



# GEOMETRICKÁ OPTIKA II

# Obsah

- Optické vady
  1. Optické vady optických soustav, rozdělení, definice.
  2. Otvorová vada.
  3. Korekce otvorové vady.



Ničeho se v životě nemusíme bát  
- jen to pochopit!

Byla významná vědkyně polského původu, která většinu života působila ve Francii. Zabývala se výzkumy v oblasti fyziky a chemie.

K jejím největším úspěchům patří práce ohledně teorie radioaktivity, technika dělení radioaktivních izotopů a objev dvou nových chemických prvků: radia a polonia. Pod jejím osobním vedením byly též prováděny první výzkumy léčby rakoviny pomocí radioaktivity.

Dvakrát byla vyznamenána Nobelovou cenou. Poprvé v roce 1903 z fyziky spolu s manželem Pierrem Curie za výzkumy radioaktivity a jejím objevitelem Henri Becquerelem, a podruhé v roce 1911 z chemie za izolaci čistého radia.

**Maria Curie-  
Skłodowska**

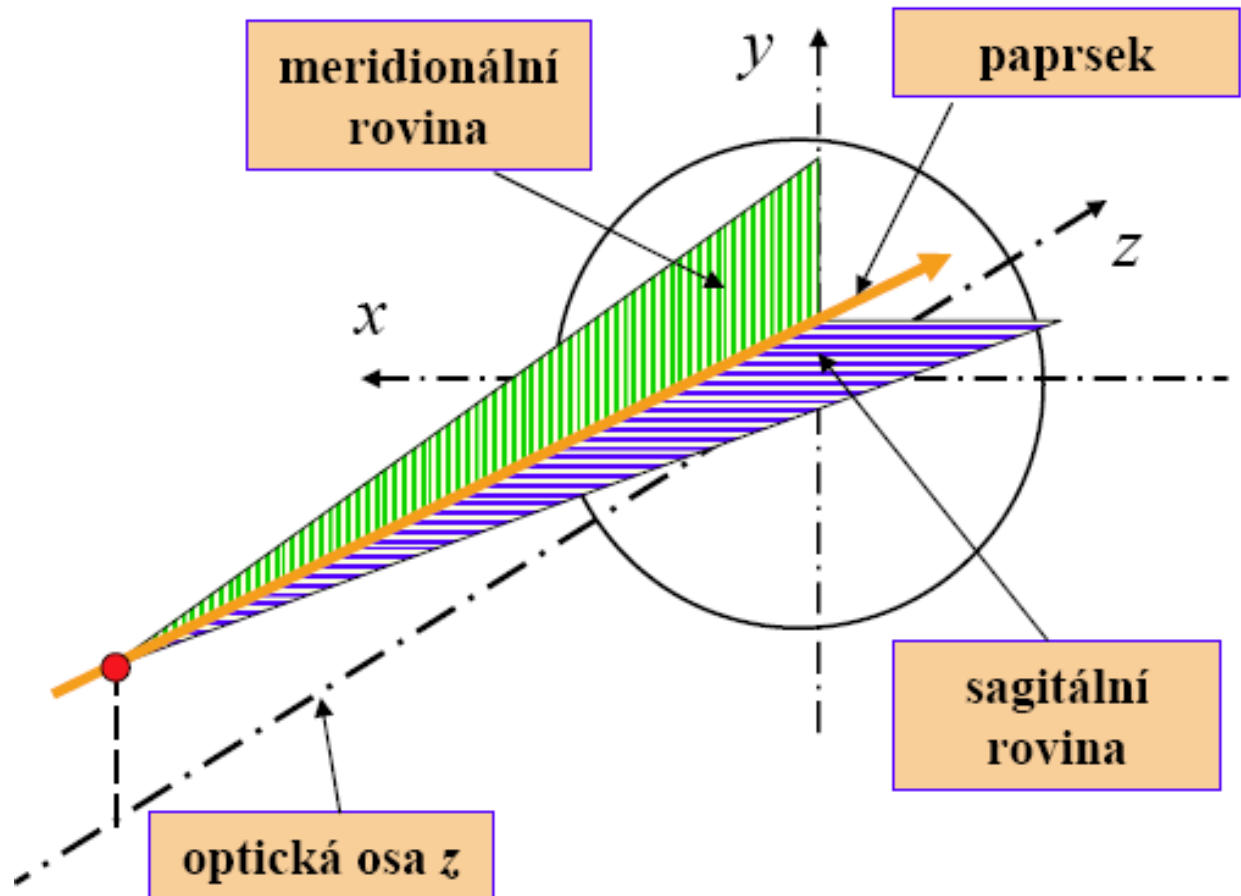
(7. listopadu 1867,  
Varsava – 4.  
července 1934,  
Sancellemoz)

# OPTICKÉ VADY ZOBRAZOVACÍCH SOUSTAV

- Při jiném než ideálním zobrazení optickou soustavou se projevují různé odchylky v zobrazení.
- V případě např. čočky, vzrůstá-li zorné pole nebo účinný průměr (popř. obě současně) při stejné ohniskové vzdálenosti, nastávají odchylky od ideálního zobrazení, které se projevují tím, že obrazem bodu je ploška, obrazem roviny kolmé k ose je rotační plocha, obrazem přímky, jež leží v předmětové rovině a neprotíná optickou osu, je obecně křivka a předmět se zobrazuje světlem o různých vlnových délkách v různých místech a v různé velikosti.
- Uvedené odchylky od ideálního zobrazení se nazývají **optické vady zobrazovacích soustav**.
- K určení vad je nutné sledovat paprsek mimo paraxiální prostor; ve většině případů vystačíme s paprsky probíhajícími v **poledníkové (meridiální, meridionální) rovině**, tj. v rovině určené optickou osou a zobrazovaným bodem.
- Vady optických soustav dělíme na vady **monochromatické** a **chromatické**.

# Optické zobrazení – významné roviny optické soustavy

- Při navrhování optických soustav lze počítat průchod libovolného paprsku soustavou.
- Pro jednoduchost se často provádí výpočty v tzv. **meridiální** nebo **sagitální** rovině.



# Optické zobrazení – příčiny vzniku aberací

Zdroj: <http://webfyzika.fsv.cvut.cz/>

## Příčiny vzniku aberací

### fyzikální

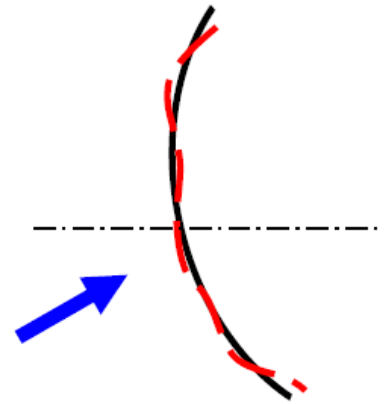
- ⊕ lom a odraz paprsků na plochách optické soustavy,
- ⊕ neplatnost paraxiálních zobrazovacích rovnic,
- ⊕ difrakce světla na prvcích optické soustavy,
- ⊕ disperze prostředí,...

### technologické

- ⊕ nedokonalost výroby prvků optických soustav (odchyly tvaru ploch, decentricita prvků, apod.)

### materiálové

- ⊕ nedokonalost (vady) materiálů, ze kterých jsou optické prvky zhotoveny (nehomogenita materiálu, bubliny, šlíry, pnutí, apod.)



# Vady zobrazovacích soustav

## Vady monochromatické

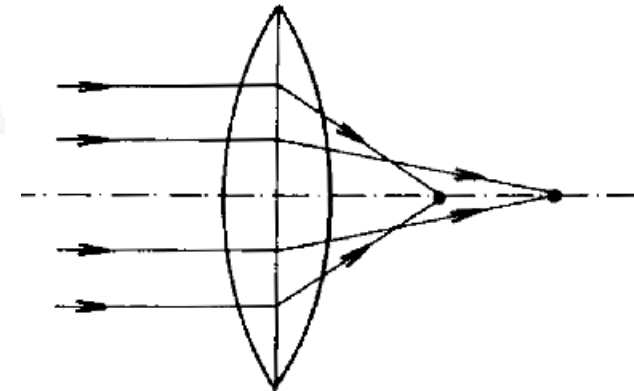
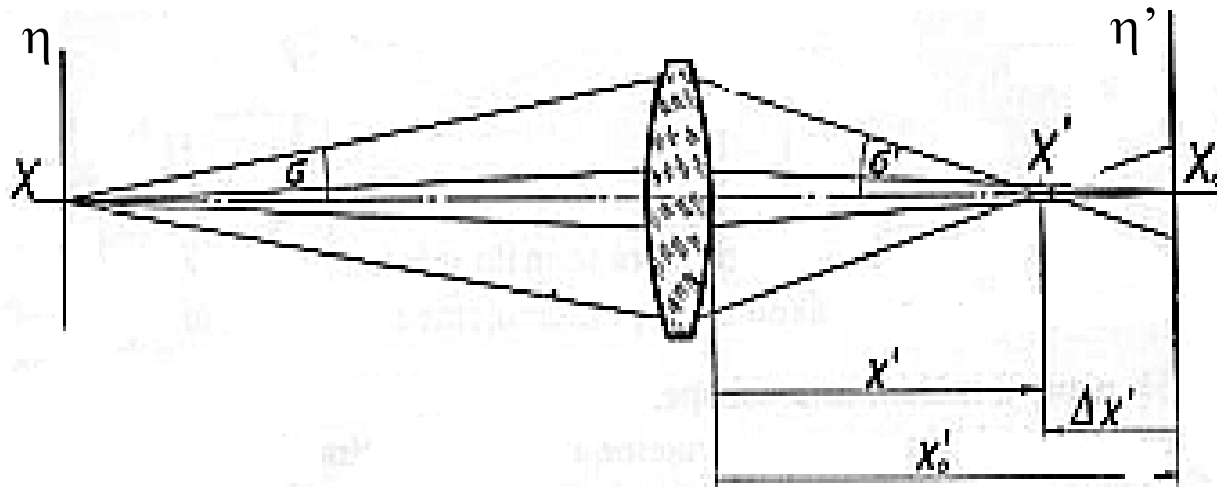
- a) Zobrazení osového bodu (vada otvorová).
  
- b) Zobrazení bodu ležícího mimo optickou osu:
  - zkreslení,
  - astigmatismus,
  - zklenutí,
  - koma.

## Vady barevné

- Barevná vada polohy
- Barevná vada velikosti
- Oprava barevné vady v PC

## Asférické optické plochy

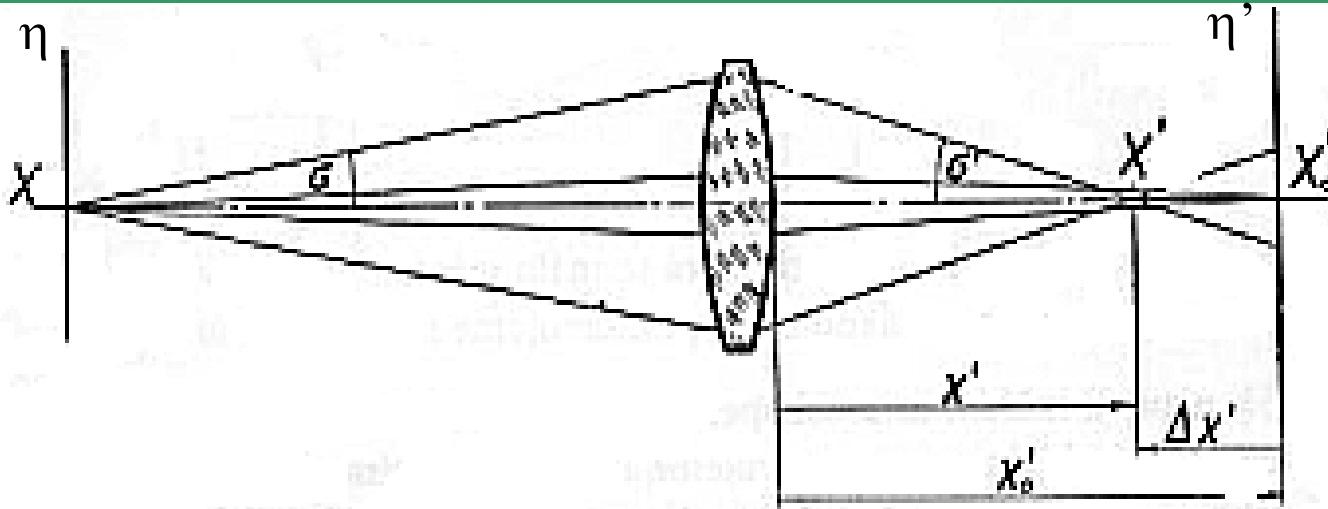
# Vada otvorová (sférická)



- Z osového bodu  $X$  vychází paprsek monochromatického světla.
- Paraxiální paprsek po průchodu čočkou se zobrazuje do bodu  $X'_0$  na optické ose.
- Paprsky svírající s optickou osou úhel  $\sigma > 5^\circ$  protnou po průchodu čočkou optickou osu v bodě  $X'$ .
- Vzdálenost bodu  $X'$  od  $X'_0$  se nazývá **podélnou otvorovou vadou ( $\Delta x'$ )**.
- U spojně čočky je  $X'$  vlevo od roviny  $\eta'$ , u rozptylky vpravo.

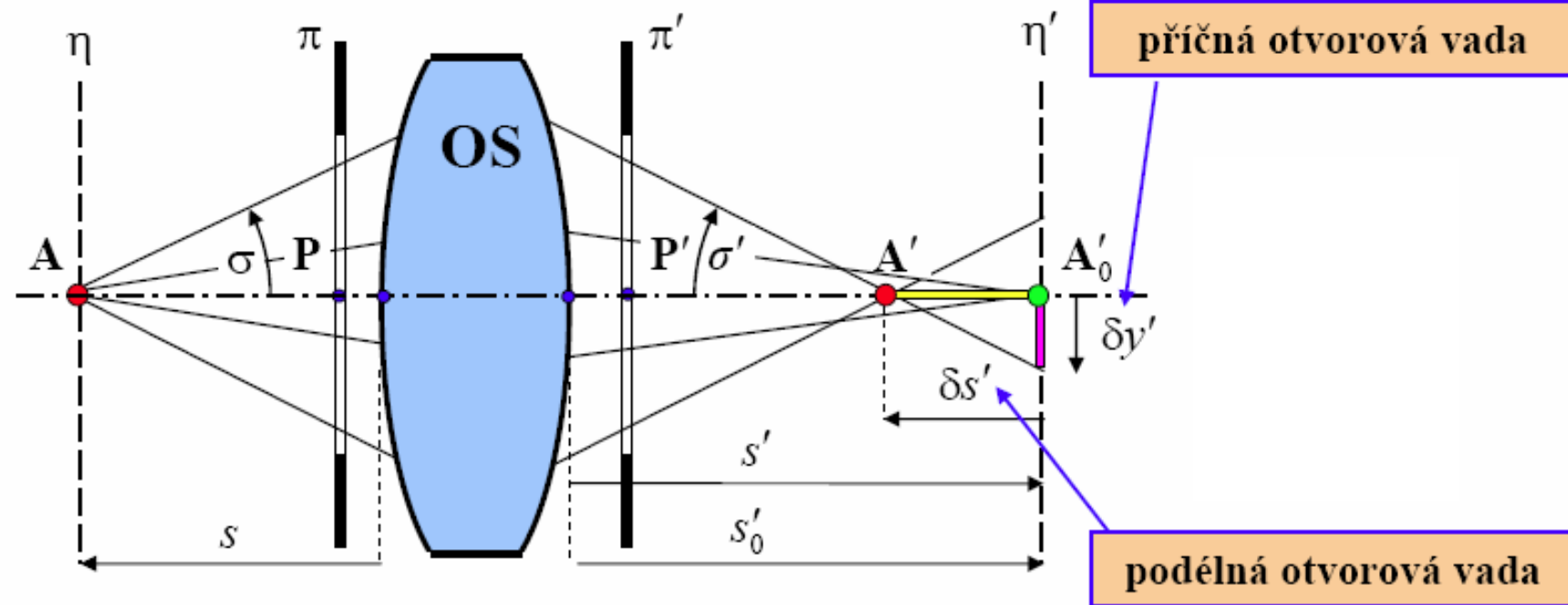


# Vada otvorová



- Paprsek protne rovinu  $\eta'$  v bodě, jehož vzdálenost od  $X_0'$  se nazývá **příčnou otvorovou vadou**.

# Vada otvorová (sférická)

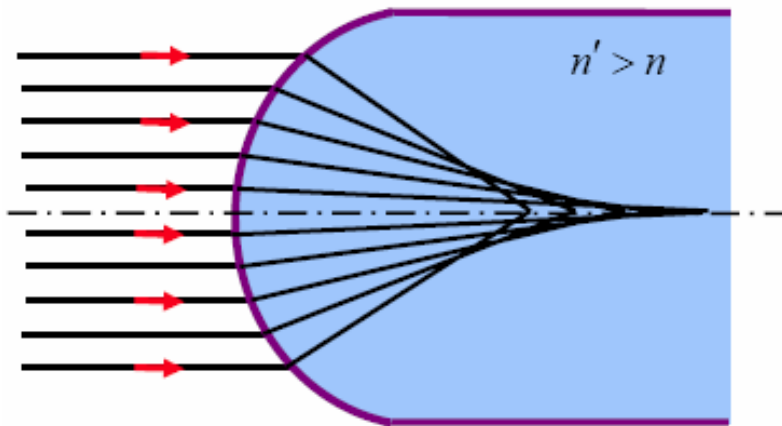


Zdroj: <http://webfyzika.fsv.cvut.cz/>

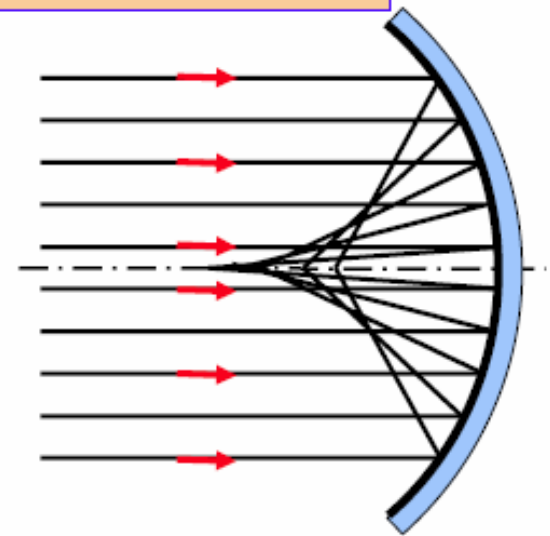
- Obrazem bodu není bod, ale kruhová ploška.

# Vada otvorová (sférická)

jednoduchá čočka



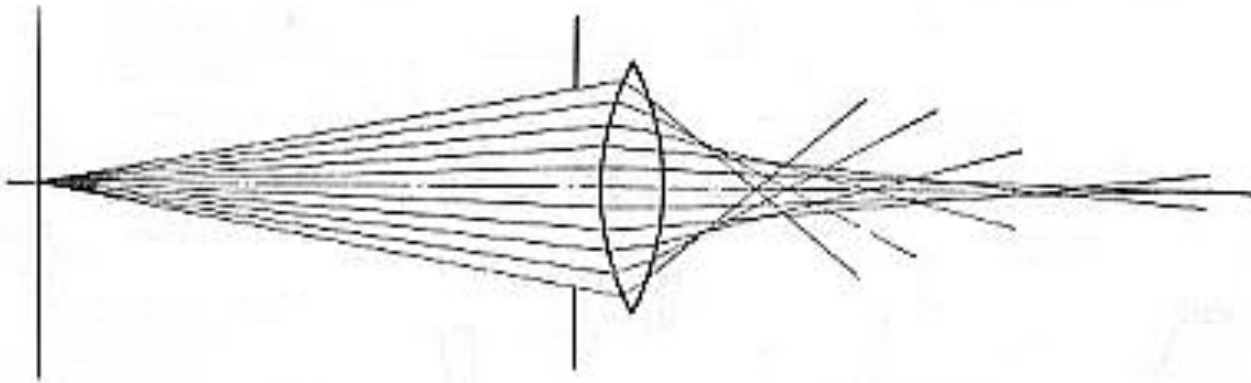
kulové zrcadlo



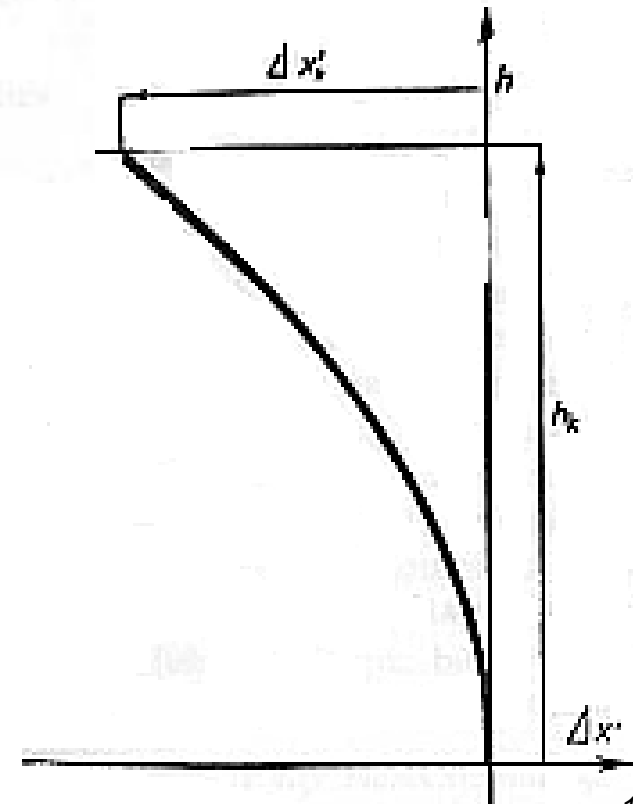
Zdroj: <http://webfyzika.fsv.cvut.cz/>

# Vada otvorová (sférická)

- Lom širokého paprskového svazku lámavou plochou.

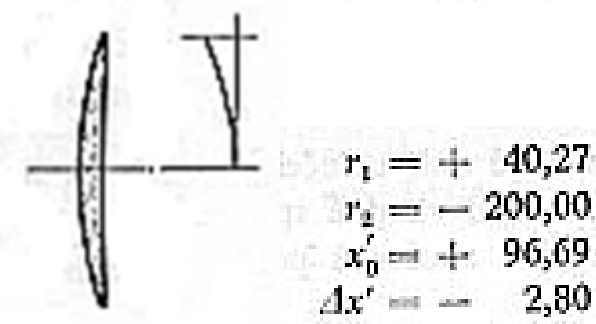
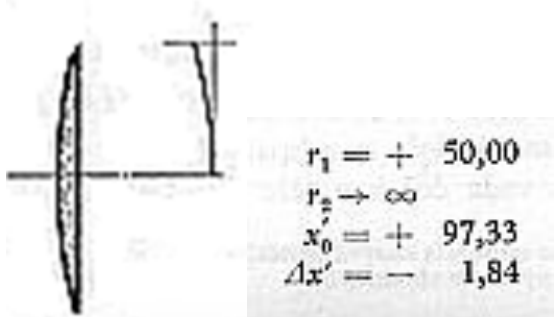
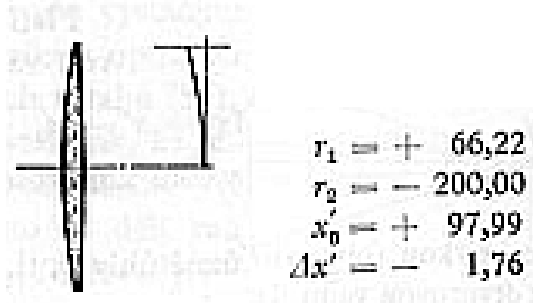
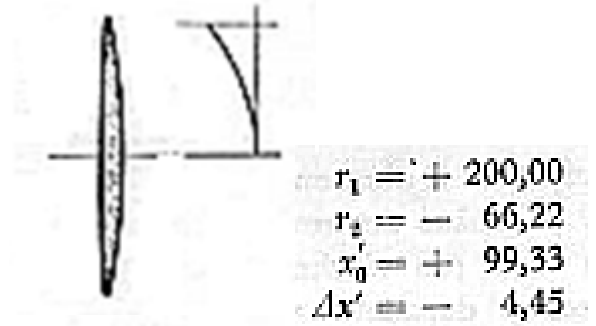
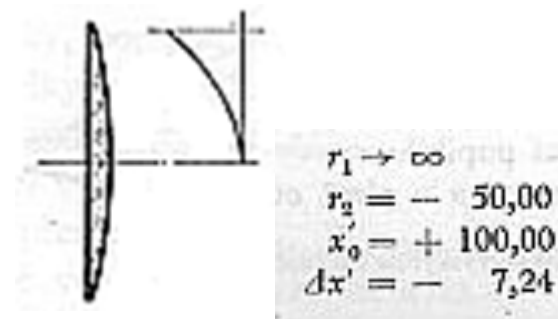
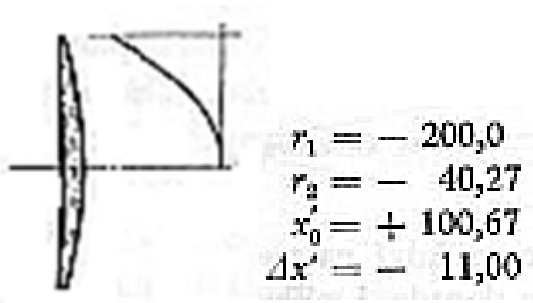


- Průběh otvorové vady pro různé úhly  $\sigma$ , tj. různé dopadové výšky  $h$  znázorňujeme křivkou, kterou dostaneme, když na vodorovnou osu nanášíme otvorovou vadu  $\Delta x'$  a na svislou osu dopadové výšky paprsků na první lámavou plochu (popřípadě v rovině vstupní pupily).



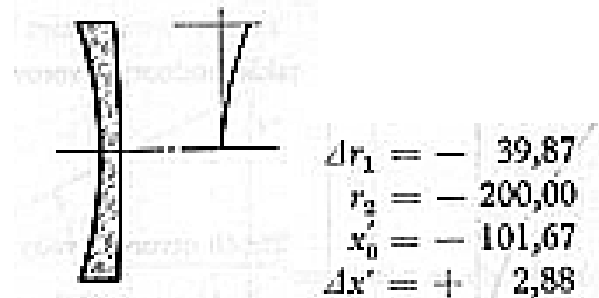
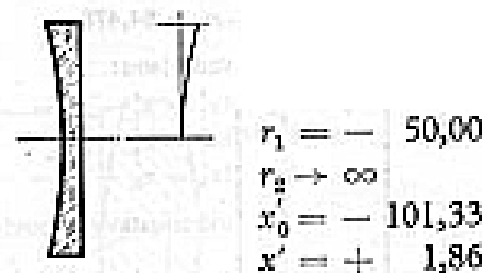
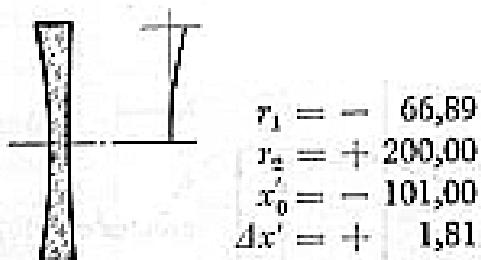
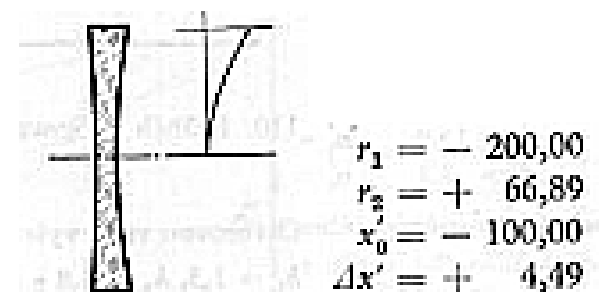
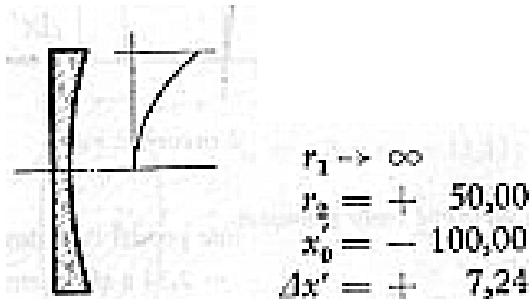
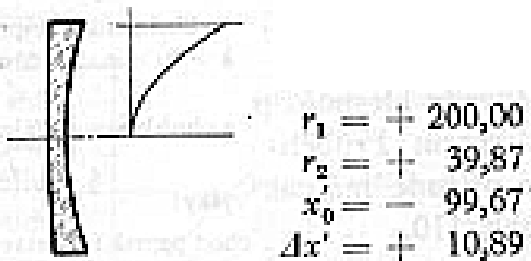
# Vada otvorová (sférická)

- Otvorová vada čoček o téže ohniskové vzdálenosti a o témž otvoru je závislá na **poloze předmětu**, na **tvaru čočky** a na **indexu lomu**.
- Příklad: spojně čočky o ohniskové vzdálenosti  $f' = 100$  mm a tloušťky  $d = 4$  mm o průměru  $r = 25$  mm a indexu lomu skla  $n = 1,5$ ; objekt v nekonečnu.
- Poloměry křivosti, hodnota obrazového ohniska a hodnota podélné otvorové vady na kraji čočky (vše v mm):



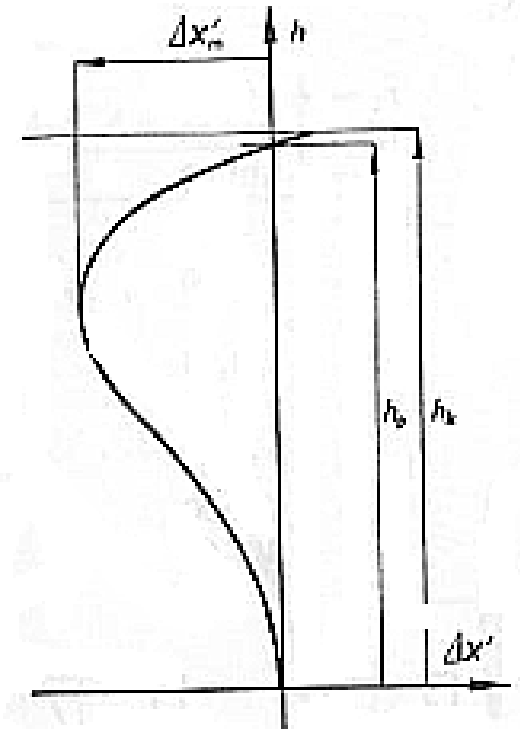
# Vada otvorová (sférická)

- Otvorová vada čoček o téže ohniskové vzdálenosti a o témž otvoru je závislá na **poloze předmětu**, na **tvaru čočky** a na **indexu lomu**.
- Příklad: rozptylné čočky o ohniskové vzdálenosti  $f' = -100$  mm a tloušťky  $d = 2$  mm o průměru  $r = 25$  mm a indexu lomu skla  $n = 1,5$ ; objekt v nekonečnu.
- Poloměry křivosti, hodnota obrazového ohniska a hodnota podélné otvorové vady na kraji čočky (vše v mm):



# Korekce otvorové vady

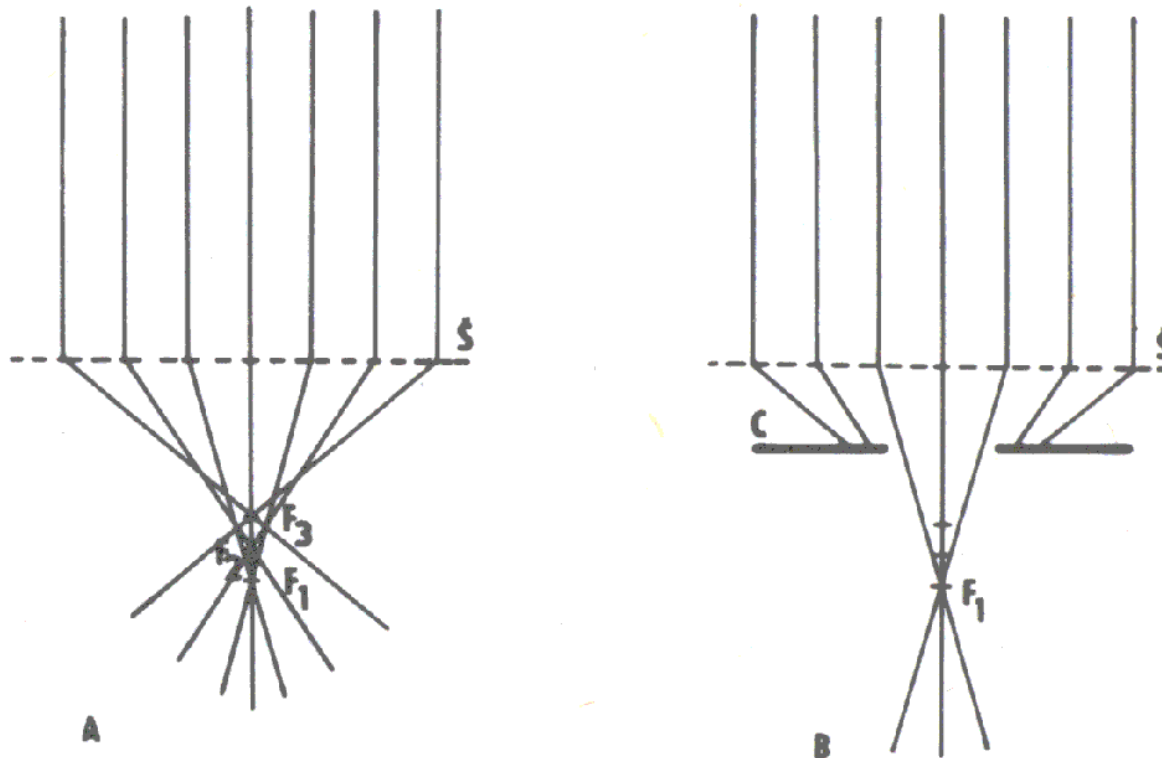
- U soustavy je otvorová vada korigována pro určitý otvor, jestliže paprsky příslušné tomuto otvoru protnou optickou osu pro průchodu optickou soustavou na stejném místě jako paraxiální paprsky.
- Průběh otvorové vady pro spojku a rozptylku je opačný.
- Kombinací vhodné spojky a rozptylky lze otvorovou vadu snížit.
- Nelze potlačit otvorovou vadu pro všechny dopadové výšky (pro všechna pásma otvoru).
- V praxi se odstraňuje otvorová vada alespoň pro okrajové pásma otvoru.



Pozn. Nejjednodušší korekce otvorové (sférické) vady – zacloněním

# Korekce otvorové vady v elektronových mikroskopech

Začloněním



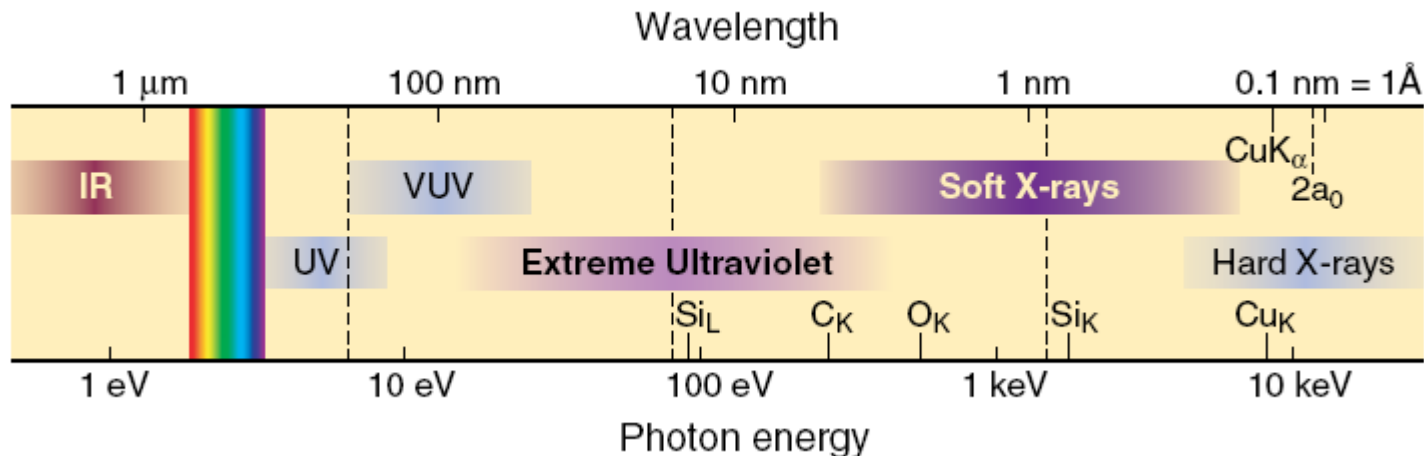
Zdroj: <http://www.paru.cas.cz/lem/book/Podkap/Pic/2.3/1.gif>



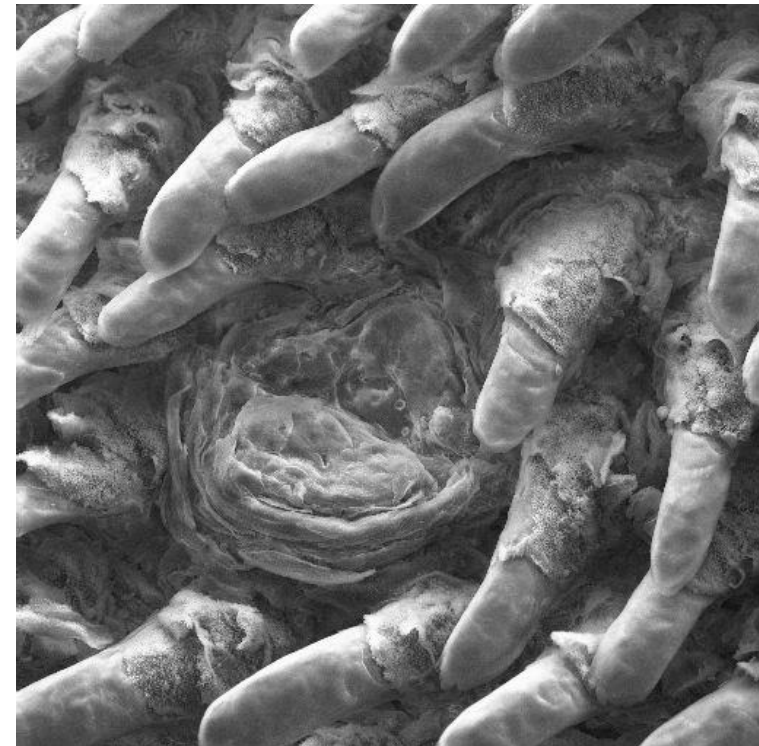
# Korekce otvorové vady v elektronových mikroskopech

**Elektronový mikroskop** je obdobou optického mikroskopu, kde jsou fotony nahrazeny elektrony a optické čočky elektromagnetickými čočkami, což je vlastně vhodně tvarované magnetické pole.

Využívá se toho, že vlnové délky urychlených elektronů jsou o mnoho řádů menší než fotonů viditelného světla ( $< 0.1 \text{ nm}$ ). Proto má elektronový mikroskop mnohem vyšší rozlišovací schopnost a může tak dosáhnout mnohem vyššího zvětšení (až  $1\,000\,000\times$ ).



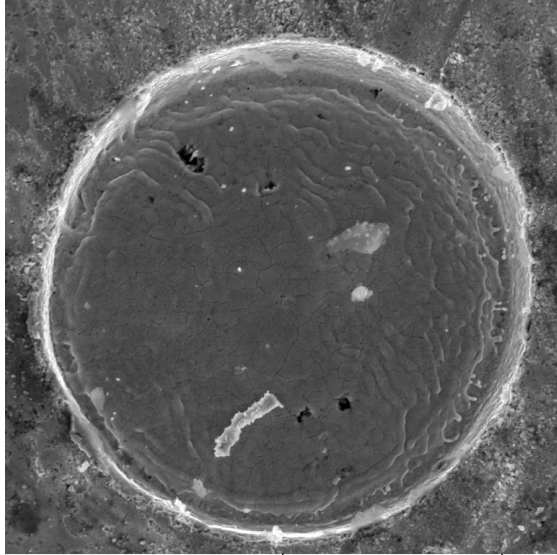
# Korekce otvorové vady v elektronových mikroskopech



SEM MAG: 475 x      DET: LVSTD  
HV: 15.0 kV      DATE: 03/12/03  
VAC: LowVac, 150 Pa      Device: TS5136MM

100  $\mu$ m      Vega ©Tescan  
Digital Microscopy Imaging

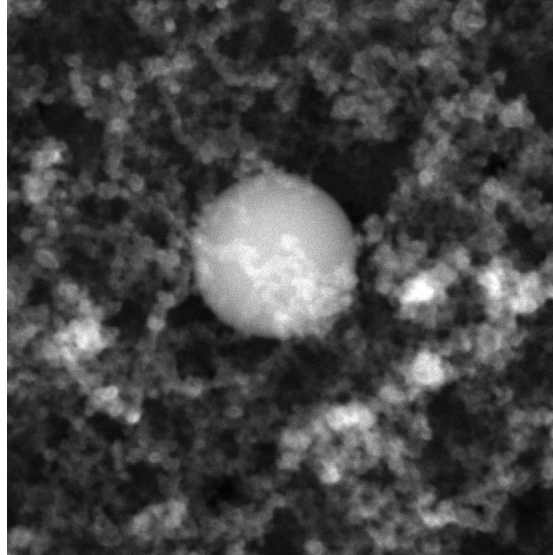
# Korekce otvorové vady v elektronových mikroskopech



SEM HV: 30.00 kV WD: 25.4310 mm  
View field: 125.49 μm Det: SE Detector  
Date(m/d/y): 11/28/07 centering

50 μm

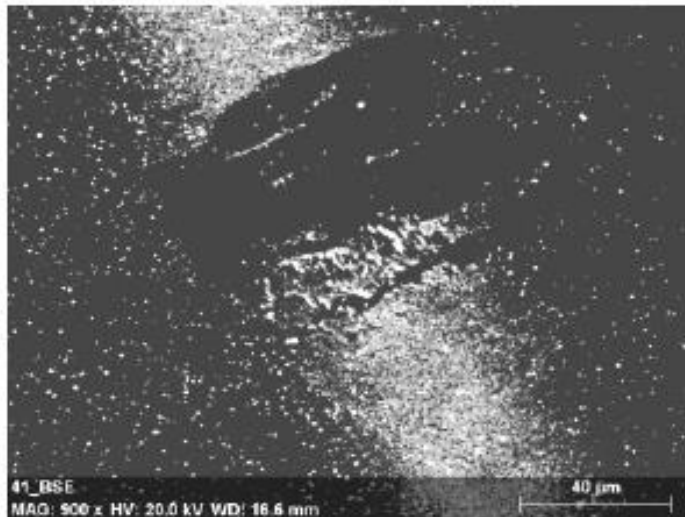
VEGA\\ TESCAN  
Digital Microscopy Imaging



SEM HV: 30.00 kV WD: 13.1530 mm  
View field: 3.77 μm Det: SE Detector  
Date(m/d/y): 02/11/08 josefkaiser

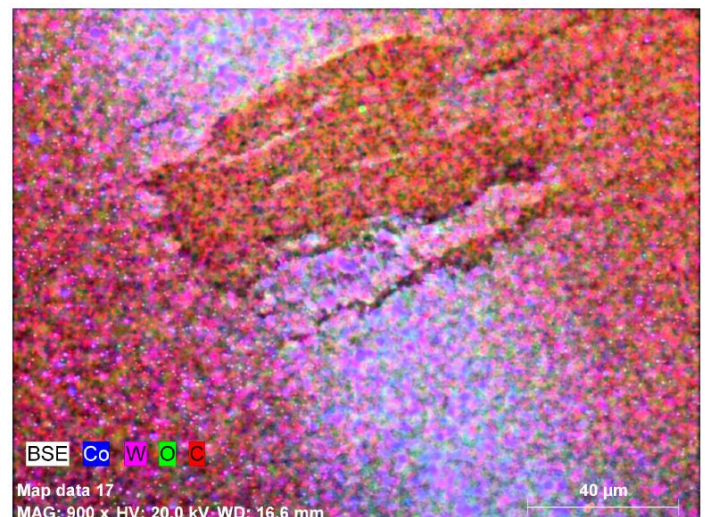
1 μm

VEGA\\ TESCAN  
Digital Microscopy Imaging



41\_BSE  
MAG: 900 x HV: 20.0 kV WD: 16.6 mm

40 μm



BSE Co W O C

Map data 17  
MAG: 900 x HV: 20.0 kV WD: 16.6 mm

40 μm

# Příklad

Určete průběh otvorové vady u soustavy  $r_1=8,57$  mm;  $r_2= 8,63$  mm;  $r_3=-8,63$  mm;  $r_4=-8,57$  mm;  $d_1=2,2$  mm;  $d_2=13,8$  mm;  $d_3=2,2$  mm;  $n_1=n_2=n_4=1$ ;  $n_1'=1,51050$ ;  $n_2'=1,51050$  pro předmět v nekonečnu, je-li účinný průměr  $d=4,68$  mm.

$$\frac{n'}{x'} - \frac{n}{x} = \frac{n' - n}{r}$$

Sledujeme nejprve paraxiální paprsek, tj.  $h=0$ ; odtud určíme polohu obrazu  $x_0'=92,802$  mm.

$$x' = \frac{n'}{\frac{n}{x} + \frac{n' - n}{r}}$$

Otvorovou vadu vyšetříme pro tři dopadové výšky  $h_1=1,3$  mm;  $h_2= 1,8$  mm;  $h_k=2,34$  mm; a pro sečné vzdálenosti dostaneme:  $x_1'=90,195$  mm;  $x_2'= 87,836$  mm;  $x_k'=84,478$  mm.

Hodnoty otvorové vady jsou:

$$\Delta x_1' = x_1' - x_0' = -2,607 \text{ mm,}$$

$$\Delta x_2' = x_2' - x_0' = -4,966 \text{ mm,}$$

$$\Delta x_k' = x_k' - x_0' = -8,324 \text{ mm.}$$