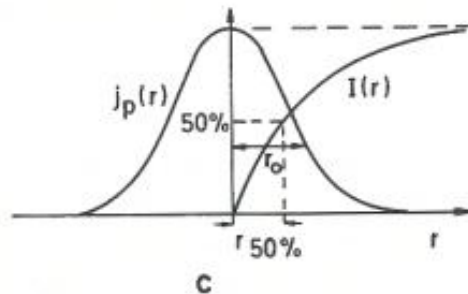
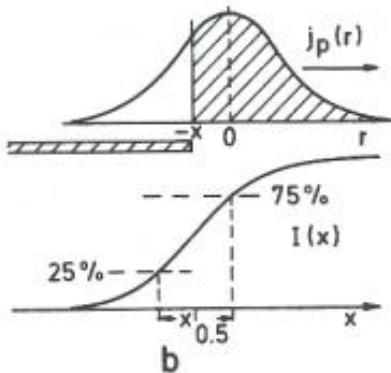
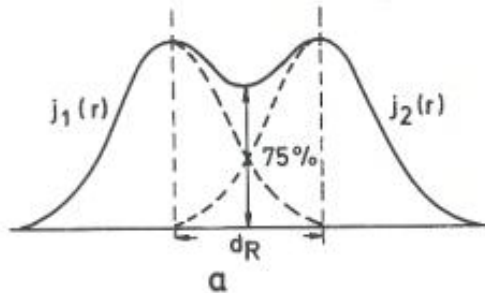


Rozlišení v elektronové mikroskopii



- Znalost aberačních koeficientů nám umožňuje určit proudovou hustotu svazku na vzorku
- Z profilu proudové hustoty lze určit rozlišení
 - Rayleigho kritérium
 - Přejít přes hranu
 - Oblast, která obsahuje 50%, 75%, ... částic
- Rozlišení tedy lze spočítat z proudových hustot svazků
- Pro systémy se sférickou a chromatickou vadou lze ale použít aproximativní vztahy ...

Odhad rozlišení je dán – uvažujeme jen sférickou a chromatickou vadu

$$d^2 = \left[(d_S^4 + d_D^4)^{\frac{1.3}{4}} + d_G^{1.3} \right]^{2/1.3} + d_C^2$$

kde:

$$d_S = 0.18C_S\alpha^3, \quad d_C = 0.34C_C \frac{\Delta E}{E} \alpha, \quad d_D = 0.54\lambda\alpha^{-1}$$

$$d_G = Md_{vS} = \left(\frac{4I_p}{\pi^2 B \Phi^*} \right)^{1/2} \alpha^{-1}$$

Co dělat, aby bylo rozlišení co nejlepší:

- **Optimální hodnota aperturního úhlu α (hodnota, pro kterou je d minimální),**

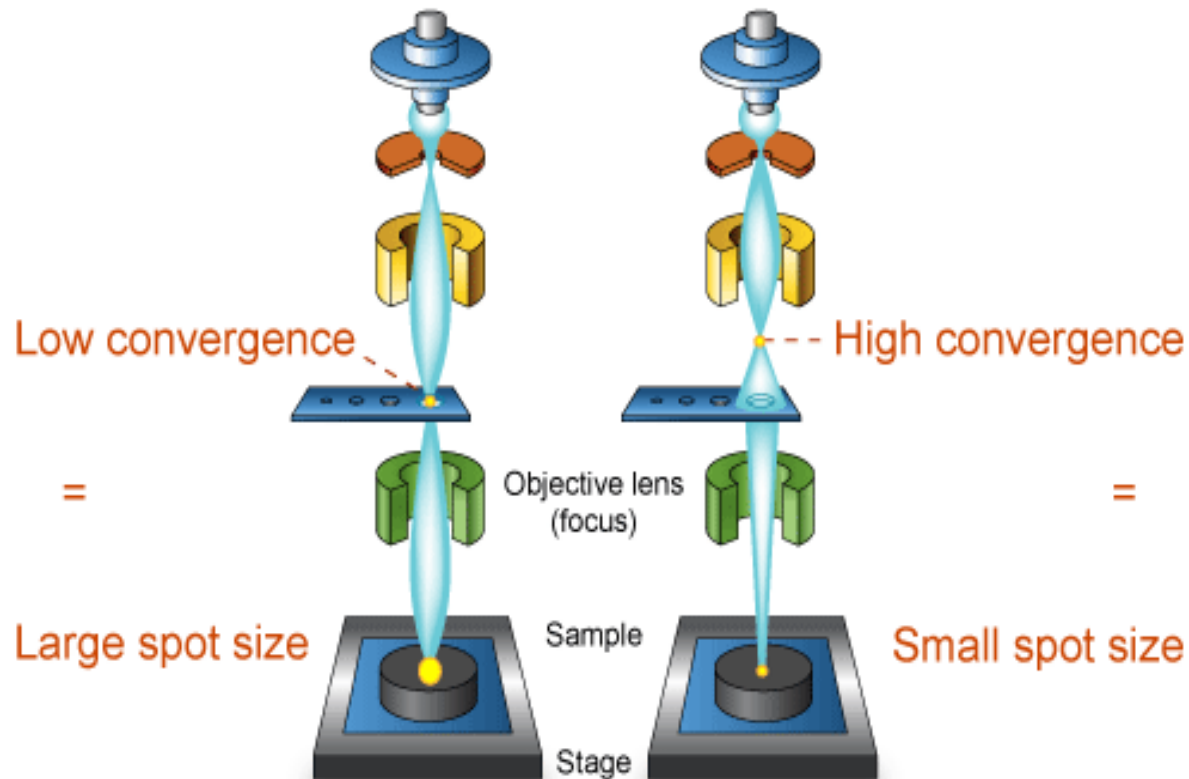
$$\frac{\partial d}{\partial \alpha} = 0$$

- Minimalizace koeficientů vad (dobrý návrh systému, korektory)
- Minimalizace energiové šířky, vlnové délky a velikosti virtuálního zdroje

Kondenzorové čočky - optimalizace aperturního úhlu

Jsou to první čočky za elektronovým zdrojem

- V SEMu se používají na zmenšení zdroje, ale především na kontrolu proudu v systému – nezávislá volba proudu a aperturního úhlu
- V TEM navíc definují režim ozáření vzorku

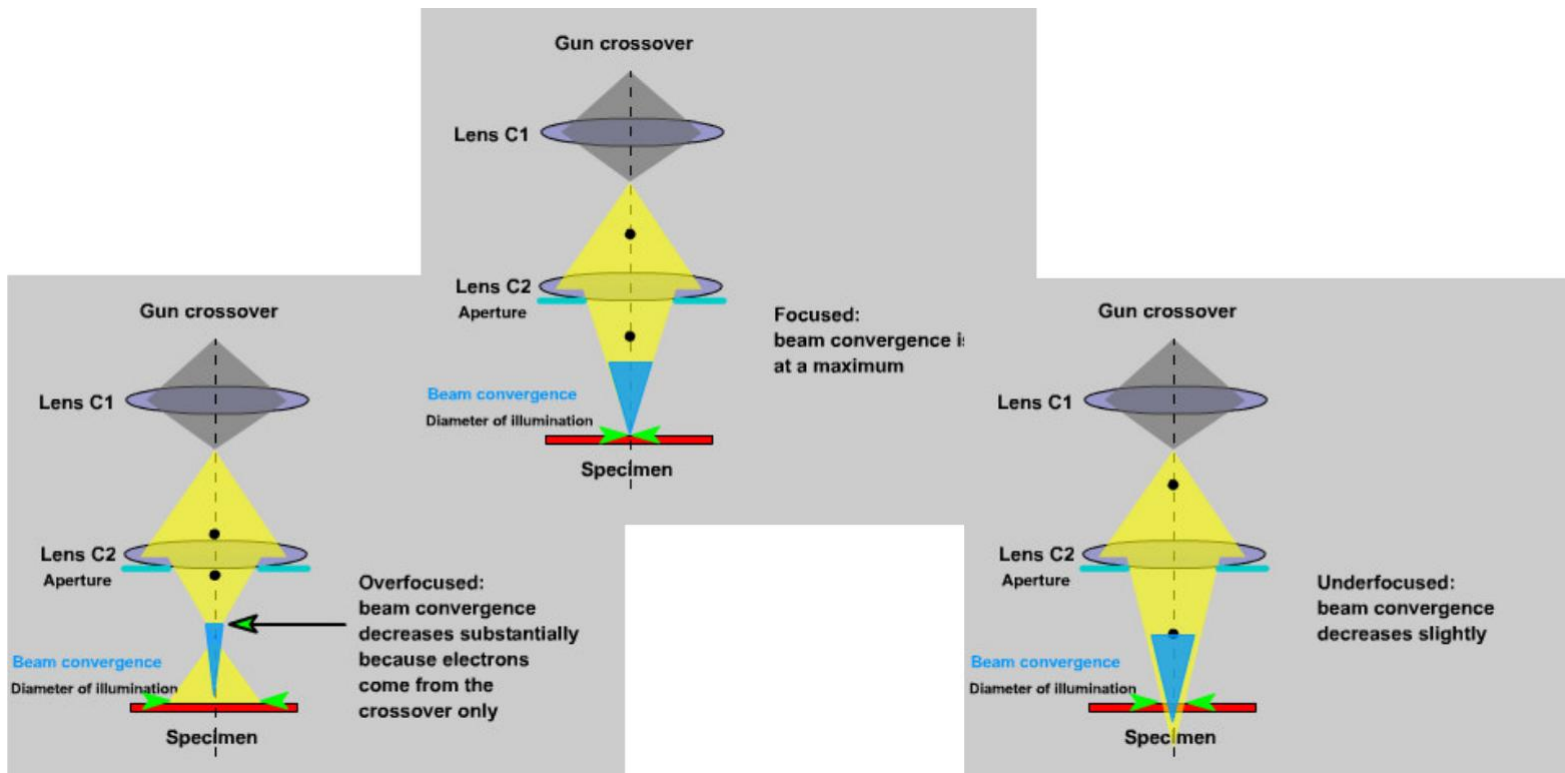


Elektronové čočky a návrh mikroskopu

Kondenzorové čočky – optimalizace aperturního úhlu

Jsou to první čočky za elektronovým zdrojem

- Ve SEMu se používají na zmenšení zdroje, ale především na kontrolu proudu v systému
- V TEM navíc definují režim ozáření vzorku



Odhad rozlišení je dán – uvažujeme jen sférickou a chromatickou vadu

$$d^2 = \left[(d_S^4 + d_D^4)^{\frac{1.3}{4}} + d_G^{1.3} \right]^{2/1.3} + d_C^2$$

kde:

$$d_S = 0.18C_S\alpha^3, \quad d_C = 0.34C_C \frac{\Delta E}{E} \alpha, \quad d_D = 0.54\lambda\alpha^{-1}$$

$$d_G = Md_{vS} = \left(\frac{4I_p}{\pi^2 B \Phi^*} \right)^{1/2} \alpha^{-1}$$

Co dělat, aby bylo rozlišení co nejlepší:

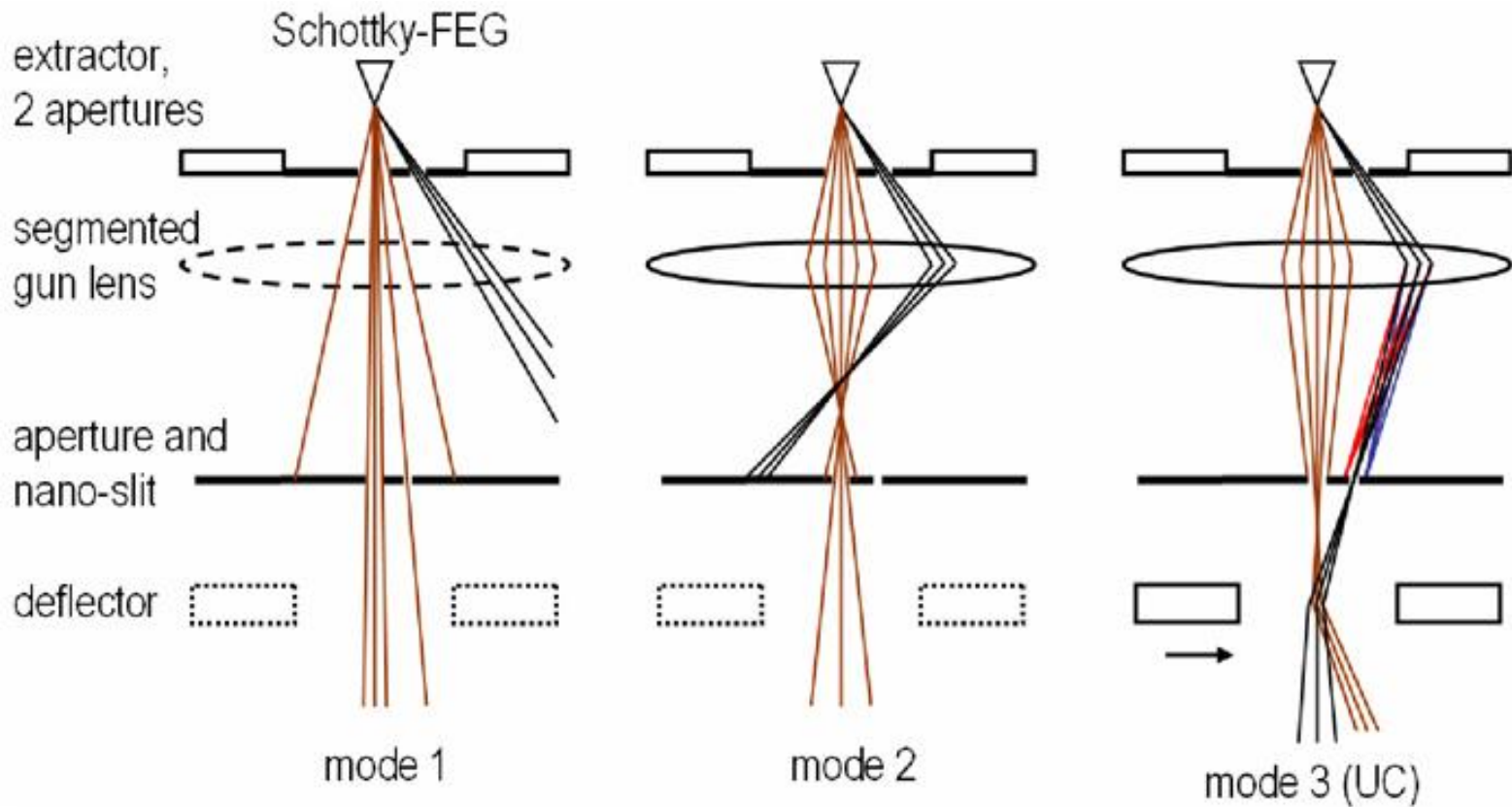
- Optimální hodnota aperturního úhlu α (hodnota, pro kterou je d minimální),

$$\frac{\partial d}{\partial \alpha} = 0$$

- **Minimalizace energiové šířky, vlnové délky a co největší brightness zdroje**
- Minimalizace koeficientů vad (dobrý návrh systému, korektory)

Redukce energiové šířky

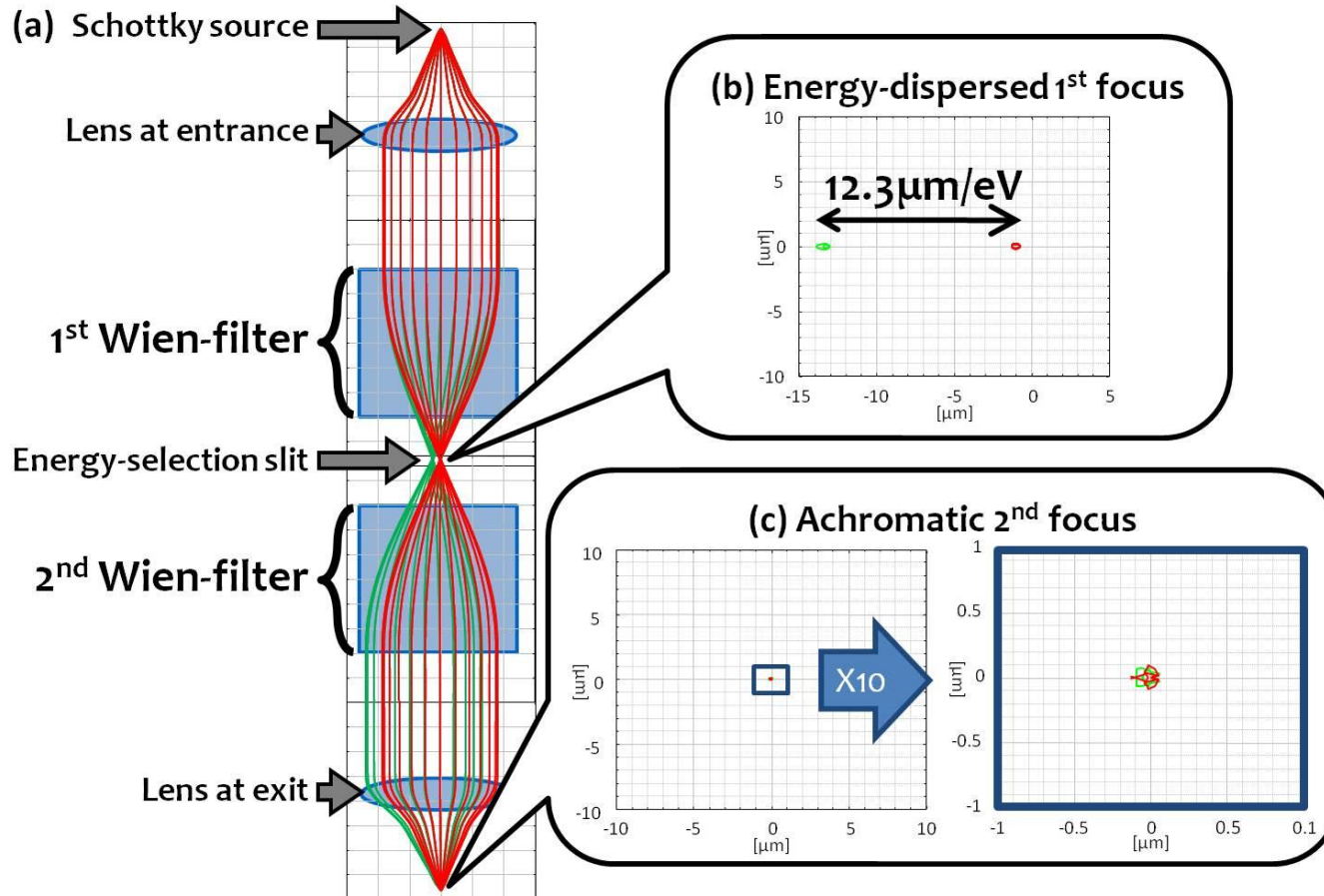
- Výběr zdroje s malou energiovou šířkou (Schottkyho, studená emise)
- Použití monochromátoru



Monochromátor FEI

Redukce energiové šířky

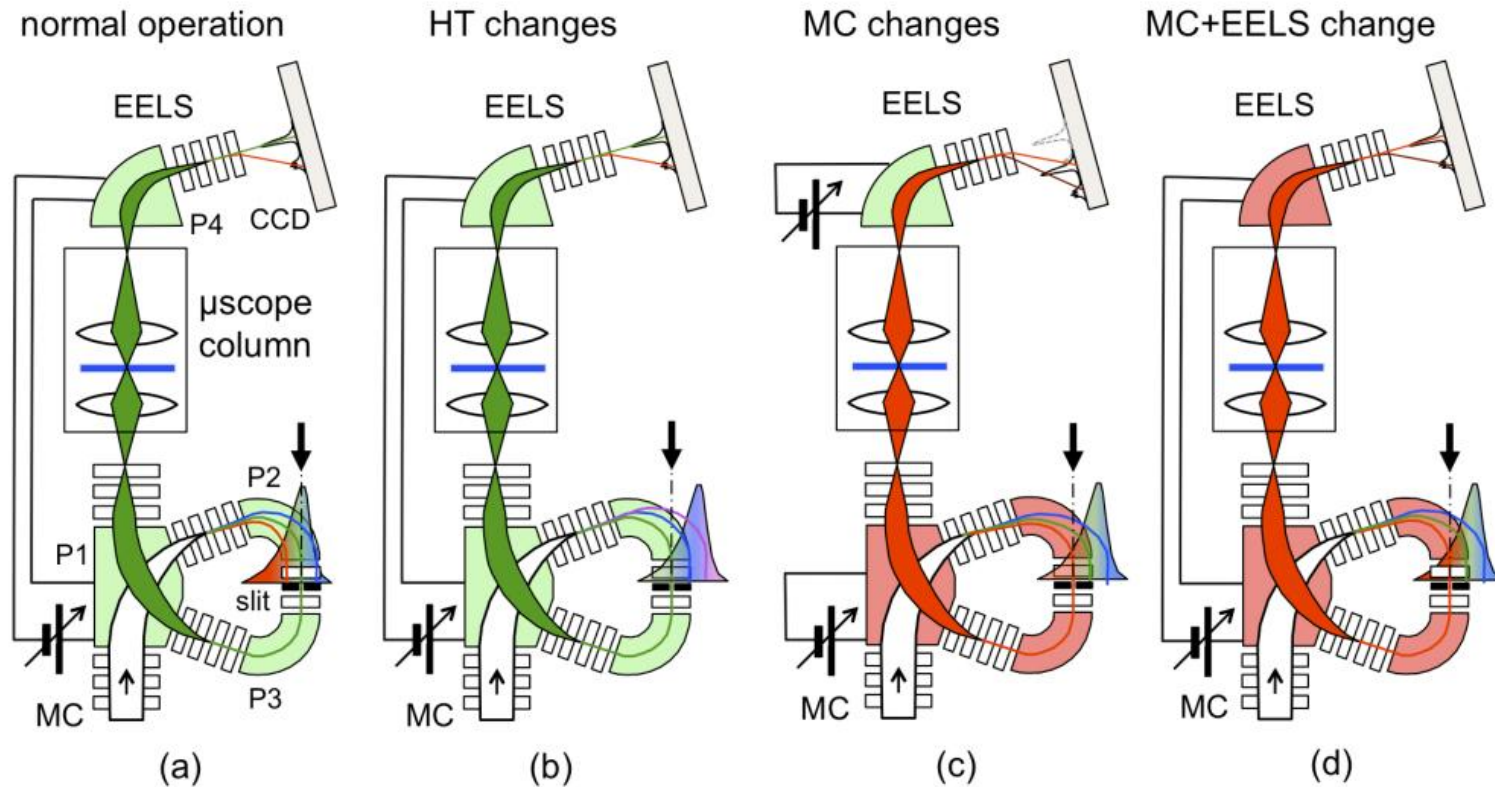
- Výběr zdroje s malou energiovou šířkou (Schottkyho, studená emise)
- Použití monochromátoru



Monochromátor založený na Wienově filtru

Redukce energiové šířky

- Výběr zdroje s malou energiovou šířkou (Schottkyho, studená emise)
- Použití monochromátoru



Monochromátor v dedicated STEM mikroskopu (Nion)

Odhad rozlišení je dán – uvažujeme jen sférickou a chromatickou vadu

$$d^2 = \left[(d_S^4 + d_D^4)^{\frac{1.3}{4}} + d_G^{1.3} \right]^{2/1.3} + d_C^2$$

kde:

$$d_S = 0.18C_S\alpha^3, \quad d_C = 0.34C_C \frac{\Delta E}{E} \alpha, \quad d_D = 0.54\lambda\alpha^{-1}$$

$$d_G = Md_{vS} = \left(\frac{4I_p}{\pi^2 B \Phi^*} \right)^{1/2} \alpha^{-1}$$

Co dělat, aby bylo rozlišení co nejlepší:

- Optimální hodnota aperturního úhlu α (hodnota, pro kterou je d minimální),

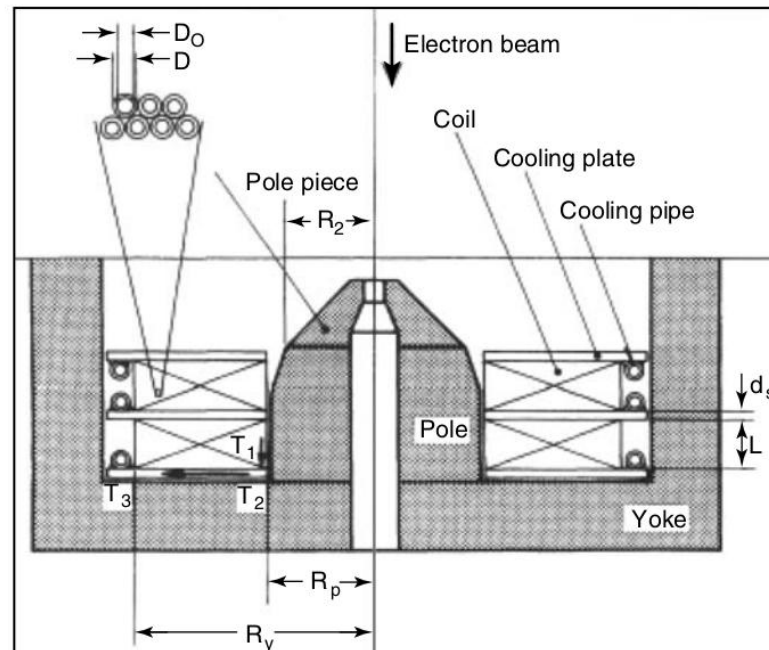
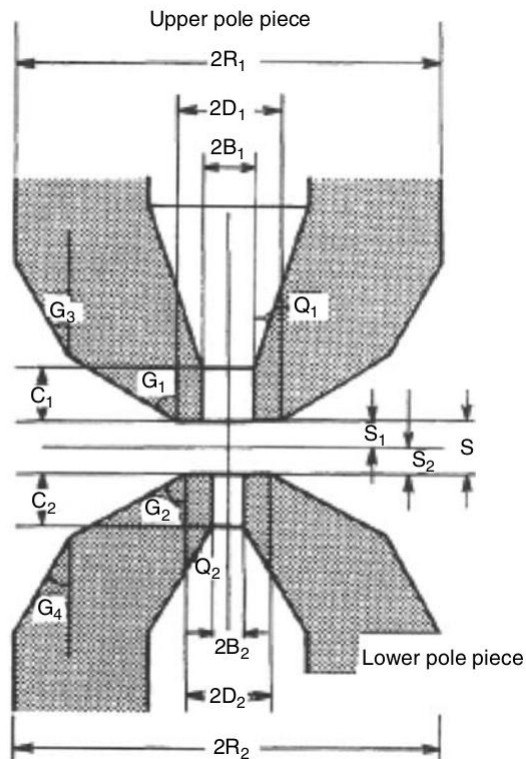
$$\frac{\partial d}{\partial \alpha} = 0$$

- Minimalizace energiové šířky, vlnové délky a velikosti virtuálního zdroje
- **Minimalizace koeficientů vad (dobrý návrh systému, korektory)**

Objektivové čočky – zvětšení, minimalizace vad

Nejkritičtější místo v mikroskopu, mají největší efekt na rozlišení (zmenšení a vady systému).

- V TEM se používá symetrická magnetická čočka, vzorek je umístěn do místa s nejvyšším polem.
- Velmi dobré optické vlastnosti, na druhou stranu velmi složitá manipulace se vzorkem a přidávání různých analytických systémů

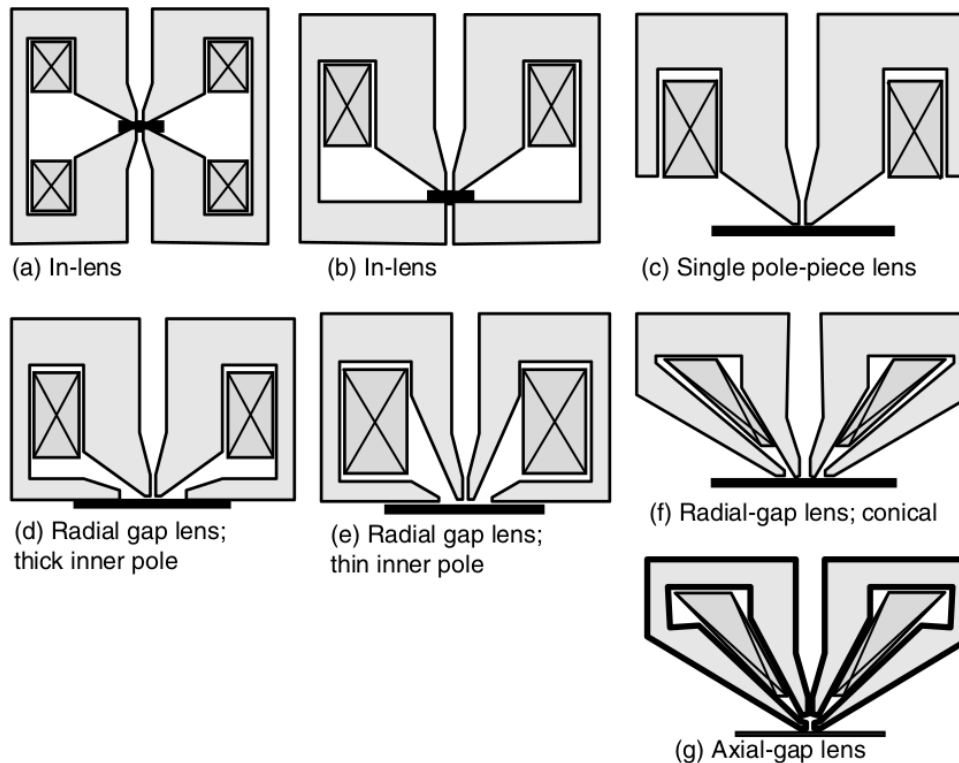


Spodní část objektivové čočky

Objektivové čočky – zvětšení, minimalizace vad

Nejkritičtější místo v mikroskopu, mají největší efekt na rozlišení, (zmenšení a vady systému).

- V SEMu se zpravidla používají magnetické objektivové čočky různého designu i vlastností.
- Elektrostatické čočky se používají v případě, pokud chceme vyloučit vliv magnetického pole na vzorek



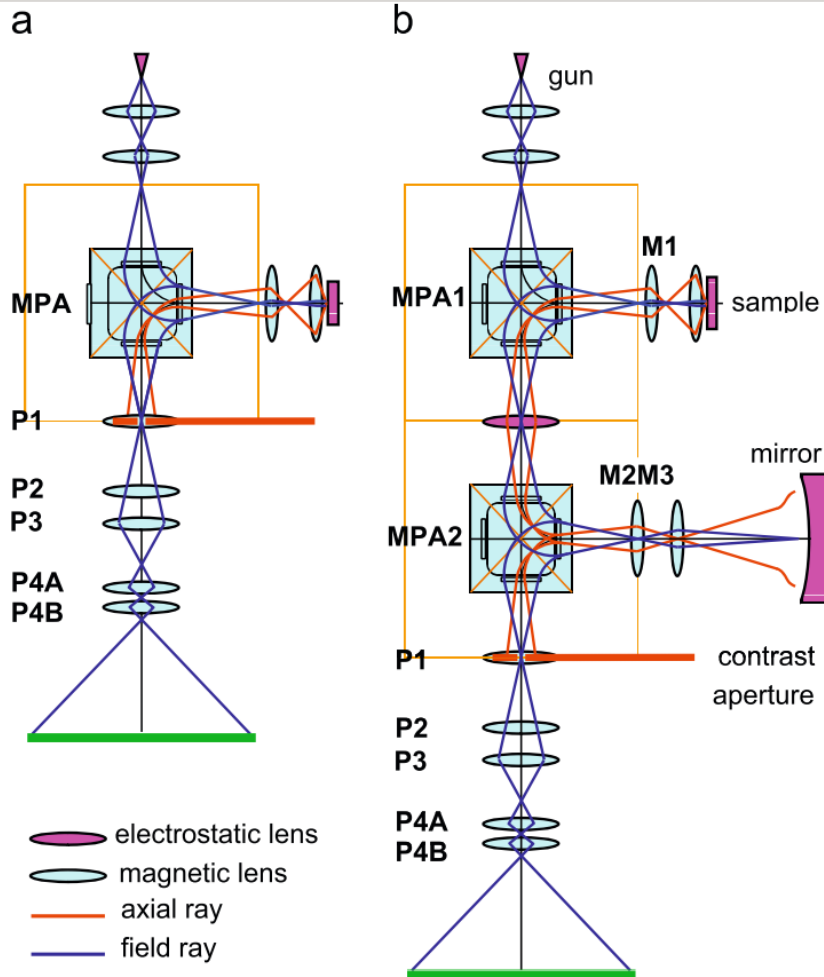
Scherzerův teorém platí za předpokladu

- Osová symetrie
- Statické pole
- Elektrony se nesmí vracet (tj. vylučuje zrcadlo)
- Potenciály a jejich derivace musí být spojité

Při porušení jednoho z těchto požadavků můžeme dostat prvek se zápornou sférickou vadou

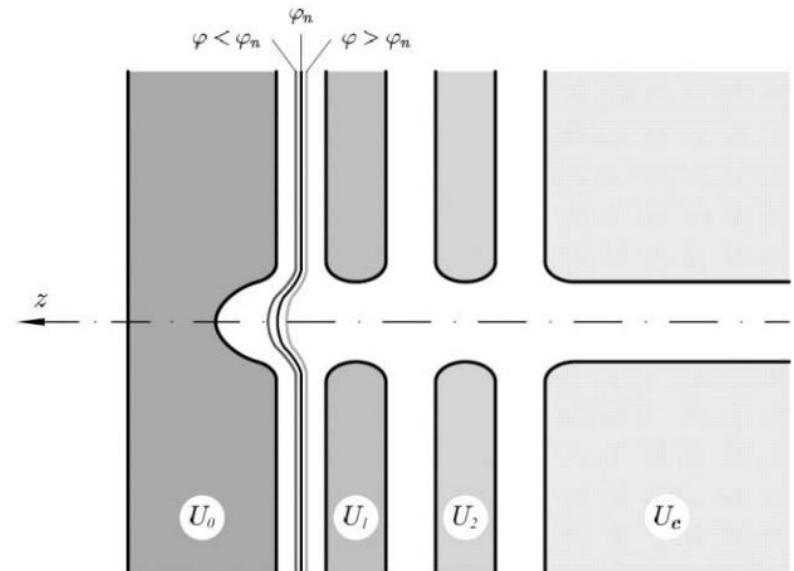
- Použití zrcadla
- Multipólové korektory
- Zbylé způsoby se ukázali jako prakticky nerealizovatelné

Zrcadlo jako korektor



Nekorigovaný a korigovaný LEEM

- Je možné korigovat sférickou i chromatickou vadu
- Užívá se především v systémech LEEM, PEEM

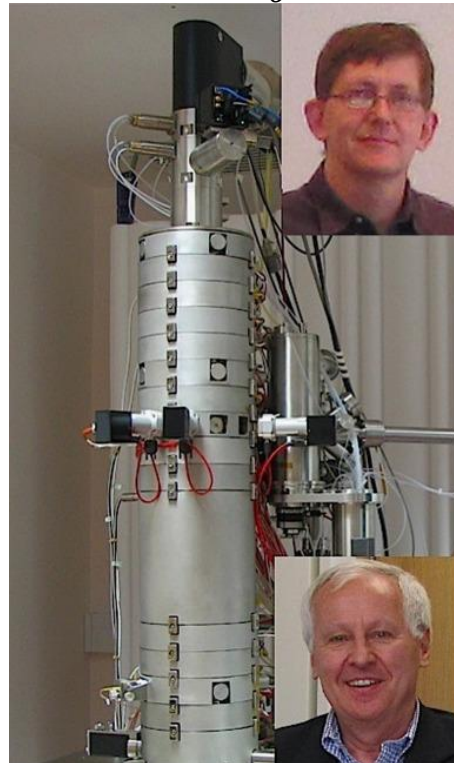
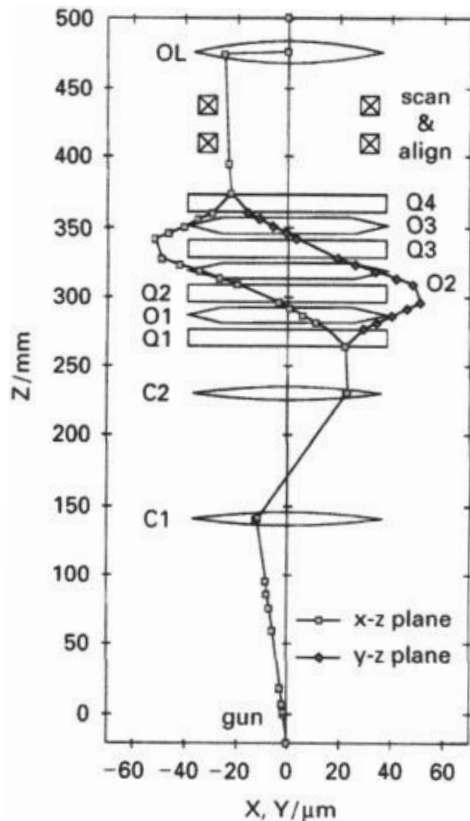


Ukázka návrhu korekčního zrcadla

Multipolové korektory

- Multipólová pole mohou produkovat osové vady s opačnou orientací než osově symetrické čočky
- Přispívají však do systému dalšími vadami \Rightarrow takový návrh systému, kde budou potlačeny jak vady čoček, tak tyto dodatečné vady – dodatečná symetrie systému

$$\delta x_{multi\ p} = x_b \int_{z_0}^{z_i} x_a(z) C_{multi\ p}(z) dz + \dots$$

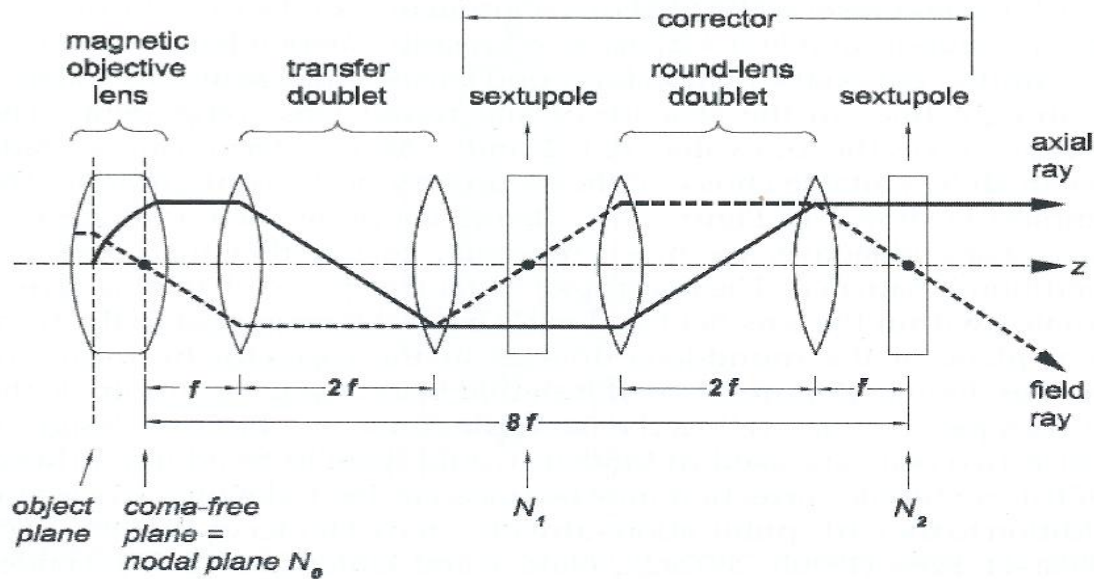


Oktupólový korektor sférické vady (Nion)

Multipolové korektory

- Multipólová pole mohou produkovat osové vady s opačnou orientací než osově symetrické čočky
- Přispívají však do systému dalšími vadami \Rightarrow takový návrh systému, kde budou potlačeny jak vady čoček, tak tyto dodatečné vady – dodatečná symetrie systému

$$\delta x_{multi\ p} = x_b \int_{z_0}^{z_i} x_a(z) C_{multi\ p}(z) dz + \dots$$



Hexapólový korektor sférické vady (CEOS)

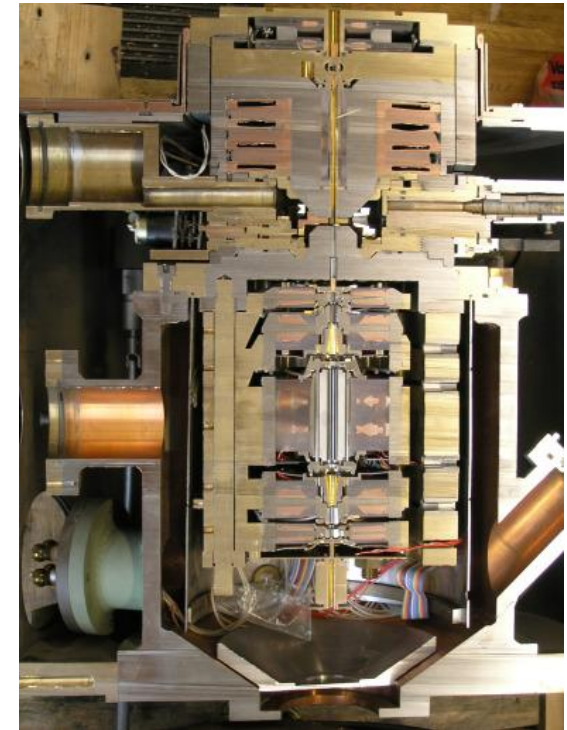
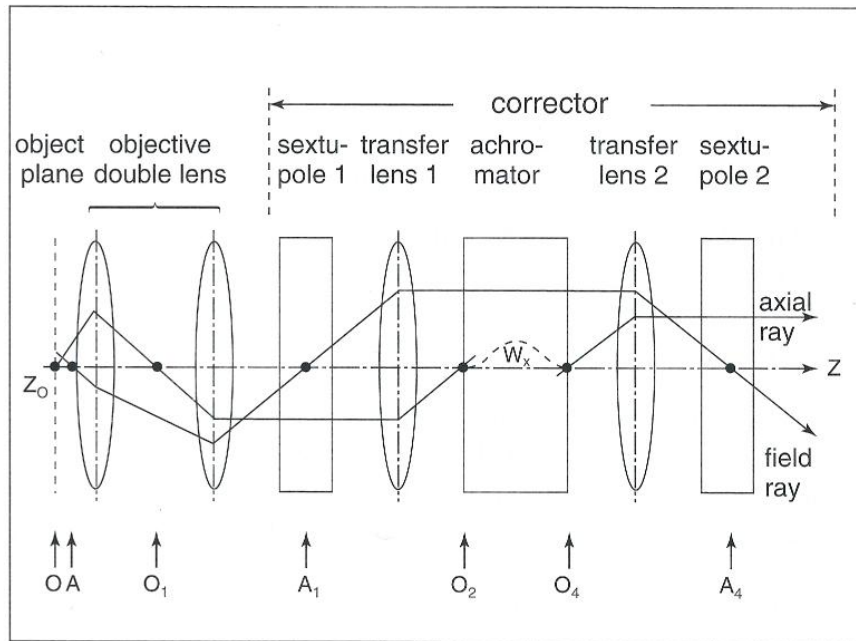


Magnetický hexapól

Multipolové korektory

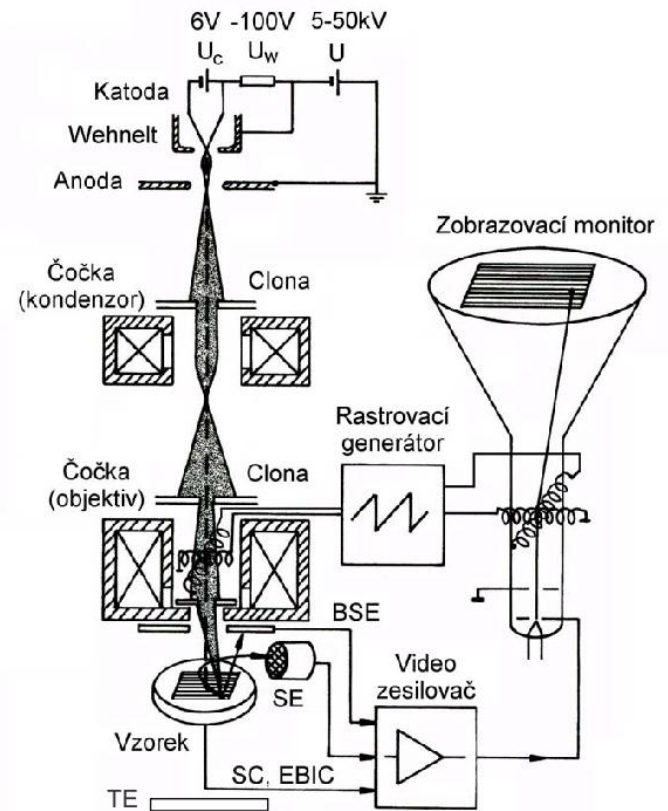
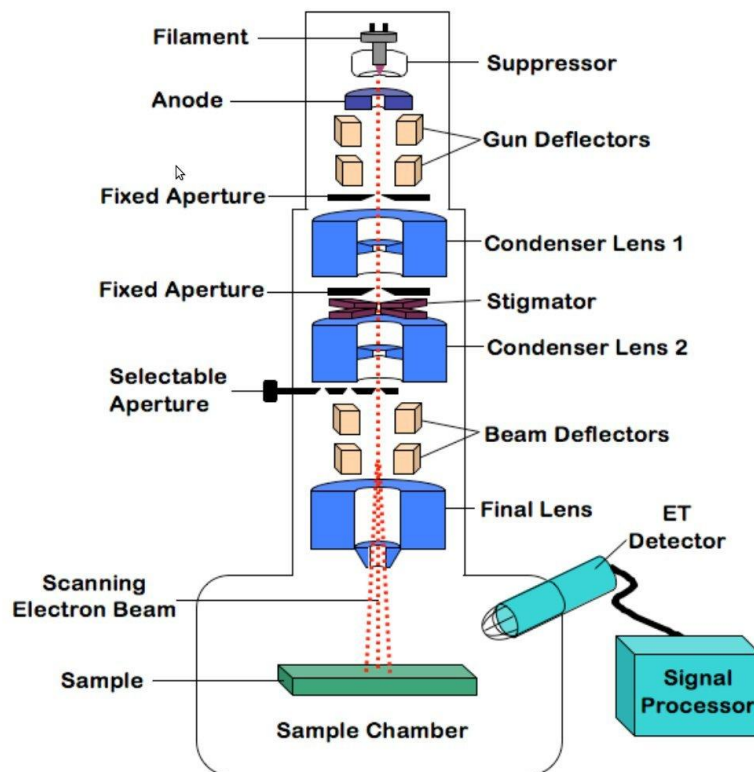
- Multipólová pole mohou produkovat osové vady s opačnou orientací než osově symetrické čočky
- Přispívají však do systému dalšími vadami \Rightarrow takový návrh systému, kde budou potlačeny jak vady čoček, tak tyto dodatečné vady – dodatečná symetrie systému

$$\delta x_{multi\ p} = x_b \int_{z_0}^{z_i} x_a(z) C_{multi\ p}(z) dz + \dots$$

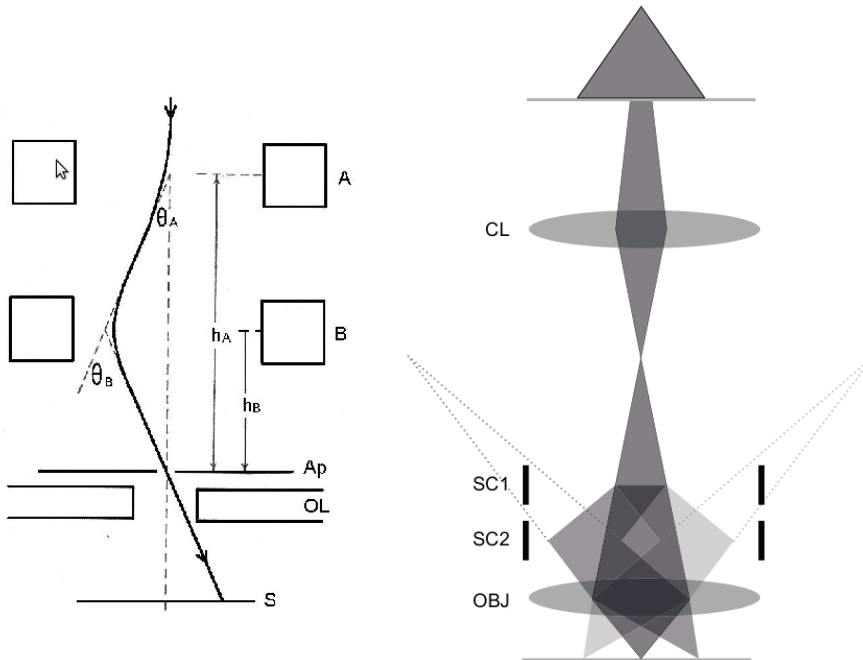


Hexapólový korektor chromatické vady (CEOS)

- Vychýlení svazku – SEM



Optimalizace vychylovacího systému



- Použití deflektorů s co nejmenšími vadami
- Elektronový svazek při každém úhlu vychylky vychází ze stejného bodu na optické ose $V_B = -\alpha V_A$
- Protíná osu ve středu clony a v blízkosti středu objektivové čočky – coma-free plane
- Minimální vady vychylování

