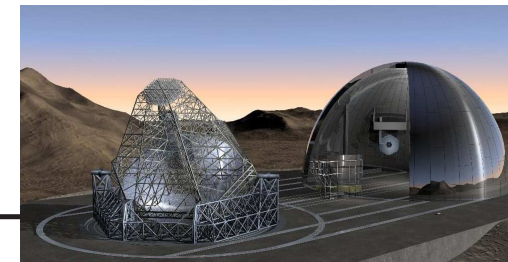


# Optika – základy

Miroslav Palatka

# Historický vývoj - velikost

## Maximalizace průměrů optiky



100 m

**Konec 20. století**  
 – limity monolitického zrcadla  
 – éra segmentovaných zrcadel

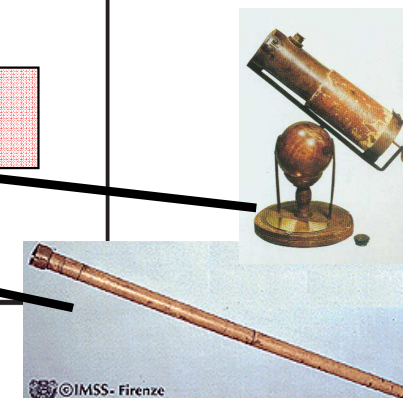
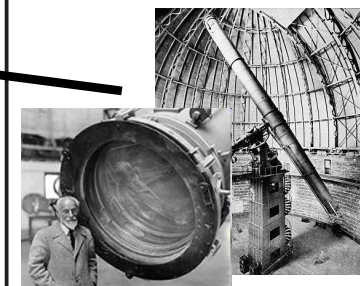
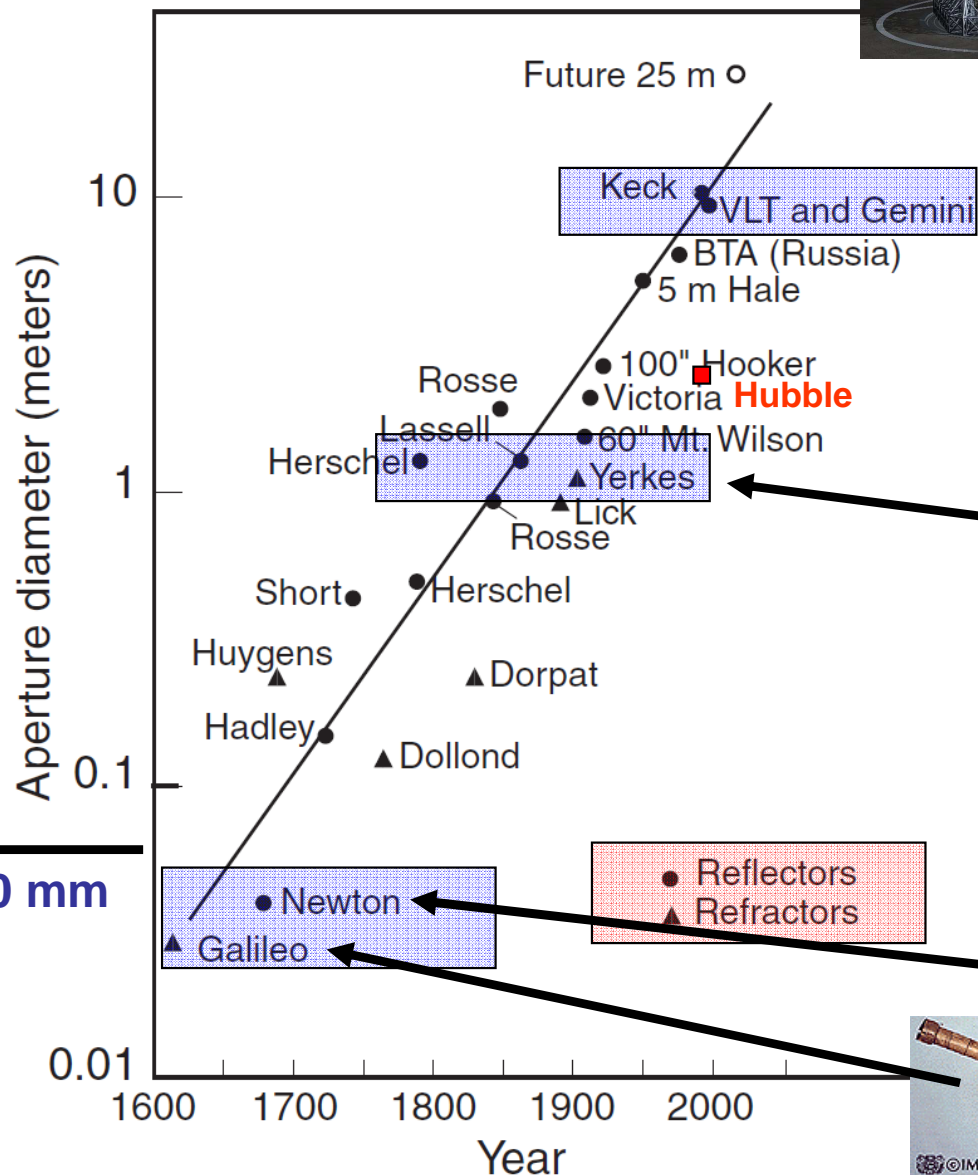
10 m

**Konec 19. století**  
 – dosažen limit u refraktorů

1 m

**16. a 17. století**  
 – omezující faktorem je kvalita dostupných skel

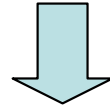
50 mm



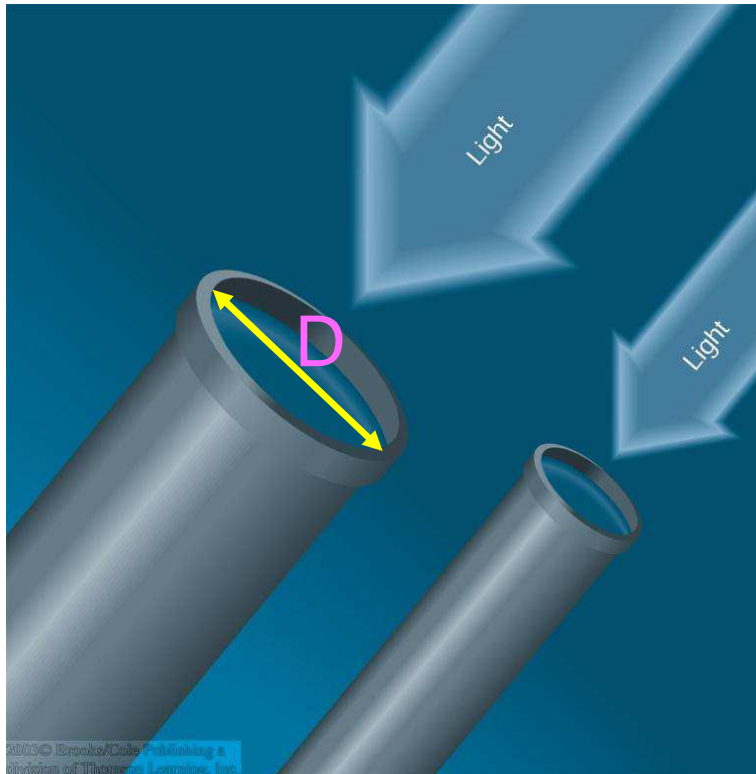
©IMSS- Firenze

# Historický vývoj - velikost

## Maximalizace průměrů optiky



## Zvýšení schopnosti detekce slabých objektů



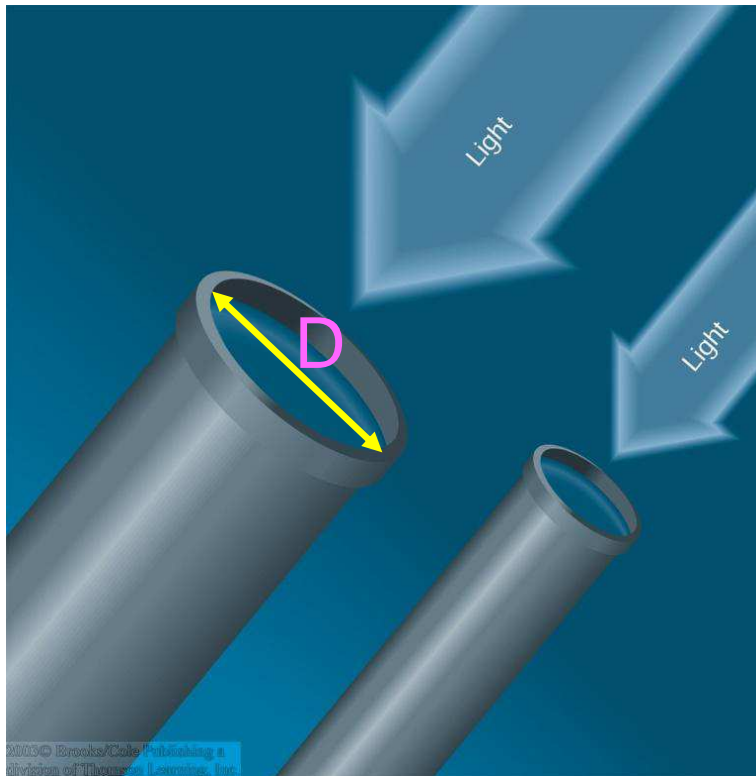
Andromeda

Zdvojnásobný  
průměr  
(stejná expozice)



# Světelný zisk

## Maximalizace průměrů optiky



$$LGA = \pi r^2 = \frac{\pi D^2}{4}$$

**Kolektivní plocha  
( Light gathering area )**

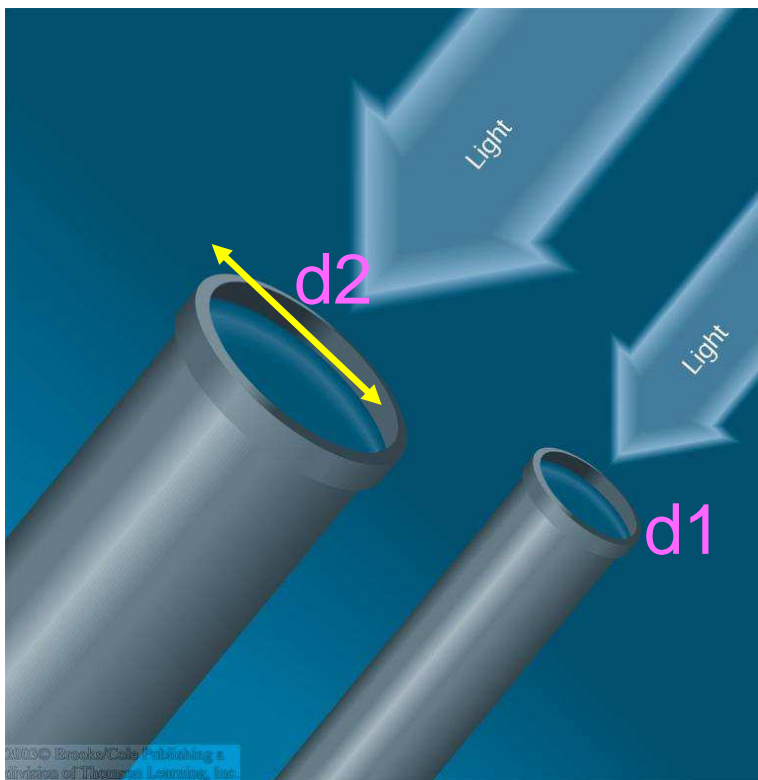
**Některá literatura :**

$$LGP = \pi r^2 = \frac{\pi D^2}{4}$$

**Light gathering power**



# Light gathering power – světelný zisk (schopnost teleskopu „posbírat“ světlo)



PGP (normováno na plochu oka)

oko	„amatérský“	Hubble	Keck
6 mm	200 mm	2.4 m	10m
1	cca 1000	160,000	cca 2,800,000

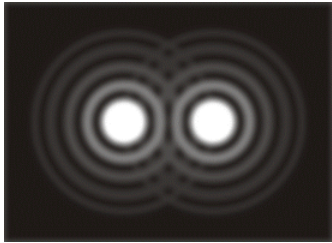
Maximalizace průměrů optiky



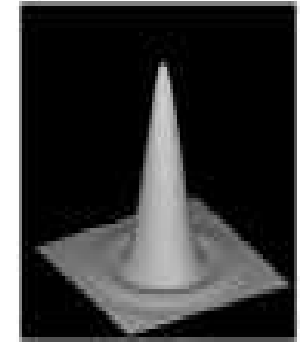
Light gathering power

$$LGP = \frac{LGA_2}{LGA_1} = \frac{d_2^2}{d_1^2}$$

dobré  
rozlišení



# Historický vývoj - velikost Maximalizace průměrů optiky



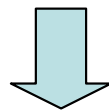
**Zvýšení úhlové rozlišovací schopnosti**

Předpoklad - teleskop bez aberací

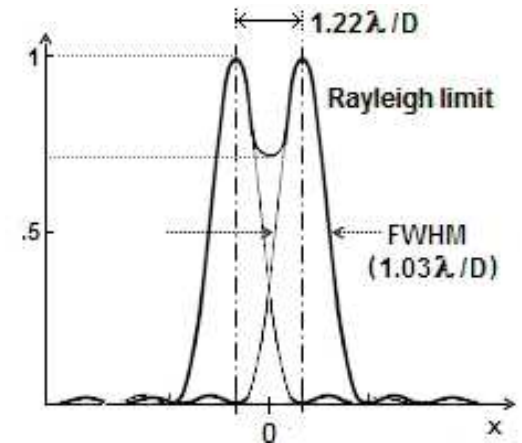
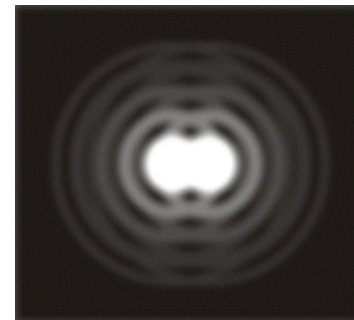
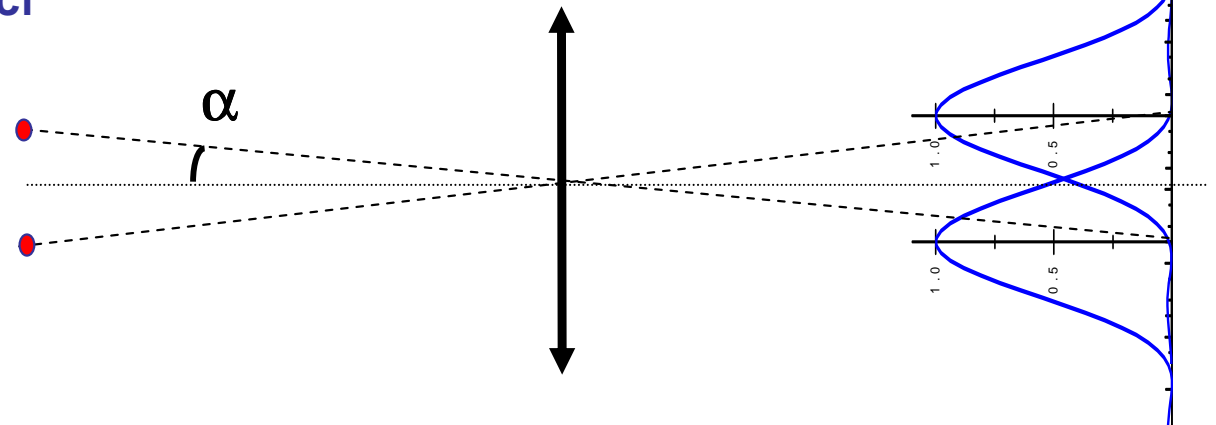
**Vliv difrakce**  
(podrobněji v  
teoretické části)

$$\alpha = 1.22 \frac{\lambda}{D} (\text{rad}) =$$

$$= 206265 \times 1.22 \frac{\lambda}{D} (\text{arc sec})$$



**Velký průměr = malý úhel  $\alpha$**



# Zvýšení úhlové rozlišovací schopnosti

## Maximalizace průměrů optiky

oko	amatérský	Hubble	Keck
6 mm	200 mm	2.4 m	10m
teoret. 20	cca 0.7	cca 0.05	cca 0.01



5''



1''



1'



0.05''

Andromeda Galaxy — NASA, Hubble Telescope

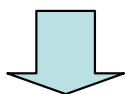
# Základní parametry telesopů

1. Světelný zisk ( Light gathering power )

2. Rozlišovací schopnost ( Resolving power )

Průměr  
teleskopu

3. Zvětšení ( Magnification ) ...?



Zvětšení bývá neodborníky často uváděno jako základní parametr kvality teleskopů.

Je to dáno historicky - především vizuální pozorování tj, kombinacemi objektivů a okulárů.

Také někteří výrobci uvádějí zvětšení jako důležitý parametr. Ve skutečnosti je hodnota zvětšení z pohledu očekávané kvality teleskopu nedůležitý parametr.

**Změna zvětšení neposkytuje žádné nové kvalitativní informace.**

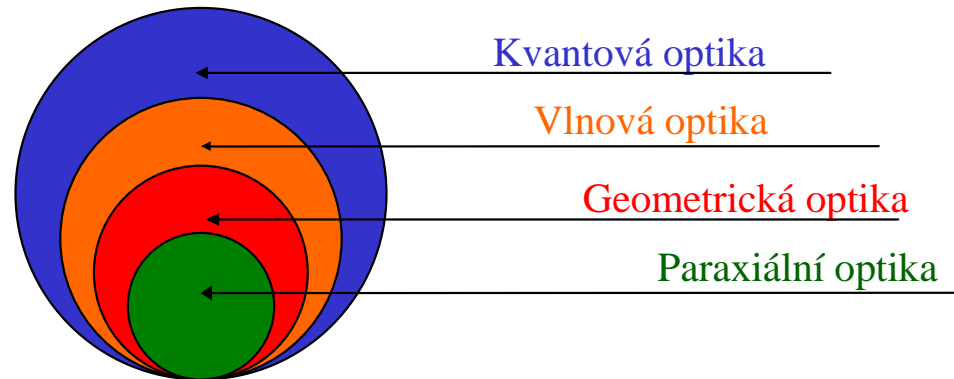


# Teleskopy.

**Nutnost základních teoretických znalostí.**

**Posouzení zobrazovacích kvalit teleskopu  
=  
vyhodnocení typu a velikosti optických aberací**

# ROZDĚLENÍ OPTIKY



**Kvanová** - vysvětluje interakce záření a látky (fotoelektrický jev), absorpci, spontánní emisi, vynucenou emisi (lasery), ...

**Vlnová** - vysvětluje difrakci, interferenci, polarizaci ...

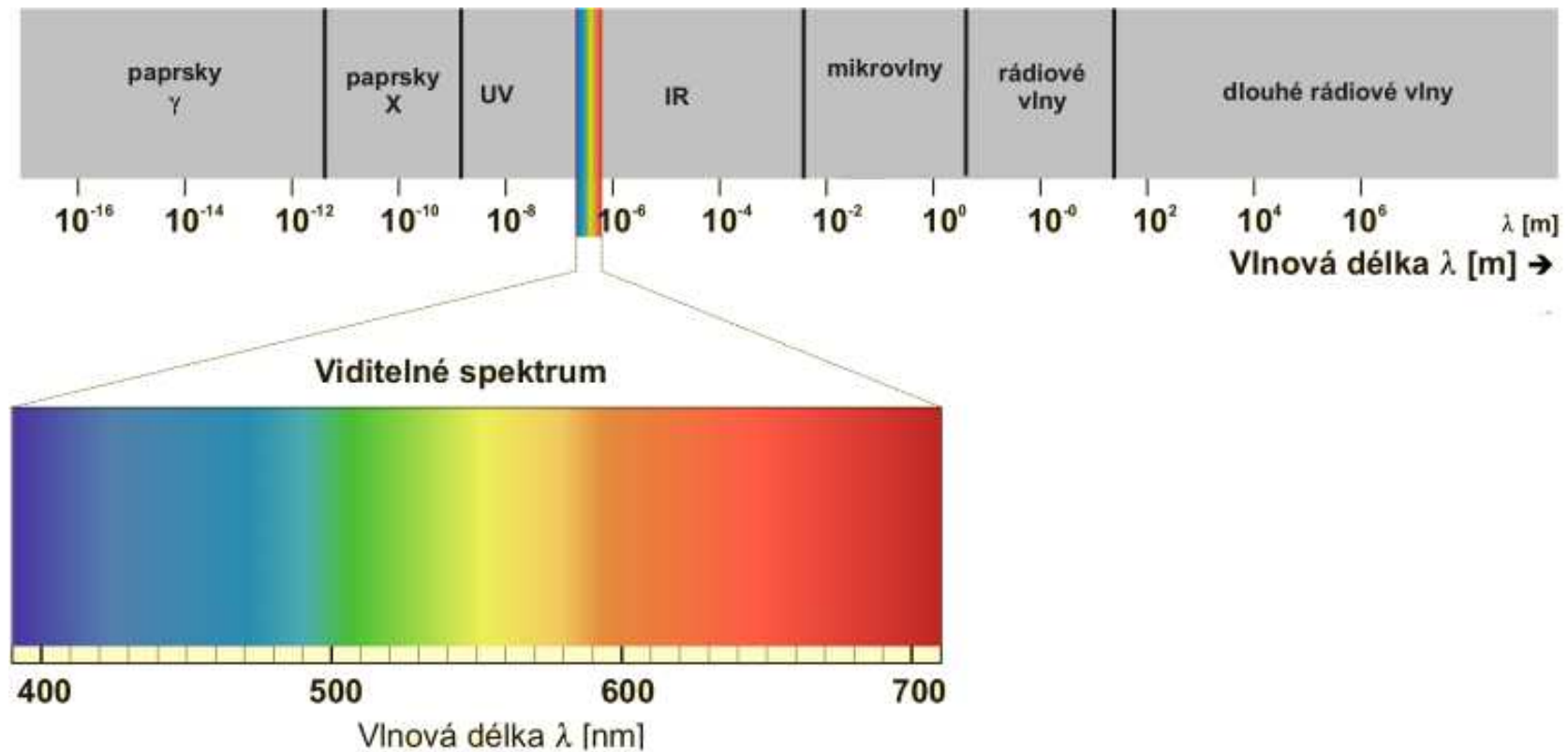
**Geometrická** - vychází z limitního případu vlnové optiky, kdy je vlnová délka mnohem menší než rozměry předmětů, se kterými záření interaguje ( $\lambda \sim 0$ ), záření se „šíří podél paprsků“, optické jevy studuje jen geometricky,  
- vysvětluje odraz a lom optických paprsků.

**Paraxiální** - je aproximací geometrické optiky, kdy jsou její základní zákony lomu a odrazu aplikovány na případ úzkých paprskových svazků cca do  $2^\circ$  kdy lze psát zákon lomu ve tvaru :  $n \alpha = n' \alpha'$

# Optické záření

Optické záření je elektromagnetické (EM) záření s vlnovými délkami mezi oblastí rentgenového záření (1nm) a radiových vln (1mm).

Světlo je „viditelná“ část optického záření (max. 360nm - 830nm)



# Index lomu

## Index lomu $n(\lambda)$ :

(pro monochromatické záření o vlnové délce  $\lambda$ )

Poměr rychlosti šíření EM vln ve vakuu k jeho fázové rychlosti v uvažovaném prostředí :

$$n(\lambda) = \frac{c}{v}$$

$c$ ...rychlost šíření světla ve vakuu ( $c = 299\,792\,458\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ),  
 $v$ ...rychlost šíření světla v daném materiálu.

# Bodový zdroj - vlnoplocha - paprsek

**Bodový zdroj** - každý bod svítícího nebo osvětleného předmětu, který je zdrojem záření, šířícího se do všech směrů“.

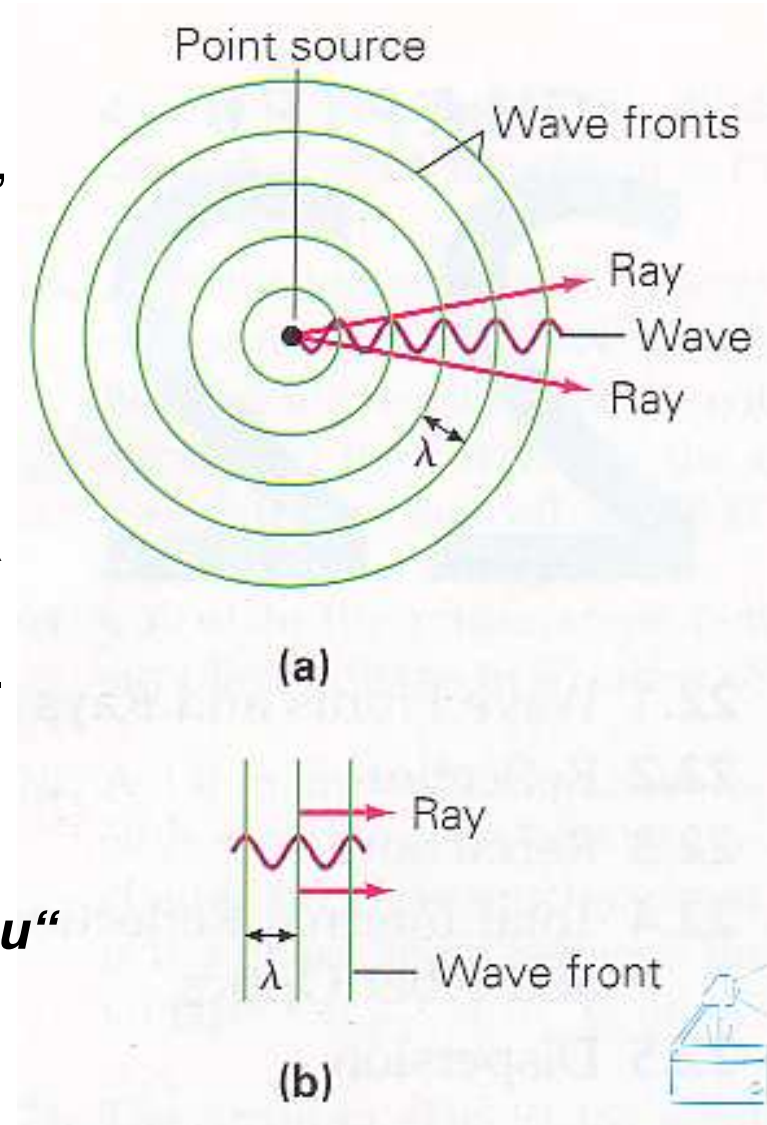
Plocha, na které je v daný okamžik konstantní fáze vlny se nazývá **vlnoplocha**.

**Paprsek** - obecně prostorová křivka jejíž tečna udává směr šíření energie.

V izotropním prostředí je kolmý na vlnoplochu.

V homogenním prostředí je to přímka.

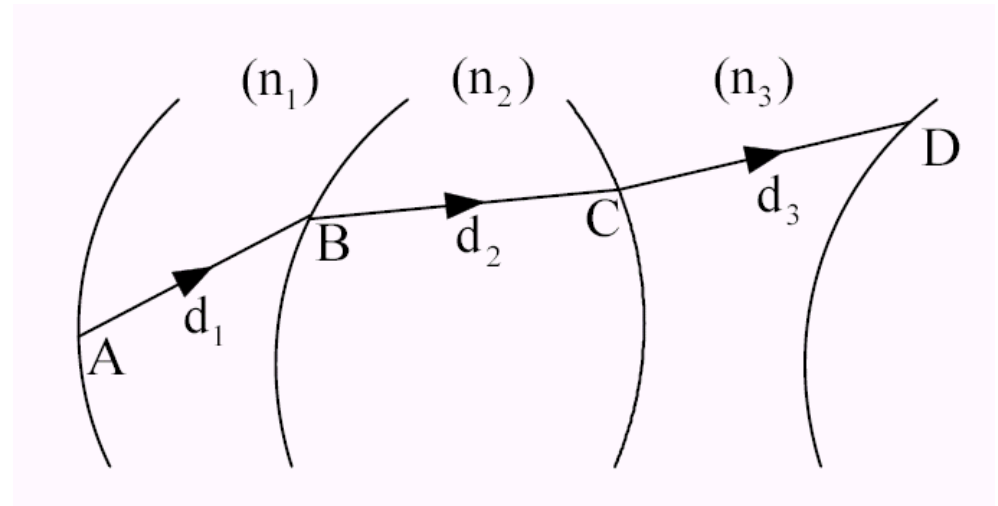
**Zdroj je v „nekonečnu“**



# Optická dráha

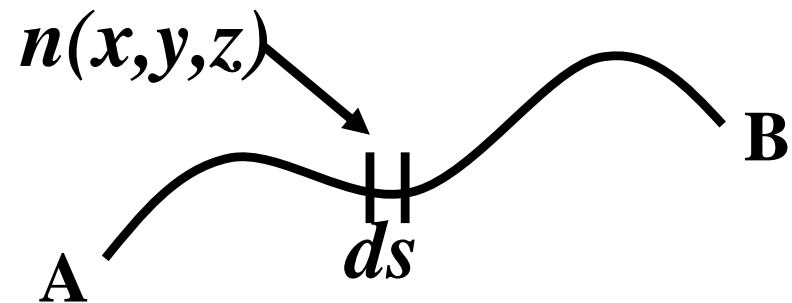
**Optická dráha** - součin geometrické dráhy paprsku a indexu lomu

$$\mathbf{OD} = [ABCD] = \sum n_i d_i$$



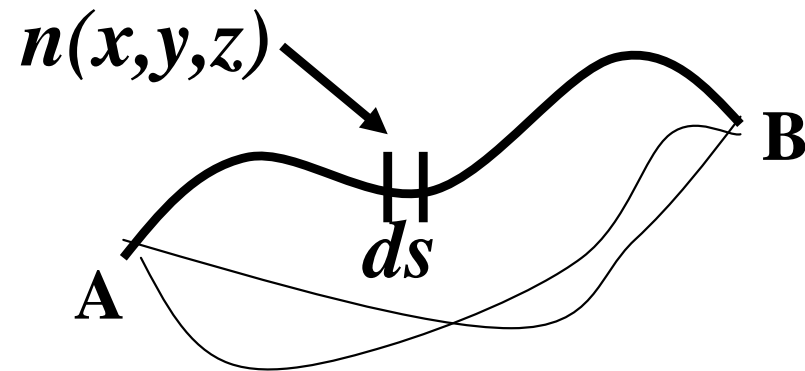
Obečně je definována jako křivkový integrál

$$\mathbf{OD} = \int_A^B n(r) ds$$



*Optická dráha je vždy větší než geometrická (kromě vakua)*

# Fermatův princip



Protože pro index lomu platí  $n = c/v$ , lze Fermatův princip vztáhnout i na čas :

*„Optické záření se šíří mezi dvěma body po takové geometrické dráze, že doba potřebná k proběhnutí této dráhy má extrémní hodnotu nebo je stacionární“.*

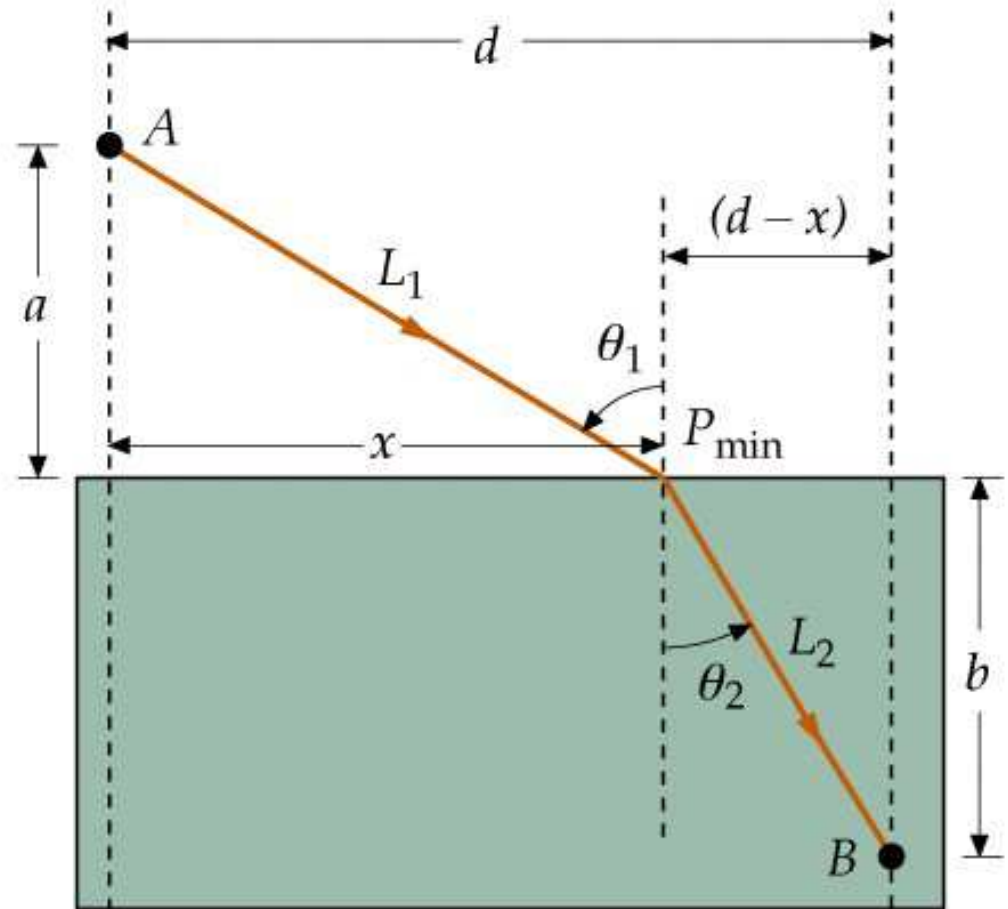
**Nepřesně:**

*„Světlo se mezi dvěma body šíří po takové dráze, aby ji urazilo za nejkratší dobu.“*

# Zákon lomu

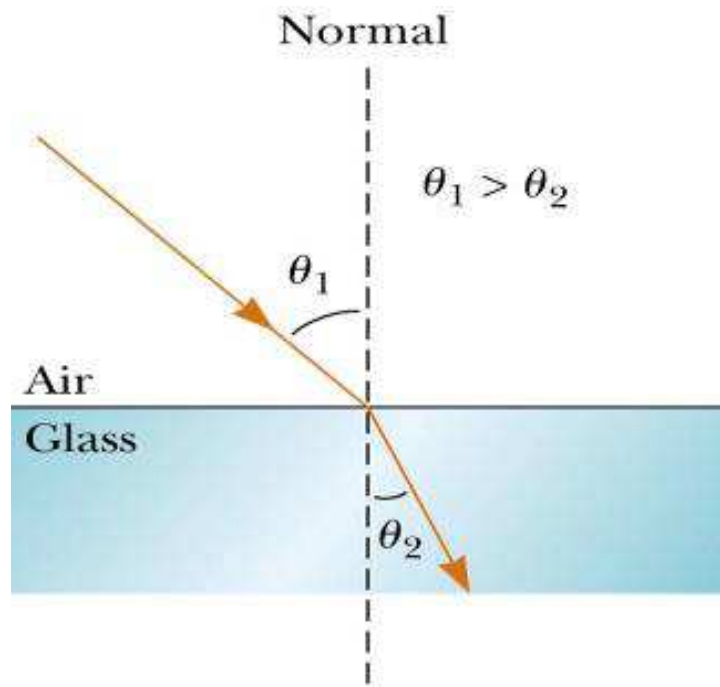
$$n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2$$

Lomený paprsek  $P_{\min}$ -B leží v jedné rovině s dopadajícím paprskem A- $P_{\min}$  a také normálou, vztyčenou v místě dopadu.

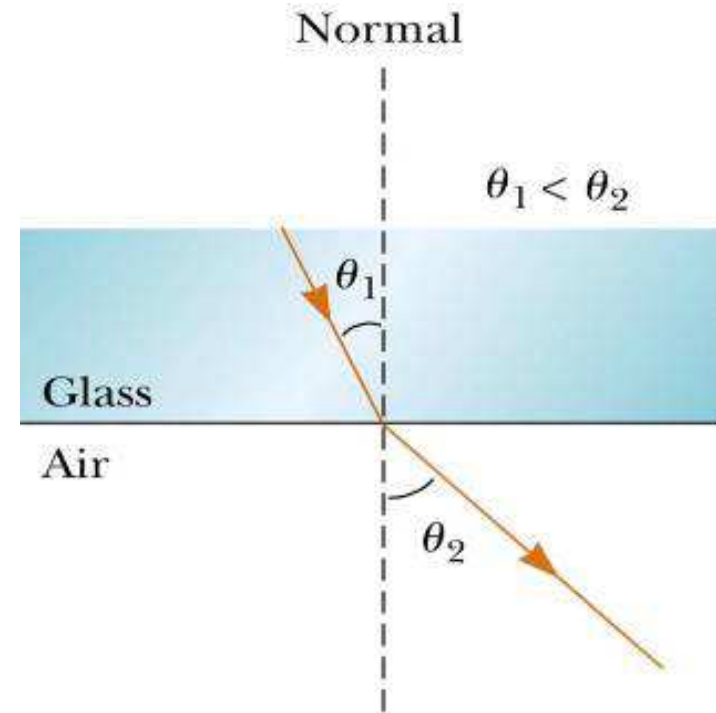




# Zákon lomu



© 2003 Thomson - Brooks Cole (a)



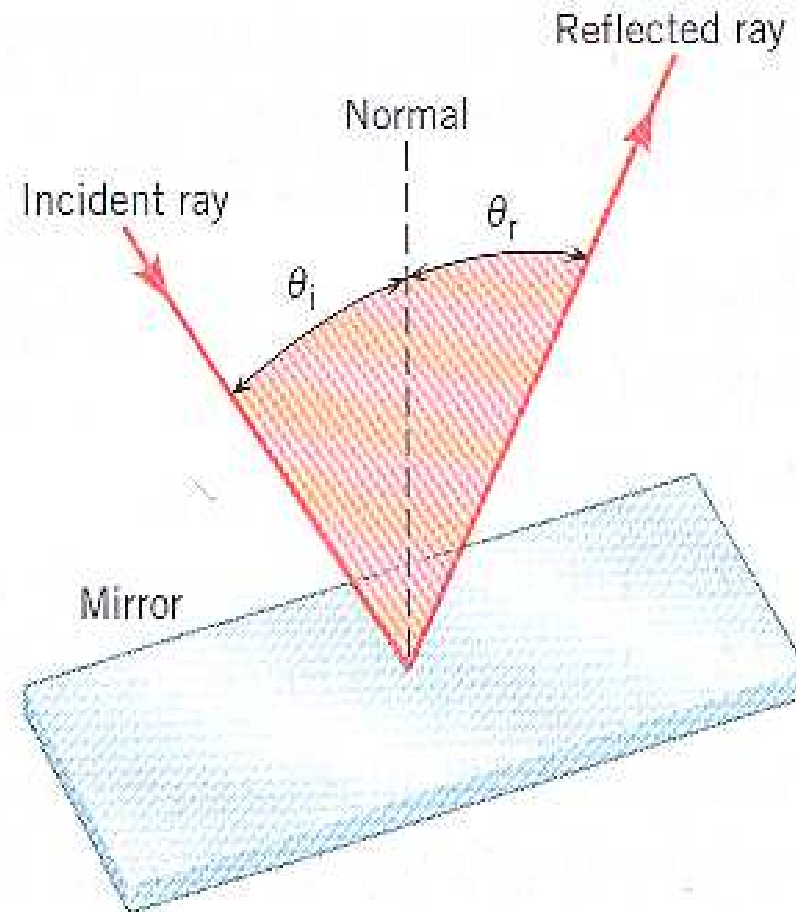
© 2003 Thomson - Brooks Cole (b)

Paprsek směřující z prostředí opticky řidšího do opticky hustšího se láme ke kolmici (úhel lomu je menší) a naopak.

# Zákon odrazu

**Úhel odrazu se rovná  
úhlu dopadu**

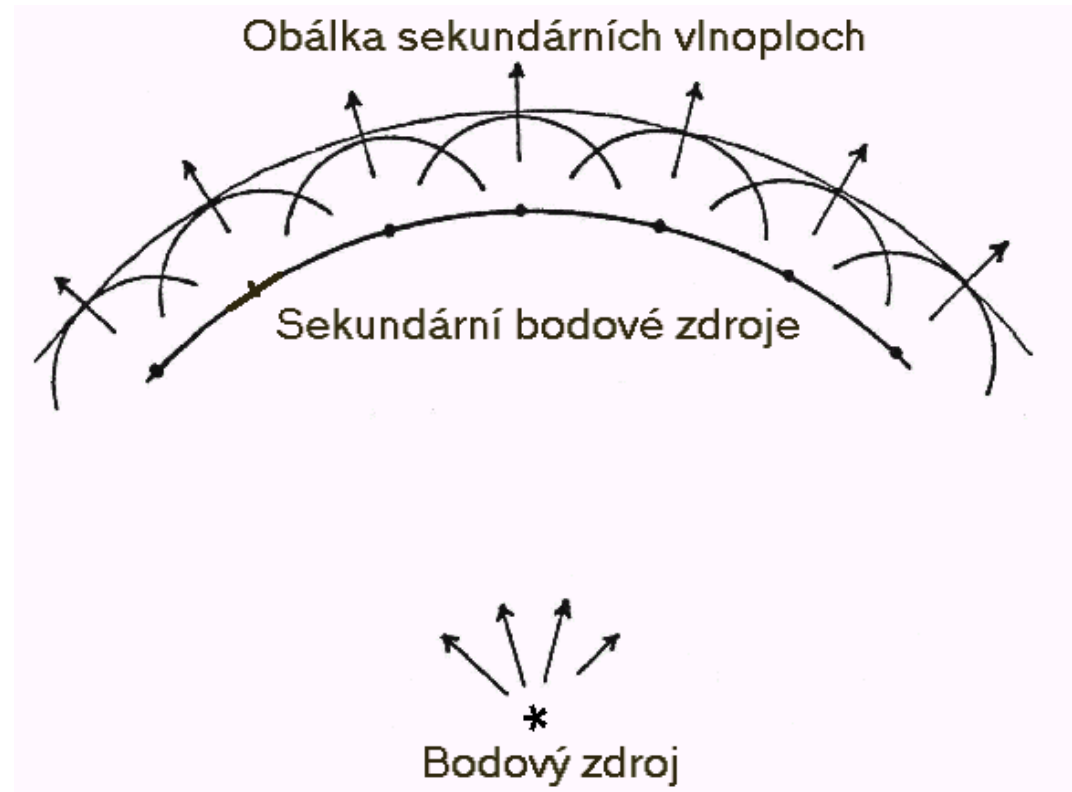
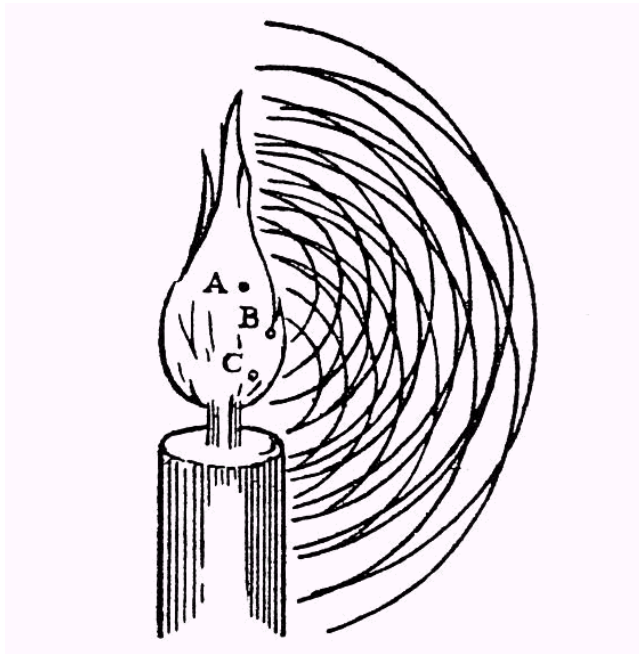
Odražený paprsek leží v jedné rovině s dopadajícím paprskem a normálou, vztyčenou v místě dopadu.



# Huygensův princip

**Huygensův princip** = geometrická představa šíření vln.

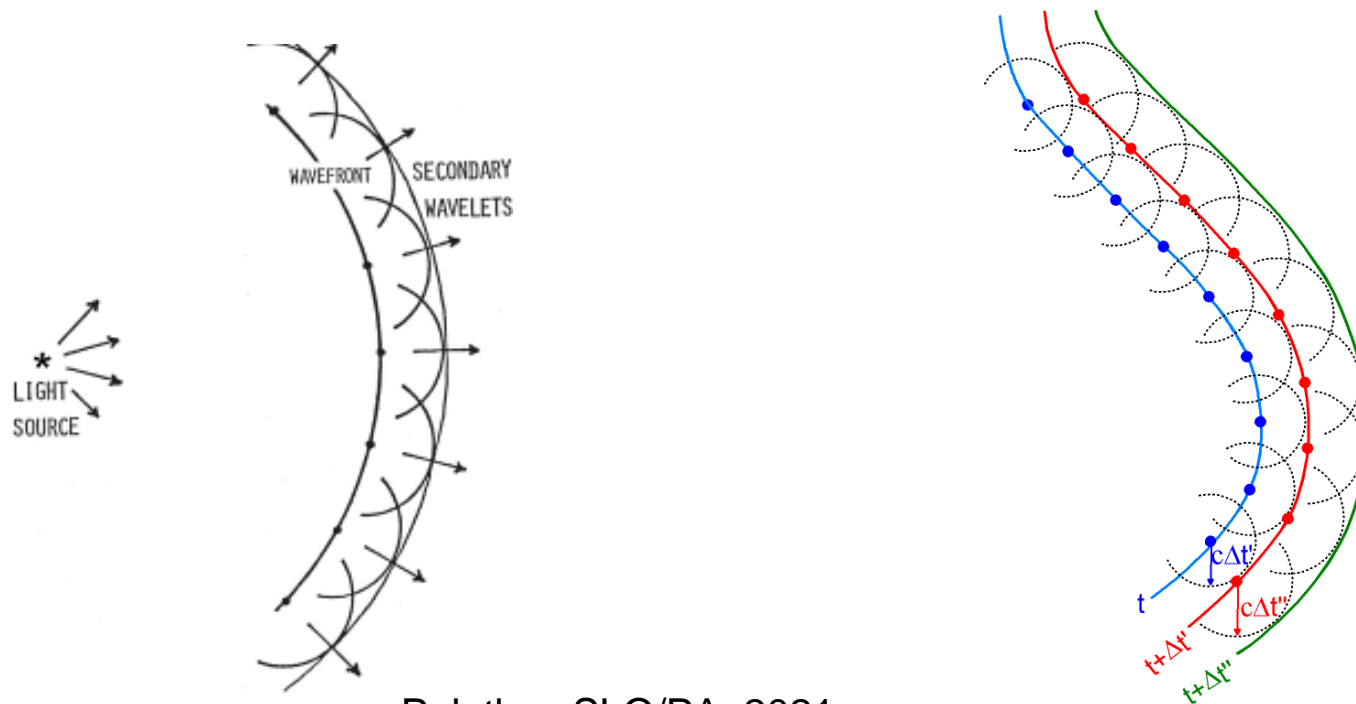
„Každý bod prostředí, kterého dosáhlo čelo EM vlny lze považovat za samostatný bodový zdroj EM vln. Nové čelo EM vlny je obálkou všech nově vzniklých sekundárních polokulových vlnoploch“.



# Historický vývoj znalostí difrakce (velmi zkráceně)

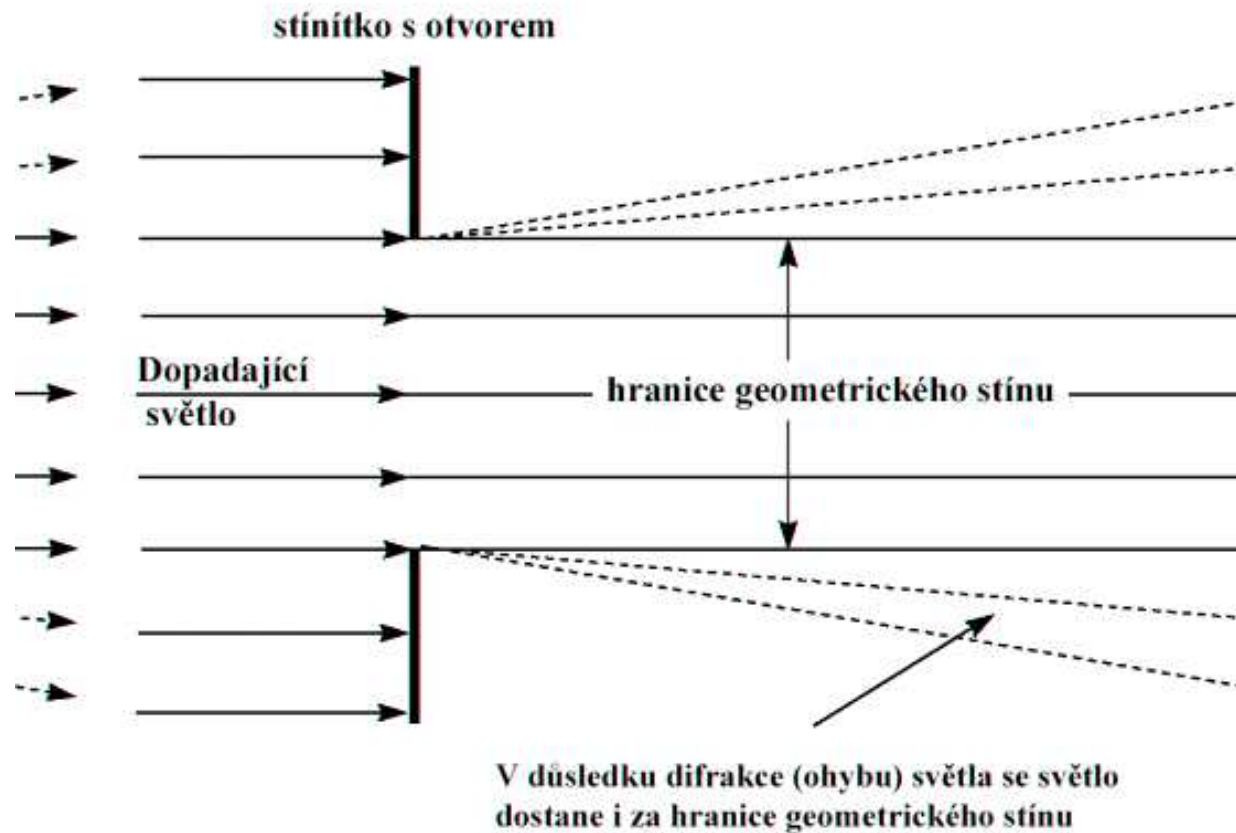
## Huygensův princip

*V roce 1690 Christian Huygens v „Traktátě o světle“ - světlo se šíří stejně jako zvuk kulovými plochami a vlnami. Každý bod vlnoplochy je zdrojem sekundárního vlnění, takže v libovolném okamžiku lze určit polohu vlnoplochy jako obálku sekundárních vln.*



## Difrakce světla

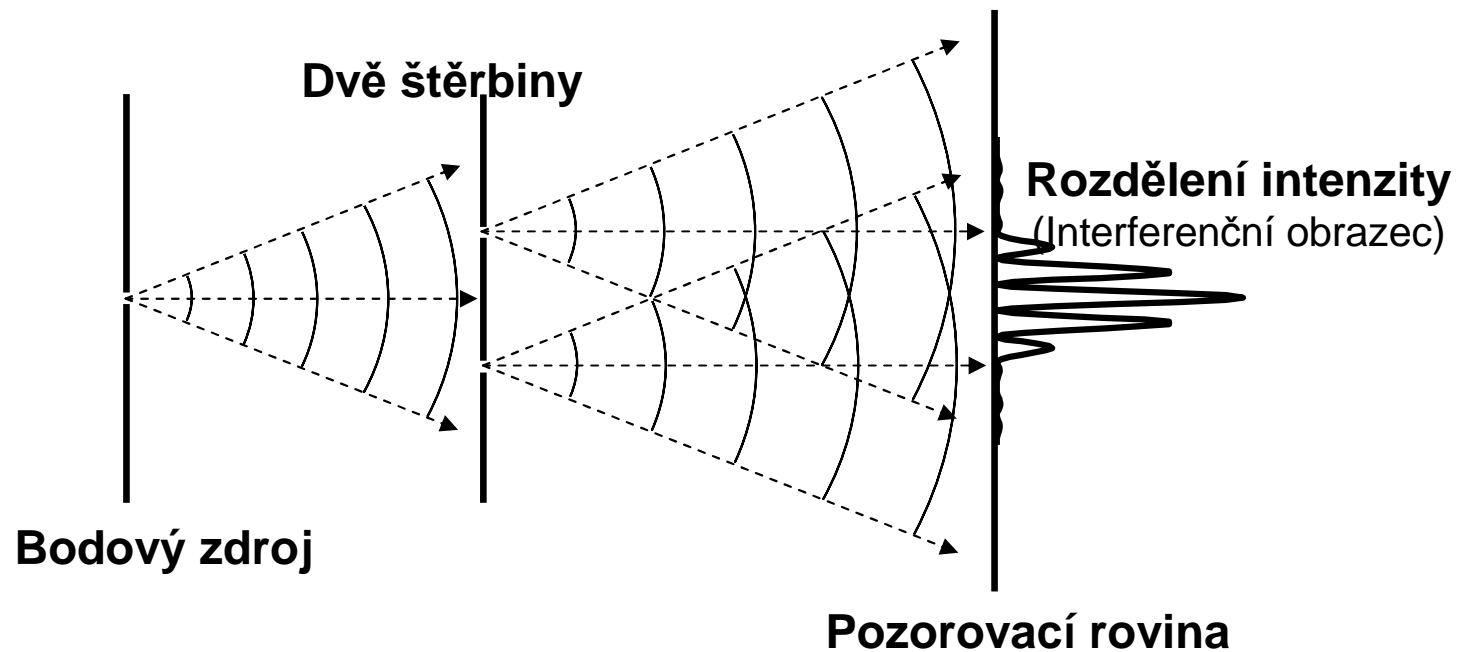
*Difrakcí lze rozumět ty odchytky při šíření světla, které nelze popsat pomocí zákonů geometrické optiky. Světlo se díky difrakci šíří i do oblasti geometrického stínu za stínítkem.*



# Historický vývoj znalostí difrakce (velmi zkráceně)

## Youngův experiment s interferencí

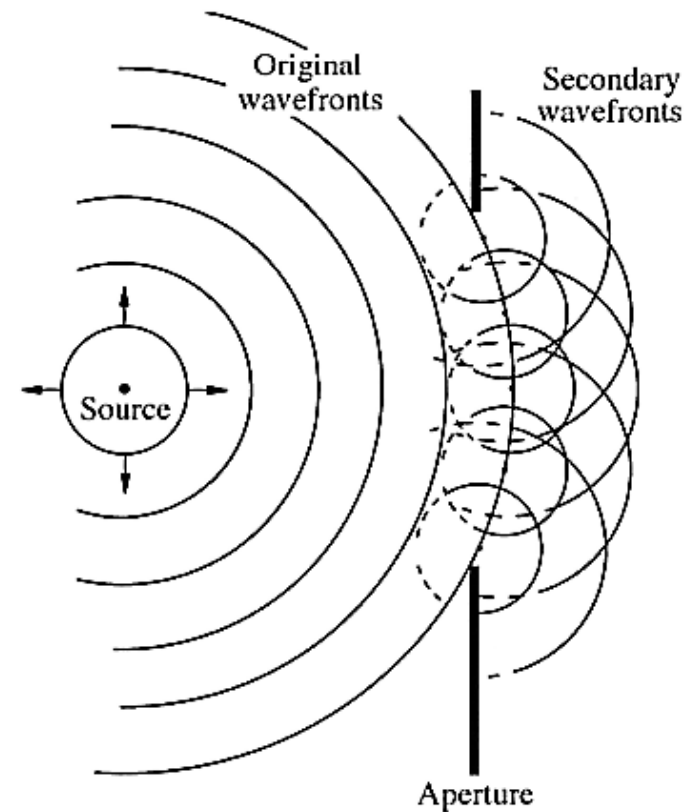
*V roce 1802 Thomas Young experimentem se dvěma štěrbinami odhalil a popsal princip superpozice světelných vln - interferenci.*



# Historický vývoj znalostí difrakce (velmi zkráceně)

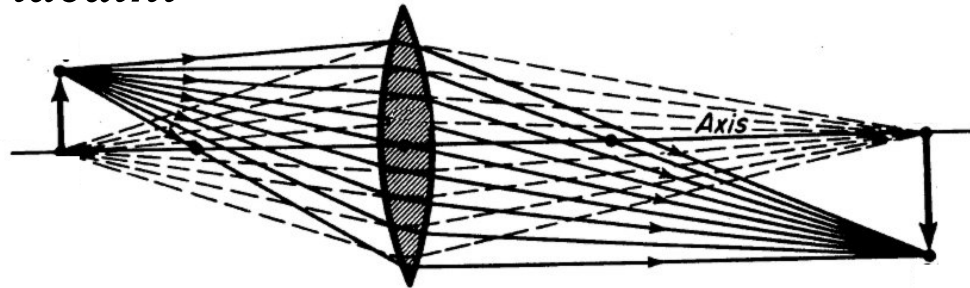
## Huygens-Fresnelův princip

*V roce 1818 A.J.Fresnel publikuje, že ohyb světla lze vysvětlit kombinací Huygensova principu a principu interference vlnění. Amplitudy a fáze sekundárních vlnění vzájemně interferují. Stav pole v kterémkoliv bodě za stínítkem je pak dán superpozicí vlnění od všech sekundárních zdrojů.*



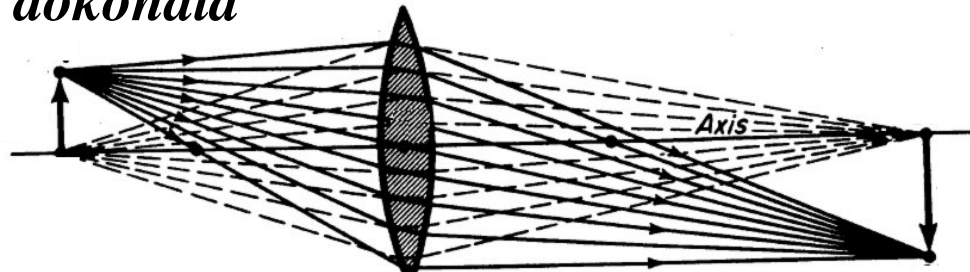
# Ideální a „fyzikálně dokonalé“ zobrazení.

*ideální*



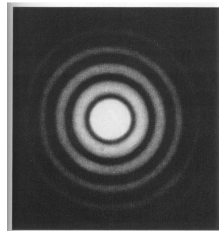
*bod - bod  
přímka - přímka  
rovina - rovina*

*fyzikálně dokonalá*

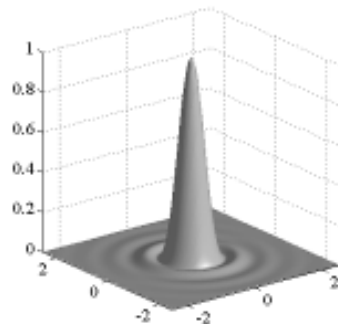


*bod se zobrazuje díky  
difrakci jako rozptylová  
ploška*

*Bez optických aberací*



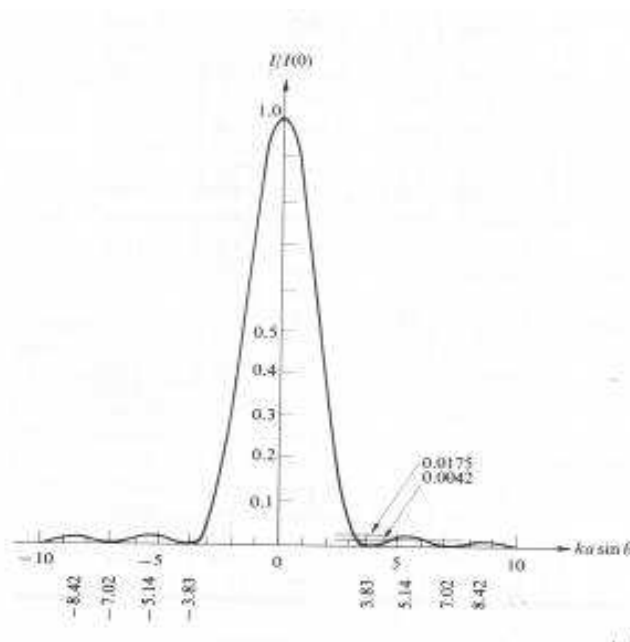
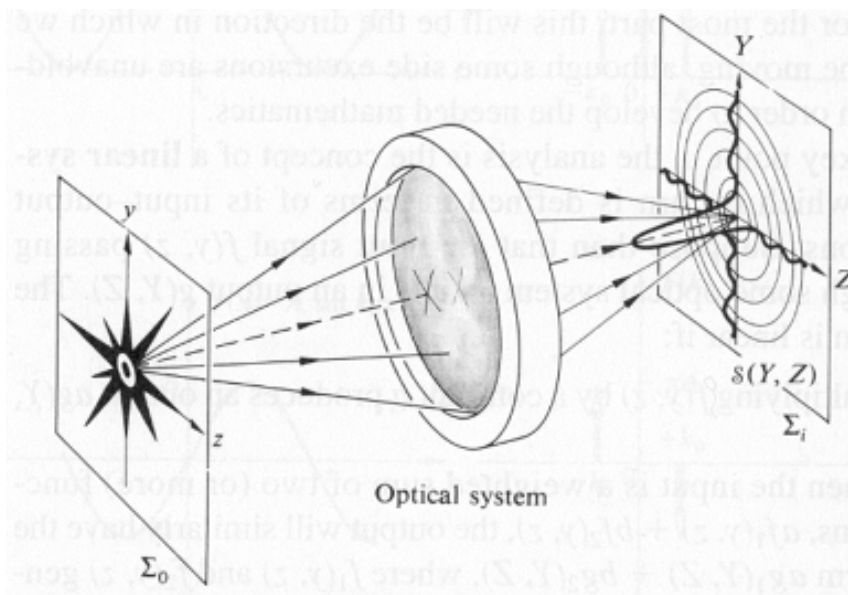
*Airyho  
disk*



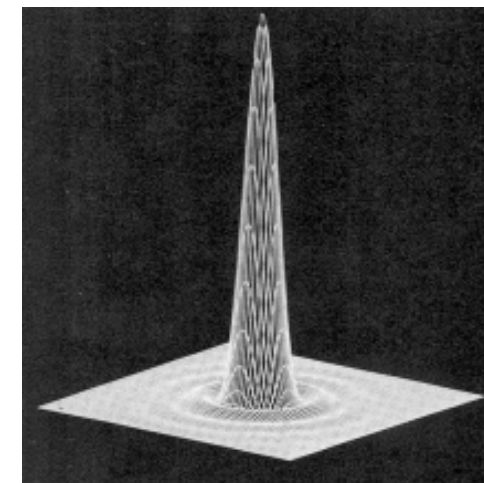
*Rozptylová funkce bodu  
PSF (point spread function) pro  
kruhovou aperturu*



# Fraunhoferova difrakce na kruhovém otvoru



PSF



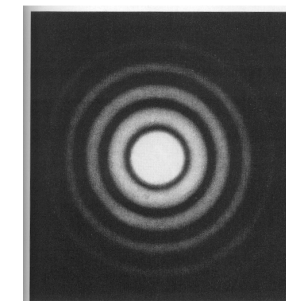
***Pokud vzniká difrakce na čočce s ohniskovou vzdáleností  $f$  potom je poloměr prvního minima v difrakčním obraze:***

$$r_A = 1.22\lambda \frac{f}{D}$$

**Průměr středového kroužku**

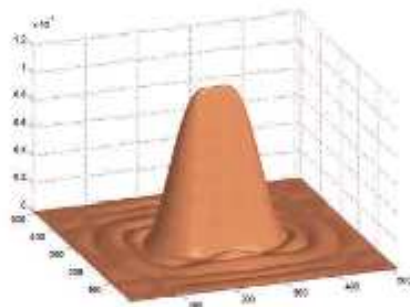
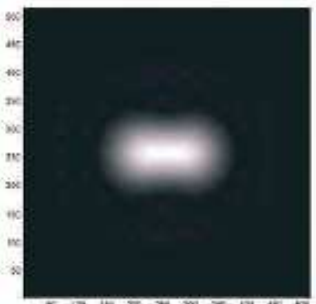
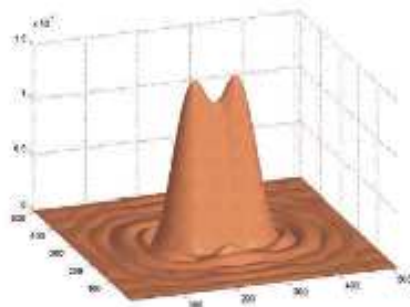
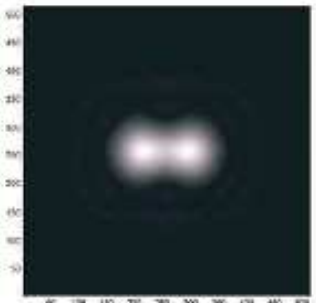
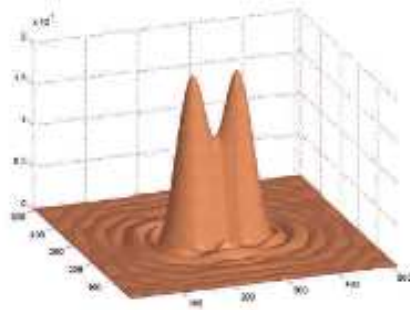
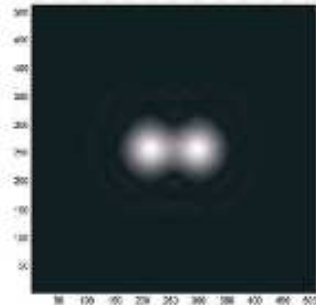
$$d_A = 2.44\lambda \frac{f}{D}$$

**Airyho disk**



# Vliv difrakce na kvalitu zobrazení fyzikálně dokonalou OS

## PSF



Zobrazení **dvou stejně jasných bodových zdrojů OS.**

Každý bod je zobrazen fyzikálně dokonalou OS jako **Airyho disk** obklopený soustřednými kroužky.

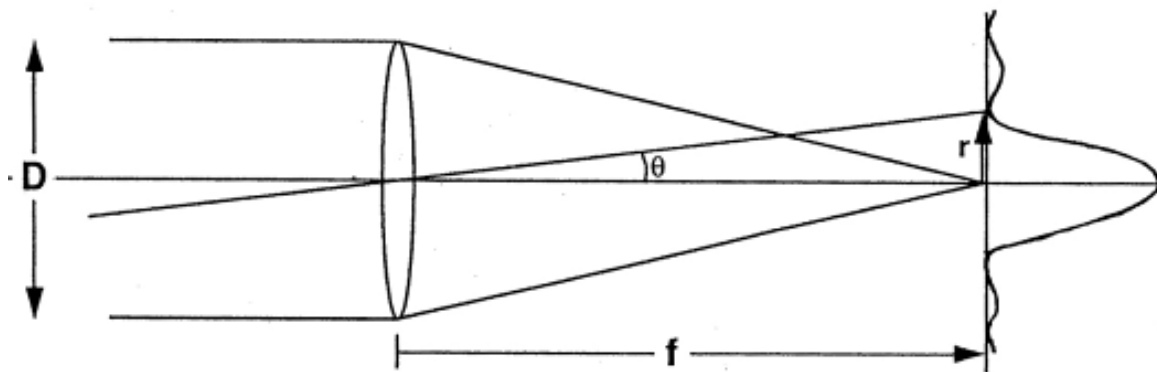
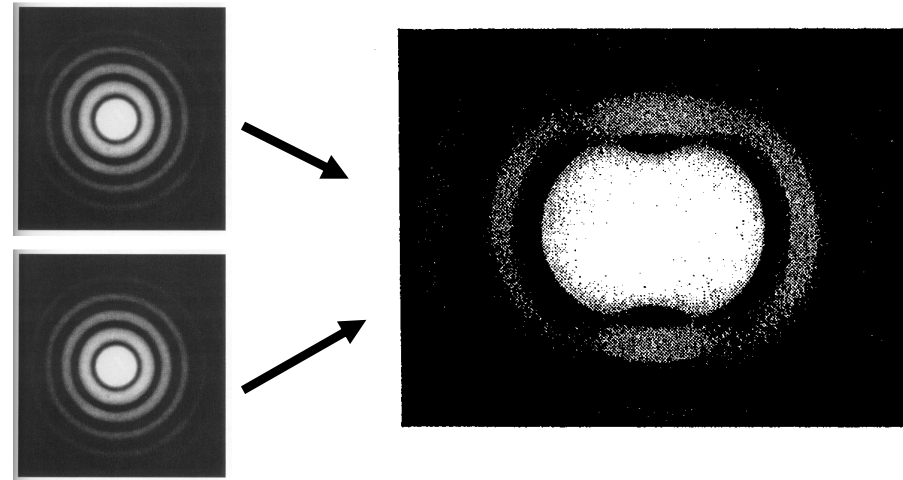
Pokud jsou body předmětu blízko sebe, potom se jejich obrazy budou překrývat.

Při určité vzdálenosti předmětových bodů nebude možné vzájemně rozeznat jejich obrazy.

**Jaká jsou kritéria rozlišení ?**

# „Rayleigh“ kriterium pro úhlové rozlišení OS

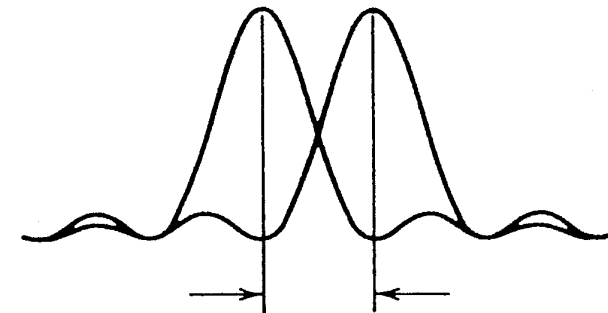
*Rayleighovo kriterium říká, že dva body jsou rozlišeny pokud maximum rozdělení intenzity v obraze jednoho bodu „padne“ do prvního minima (tmavého kroužku) rozdělení intenzity v obraze druhého bodu.*



Angular Resolution  
 $\theta = 1.22\lambda/D$

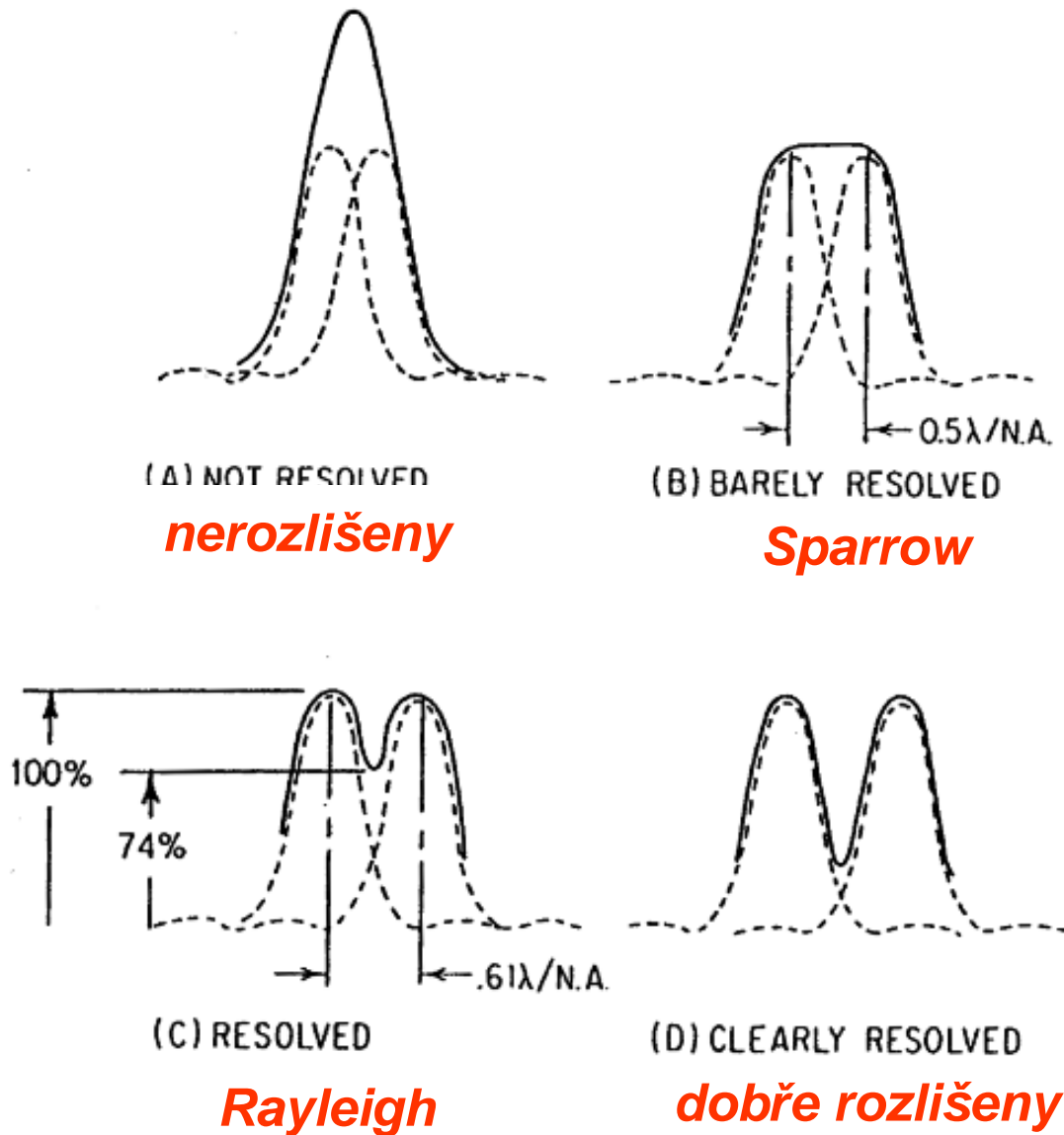
Linear Resolution

$$r = 1.22\lambda f/D = 1.22 \lambda F\#$$



$\theta = 1.22\lambda/D$   
Angular Resolution

## Limit rozlišení dvou bodů předmětu



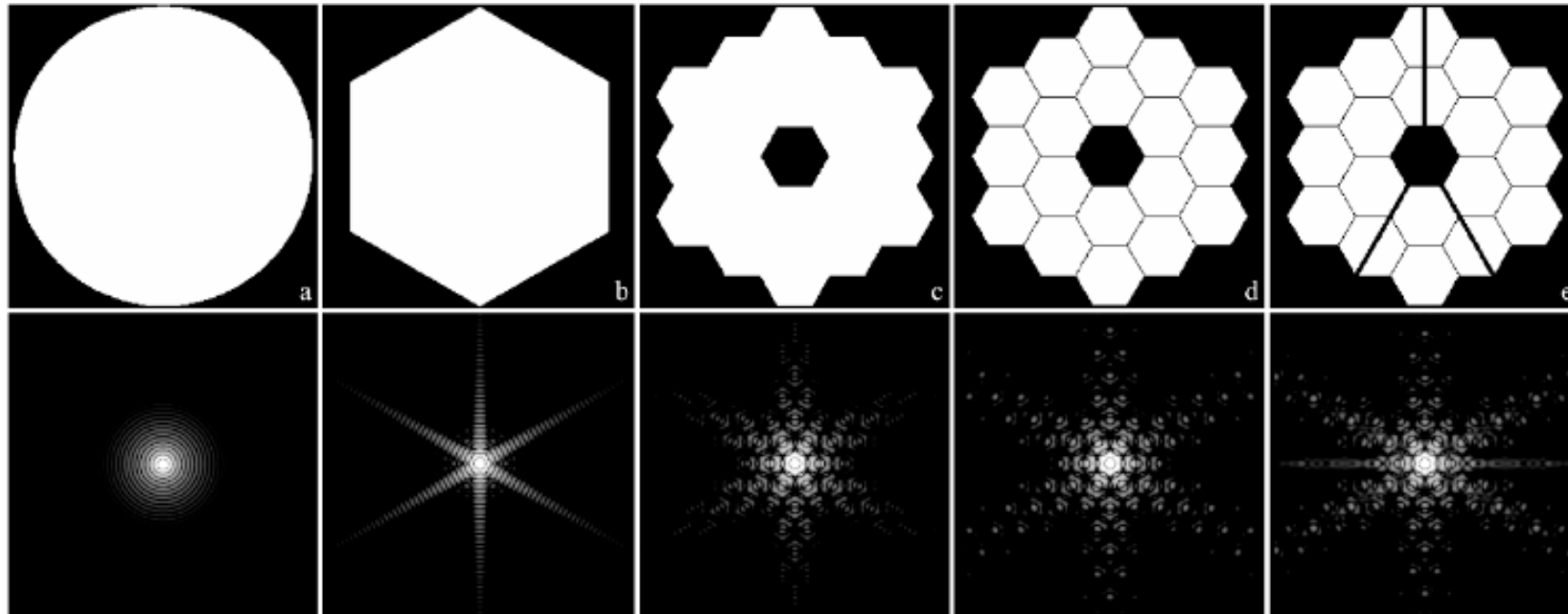
*Neexistuje obecné jednoznačné kritérium, které definuje limit v rozlišení obrazu dvou bodů. Nejznámější je kritérium Rayleigha, ale používáné je také například kritérium Sparrow, které definuje maximální limit přenosu kontrastu v optické funkci přenosu.*

$$\text{Rayleigh} = 1.22\lambda c$$

$$\text{Sparrow} = \lambda c$$

# Difrakce OS **bez aberací** - tvar apertury

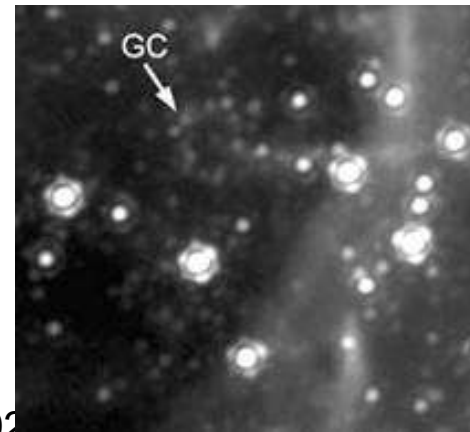
## Simulovaná difrakce



**KECK**



**Reálná difrakce**



# Zobrazovací optické systémy

**Optická soustava je soubor optických prvků :**

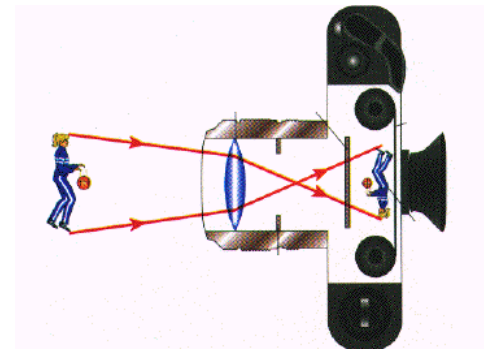
čočky, zrcadla, hranoly, planparalelní desky, difrakční mřížky, hologramy ...

Optická soustava transformuje svazek paprsků od každého bodu předmětu tak, aby se na jiném místě vytvořil jeho obraz s požadovanou kvalitou.

## Zobrazovací X Nezobrazovací optické systémy

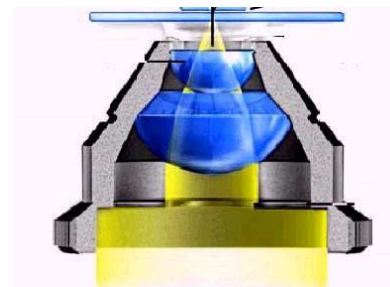
### **Zobrazovací OS**

vytvářejí obraz předmětu vhodné velikosti a v požadované vzdálenosti



### **Nezobrazovací OS**

vytvářejí souhrnný svazek paprsků s požadovaným tvarem a strukturou



# Zobrazovací optické systémy

## Základní aberace optických soustav

### *5 monochromatických*

- *otvorová vada,*
- *koma,*
- *astigmatismus,*
- *zklenutí ( křivost pole),*
- *zkreslení*

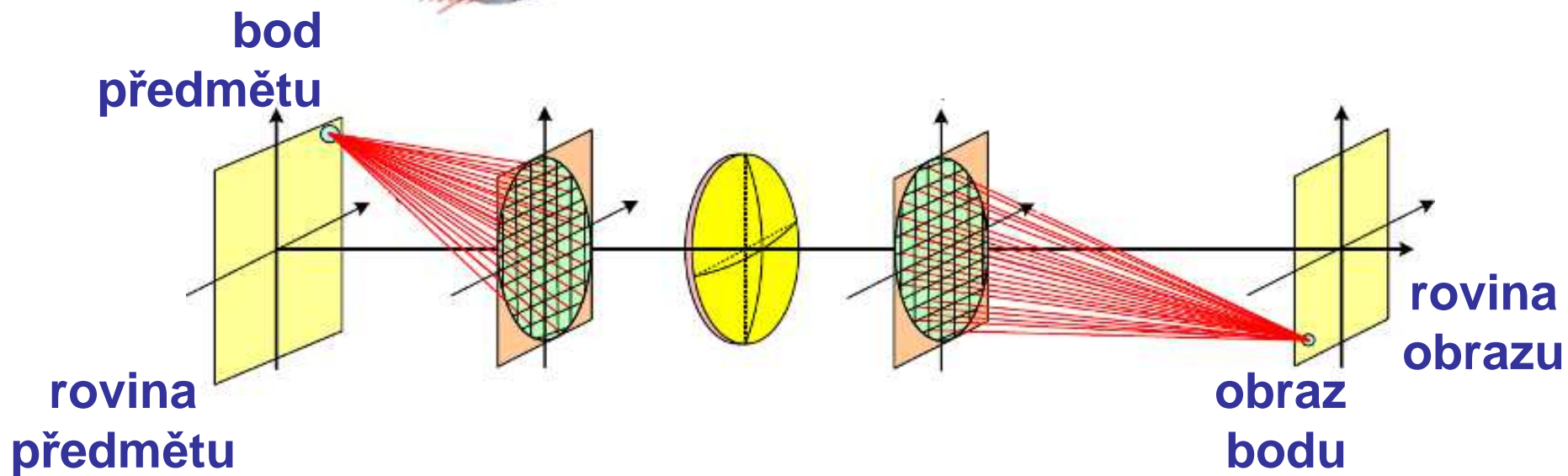
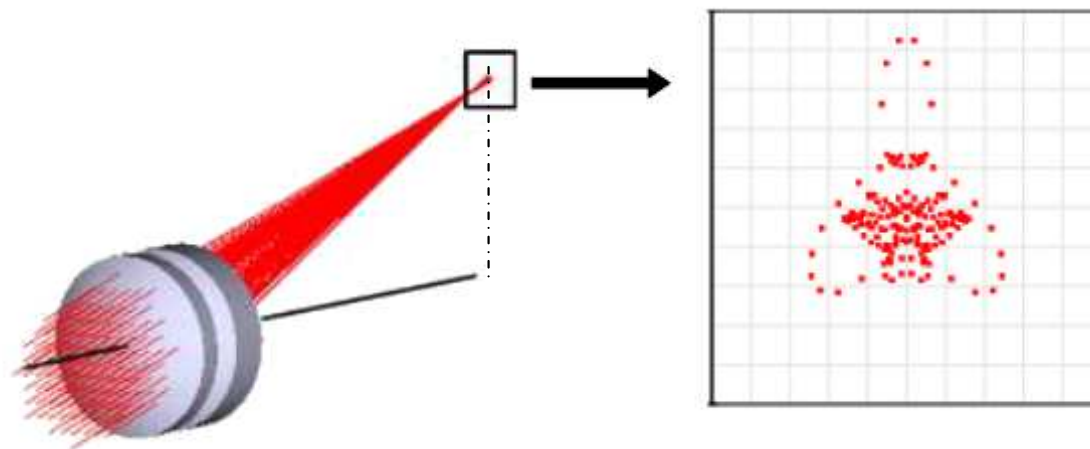
### *2 barevné*

- *barevná vada polohy (sféro-chromatická),*
- *barevná vada velikosti*

~~*bod - bod*~~  
~~*přímka - přímka*~~  
~~*rovina - rovina*~~

# Základní aberace optických soustav

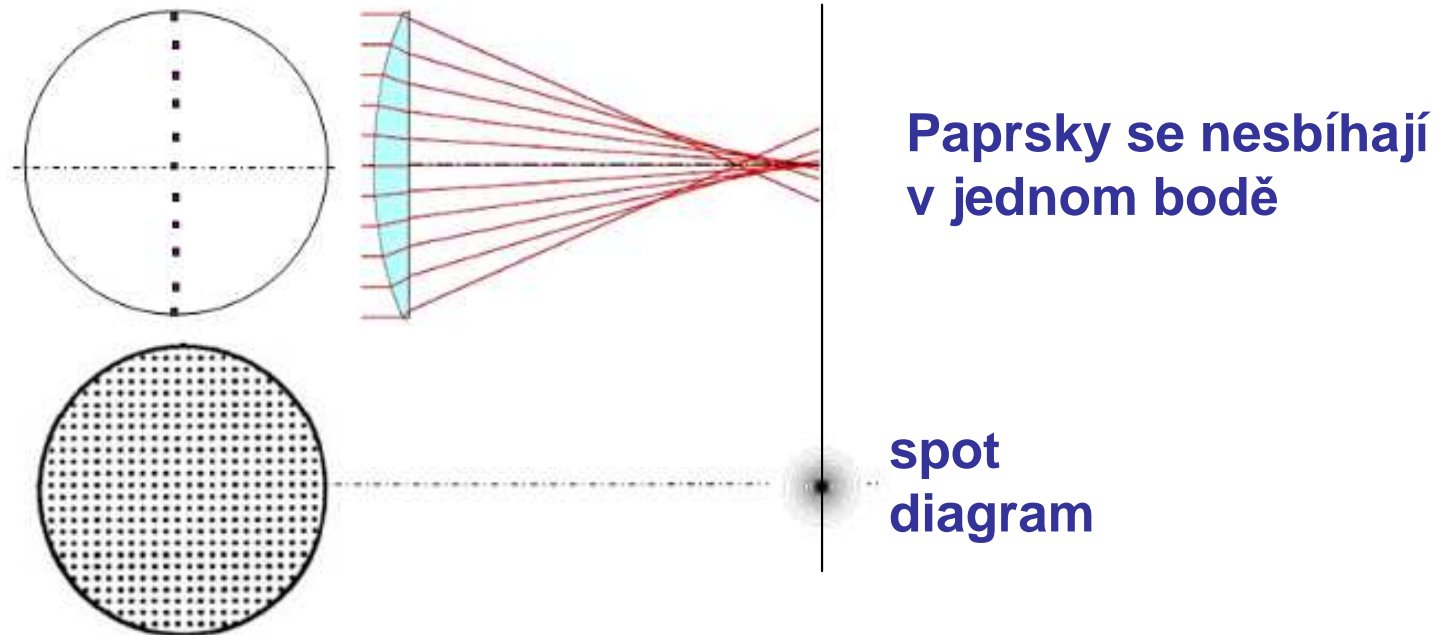
## Spot diagram



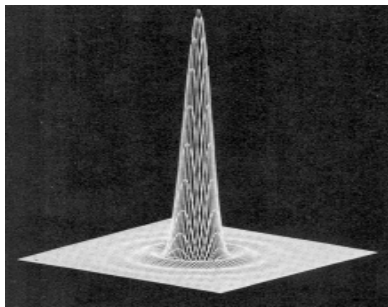


# Základní aberace optických soustav

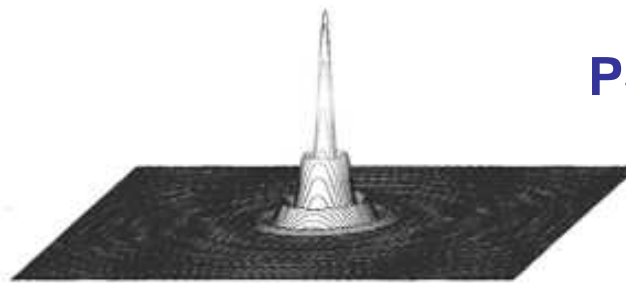
**Otvorová vada** – vada **širokých osových** optických svazků  
(porušena podmínka ideálního zobrazení bod - bod )



PSF  
bez  
aberace

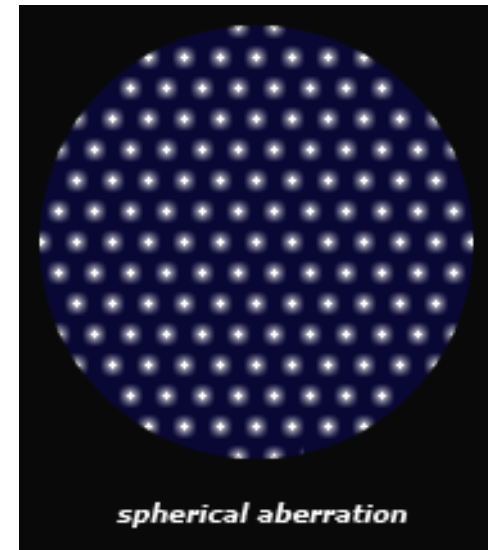
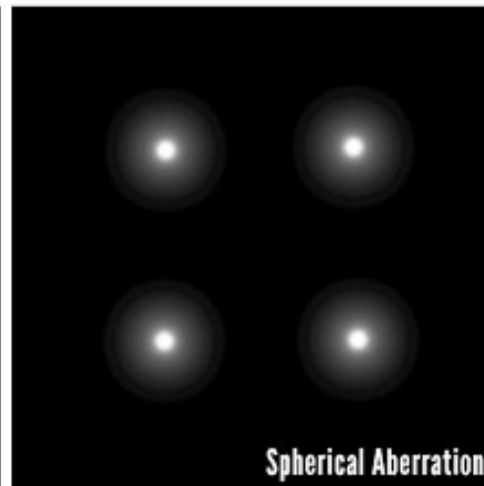
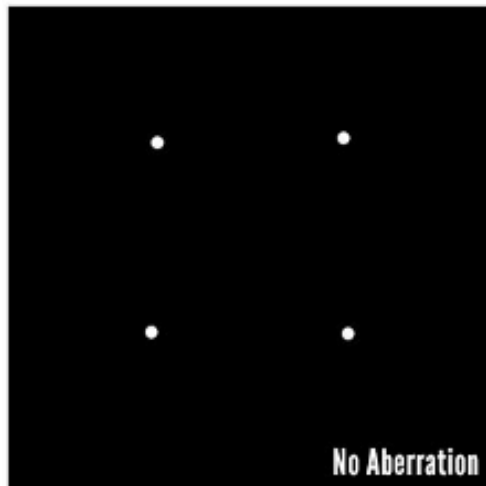


PSF 3D



# Základní aberace optických soustav

**Otvorová vada** – vada **širokých osových** optických svazků  
(porušena podmínka ideálního zobrazení bod - bod )



## Základní aberace optických soustav

**Otvorová vada** – vada širokých osových optických svazků  
(porušena podmínka ideálního zobrazení bod - bod )

Un-aberrated image

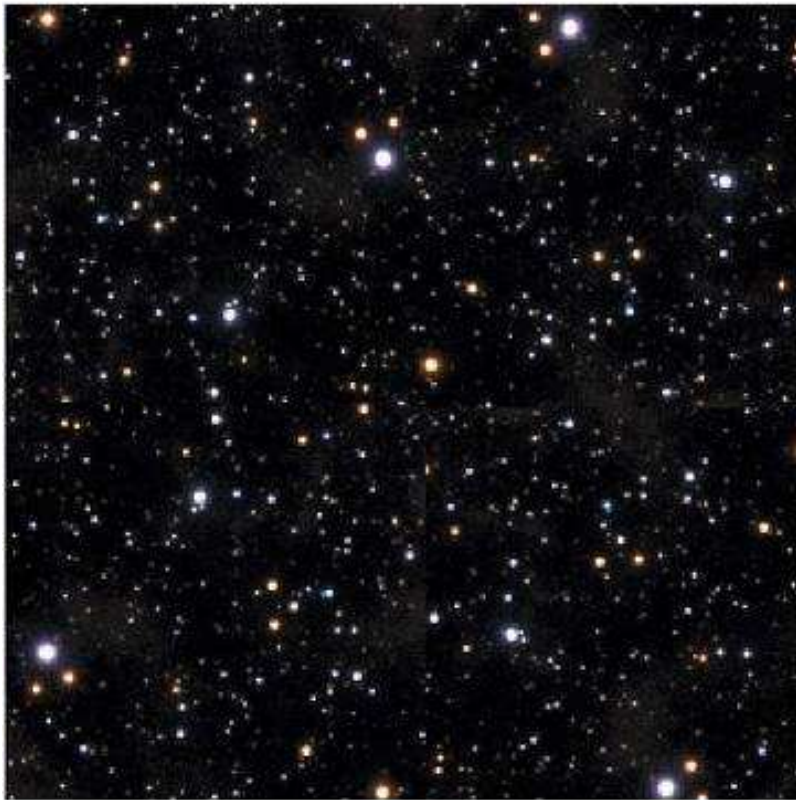
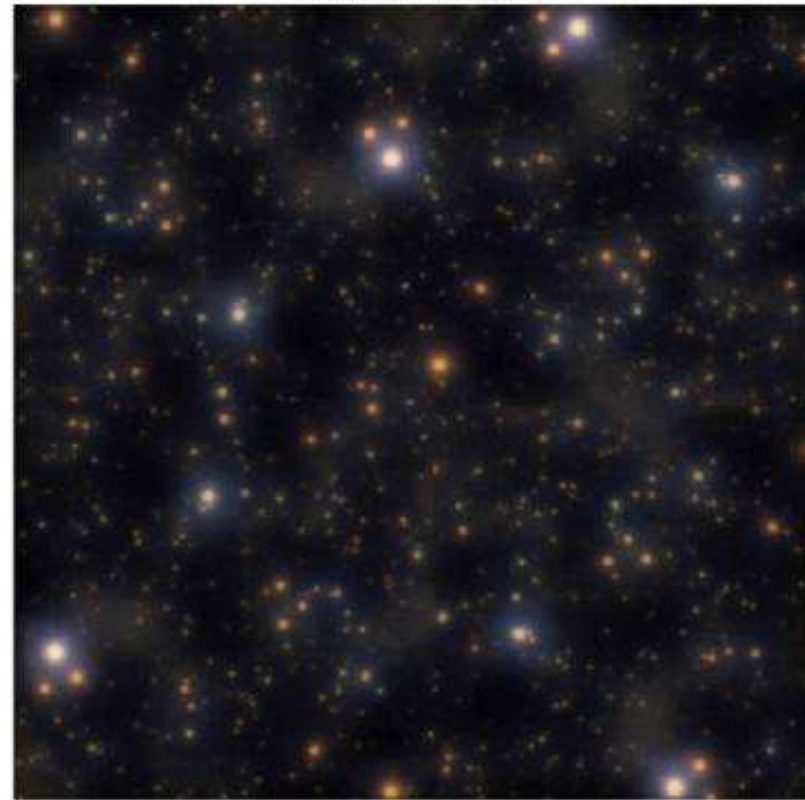


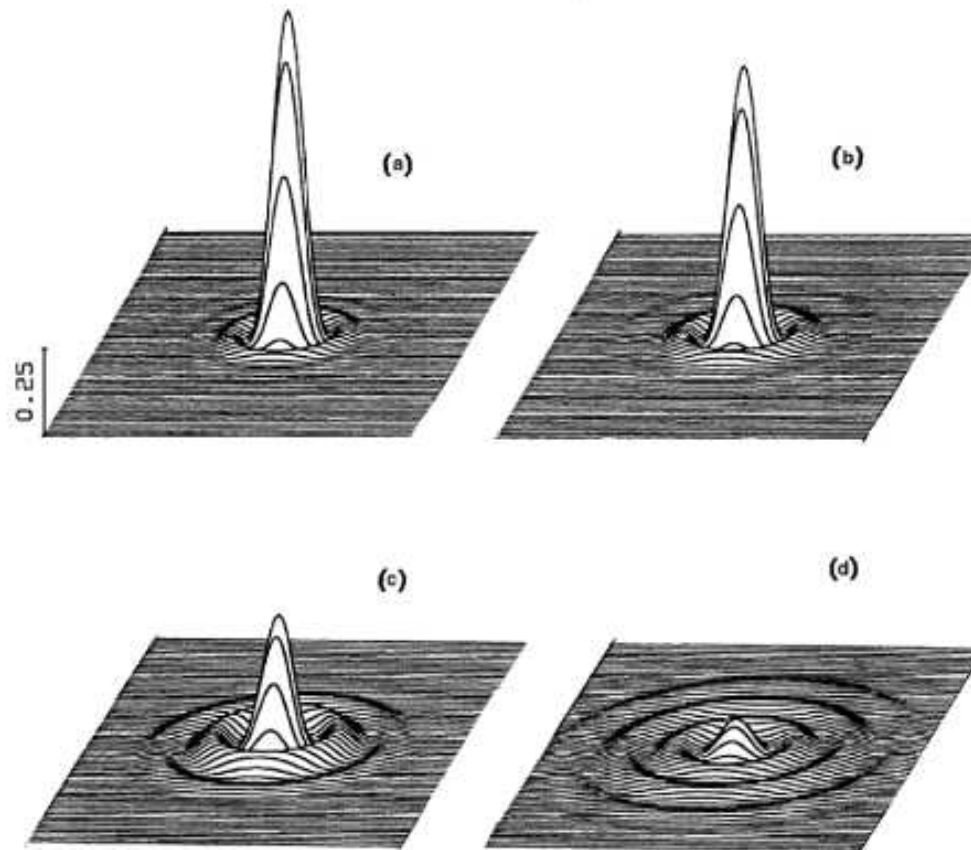
Image from lens with Spherical Aberration



# Základní aberace optických soustav

**Otvorová vada** – vada širokých osových optických svazků  
(porušena podmínka ideálního zobrazení bod - bod )

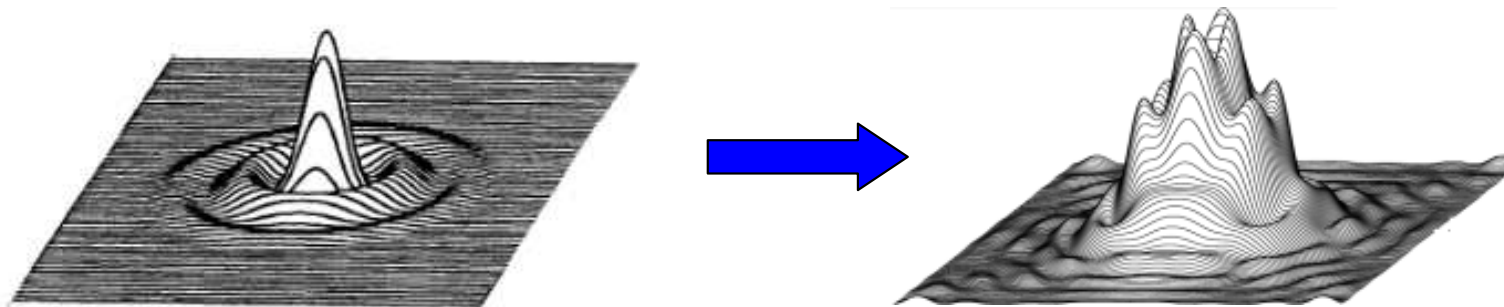
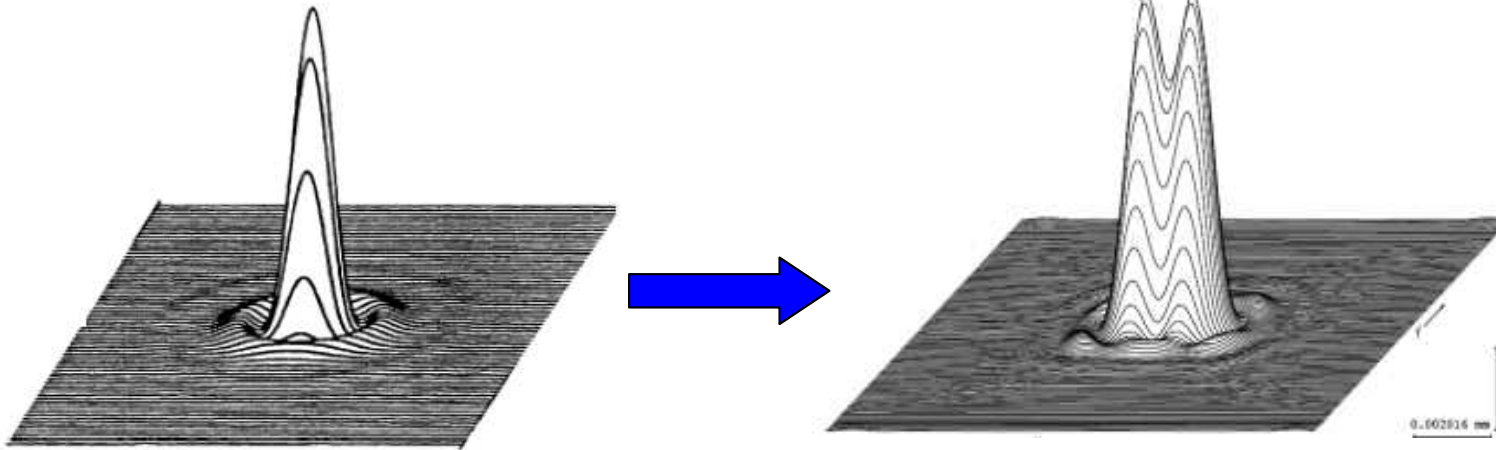
## PSF vs. Third-order Spherical Aberration



Rostoucí velikost otvorové vady

# Základní aberace optických soustav

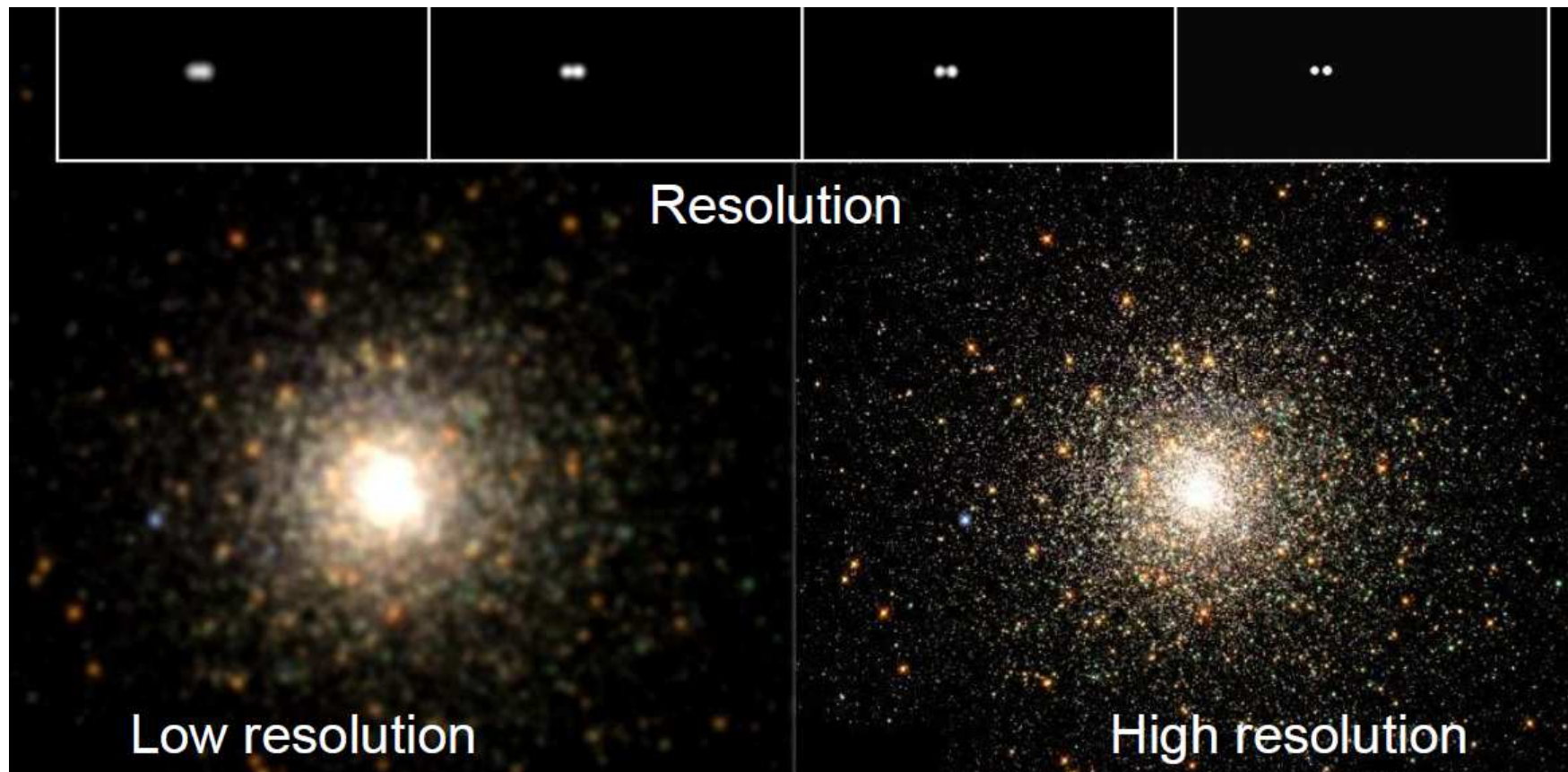
**Otvorová vada** – vada širokých osových optických svazků  
(porušena podmínka ideálního zobrazení bod - bod )



**Rostoucí velikost otvorové vady – degradace rozlišení 2 bodů**

# Základní aberace optických soustav

**Otvorová vada** – vada širokých osových optických svazků  
(porušena podmínka ideálního zobrazení bod - bod )

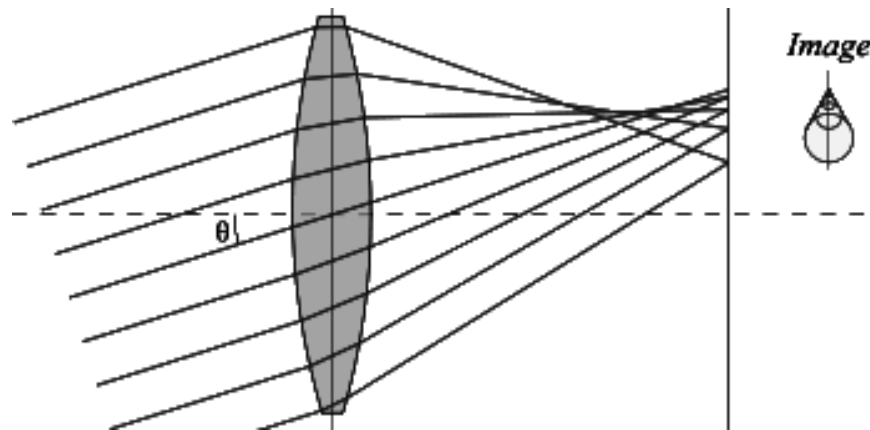


**Rostoucí velikost otvorové vady – degradace rozlišení 2 bodů**

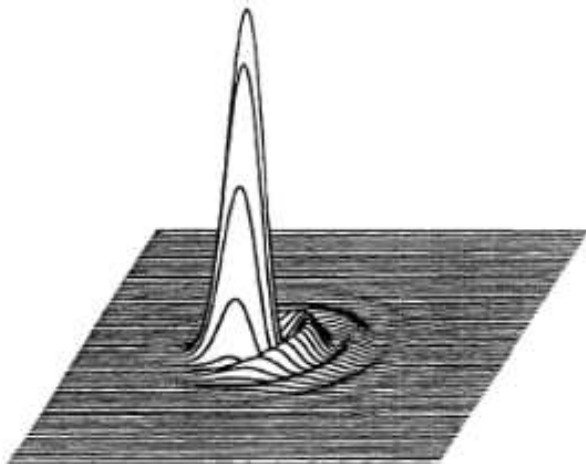
# Základní aberace optických soustav

## KOMA – vada širokých šikmých optických svazků

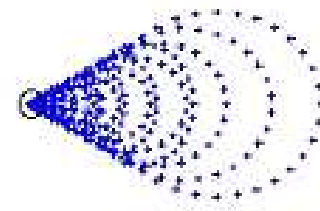
(porušena podmínka ideálního zobrazení bod - bod )



Paprsky se nesbíhají  
v jednom bodě



PSF 3D

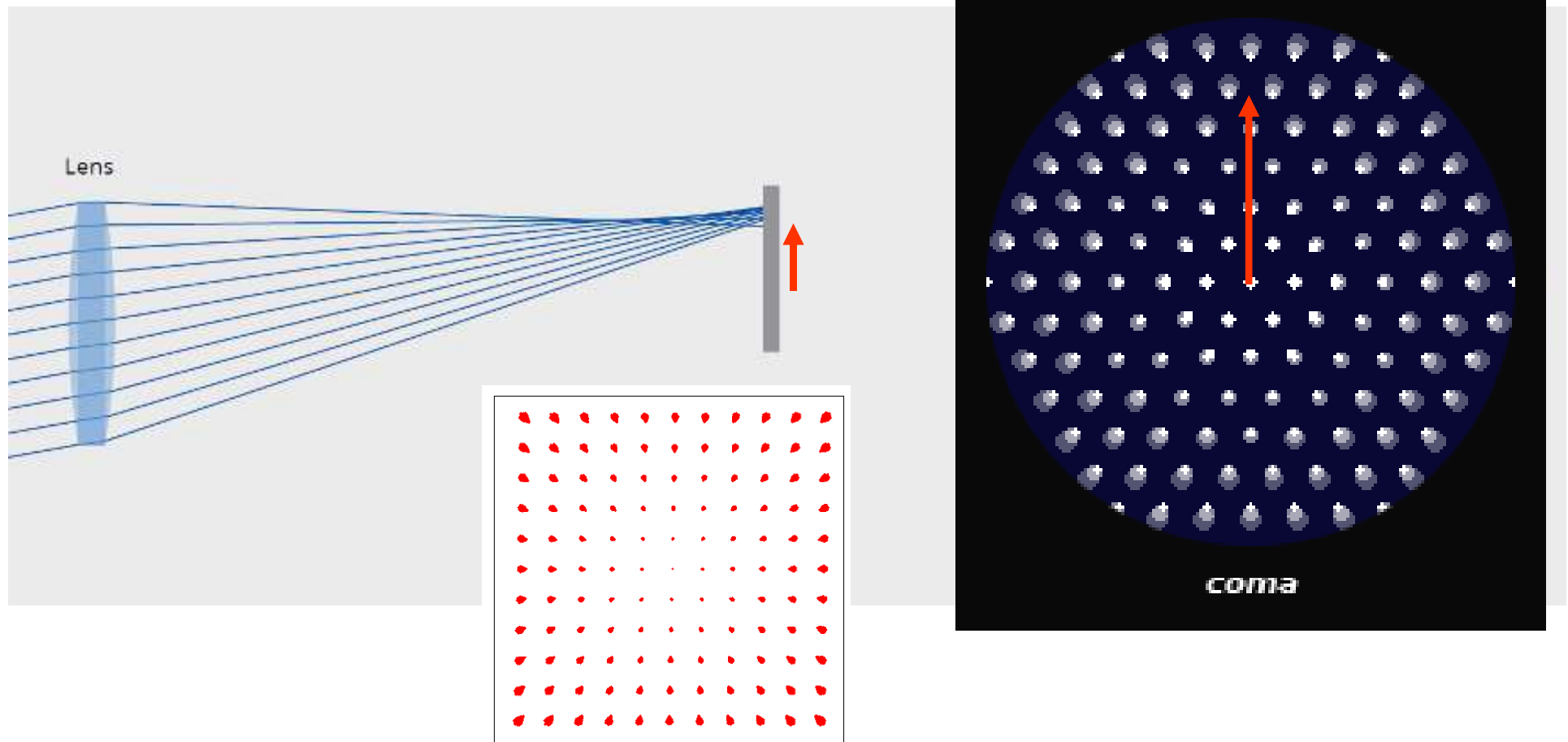


spot diagram

# Základní aberace optických soustav

**KOMA** – vada širokých šikmých optických svazků

(porušena podmínka ideálního zobrazení bod - bod )

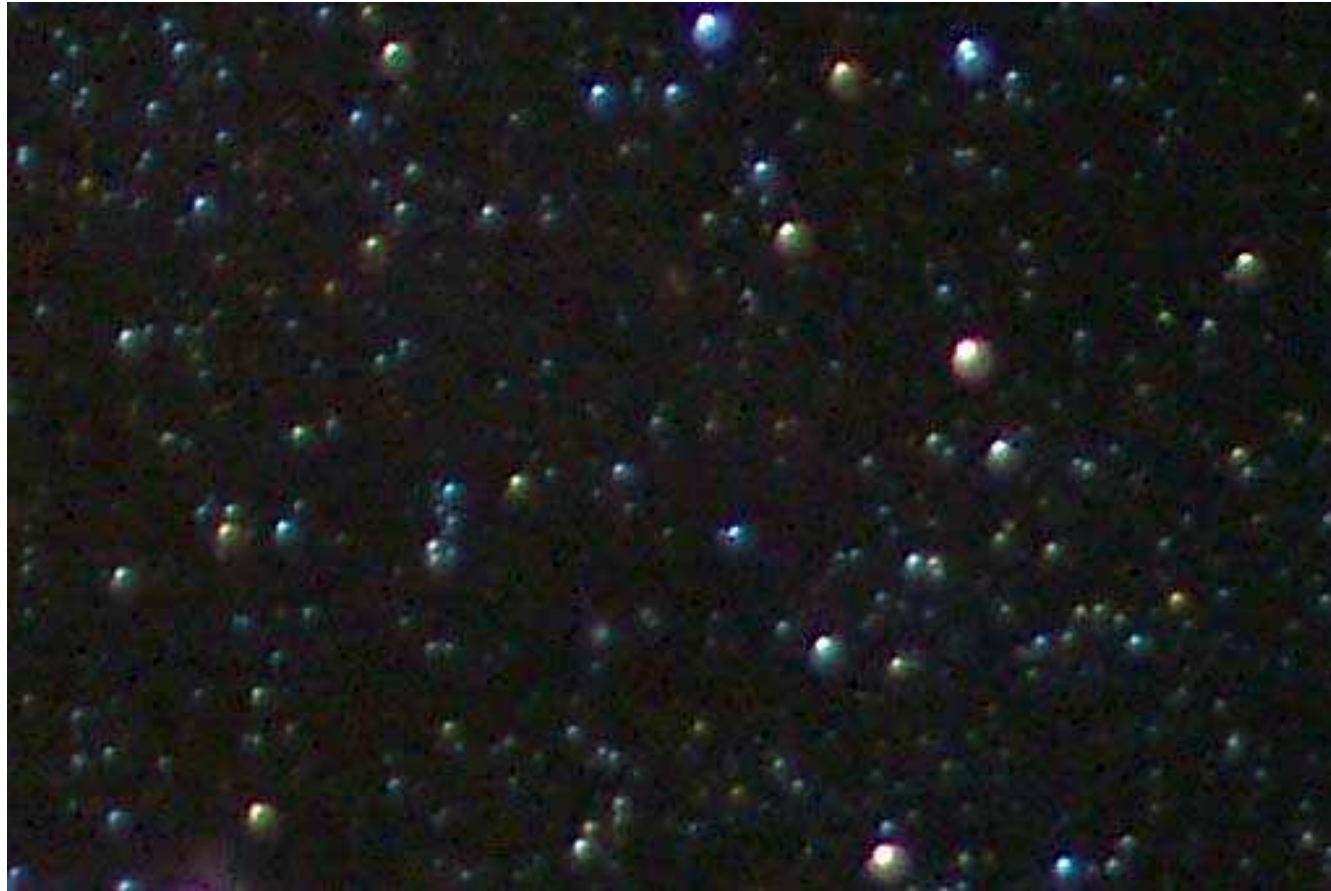




## Základní aberace optických soustav

**KOMA** – vada širokých šikmých optických svazků

(porušena podmínka ideálního zobrazení bod - bod )

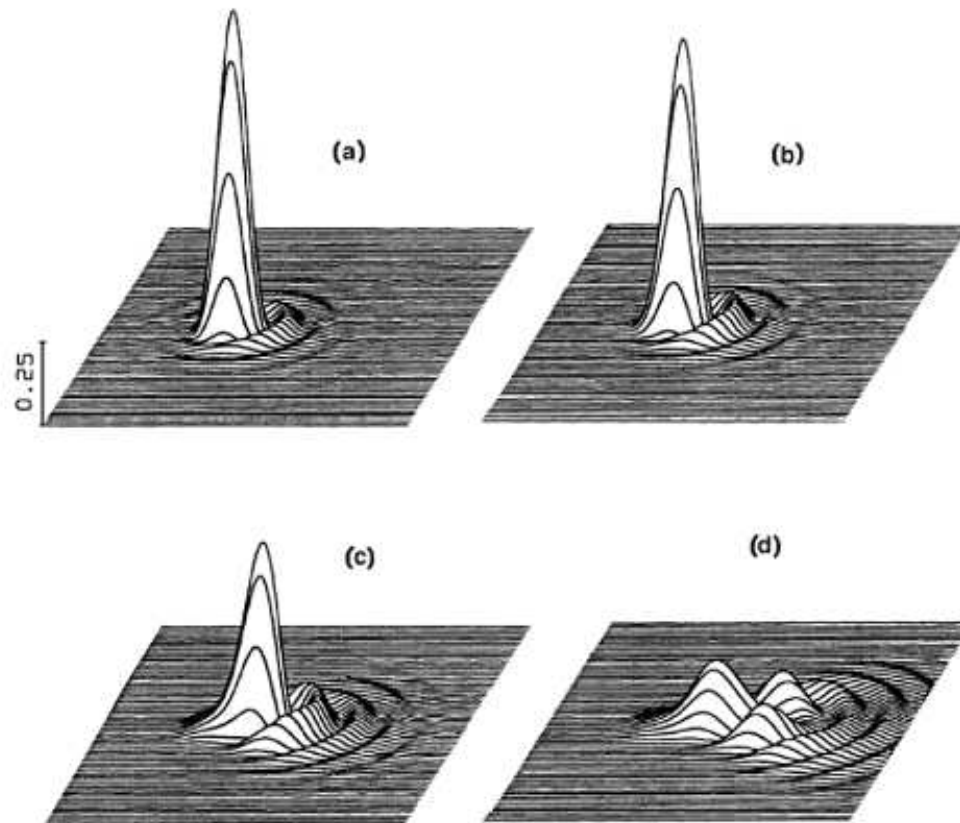


# Základní aberace optických soustav

**KOMA** – vada **širokých šikmých** optických svazků

(porušena podmínka ideálního zobrazení bod - bod )

## PSF vs. Third-order Coma

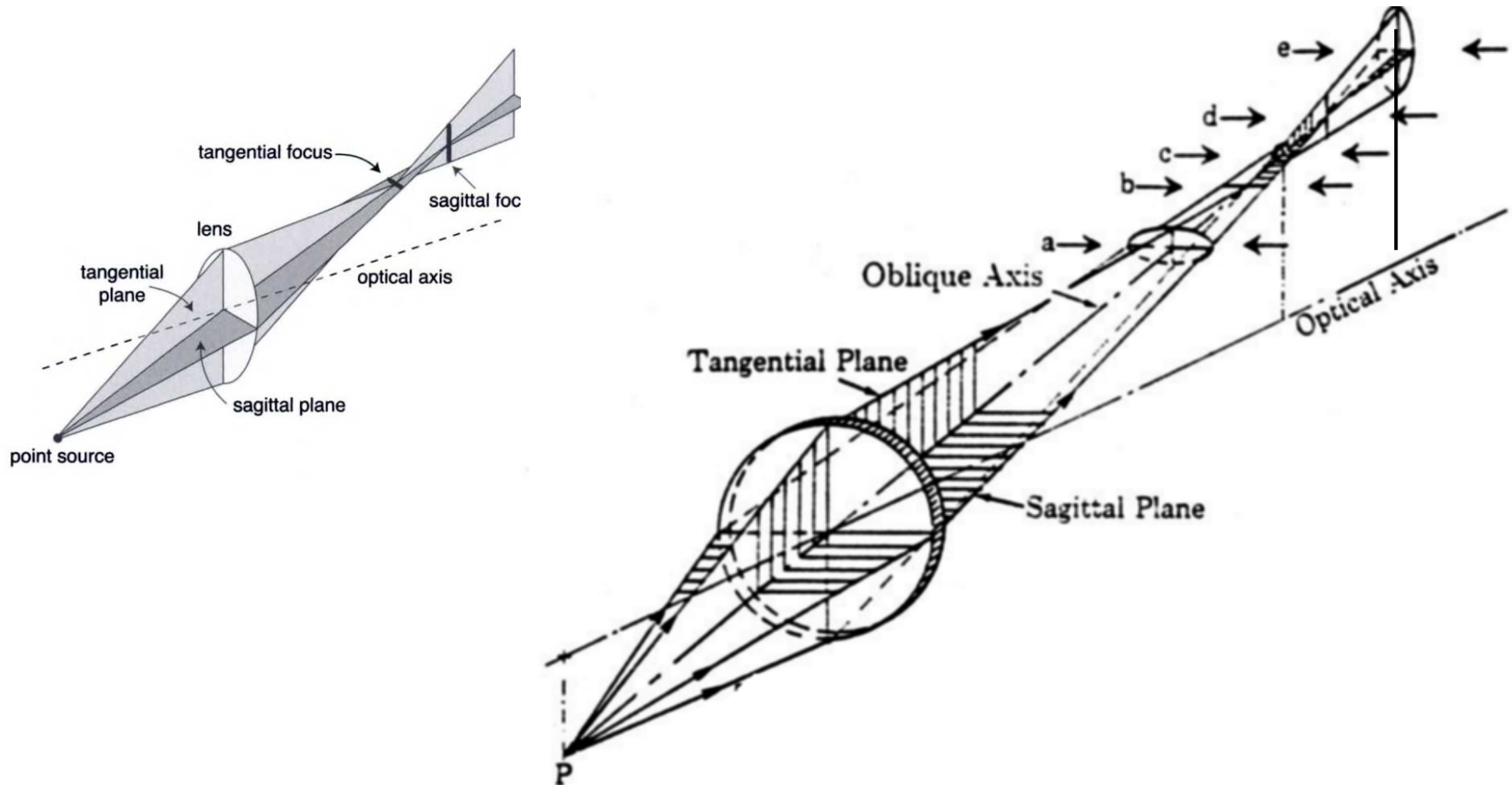


Rostoucí velikost komy

# Základní aberace optických soustav

## Astigmatismus – vada úzkých šikmých optických svazků

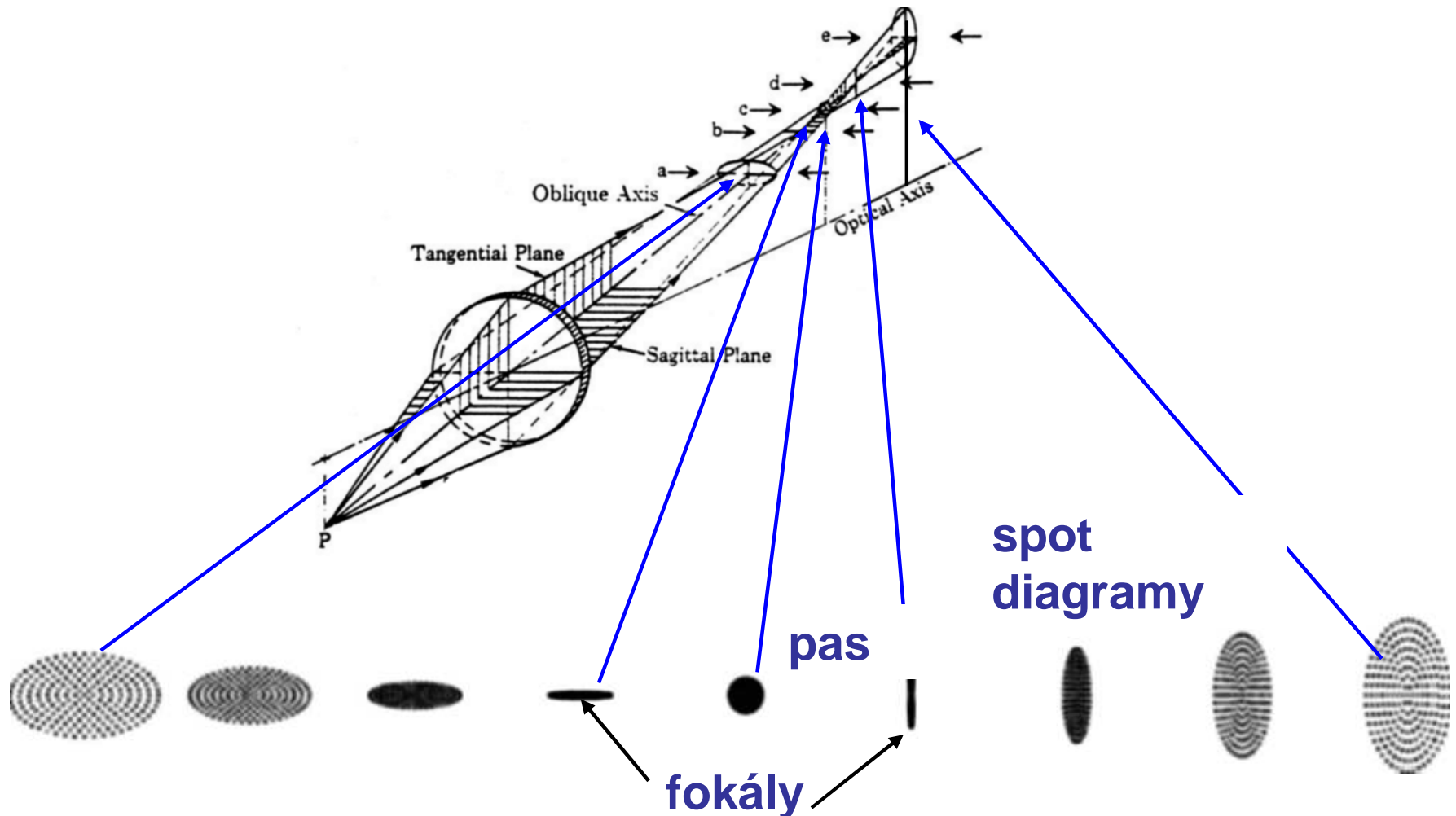
(porušena podmínka ideálního zobrazení bod - bod )



# Základní aberace optických soustav

**Astigmatismus** – vada **úzkých šikmých** optických svazků

(porušena podmínka ideálního zobrazení bod - bod )

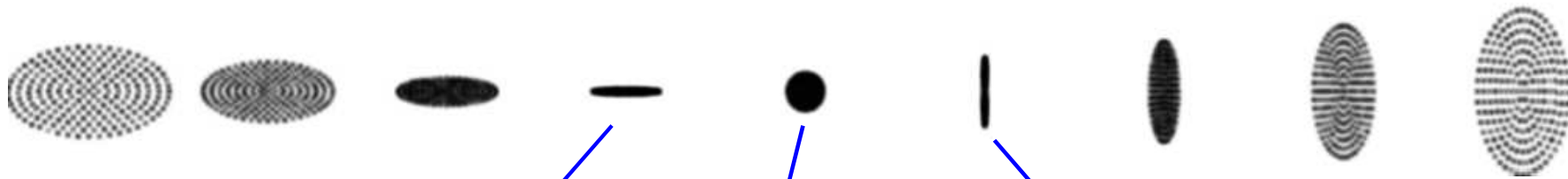


# Základní aberace optických soustav

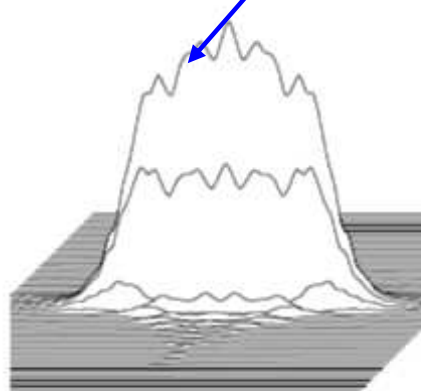
**Astigmatismus** – vada **úzkých šikmých** optických svazků

(porušena podmínka ideálního zobrazení bod - bod )

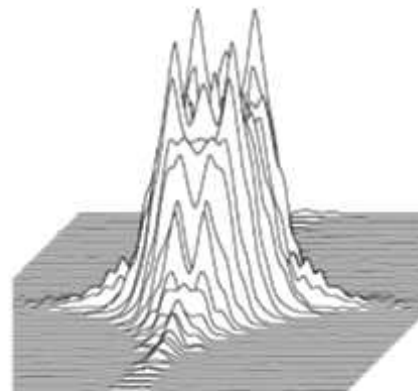
spot diagramy



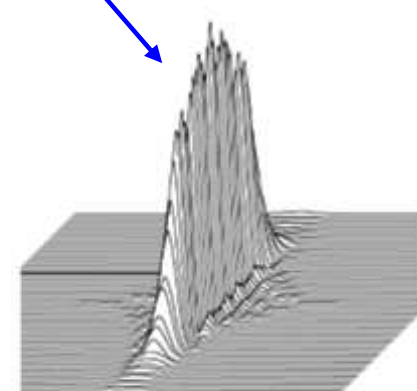
PSF



Tangential focus



Medial focus  
(best diffraction focus)

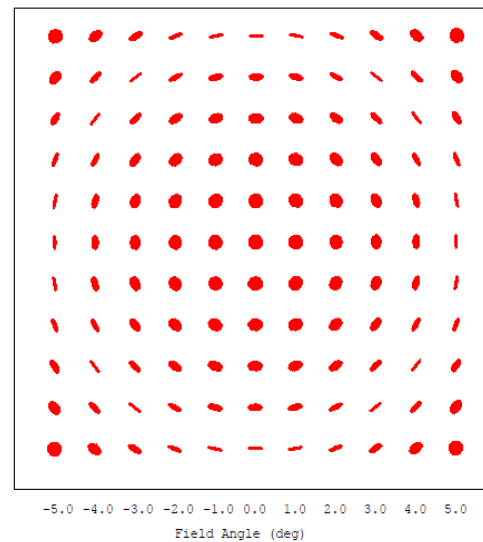
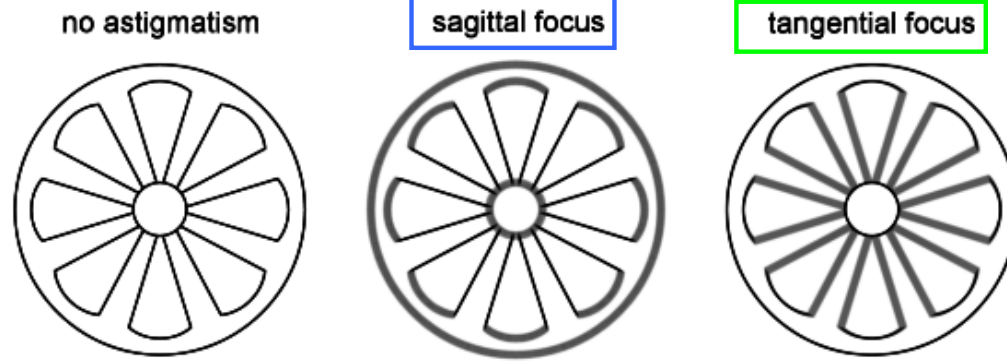
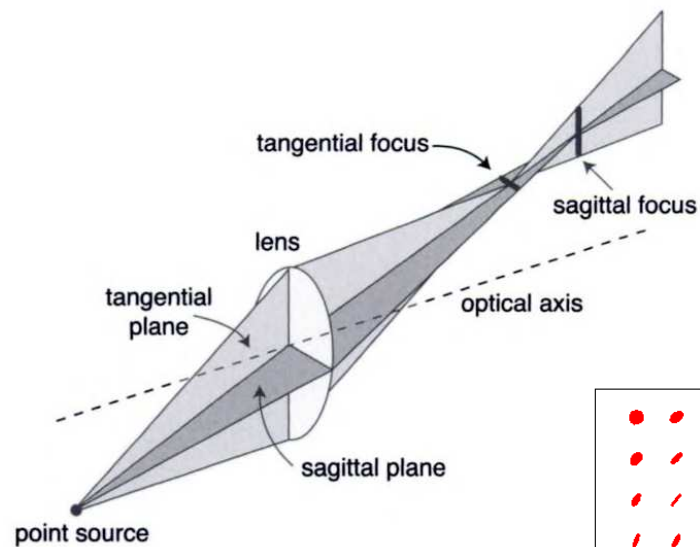


Sagittal focus

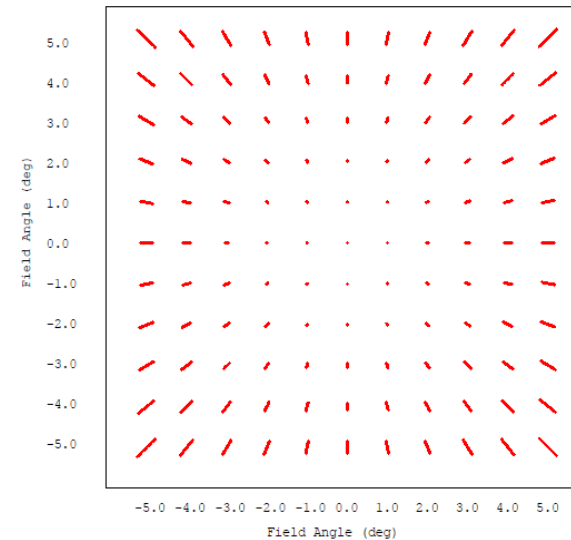
# Základní aberace optických soustav

## Astigmatismus – vada **úzkých šikmých** optických svazků

(porušena podmínka ideálního zobrazení bod - bod )



Tangential focus



Sagittal focus

# Základní aberace optických soustav

**Astigmatismus** – vada **úzkých šikmých** optických svazků

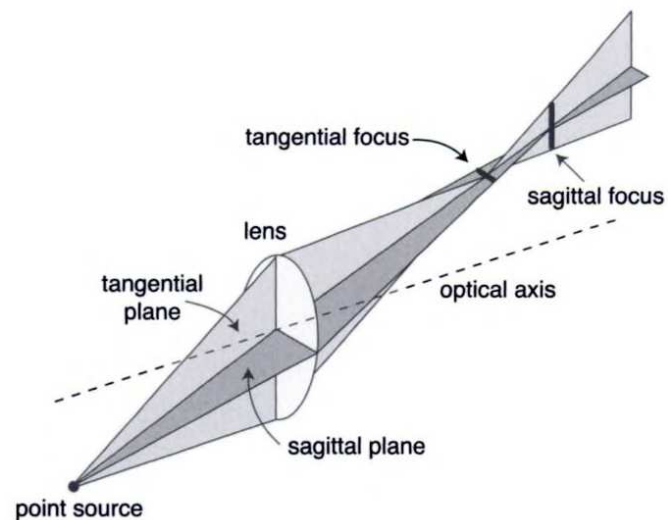
(porušena podmínka ideálního zobrazení bod - bod )

Un-aberrated Image

Tangential Focus

Medial Focus

Sagittal Focus

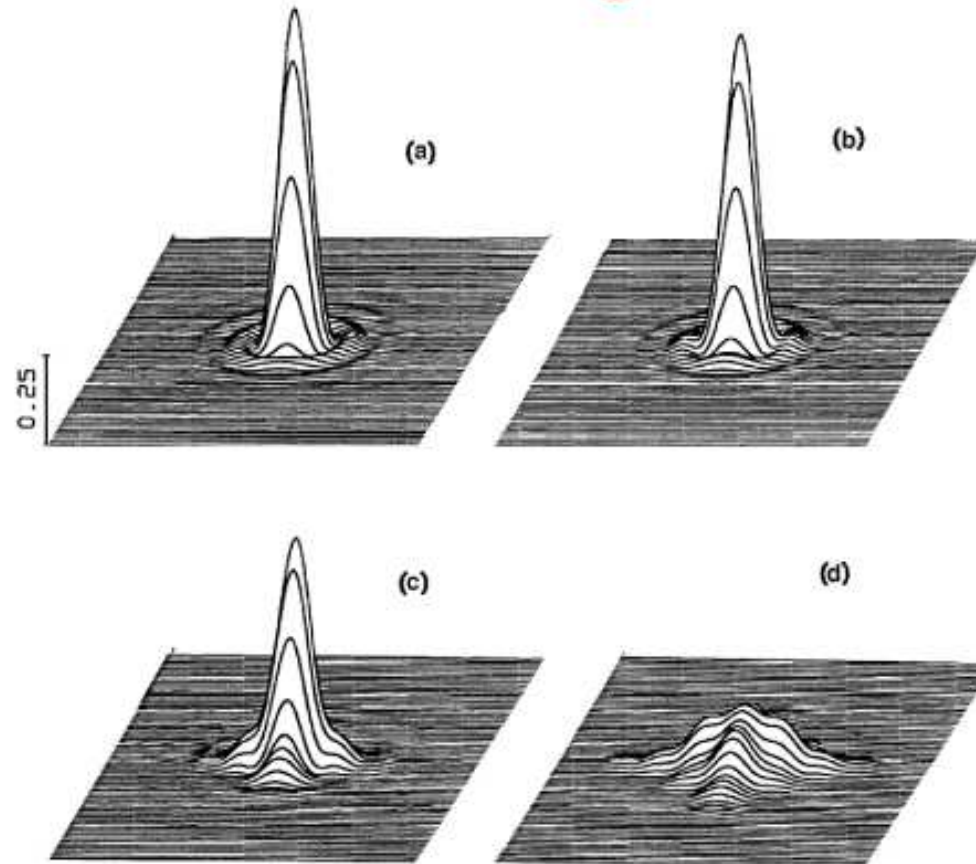


# Základní aberace optických soustav

**Astigmatismus** – vada **úzkých šikmých** optických svazků

(porušena podmínka ideálního zobrazení bod - bod )

## PSF vs. Astigmatism



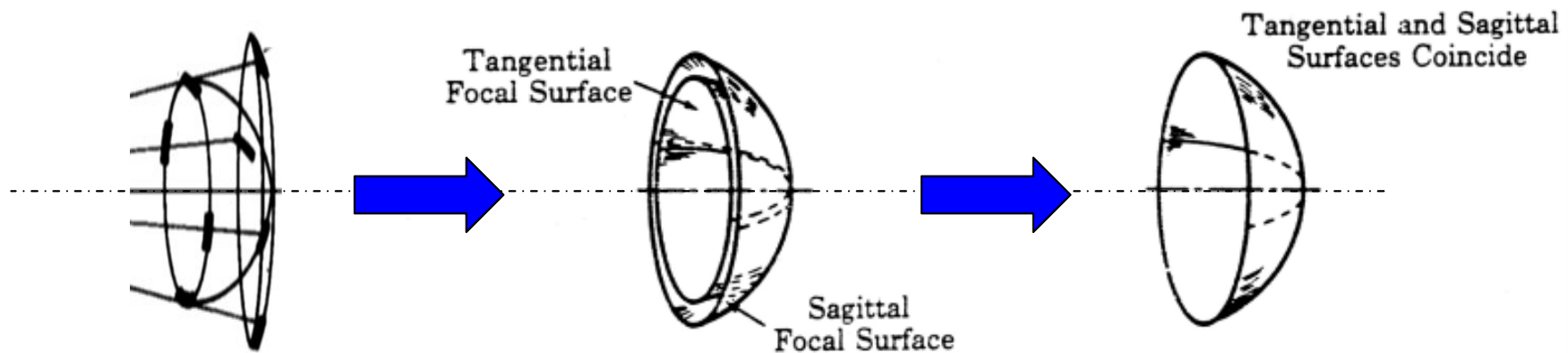
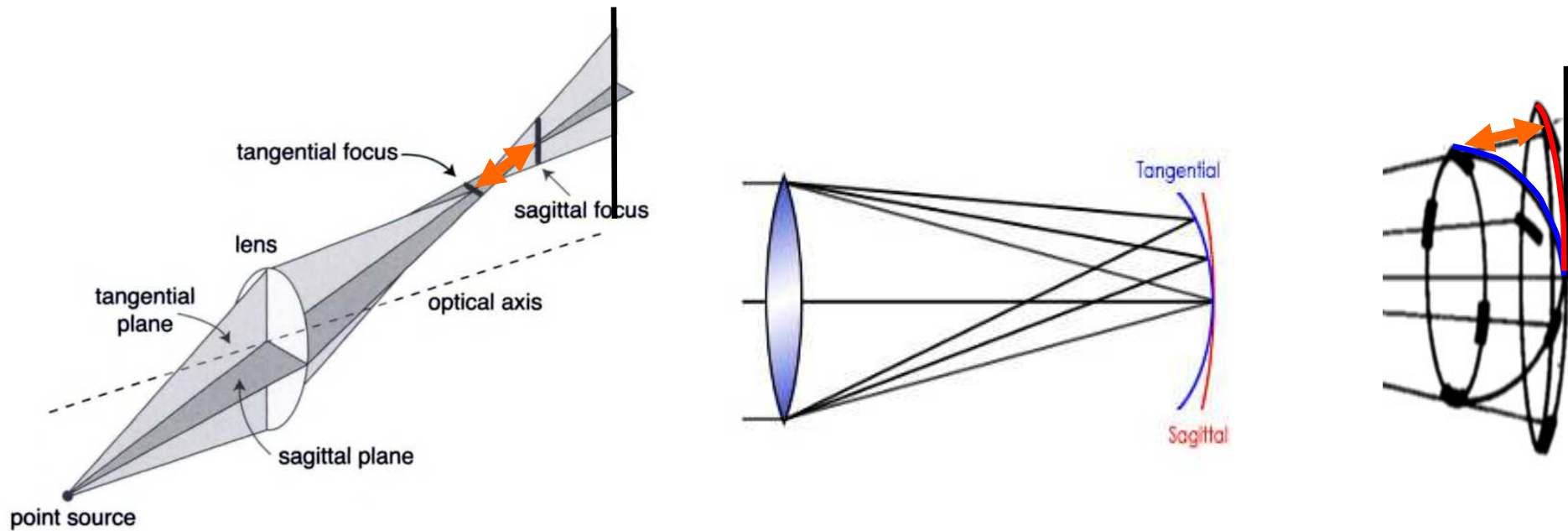
**Rostoucí velikost astigmatismu – medial fokus**

Palatka SLO/PA 2021



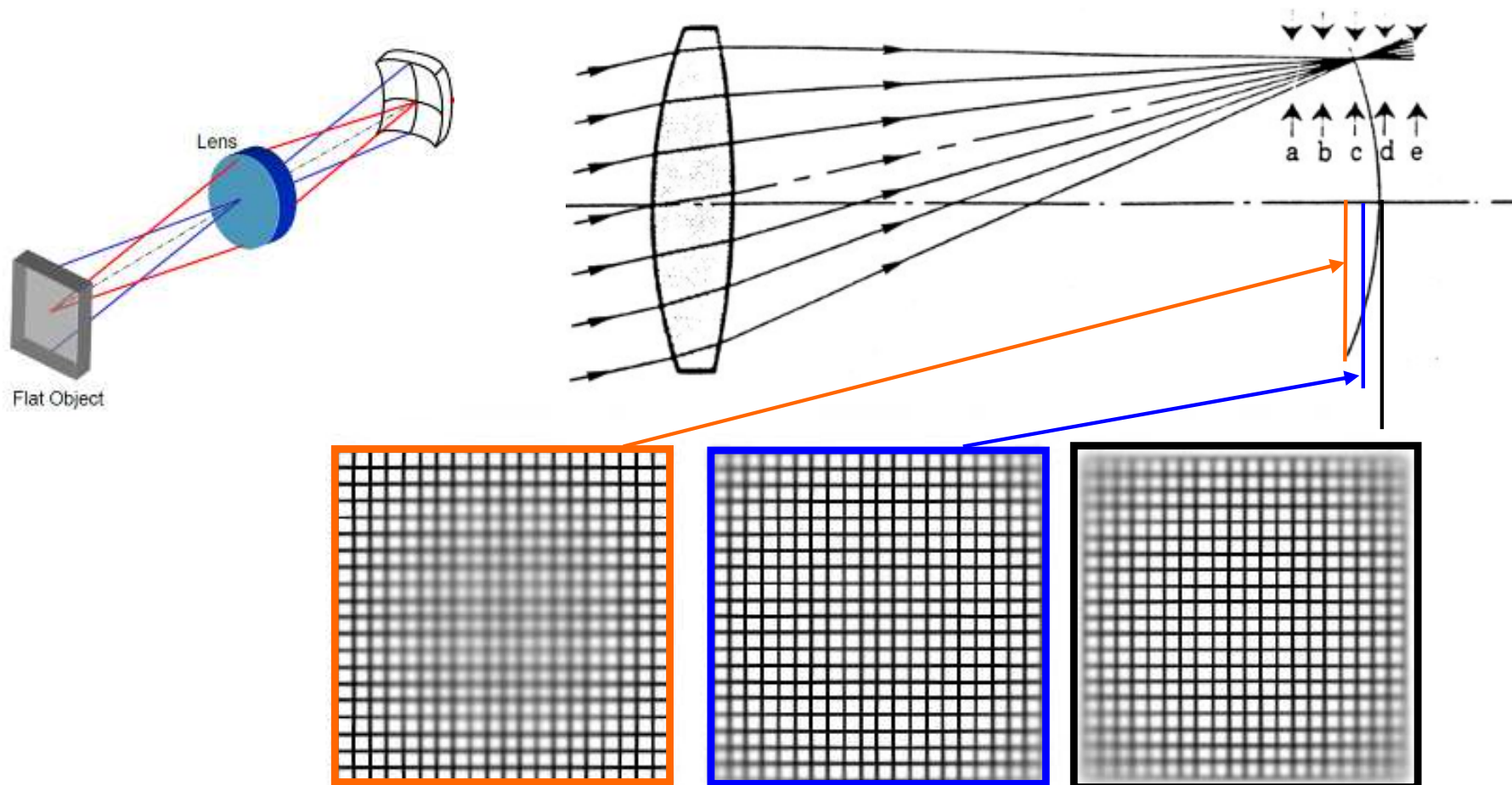
# Základní aberace optických soustav

## Nulový astigmatismus = křivost pole



# Základní aberace optických soustav

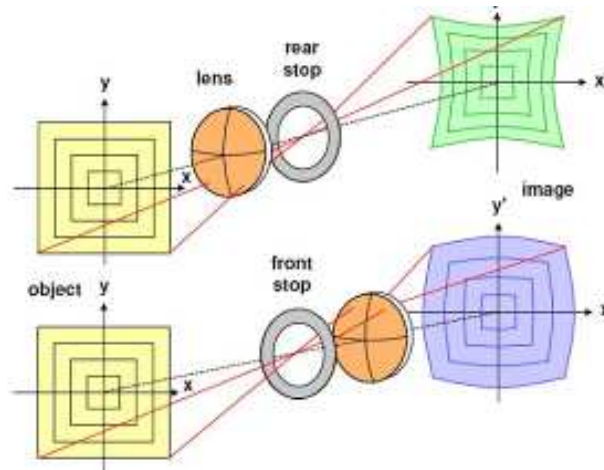
**Křivost pole** – vada **šikmých** optických svazků  
(porušena podmínka ideálního zobrazení **rovina - rovina**)



Body předmětu se zobrazují jako body, ale leží na kulové ploše. Kdyby byla zakřivená obrazová plocha, obraz bude ostrý.

# Základní aberace optických soustav

**Zkreslení** – vada **šikmých** optických svazků  
(porušena podmínka ideálního zobrazení **přímka - přímka** )



poduškové



soudkové



**Přímky předmětu se zobrazují jako ostré křivky (množiny bodů).  
Obraz je ostrý ale deformovaný**

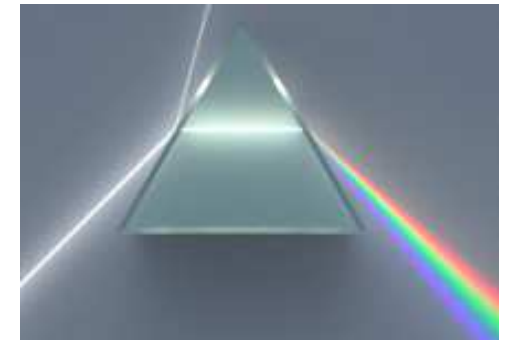
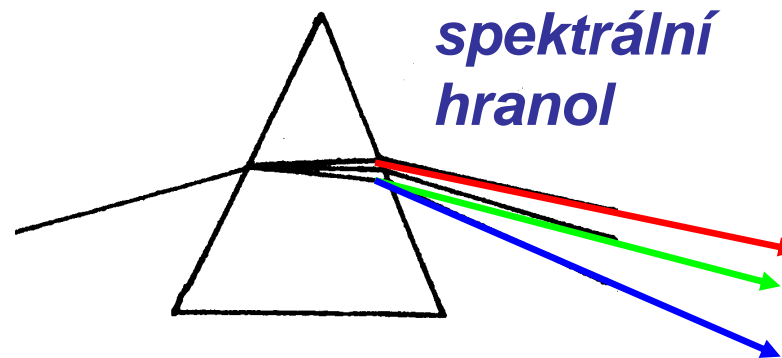
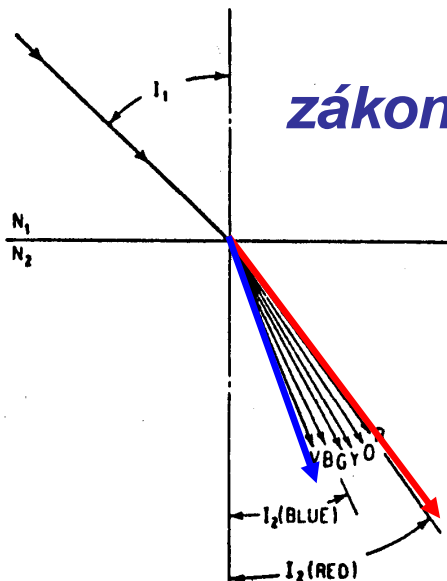
# Základní barevné aberace optických soustav

## Disperze optických materiálů

Index lomu není konstantní, ale závisí na vlnové délce záření = **disperze**.

*Díky disperzi optických materiálů se mění úhel lomu v závislosti na vlnové délce světla. Toho se využívá ve spektrálních přístrojích.*

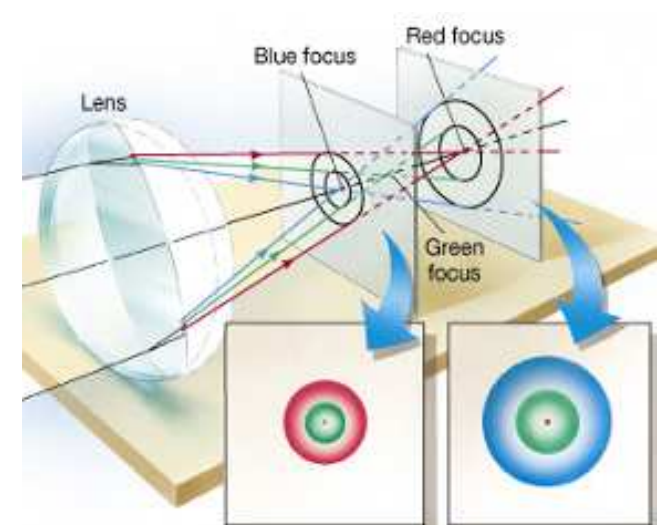
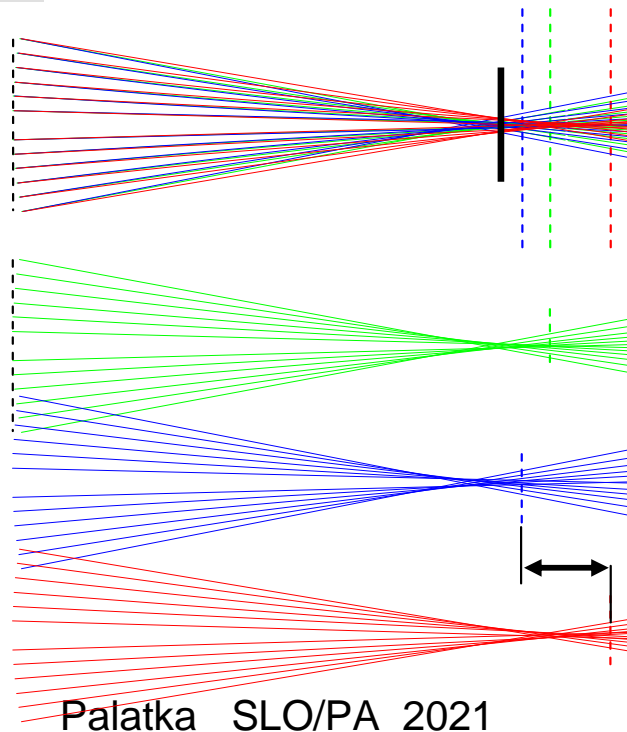
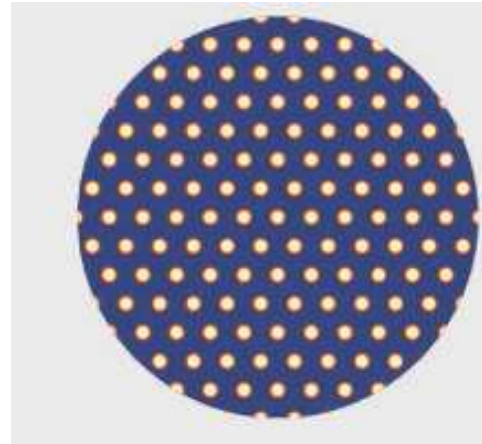
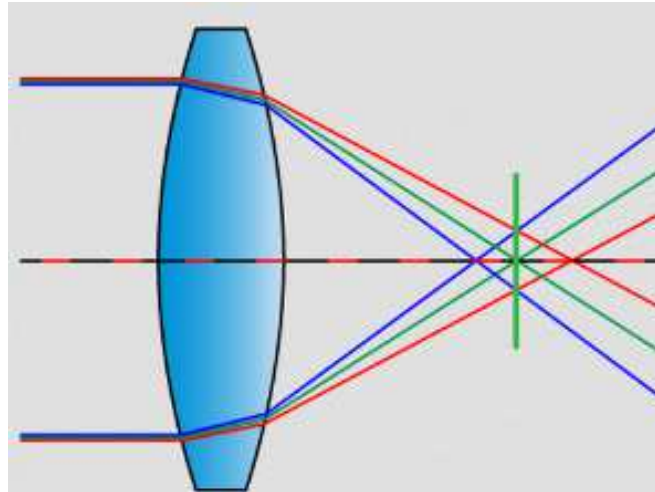
*Disperze bohužel vede k barevné degradaci obrazu v OS - barevným vadám.*



**Barevné vady se vyskytují již v paraxiálním prostoru.**

# Základní **barevné** aberace optických soustav

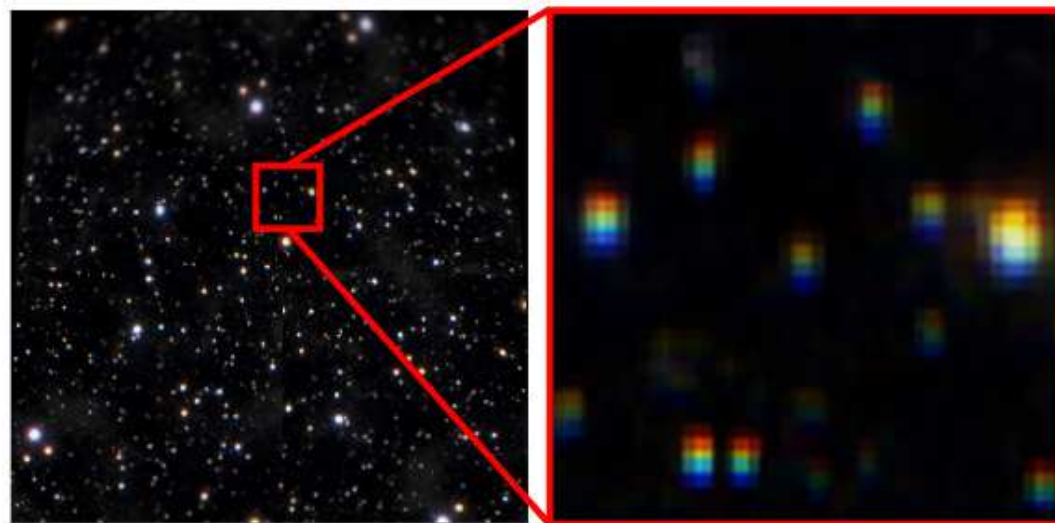
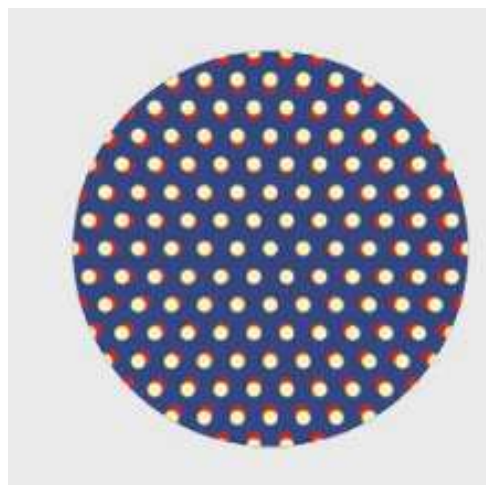
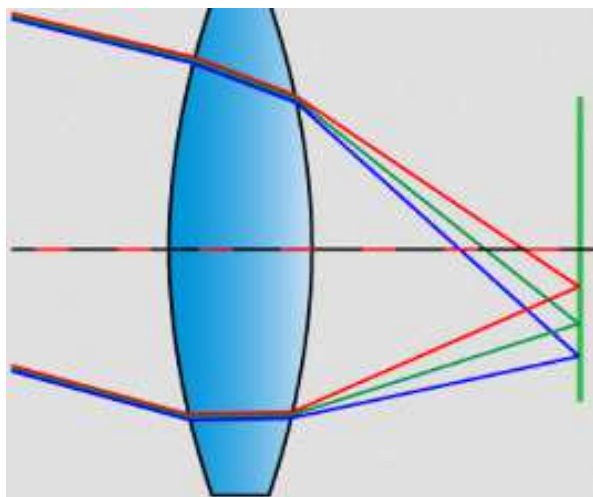
## Barevná vada **polohy**



**Barevná ohniska**

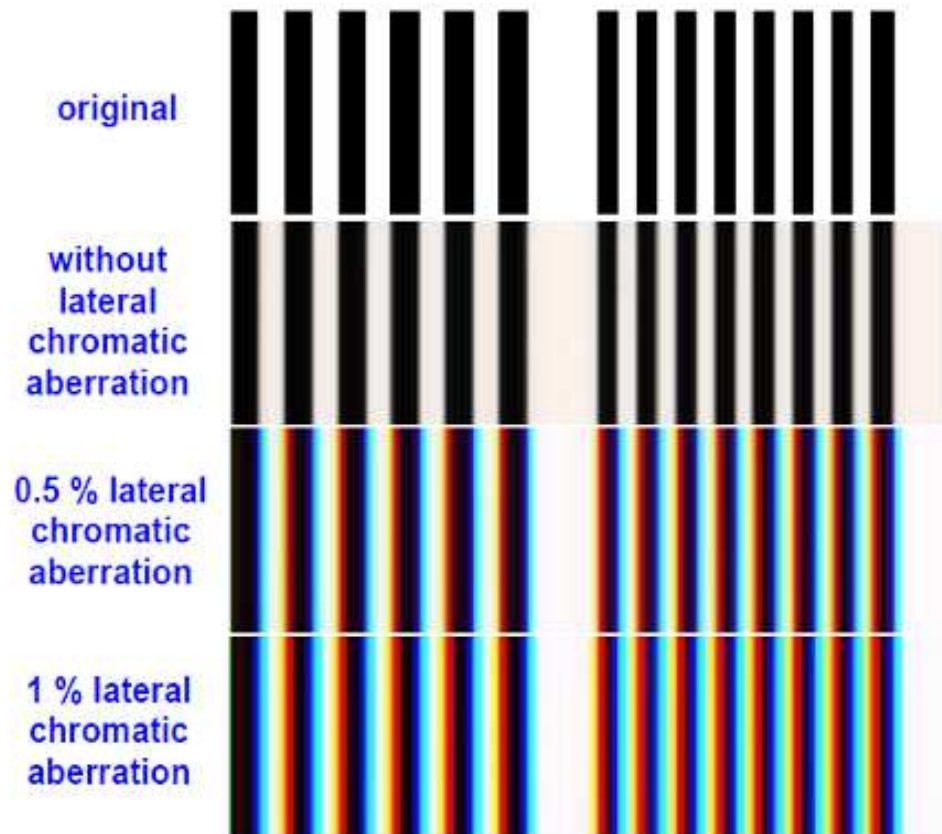
# Základní **barevné** aberace optických soustav

## Barevná vada **velikosti**



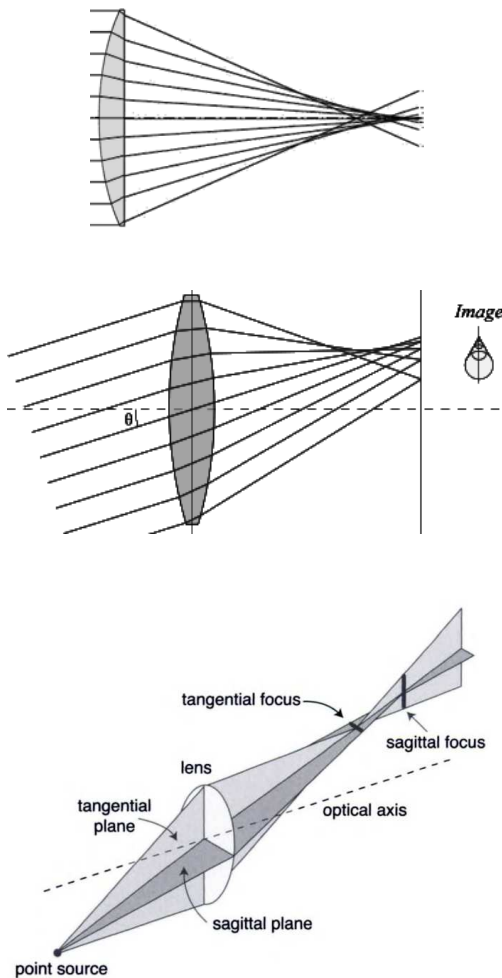
# Základní **barevné** aberace optických soustav

## Barevná vada **velikosti**



# Základní aberace optických soustav

## Spot diagramy - aberace



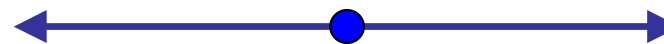
### Spherical Aberration



### Coma



### Astigmatism



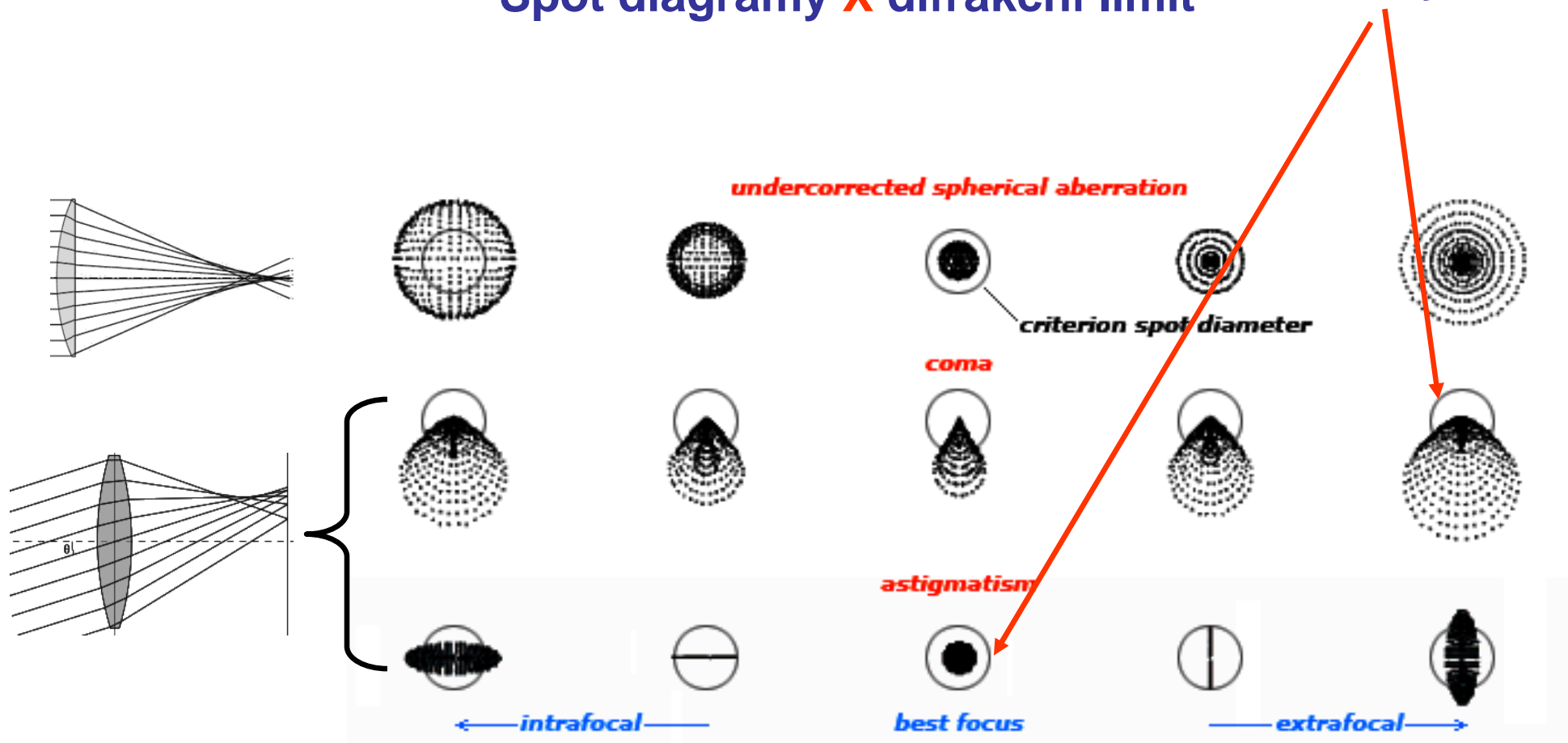
**defokusace obrazové roviny**



# Základní aberace optických soustav

## Spot diagramy X difrakční limit

Airyho disk



diffraction limited

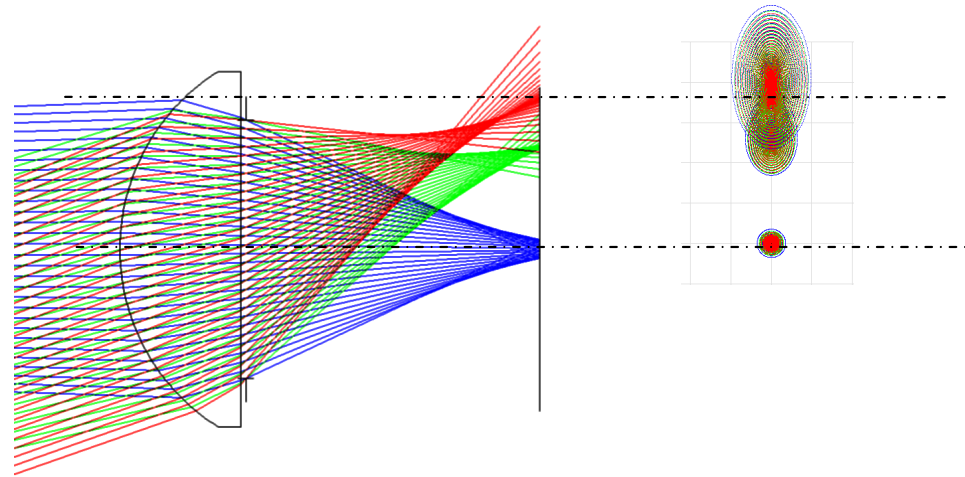
Cílem návrhů optických soustav je dostat velikost spotů na hodnoty srovnatelné s Airyho diskem.

# Základní aberace optických soustav

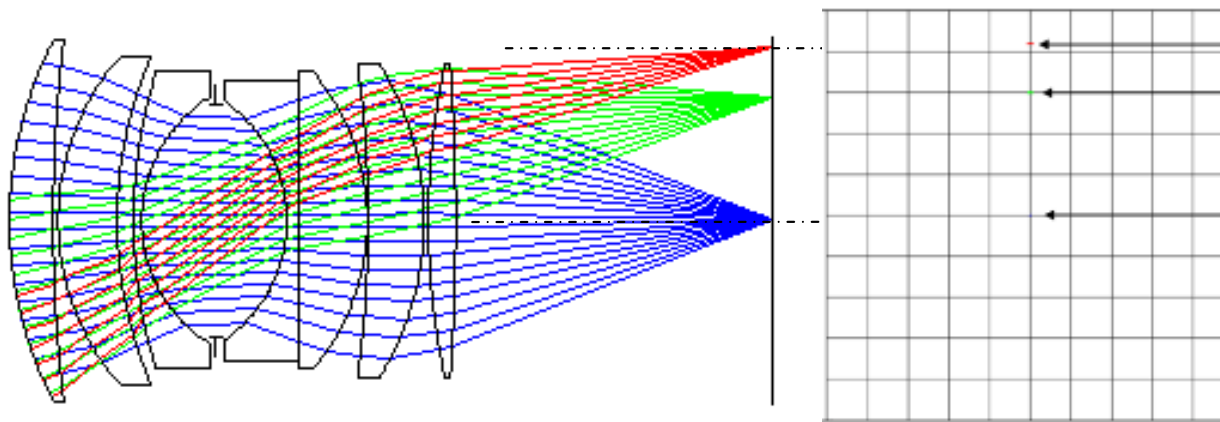
## Spot diagramy

„Stejné“ soustavy :  $f' = 50\text{mm}$ ;  $\text{FOV} = 44^\circ$ ;  $c = 1.2$

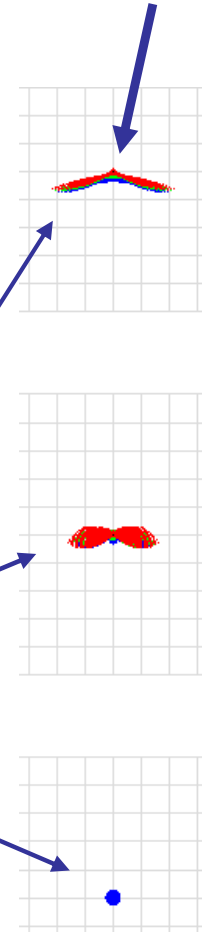
singlet



Double Gauss objektiv

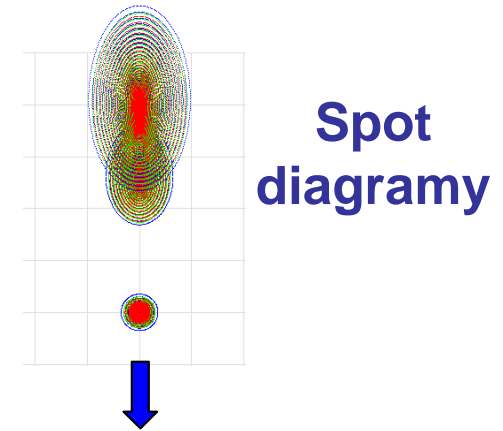
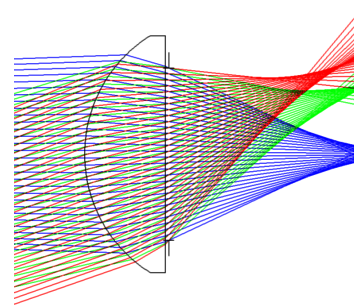
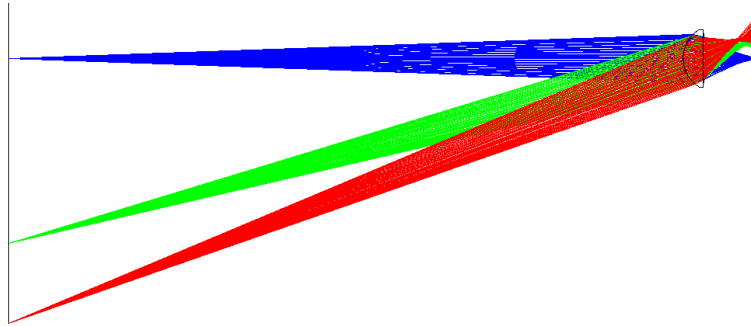


MIX  
mimo-osových  
vad



Cílem návrhů optických soustav je dostat velikost spotů na hodnoty srovnatelné s Airyho diskem.

# Základní aberace optických soustav singlet



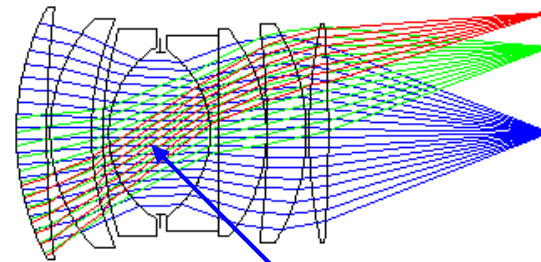
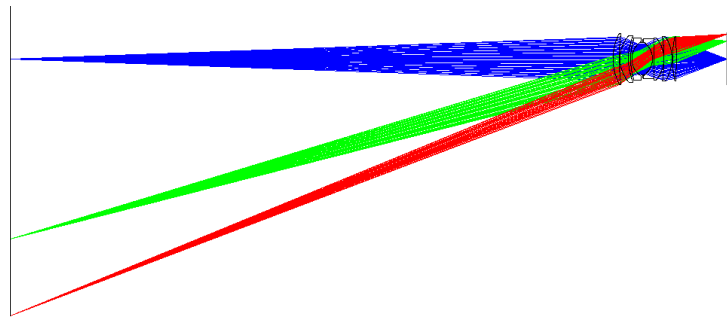
**předmět**



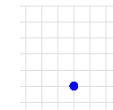
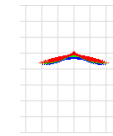
**obraz**

# Základní aberace optických soustav

## Double Gauss objektiv



vignetace



Spot  
diagramy

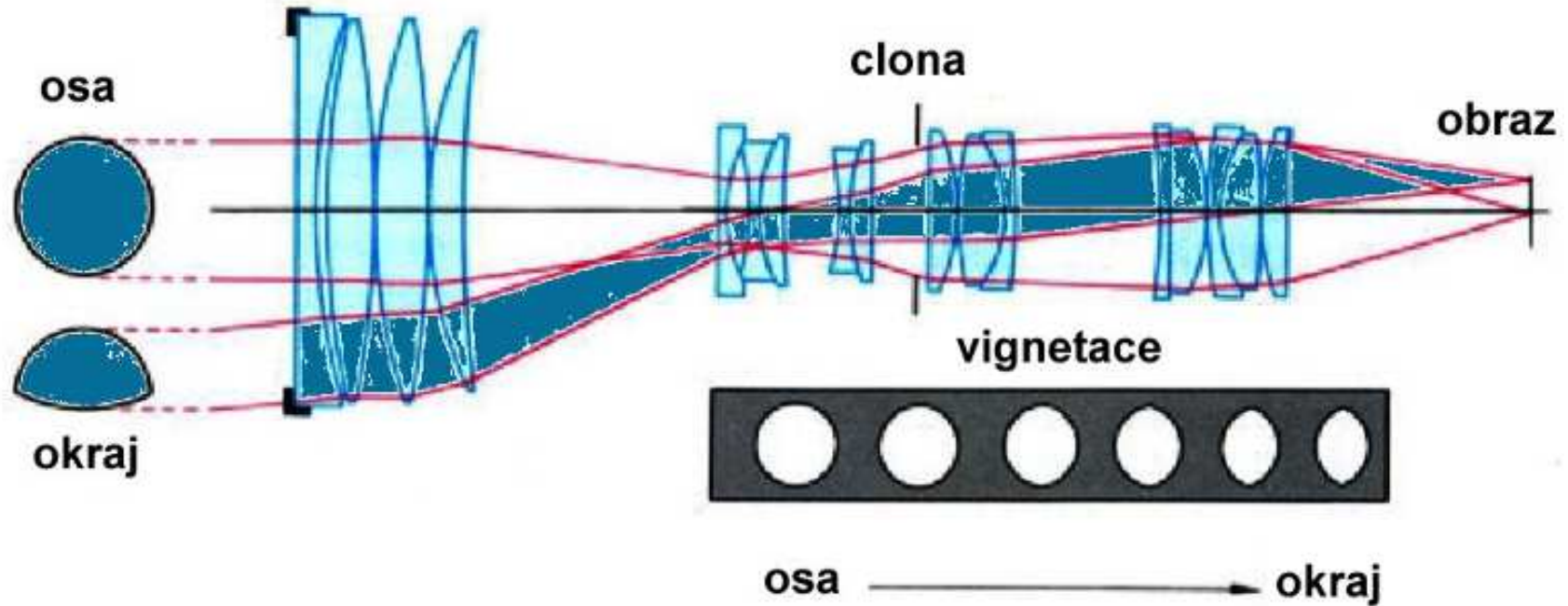


předmět



obraz

## Vignetace - složitější optická soustava

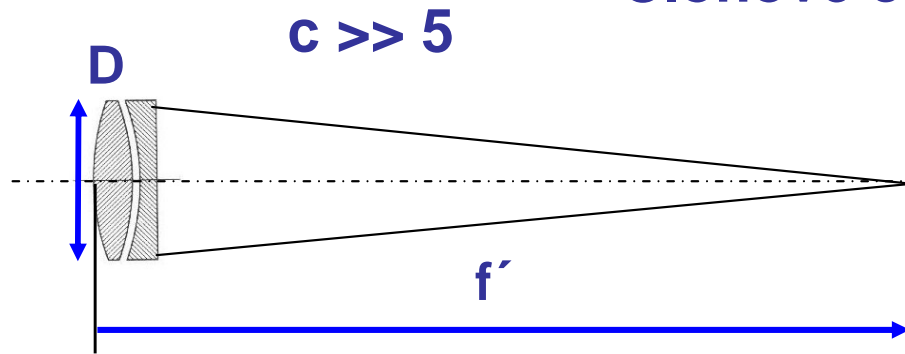


***Mimo-osové svazky jsou odcláněny  
objímkami čoček***

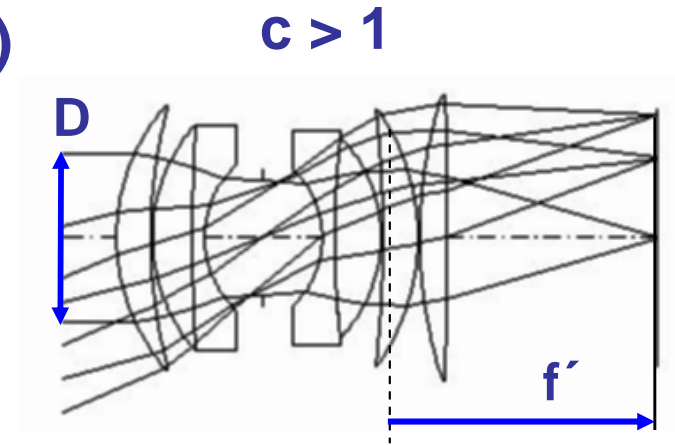
# Zobrazovací optické systémy

## Základní členění

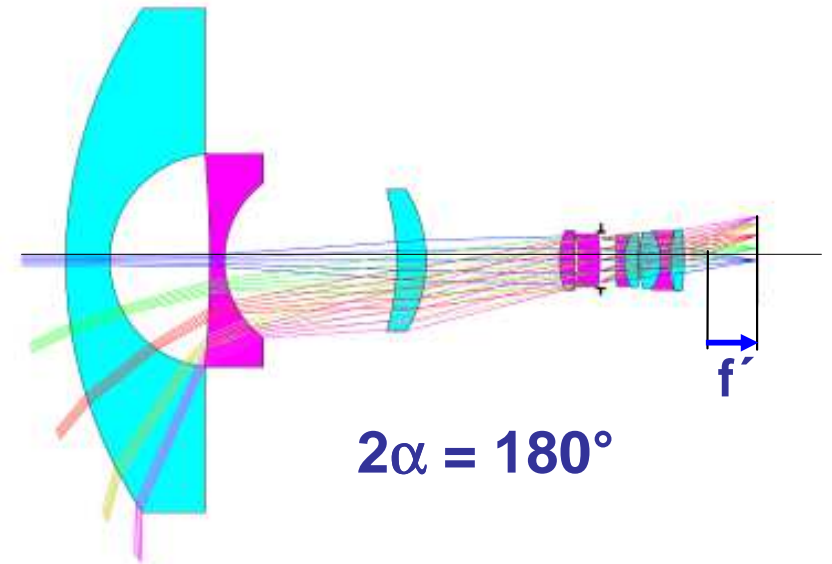
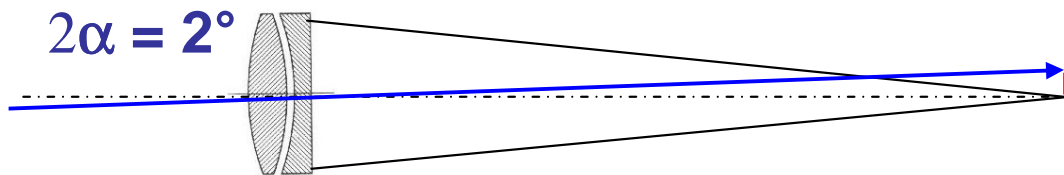
### Clonové číslo (Světelnost)



$$c = f'/D$$

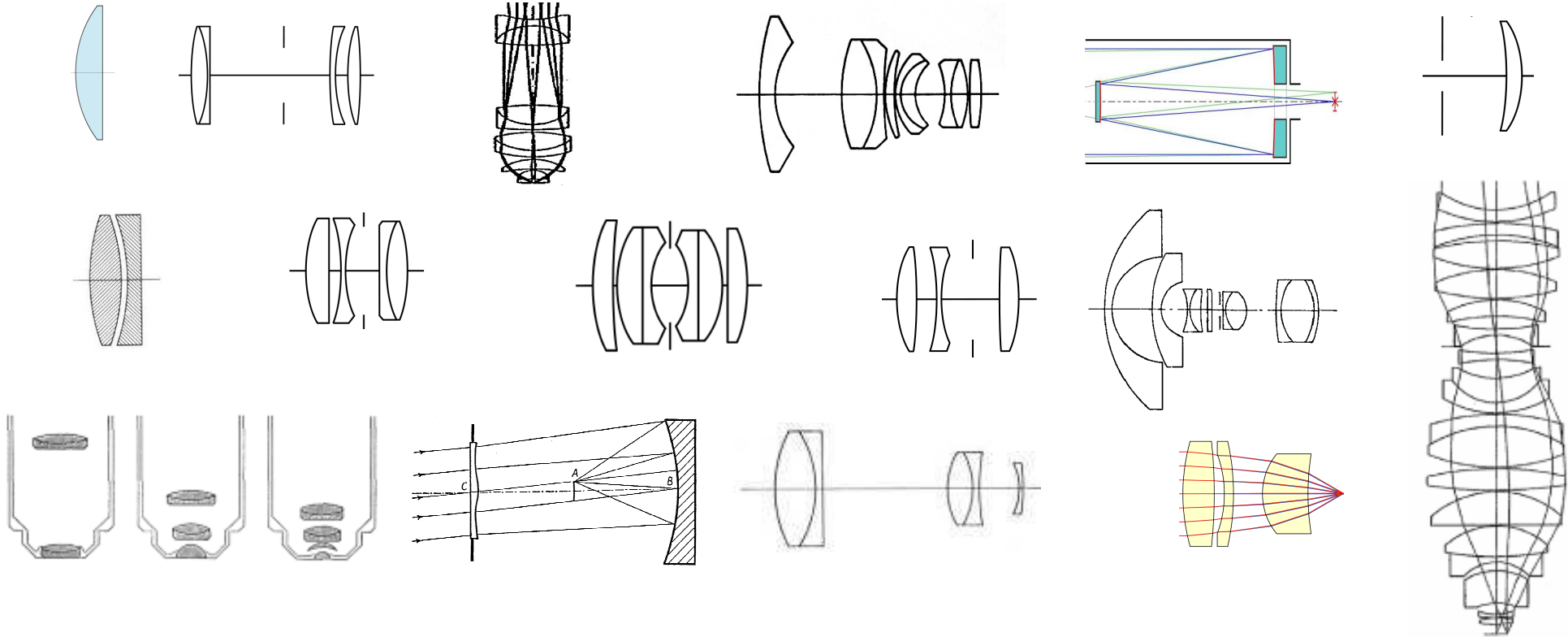


### Zorné pole



# Zobrazovací optické systémy

## Současnost



**Cílem návrhů optických soustav je dostat velikost spotů na hodnoty srovnatelné s Airyho diskem.**

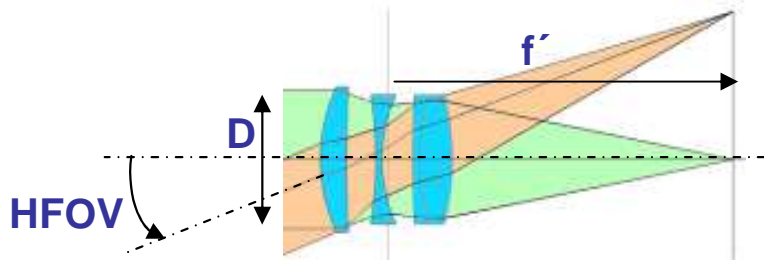
**S růstem požadavků na clonové číslo (světelnost) a zorné pole obecně roste počet optických členů optické soustavy.**

coma

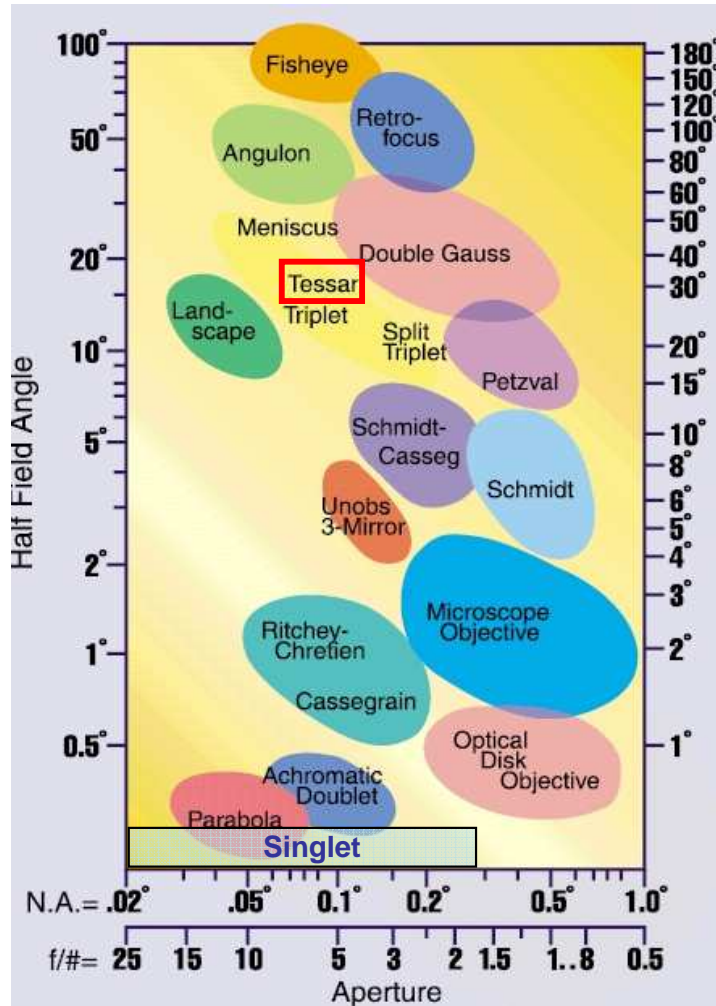


# Zobrazovací optické systémy

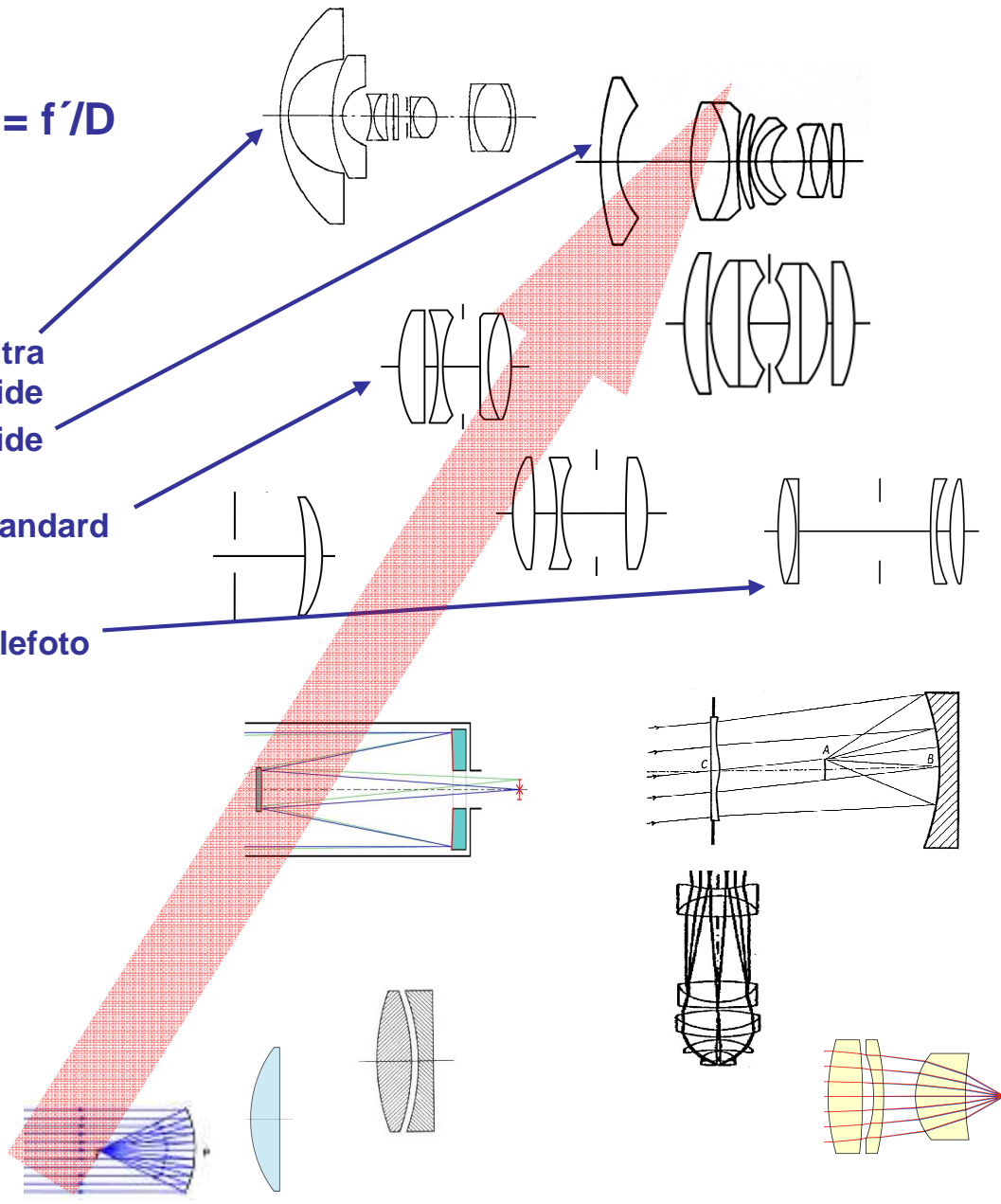
## Členění optických soustav – clonové číslo + zorné pole



$$c = f'/D$$



Ultra wide wide  
standard  
telefoto



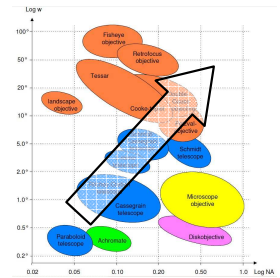
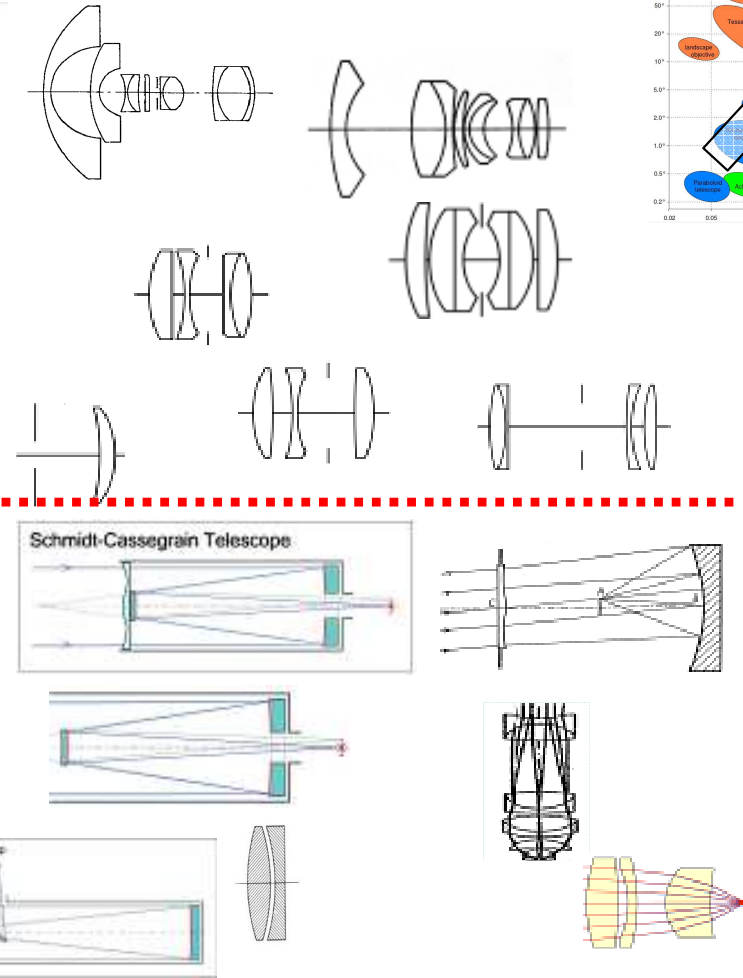
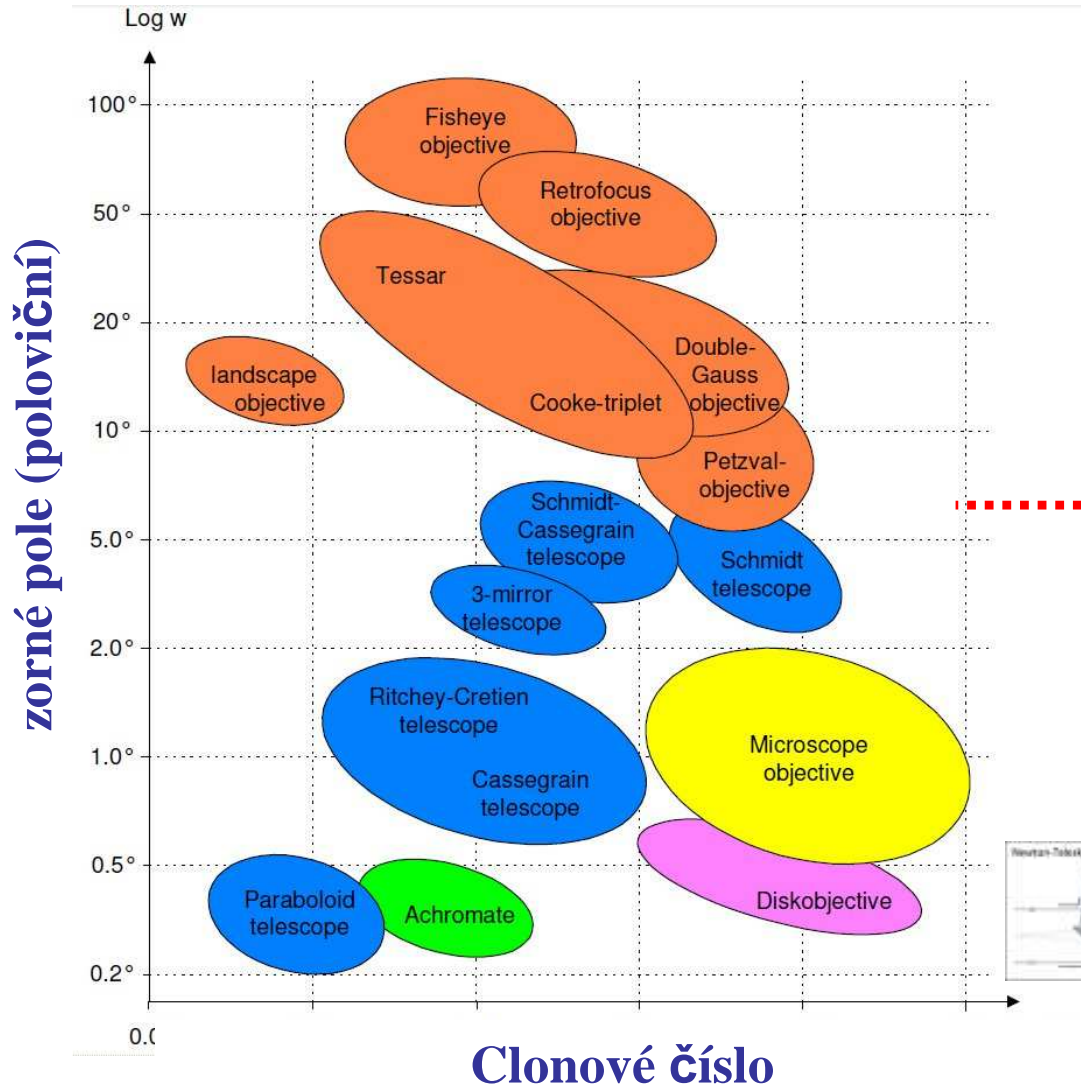
P. Smith: Modern optical engineering  
P. Matka SLO/PA 2021



# Optické zobrazovací soustavy

## Diagram clonové číslo – zorné pole

**Složitost soustavy**

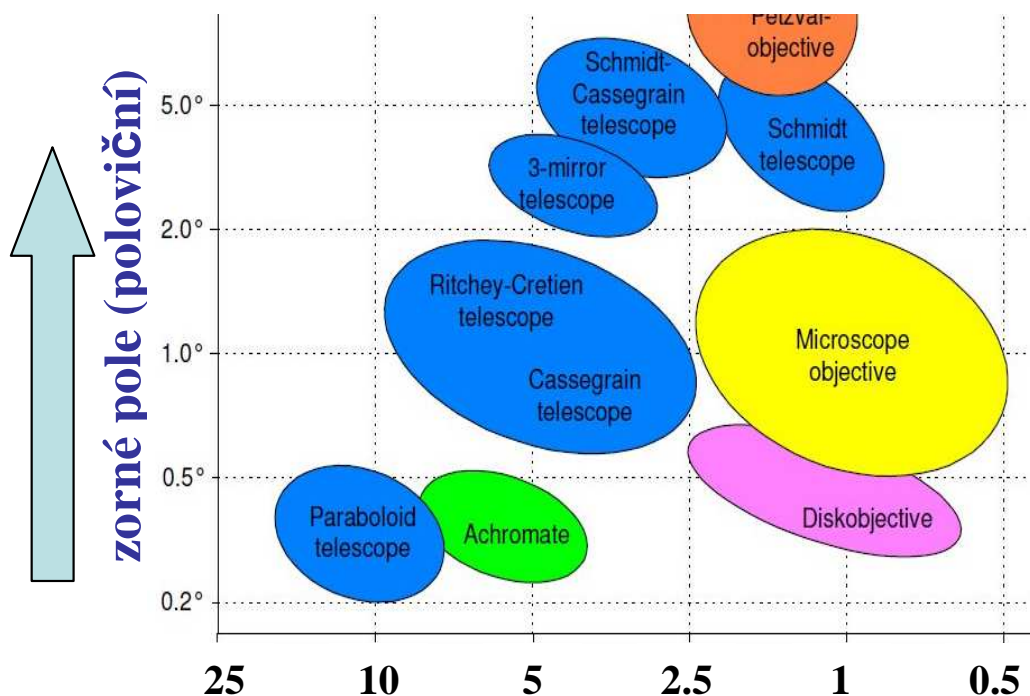


**Korekce aberací  
různá !**

**Modré bubliny = teleskopy**

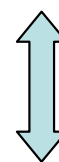
# Optické soustavy teleskopů

## Diagram clonové číslo – zorné pole

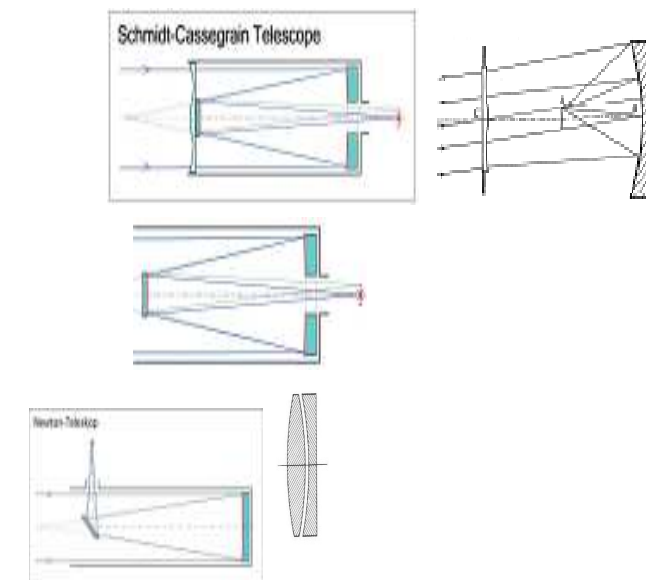


### Pozorování

kosmický  
prostor  
astrofoto



planety  
hvězdy



### Clonová čísla teleskopů

- ... f/4 – f/6 malá
- ... f/7 – f/11 standardní
- ... f/12 – velká

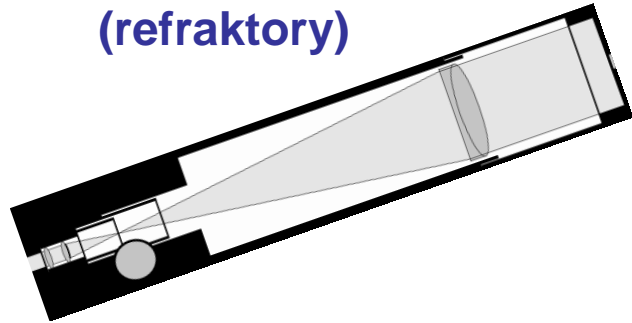
Orientační hodnoty

### Zorná pole teleskopů (polovina)

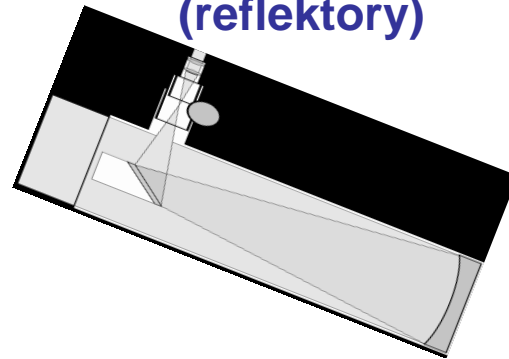
- ... 0.1° – 0.2° malá
- ... 0.5° - 1° standardní
- ... 2° – velká

# Hlavní členění teleskopů podle konstrukčních prvků

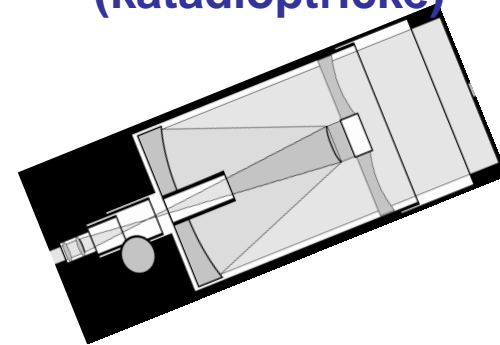
Čočkové  
(refraktory)



Zrcadlové  
(reflektory)



Zrcadlo-čočkové  
(katadioptrické)



## Příklady konstrukcí teleskopů pro „amatérskou“ astronomii

