

Sférické vady v elektronové optice a jejich odstranění

Lukáš Průcha



Sférické vady

- El. optika trpí vadami více než normalní
- Složité se jich zbavit
- V praxi nelze dosáhnout teoretické rozlišovací schopnosti
-

Rozlišovací schopnost

- Nelze dosáhnout její teoretické hodnoty v praxi
- Dříve díky nedokonalé technologii (malá stabilita zdrojů proudu a vysokého napětí, nedostatečné metody přípravy tenkých vzorků, nízké vakuum, nekvalitní magnetické materiály pro elektronové čočky)
- Dnes hlavně kvůli optickým vadám, ale i ty jsou z velké části již eliminovány
- Pro rozlišení v řádu nm se volí vlnové délky 10 pm (kvůli difrakční vadě)

$$d = \frac{0,61 \cdot \lambda}{n \cdot \sin \alpha_0}$$

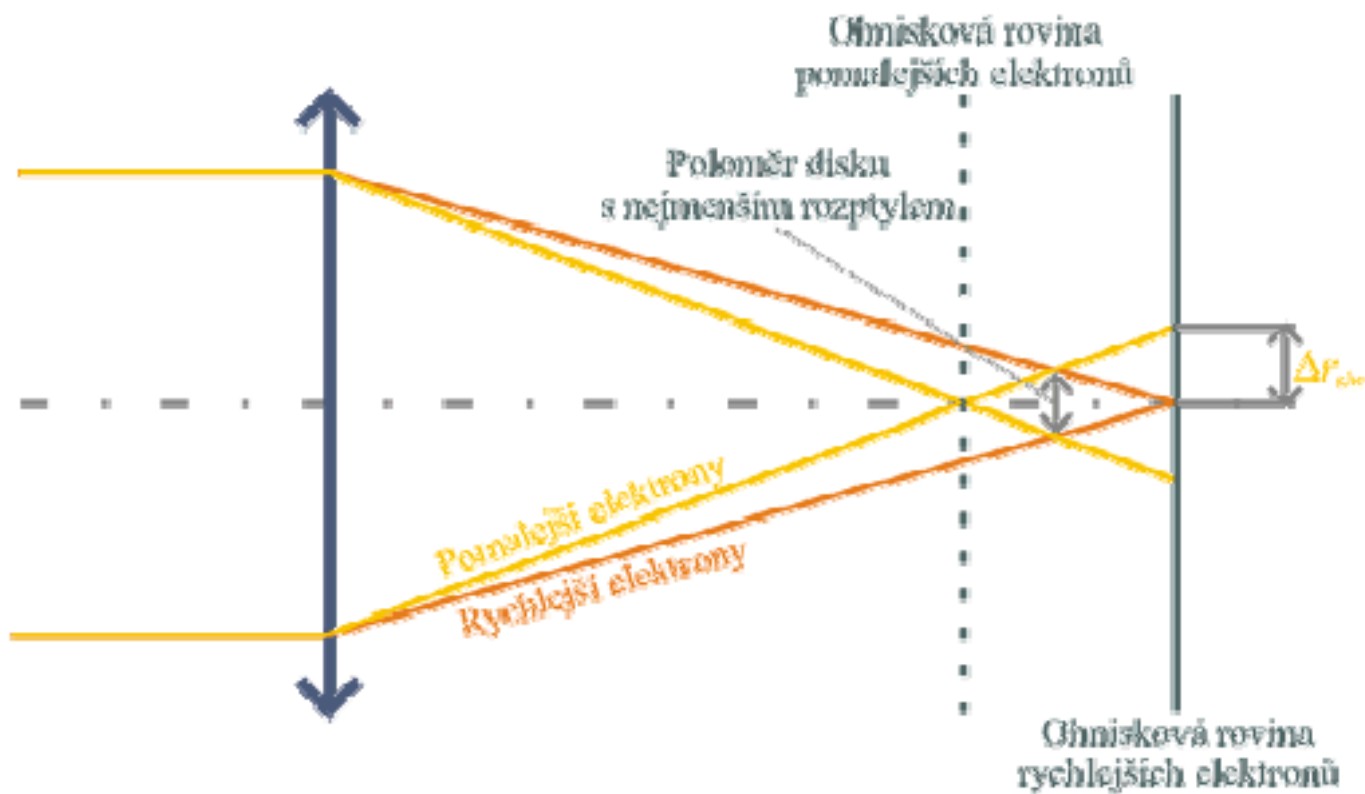
Druhy optických vad

- Sférická vada (otvorová)
- Chromatická vada
- Osový astigmatismus

Chromatická vada

- Vznik v důsledku rozdílných energií elektronů ve svazku
- Pomalejší elektrony s větší vlnovou délkou jsou v mag. poli vychylovány jinak a protínají osu cívky v jiném bodě, než elektrony s vyšší rychlostí – nevzniká bod, ale kroužek
- Jakákoli změna urychlojícího napětí způsobí tuto vadu
- Elektrony také mohou ztratit rychlost při srážce s předmětem

Chromatická vada



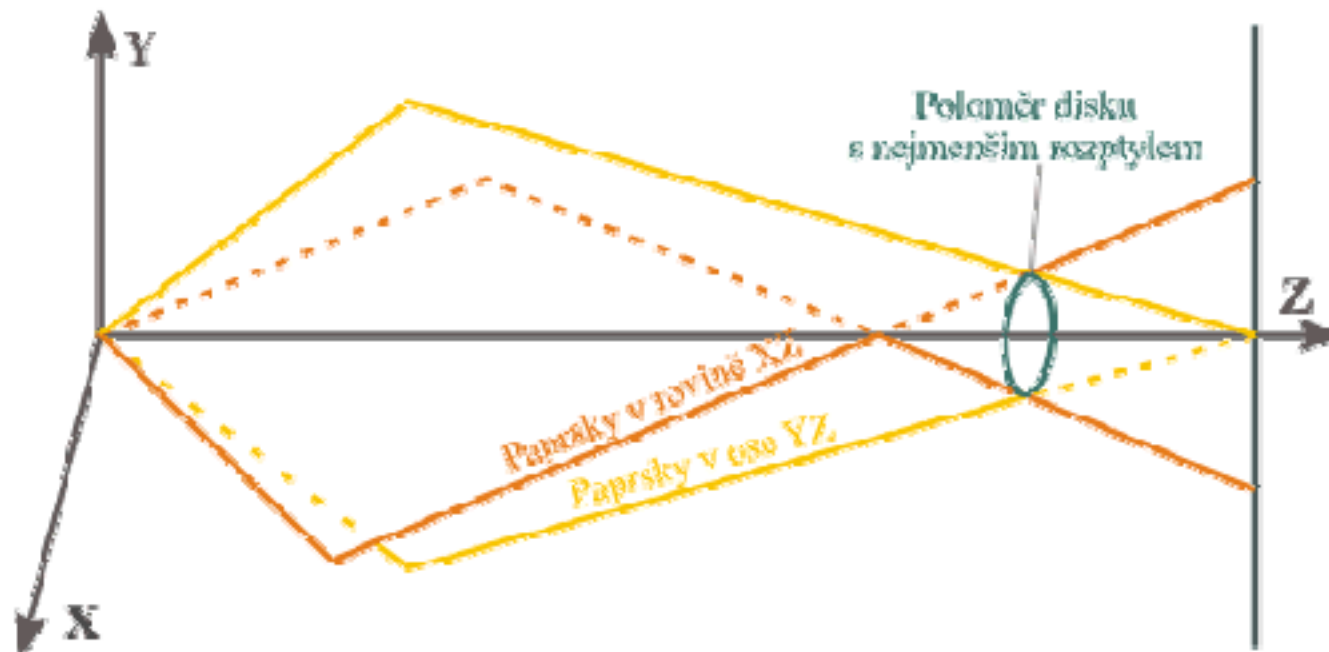
Odstranění chromatické vady

- Zlepšení koherentnosti a monochromatickosti elektronového svazku – maximální stabilizace urychlovacího napětí
- Odstranit zcela nelze, kvůli změnám energie při interakci elektronů s preparátem – slabé řezy

Osový astigmatismus

- Způsobený nesymetrií magnetického pole – elektrony procházejí čočkou v různých rovinách (mají různé ohnisko) – dvě na sebe kolmé osy
- Může ho také způsobovat lokální bodový náboj tvořený např. Nevodivými nečistotami v tubusu mikroskopu
- Nečistoty se nabíjejí a svým rušivým elektrickým polem způsobují změny v drahách elektronů

Osový astigmatismus



Odstranění osového astigmatismu

- Velice jednoduchá korekce
- Korigování magnetickým polem stigmátoru (vnější přídavné magnetické pole určeného směru)
- V SEM se provádí až několikrát denně

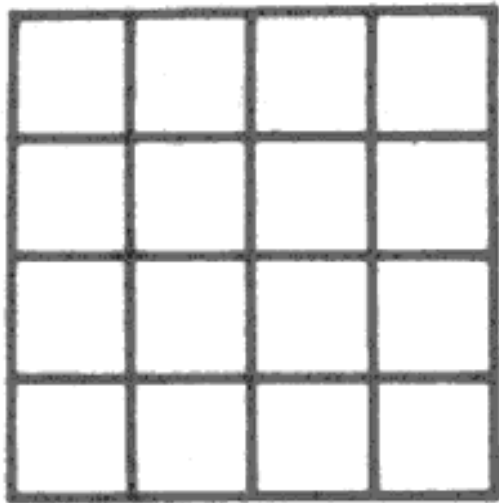
Sférická vada

- Neschopnost čočky zaostřovat všechny paprsky vycházející z bodového zdroje opět do jednoho bodu
- Elektrony procházející vnější částí čočky jsou zaostřovány do bodu, který leží blíž čočce, než elektrony, které procházejí čočkou v těsné blízkosti optické osy – vzniká kaustická plocha
- Důsledek je jiné zvětšení v krajích obrazu než v jeho středu

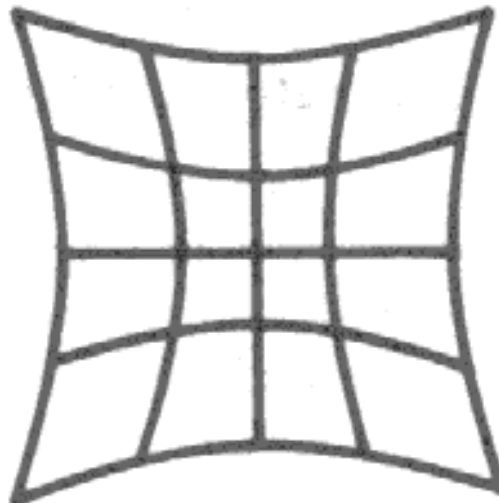
Sférická vada

- Velikost sférické vady roste s třetí mocninou poloviční úhlové apertury

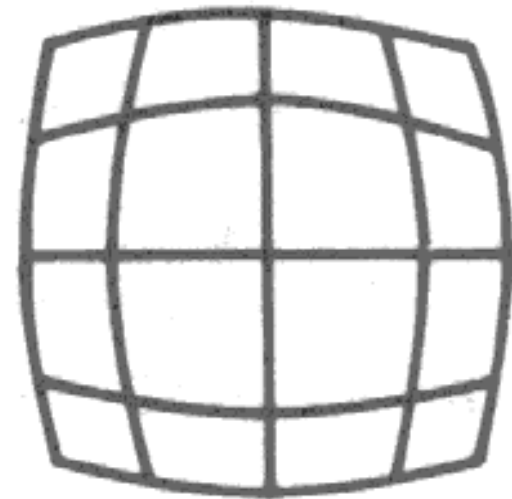
V



B

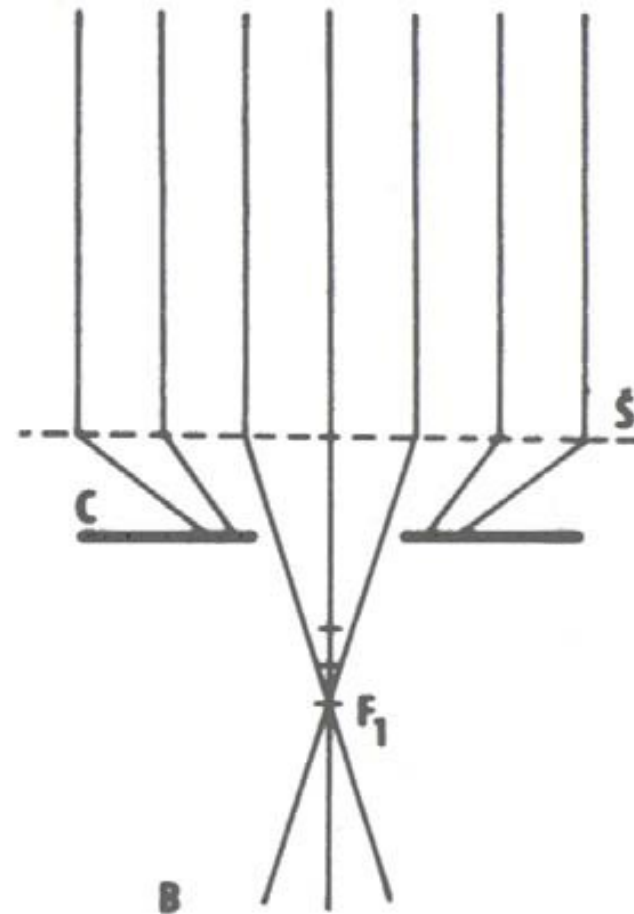
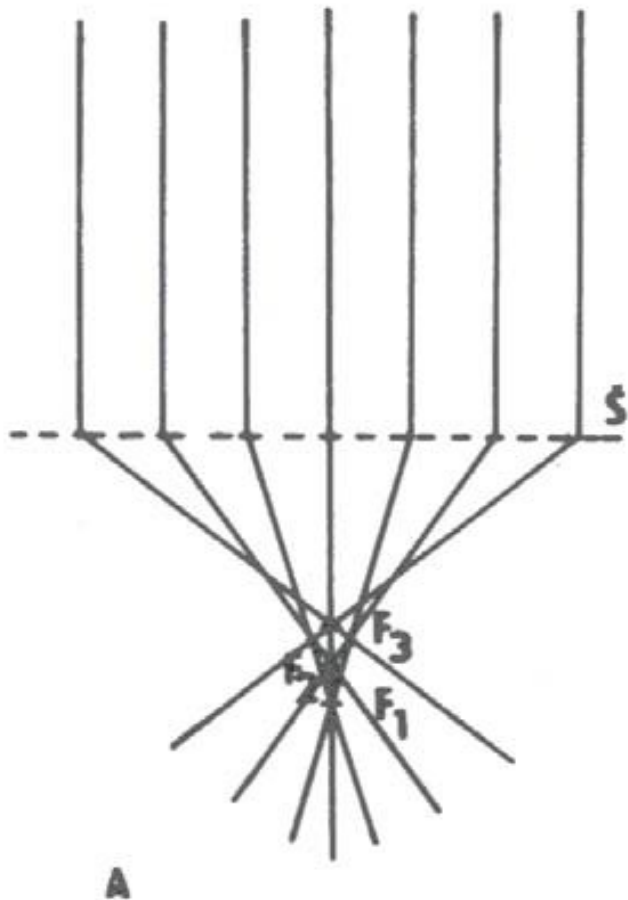


C

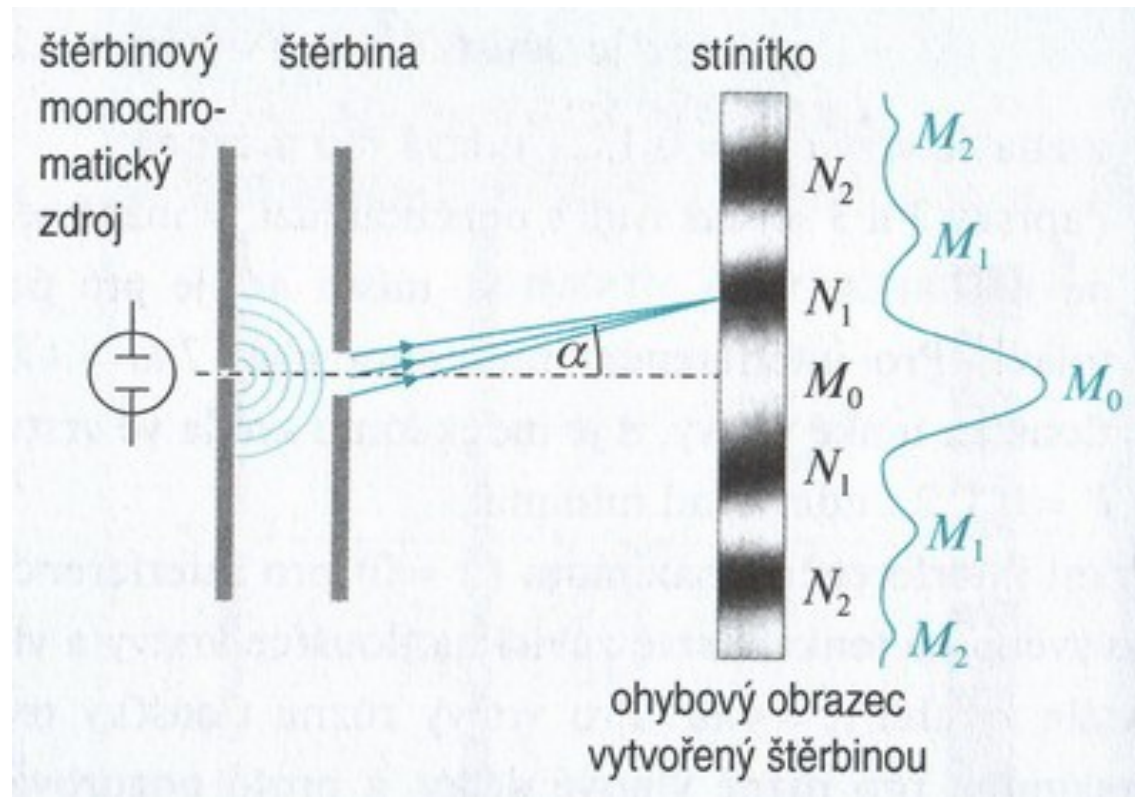


Odstranění sférické vady

- Vada se omezuje odstraněním okrajových paprsků pomocí clony



- Problémy s tímto řešením – malá světelnost, difrakce na cloně



- Řešení vymyslel Otto Scherzer

Scherzerova věta (1936)

V elektronově optické soustavě, kde

- pohyb elektronů je řízen elektromagnetickými poli
- tato pole jsou statická
- mají osovou symetrii
- v paprskovém prostoru nejsou
- prostorové náboje
- ,trpí zobrazení jak chromatickou tak sférickou vadou



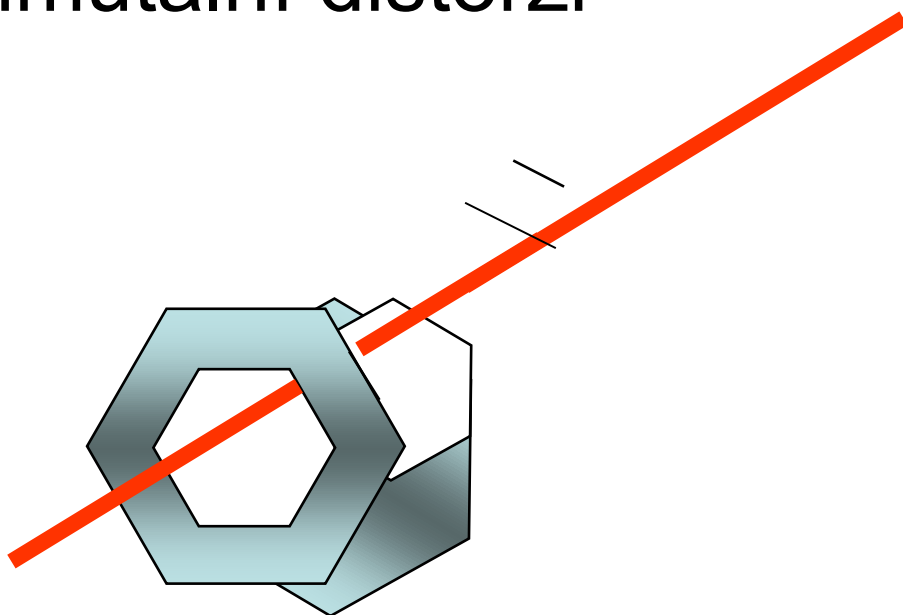
Scherzerovy návrhy na překonání sférické vady

V elektronově optické soustavě provést jednu ze změn

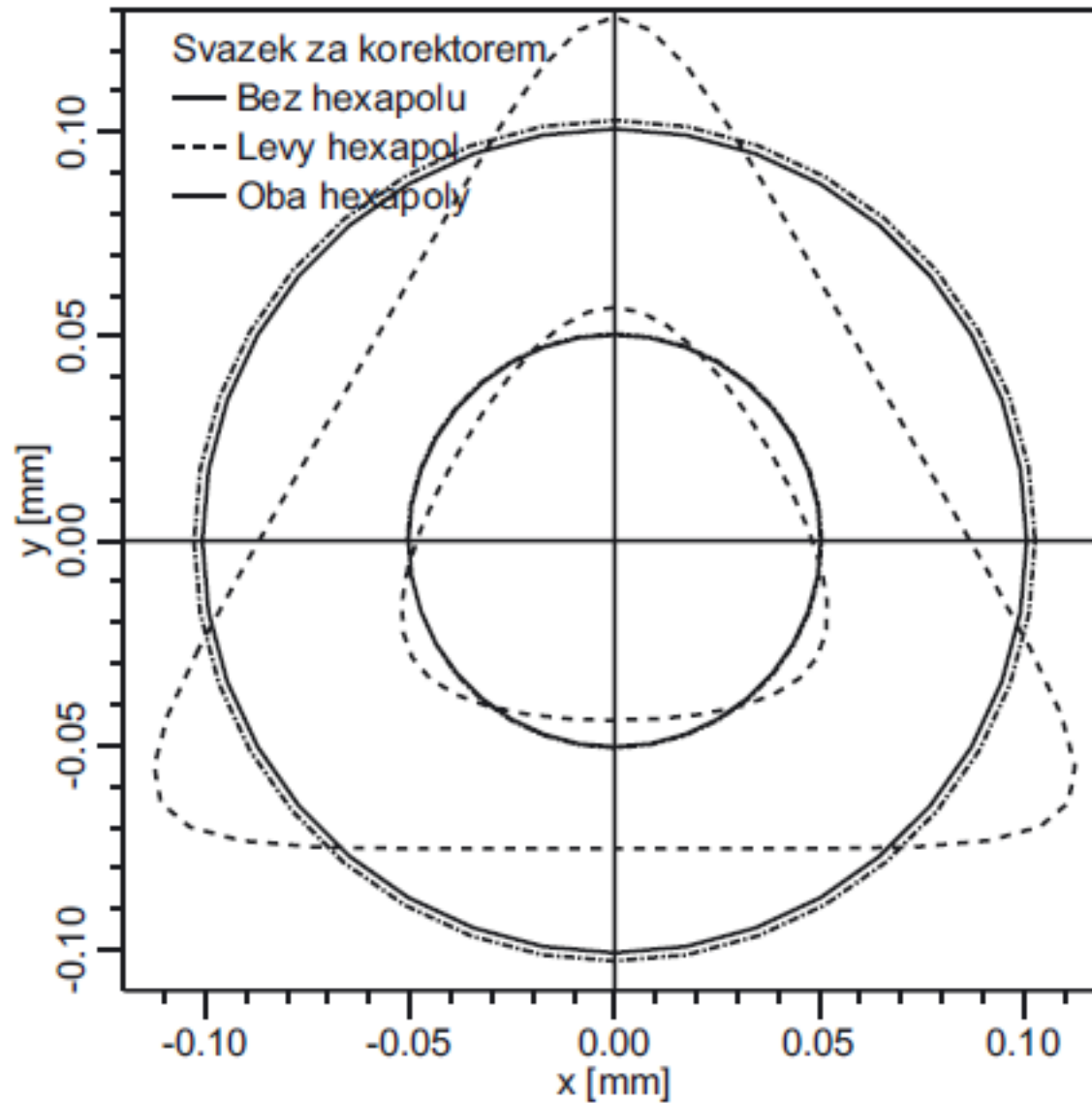
- K elektromagnetickým polím přidat zrcadlo
- Použít rychle oscilující pole
- **Narušit osovou symetrii (kvadrupóly, oktopóly)**
- Do paprskového prostoru vložit prostorové náboje
- a tím se překoná jak chromatická, tak kladná sférická aberace

Řešení otvorové vady

- Opuštění axiální symetrie (nezávislost na azimutu)
- Dva navzájem pootočené hexapóly téměř dokonale kompenzují otvorové vady při mizivé azimutální distorzi



Korekce dvou kruhových svazků



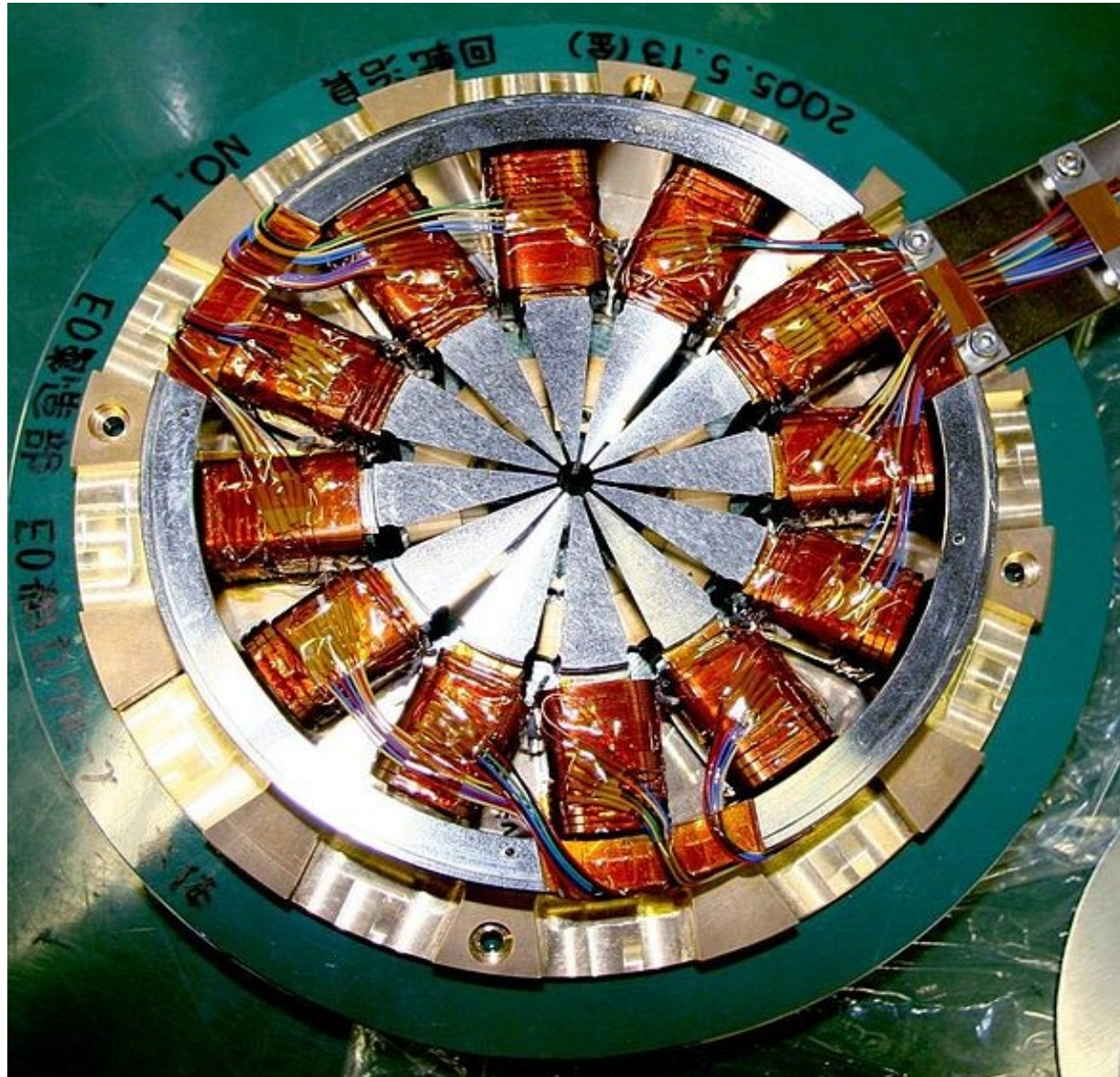
Přehled vyzkoušených korektorů

Correction of Aberrations				
	SEM	STEM	TEM	LEEM
Spherical C_3	-	+	+	-
Spherical & Chromatic $C_3 + C_c$	+	+	?	+

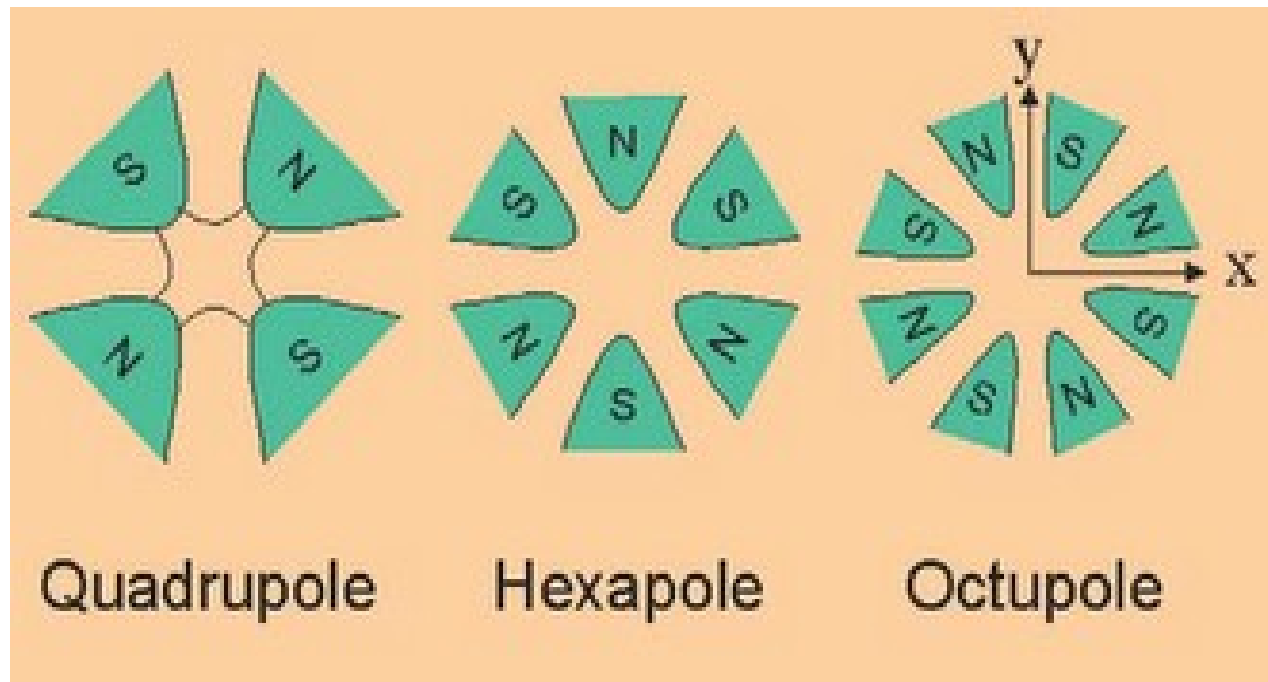
Type of Corrector		SEM	STEM	TEM	LEEM
Hexapole	C_3	-	+	+	-
Quadrupole	C_3	-	+	+	-
Electrostatic Mirror	$C_3 C_c$	+	-	-	+
Purely Electrostatic Quad.	$C_3 C_c$	+	-	-	?
Quadrupole Electr./Magn.	$C_3 C_c$	+	+	-?	-

Key: + = effective and already demonstrated;
 + = feasible, but not yet demonstrated;
 - = not feasible or not useful;
 ? or ? = questionable or very questionable

12-ti pólový korektor



Druhy korektorů



Zdroje

- Skripta (prezentace) B04M2112 ElectronOptics
- <http://jmo.fzu.cz/2006/Jmo-10/JMO-200610.pdf>
- http://en.m.wikipedia.org/wiki/Scanning_transmission_electron_microscope
- <http://www.paru.cas.cz/lem/book/Podkap/2.3.html>
- http://is.muni.cz/th/268889/prif_b/Bakalarka1.txt
- http://theses.cz/id/y4dz0w/Diplomov_prce.pdf
- <http://web.natur.cuni.cz/parasitology/parpages/mikroskopickatechnika/elektronova.htm>