



Ústav fyzikálního inženýrství
Fakulta strojního inženýrství
VUT v Brně

GEOMETRICKÁ OPTIKA II

Přednáška 4

Obsah

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



Maria Curie-Skłodowska

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

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.

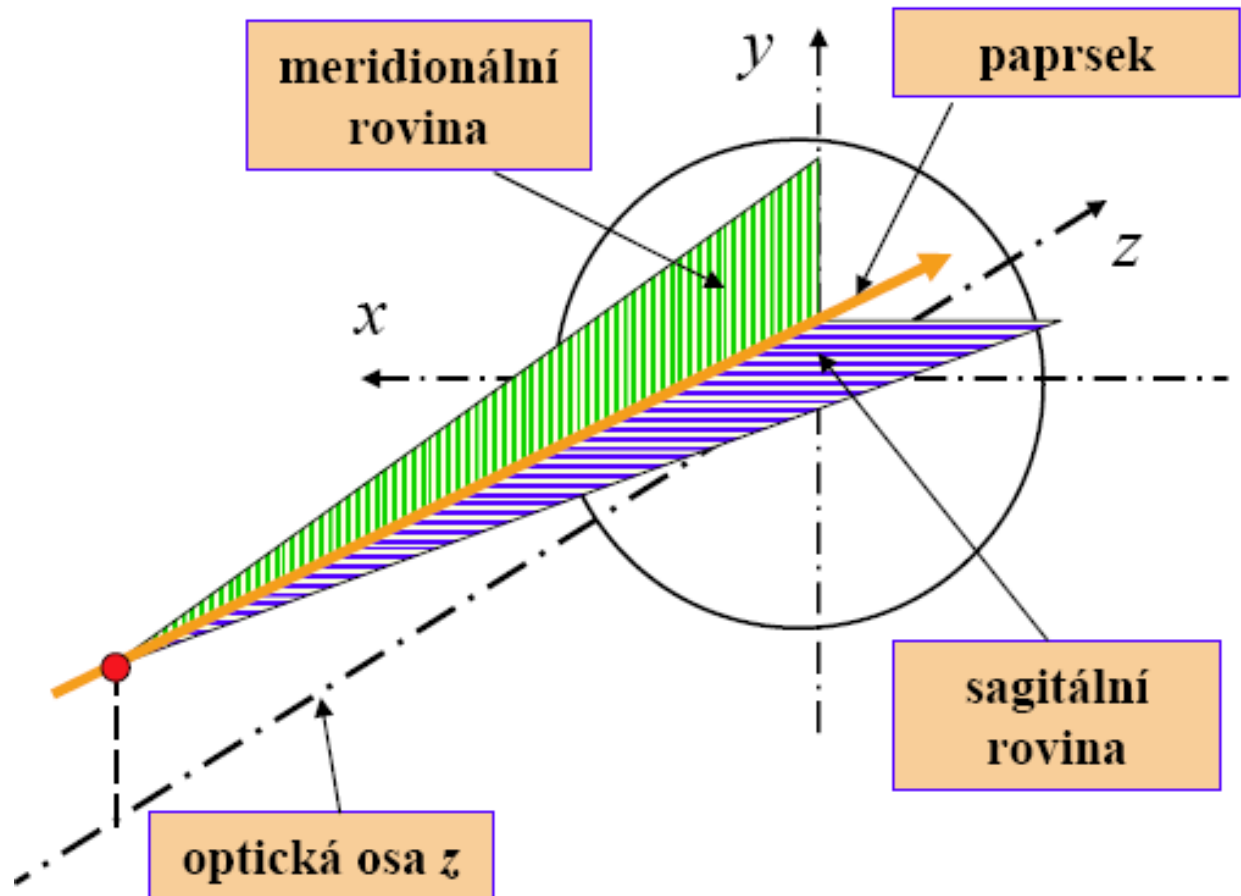
Dvakrát byla vyznamenána Nobelovou cenou. Poprvé v roce 1903 z fyziky spolu s manželem Pierrem Curie za výzkumy radioaktivity a jejím objevitelem Henri Becquerelem, a podruhé v roce 1911 z chemie za izolaci čistého radia.

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

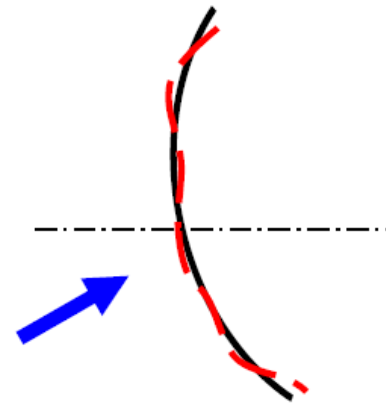
- ⊕ lom a odraz paprsků na plochách optické soustavy,
- ⊕ neplatnost paraxiálních zobrazovacích rovnic,
- ⊕ difrakce světla na prvcích optické soustavy,
- ⊕ disperze prostředí,...

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, šlírý, pnutí, apod.)



Vady zobrazovacích soustav

Vady monochromatické

- a) Zobrazení osového bodu (vada otvorová).

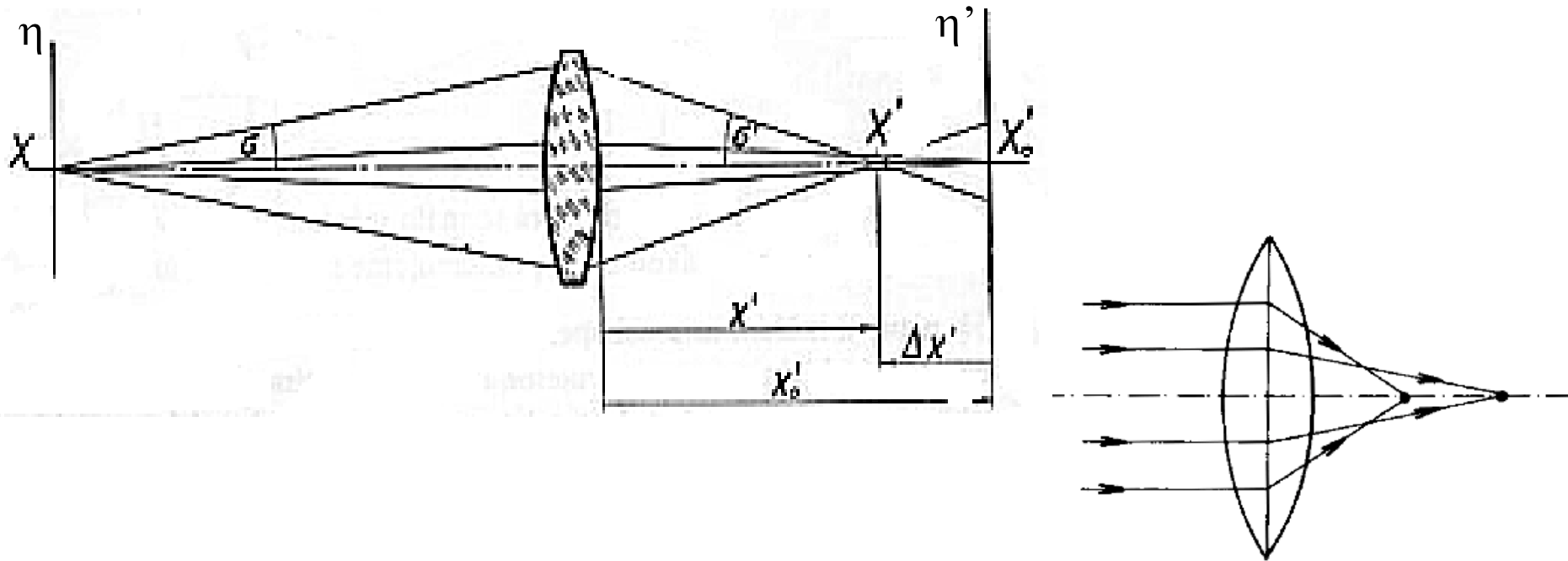
- b) Zobrazení bodu ležícího mimo optickou osu:
 - zkreslení,
 - astigmatismus,
 - zklenutí,
 - koma.

Vady barevné

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

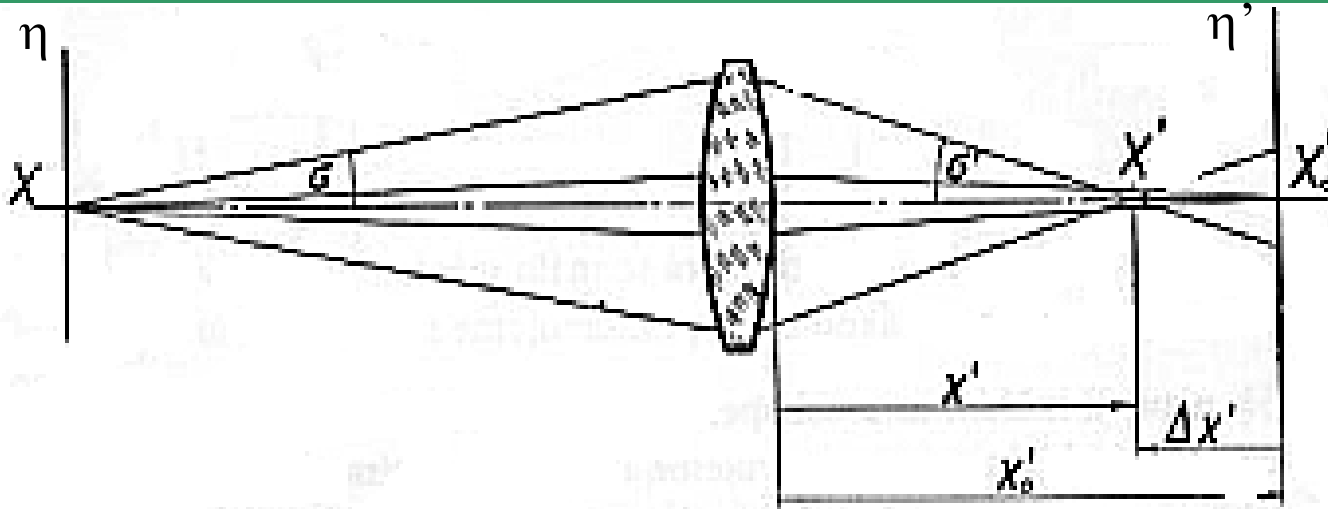
Asférické optické plochy

Vada otvorová (sférická)



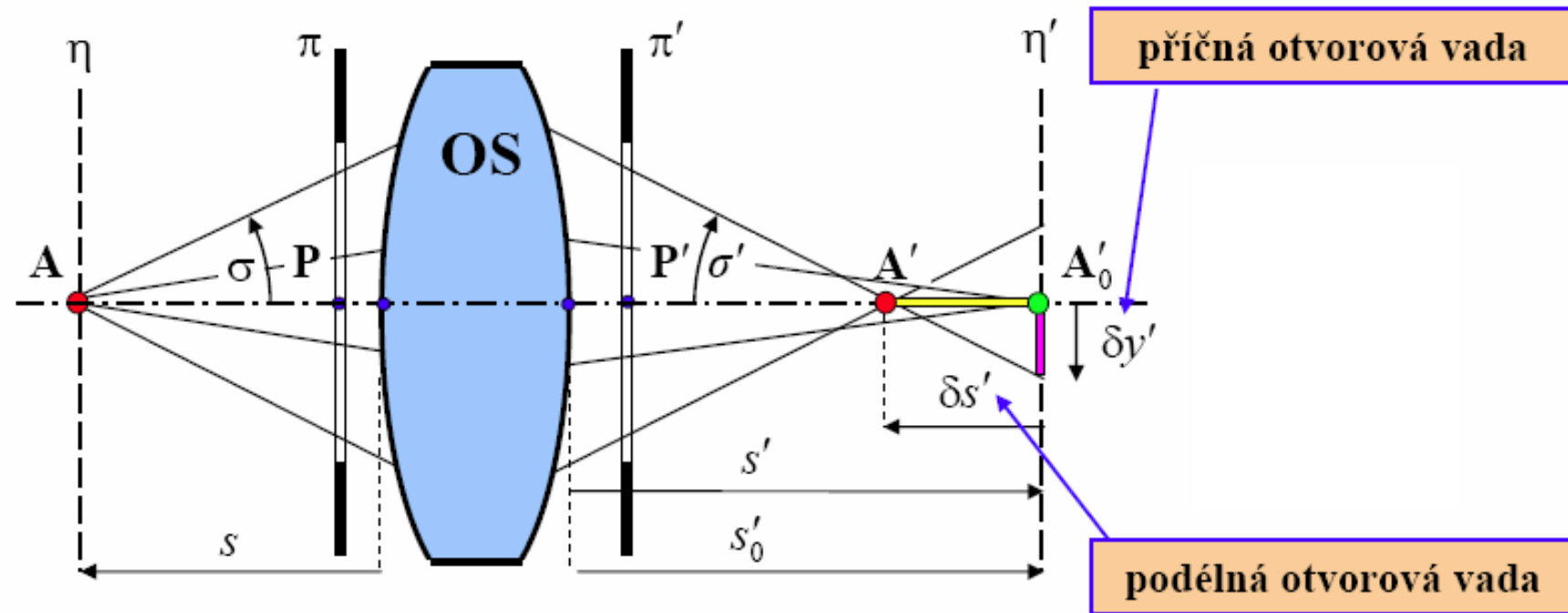
- Z osového bodu X vychází paprsek monochromatického světla.
- Paraxiální paprsek po průchodu čočkou se zobrazuje do bodu X'_0 na optické ose.
- Paprsky svírající s optickou osou úhel $\sigma > 5^\circ$ protnou po průchodu čočkou optickou osu v bodě X' .
- Vzdálenost bodu X' od X'_0 se nazývá **podélnou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

Vada otvorová



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

Vada otvorová (sférická)

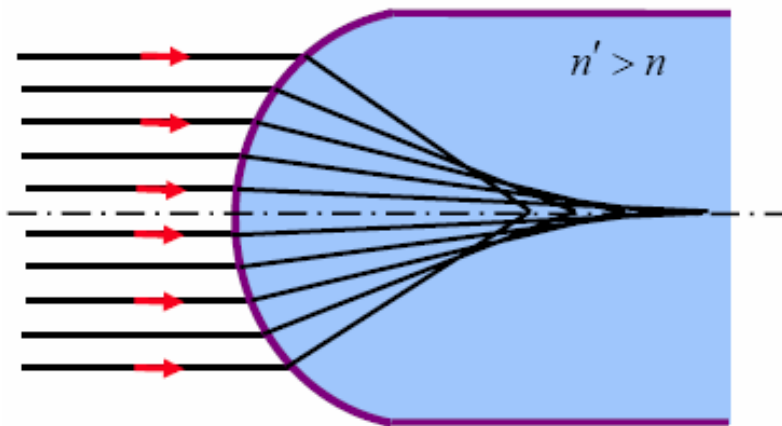


Zdroj: <http://webfyzika.fsv.cvut.cz/>

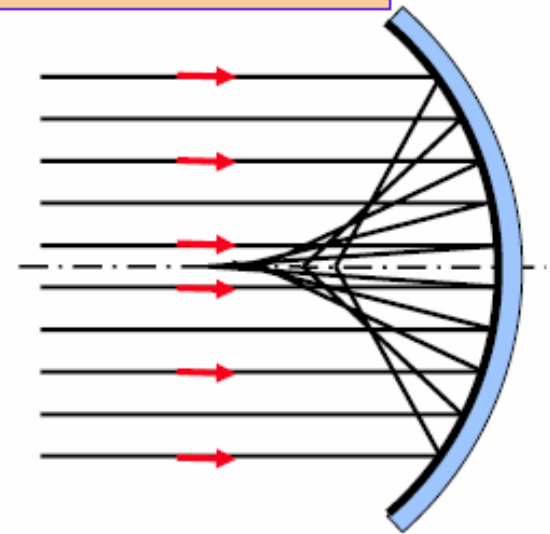
- Obrazem bodu není bod, ale kruhová ploška.

Vada otvorová (sférická)

jednoduchá čočka



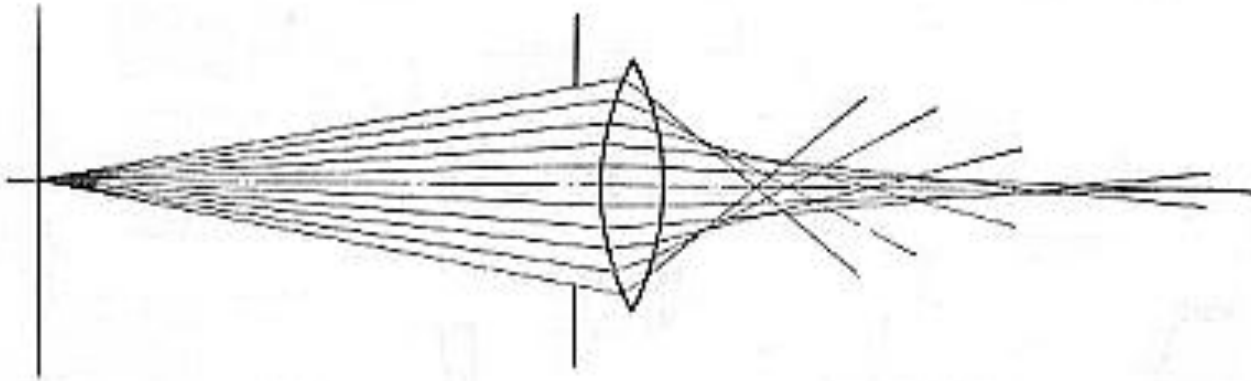
kulové zrcadlo



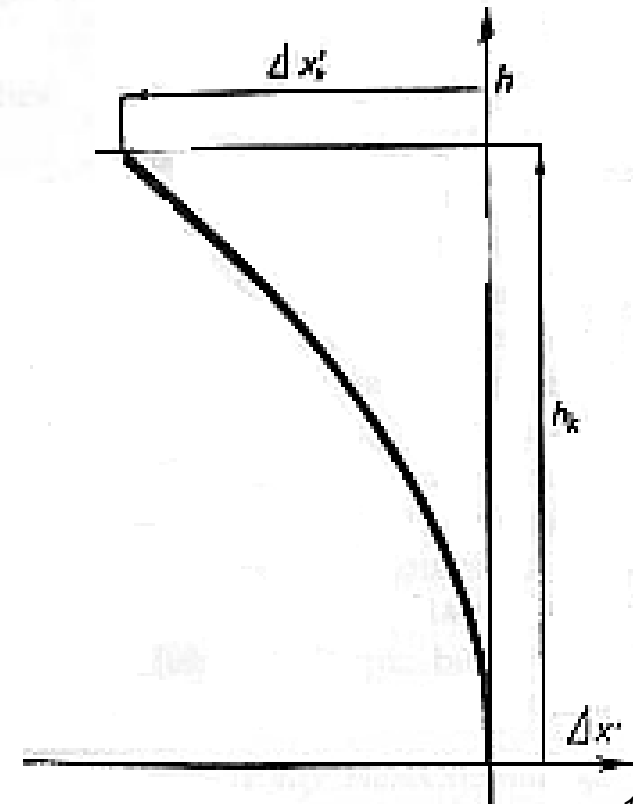
Zdroj: <http://webfyzika.fsv.cvut.cz/>

Vada otvorová (sférická)

- Lom širokého paprskového svazku lámavou plochou.

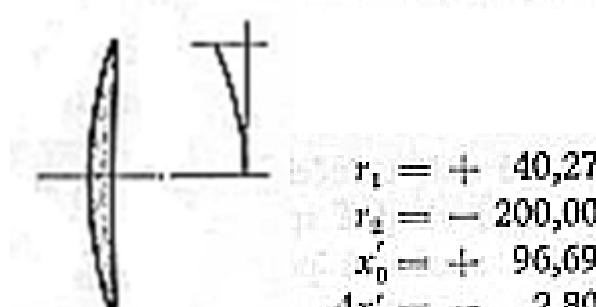
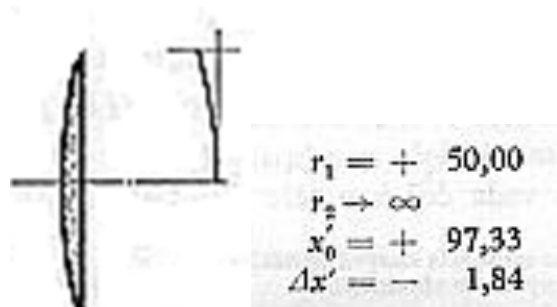
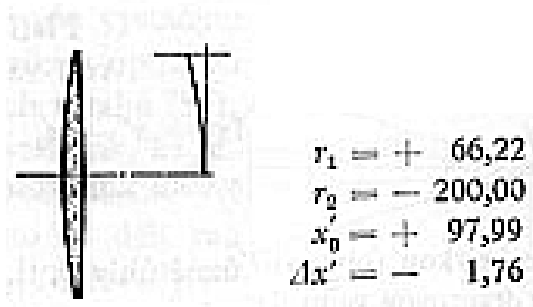
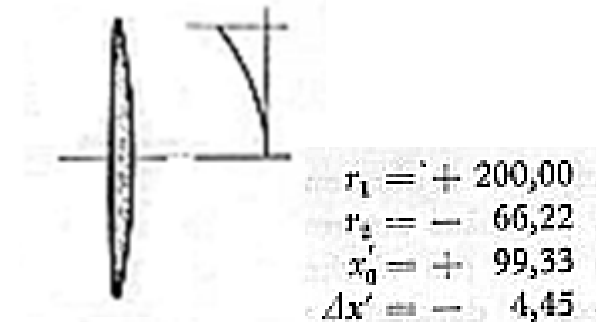
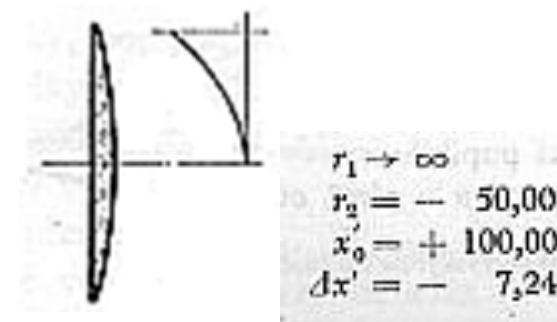
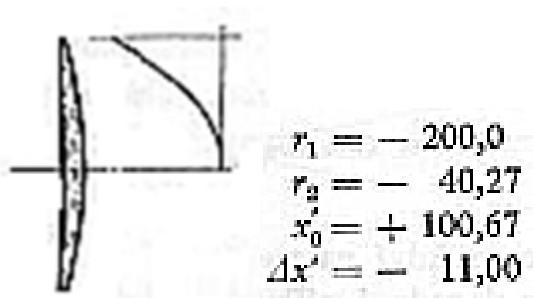


- Průběh otvorové vady pro různé úhly σ , tj. různé dopadové výšky h znázorňujeme křivkou, kterou dostaneme, když na vodorovnou osu nanášíme otvorovou vadu $\Delta x'$ a na svislou osu dopadové výšky paprsků na první lámavou plochu (popřípadě v rovině vstupní pupily).



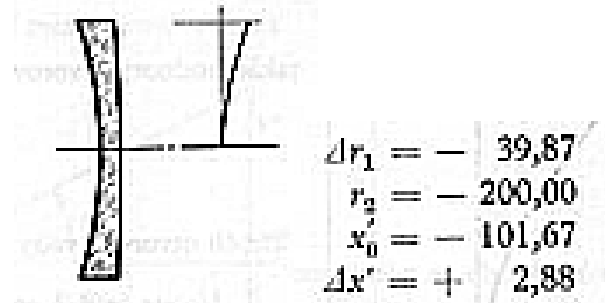
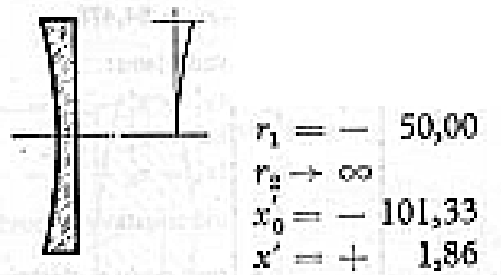
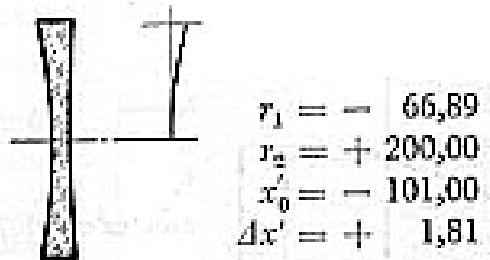
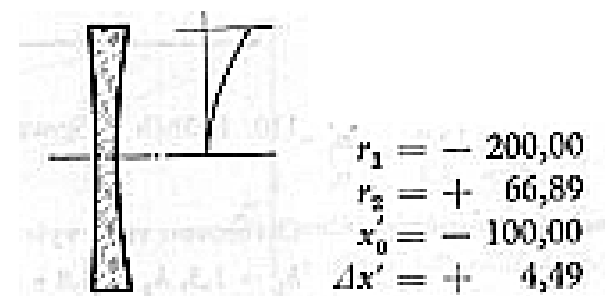
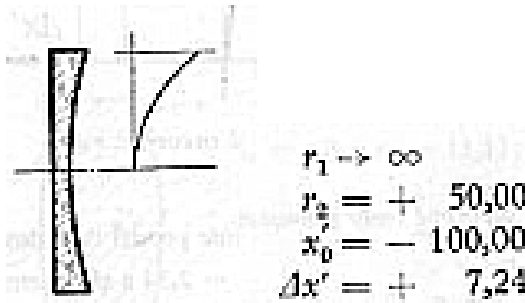
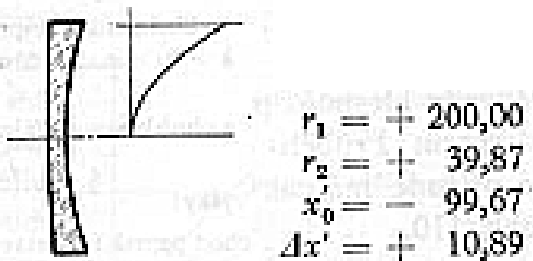
Vada otvorová (sférická)

- 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):



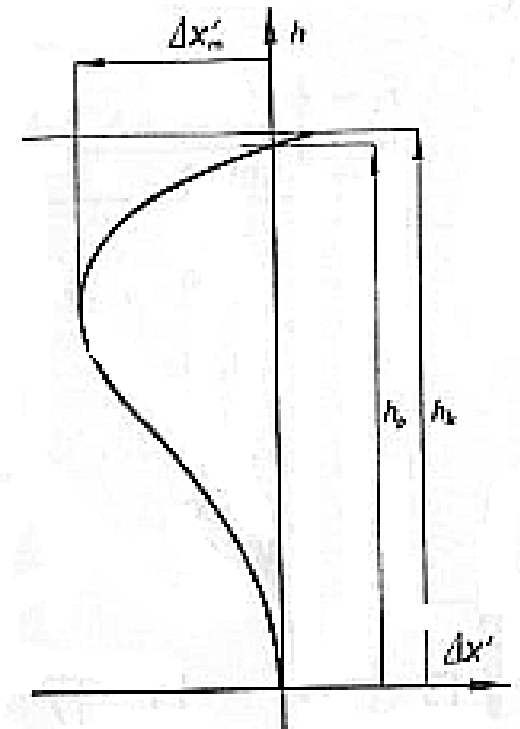
Vada otvorová (sférická)

- 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

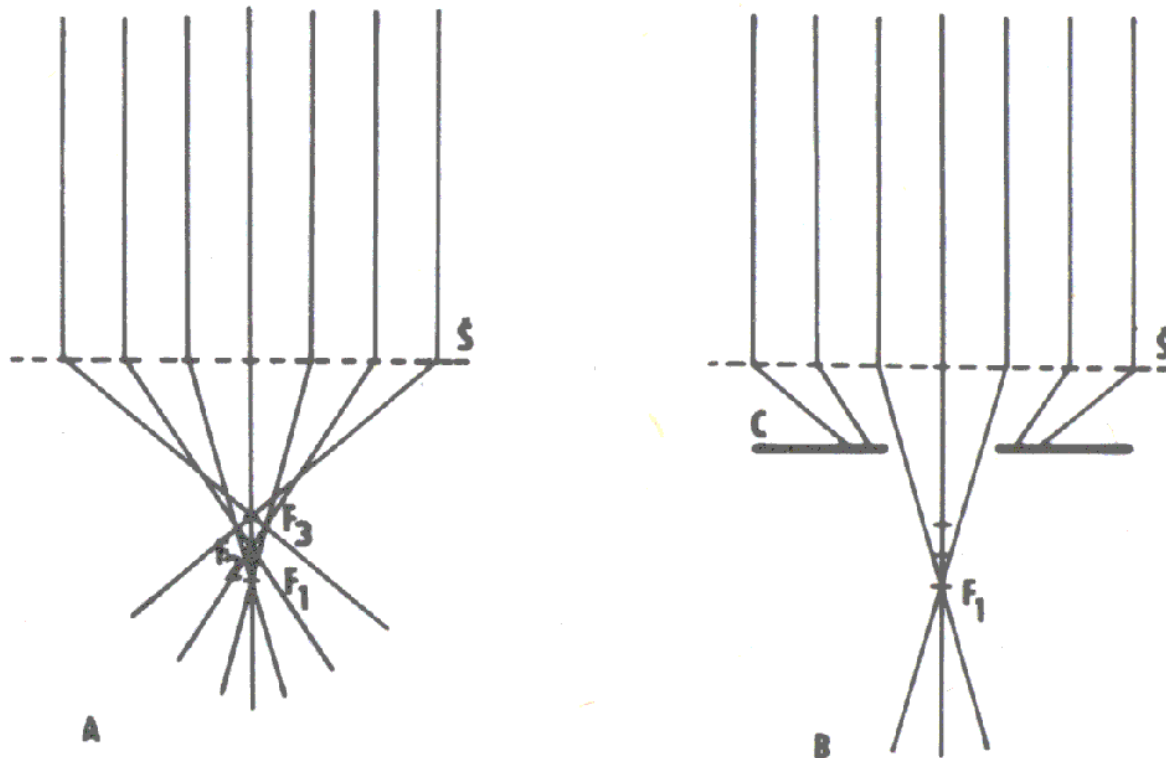
- U soustavy je otvorová vada korigována pro určitý otvor, jestliže paprsky příslušné tomuto otvoru protnou optickou osu pro průchodu optickou soustavou na stejném místě jako paraxiální paprsky.
- Průběh otvorové vady pro spojku a rozptylku je opačný.
- Kombinací vhodné spojky a rozptylky lze otvorovou 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

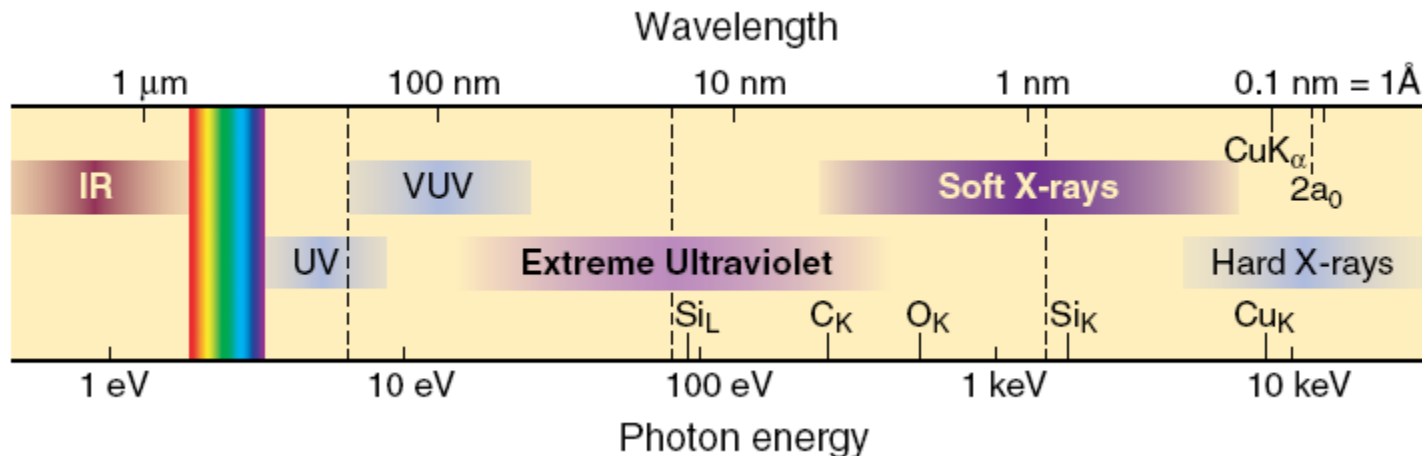


Zdroj: <http://www.paru.cas.cz/lem/book/Podkap/Pic/2.3/1.gif>

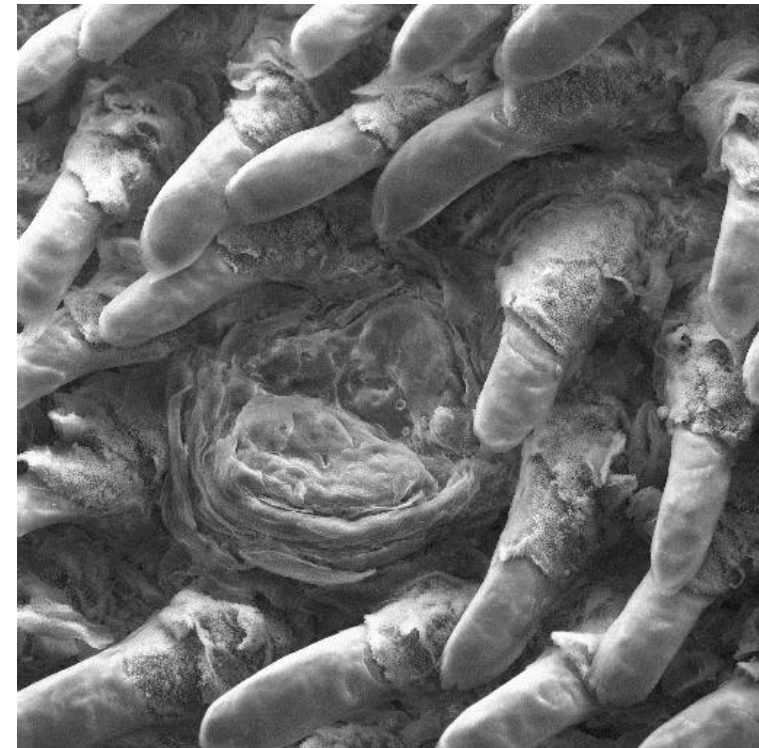
Korekce otvorové vady v elektronových mikroskopech

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

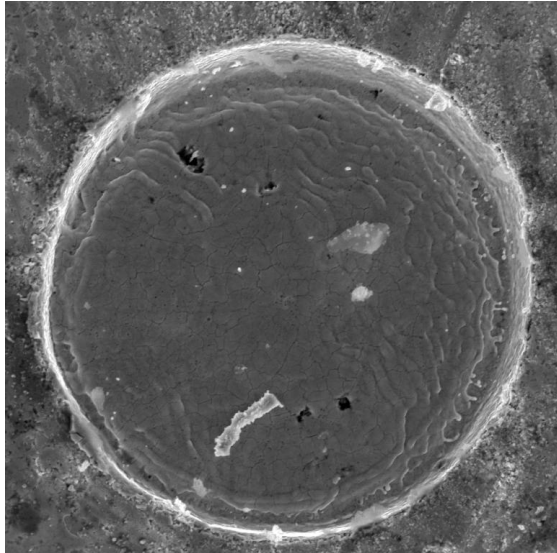


SEM MAG: 475 x DET: LVSTD
HV: 15.0 kV DATE: 03/12/03
VAC: LowVac, 150 Pa Device: TS5136MM

100 µm

Vega ©Tescan
Digital Microscopy Imaging

Korekce otvorové vady v elektronových mikroskopech

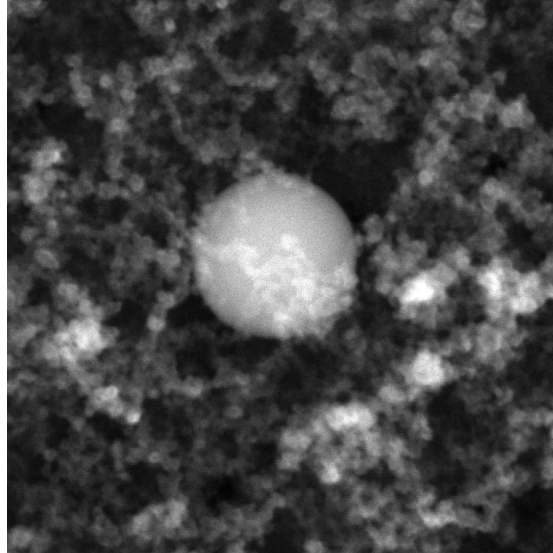


SEM HV: 30.00 kV
View field: 125.49 μm
Date(m/d/y): 11/28/07

WD: 25.4310 mm
Det: SE Detector
centering

50 μm

VEGA\\ TESCAN
Digital Microscopy Imaging

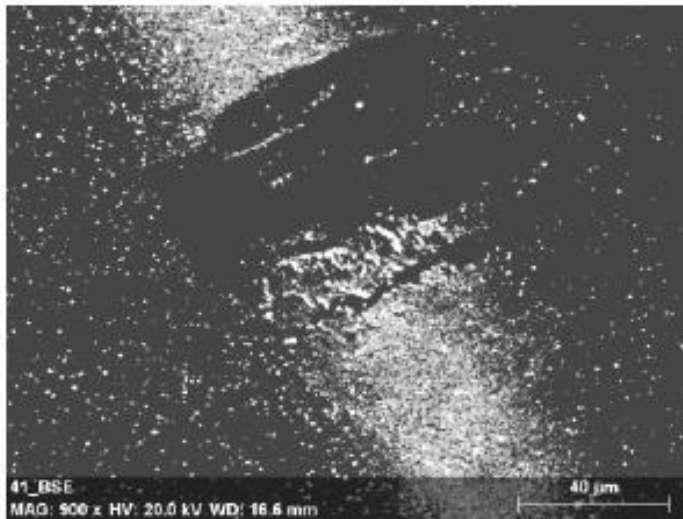


SEM HV: 30.00 kV
View field: 3.77 μm
Date(m/d/y): 02/11/08

WD: 13.1530 mm
Det: SE Detector
josefkaiser

1 μm

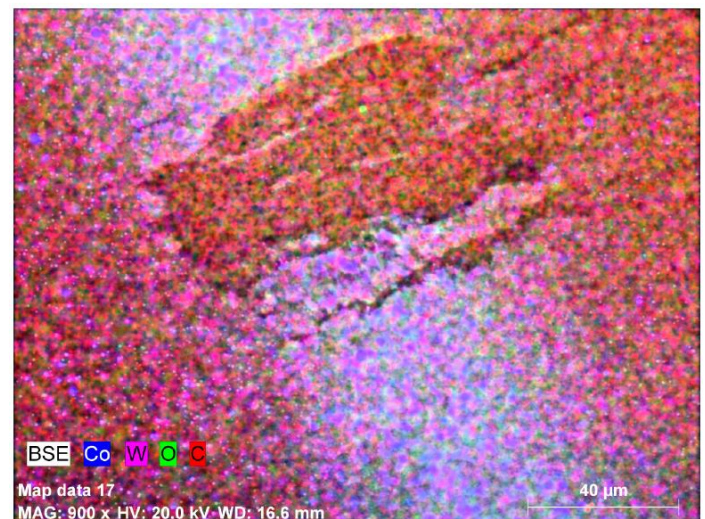
VEGA\\ TESCAN
Digital Microscopy Imaging



41_BSE

40 μm

MAG: 900 x HV: 20.0 kV WD: 16.6 mm



BSE Co W O C

Map data 17

40 μm

MAG: 900 x HV: 20.0 kV WD: 16.6 mm

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:

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

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

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