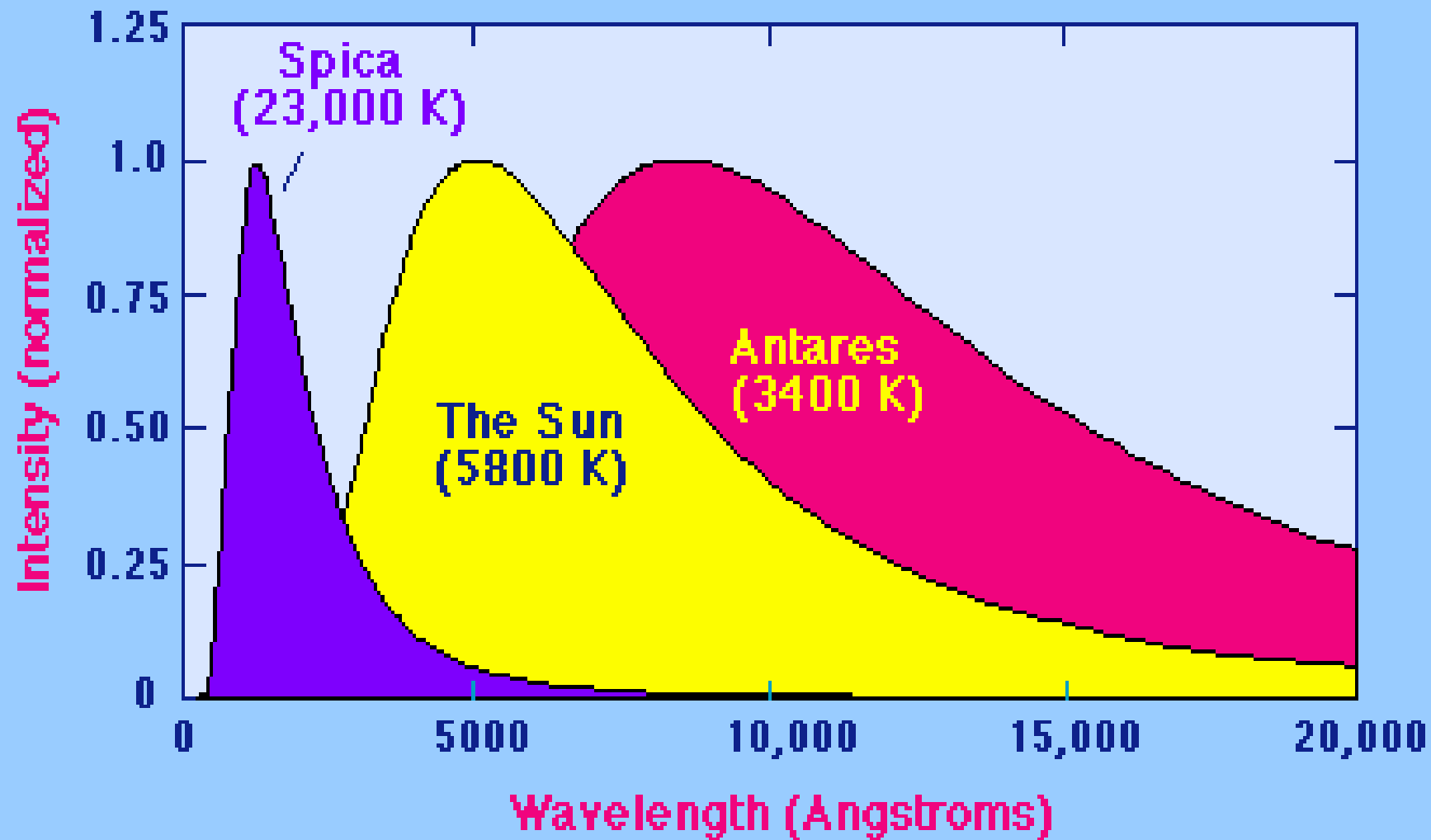
$$E(T) = \int_0^{\infty} E(\lambda, T) d\lambda = \sigma T^4$$

$$k = 1.38 \times 10^{-16} \text{ erg/K}$$

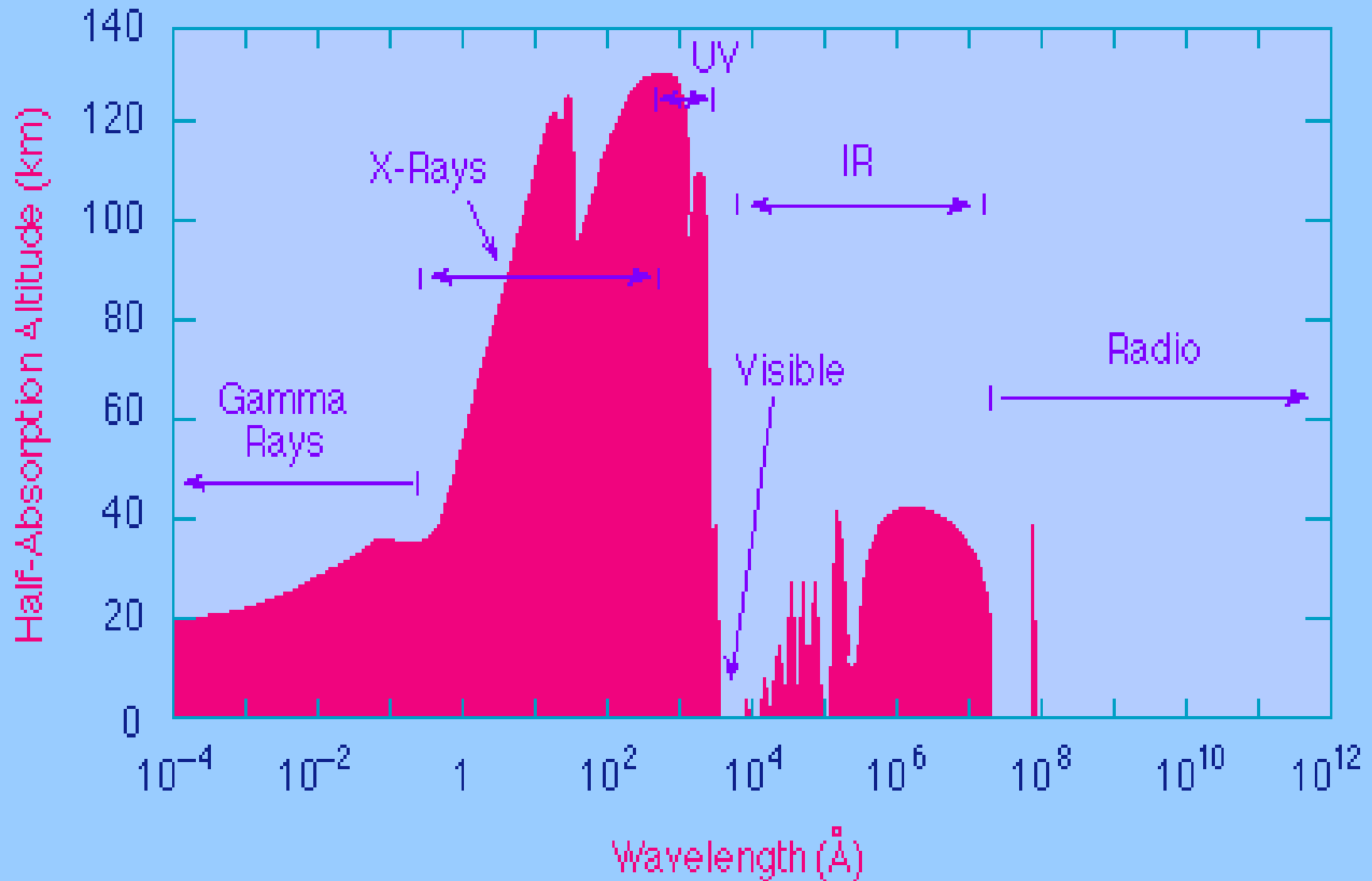
$$\sigma = 5.6705 \times 10^{-5} \text{ erg} \cdot \text{cm}^2 \cdot \text{K}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$$



Prawo przesunięć Wiena



Wpływ atmosfery

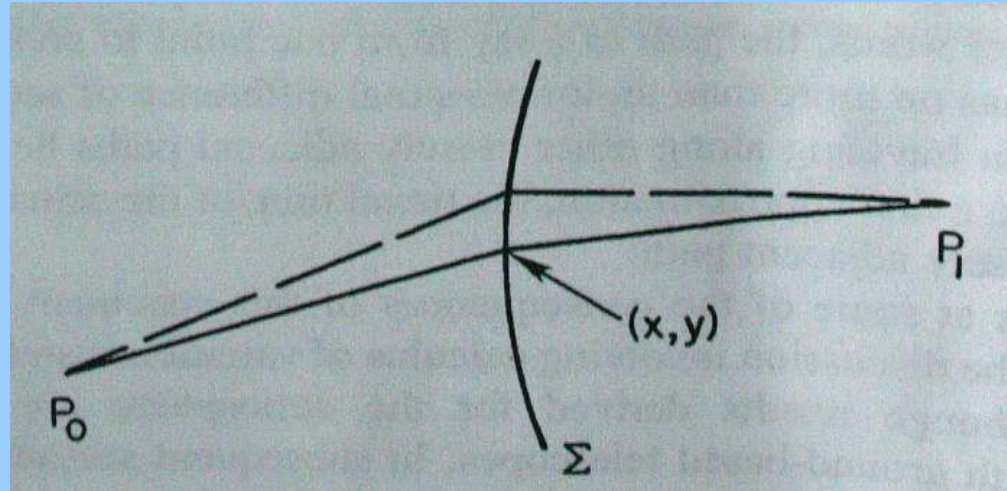


Techniki astronomii optycznej

- **Fotometria**: pomiar natężenia światła dochodzącego do nas od obiektów astronomicznych,
- **Spektroskopia**: pomiar widma obiektu (funkcja natężenia od długości fali),
- **Obrazowanie**: pomiar odległości i rozmiarów kątowych obiektów

Zasada Fermata

Mamy granicę dwóch ośrodków i promień światła lecący z P_0 do P_1



Niech OPL (Optical Path Length) oznacza długość drogi optycznej,

$$d(\text{OPL}) = c dt = (c/v)v dt = n ds,$$

$$\text{OPL} = c \int dt = \int n ds,$$

gdzie c to prędkość światła w próżni, a v w ośrodku o współczynniku załamania n

Zasada Fermata

Zasadę Fermata możemy teraz sformułować na dwa sposoby:

$$\delta\tau = 0 \text{ or } \delta(\text{OPL}) = 0,$$

co jest równoznaczne z powiedzeniem, że światło porusza się wybierając najkrótszą drogę optyczną lub drogę, której pokonanie zajmuje najmniej czasu.

W wariancie 2D w przestrzeni (y, z) mamy:

$$n = n(y, z)$$

$$ds = \sqrt{dy^2 + dz^2}$$

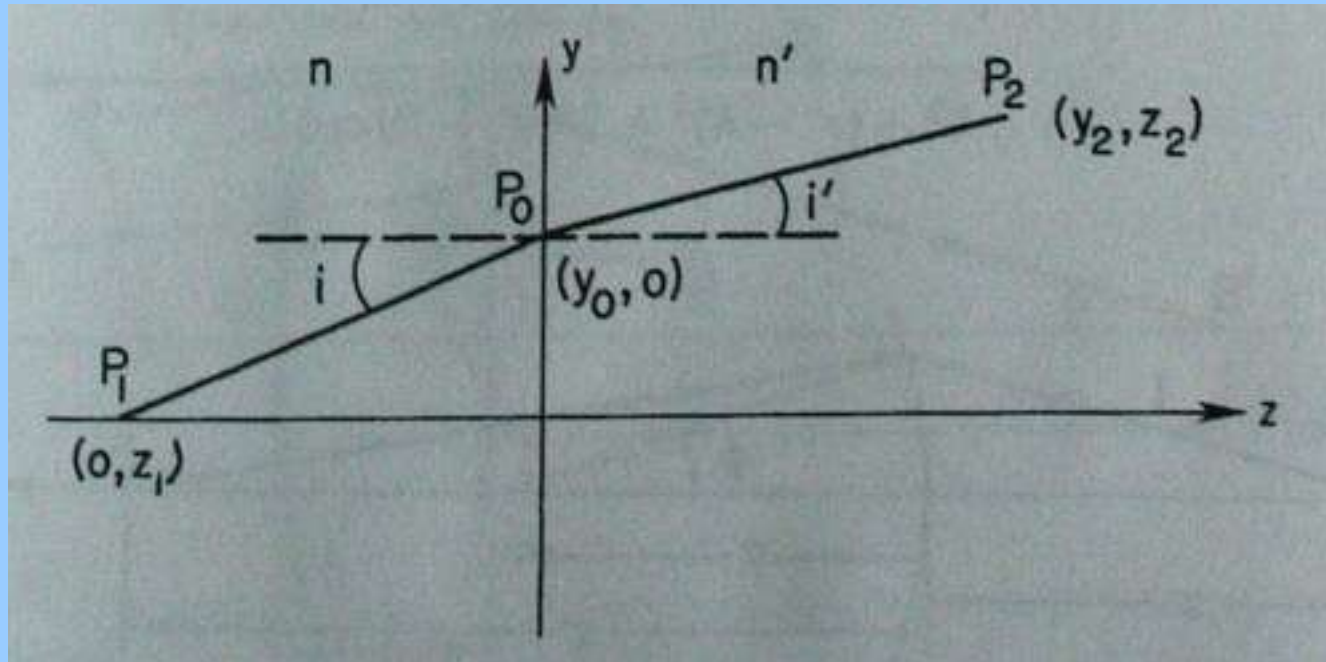
$$y' = dy/dz,$$

i wtedy zasada Fermata wygląda następująco:

$$\delta \int_{P_0}^{P_1} n(y, z) \sqrt{(1 + y'^2)} dz = 0,$$

Zasada Fermata

Dla granicy dwóch ośrodków o współczynnikach załamania n i n' :



zasada Fermata daje:

$$\delta \left[n \int_{P_1}^{P_0} ds + n' \int_{P_0}^{P_2} ds \right] = 0,$$

a korzystając z geometrii:

$$\delta \left\{ n \sqrt{(z_1^2 + y_0^2)} + n' \sqrt{[z_2^2 + (y_2 - y_0)^2]} \right\} = 0.$$

Zasada Fermata

Ponieważ zmienną jest y_0 to różniczkowanie daje:

$$\left\{ n \frac{d}{dy_0} \sqrt{(z_1^2 + y_0^2)} + n' \frac{d}{dy_0} \sqrt{[z_2^2 + (y_2 - y_0)^2]} \right\} \delta y_0 = 0.$$

równanie musi być spełnione zawsze, więc wyraz w nawiasach = 0:

$$n \frac{y_0}{\sqrt{(z_1^2 + y_0^2)}} - n' \frac{y_2 - y_0}{\sqrt{[z_2^2 + (y_2 - y_0)^2]}} = 0.$$

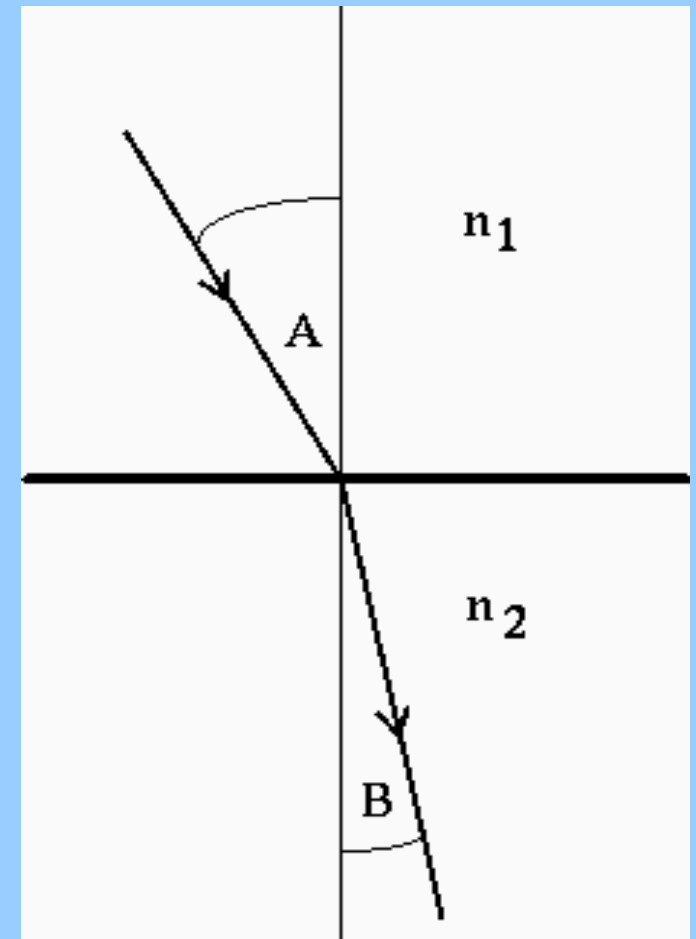
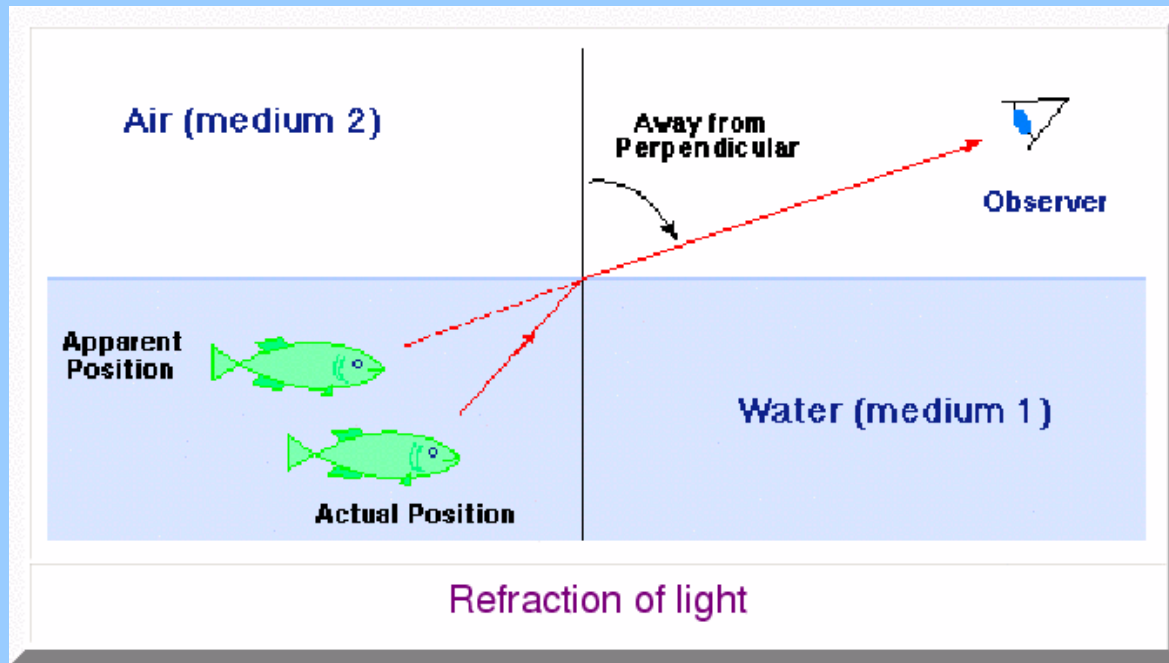
Łatwo zauważyć, że wyrażenia przy n i n' to odpowiednie sinusy.

Ostatecznie otrzymujemy:

$$n \sin i = n' \sin i'$$

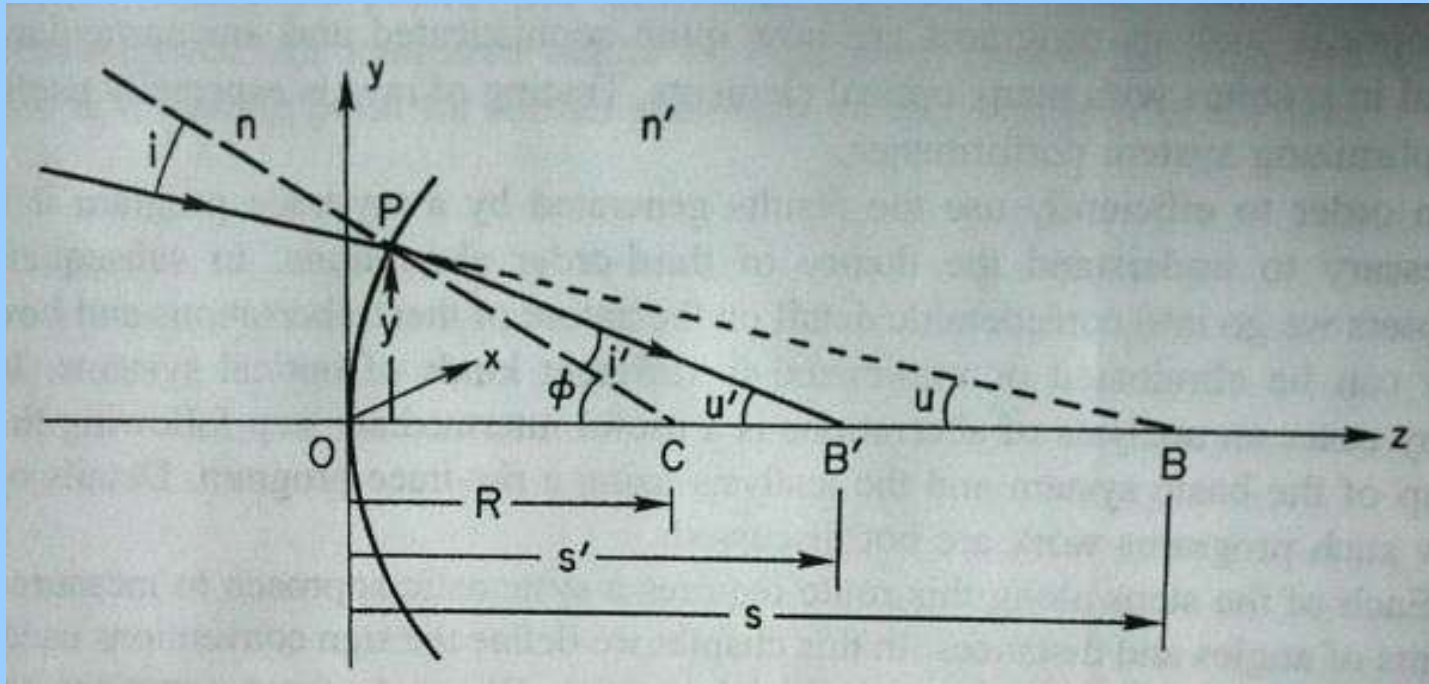
Załamanie światła

Prawo załamania (Snella)



$$\frac{\sin A}{\sin B} = \frac{n_2}{n_1}$$

Załamanie na powierzchni sferycznej



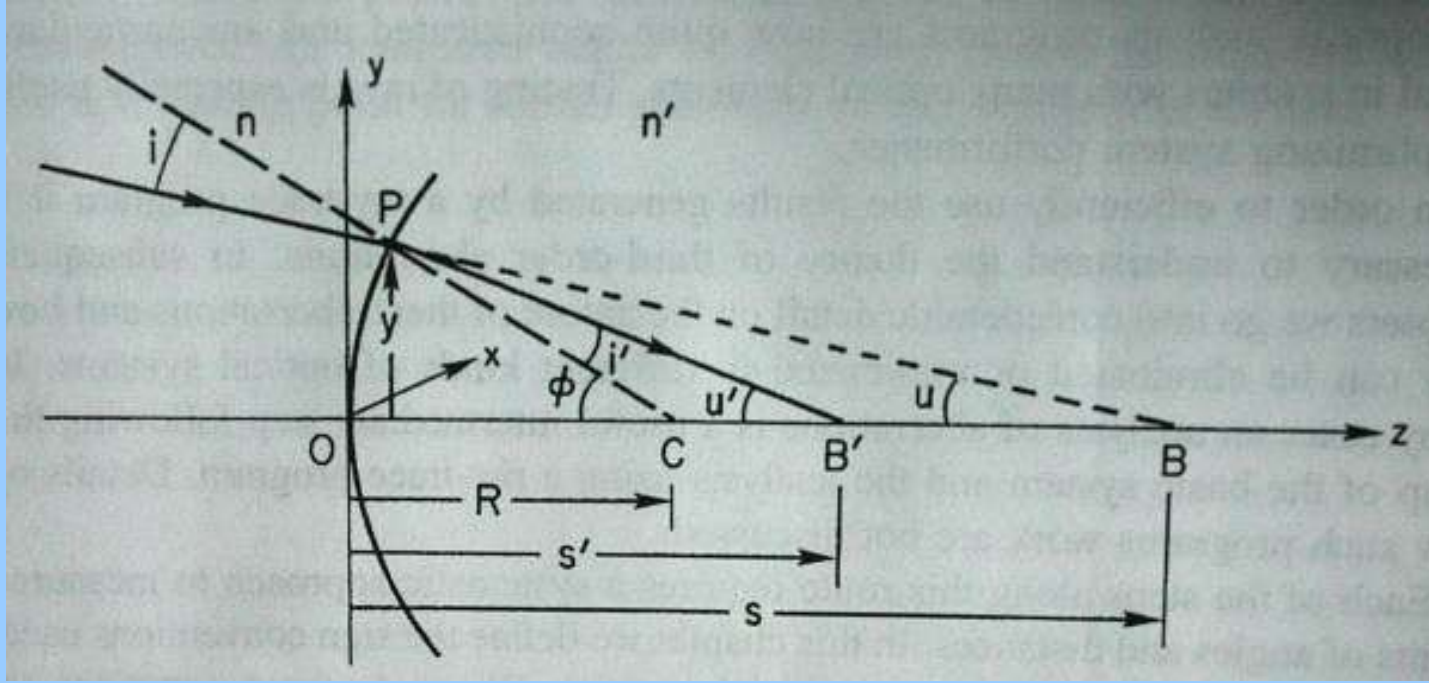
Prawo Snelliusa: $n \sin i = n' \sin i'$

W przybliżeniu osiowym: $ni = n'i'$

Z rysunku:

$$i + u = \phi, \quad i' + u' = \phi.$$

Załamanie na powierzchni sferycznej



Po przekształceniach:

$$n'u' - nu = (n' - n)\phi.$$

ale w przybliżeniu osiowym: $\phi = y/R$, $u = y/s$ oraz $u' = y/s'$

więc:

$$\frac{n'}{s'} - \frac{n}{s} = \frac{n' - n}{R}.$$

dla $s \rightarrow$ nieskończoności

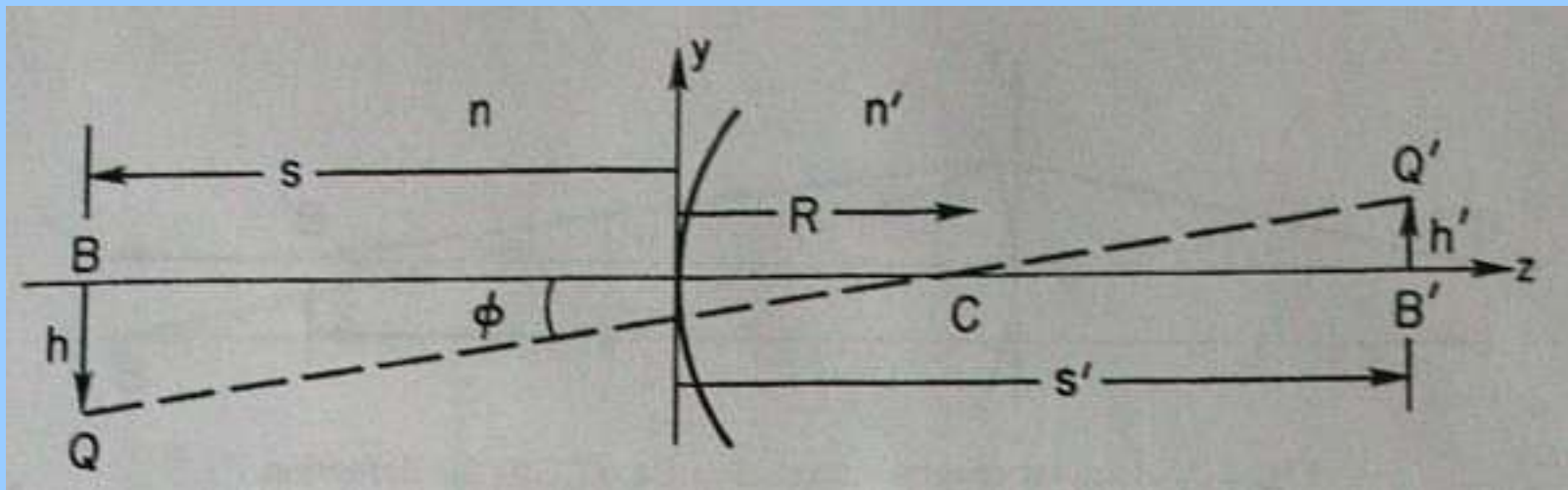
$s' = f$ - ogniskowa

Załamanie na powierzchni sferycznej

Moc soczewki P :

$$\frac{n'}{s'} - \frac{n}{s} = \frac{n' - n}{R} = P = \frac{n'}{f'} = -\frac{n}{f}$$

Powiększenie m :



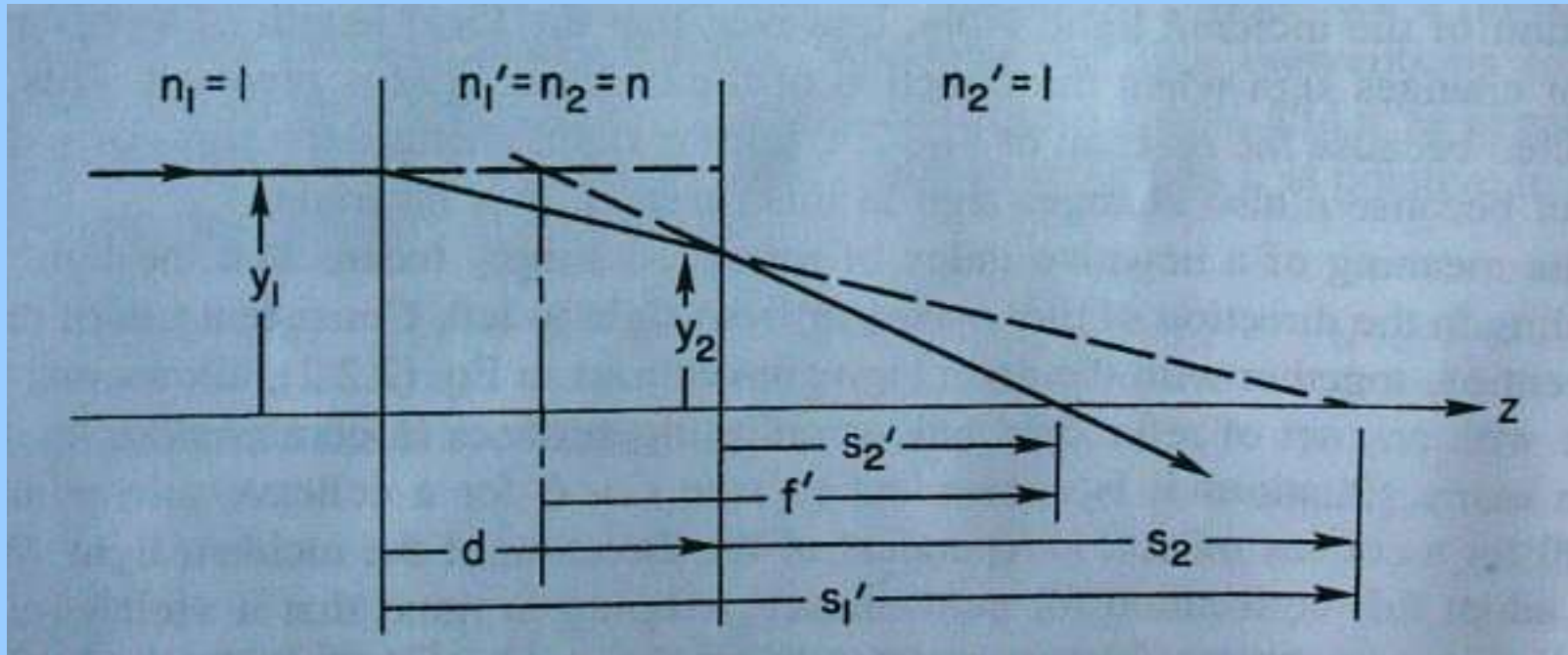
$$h' = -(s' - R) \tan \phi, \quad h = -(s - R) \tan \phi,$$

$$m = \frac{h'}{h} = \frac{s' - R}{s - R} = \frac{ns'}{n's}$$

Załamanie na grubej soczewce

Zakładając że soczewka jest w powietrzu:

$$n_1 = n_2' = 1,$$

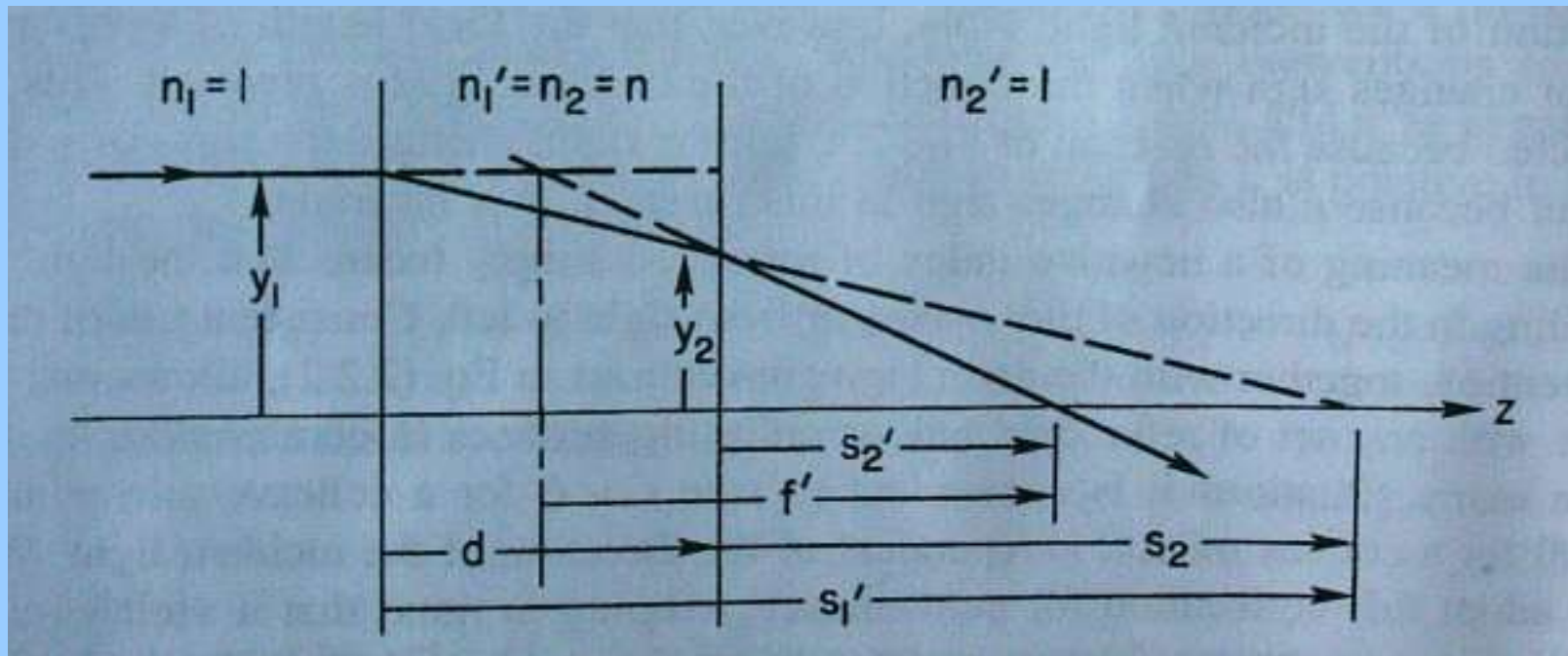


gdzie: $s_2 = s_1' - d.$

pisząc równanie soczewki dla każdej z dwóch granic:

$$\frac{n}{s_1'} - \frac{1}{s_1} = \frac{n-1}{R_1} = P_1, \quad \frac{1}{s_2'} - \frac{n}{s_2} = \frac{1-n}{R_2} = P_2,$$

Załamania na grubej soczewce



Nas interesuje całkowita moc P lub efektywna ogniskowa f' , gdzie $f' = 1/P$. To jest realizowane dla s_1 dążącego do nieskończoności.

Mamy więc promień wchodzący do soczewki na wysokości y_1 i wychodzący na wysokości y_2 :

$$\frac{y_2}{y_1} = \frac{s_1' - d}{s_1'} = \frac{s_2'}{f'}$$

Załamania na grubej soczewce

Wychodzimy z:

$$\frac{y_2}{y_1} = \frac{s'_1 - d}{s'_1} = \frac{s'_2}{f'}$$

$$\frac{n}{s'_1} - \frac{1}{s_1} = \frac{n-1}{R_1} = P_1, \quad \frac{1}{s'_2} - \frac{n}{s_2} = \frac{1-n}{R_2} = P_2,$$

i przy założeniu $s_2 = s'_1 - d$, $s_1 = \infty$ otrzymujemy:

$$P_1 = \frac{n}{s'_1}, \quad P_2 = \frac{1}{s'_2} - \frac{n}{s'_1 - d},$$
$$P = \frac{1}{f'} = \frac{1}{s'_2} \left(\frac{s'_1 - d}{s'_1} \right) = \left(P_2 + \frac{n}{s'_1 - d} \right) \left(\frac{s'_1 - d}{s'_1} \right).$$

po wymnożeniu nawiasów i uporządkowaniu:

$$P = \frac{1}{f'} = P_1 + P_2 - \left(\frac{d}{n} \right) P_1 P_2.$$

Cienka soczewka

Ogólnie:

$$\frac{n}{s'_1} - \frac{1}{s_1} = \frac{n-1}{R_1} = P_1, \quad \frac{1}{s'_2} - \frac{n}{s_2} = \frac{1-n}{R_2} = P_2, \quad P = \frac{1}{f'} = P_1 + P_2 - \left(\frac{d}{n}\right)P_1P_2.$$

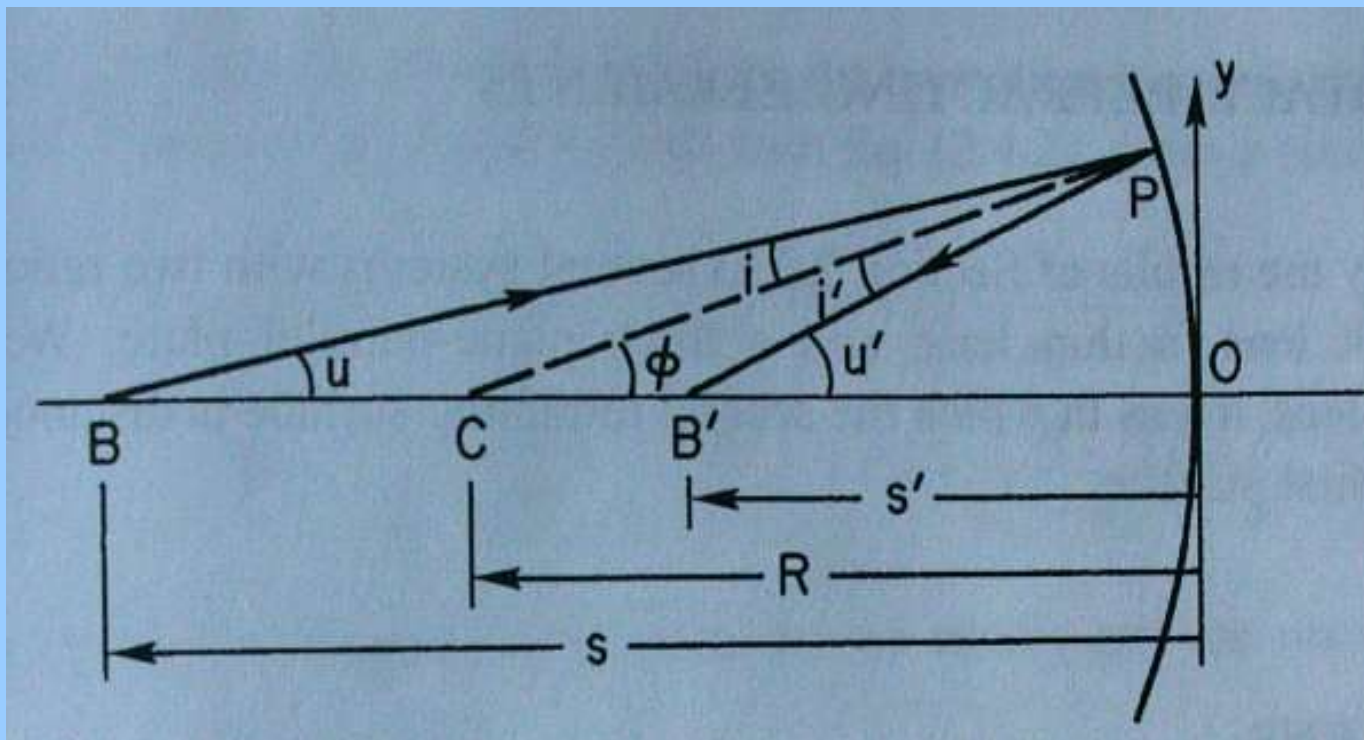
ale dla cienkiej soczewki d jest małe w porównaniu z wszystkimi s więc równanie $s_2 = s'_1 - d$ przechodzi w: $s_2 = s'_1$

Sumując P_1 i P_2 oraz oznaczając $s_1 = s$ i $s'_2 = s'$ otrzymujemy:

$$\frac{1}{s'} - \frac{1}{s} = (n-1) \left(\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2} \right) = P_1 + P_2 = P = \frac{1}{f'} = -\frac{1}{f}.$$

czyli to samo gdybyśmy w równaniu na P położyli $d=0$

Zwierciadło sferyczne



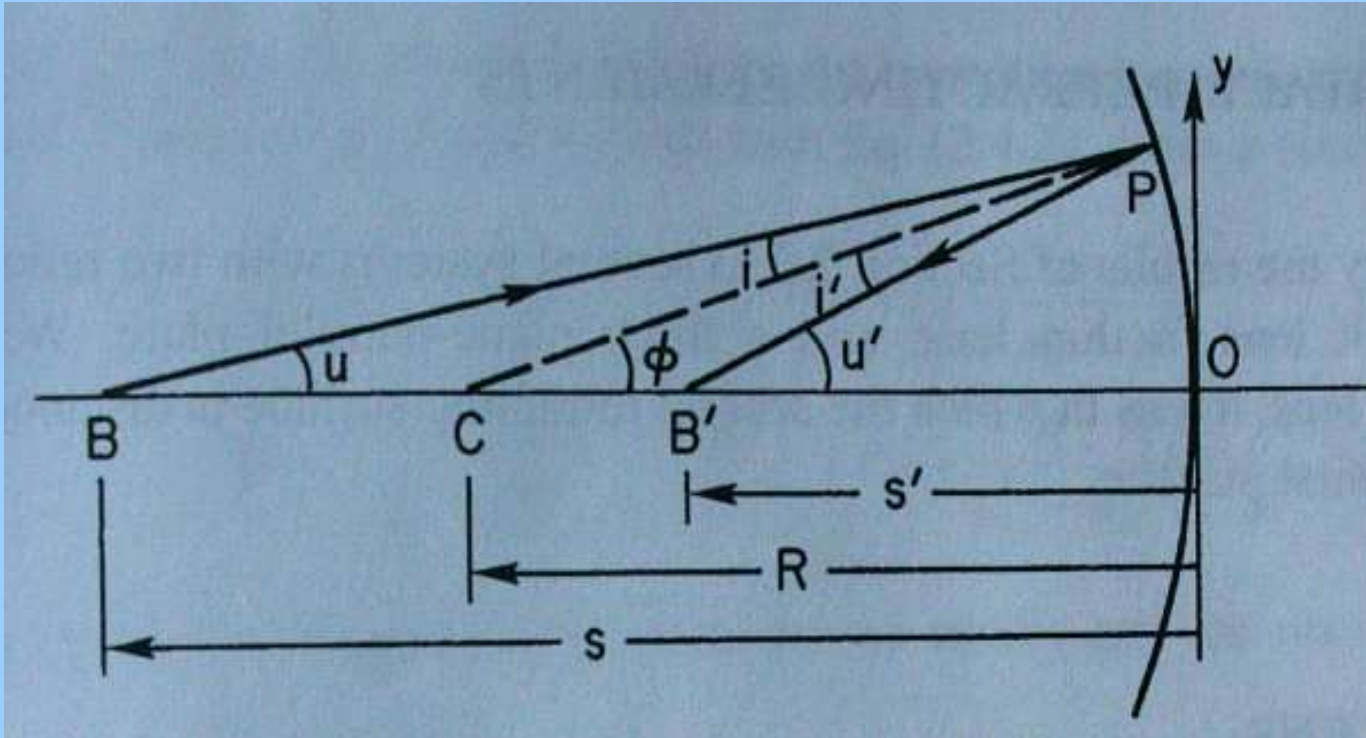
W przybliżeniu osiowym:

$$i = \phi - u, \quad i' = \phi - u', \quad \phi = \frac{y}{R}, \quad u = \frac{y}{s}, \quad u' = \frac{y}{s'}.$$

a ponieważ kąt padania = kąt odbicia: $i = -i'$,

$$\frac{1}{s'} + \frac{1}{s} = \frac{2}{R}.$$

Zwierciadło sferyczne



Prawo odbicia jest analogiczne do prawa Snella, jeśli położymy $n' = -n$

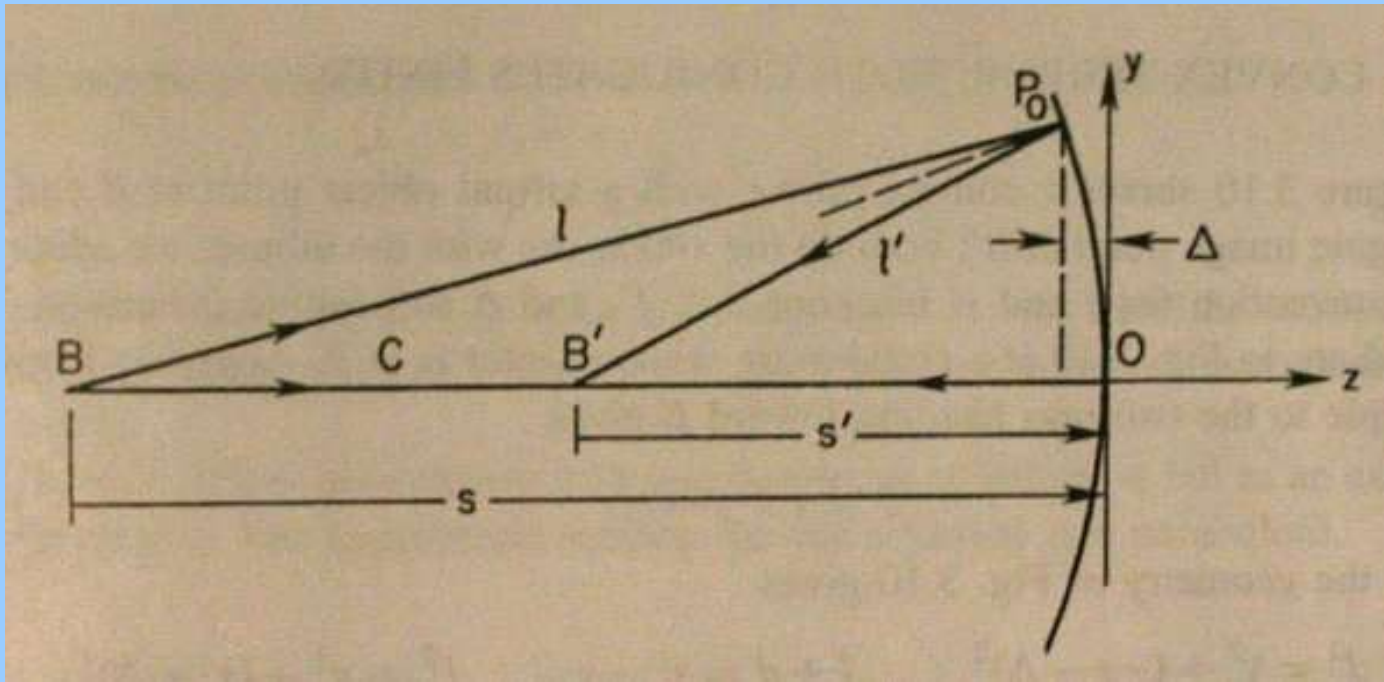
Wtedy wzór:
$$\frac{n'}{s'} - \frac{n}{s} = \frac{n' - n}{R} = P = \frac{n'}{f'} = -\frac{n}{f}$$

przyjmuje postać:

$$\frac{1}{s'} + \frac{1}{s} = \frac{2}{R} = -\frac{P}{n} = \frac{1}{f'} = \frac{1}{f},$$

$$m = -\frac{s'}{s}.$$

Zwierciadło wklęsłe w ogólności



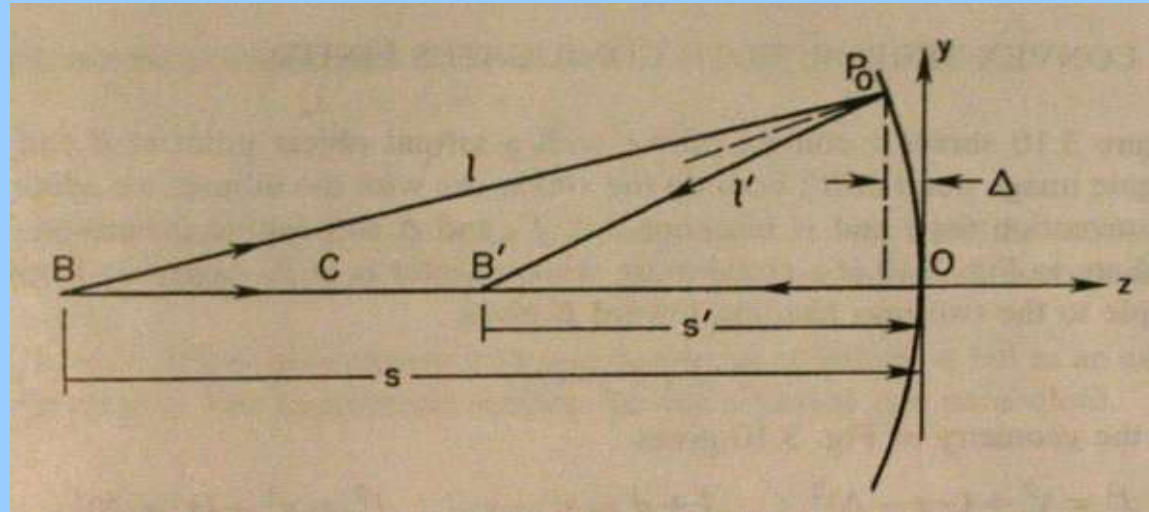
W ogólności równanie powierzchni odbijającej możemy zapisać jako:

$$y^2 - 2Rz + (1 - e^2)z^2 = 0.$$

gdzie e jest związane z tzw. Stałą stożkową K równaniem:

$$K = -e^2$$

Zwierciadło wklęsłe w ogólności

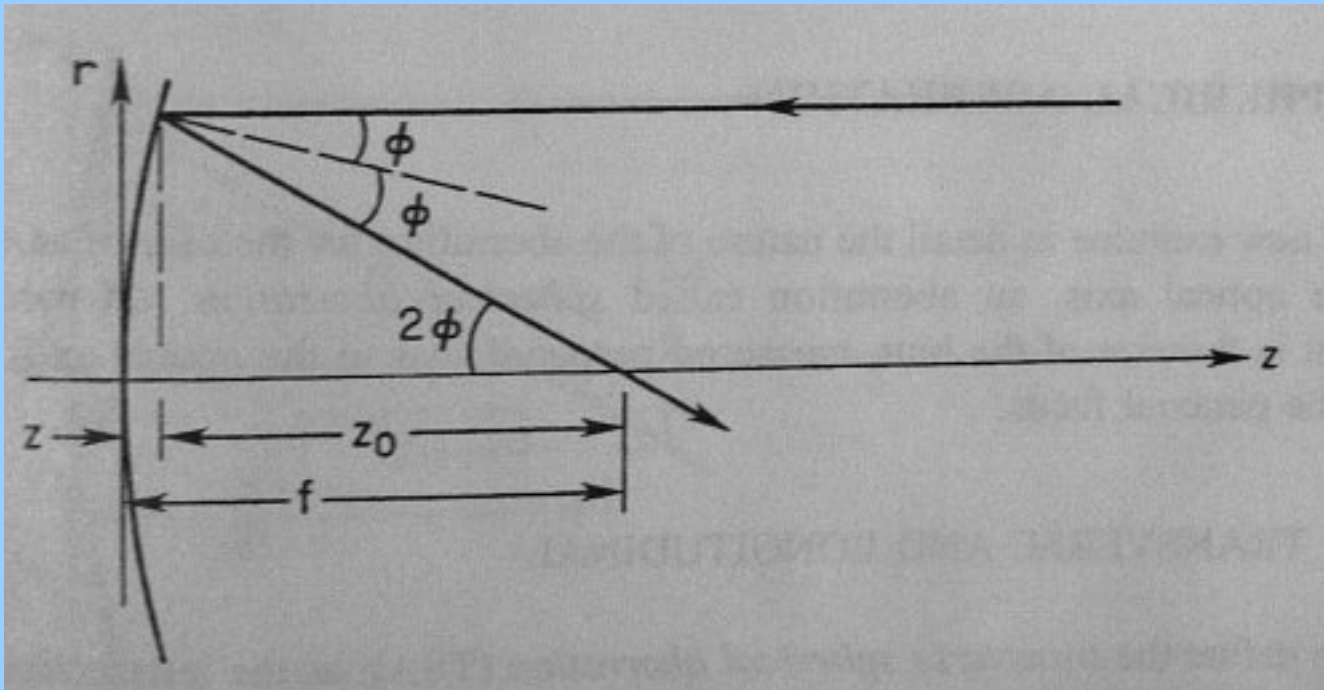


$$y^2 - 2Rz + (1 - e^2)z^2 = 0.$$

W zależności od wartości e i K mamy następujące krzywe stożkowe:

oblate ellipsoid:	$e^2 < 0$	$K > 0$
sphere:	$e = 0$	$K = 0$
prolate ellipsoid:	$0 < e < 1$	$-1 < K < 0$
paraboloid:	$e = 1$	$K = -1$
hyperboloid:	$e > 1$	$K < -1$

Zwierciadło wklęsłe dla promieni z nieskończoności



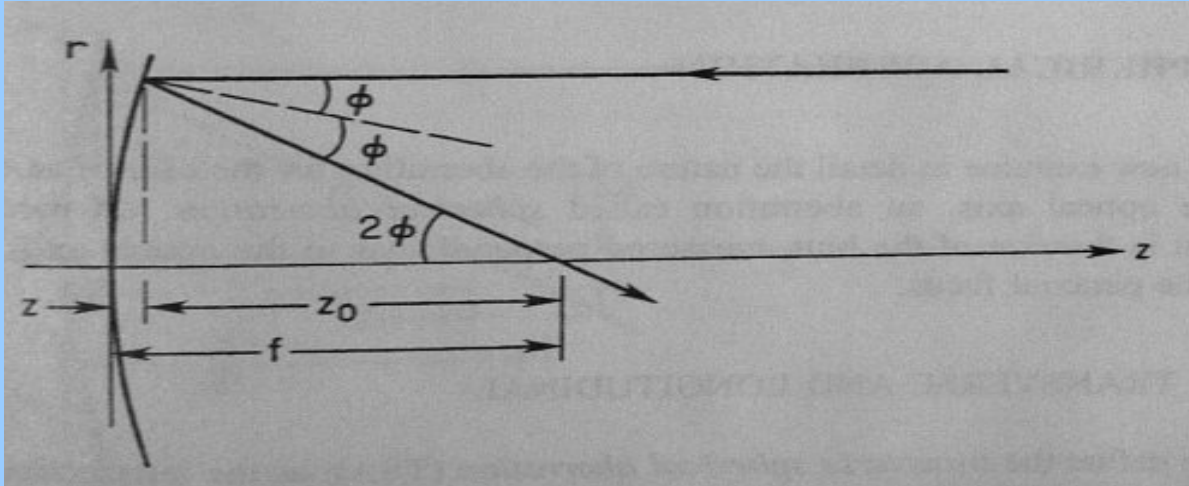
Mamy teraz w ogólności r zamiast y gdzie $r^2 = x^2 + y^2$

Nasze równanie zwierciadła to: $r^2 - 2Rz + (1+K)z^2 = 0$

Ale: $z_0 = \frac{r}{\tan 2\phi} = \frac{r(1 - \tan^2 \phi)}{2 \tan \phi}$ a $\tan \phi$ to dz/dr więc różniczkując:

$$\frac{dz}{dr} = \frac{r}{R - (1 + K)z} = \tan \phi.$$

Zwierciadło wklęsłe dla promieni z nieskończoności



$$z_0 = \frac{r}{\tan 2\phi} = \frac{r(1 - \tan^2 \phi)}{2 \tan \phi}.$$

$$\frac{dz}{dr} = \frac{r}{R - (1 + K)z} = \tan \phi.$$

$$f = z + z_0$$

Łącząc powyższe równania otrzymujemy:

$$f = \frac{R}{2} + \frac{(1 - K)z}{2} - \frac{r^2}{2(R - (1 + K)z)}.$$

natomiast równanie zwierciadła można rozwiązać względem z i zrobić przybliżenie pierwiastka dla małych r/R :

$$\begin{aligned} z &= \frac{R}{1 + K} \left[1 - \left(1 - \frac{r^2}{R^2} (1 + K) \right)^{1/2} \right] \\ &= \frac{r^2}{2R} + (1 + K) \frac{r^4}{8R^3} + (1 + K)^2 \frac{r^6}{16R^5} + \dots \end{aligned}$$

Zwierciadło wklęsłe dla promieni z nieskończoności

Połączenie poniższych dwóch równań daje:

$$f = \frac{R}{2} + \frac{(1-K)z}{2} - \frac{r^2}{2(R - (1+K)z)}$$

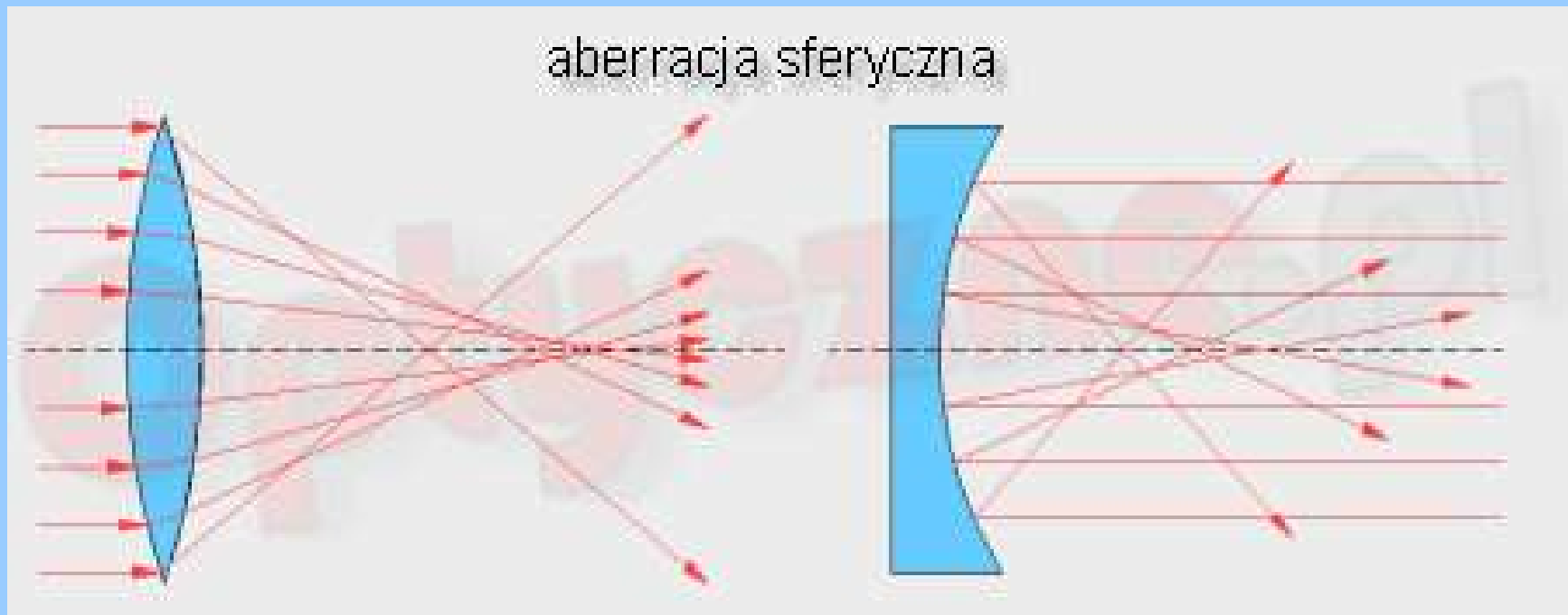
$$z = \frac{R}{1+K} \left[1 - \left(1 - \frac{r^2}{R^2} (1+K) \right)^{1/2} \right]$$
$$= \frac{r^2}{2R} + (1+K) \frac{r^4}{8R^3} + (1+K)^2 \frac{r^6}{16R^5} + \dots$$

nam wynik na ogniskową zwierciadła:

$$f = \frac{R}{2} - \frac{(1+K)r^2}{4R} - \frac{(1+K)(3+K)r^4}{16R^3} - \dots$$

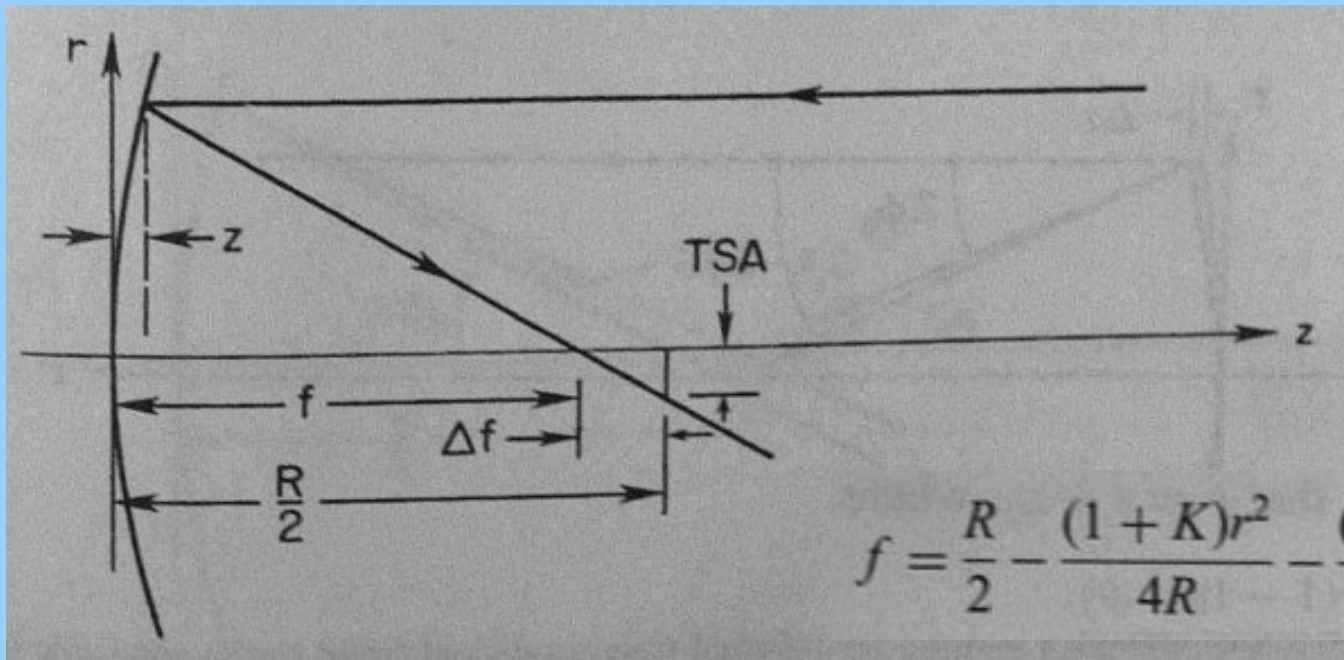
Aberracja sferyczna

Zjawisko polegające na różnym miejscu ogniskowania się promieni wchodzących do układu w różnych odległościach od osi optycznej.



Aberracja sferyczna

Aberracja sferyczna podłużna Δf (LSA) i poprzeczna (TSA)



$$f = \frac{R}{2} - \frac{(1+K)r^2}{4R} - \frac{(1+K)(3+K)r^4}{16R^3} - \dots$$

$$\Delta f = f(r) - f(\text{paraxial}) = -\frac{(1+K)r^2}{4R} - \frac{(1+K)(3+K)r^4}{16R^3} - \dots$$

$$\text{TSA/LSA} = r/(f - z),$$

$$\text{TSA} = -(1+K)\frac{r^3}{2R^2} - 3(1+K)(3+K)\frac{r^5}{8R^4} + \dots$$

Aberracja sferyczna - zwalczanie

$$\Delta f = f(r) - f(\text{paraxial}) = -\frac{(1+K)r^2}{4R} - \frac{(1+K)(3+K)r^4}{16R^3} - \dots$$

$$\text{TSA} = -(1+K)\frac{r^3}{2R^2} - 3(1+K)(3+K)\frac{r^5}{8R^4} + \dots$$

Dla paraboloidy $K=-1$ więc problem sam znika bo wszędzie jest wyraz $(1+K)$

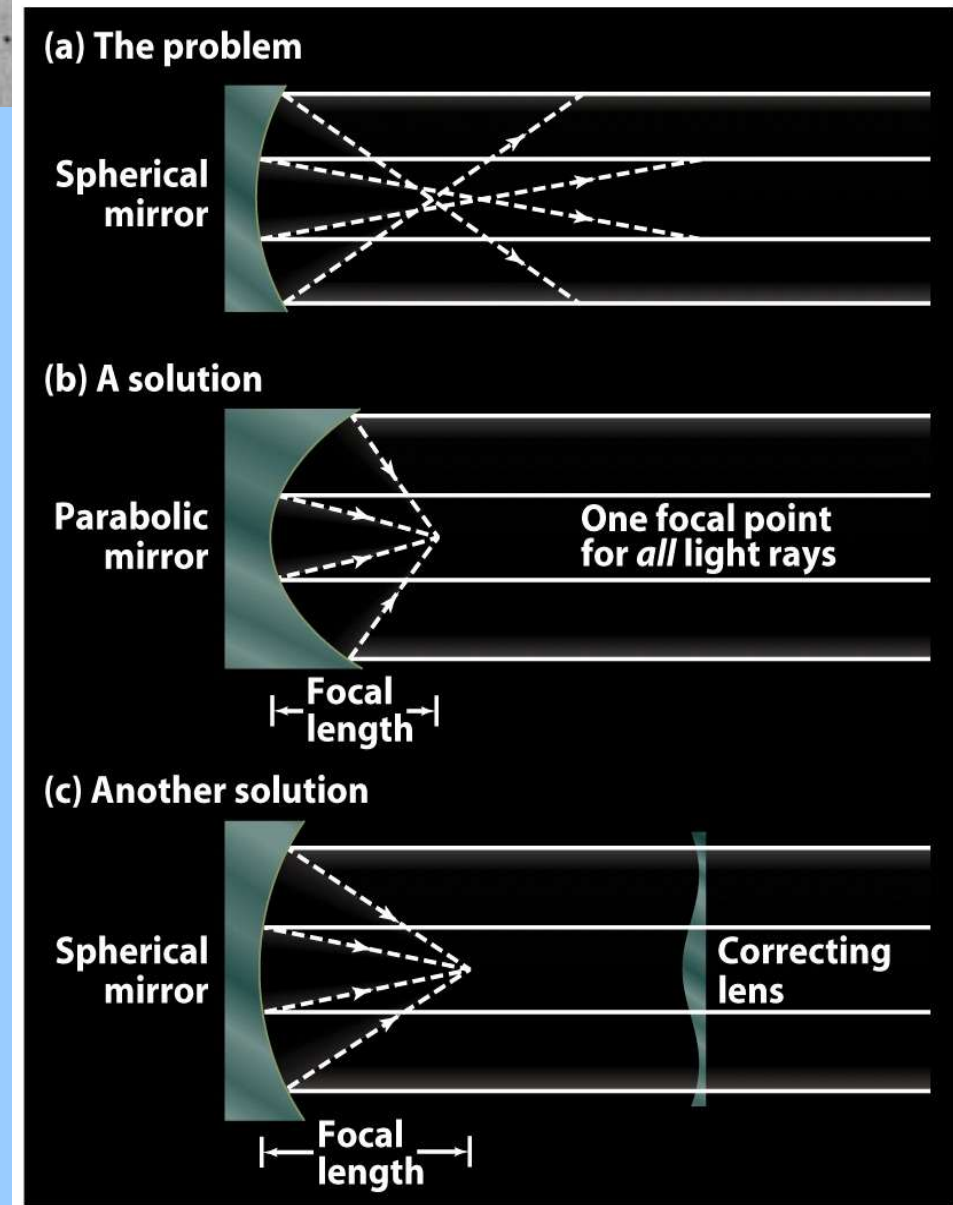
Dla sfery z $K=0$ mamy wyraźną aberrację sferyczną, ale dla amatorskich teleskopów 10-20 cm:

$$\text{TSA} [\text{cm}] \approx 1/4A^2$$

$$\text{LSA} [\text{cm}] \approx 1/2A$$

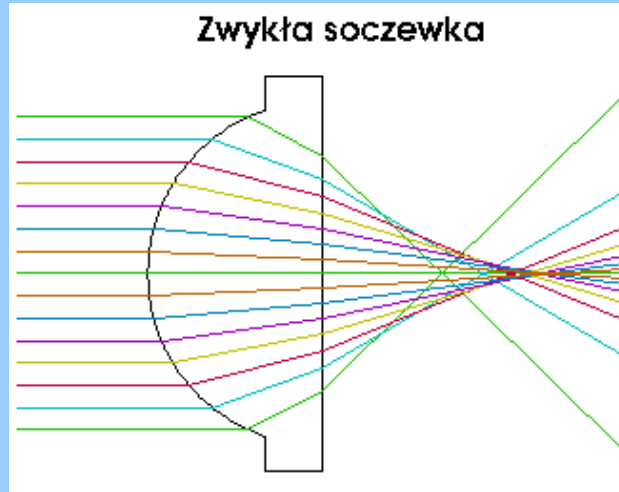
gdzie A to światłosiła czyli f/D .

Światłosiły na poziomie $A=10$ są OK.

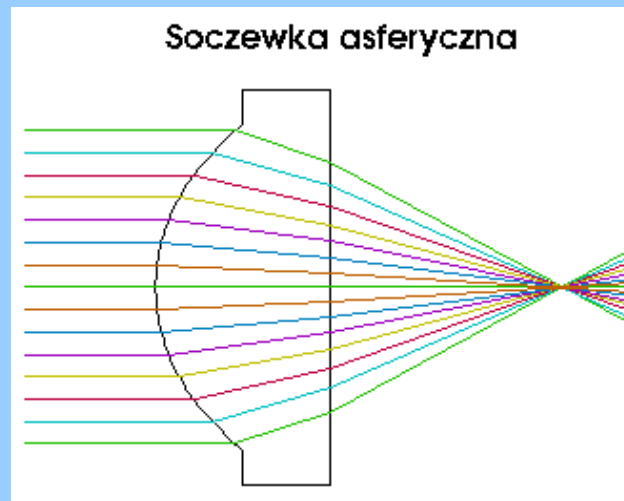


Aberracja sferyczna - zwalczanie

Soczewki też mają aberrację sferyczną:



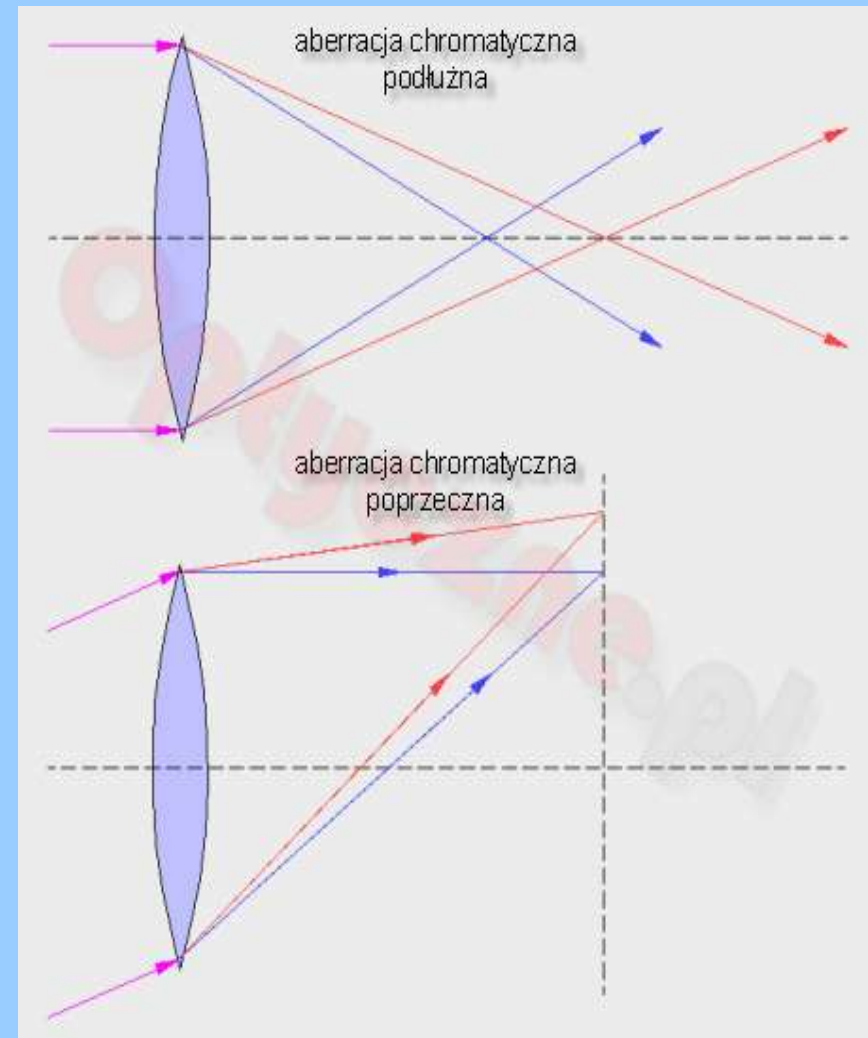
likwiduje się ją poprzez zastosowanie soczewek asferycznych:



Aberracja chromatyczna

Zjawisko wynikające z dyspersji szkła i polegające na różnym miejscu ogniskowania się promieni o różnej długości fali.

Glass type	Refractive index at the specified wavelengths				
	361 nm	486 nm	589 nm	656 nm	768 nm
Crown	1.539	1.523	1.517	1.514	1.511
High dispersion crown	1.546	1.527	1.520	1.517	1.514
Light flint	1.614	1.585	1.575	1.571	1.567
Dense flint	1.705	1.664	1.650	1.644	1.638

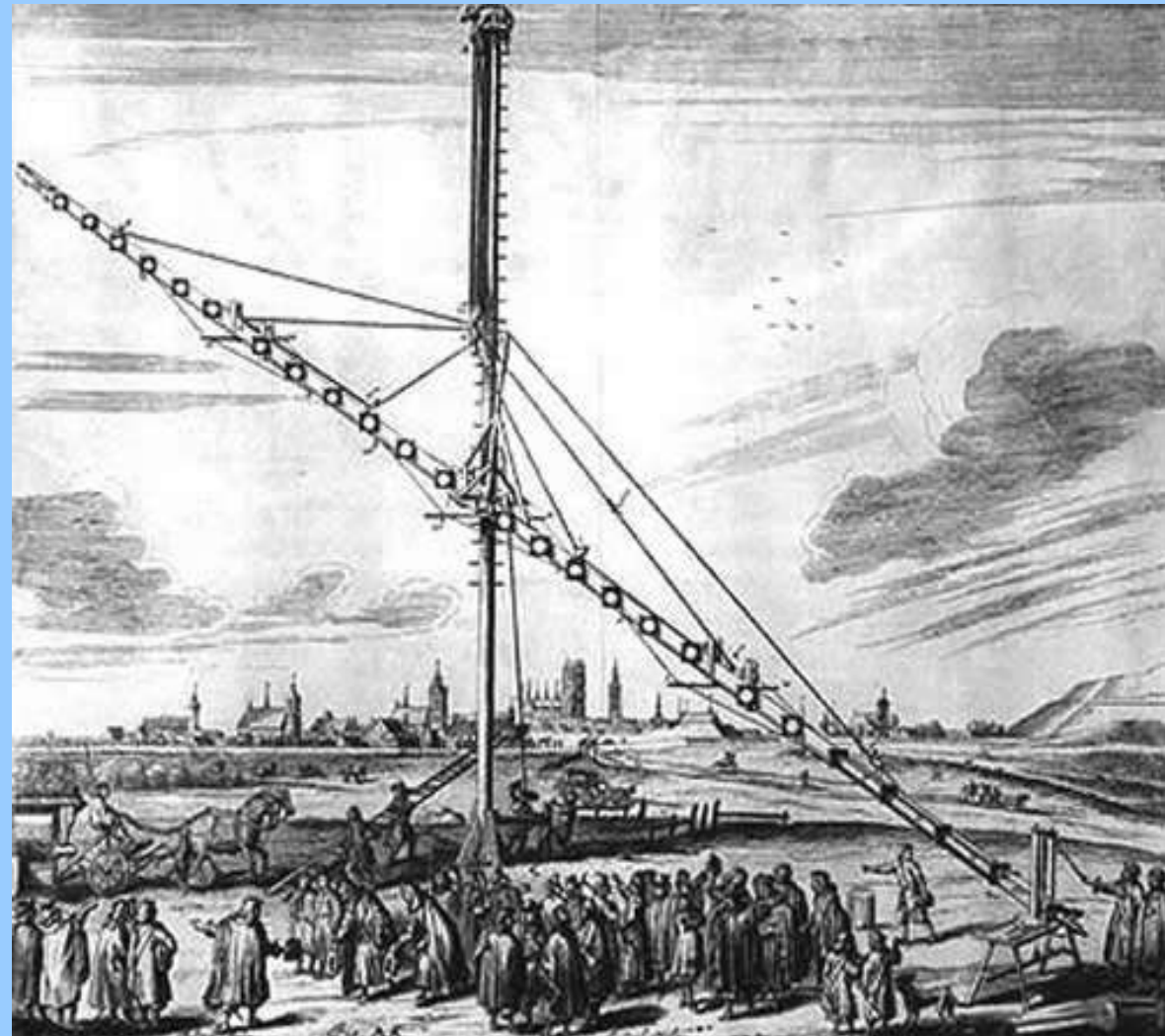
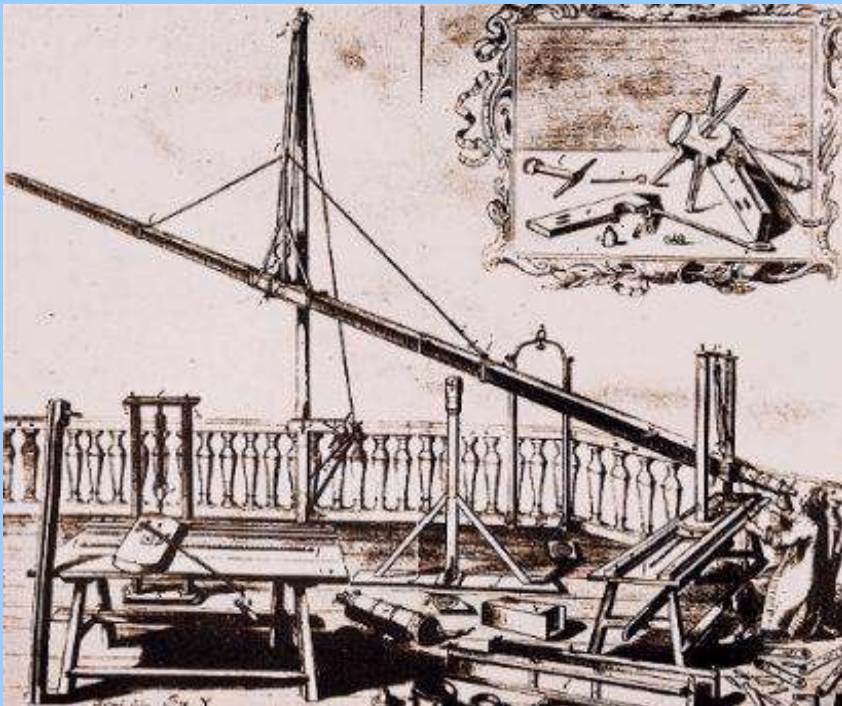
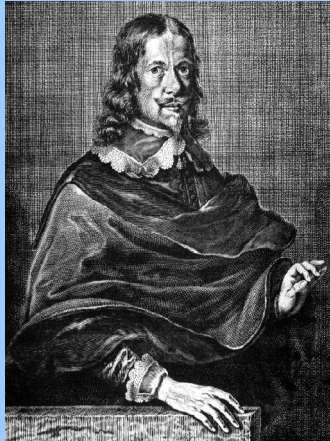


Zwalczanie aberracji chromatycznej

Aberracja chromatica maleje przy wzrastajacej wartosci swiatlosily.

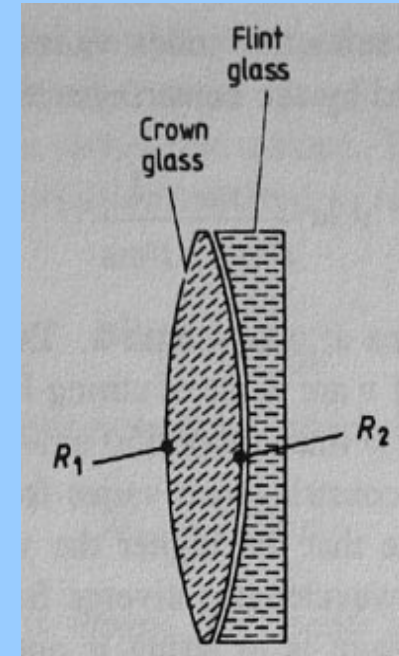
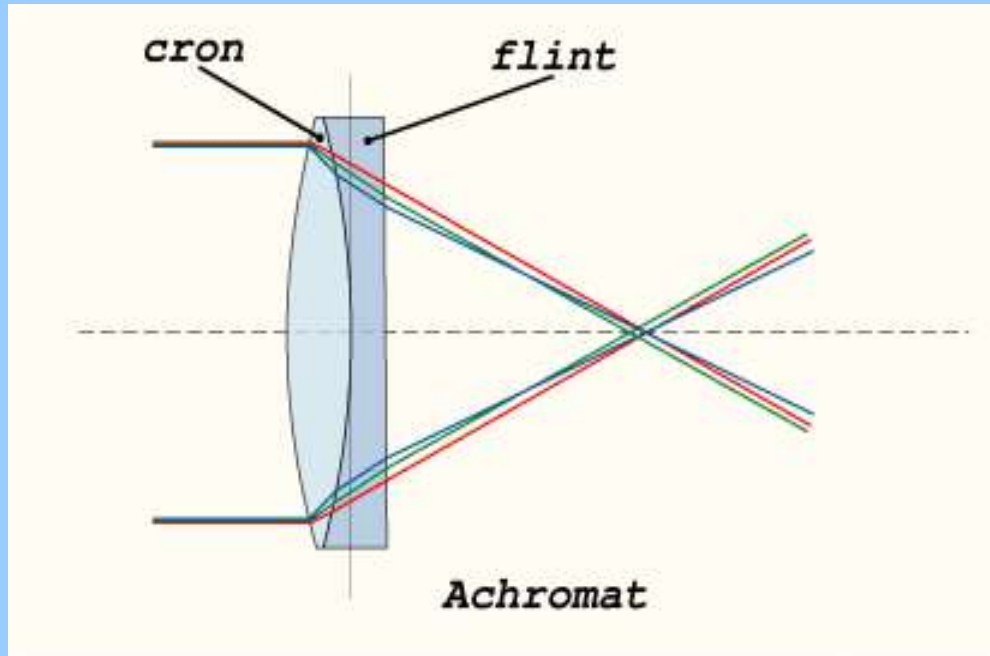
Najdluzsza luneta Heweliusza (1670 r.) miala 45 metrow !!!

Nie jest to najsprytniejsze rozwiazanie.



Zwalczanie aberracji chromatycznej

W 1829 r. Joseph Lister znalazł częściowe rozwiązanie problemu – połączenie dwóch rodzajów szkła o różnym współczynniku załamania.



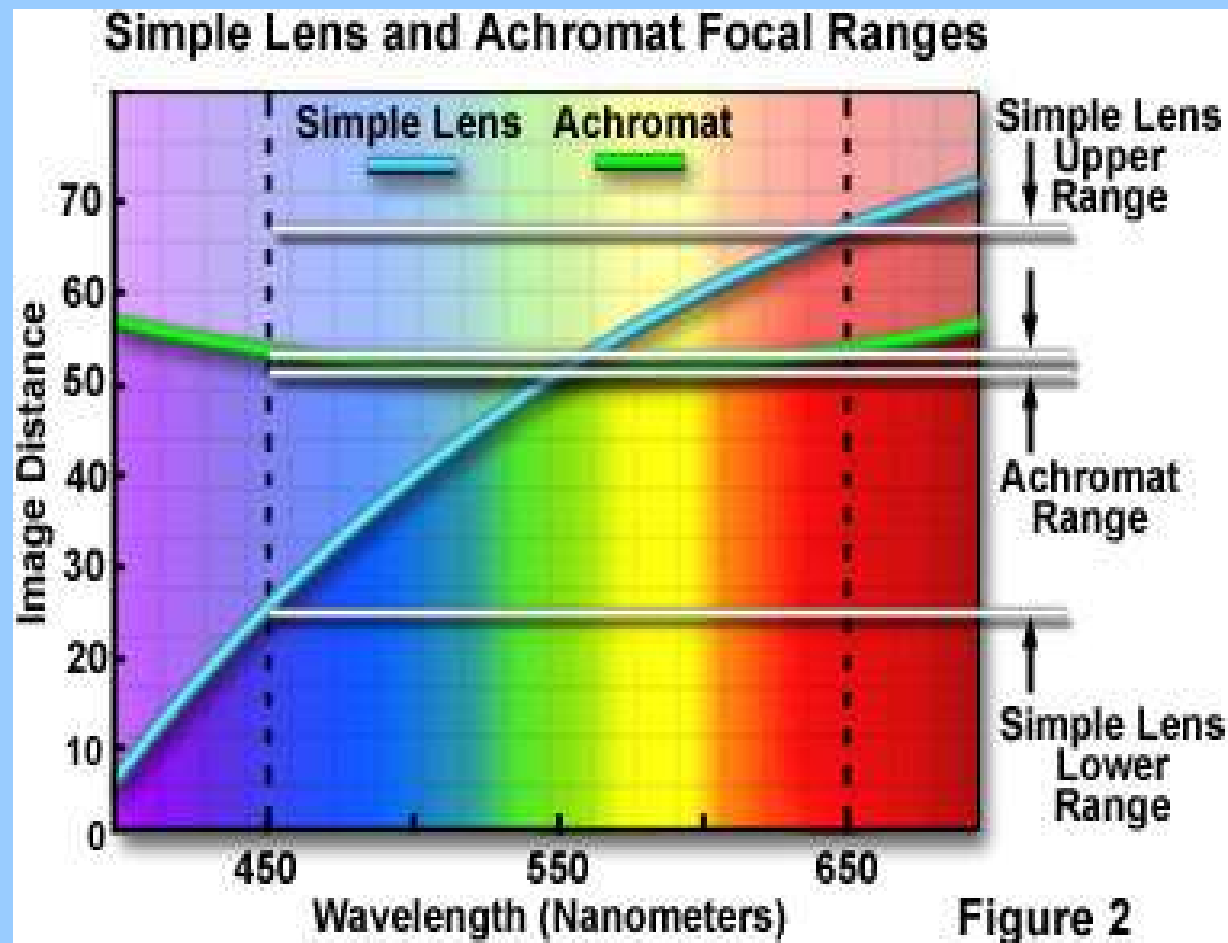
Obiektyw achromatyczny.

$$\frac{R_1 + R_2}{R_1} \Delta n_C = \Delta n_F$$

Zwalczanie aberracji chromatycznej

W 1829 r. Joseph Lister znalazł częściowe rozwiązanie problemu – połączenie dwóch rodzajów szkła o różnym współczynniku załamania.

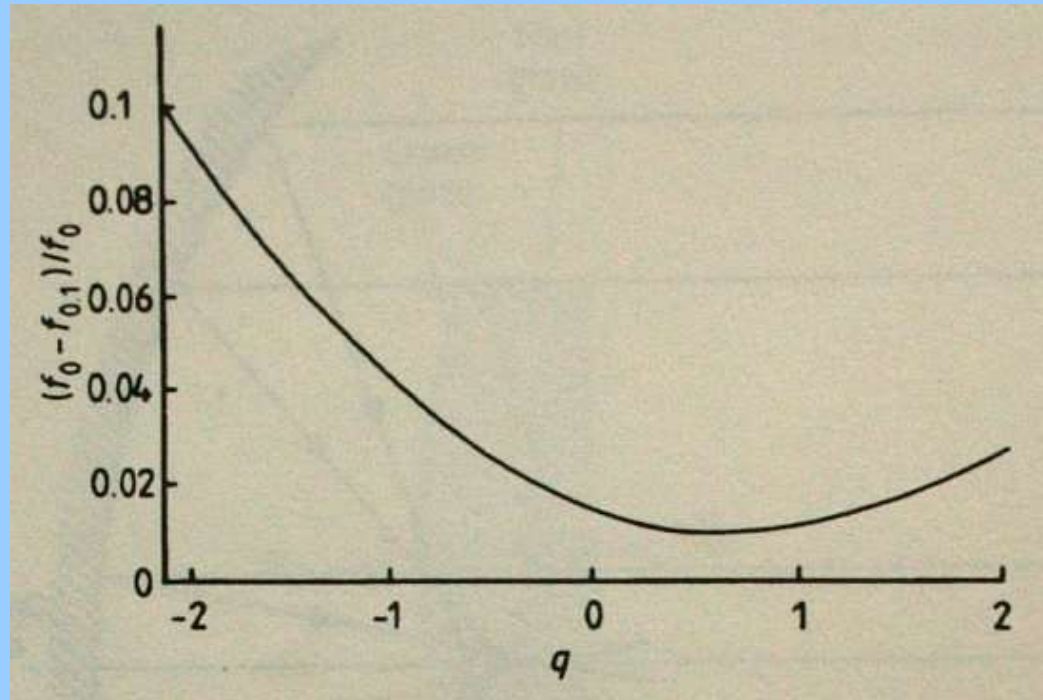
Obiektyw achromatyczny.



Zwalczanie aberracji chromatycznej

Przy okazji walki z chromatyzmem możemy trochę powalczyć z aberracją sferyczną.

Definiując parametr $q = (R2 + R1)/(R2 - R1)$

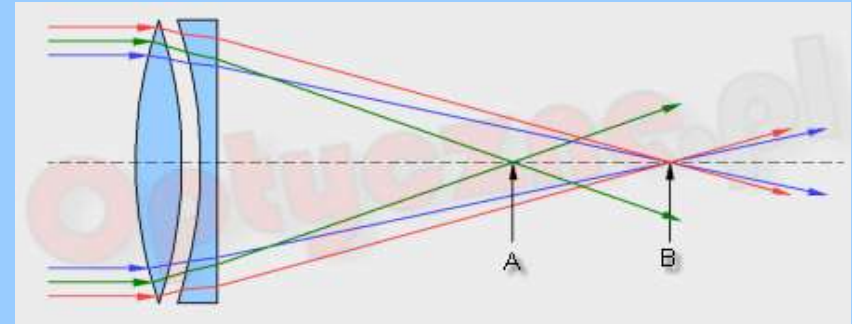


Minimum dla $q=0.6$. Można więc tak dobrać $R1$ i $R2$, aby mieć minimalną aberrację chromatyczną i sferyczną.

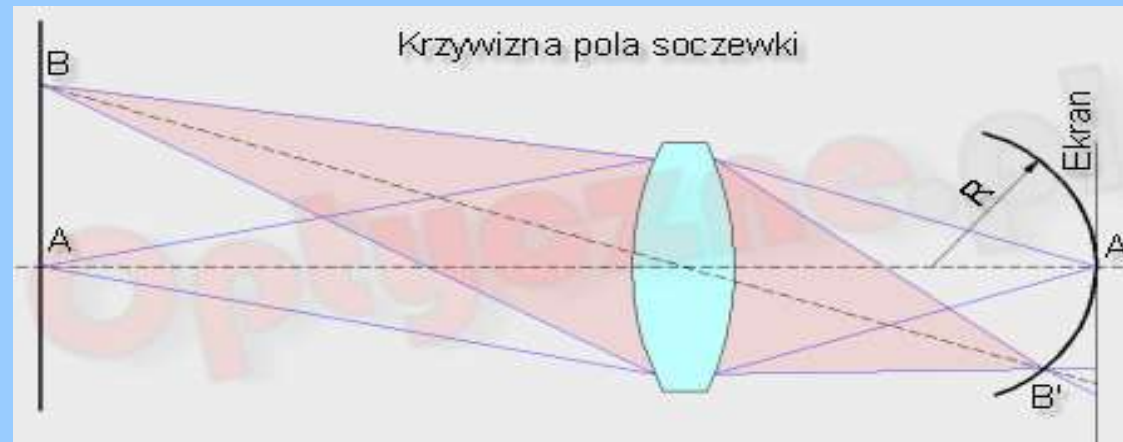
Zwalczanie aberracji chromatycznej

Achromaty miały wady:

- Tzw. widmo wtórne – jedno ognisko promieni czerwonych i niebieskich (B), ale inne promieni zielono-żółtych (A):



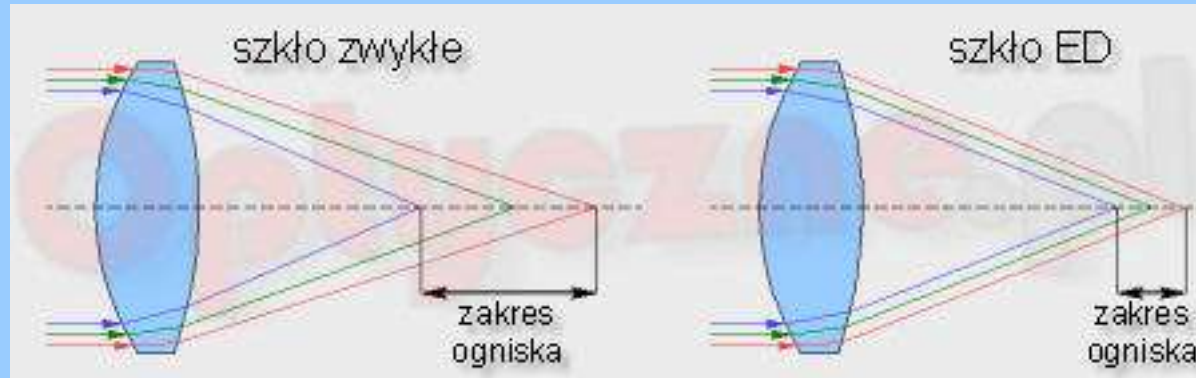
- Szczałkowa lecz zauważalna aberracja sferyczna
- Krzywizna pola:



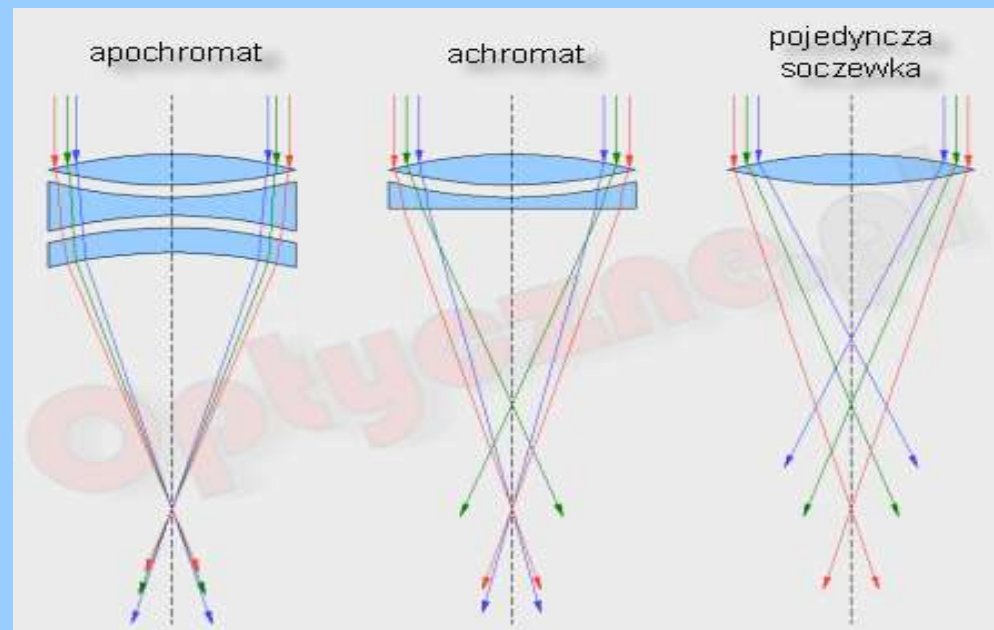
Bardzo duży problem na przełomie XIX i XX wieku kiedy królowała fotografia na płytach szklanych dużej wielkości

Zwalczanie aberracji chromatycznej

Kolejny pomysł to użycie trzech soczewek zamiast dwóch lub dodatkowo zastosowanie szkła o niskiej dyspersji.



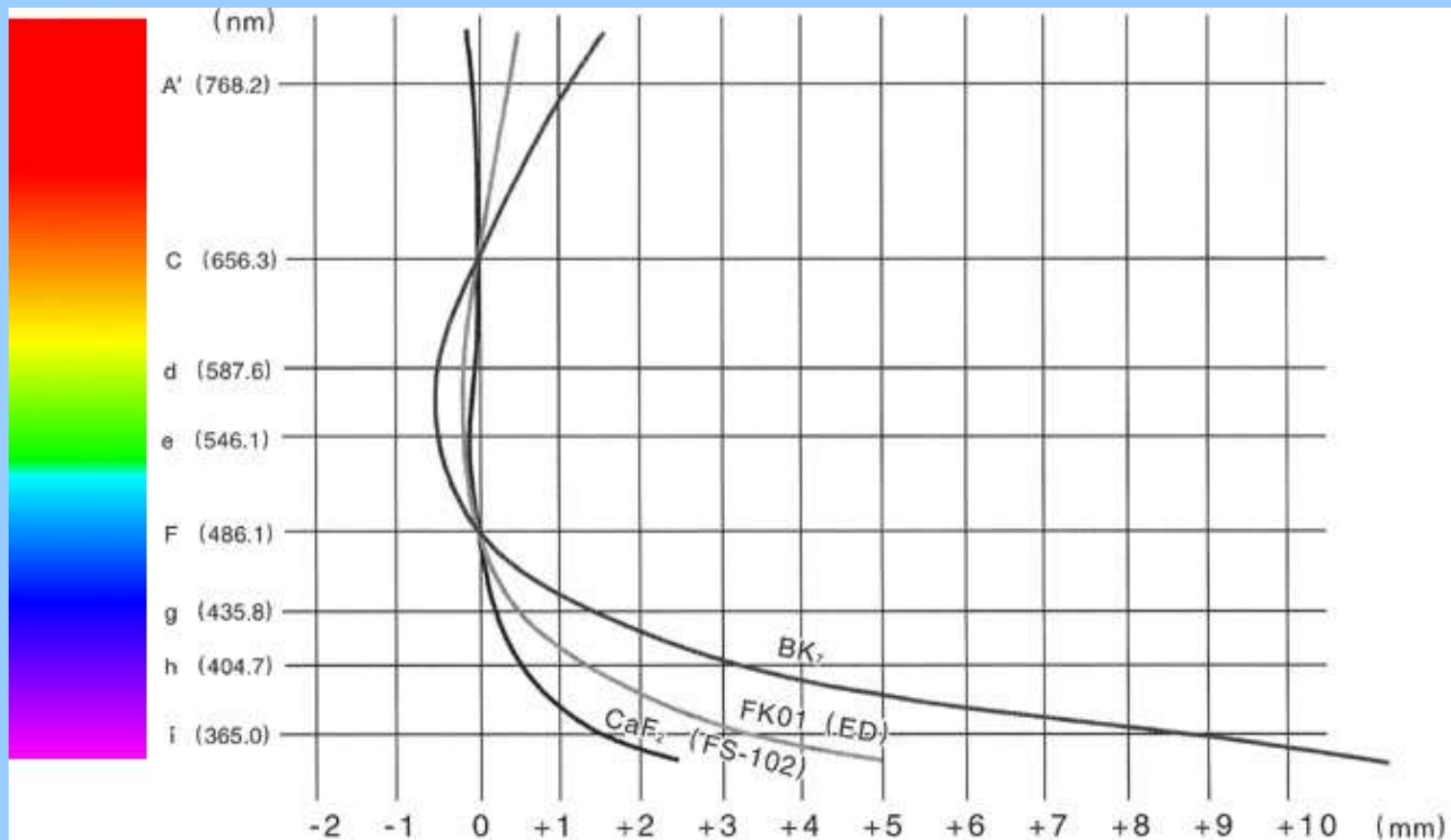
Achromat to obiektyw najczęściej 2-4 elementowy, który likwiduje widmo wtórne (3 barwy podstawowe w jednym punkcie) oraz aberrację sferyczną



Zwalczanie aberracji chromatycznej

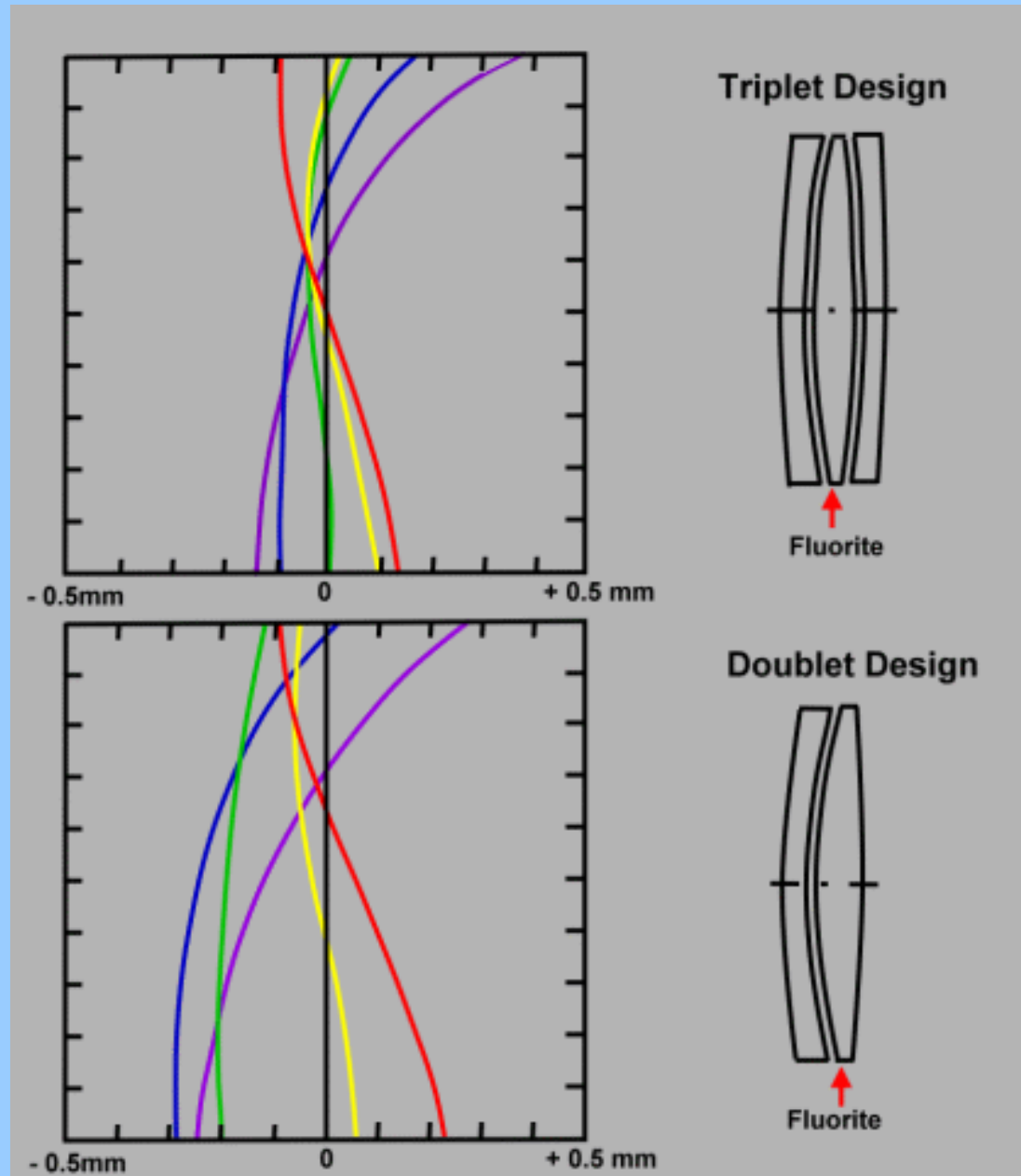
Różne techniki wytwarzania apochromatów:

- 3-4 soczewki w obiektywie w różnych układach
- 3-4 soczewki plus wypełnienie olejem (lata 20te XX wieku)
- W połowie XX wieku odkrycie fluorytu (CaF_2) w optyce – bardzo niska dyspersja!



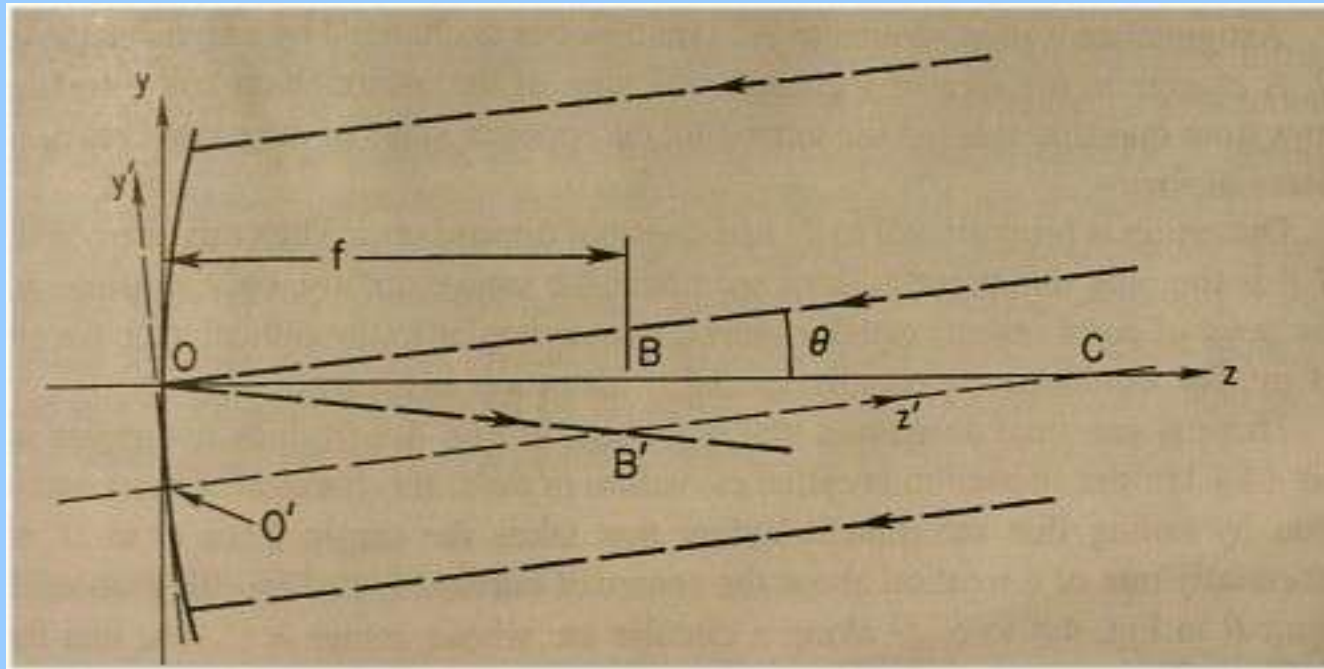
Zwalczanie aberracji chromatycznej

Apochromaty:



Wady pozaosiowe

Mamy z nimi do czynienia, gdy wiązka wchodzi do instrumentu pod kątem do osi optycznej, inaczej mówiąc gdy obserwowany obiekt nie leży w osi optycznej.



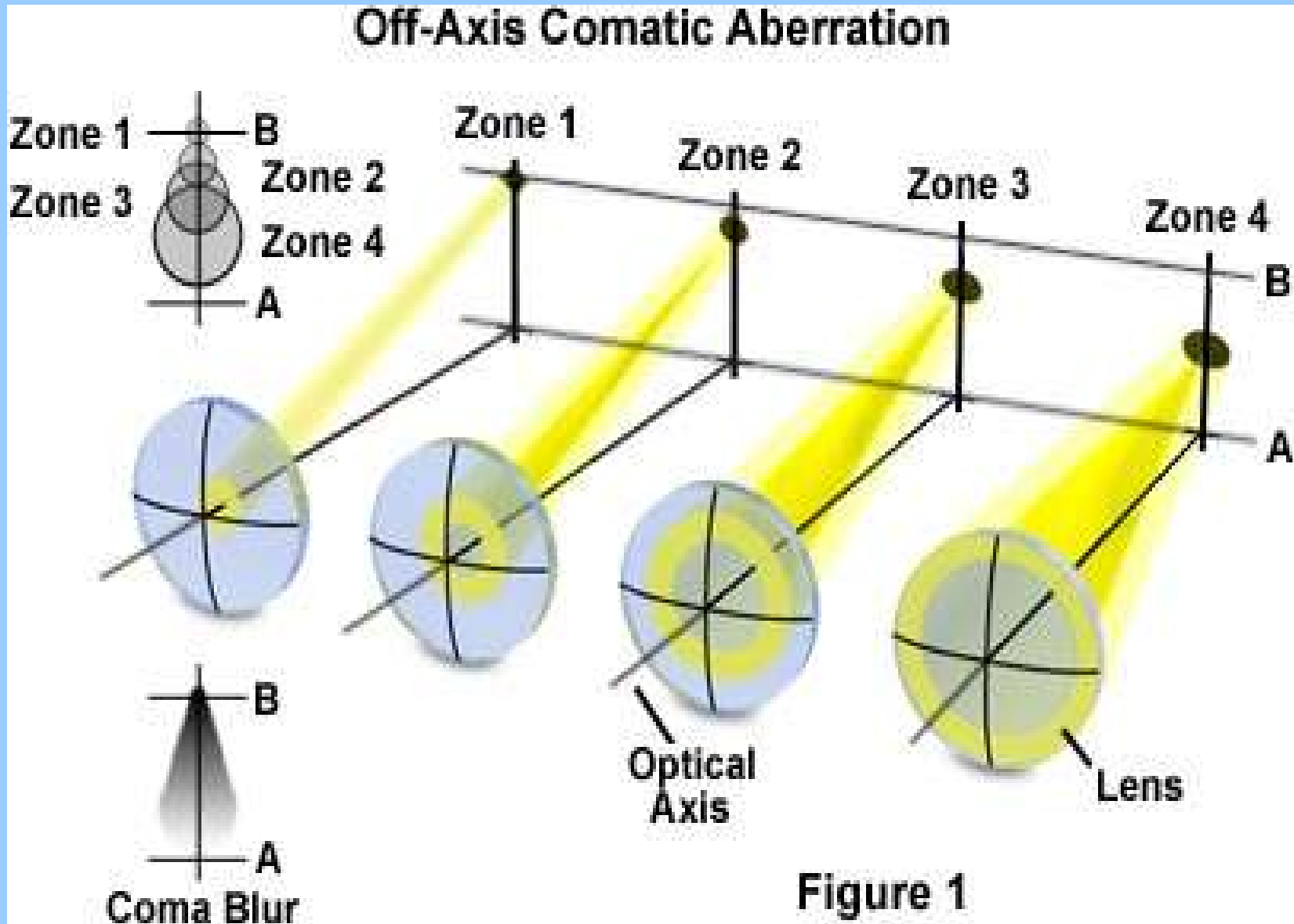
$$AA_3 = 3a_1 \frac{y^2 \theta}{R^2} + 2a_2 \frac{y \theta^2}{R} + a_3 \theta^3,$$

Koma astygmatyzm dystorsja

AA3 – aberracje kątowe 3go rzędu

Wady pozaosiowe - koma

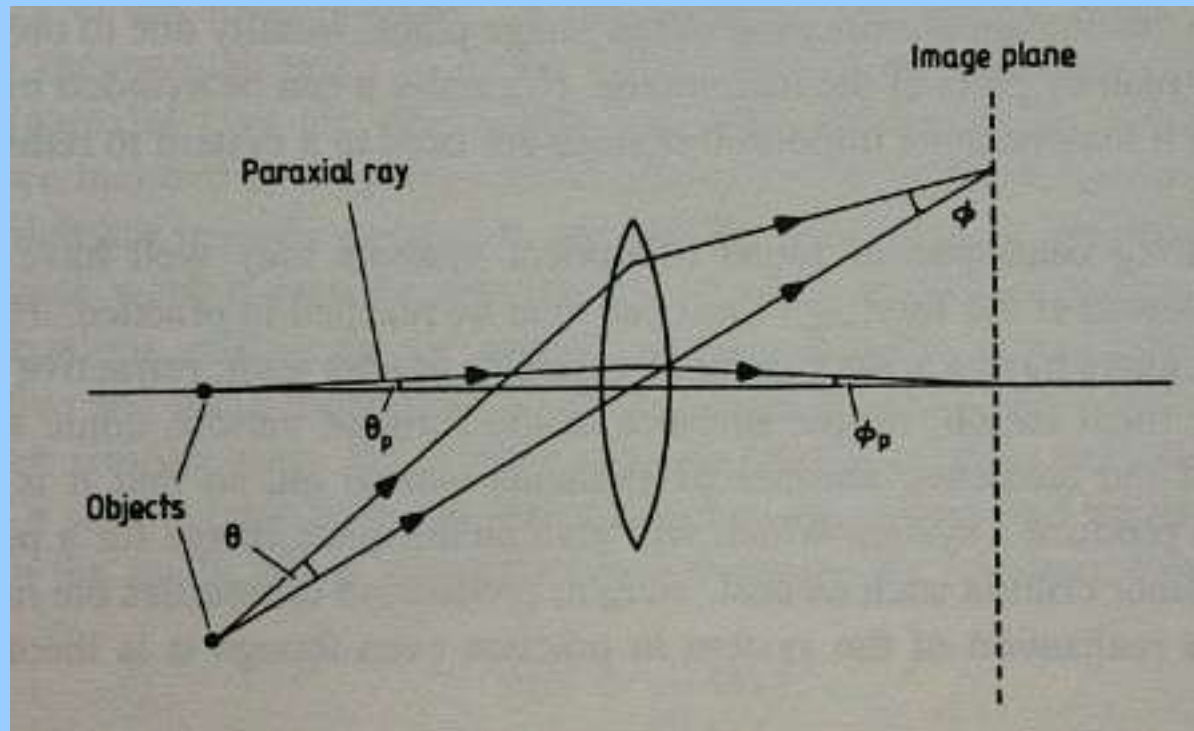
Zasada powstawania.



Wady pozaosiowe - koma

Zmiana kształtu zwierciadła ze sferycznego na paraboliczne wprowadza komę. Podobnie jest w soczewkach.

Warunek sinusowy Abbego na brak komy:



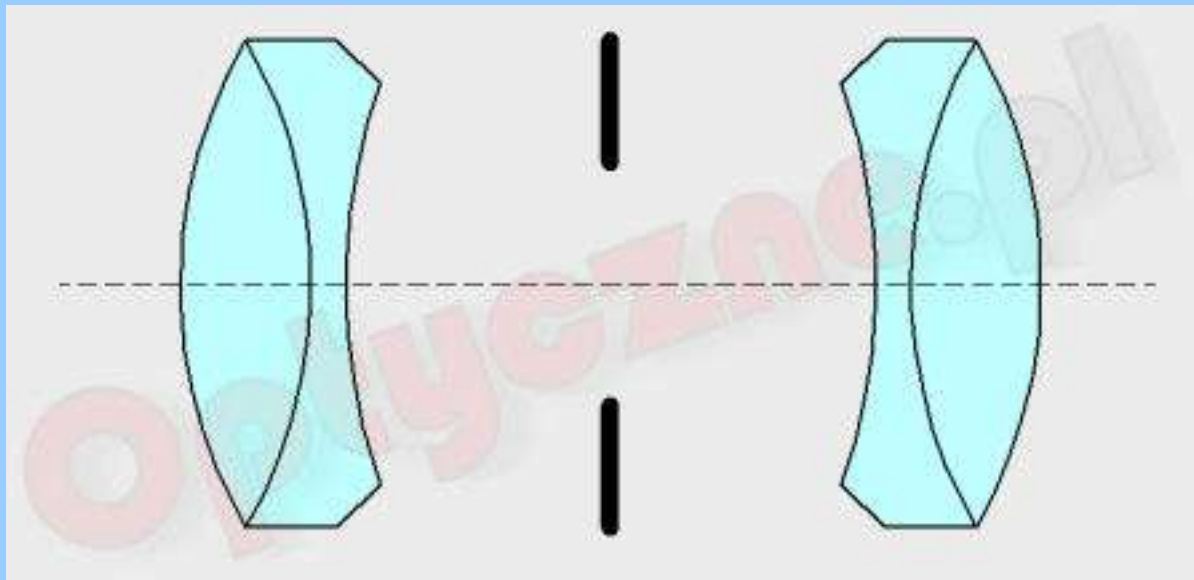
$$\frac{\sin \theta}{\sin \varphi} = \frac{\theta_p}{\varphi_p} = \text{constant}$$

Wady pozaosiowe - koma

Konstruując achromat korygujemy go pod względem aberracji chromatycznej i sferycznej. Rozdzielając soczewki możemy go też zacząć korygować pod względem komy.

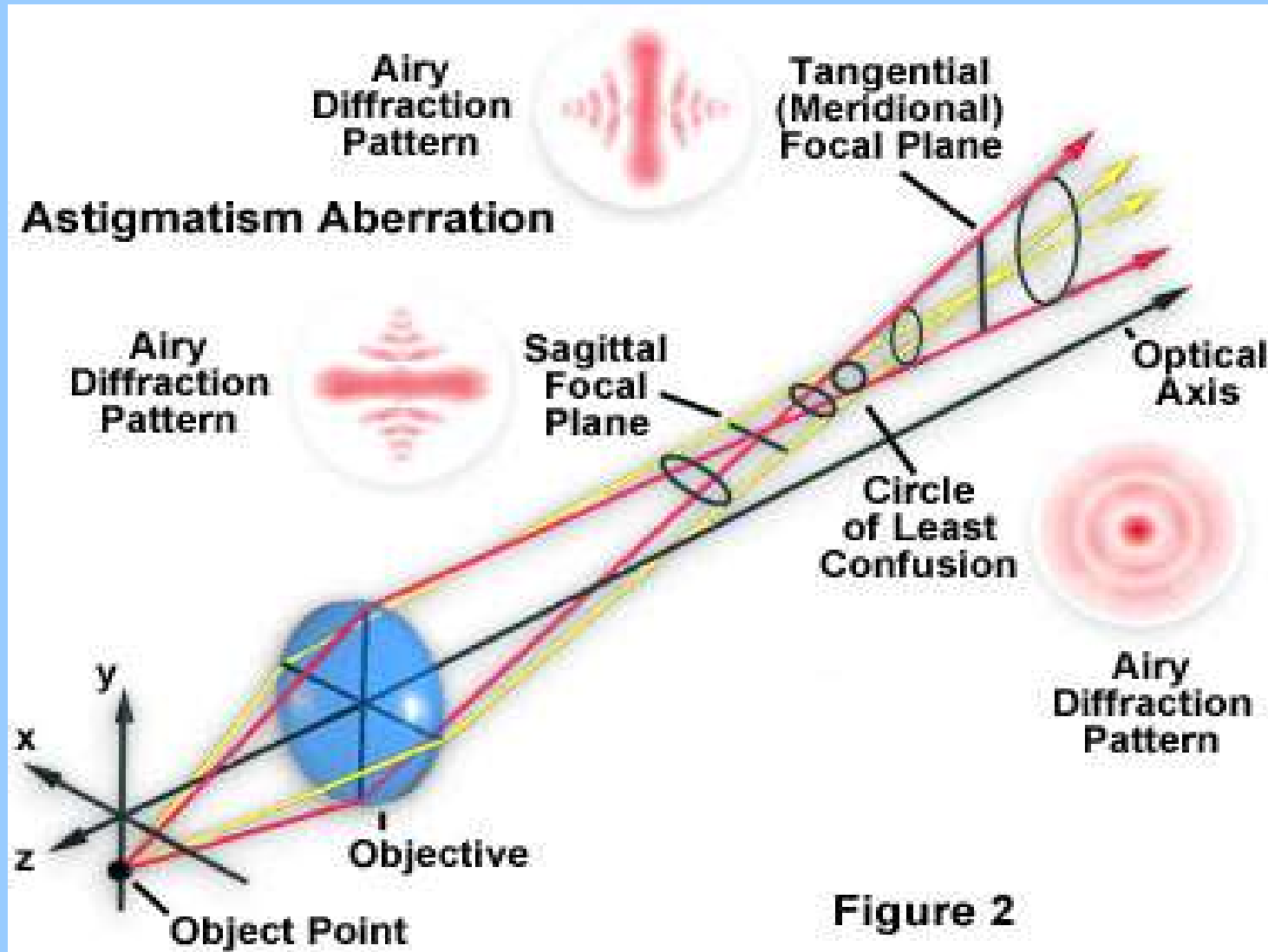
Jeszcze lepiej połączyć dwa klejone achromaty.

System wolny od komy nazywamy aplanatem.



Wady pozaosiowe - astygmatyzm

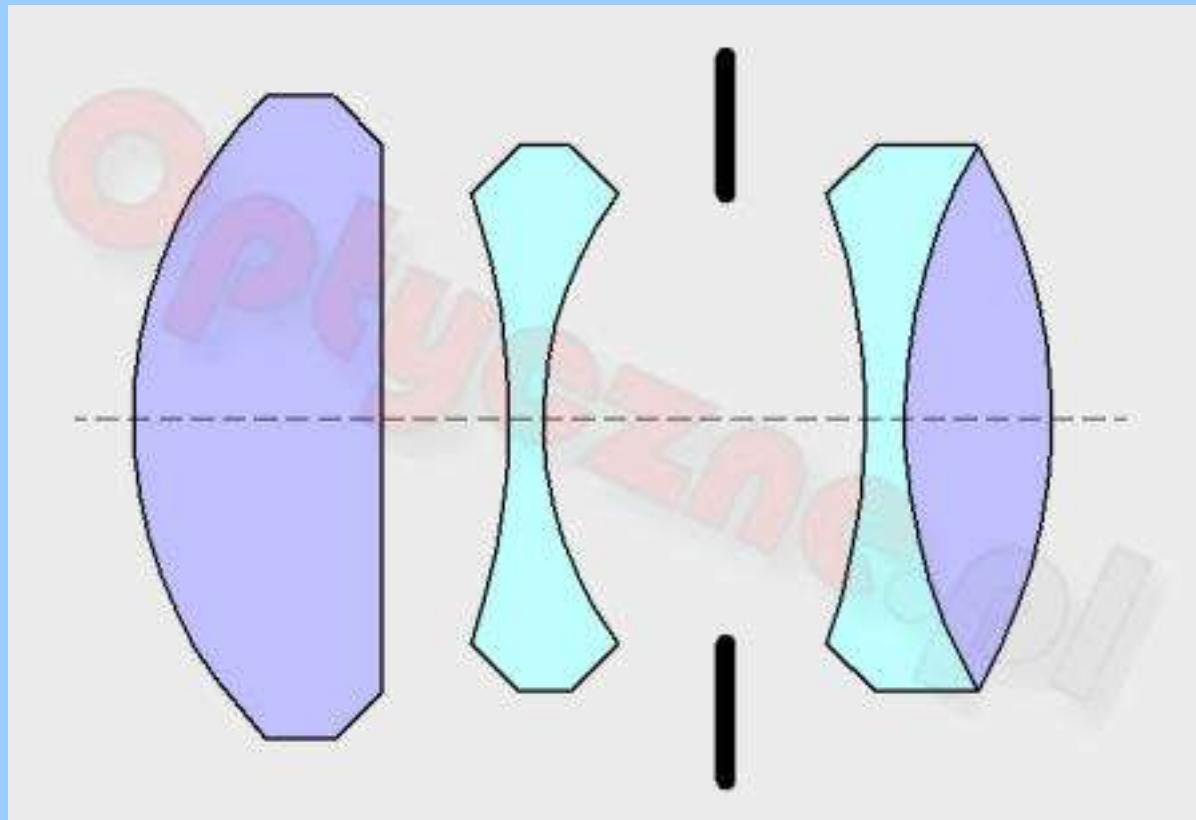
Zasada powstawania.



Wady pozaosiowe - astygmatyzm

Astygmatyzm koryguje się bardzo trudno, bo wraz z jego zmniejszaniem rośnie krzywizna pola.

Układy dobrze skorygowane pod kątem tej wady nazywamy anastygmatami.



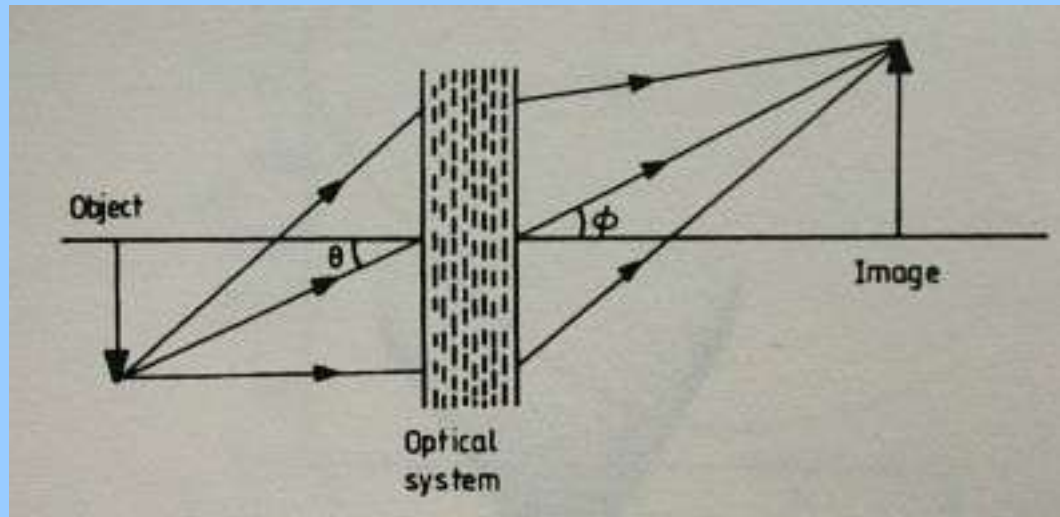
Wady pozaosiowe - dystorsja

Zniekształcenia obrazu na brzegach ze względu na to, że powiększenie blisko osi optycznej jest inne niż na skraju soczewki.



Wady pozaosiowe - dystorsja

Zniekształcenia obrazu na brzegach ze względu na to, że powiększenie blisko osi optycznej jest inne niż na skraju soczewki.

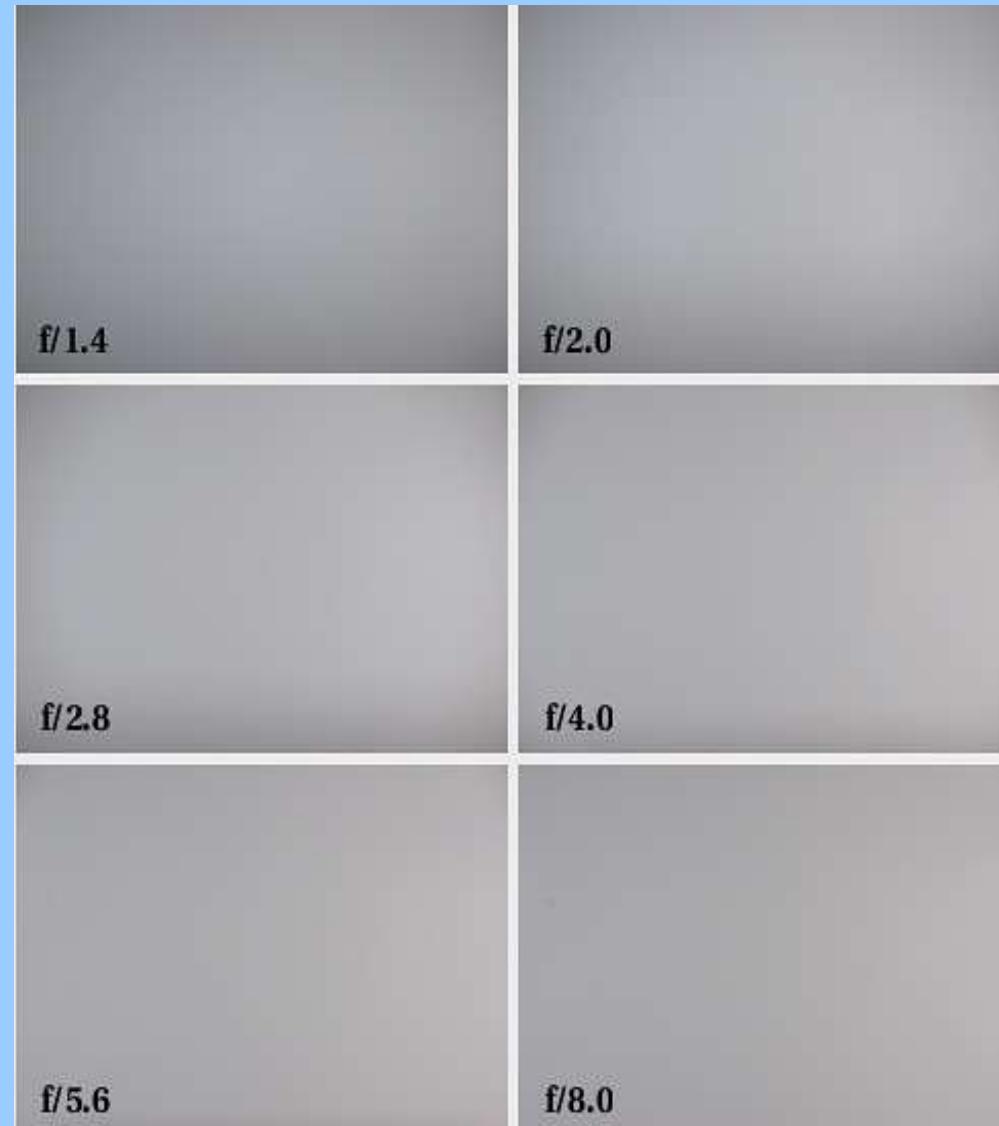
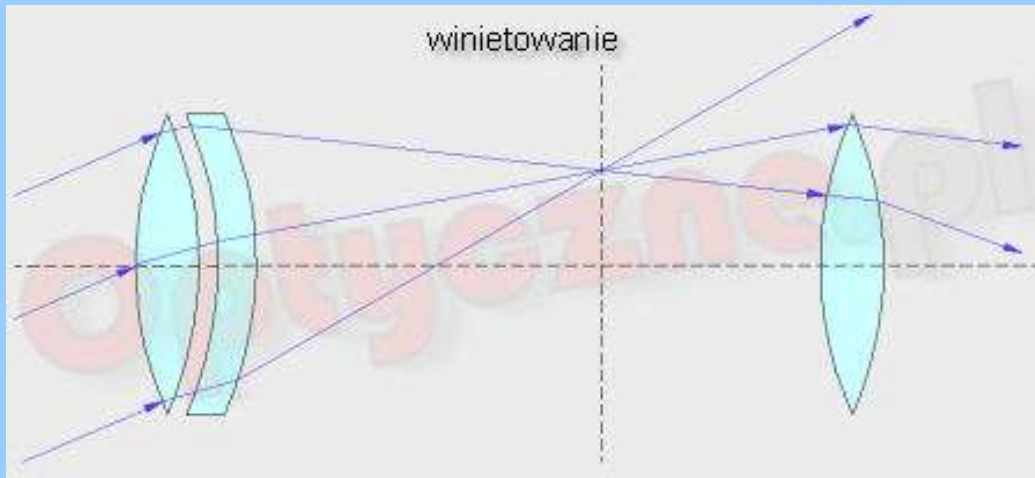


System wolny od dystorsji (układ ortoskopowy) musi spełniać warunek:

$$\frac{\tan \theta}{\tan \varphi} = \text{constant}$$

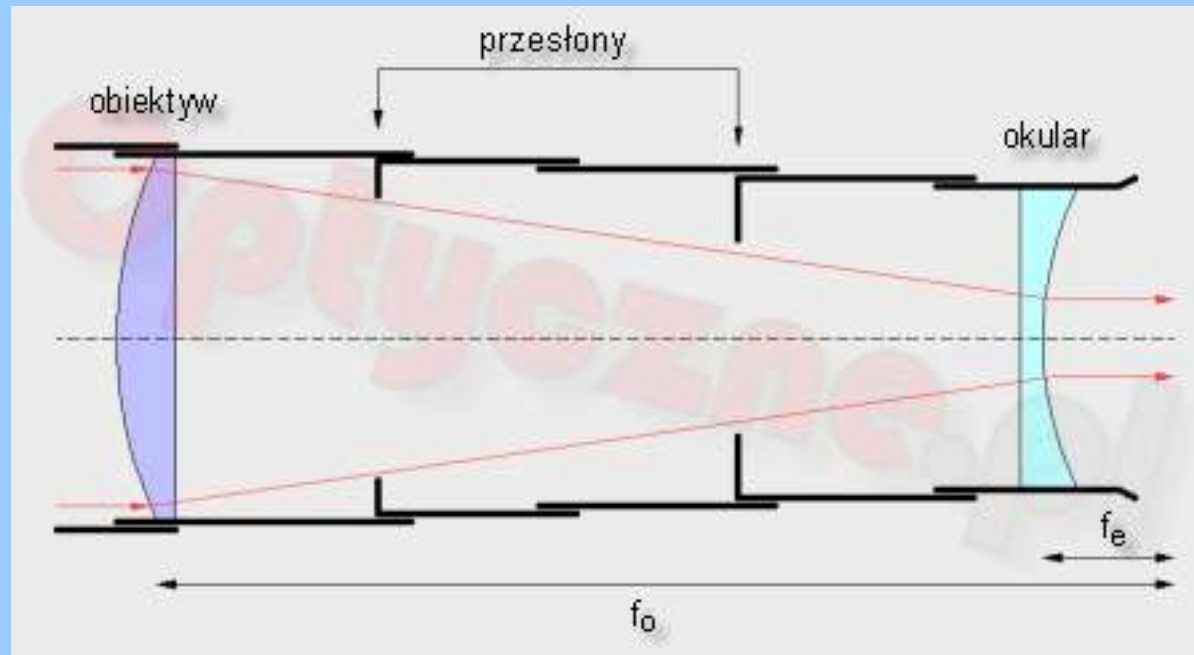
Winietowanie

Niektóre elementy konstrukcyjne obiektywu czy teleskopu lub sama optyka, wprowadzają wadę zwaną winietowaniem.



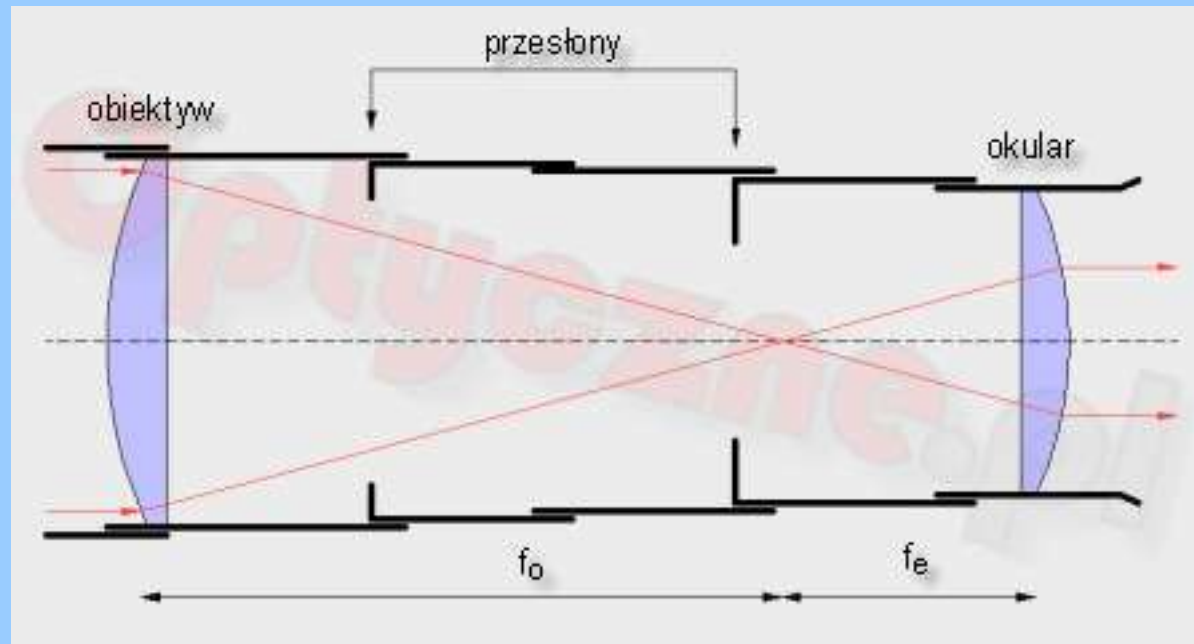
Typy teleskopów

Luneta Galileusza



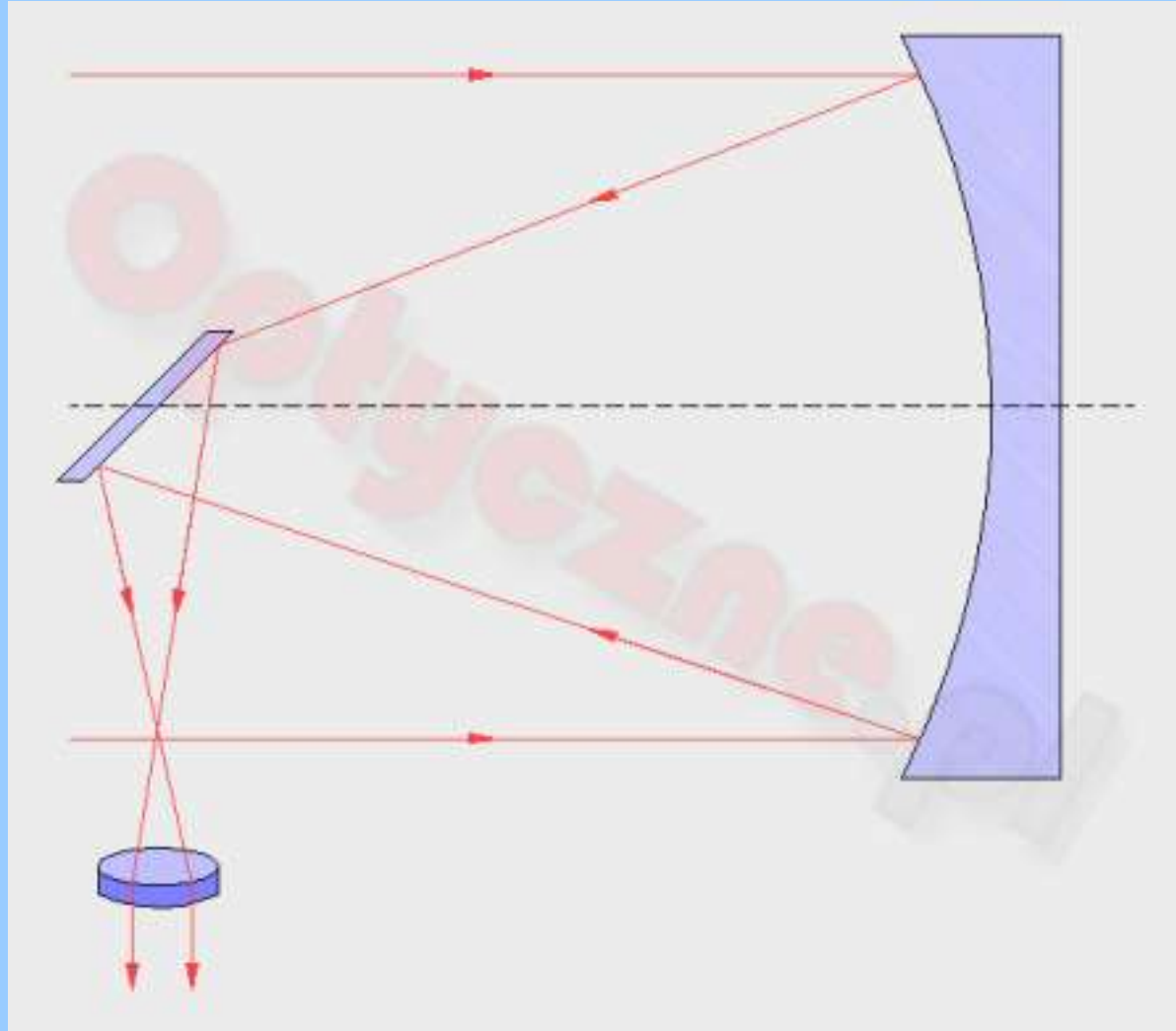
Typy teleskopów

Luneta Keplera



Typy teleskopów

Teleskop Newtona (1668 r.)



Typy teleskopów

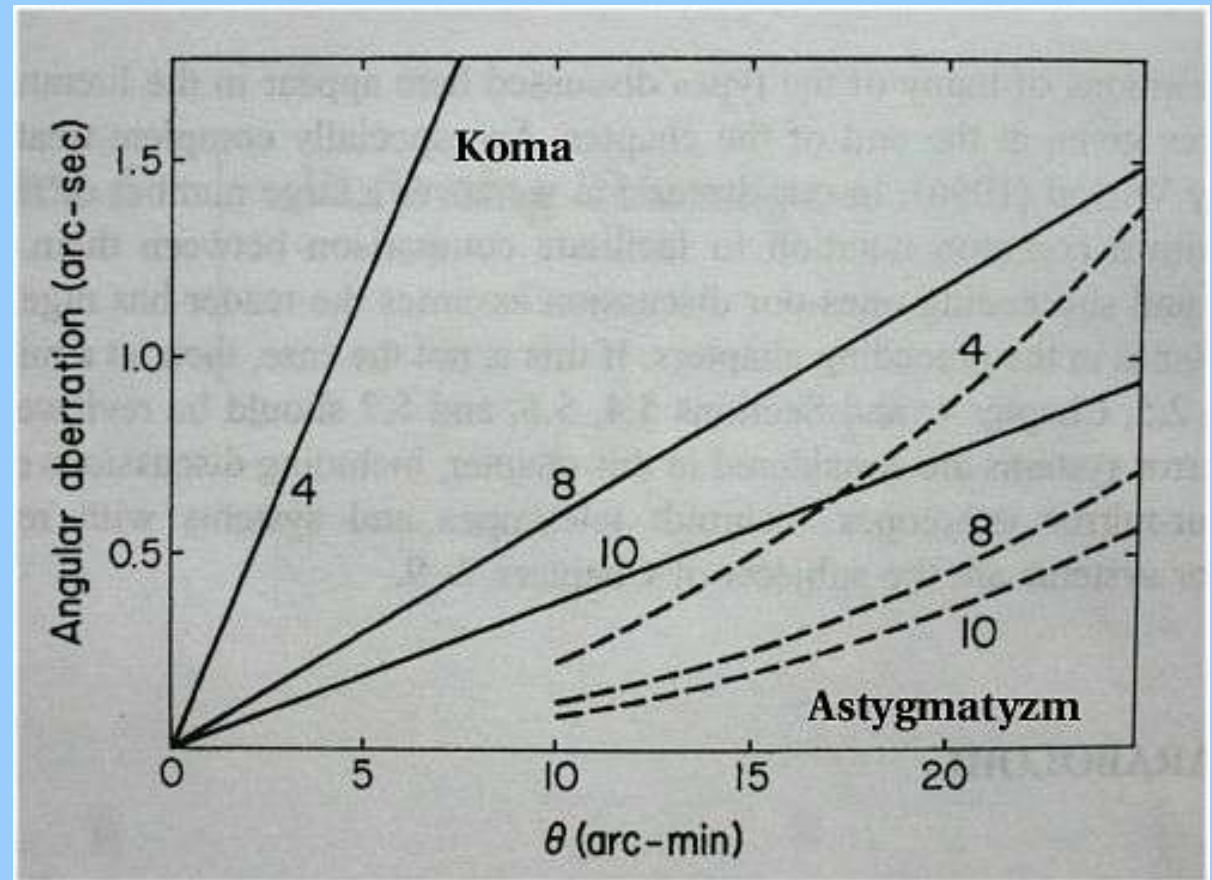
Teleskop Newtona

- Źródłem aberracji jest lustro główne
- Jeśli jest paraboliczne, nie ma aberracji sferycznych
- Jest koma i astygmatyzm

Limiting Field Radius for Good^a Images: Paraboloid Telescope

F	θ (arc-min)
4	1.42
8	5.69
10	8.89

^a Good defined as tangential coma that measures 1 arc-sec.



Typy teleskopów

Teleskop Newtona, ze względu na prostotę konstrukcji (jedno zwierciadło do wyszlifowania, które dla światłości około 10-12 może być nawet sferyczne) jest najpopularniejszym teleskopem amatorskim.

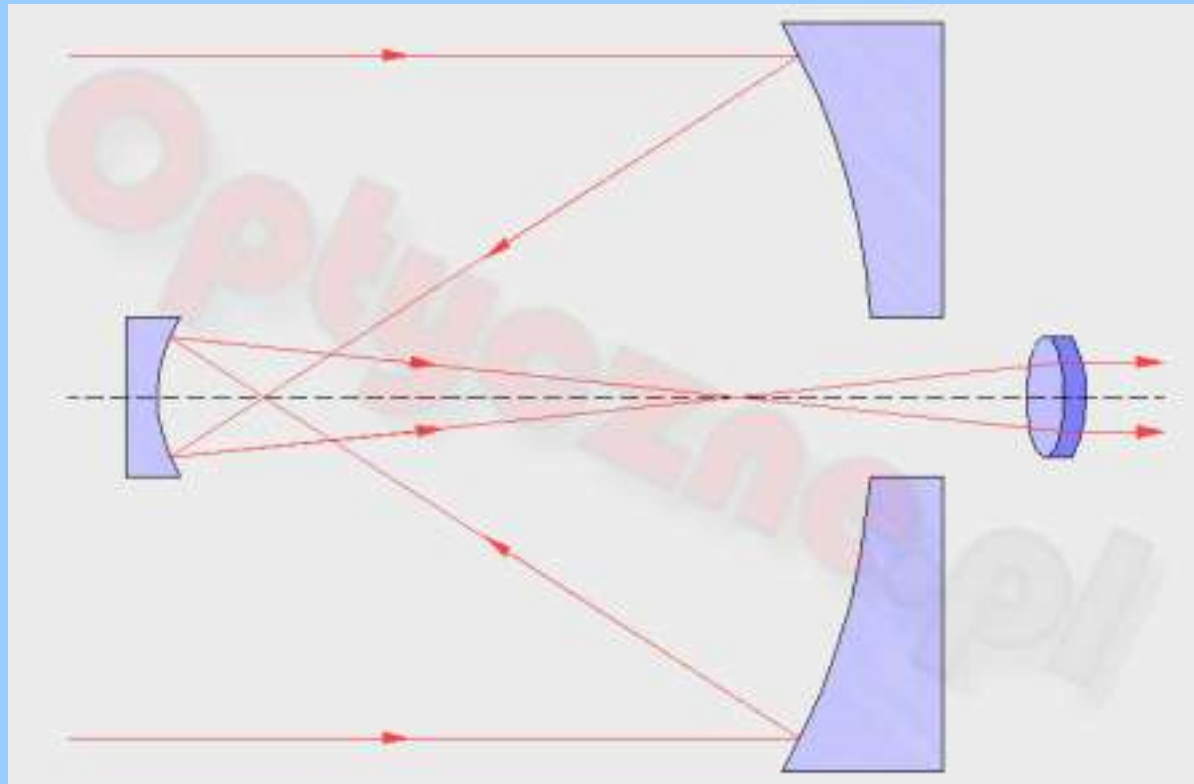


Typy teleskopów

Teleskop Gregory'ego – pierwszy teleskop zwierciadlany (1663 r.) z wtórnym zwierciadłem elipsoidalnym.

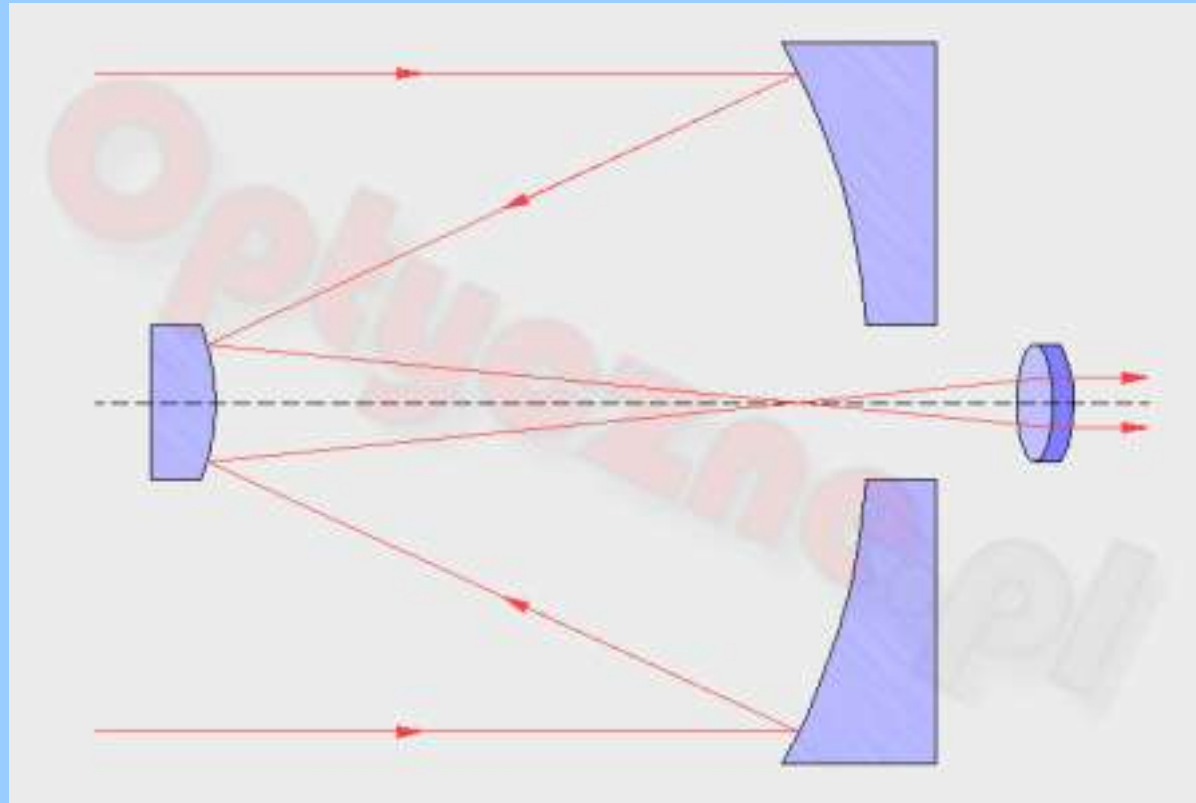
Obraz prosty.

Brak zastosowań praktycznych.



Typy teleskopów

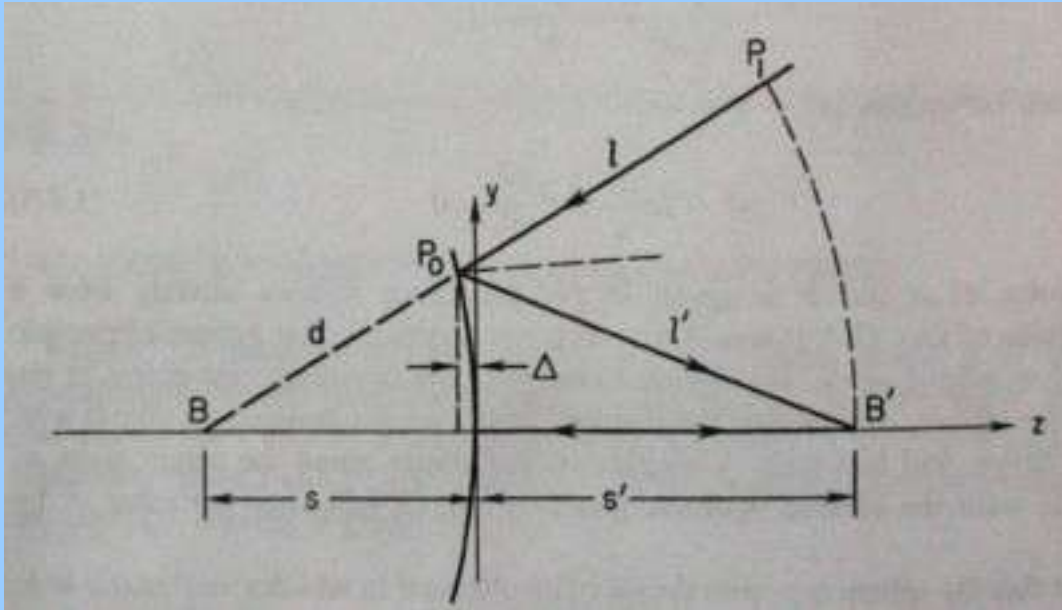
Teleskop Cassegraina



Jeśli główne zwierciadło jest paraboliczne, jakie musi być wtórne, żeby promienie ogniskowały się tam gdzie trzeba?

Typy teleskopów

Promienie odbite od zwierciadła parabolicznego skupiają się w punkcie B.



Zasada Fermata mówi nam:

$$l + l' = 2s',$$

a geometria układu:

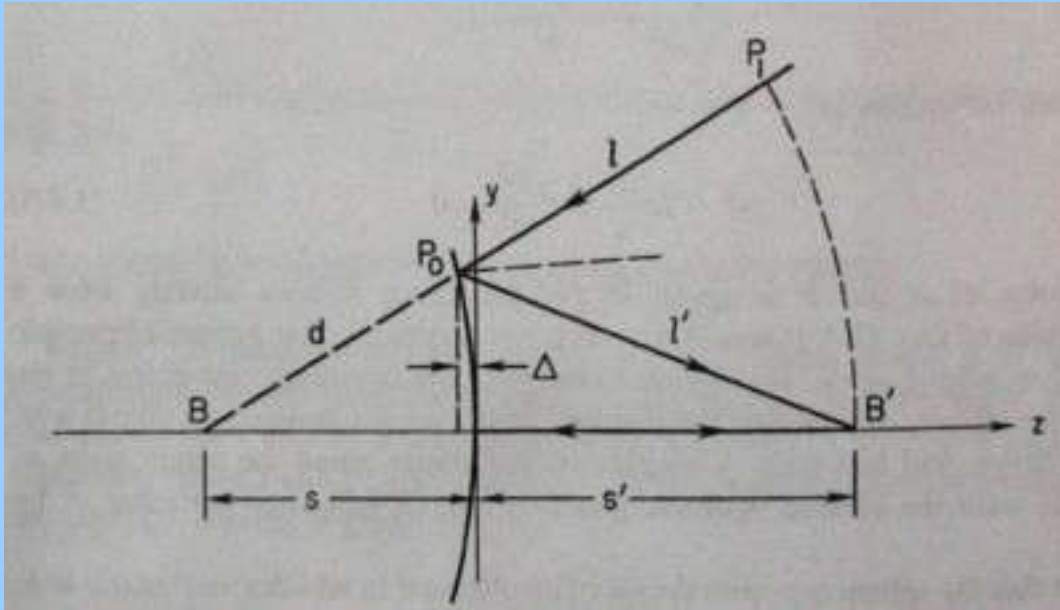
$$d^2 = y^2 + (-s - \Delta)^2, \quad l + d = s' - s, \quad l'^2 = y^2 + (s' + \Delta)^2.$$

Po połączeniu równań:

$$y^2 - 4z \frac{ss'}{s + s'} + 4z^2 \frac{ss'}{(s + s')^2} = 0,$$

Typy teleskopów

Promienie odbite od zwierciadła parabolicznego skupiają się w punkcie B.



$$y^2 - 4z \frac{ss'}{s+s'} + 4z^2 \frac{ss'}{(s+s')^2} = 0,$$

Ogólne równanie na hiperbolę:

$$\frac{(z-a)^2}{a^2} - \frac{y^2}{b^2} = 1,$$

Po przekształceniach:

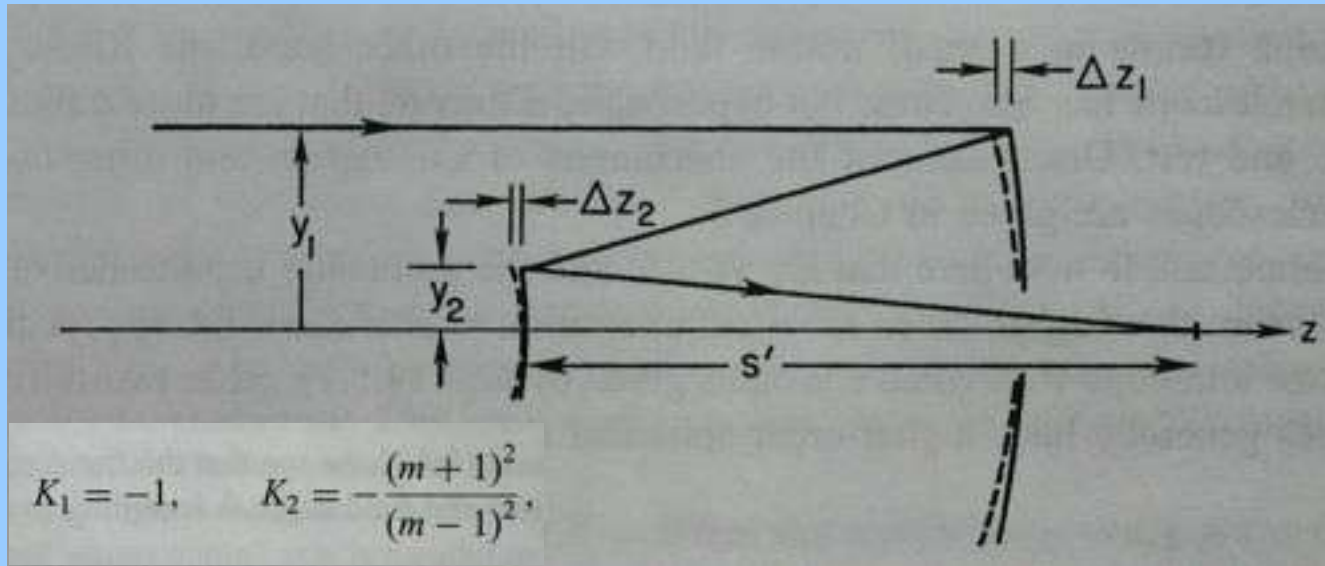
$$y^2 + 2z \frac{b^2}{a} - z^2 \frac{b^2}{a^2} = 0.$$

Typy teleskopów

Teleskop Cassegraina to jeden z najbardziej popularnych systemów w astronomii profesjonalnej.

Typy teleskopów

Modyfikacje teleskopu Cassegraina



$$z = \frac{R}{1+K} \left[1 - \left(1 - \frac{r^2}{R^2} (1+K) \right)^{1/2} \right]$$

$$= \frac{r^2}{2R} + (1+K) \frac{r^4}{8R^3} + (1+K)^2 \frac{r^6}{16R^5} + \dots$$

$$z_1(\text{original}) = \frac{y_1^2}{2R_1},$$

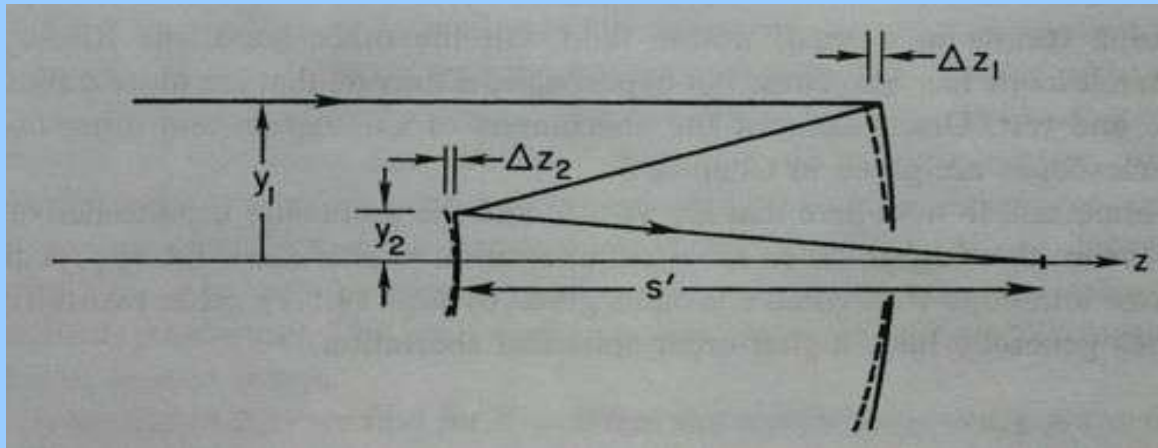
$$z_1(\text{new}) = \frac{y_1^2}{2R_1} + (1+K_1) \frac{y_1^4}{8R_1^3},$$

$$z_2(\text{original}) = \frac{y_2^2}{2R_2} + \left[1 - \left(\frac{m+1}{m-1} \right)^2 \right] \frac{y_2^4}{8R_2^3},$$

$$z_2(\text{new}) = \frac{y_2^2}{2R_2} + (1+K_2) \frac{y_2^4}{8R_2^3}.$$

Typy teleskopów

Modyfikacje teleskopu Cassegraina



$$2 \Delta z_1 = (1 + K_1) \frac{y_1^4}{4R_1^3},$$

$$2 \Delta z_2 = \left[K_2 + \left(\frac{m+1}{m-1} \right)^2 \right] \frac{y_2^4}{4R_2^3},$$

Zakładając, że położenie obrazu się nie zmieni:

$$2 \Delta z_1 = 2 \Delta z_2.$$

$$K_1 + 1 = \frac{y_2^4 R_1^3}{y_1^4 R_2^3} \left[K_2 + \left(\frac{m+1}{m-1} \right)^2 \right] = \frac{k^4}{\rho^3} \left[K_2 + \left(\frac{m+1}{m-1} \right)^2 \right].$$

Typy teleskopów

Modyfikacje teleskopu Cassegraina:

$$K_1 + 1 = \frac{y_2^4 R_1^3}{y_1^4 R_2^3} \left[K_2 + \left(\frac{m+1}{m-1} \right)^2 \right] = \frac{k^4}{\rho^3} \left[K_2 + \left(\frac{m+1}{m-1} \right)^2 \right].$$

- Możemy położyć $K_2=0$ (czyli sfera), wtedy $K_1 = -0.7696$, co daje nam elipsoidalne zwierciadło główne. Jest to system Dall-Kirkhama, dość prosty do wykonania i testów pod względem aberracji, ale obarczony sporą komą.
- Jeśli położymy $K_1 < -1$ (hiperbola), to $K_2 < -1$ (hiperbola) np. $K_1=-1.02$ i $K_2=-2.4453$. W tym przypadku mamy system Ritchey-Chretien z zerową komą, ale z trudnymi do wyszlifowania zwierciadłami.

Typy teleskopów

Przykłady teleskopów RC.



Typy teleskopów

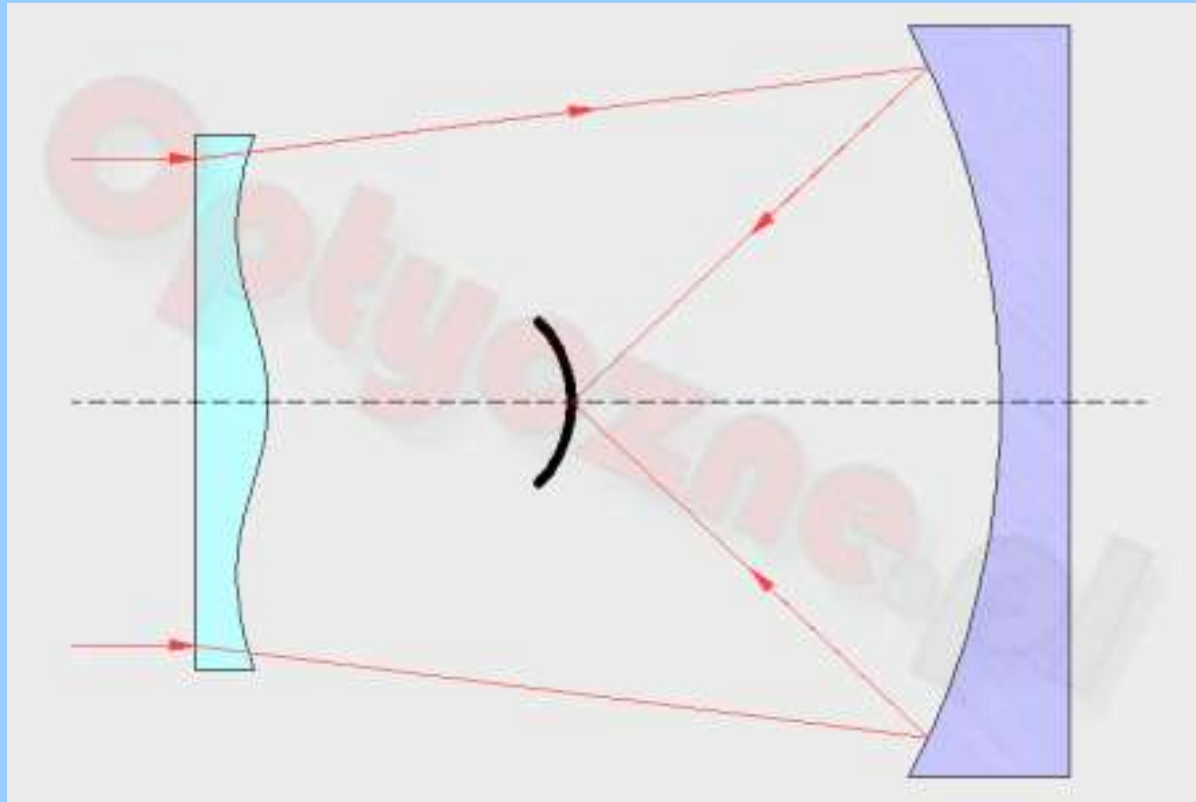
Przykład teleskopu Dall-Kirkhama

50-cm teleskop Celestrona – niby dla miłośników...



Typy teleskopów

Kamera Schmidta (1930 r.)



Lustro główne sferyczne, ale czoło fali świetnej modyfikowane przez korektor, tak że układ jest wolny od aberracji sferycznej.

- Duże pole wolne od aberracji (nawet kilkanaście stopni!)
- Krzywizna pola (zakrzywione klisze)

Typy teleskopów

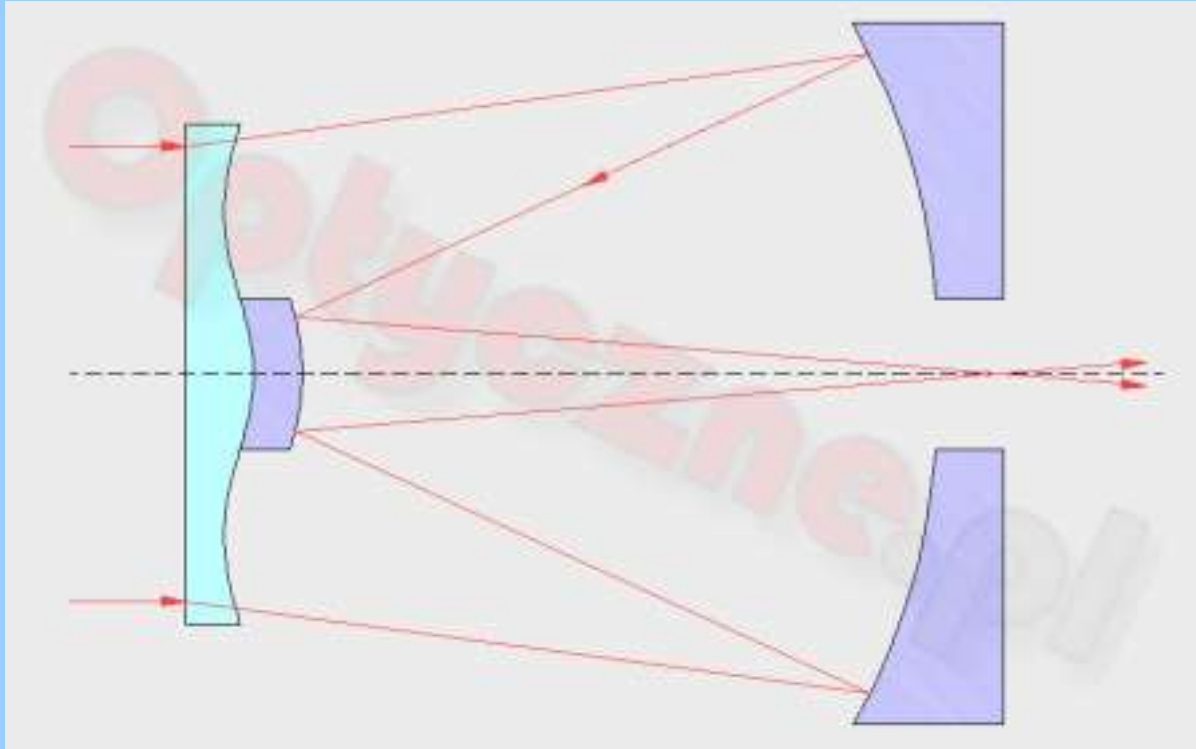
Kamera Schmidta (1930 r.) - przykłady.

Toruń 60/90 cm



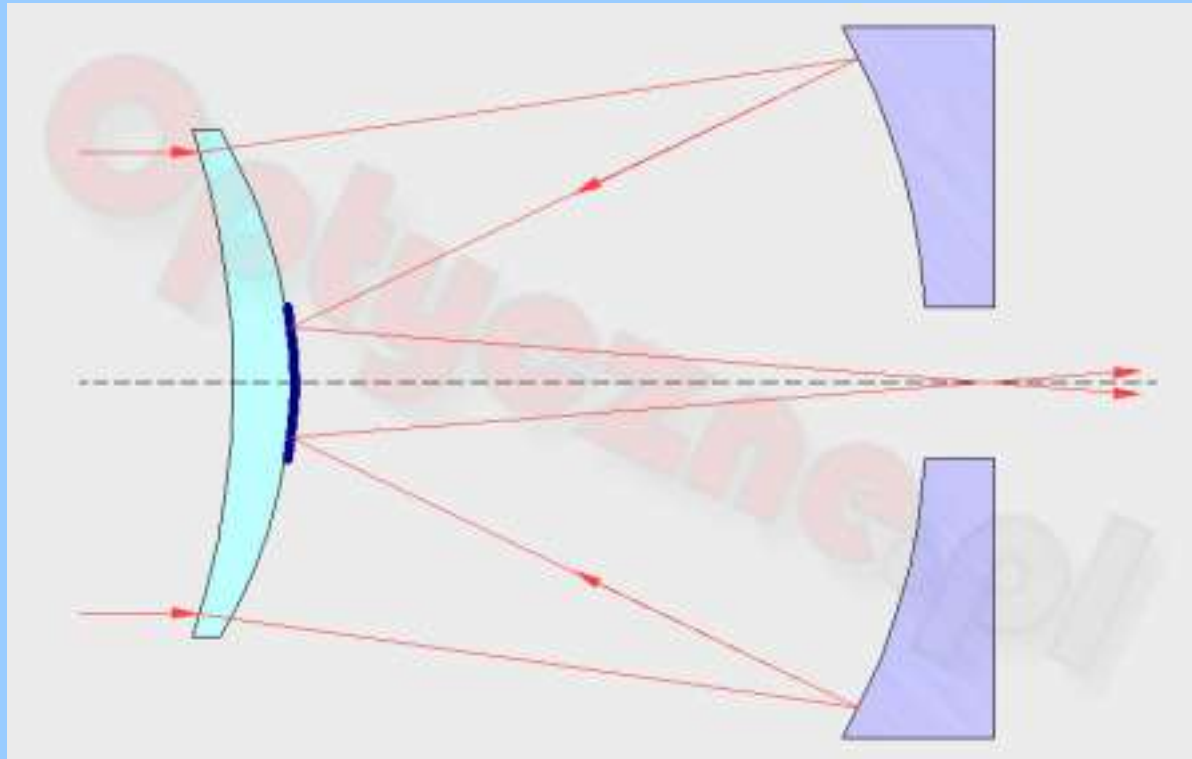
Typy teleskopów

Teleskop Schmidta-Cassegraina



Typy teleskopów

Teleskop Maksutowa (1940 r.)

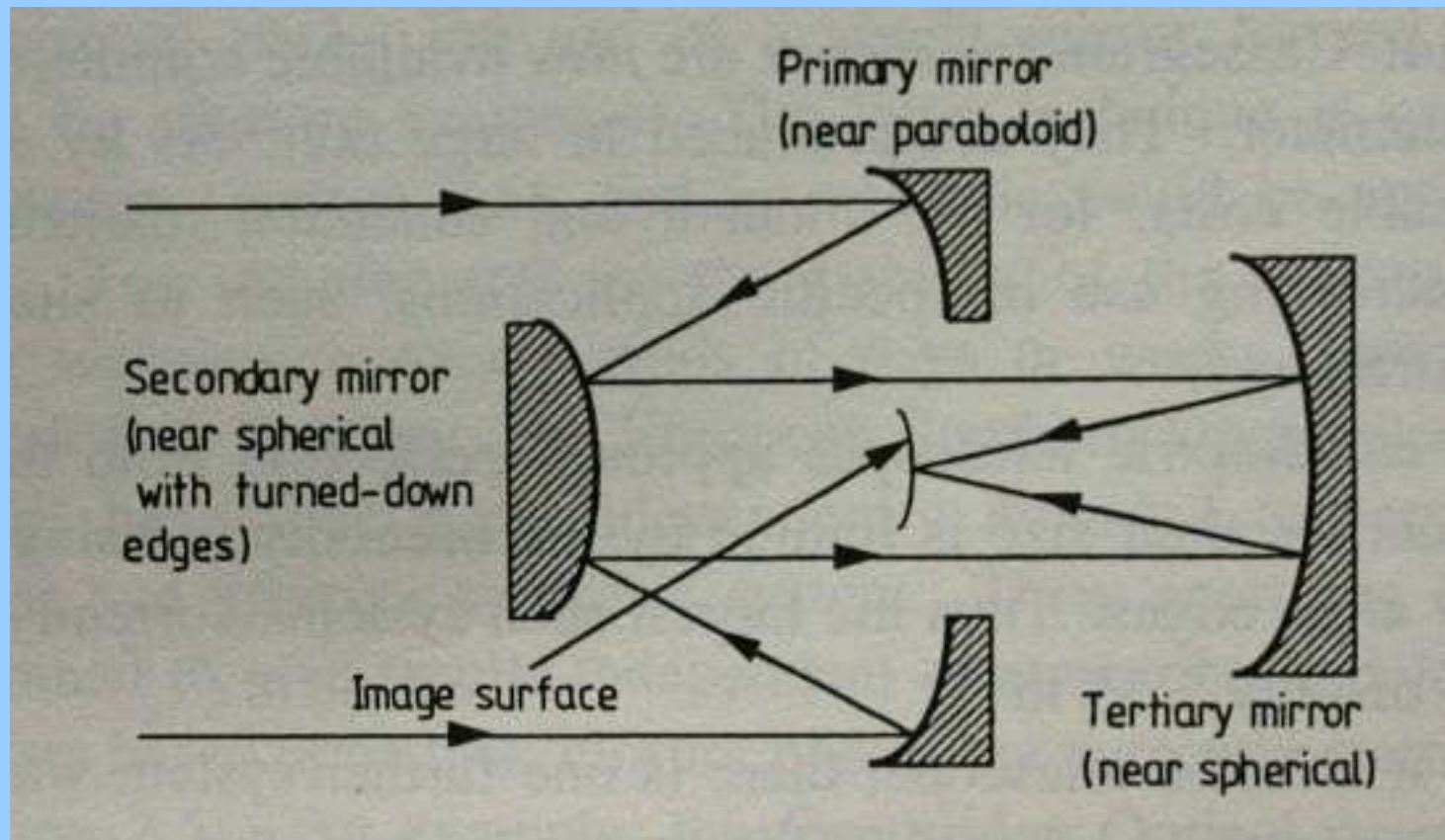


Typy teleskopów

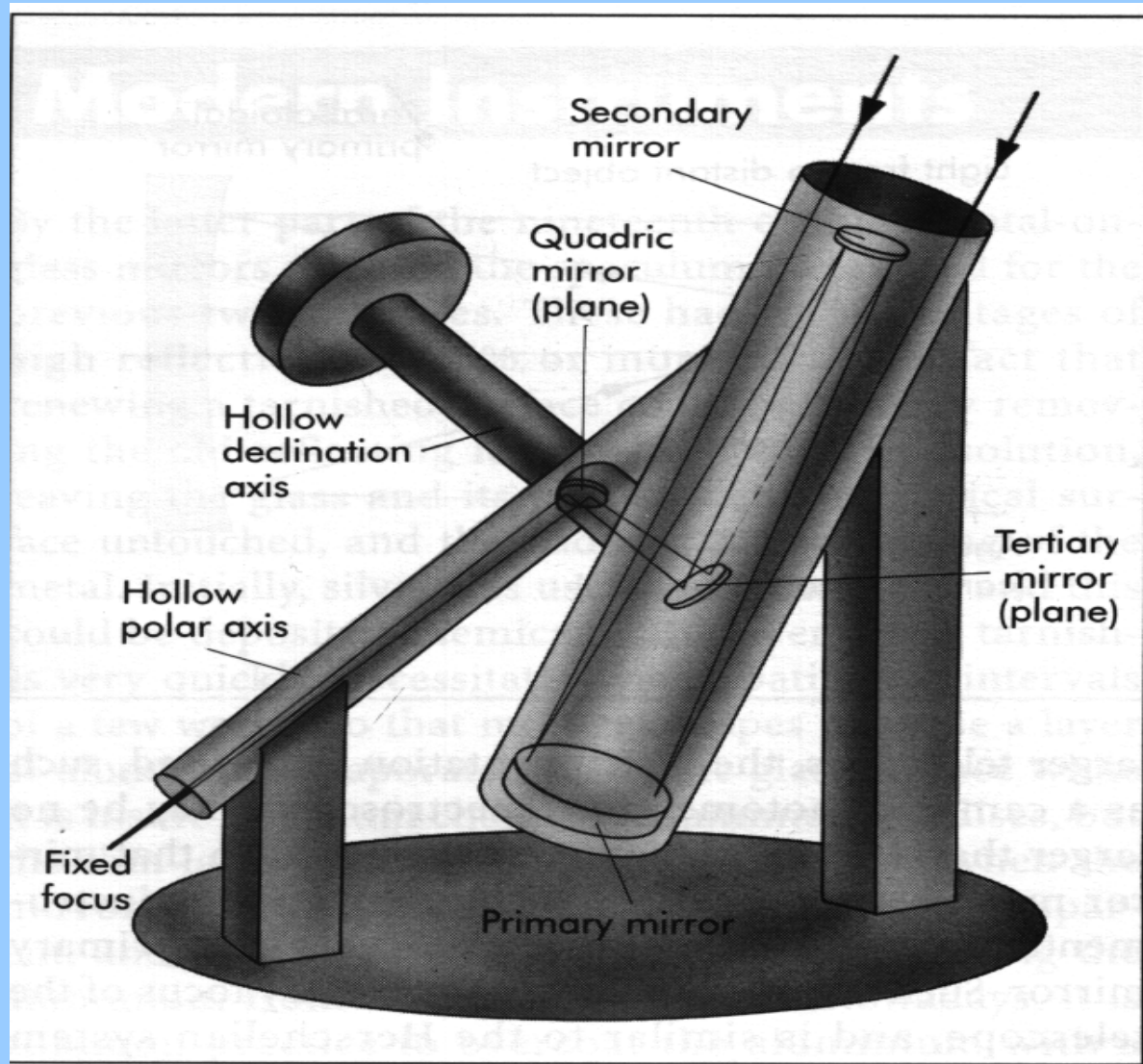
Teleskopy Schmidta i Maksutowa nie mogą mieć dużych rozmiarów, bowiem ogranicza je wielkość korektora.

Są inne rozwiązania np. Teleskop Willstropa- duże pole wolne od wad, ale wymaga trzech zwierciadeł i ma zakrzywione pole.

Największy w Cambridge – 0.5 metra.

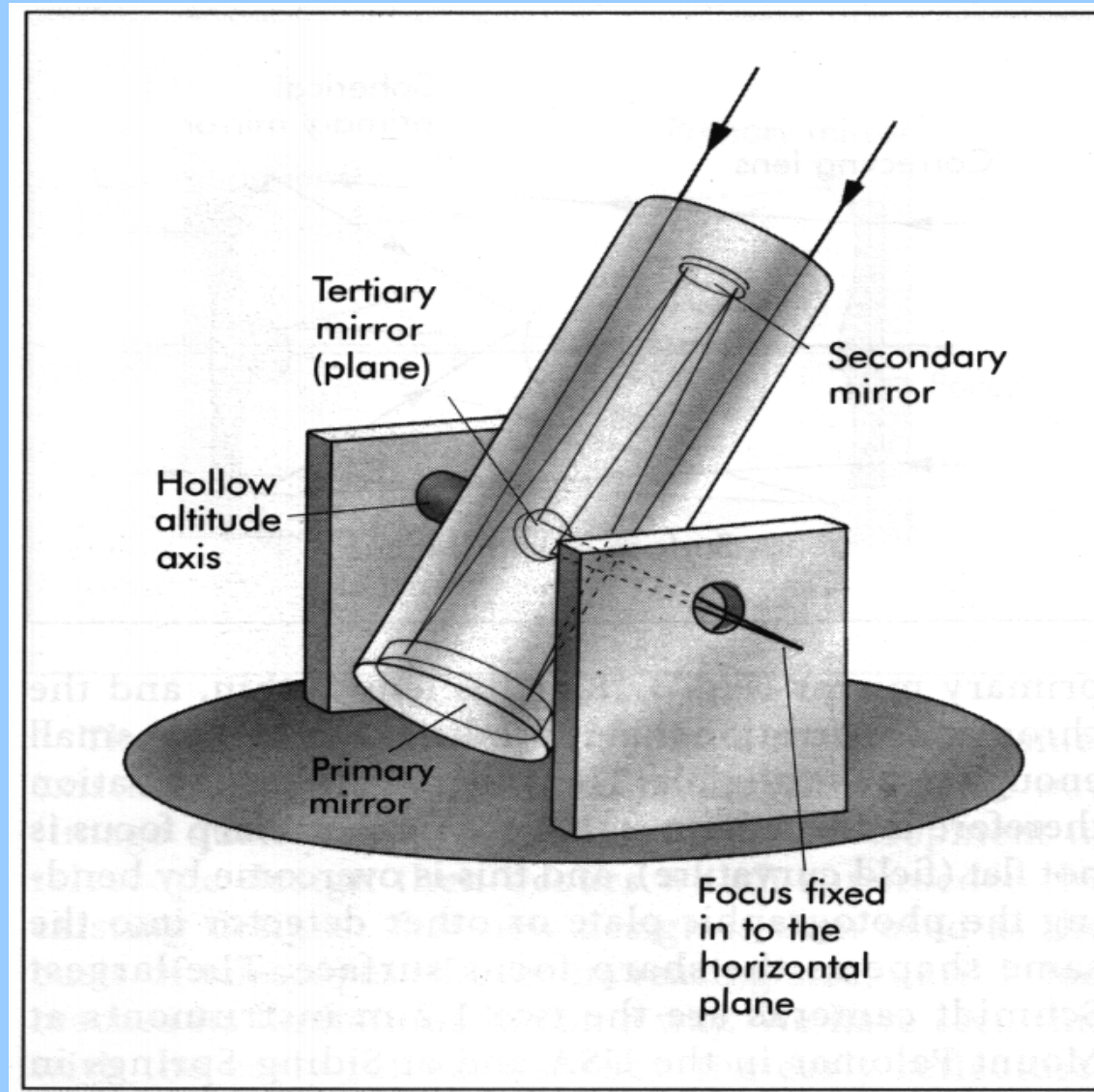


Typy teleskopów



Teleskop Coude

Typy teleskopów

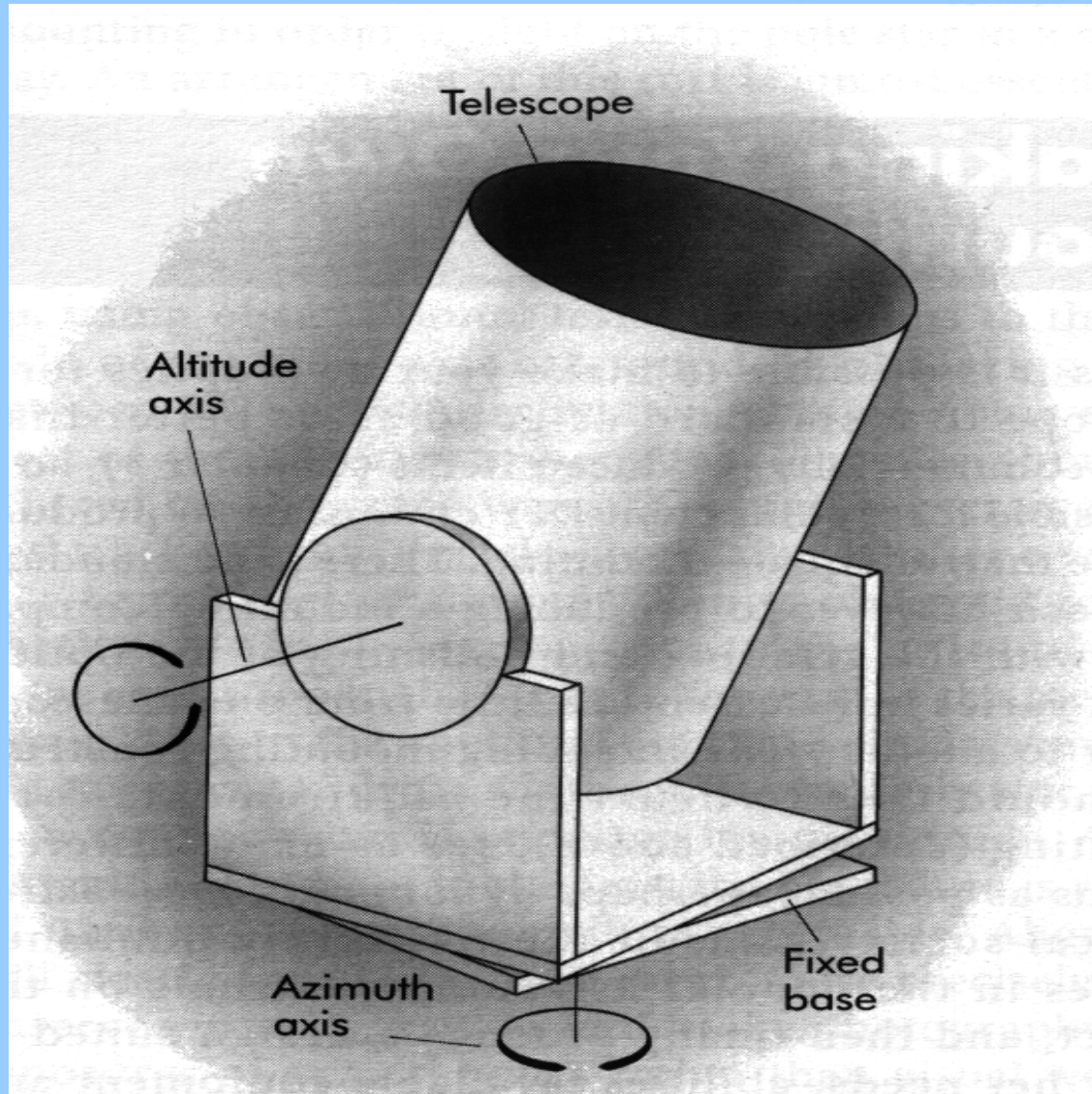


Teleskop Nasmytha

Warstwy

Teleskop Nasmytha

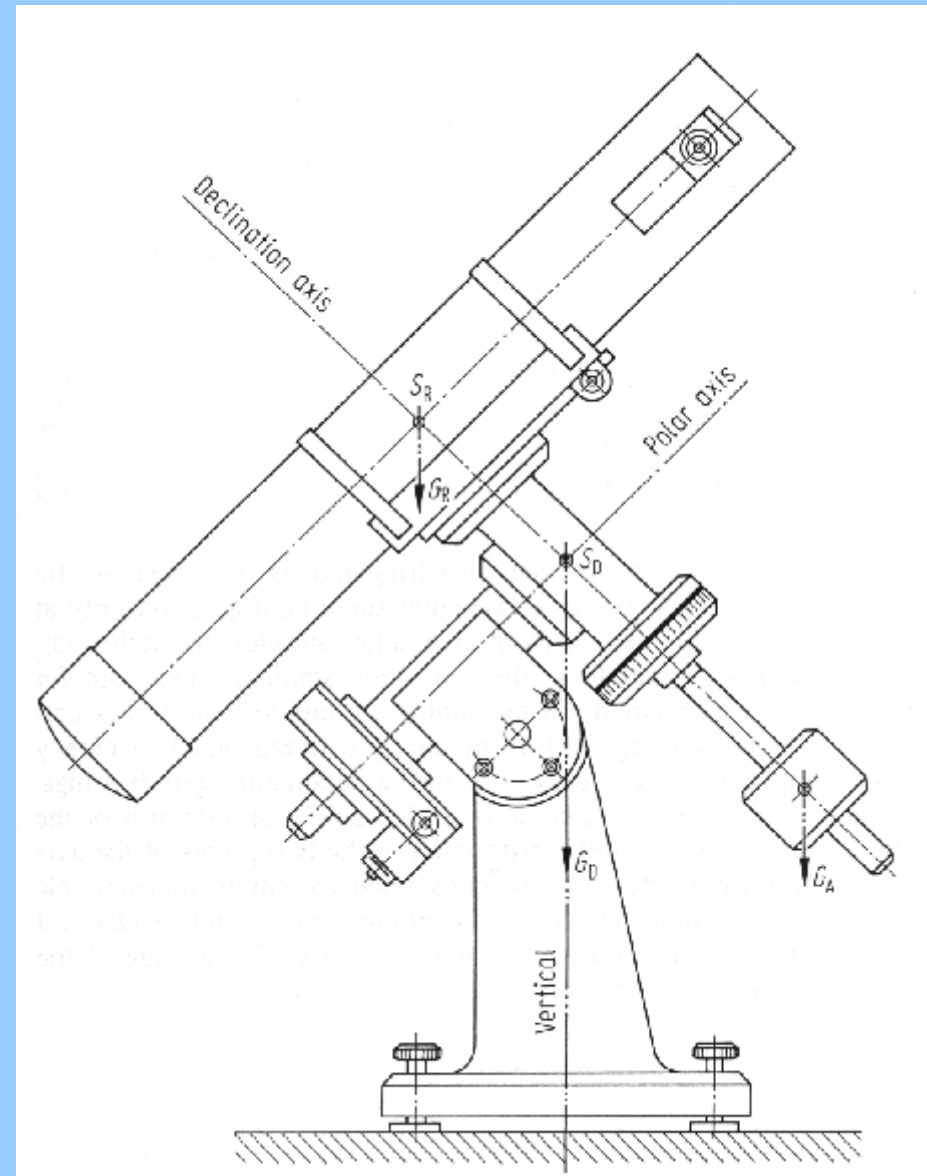
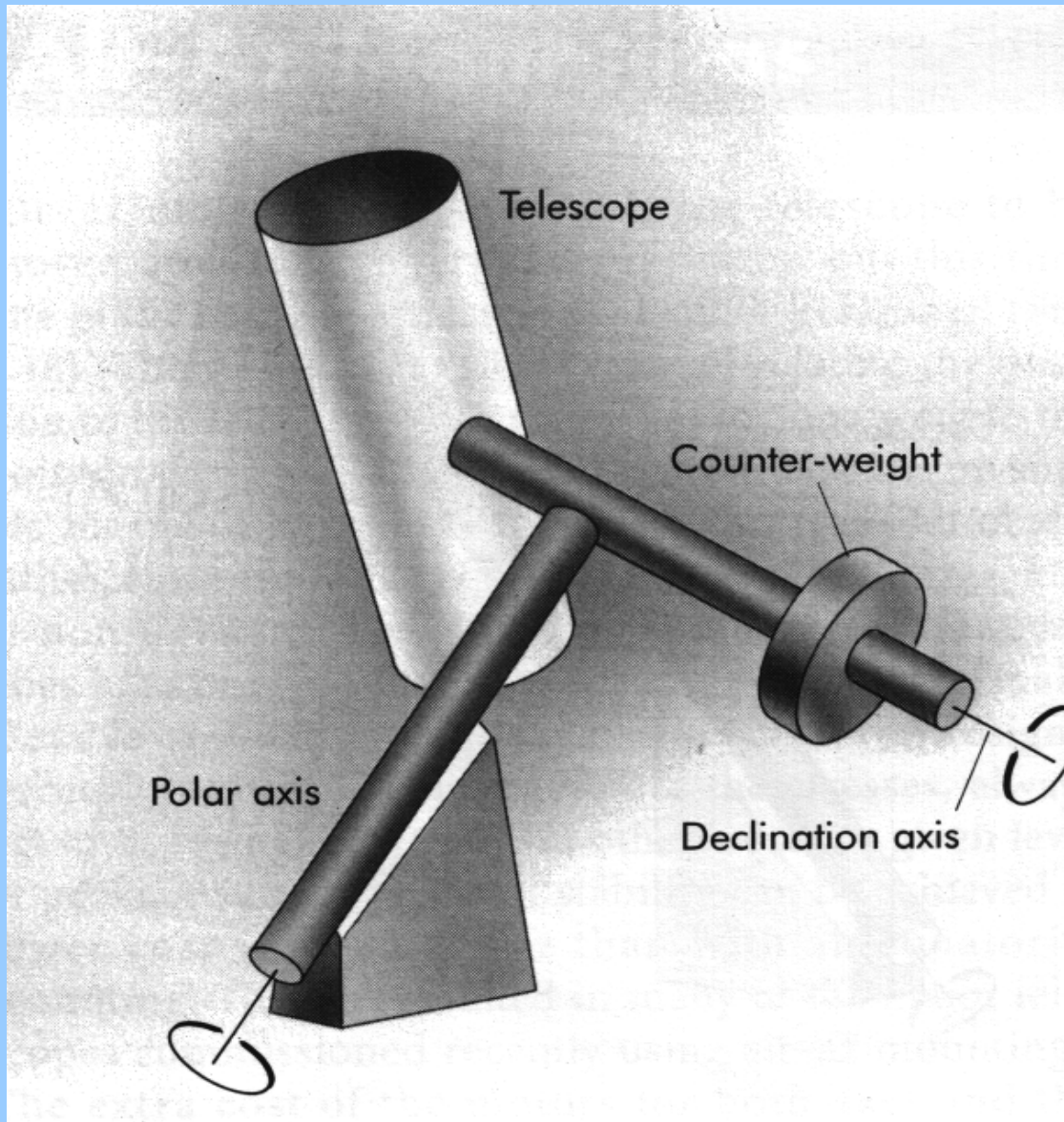
Montaże teleskopów



Montaż azymutalny (Dobsona)



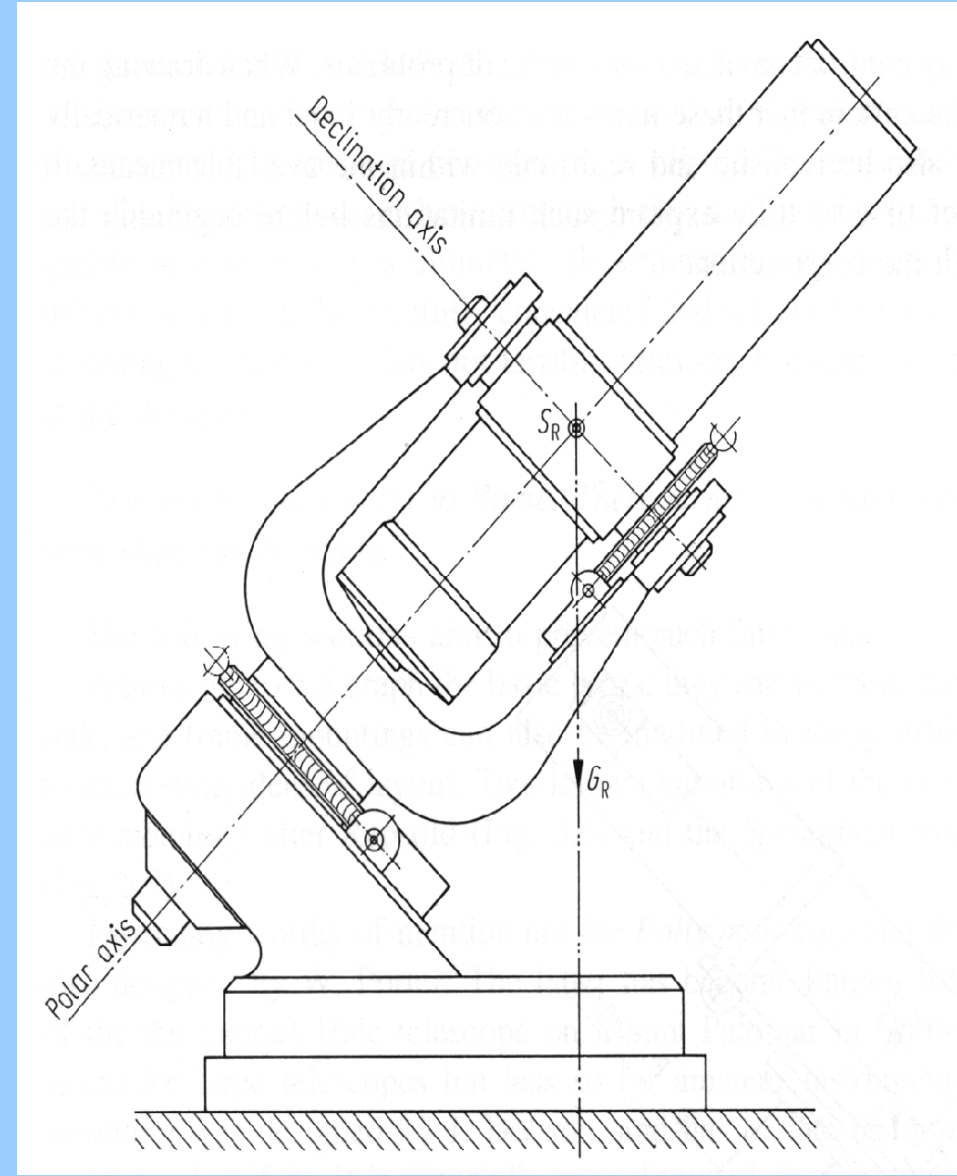
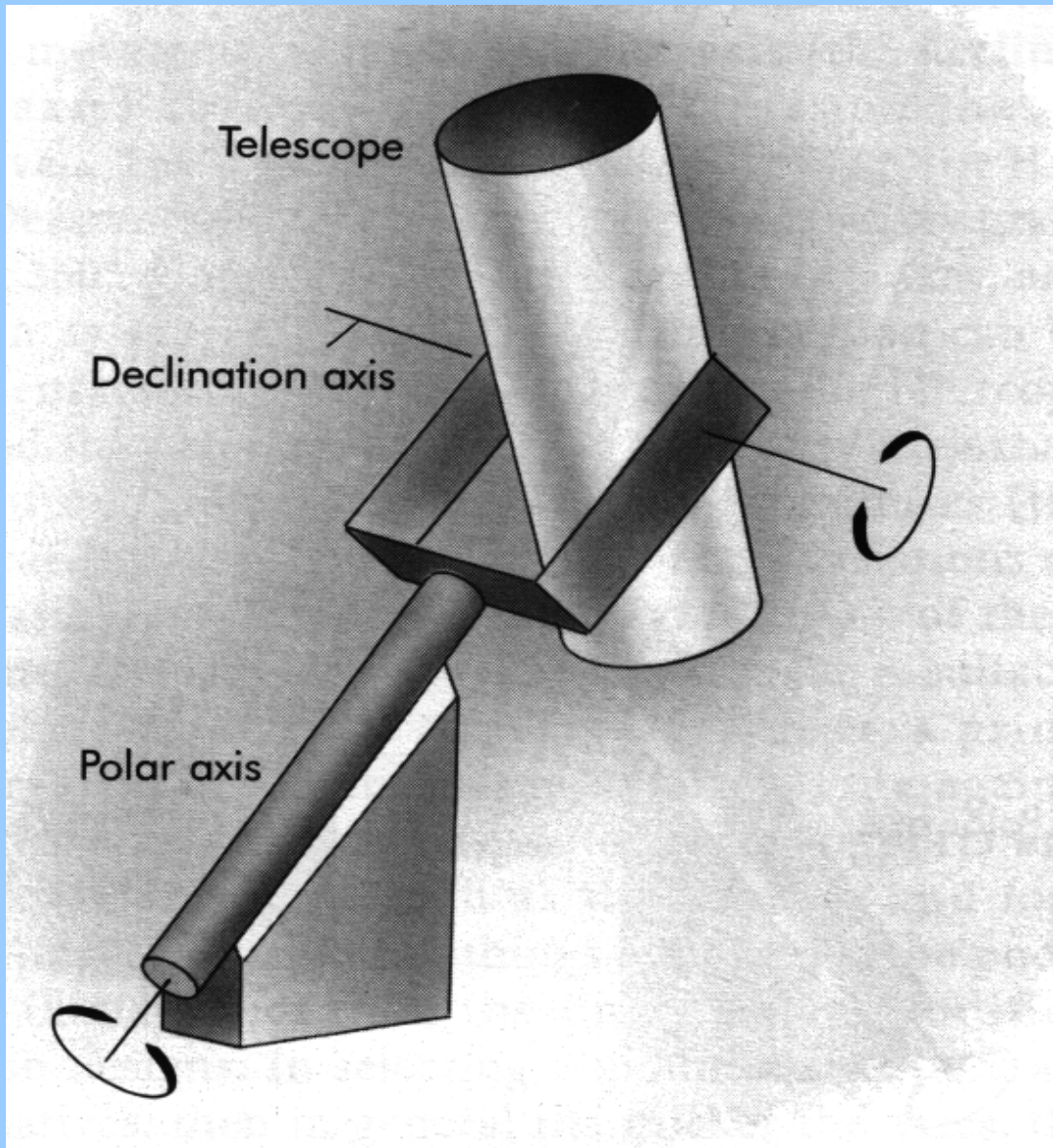
Montaże teleskopów



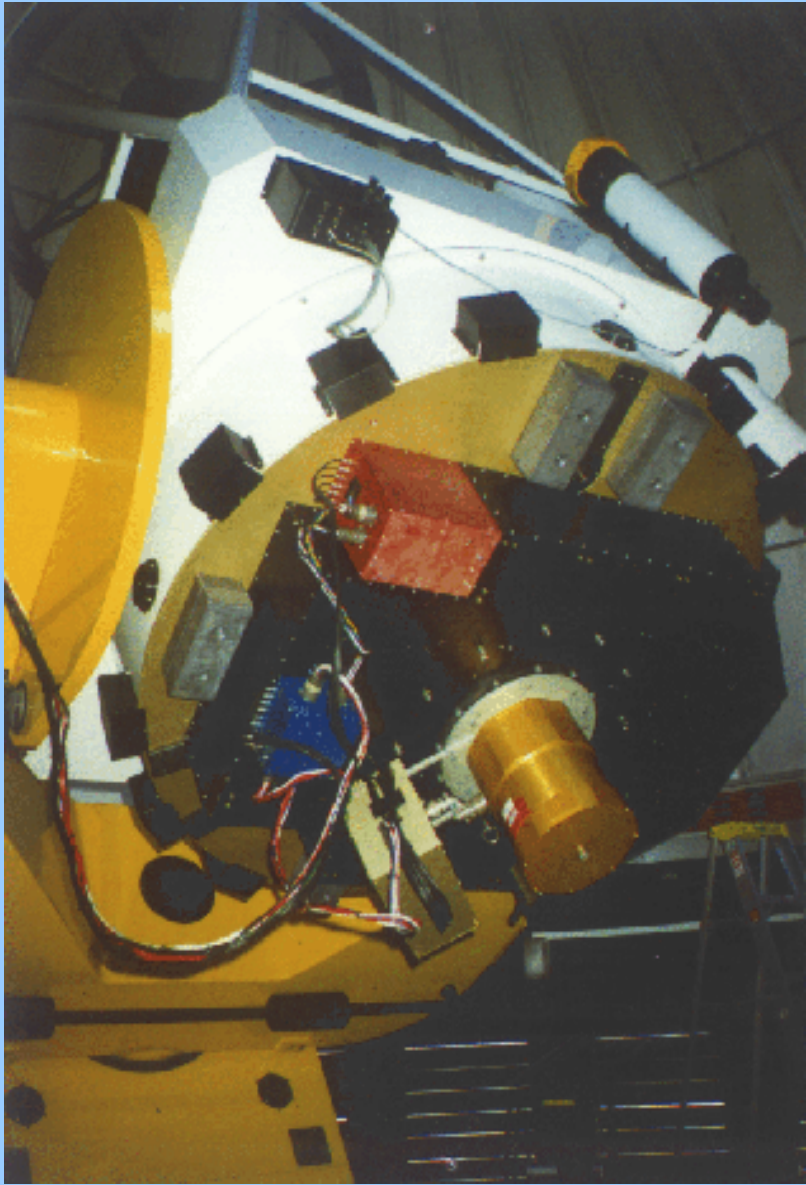
Montaż niemiecki



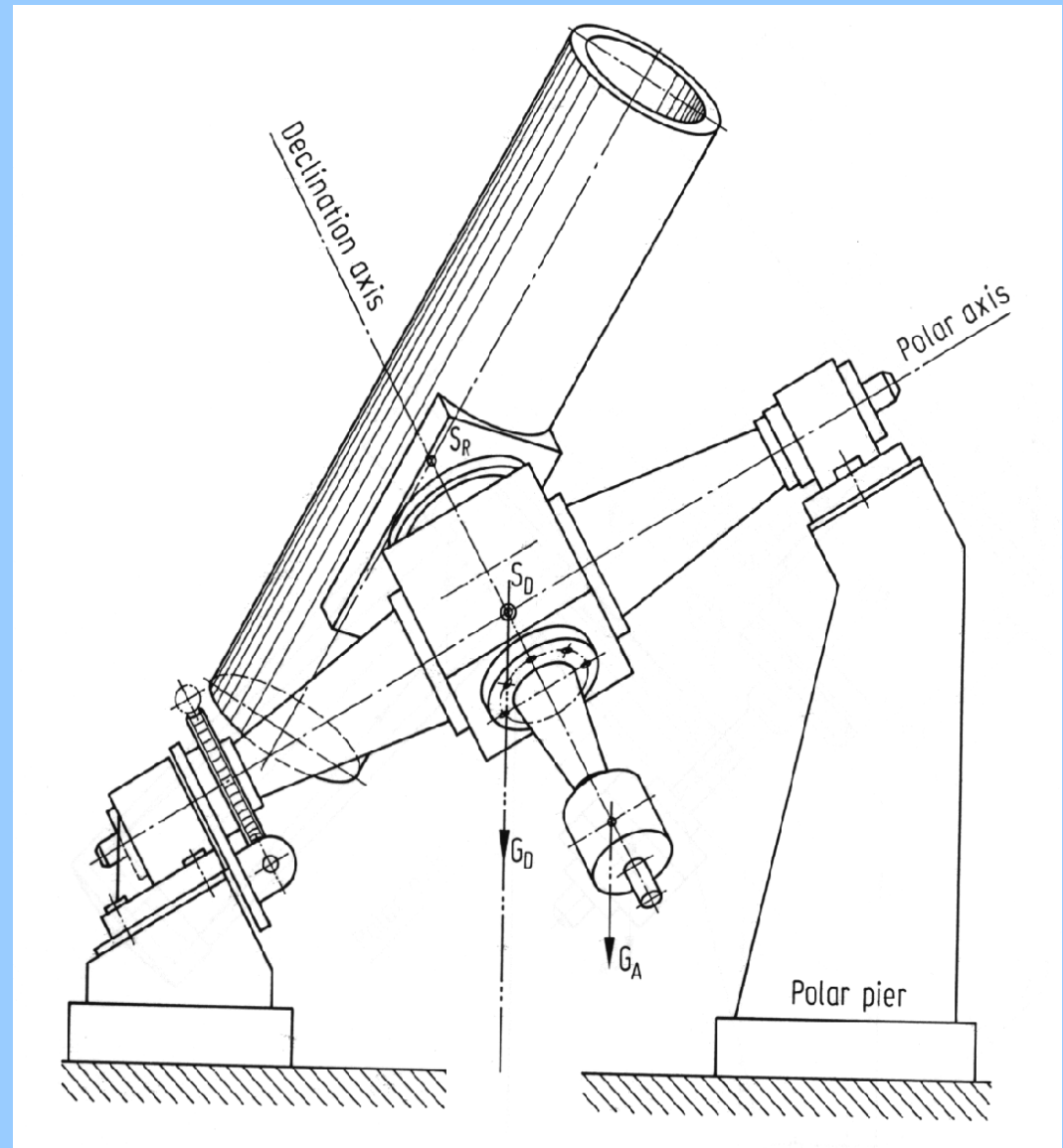
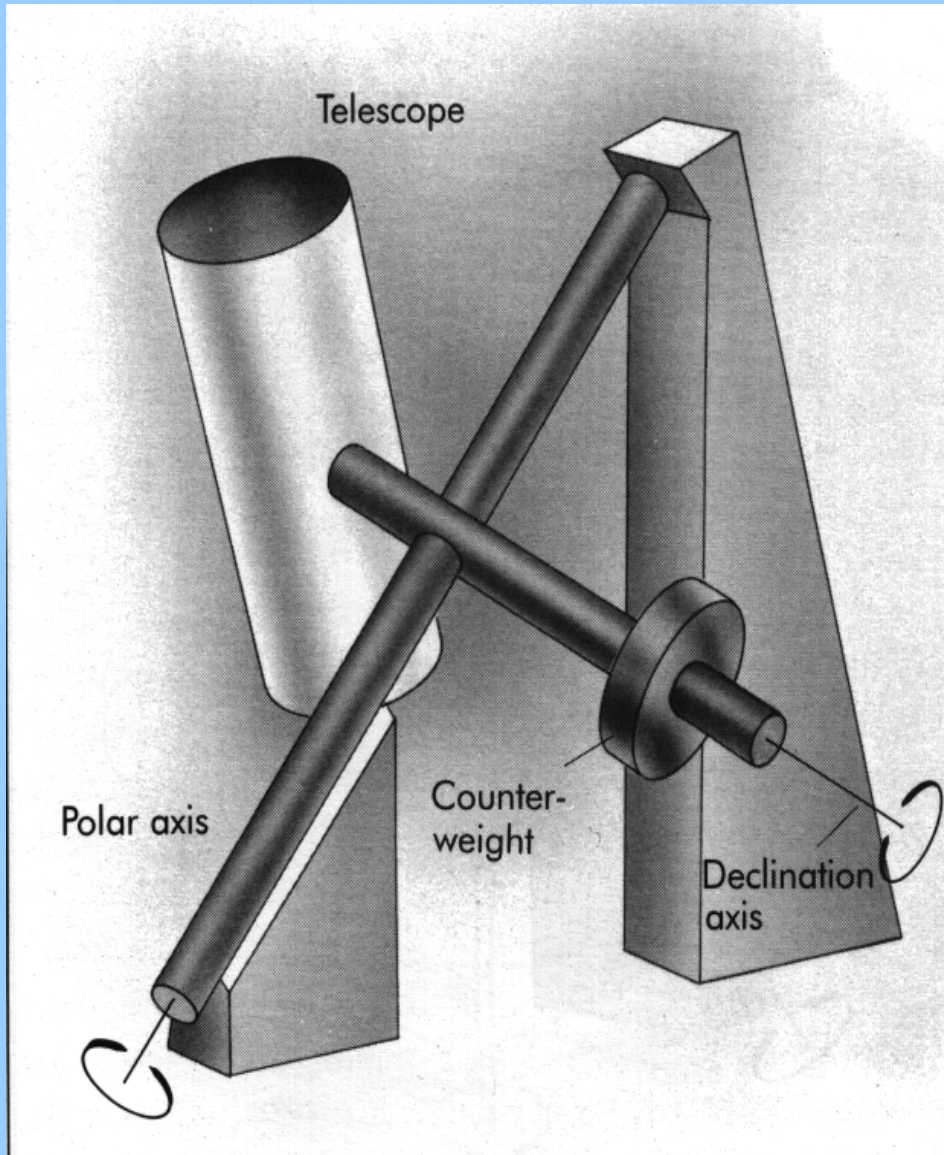
Montaże teleskopów



Montaż widłowy (amerykański)

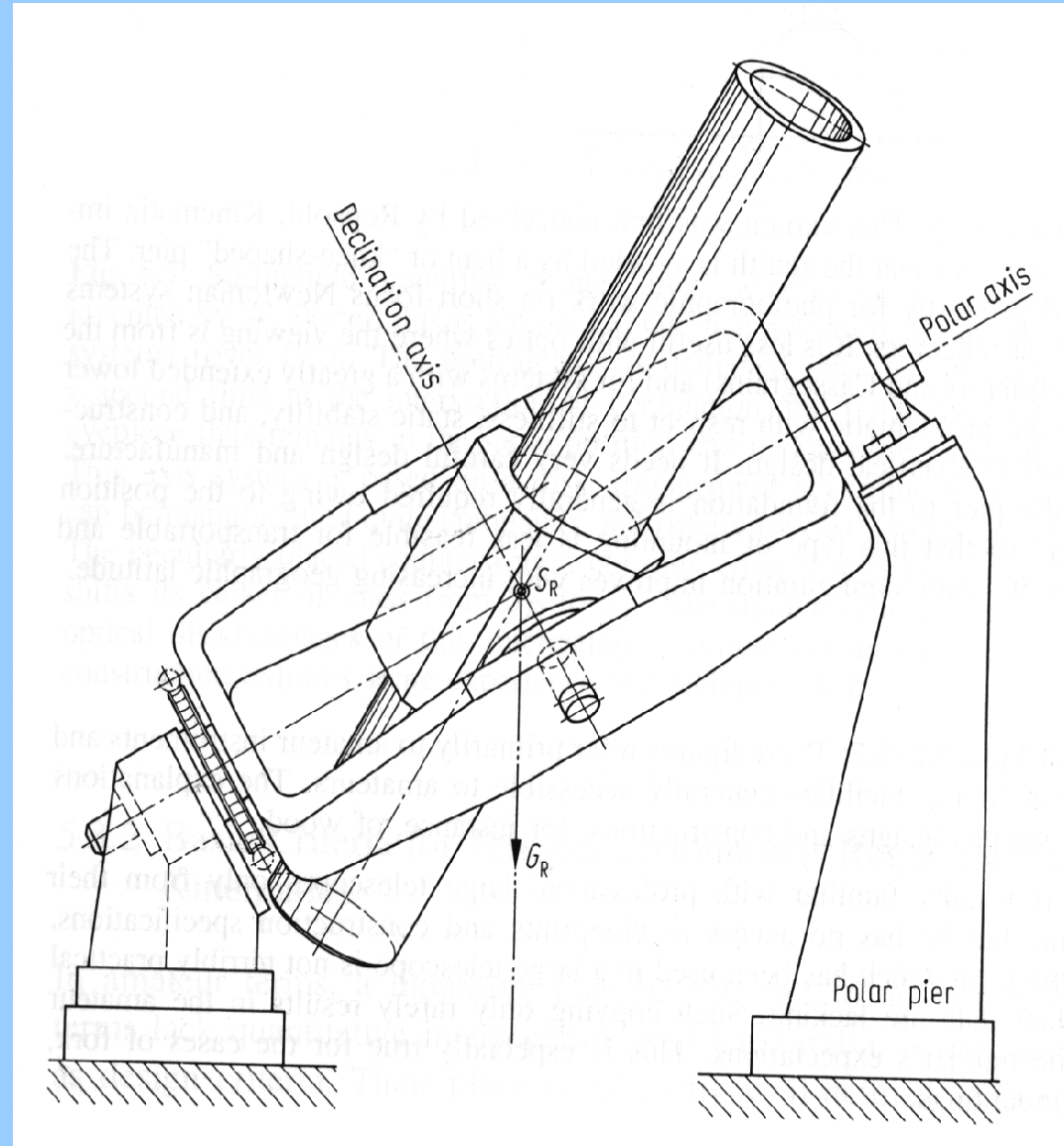
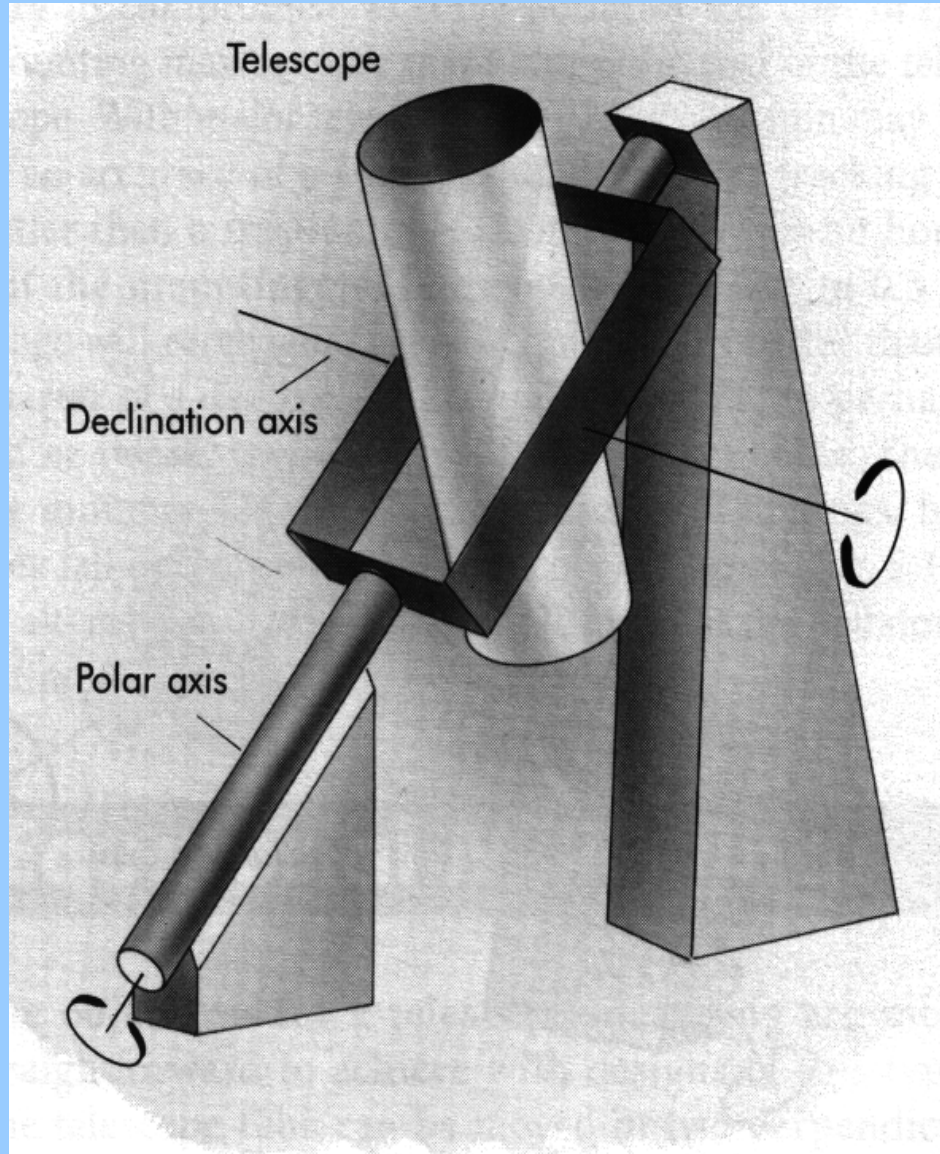


Montaże teleskopów

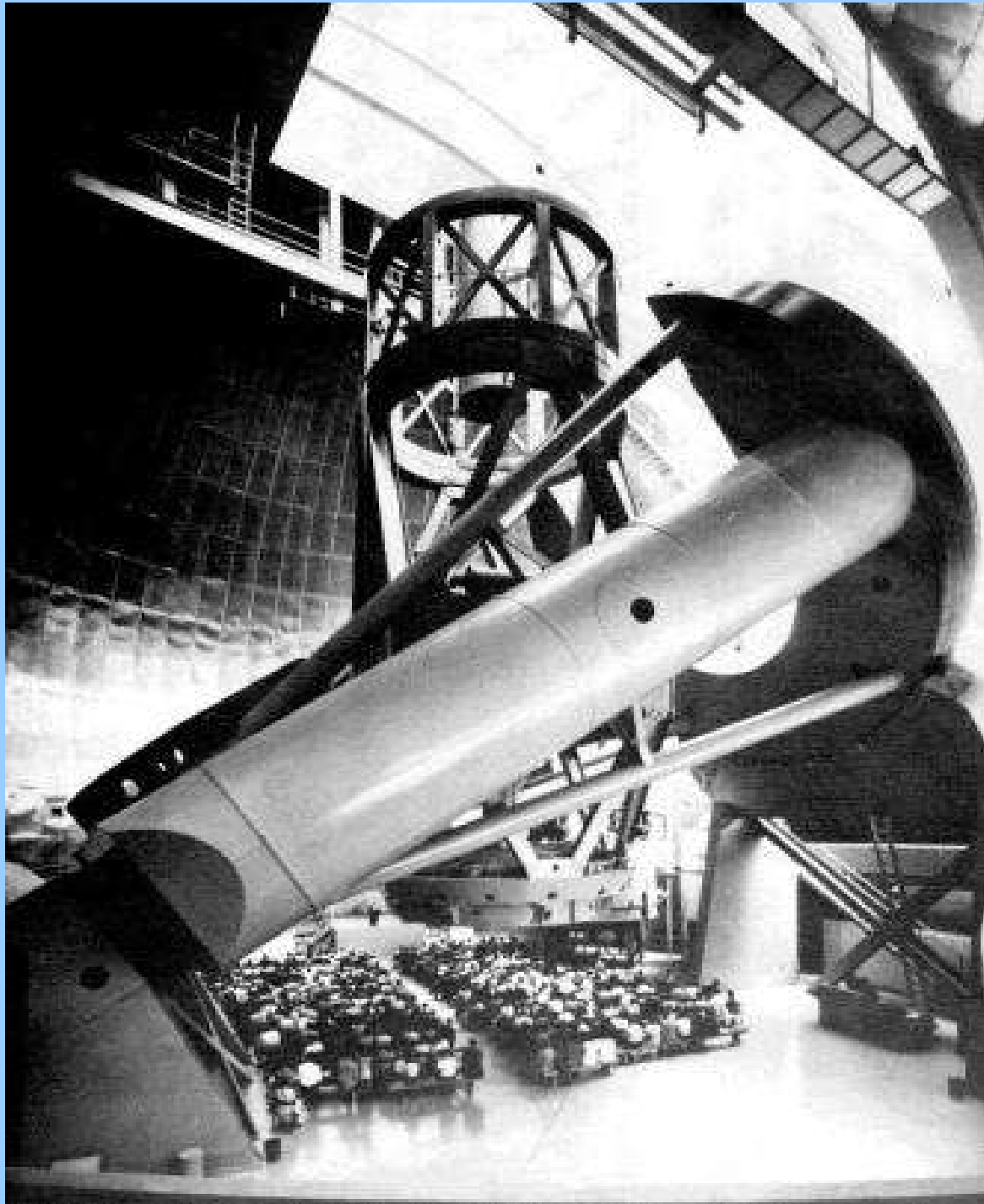


Montaż angielski

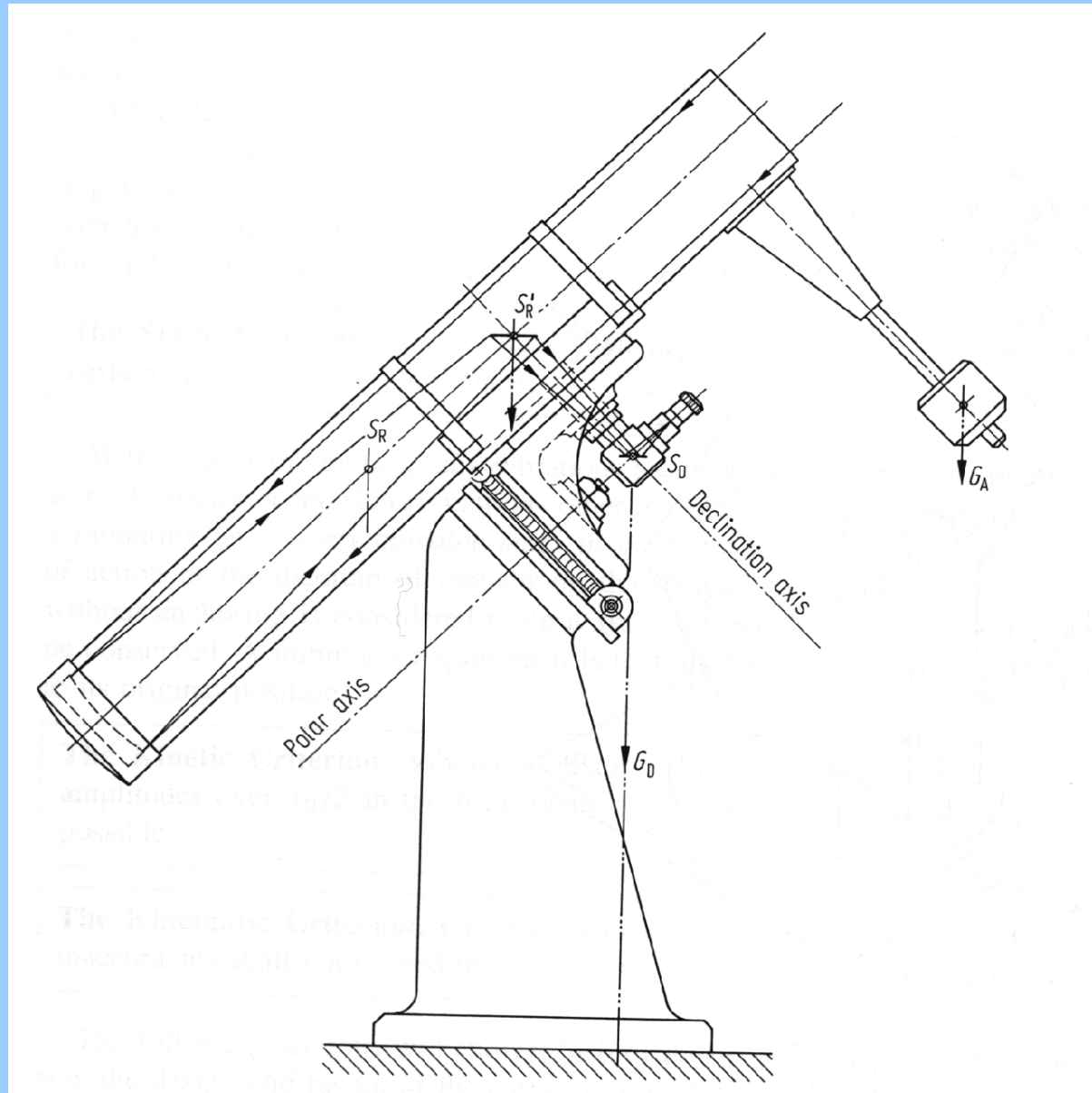
Montaże teleskopów



Montaż jaźmowy (yoke)



Montaże teleskopów



Montaż Springfielda