

1100-1BO15, rok akademicki 2021/22

# **OPTYKA GEOMETRYCZNA I INSTRUMENTALNA**

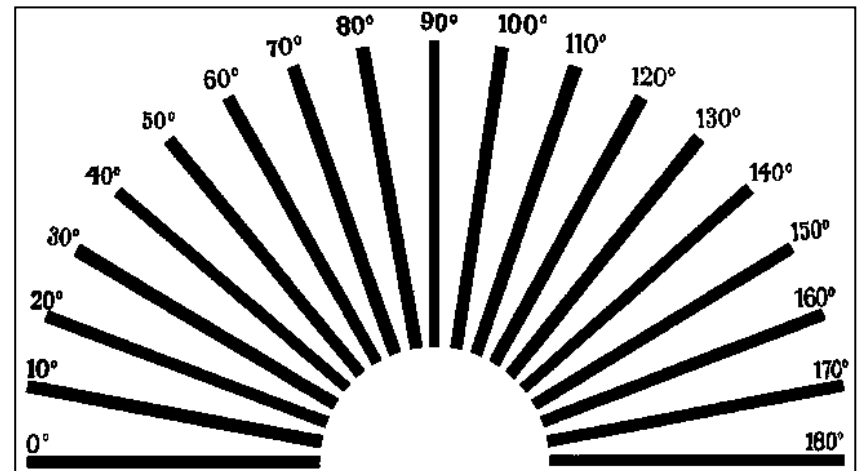
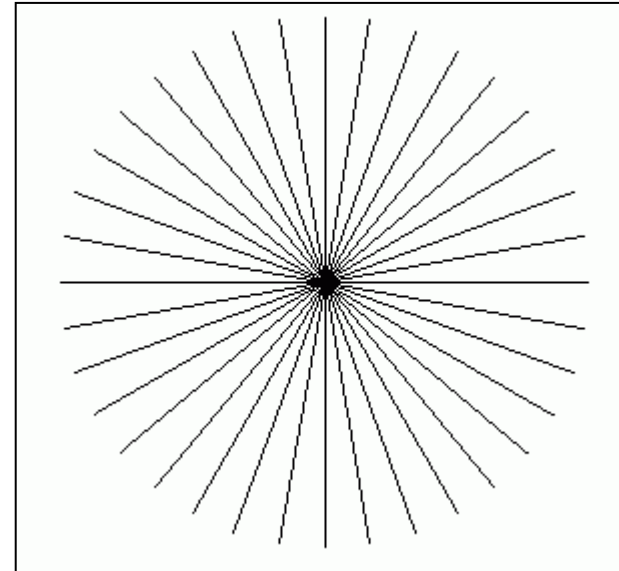
dr hab. Rafał Kasztelan

Wykład 9

# Astygmatyzm i krzywizna pola

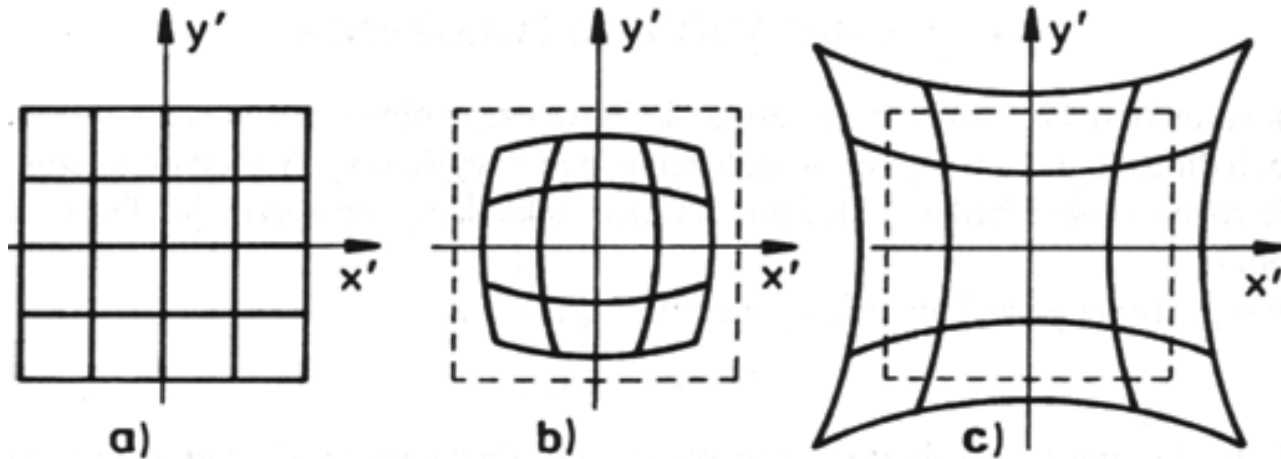
Ocena stopnia astygmatyzmu

Original	Compromise
<b>aio</b>	<b>aio</b>
Horizontal Focus	Vertical Focus
<b>aio</b>	<b>aio</b>



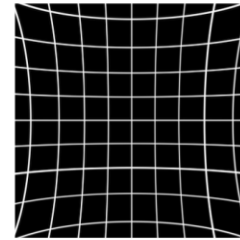
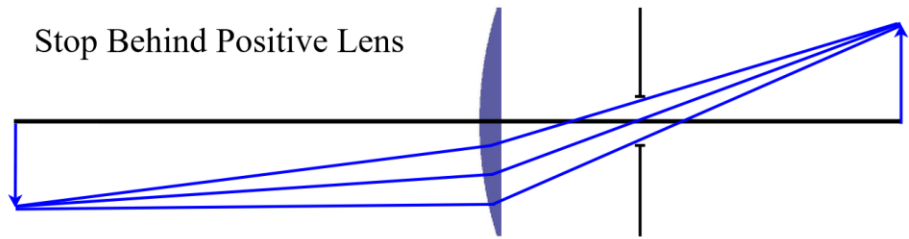
# Dystorsja

- Zależy od wielkości pola widzenia.
- Dystorsja nie wpływa na ostrość obrazu lecz dokonuje zniekształcenia geometrycznego.



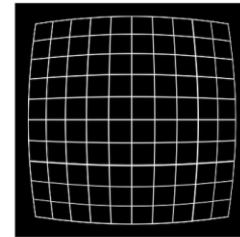
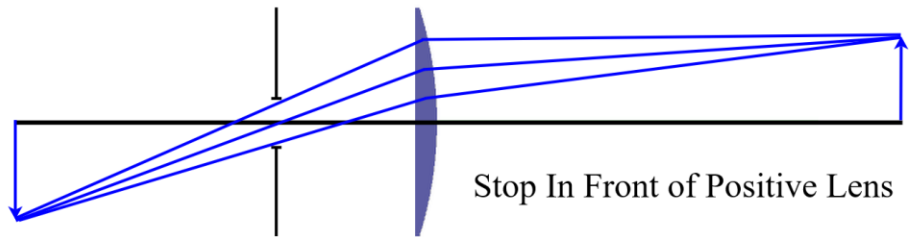
[www.uni-koeln.de/~al001/radcor\\_files](http://www.uni-koeln.de/~al001/radcor_files)

# Dystorsja



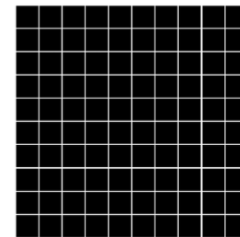
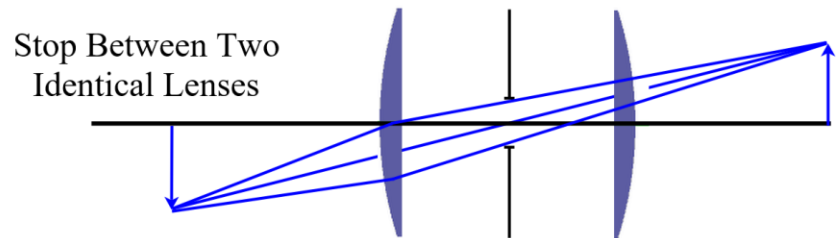
Pin-cushion distortion

+



Barrel distortion

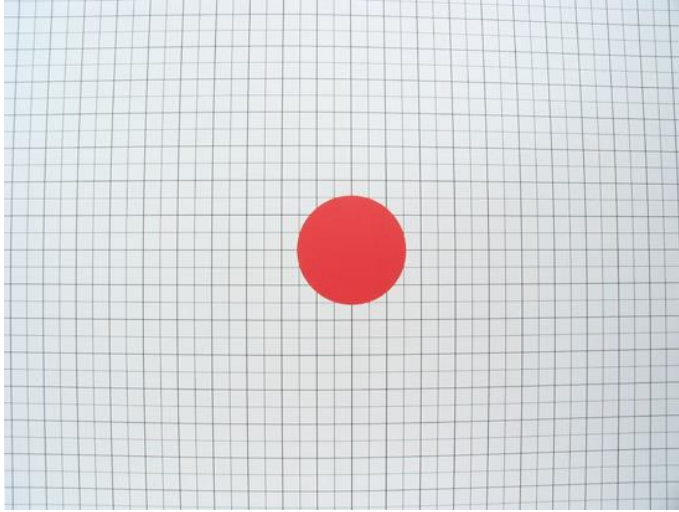
=



No distortion

# Dystorsja

## Przykłady



17MM

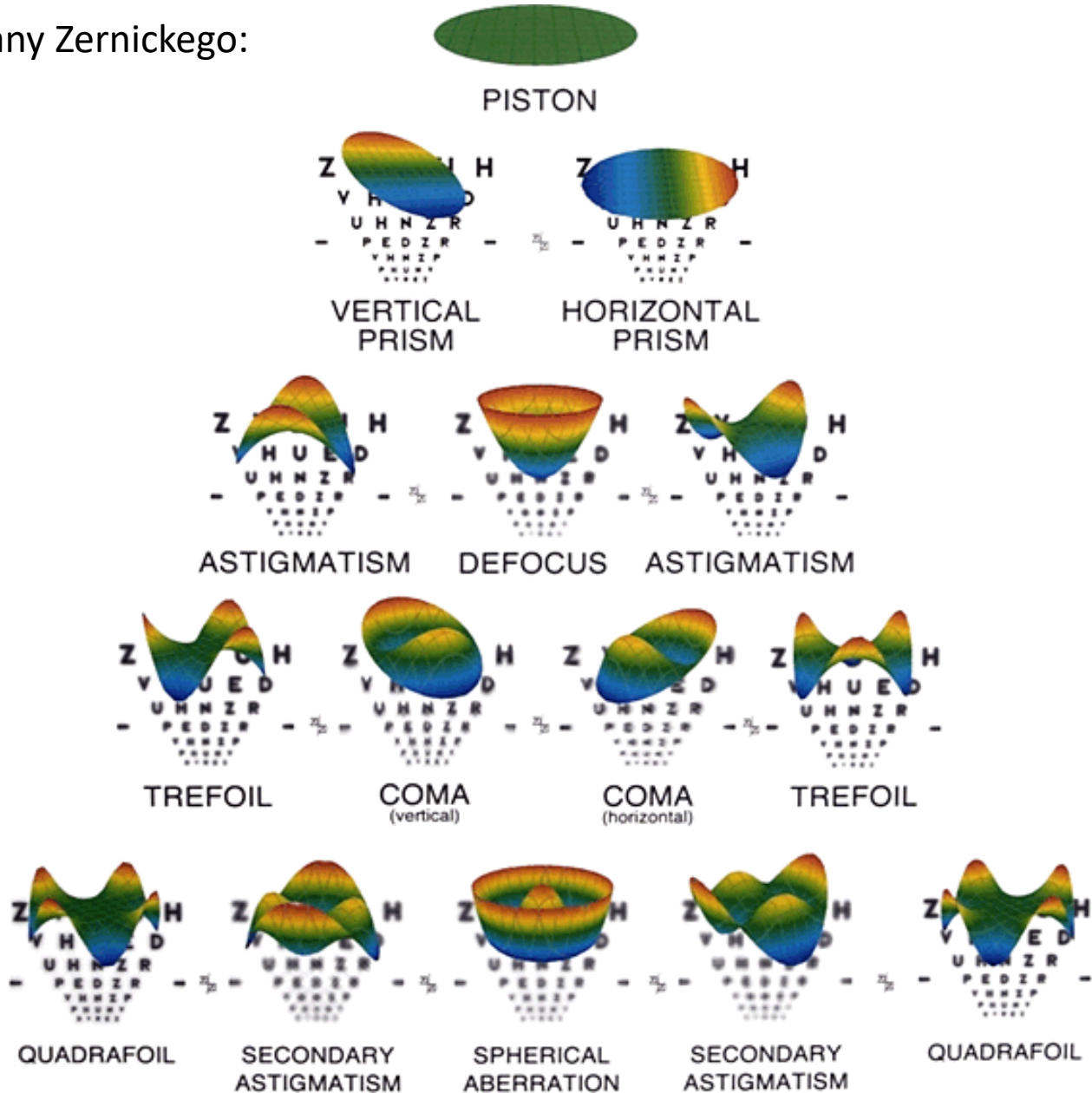
50MM

200MM

F5.6 1/200 ISO100

# Aberracje monochromatyczne

Wielomiany Zernickego:



# Aberracje monochromatyczne

Wielomiany Zernickego:

$$Z_n^m(\rho, \varphi) = R_n^m(\rho) \cos(m\varphi)$$

$$Z_n^{-m}(\rho, \varphi) = R_n^m(\rho) \sin(m\varphi)$$

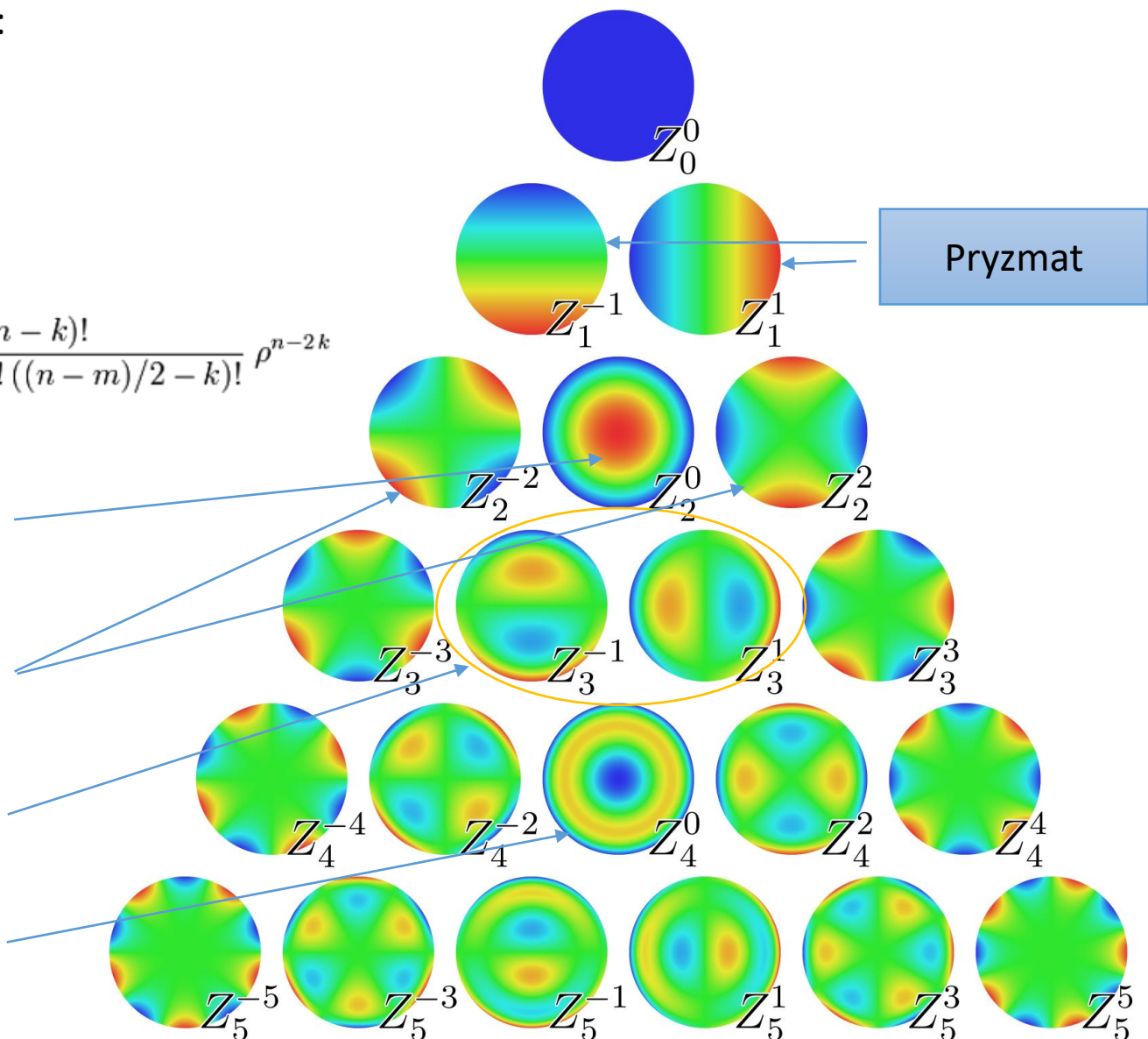
$$R_n^m(\rho) = \sum_{k=0}^{(n-m)/2} \frac{(-1)^k (n-k)!}{k! ((n+m)/2 - k)! ((n-m)/2 - k)!} \rho^{n-2k}$$

Rozogniskowanie

Astygmatyzm

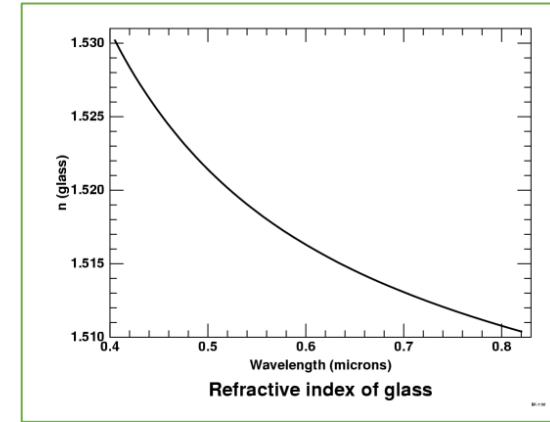
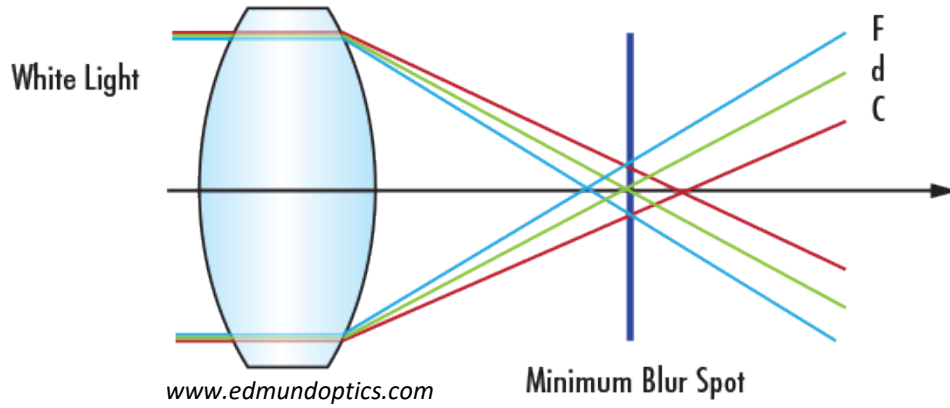
Koma

Aberracja sferyczna



# Aberracje chromatyczne

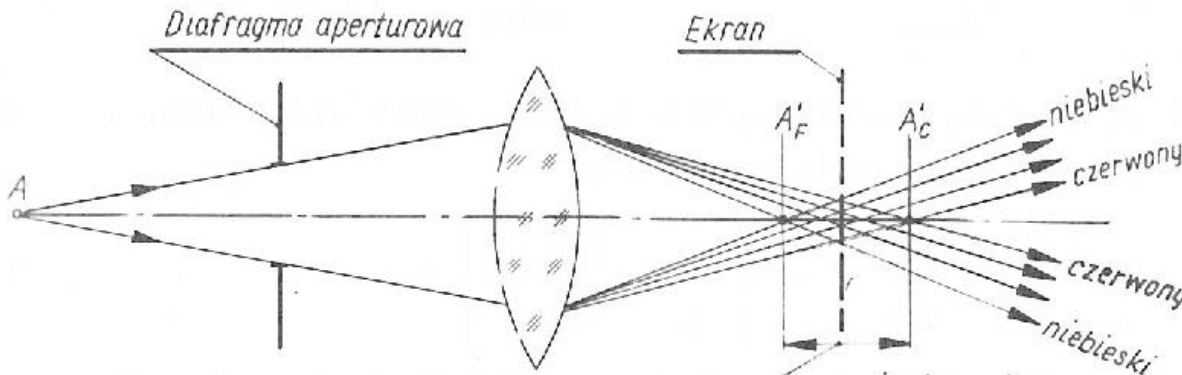
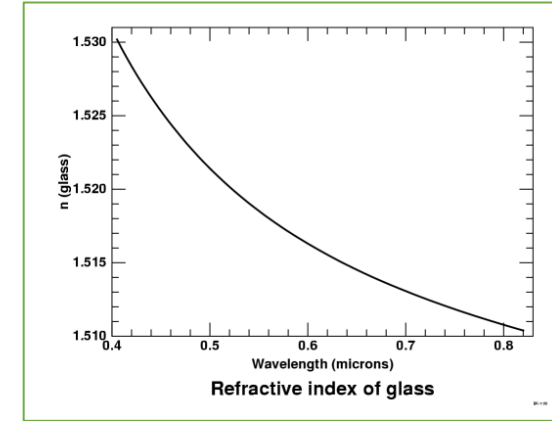
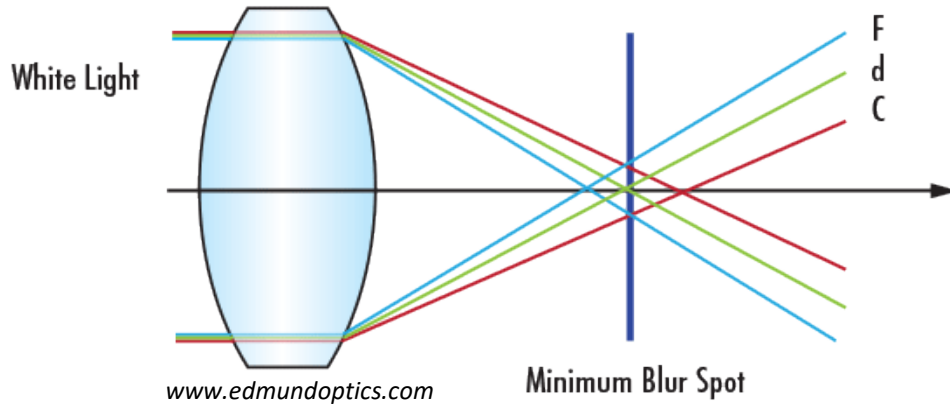
- chromatyzm położenia





# Aberracje chromatyczne

- chromatyzm położenia



aberracja podłużna =  $f_f - f_c$   
(aberracja położenia)

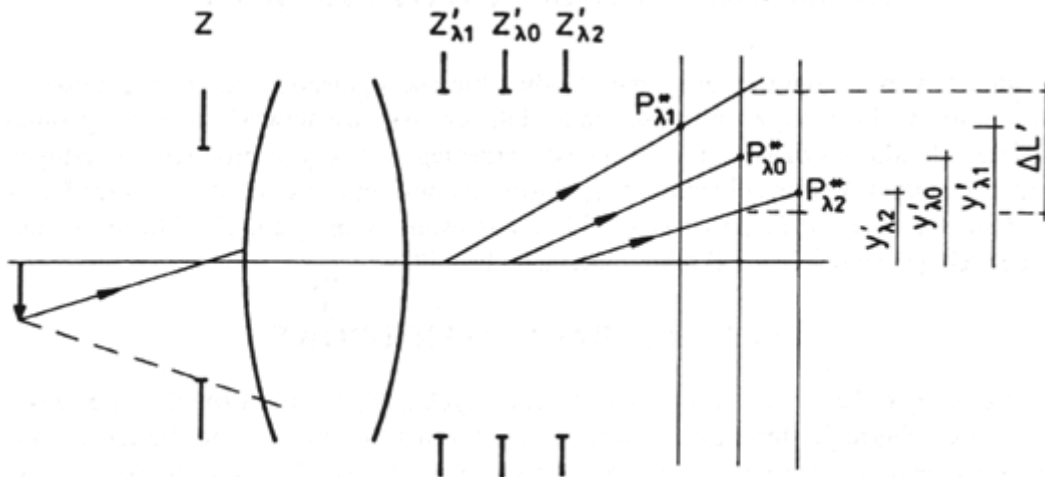
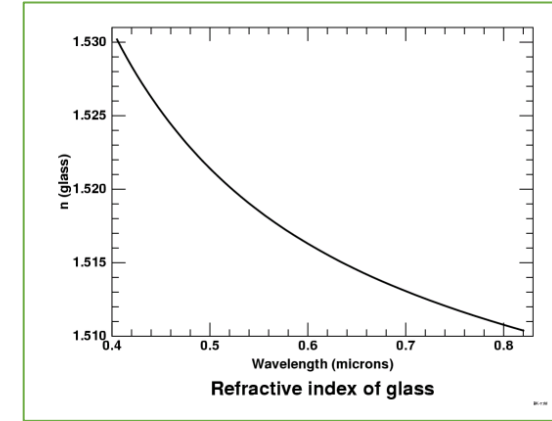
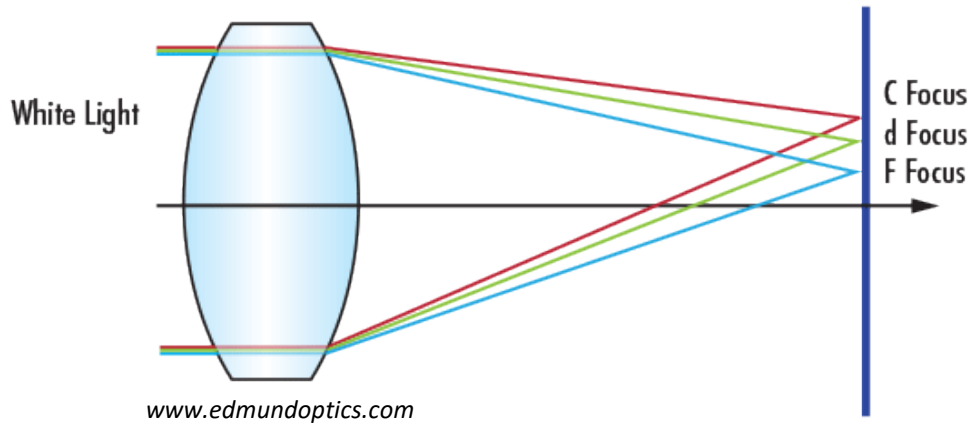
$$LCA = \frac{F}{v}$$

aberracja poprzeczna  
(minimalna średnica plamki)

$$b = 2 \frac{f_c - f_f}{f_c + f_f} h$$

# Aberracje chromatyczne

- chromatyzm powiększenia



$$\frac{\Delta y'}{y'} = \frac{y'_{\lambda_2} - y'_{\lambda_1}}{y'_{\lambda_0}}$$

$$\lambda_2 = \lambda_F (486,13 \text{ nm})$$

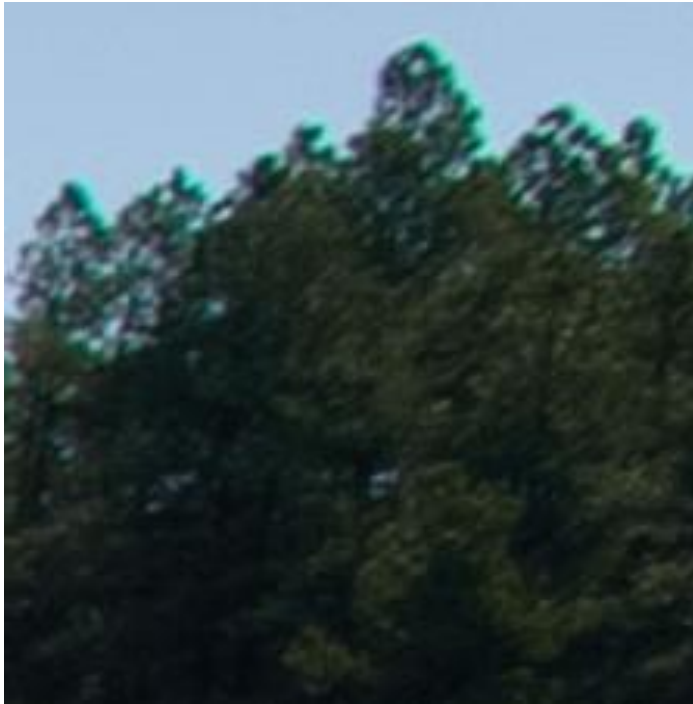
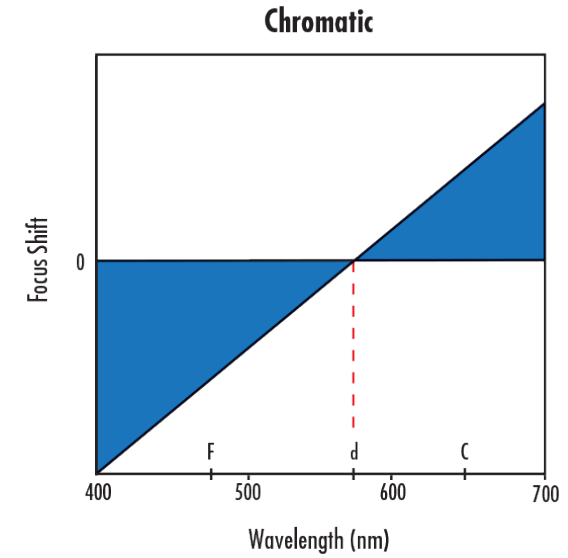
$$\lambda_1 = \lambda_C (656,27 \text{ nm})$$

$$\lambda_0 = \lambda_d (587,56 \text{ nm})$$

# Aberracje chromatyczne



[briankoberlein.com](http://briankoberlein.com)



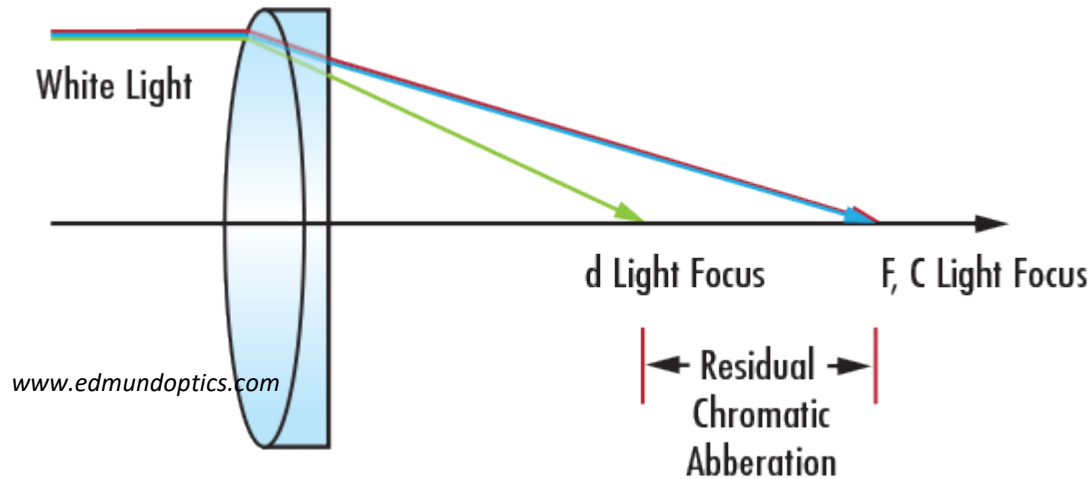
[www.edmundoptics.com](http://www.edmundoptics.com)

[www.picturecode.com](http://www.picturecode.com)

# Aberracje chromatyczne

Pojedyncza soczewka jest obarczona aberracją chromatyczną

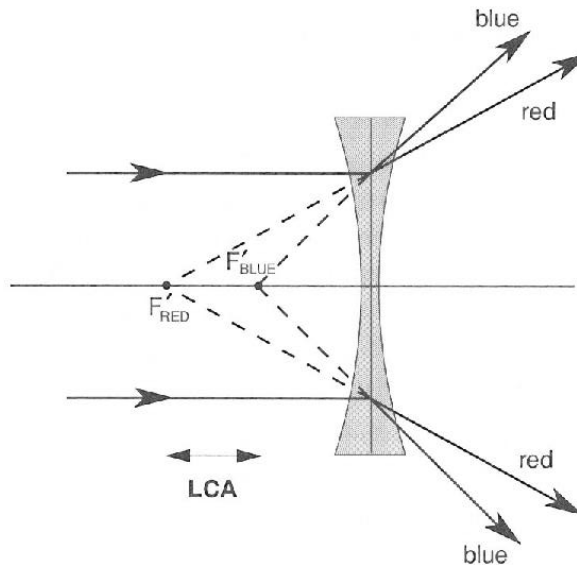
**Dublet achromatyczny** – korekcja aberracji chromatycznej



$$\frac{F_1}{v_1} + \frac{F_2}{v_2} = 0$$

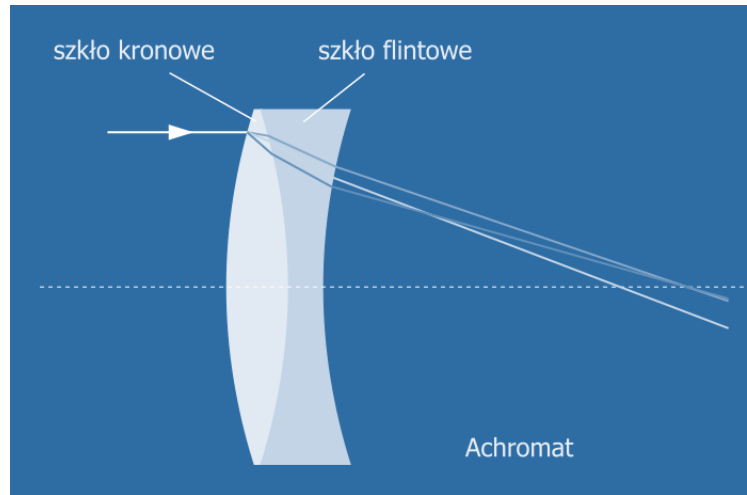
$F$  – moc optyczna  
 $v$  – dyspersja

$$F_2 = -\frac{v_2}{v_1} F_1$$



# Aberracje chromatyczne

**Dublet achromatyczny** – korekcja aberracji chromatycznej

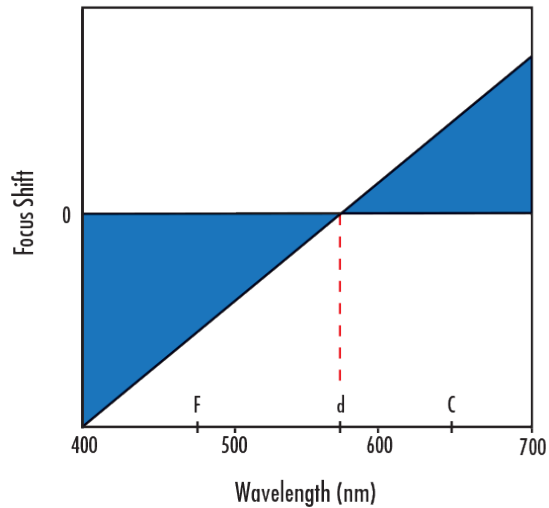


Szkło kronowe (crown) – szkło optyczne o dużej zawartości tlenku potasu ( $K_2O$ ), charakteryzujące się dużą przejrzystością. Ma niski współczynnik załamania światła (1,45–1,6) i niską dyspersję (liczba Abbego ok. 60).

Flint – szkło optyczne o wysokiej zdolności rozszczepiania światła. Ma współczynnik załamania światła w granicach 1,55–1,9 i wysoką dyspersję (liczba Abbego 50–55).

# Aberracje chromatyczne

Chromatic

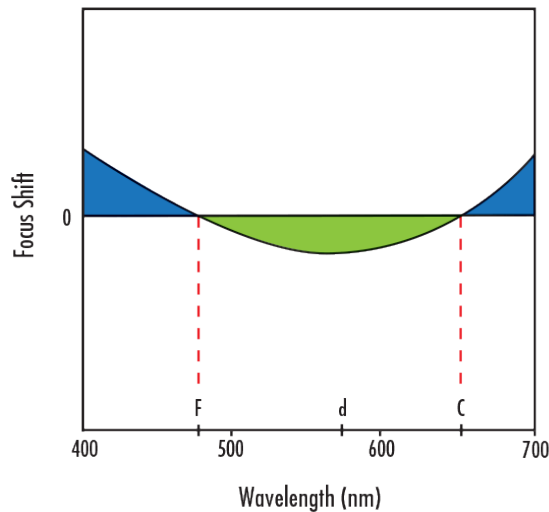


Układ optyczny korygujący aberrację chromatyczną dla dwóch długości fali – **achromat**, dla trzech – **apochromat**, dla czterech – **superachromat**.

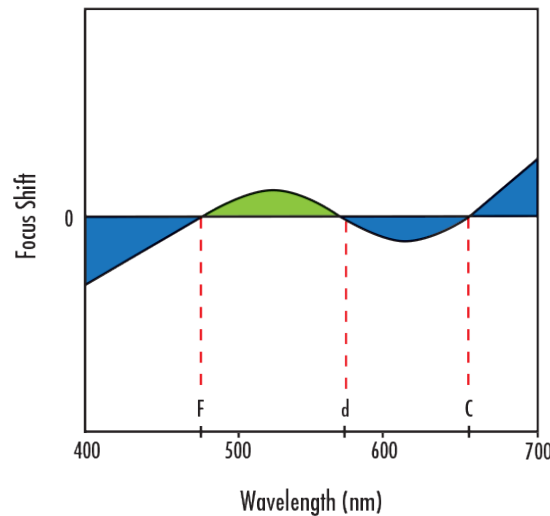
Obie soczewki muszą być wykonane z różnych materiałów i mieć różnoimienne moce optyczne.

Zwykle dąży się do tego, aby różnica współczynników dyspersji była duża, gdyż wtedy wystarczą mniejsze moce soczewek.

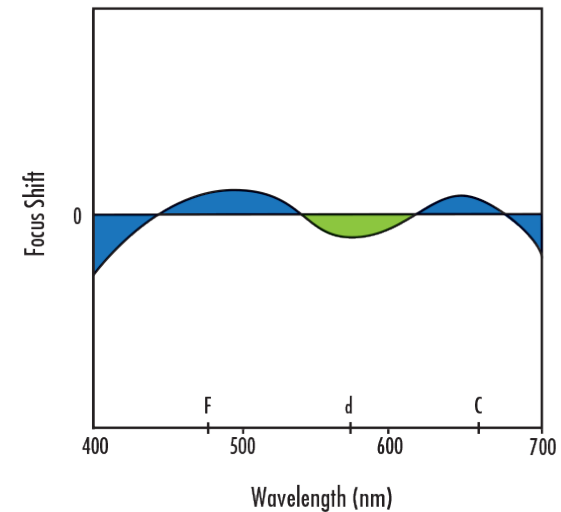
Achromatic



Apochromat



Superachromat



# Aberracje chromatyczne

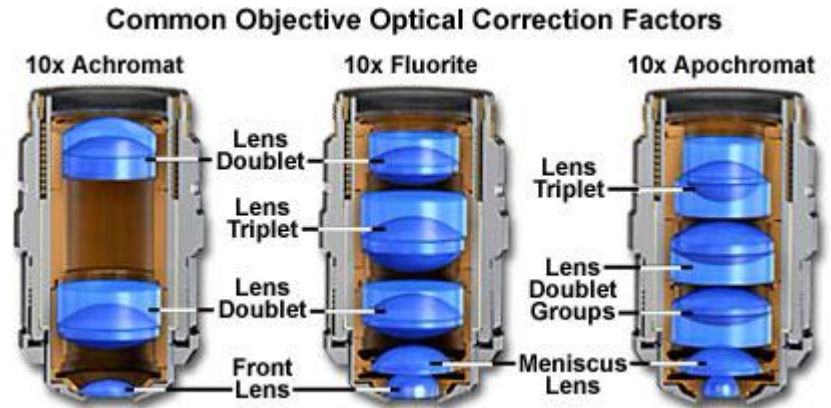
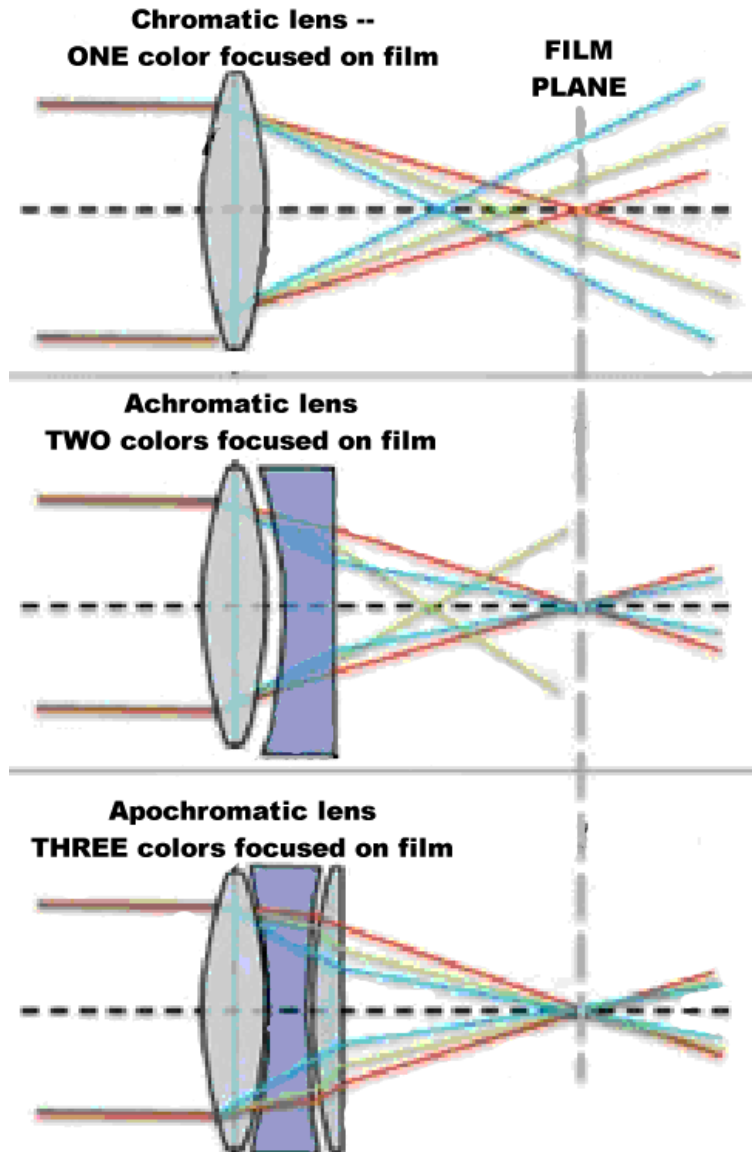
Skorygowanie chromatyzmu dla pewnej liczby długości fal nie gwarantuje korekcji dla pozostałej części widma. Powstaje tzw. *chromatyzm wtórny*.



Achromat

Apochromat

# Aberracje chromatyczne



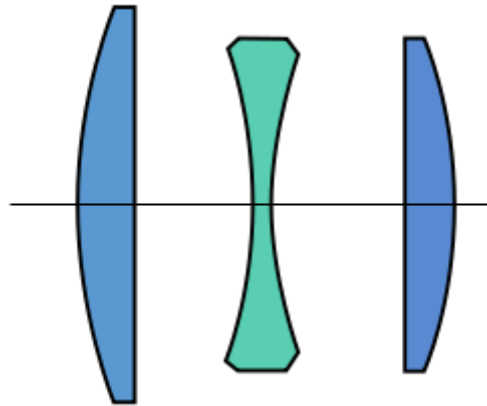
[www.olympus-lifescience.com](http://www.olympus-lifescience.com)



# Aberracje chromatyczne

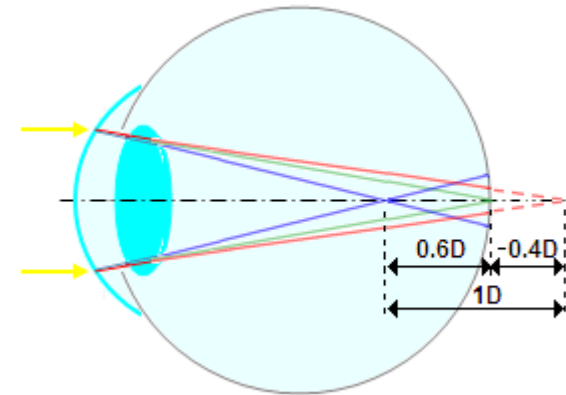
## Tryplet Cooke'a

- Obiektyw zaprojektowany i opatentowany w roku 1893 przez Dennisa Taylora zatrudnionego przez Cooke of York (stąd nazwa).
- Pierwszy obiektyw eliminujący w znacznym stopniu większość aberracji.
- Składa się z rozpraszającej soczewki ze szkła flintowego i dwóch soczewek skupiających ze szkła kronowego.



# Aberracje oka

- Aberracja sferyczna – istotna i różna w różnych przypadkach.
- Astygmatyzm – istotny i różny w różnych przypadkach.
- Koma – zanedbywalna.
- Chromatyzm – istotny.
- Aberracje wyższych rzędów – istotne w szczególnych warunkach obserwacji.
- Dystorsja – zanedbywalna.
  
- Mózg ludzki jest w stanie zaadaptować się do wielu aberracji, korygując obraz.

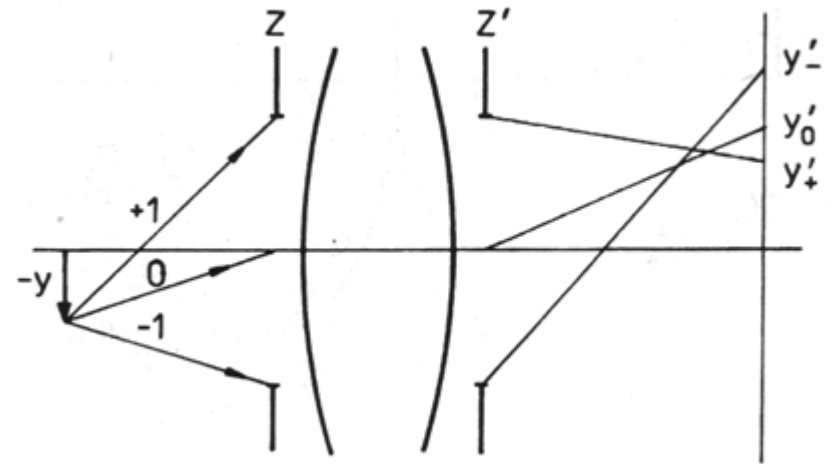


# Aberracje a przysłony

- **Aberracje aperturowe** – przedmiot znajduje się na osi optycznej:
  - aberracja sferyczna,
  - chromatyzm położenia,
- Wielkość aberracji zależy od wielkości przysłony aperturowej.

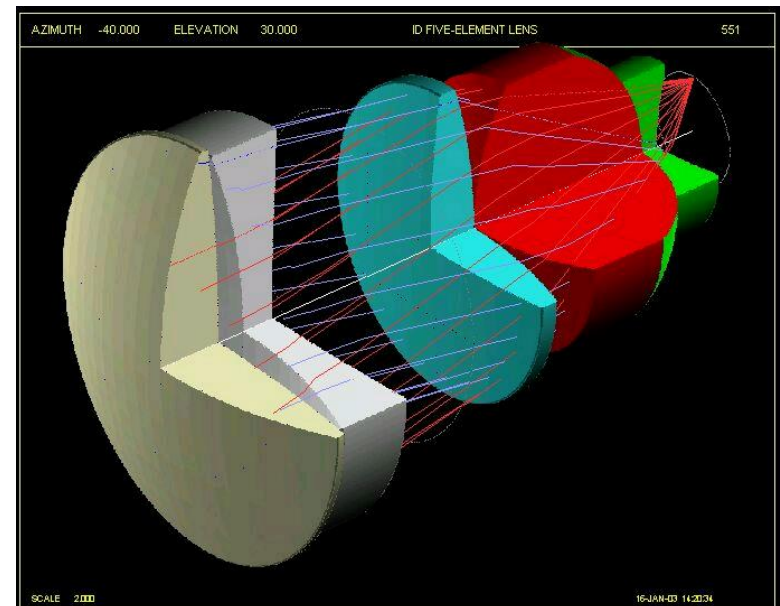
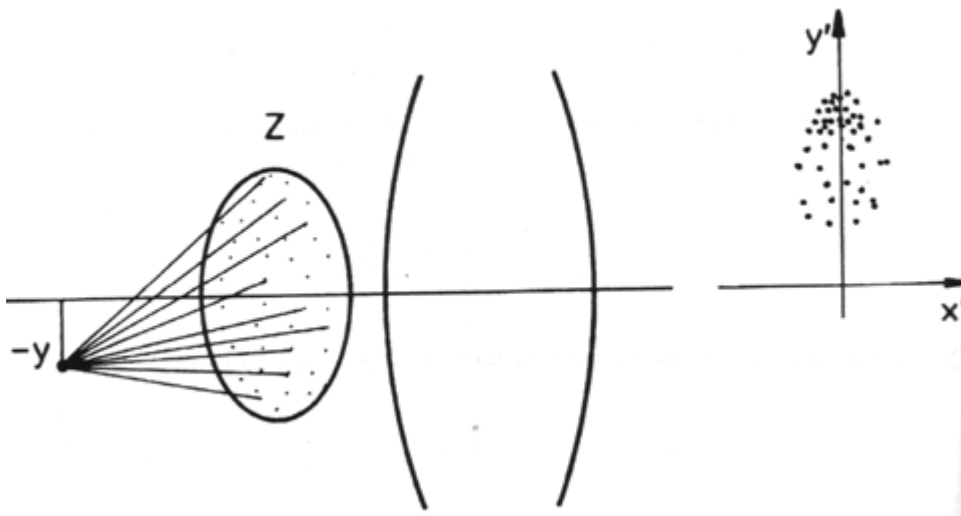
# Aberracje a przestony

- **Aberracje polowe** – przedmiot leży poza osią optyczną układu:
  - koma,
  - krzywizna pola i astygmatyzm,
  - dystorsja,
  - **chromatyzm powiększenia**
- Wielkość aberracji zależy od odległości punktu przedmiotowego od osi ( $y$ ), czyli od kąta polowego.



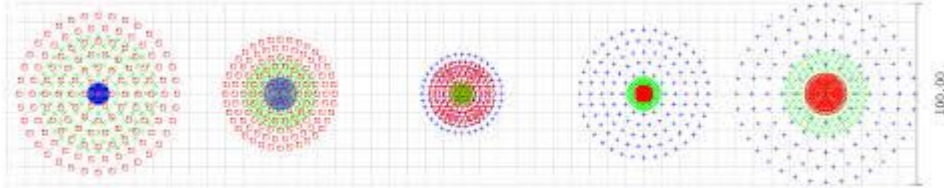
# Aberracje - diagram śladowy

- Równomiernie rozłożony w kącie bryłowym pęk promieni wychodzący ze źródła punktowego prowadzony jest przez układ i „uderza” w ekran.
- Kształt plamki i rozkład punktów przebicia tych promieni określają rozkład energii w plamce aberracyjnej.

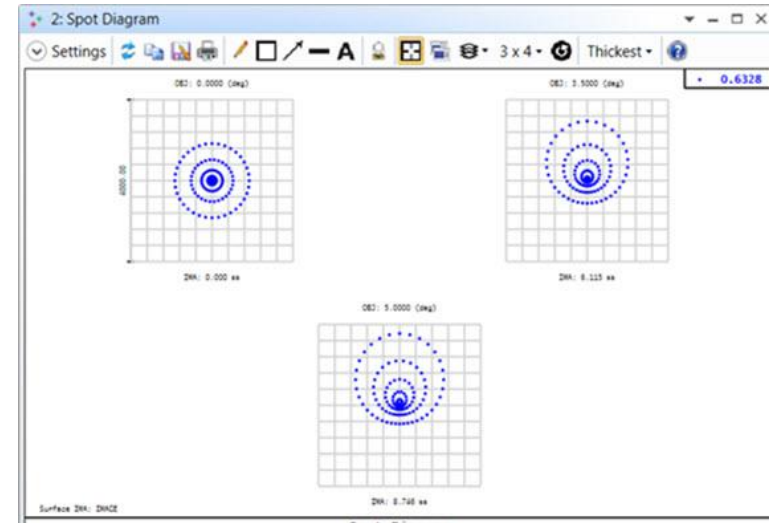


# Aberracje - diagram śladowy

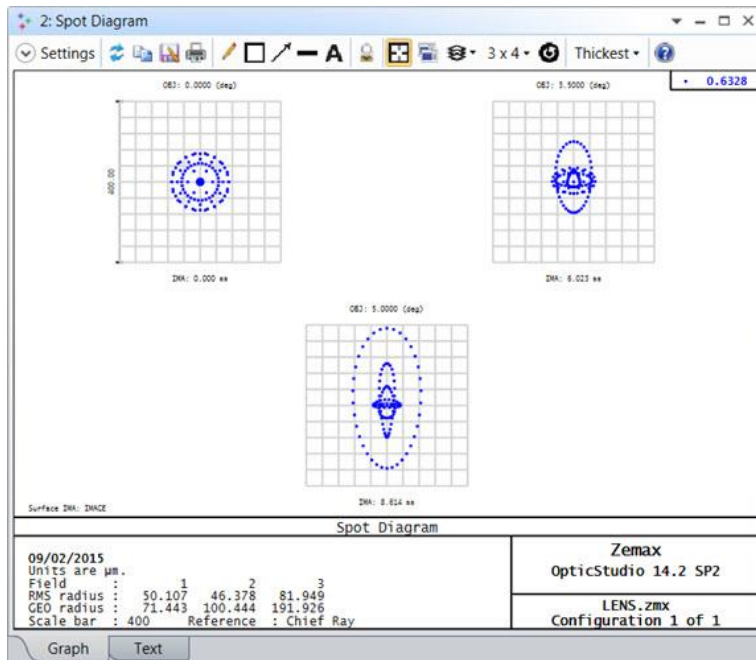
## Aberracja chromatyczna



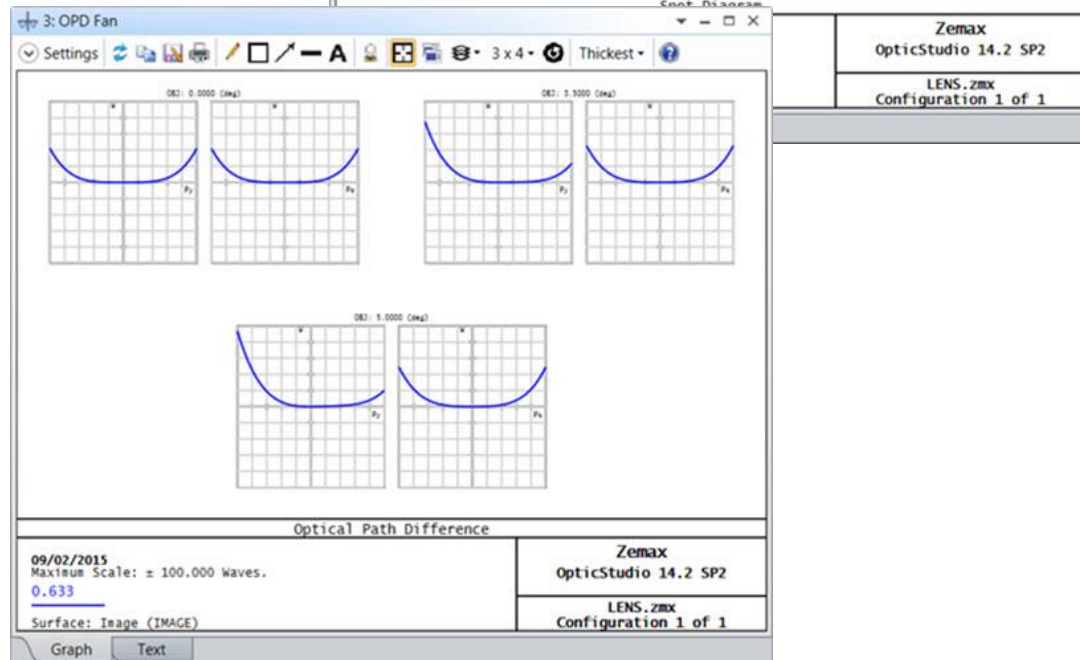
## Coma



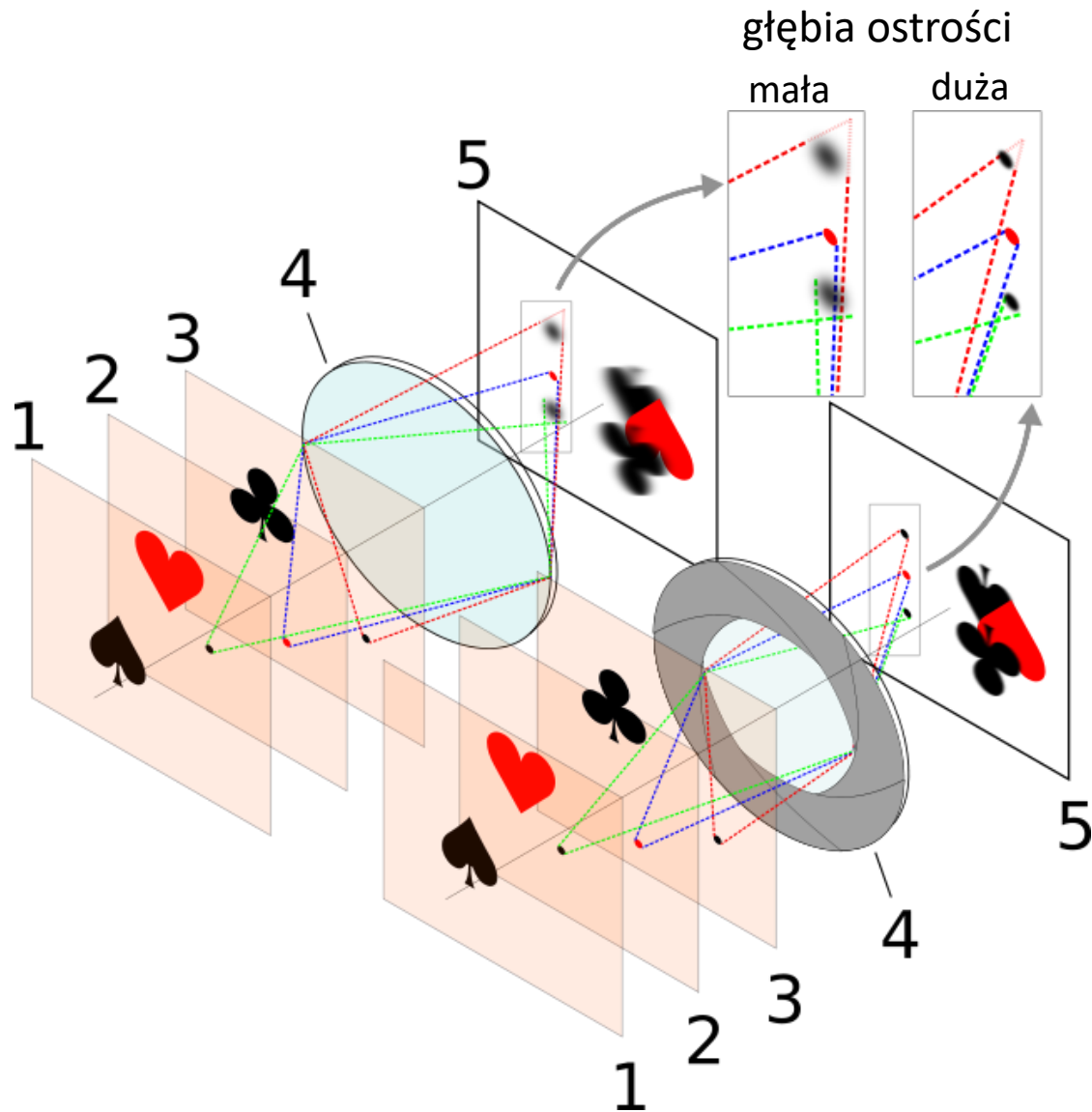
## Astygmatyzm



## Krzywizna pola



# Głębina ostrości

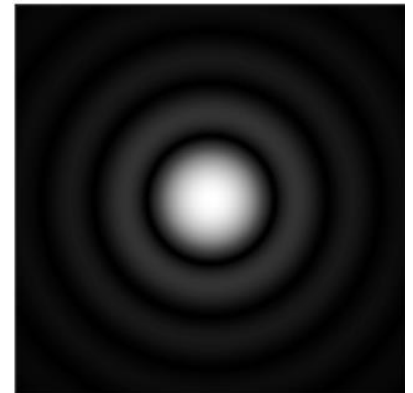


# Głębina ostrości

- im mniejsza przysłona, tym większa głębina ostrości
- im odległość ustawienia ostrości obiektywu mniejsza, tym mniejsza głębina ostrości
- im krótsza ogniskowa tym większa głębina ostrości
- w fotografii: odległość hiperfokalna  $H$  – odległość od aparatu gdzie dla danej przysłony ostre są wszystkie obiekty począwszy od tej odległości aż do nieskończoności)

$$H \cong \frac{f^2}{Nc}$$

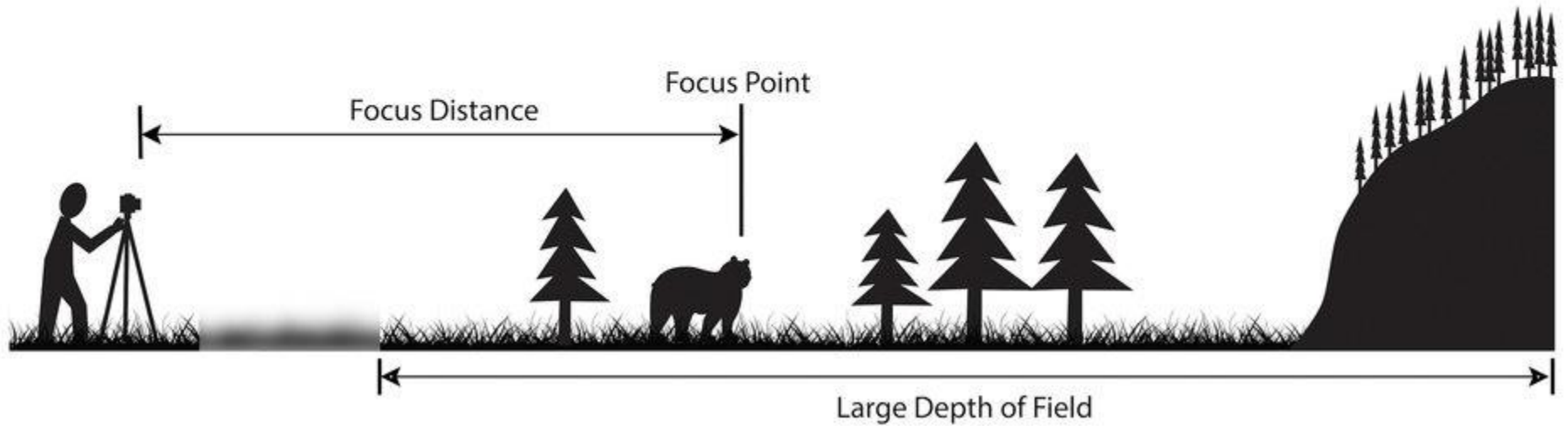
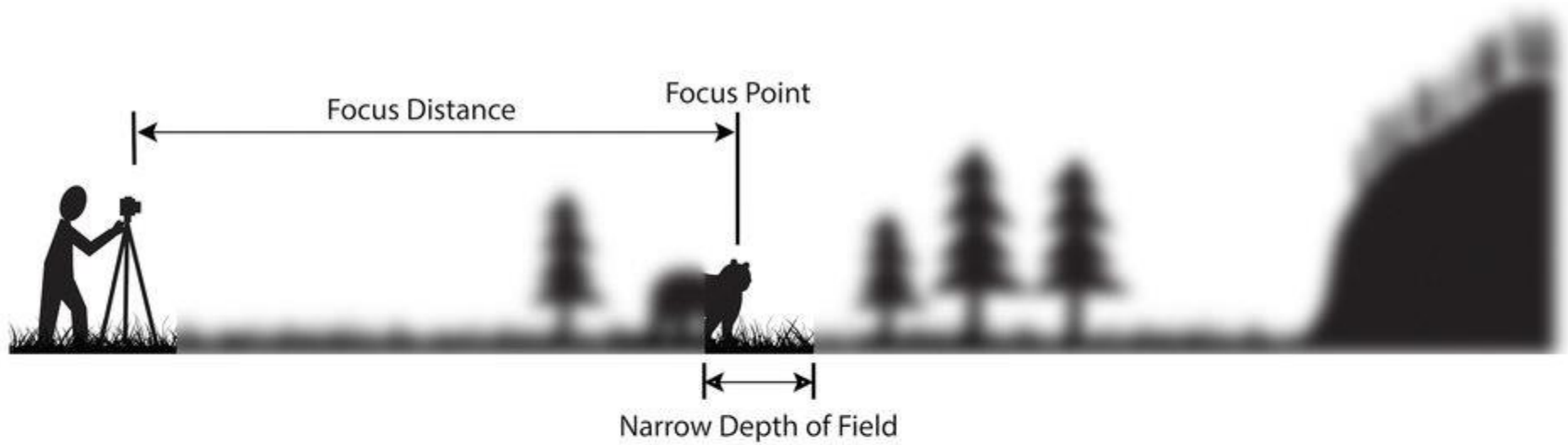
$N$  – liczba przysłony,  $c$  – krążek rozmycia (Airy)



*photographylife.com*



# Głębia ostrości



# Głębia ostrości

[pl.pinterest.com/pin/816347869928675932/](https://pl.pinterest.com/pin/816347869928675932/)



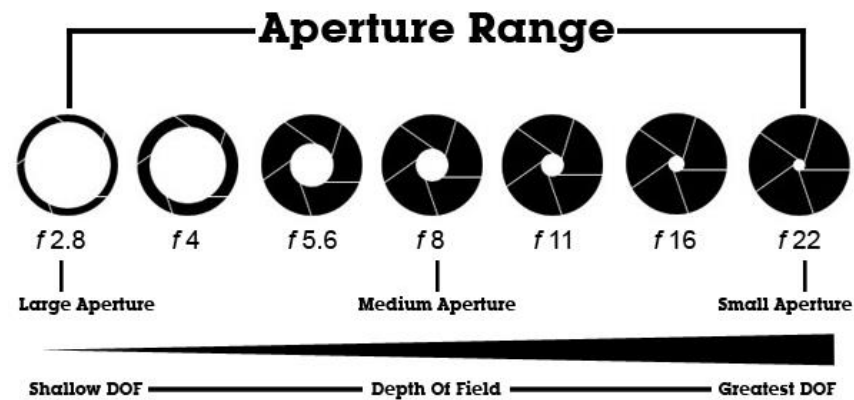
f/1.8



f/4.5



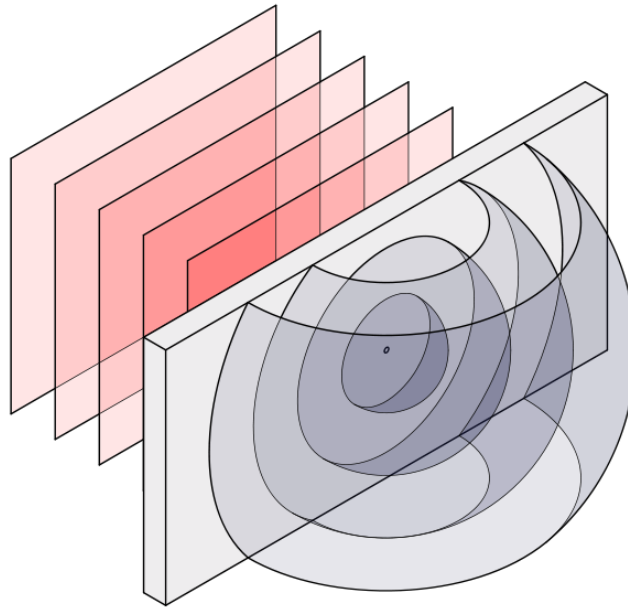
f/22



[photography.tutsplus.com](http://photography.tutsplus.com)

## Zasada Huygensa

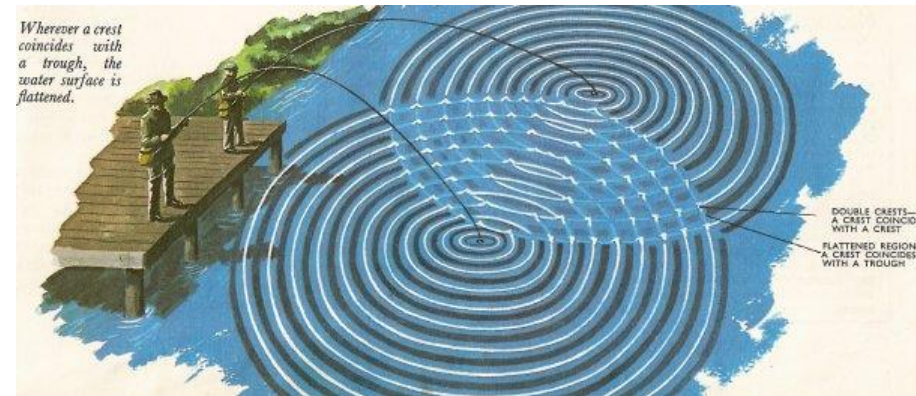
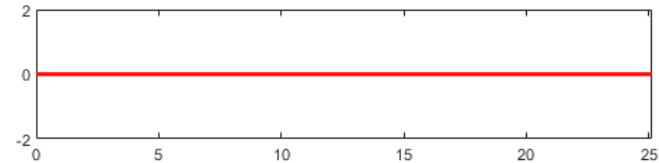
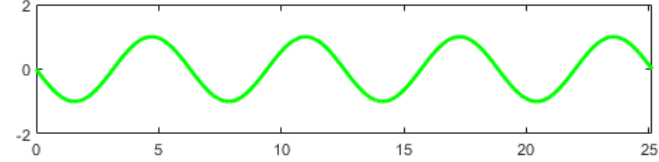
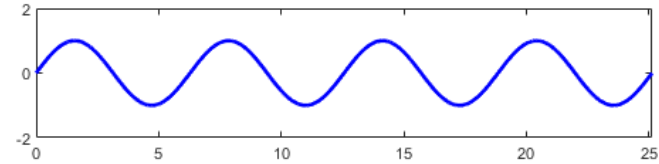
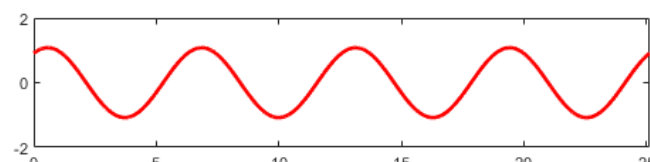
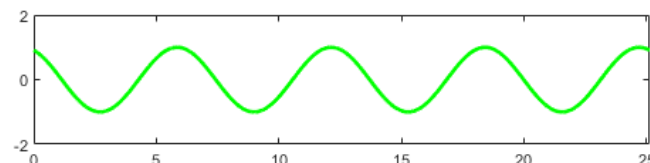
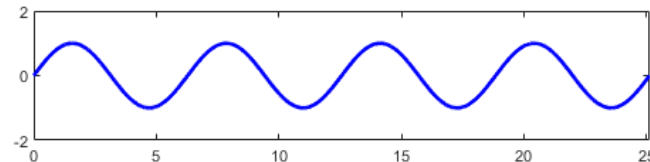
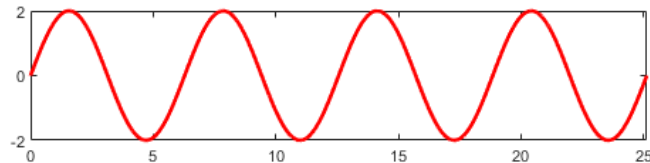
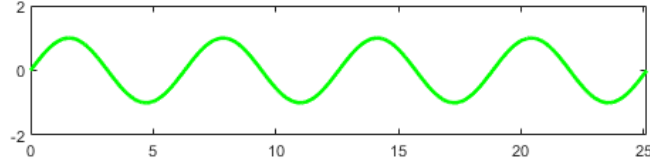
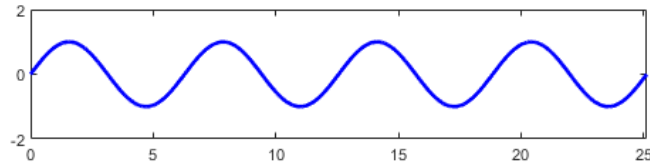
każdy punkt do którego dotrze fala staje się nowym źródłem fali kulistej. Fale te nakładają się zgodnie z zasadą superpozycji. W efekcie pojawiają się obszary wzmocnienia i osłabienia rozchodzących się fal (interferencja konstruktywna lub destruktywna).



# Optyka falowa - interferencja

**Interferencja:** nakładanie się fal prowadzące do zwiększania lub zmniejszania amplitudy fali wypadkowej.

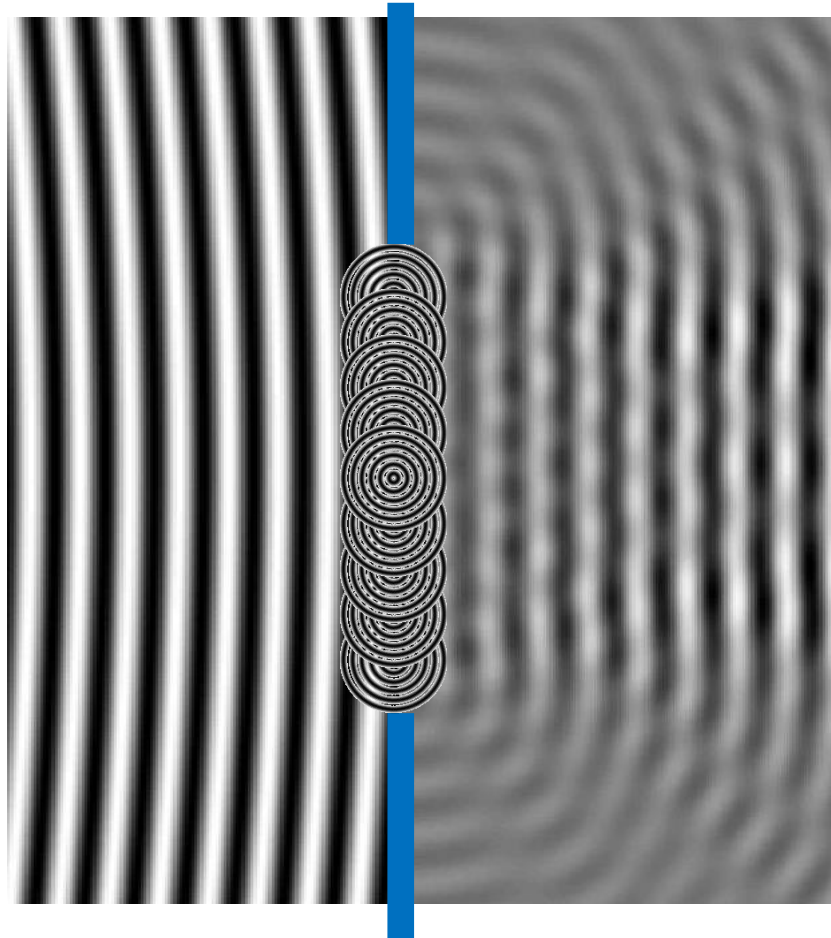
$$y(P) = A_1 \sin(\omega_1 t + \phi_1) + A_2 \sin(\omega_2 t + \phi_2)$$



# Optyka falowa - interferencja

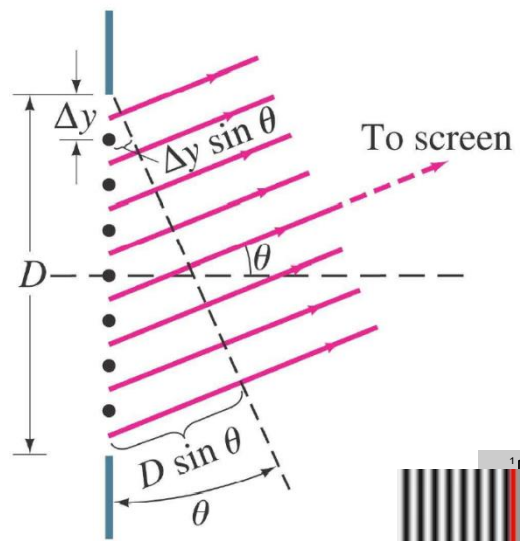
## Pojedyncza szczelina

Propagację fali elektromagnetycznej za przeszkodą możemy sobie wyobrazić za Huygensem jako falę pochodzącą ze zbioru punktowych źródeł światła umieszczonych w płaszczyźnie przesłony.



# Optyka falowa - interferencja

## Pojedyncza szczelina

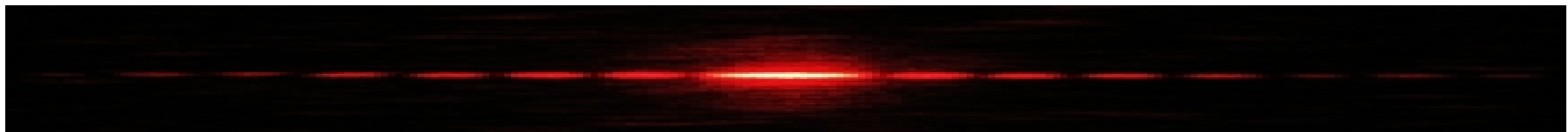
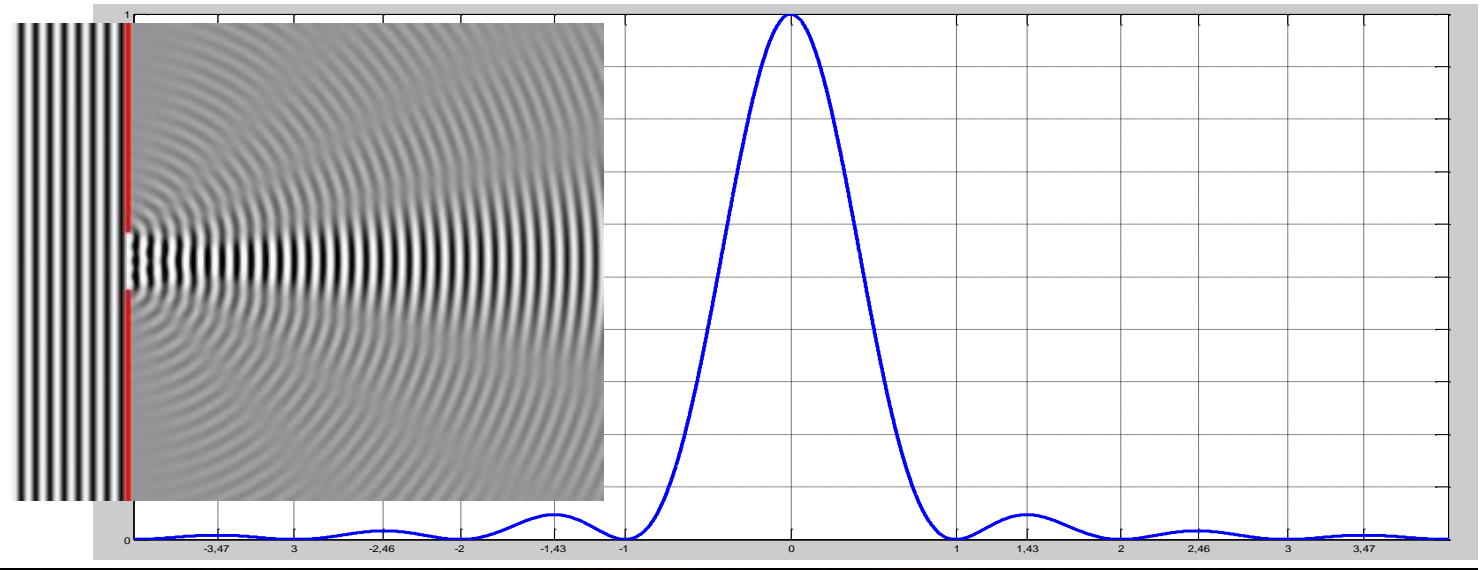


$$I = I_0 \left( \frac{\sin(\beta/2)}{\beta/2} \right)^2$$

Warunki na występowanie minimum:

$$\frac{\pi D \sin \theta}{\lambda} = m\pi$$

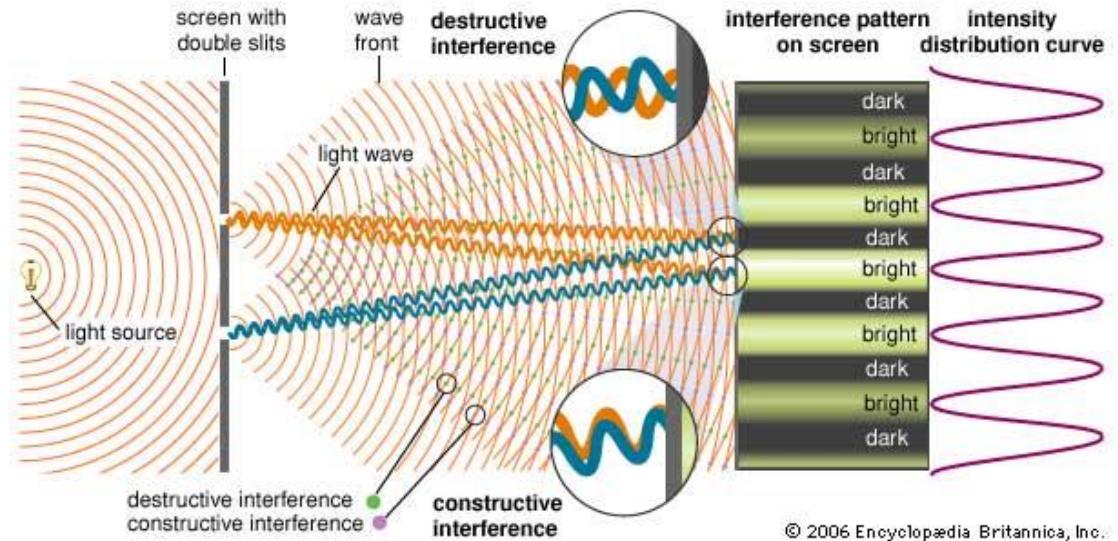
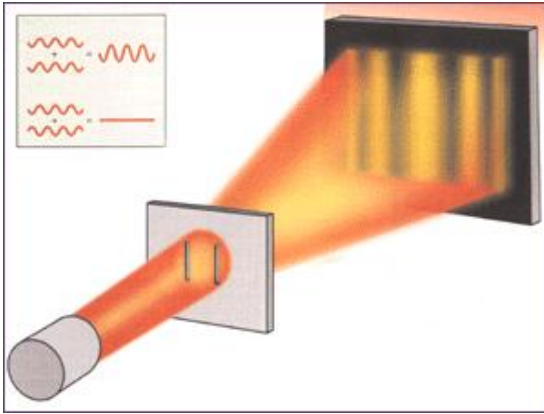
$$m = \pm 1, \pm 2, \pm 3, \dots$$



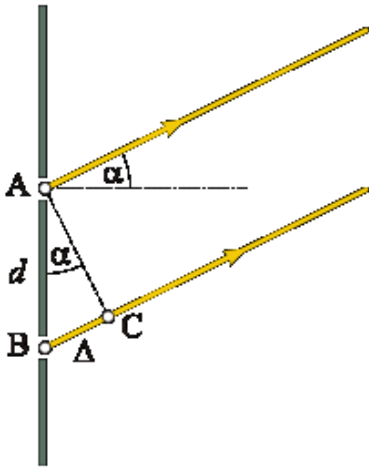
# Optyka falowa - dyfrakcja

## Doświadczenie Younga – 2 szczeliny

Dyfrakcja – ugięcie na przeszkodzie



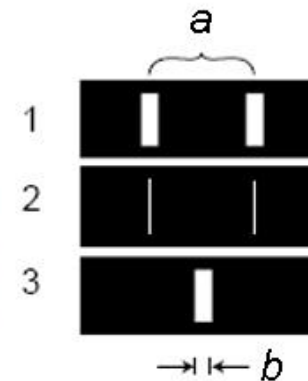
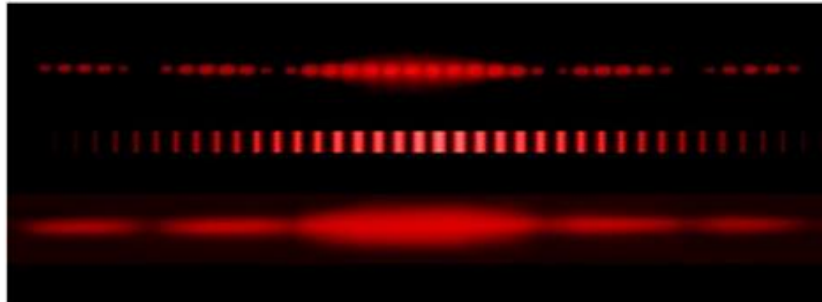
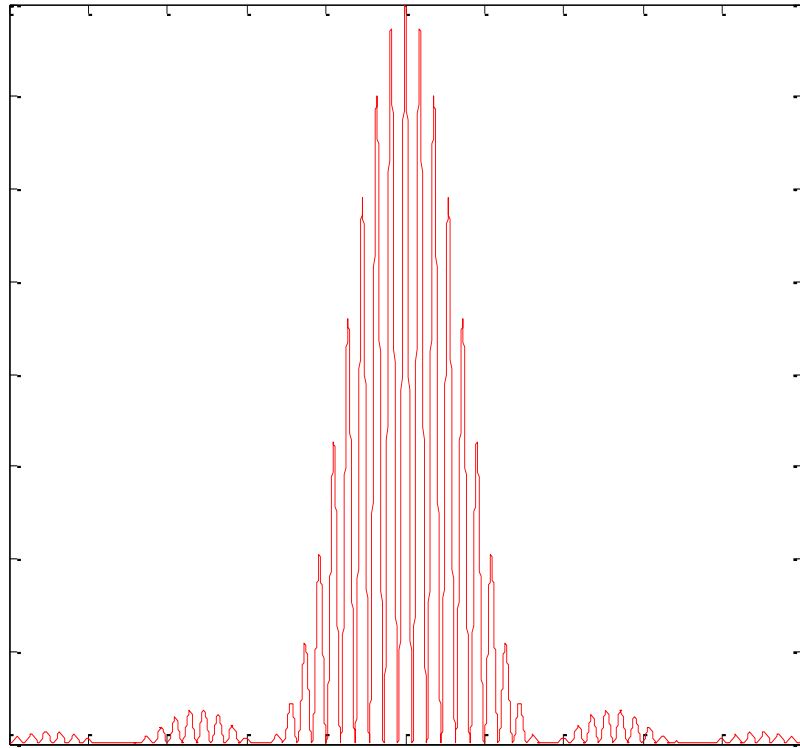
© 2006 Encyclopædia Britannica, Inc.



maksimum: 
$$d \sin \alpha_k = k\lambda \quad k \in \mathbb{Z}, k \in \left(-\frac{d}{\lambda}, \frac{d}{\lambda}\right)$$

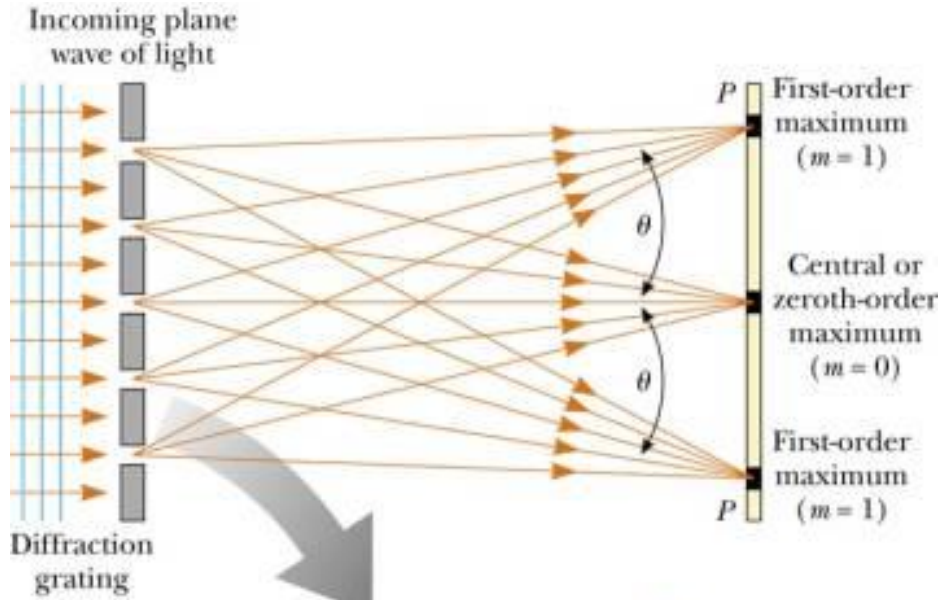
minimum: 
$$d \sin \alpha_k = \left(\frac{2k+1}{2}\right)\lambda \quad k \in \mathbb{Z}, k \in \left(-\frac{2d-\lambda}{2\lambda}, \frac{2d-\lambda}{2\lambda}\right)$$

## Doświadczenie Younga – 2 szczeliny





# Optyka falowa – siatka dyfrakcyjna



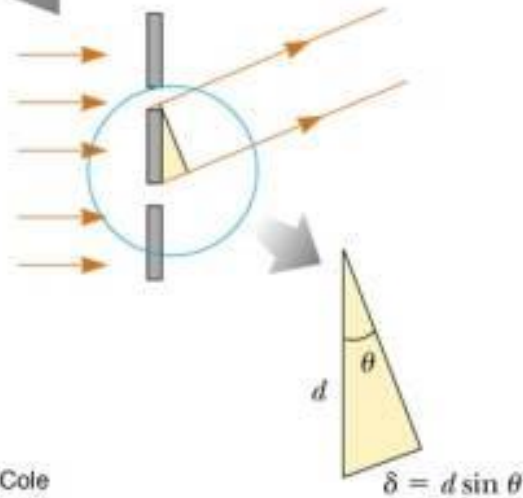
Wzór siatki dyfrakcyjnej:

$$d \sin(\theta_k) = k \lambda$$

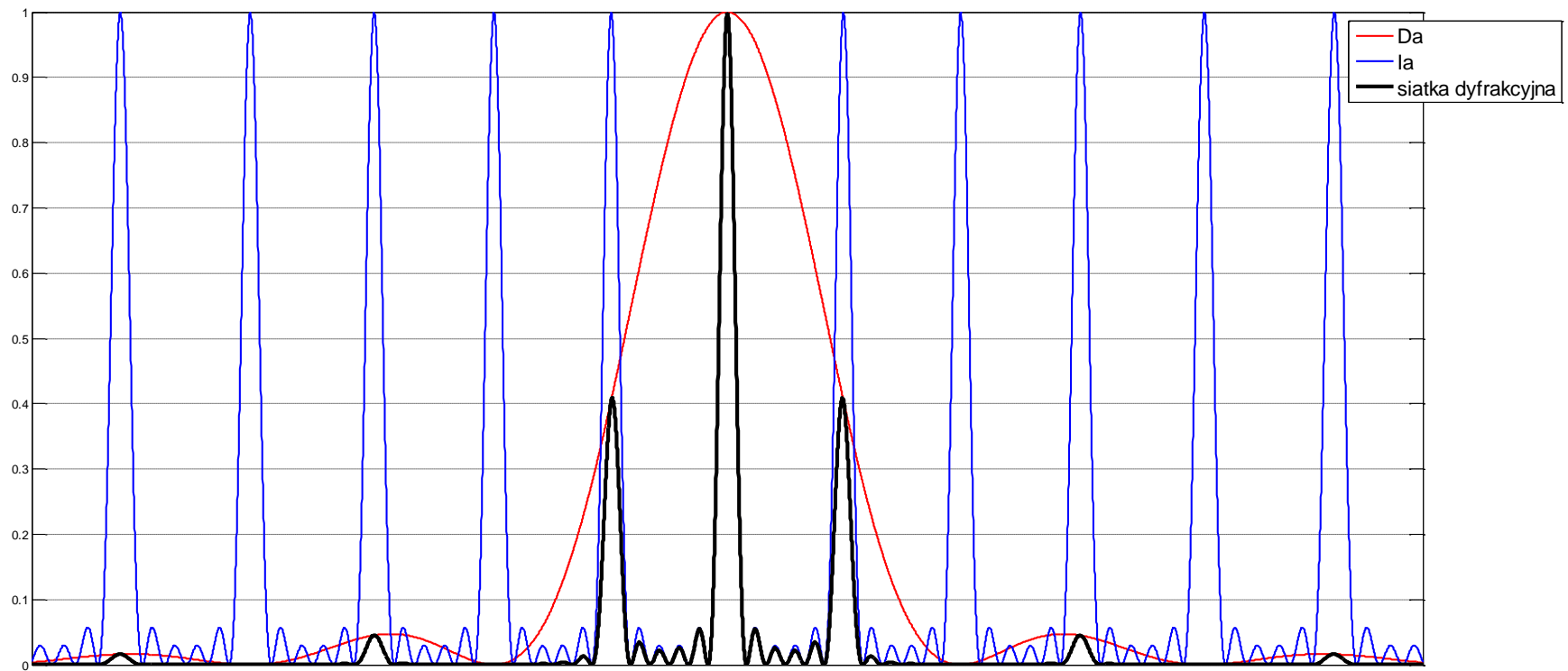
$$k = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$$

$d$  – stała siatki

$k$  – rząd ugięcia, numer wzmocnienia



# Optyka falowa – siatka dyfrakcyjna



# Optyka falowa – siatka dyfrakcyjna

Przykładowa siatka – płyta CD

Odległość między ścieżkami:  $d = 1,6 \mu\text{m}$

Liczba linii na mm:  $N = 625$

Długość fali (laser He-Ne):  $\lambda = 632,8 \text{ nm}$



Rzędy ugięcia:

$$\theta_k = \arcsin\left(\frac{k\lambda}{d}\right)$$

Czyli:  $\theta_1 = 23,2972$

$\theta_2 = 52,2791$

$\theta_3 = \text{nie ma}$

Rozdzielczość siatki dyfrakcyjnej:

Określa możliwość rozdzielenia dwóch długości fali różniących się o  $\Delta\lambda$

Maksimum od jednej wypada w pierwszym minimum od drugiej (kryterium Rayleigha)

$$\frac{\lambda}{\Delta\lambda} = \frac{Nd |\sin \theta - \sin \theta_0|}{\lambda}$$

$$\Delta\lambda = 0,506 \text{ nm}$$

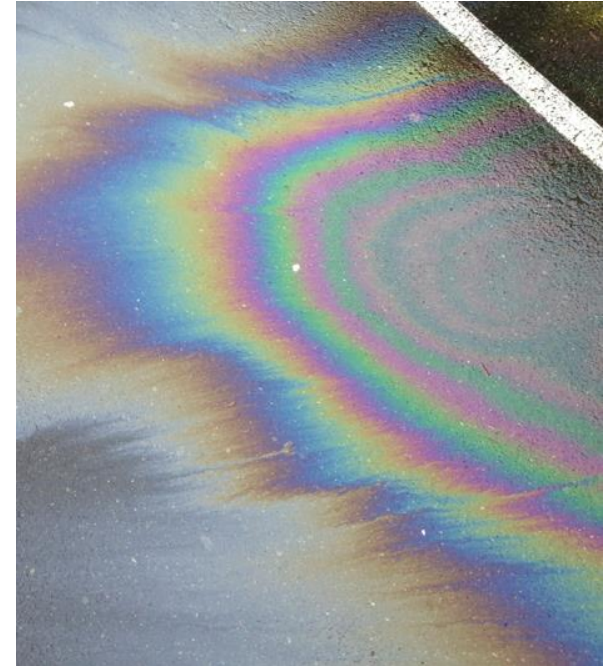
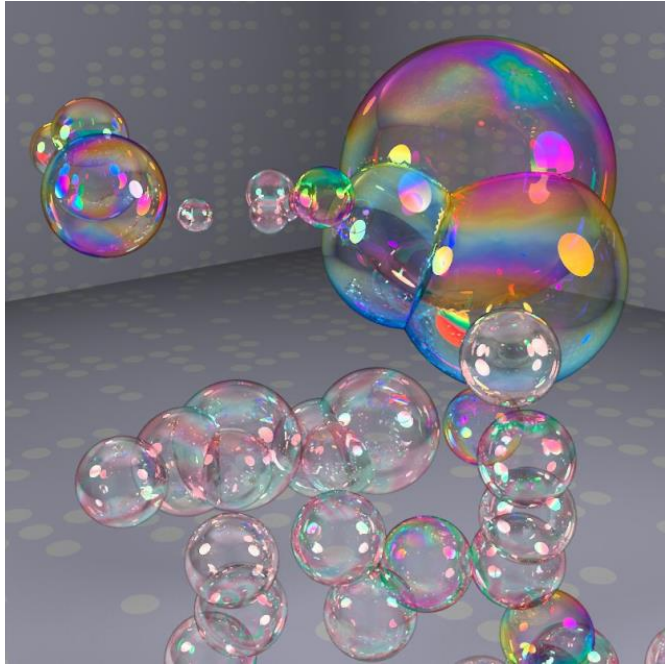
gdzie:

$\vartheta_0$  – kąt padania wiązki na siatkę

(2 rząd)

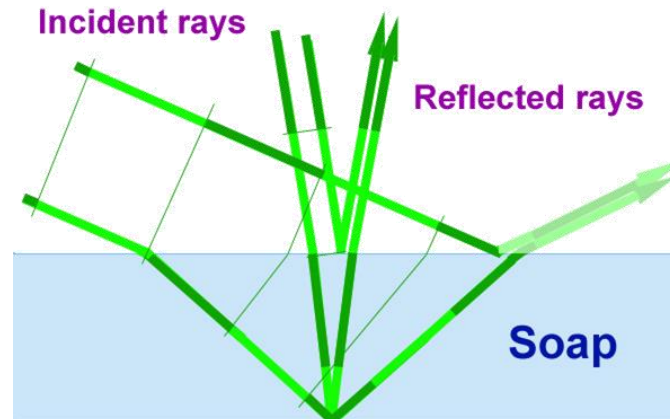


# Optyka falowa – cienkie warstwy



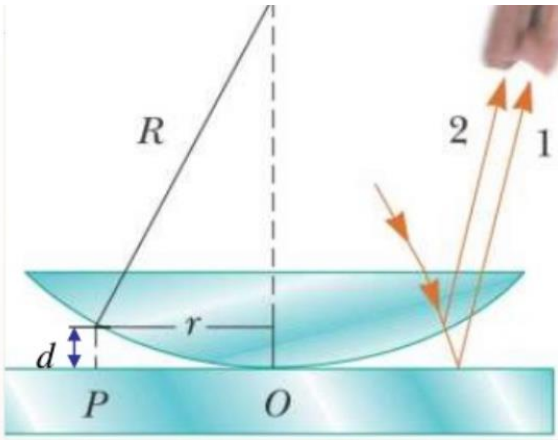
[climate.uvic.ca/climate-lab/front\\_page\\_pics/thin\\_film.html](http://climate.uvic.ca/climate-lab/front_page_pics/thin_film.html)

## Thin Film Interference



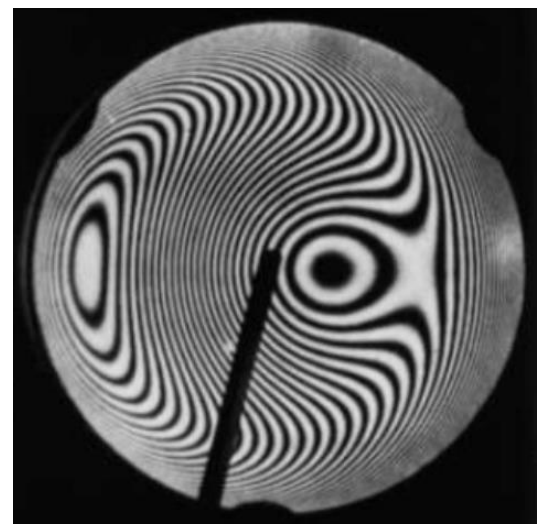
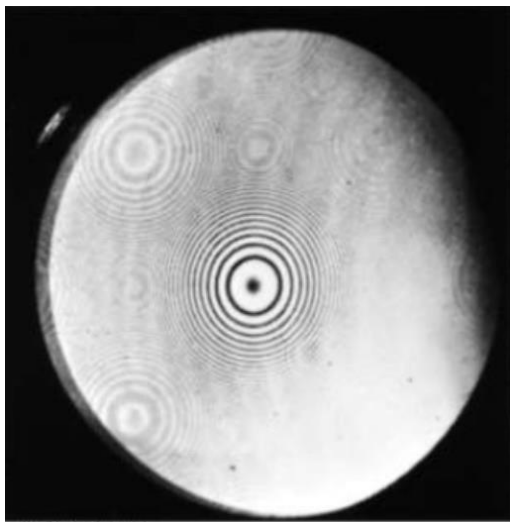
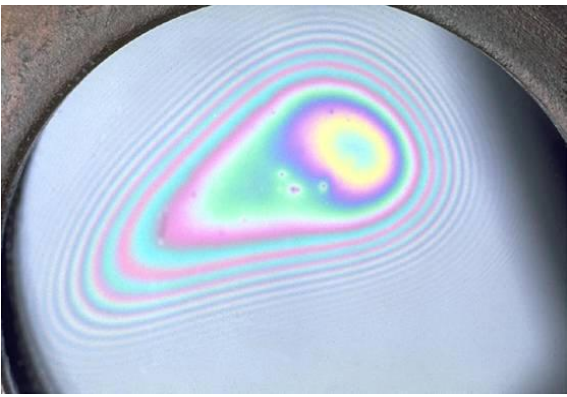
# Optyka falowa – pierścienie Newtona

- Pierścienie Newtona prążki interferencyjne w kształcie pierścieni, w świetle przechodzącym (lub odbitym) przez cienkie warstwy w pobliżu styku powierzchni wypukłej i płaskiej rozdzielonych substancją o innym niż stykające się współczynniku załamania.
- Dla światła białego powstają wielobarwne prążki, dla monochromatycznego – jasne i ciemne prążki.

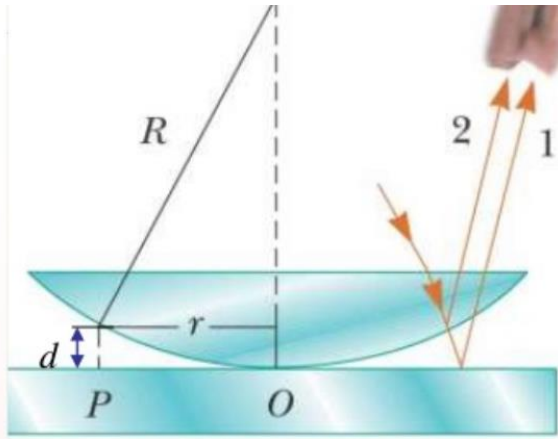


$$d = r^2/2R$$

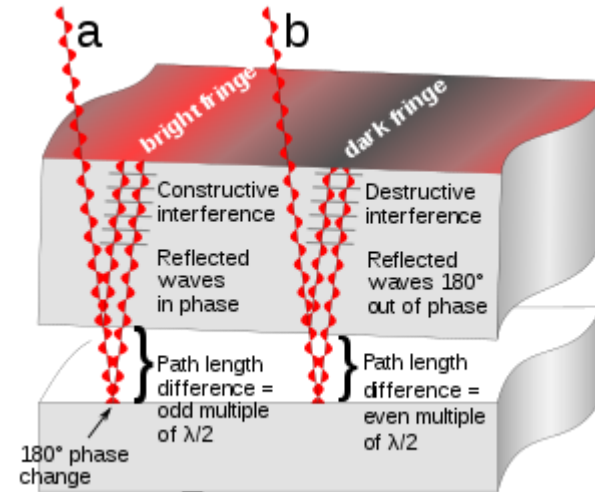
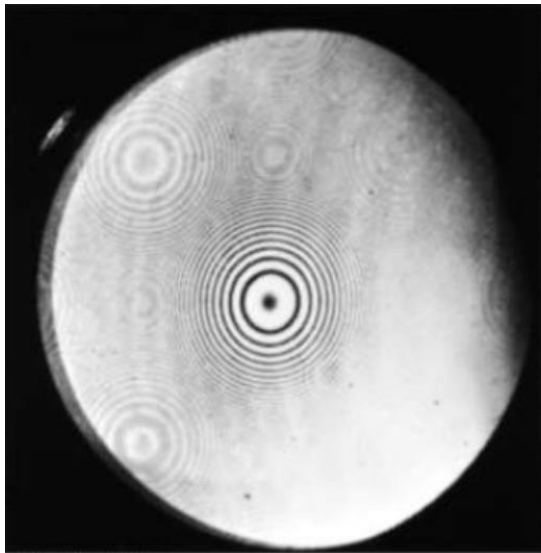
$$r = \sqrt{\frac{m\lambda R}{n}}$$



# Optyka falowa – pierścienie Newtona



- Światło przy odbiciu zmienia swoją fazę o  $\pi/2$  gdy odbija się od ośrodka o wyższym współczynniku załamania
- Przy odbiciu od ośrodka o niższym współczynniku załamania faza się nie zmienia
- Przy przejściu przez granicę między ośrodkami faza się nie zmienia



[en.wikipedia.org/wiki/Newton%27s\\_rings](https://en.wikipedia.org/wiki/Newton%27s_rings)