

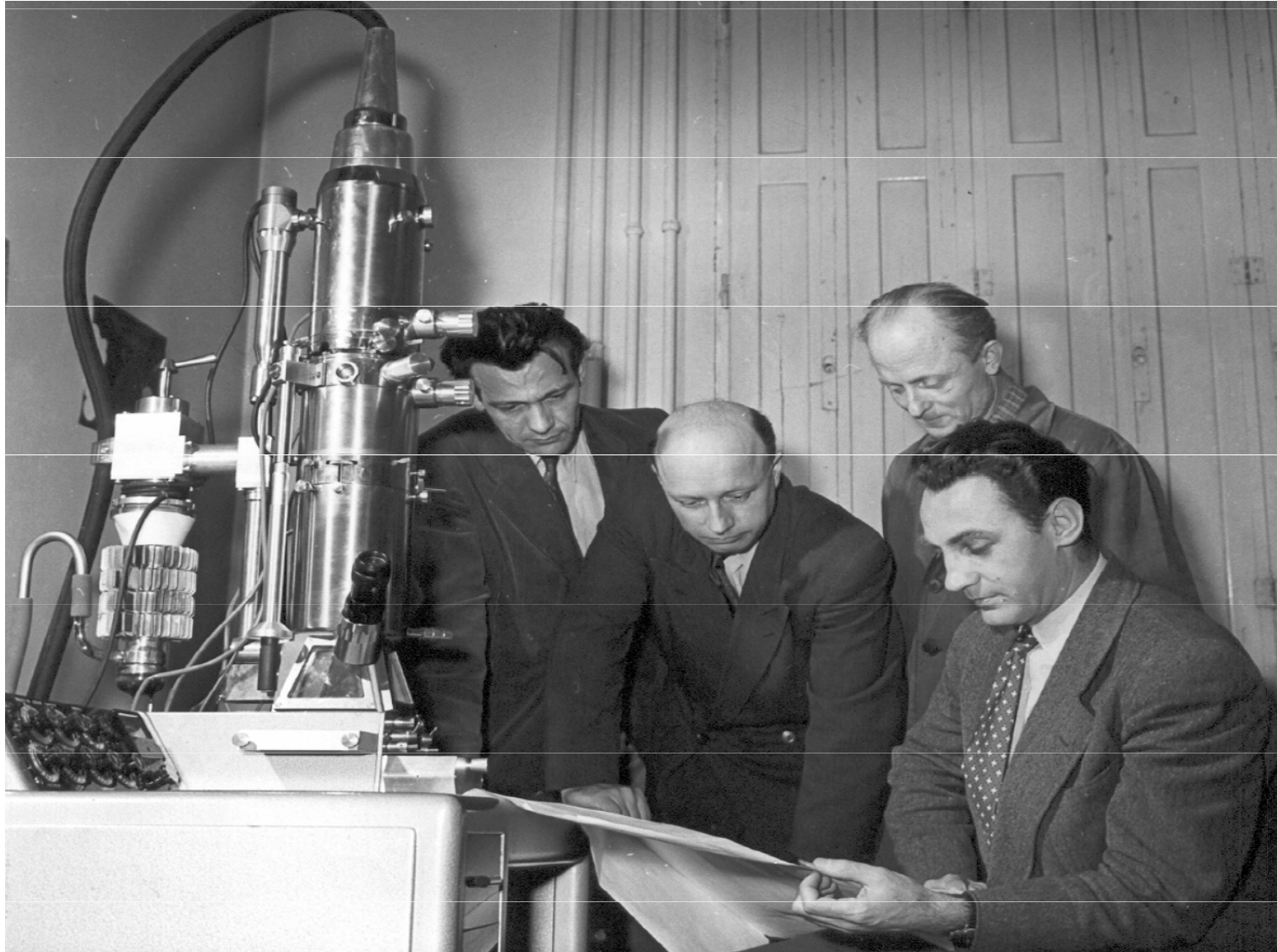
# Elektronová mikroanalýza

Vítězslav Otruba

# Elektronová mikroanalýza – trocha historie

- 1949 – Castaing postavil první mikrosundu s vlnově disperzním spektrometrem a vypracoval teorii
- 1956 – počátek výroby komerčních mikrosond (Cameca)
- 1965 - počátek výroby komerčních SEM
- 1968 – vyvinuty energiově disperzní detektory

# A. Delong a kolektiv (1951) TEM mikroskopy Brno



# Mikroanalýza

- Rtg. mikroanalýza (Electron probe Microanalysis – EPMA), často označovaná nesprávně jako EDX, EDAX, EDS-SEM, apod., je metoda, která využívá jako primární (budící) zdroj svazek elektronů, fokusovaný do průměru menšího než 1  $\mu\text{m}$  a s energií 3-50 keV.
- je možné používat i energie menší, metoda se však stává více povrchově citlivou a tedy i náročnou na čistotu povrchu a současně nelze vybudit vnitřní energetické hladiny těžších atomů.
- zvyšováním energie primárních elektronů klesá nejenom pravděpodobnost emise spektrálních čar (obzvláště lehčích prvků), ale i celková výtěžnost této spektroskopické metody.
- Používají se obvykle energie v rozmezí 10 - 30 keV. Signálem nesoucím informaci o složení ozářené látky je emitované rtg. záření, tj. fotony o energiích 0,1 – 15 keV, přičemž dolní mez je dána experimentální konstrukcí detektorů a horní mez je určena energií dopadajících elektronů.

# Elektronová resp. rentgenová mikrosonda

(Electronprobe microanalysis EPMA, Electron microprobe analysis EMPA, X-ray Microanalysis)

- R. Castaing r. 1940 (Univerzita v Paříži) – první teorie WDS
- r. 1968 první pevnolátkový detektor pro EDS
- Informaci chemickém složení (případně struktuře) vzorku poskytují při interakci s elektrony:
  - rentgenové záření,
  - zpětně rozptýlené elektrony,
  - katodoluminiscence.

EMA – zahrnuje dva způsoby jak získat informaci o složení a struktuře vzorku prostřednictvím rtg. záření:

- WDS (Wavelength Dispersive Spectrometr) – rozklad záření podle vlnových délek.
- EDS (Energy Dispersive Spectrometer) – rozklad podle energie rtg. záření.

WDS – úzké svazky rtg. paprsků dopadají na krystalový detektor a jejich  $\lambda$  (energie) je dána Braggovým vztahem (při známém  $d$ )

EDS – vyhodnocuje celé spektrum rtg. záření emitovaného ze vzorku.

Detektor EDS je pevnolátkový (podle energie rtg. záření generuje dvojice elektron-díra). Signál z detektoru je veden do multikanálového analyzátoru

# Elektrony

- Elektron je elementární částice, plně popsaná svojí klidovou hmotností ( $m_0 = 9,110 \cdot 10^{-31}$  kg), nábojem ( $e = 1,602 \cdot 10^{-19}$  C) a spinem (1/2). Informace o pohybujícím se elektronu je nutno doplnit o jeho kinetickou energii (hybnost) anebo vlnovou délku. Jelikož se pohybujeme v oblasti energií, kde relativistické korekce jsou nezanedbatelné, je lépe vycházet z relativistického vztahu mezi hybností  $p$  a kinetickou energií  $E$  :

$$E^2 = p^2 c^2 + m_0^2 c^4$$

- Vlnová délka elektronu je pak svázaná s hybností pomocí deBroglieho vztahu

$$\lambda = \frac{h}{p}$$

kde  $h$  je Planckova konstanta ( $h = 6,626 \cdot 10^{-34}$  Js). Míra relativističnosti je vyjádřena jako relativní odchylka vlnových délek

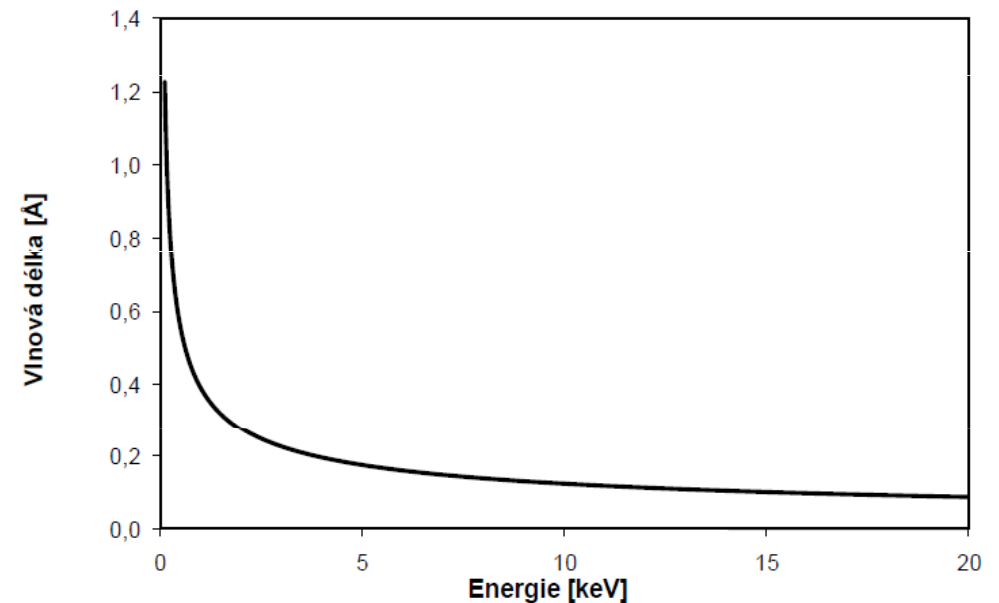
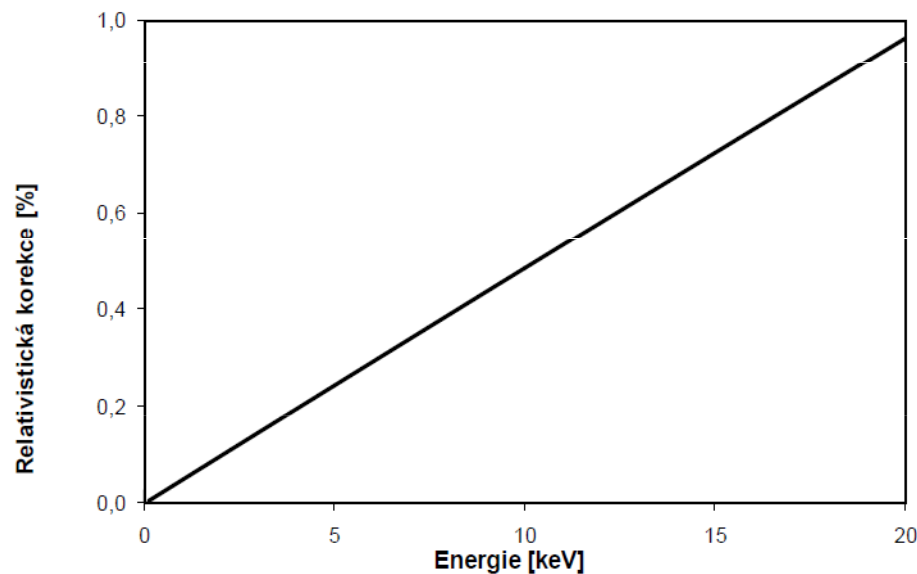
$$\Delta = \frac{\lambda - \lambda_{rel}}{\lambda}$$

v závislosti na energii primárního elektronu a demonstruje vzrůstající roli relativistické korekce se zvyšující se energií.

# Elektrony

*Závislost velikosti relativistické korekce na energii elektronu*

*Závislost vlnové délky elektronu na jeho kinetické energii*



Obr. 2 demonstruje závislost vlnové délky elektronu na energii a ukazuje, že vlnová délka primárního elektronu se pohybuje v subångströmové oblasti (pod 0,01 nm) a můžeme tedy očekávat, že difrakční jevy primárních elektronů lze zanedbat



# Fotony

Foton je elementární částice s nulovou klidovou hmotností (a pohybuje se tedy rychlostí světla) a spinem 1. Energie,  $E$ , frekvence,  $\nu$ , hybnost,  $p$ , a vlnová délka,  $\lambda$ , jsou svázány následujícími vztahy

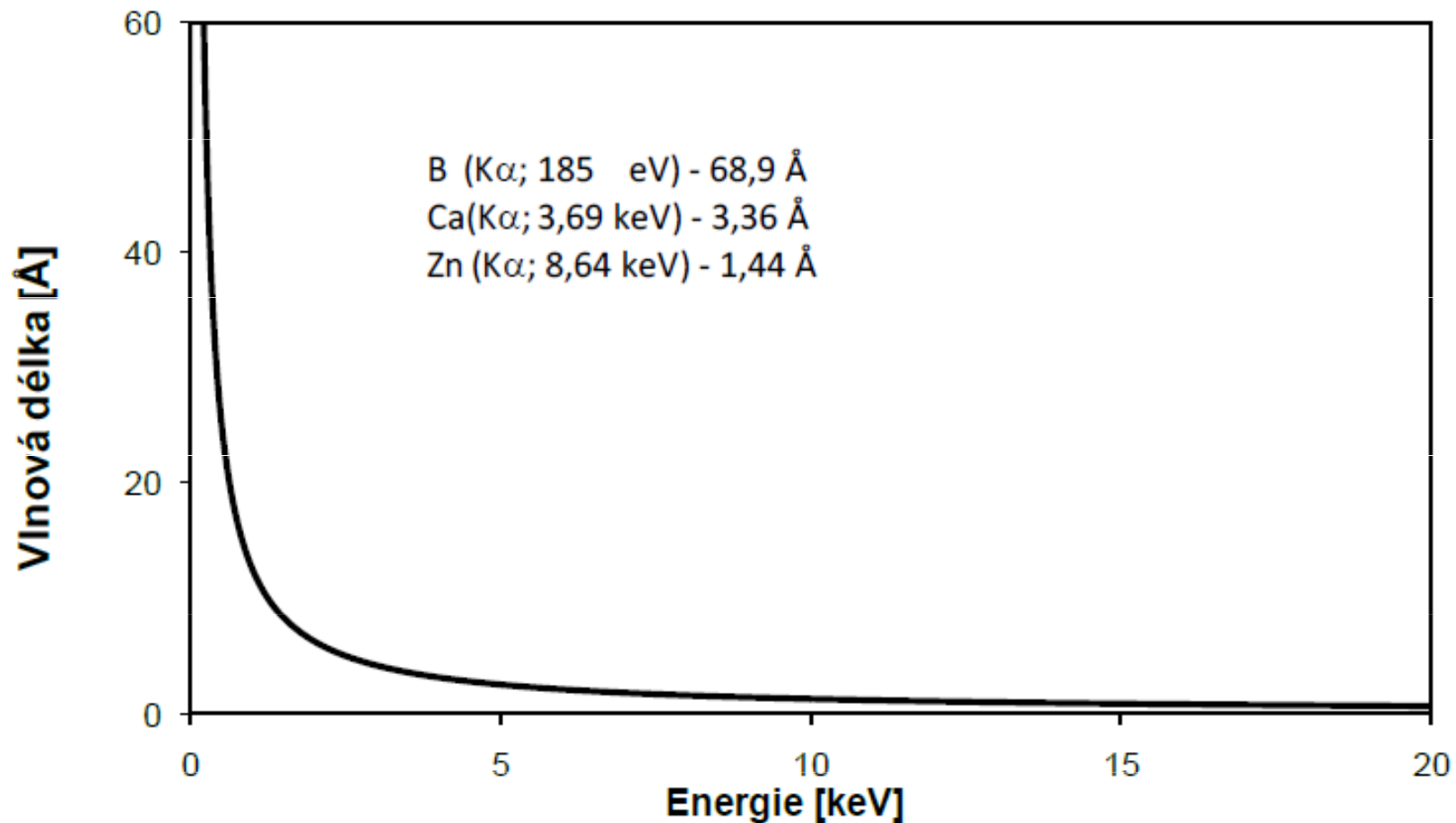
$$E = \hbar\omega = h\nu = h\frac{c}{\lambda}$$

Kde  $\omega$  je úhlová frekvence

$$\omega = \frac{\nu}{2\pi}$$

Následující obraz demonstruje závislost vlnové délky fotonu na energii a ukazuje, že vlnová délka primárního elektronu se převážně pohybuje v sub-ångströmové oblasti a můžeme tedy očekávat, že difrakční jevy nebudeme standardně pozorovat

# Foton



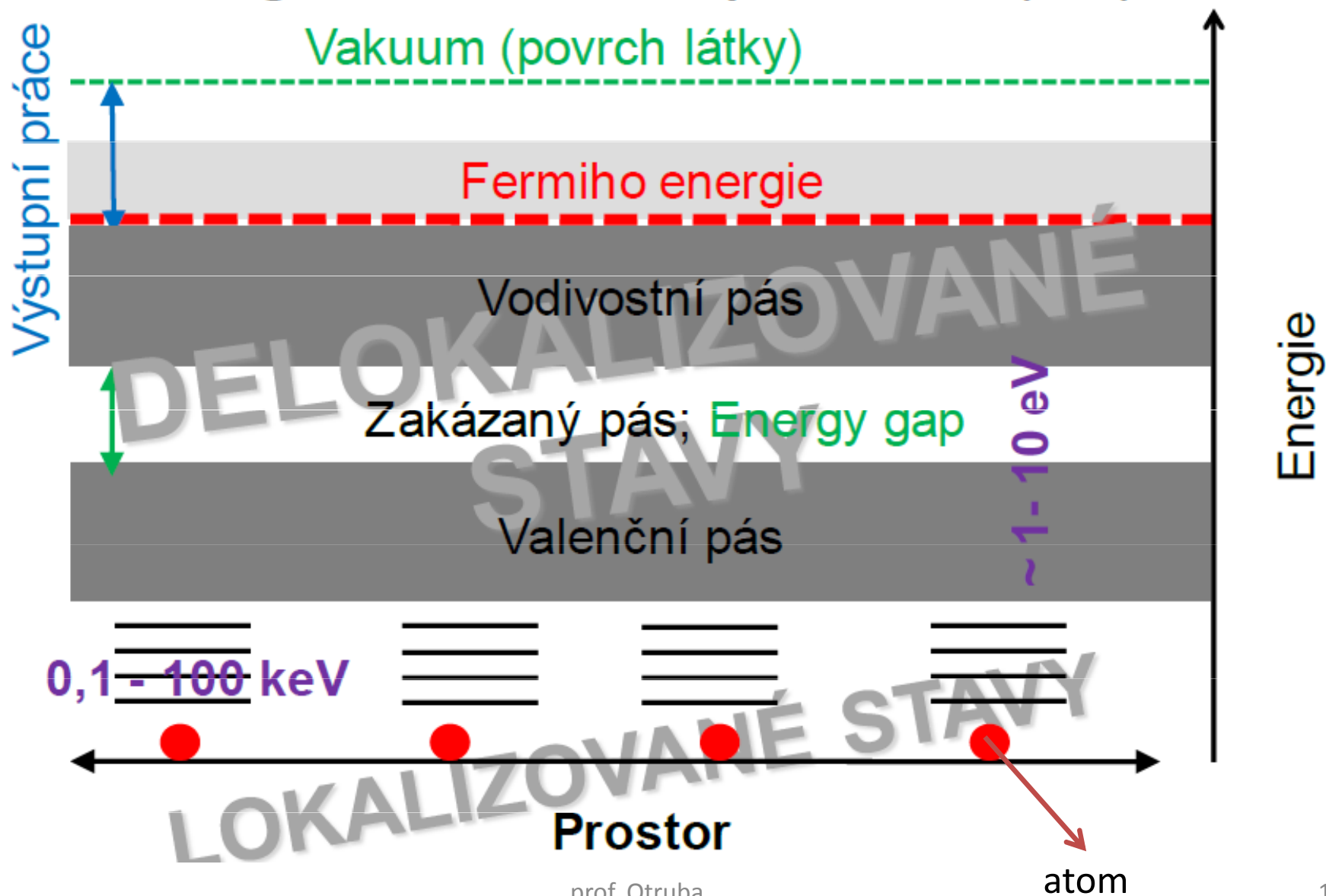
*Závislost vlnové délky fotonu na jeho energii. Pro informaci jsou uvedeny energie a vlnové délky vybraných spektrálních čar*

# Pevná látka

- Pevnou látku lze popsat jak v reálném prostoru jako systém atomů vibrující kolem svých rovnovážných poloh, tak v energetickém prostoru, kde energie jednotlivých entit pevné látky jsou vztaženy k energii vakua. Rovnovážné polohy atomů jsou od sebe ve vzdálenostech v řádu jednotek Ångströmů a proto elektrony používané při mikroanalýze (viz jejich vlnová délka) se chovají vzhledem ke struktuře jako bodové částice.
- To už přirozeně neplatí pro jednotlivé elektrony v atomu, jejichž vlnová délka je srovnatelná s vlnovou délkou primárních elektronů. Tyto interakce jsou ve své podstatě vždy kvantové (nebo kvazikvantové, tj. lze je popsat klasicky s kvantovými korekcemi). To ve výsledku znamená, že pohyb primárního elektronu v pevné látce můžeme popsat jako klasický mezi řadou kvantových událostí (=interakcí, srážek). Energetický pohled na pevnou látku nám dává následující obraz, kde je schematicky načrtnuta energetická struktura v pevné látce. Zatímco energie vnitřních elektronových hladin se pohybují od 0,19 keV (bór) až po 115 keV (uran), energie delokalizovaných elektronů ve valenčních a vodivostních páscech jsou v řádu pouze jednotek elektronvoltů.

# Energie elektronů v pevné látce.

## Energetická struktura v pevné látce (kov)



# Atom

Většina elementárních procesů se v mikroanalýze odehrává v atomu, a proto je vhodné ho alespoň stručně popsat. Výhodné je popsat atom v energetické reprezentaci, jelikož energie rtg. fotonů jsou nositeli informace o atomové struktuře. Nejjednodušším modelem pro elektrony v atomu je Bohrovův model, který je schopen vysvětlit a kvantitativně popsat základní rysy elektronových hladin v atomu (rozdělení elektronů do slupek). Jemnější vlastnosti atomárních elektronů je však schopna zachytit pouze kvantová mechanika. Mějme jednoelektronový model (zanedbáváme např. elektron-elektronovou interakci), tj. atom popsaný Schrödingerovou rovnicí

$$\left( -\frac{\hbar^2}{2m} \nabla^2 + V \right) \psi = E \psi$$

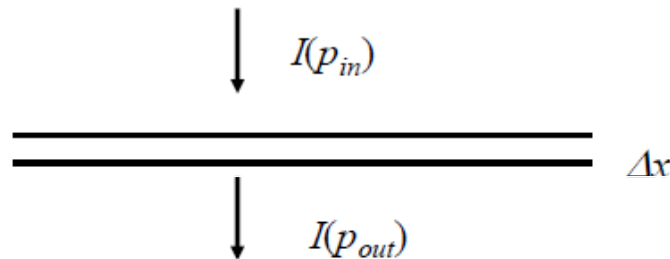
kde interakční potenciál je omezen na elektrostatickou interakci

$$V(x) = -\frac{Ze^2}{4\pi\epsilon_0} \frac{1}{r}$$

Standardní řešení rovnice ve sférických souřadnicích vede k existenci tří kvantových čísel (postupně hlavní, vedlejší a magnetické) a tří kvantovaných fyzikálních veličin (energie, velikosti momentu hybnosti, jedné složky momentu hybnosti) pro vázané stavy elektronu (blíže viz kvantová chemie).

# Účinný průřez

- Základní fyzikální veličinou popisující interakci dvou objektů (např. částic je účinný průřez)  $\sigma$ . Experimentálně je  $\sigma$  popsán následujícím experimentem. Mějme „dostatečně tenkou“ desku o tloušťce  $\Delta x$ , v níž se nachází „centra rozptylu“ náhodně rozmístěna s objemovou hustotou  $N$ . Na desku dopadá náhodný tok částic  $I(p_{in})$  s parametry  $p_{in}$  a na průchodu detekujeme tok částic  $I(p_{out})$  s parametry  $p_{out}$ , viz obr.

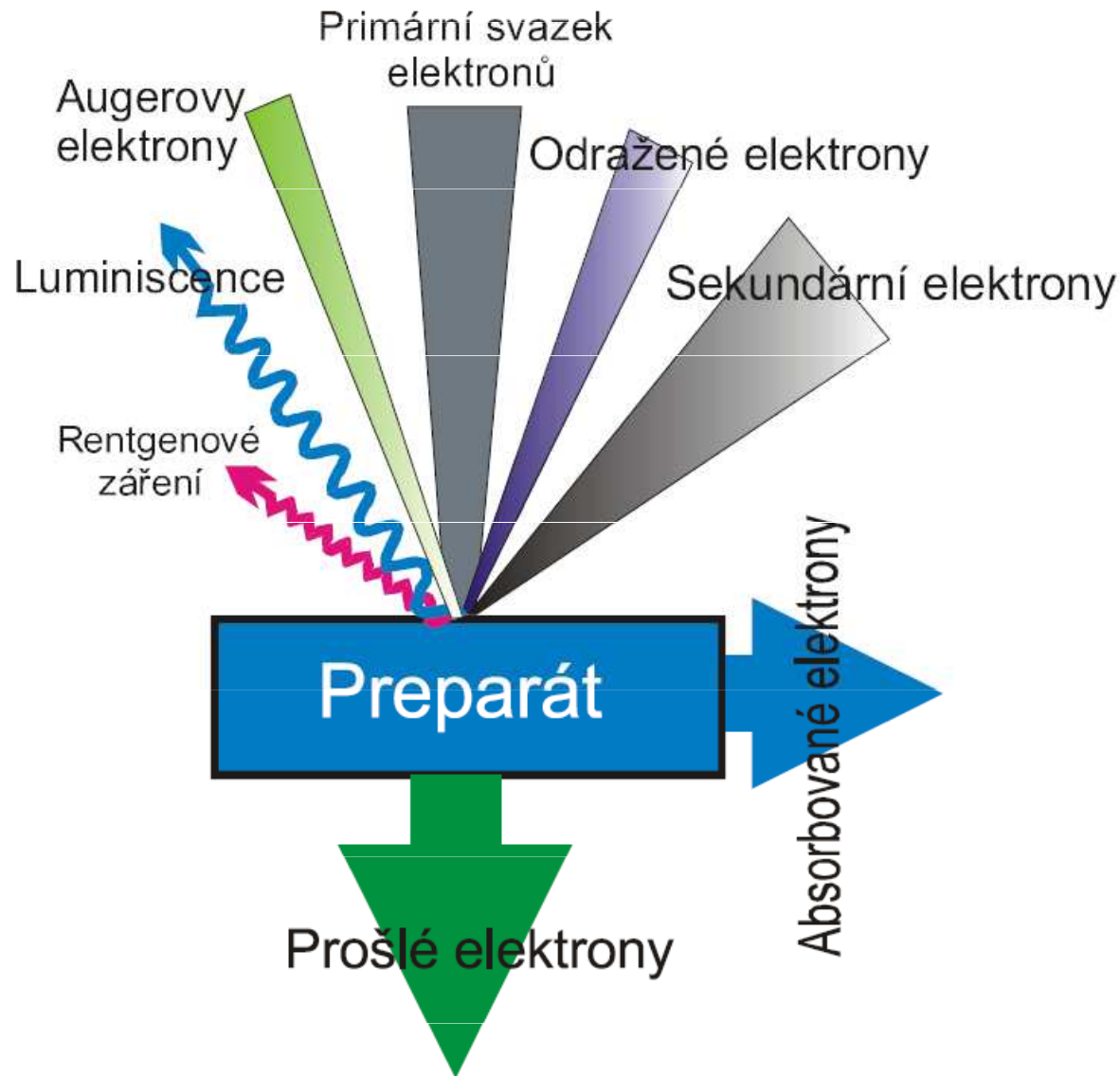


- Účinný průřez je pak definován následujícím vztahem mezi oběma toky

$$I(p_{out}) = I(p_{in}) N \sigma(p_{out}, p_{in}) \Delta x$$

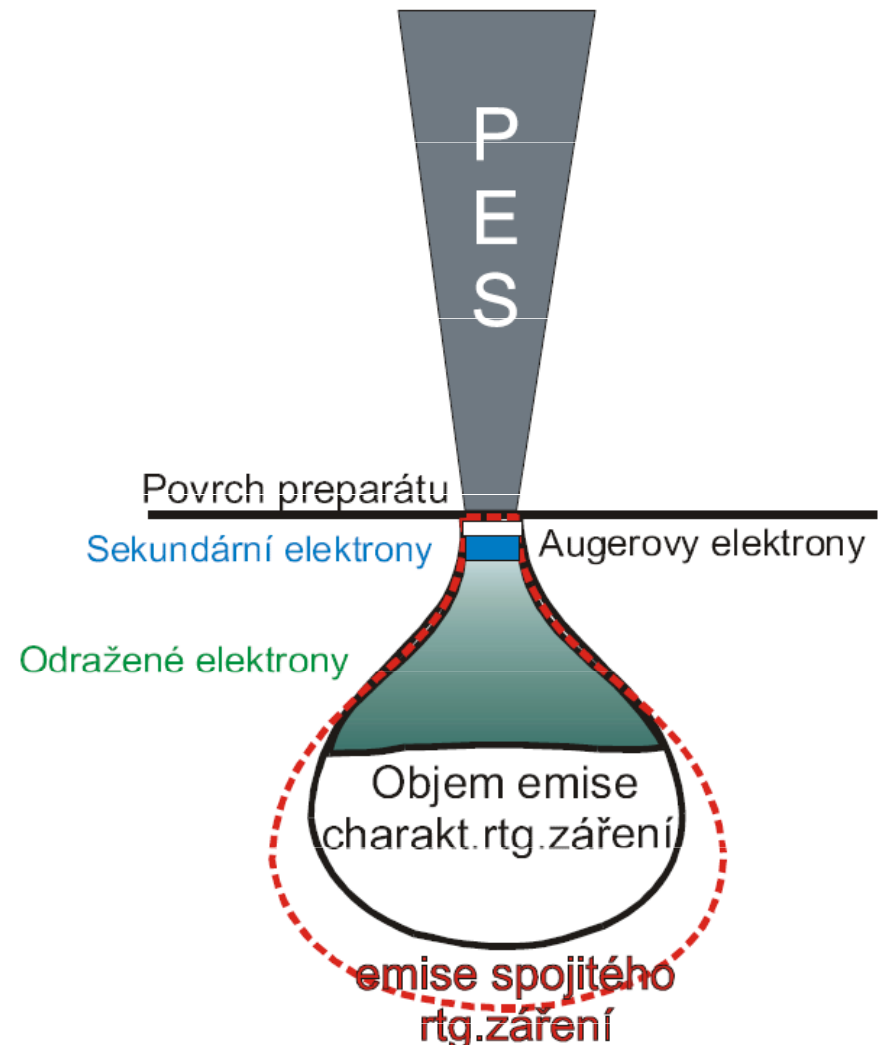
- Typickými parametry  $p_{in}$  je energie, vlnová délka; typickými parametry  $p_{out}$  je energie, úhel rozptylu, typ částice, apod.

# Interakce primárního elektronového svazku s hmotou vzorku



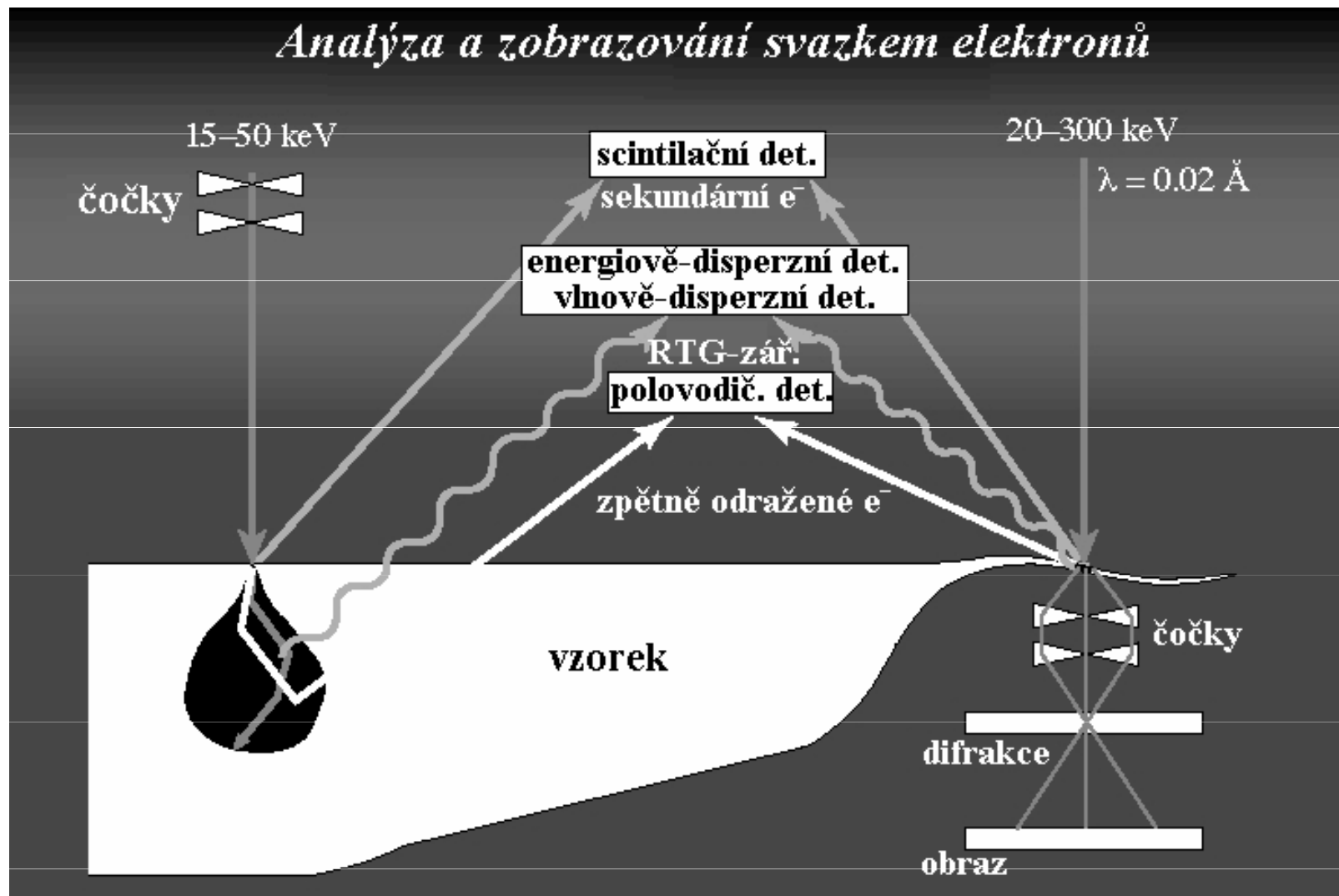
# Objem interakce

- rozměr a tvar jsou funkcí lokálního chemického složení (průměrného atomového čísla), energie elektronů  $E_0$  a úhlu, pod nímž svazek elektronů dopadá na povrch.
- Elektrony se v oblasti dopadu pohybují složitým způsobem. V důsledku srážek se mění jejich energie i směr pohybu.





# Skenovací a transmisní elektronová mikroskopie



# RASTROVACÍ ELEKTRONOVÁ MIKROSKOPIE – REM (Scanning Electron Microscopy – SEM)

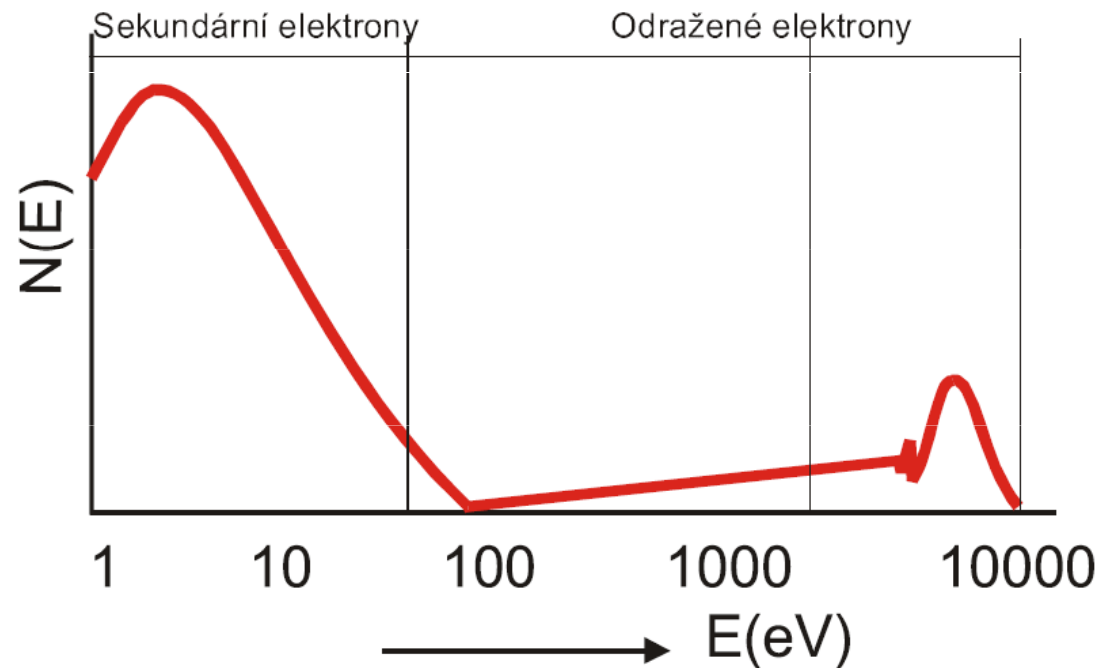
Energie elektronů v primárním elektronovém svazku  $10^3$  až  $10^5$  eV.

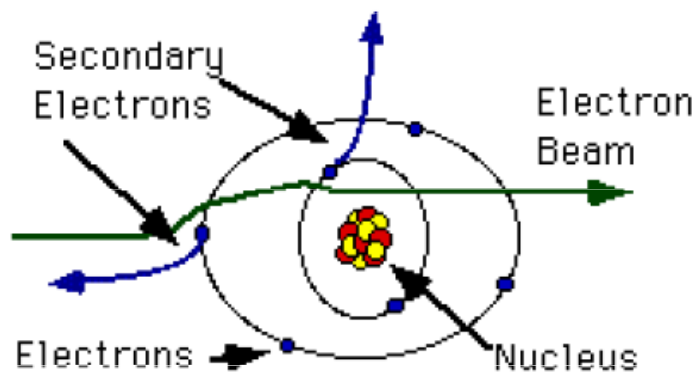
**Pružný rozptyl** – PE neztrácí energii po interakci s látkou

**Nepružný rozptyl** – PE jsou v poli atomů bržděny a jejich energie se

- předá volným elektronům (plazmonová excitace)
- krystalové mřížce (fononová excitace)
- iontům (obalová excitace)

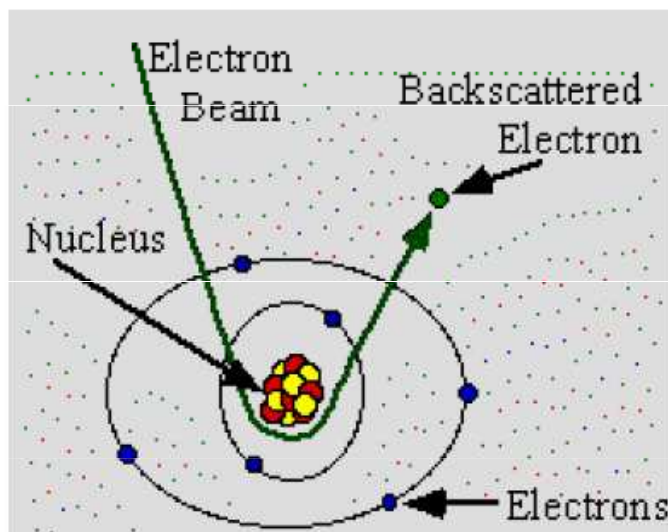
Hustota energetických stavů elektronů  $N(E)$





## **Sekundární elektrony (SE)**

primárním svazkem excitované elektrony ve vnějších slupkách. Uvolněné elektrony mají energii do 50 eV (pravé SE)



## **Odražené elektrony (BSE)**

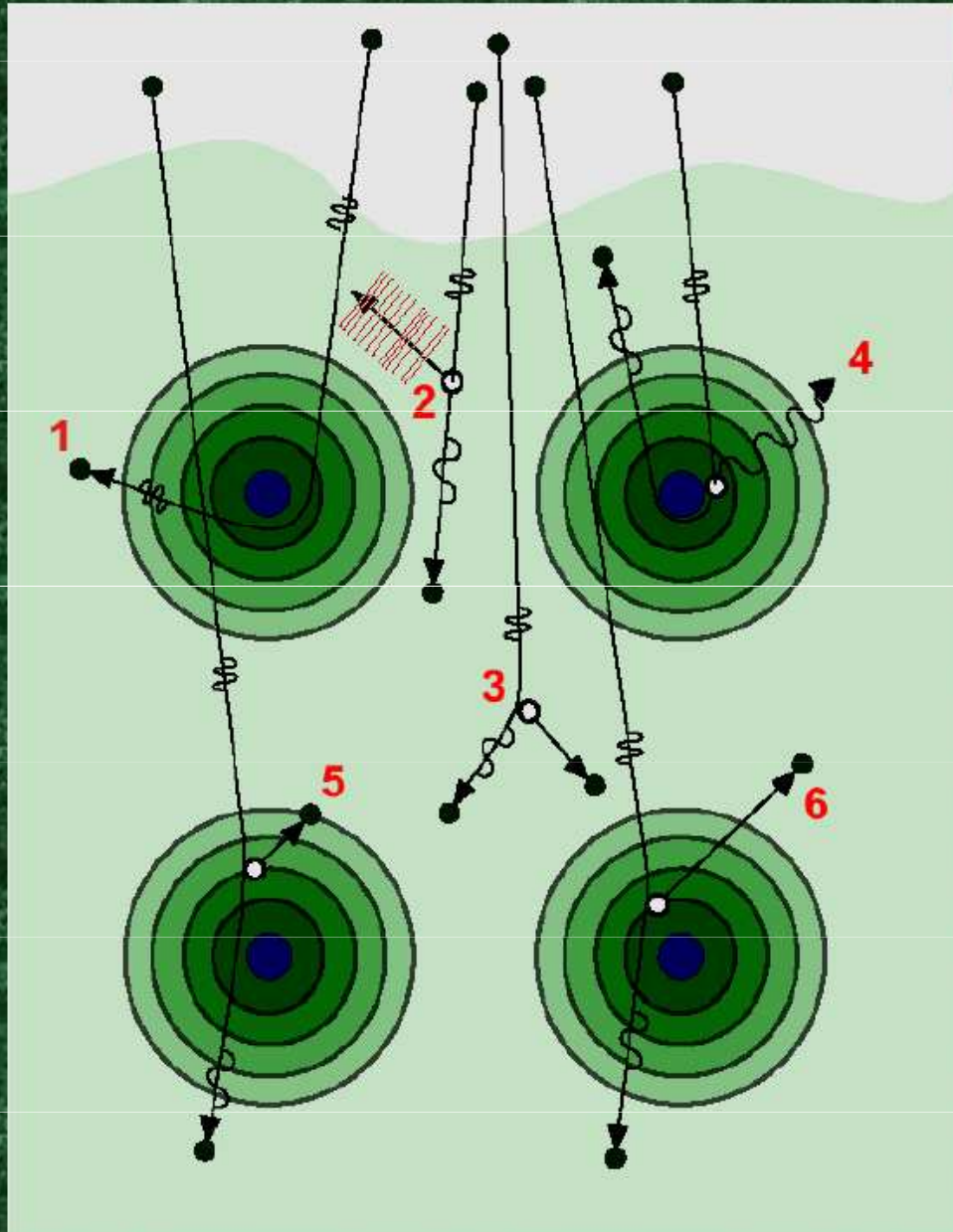
vrací se s energií  $E = 0,8 E_0$

## **Augerovy elektrony (AE)**

elektrony vyražené z vnitřních slupek



# Rozptylové události



Pohyb elektronu v poli krystalu je aproximován sledem jednotlivých interakcí mezi kvazivolným primárním elektronem a mezi částicemi a poli ve vzorku. Vztahuje se i na částice uvolněné předchozími interakcemi.

- 1 – pružný odraz na jádrech
- 2 – emise plasmonu
- 3 - „Comptonův“ rozptyl
- 4 – emise kvanta brzdného záření
- 5 – vnitro- nebo mezipásový přechod
- 6 – ionizace vnitřní hladiny



# Signální elektrony v REM

- Výsledkem srážky primárních elektronů se vzorkem je generace signálních elektronů.

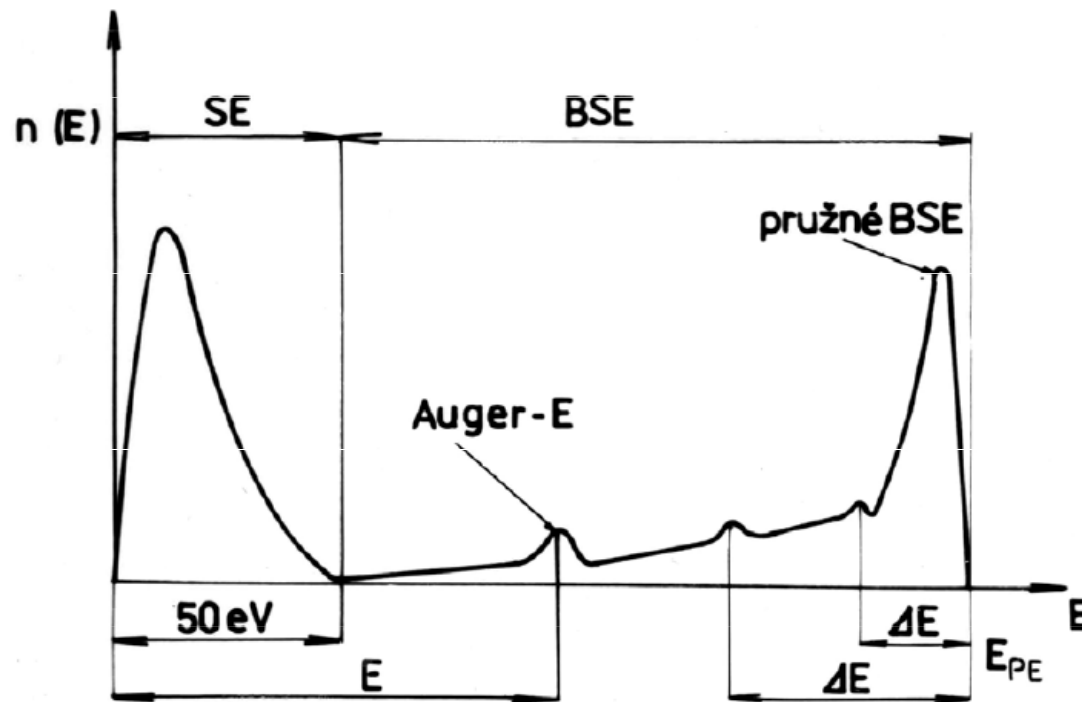


Schéma energiového rozdělení signálních elektronů

Dvě hlavní skupiny :

- 1) Elektrony s energií  $E \leq 50\text{eV}$   
Sekundární elektrony (SE)
- 2) Elektrony s energií  $50\text{eV}$  až  $\leq E_{PE}$   
Zpětně odražené elektrony (BSE)  
(pružně a nepružně)

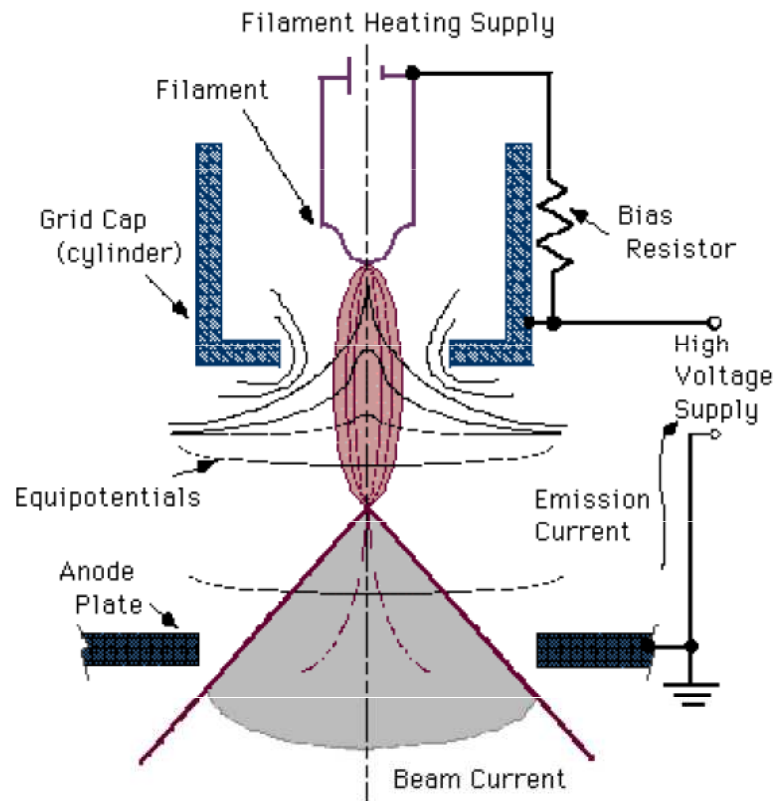
Výtěžek SE (počet SE/počet PE) =  
koeficient SE  $\delta$

Výtěžek BSE (počet BSE/počet PE)  
= koeficient BSE  $\eta$

Obecně platí :  $\delta$  se zvyšuje s  $E_{PE}$  (300-800eV) a pak se snižuje se zvyšující se  $E_{PE}$

:  $\eta$  zůstává pro  $E_{PE} > 10\text{keV}$  téměř neměnný a zvyšuje se s atomovým číslem  $Z$  vzorku

# Zdroj elektronů



několik let

zdroj elektronů:

➤ termoemisní zdroj  
přímo (nepřímo)

žhavená katoda

(2700 °C – Wolframové vlákno –  
vydrží měsíc)

➤ katoda LaB<sub>6</sub>

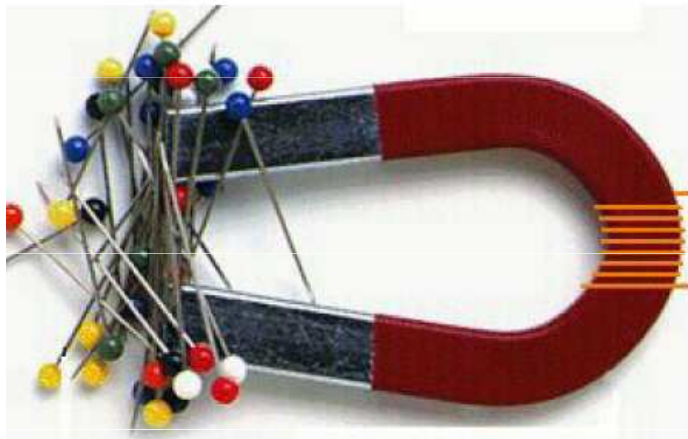
(2100 °C – hexaborid  
lanthanu – vydrží rok)

➤ autoemisní

(studený) zdroj (FEG) – vydrží

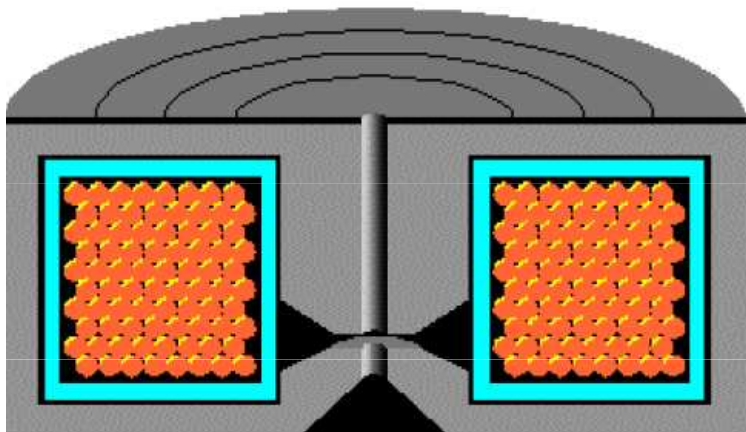
- Wehneltův válec (obklopuje katodu) – potenciál -100 V
- Křižička (zdroj elektronů, podobně jako vlákno žárovky) s průměrem cca 50 μm
- Urychlovací napětí 100 až 300 kV (obvyklá hodnota TEM)

# Elektromagnetické čočky

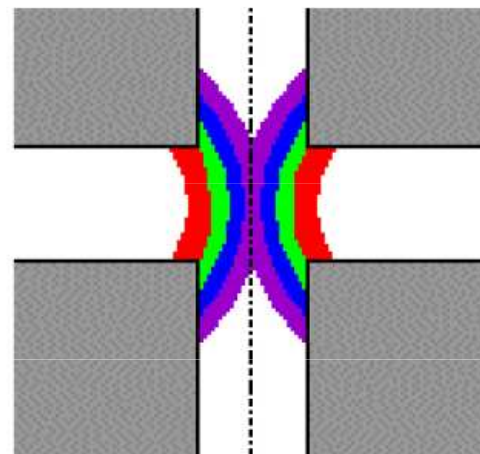


permanentní magnet ve tvaru podkovy

resp. kovová podkova s vinutím jako elektromagnet



elektromagnetická čočka  
(solenoid)



průběh magnetického pole (aberrace)

# Elektromagnetická čočka

Pro ohniskovou vzdálenost elektromagnetické čočky přibližně platí:

$$\frac{1}{f} = \frac{e}{8.m.U} \int_{z_1}^{z_2} B^2_{z0}(z).dz$$

$B_{z0}$  – magnetická indukce v místě  $z$  na ose

Výhoda:

možnost měnit ohniskovou vzdálenost elmag. čočky změnou proudu ve vinutí cívky (solenoidu).

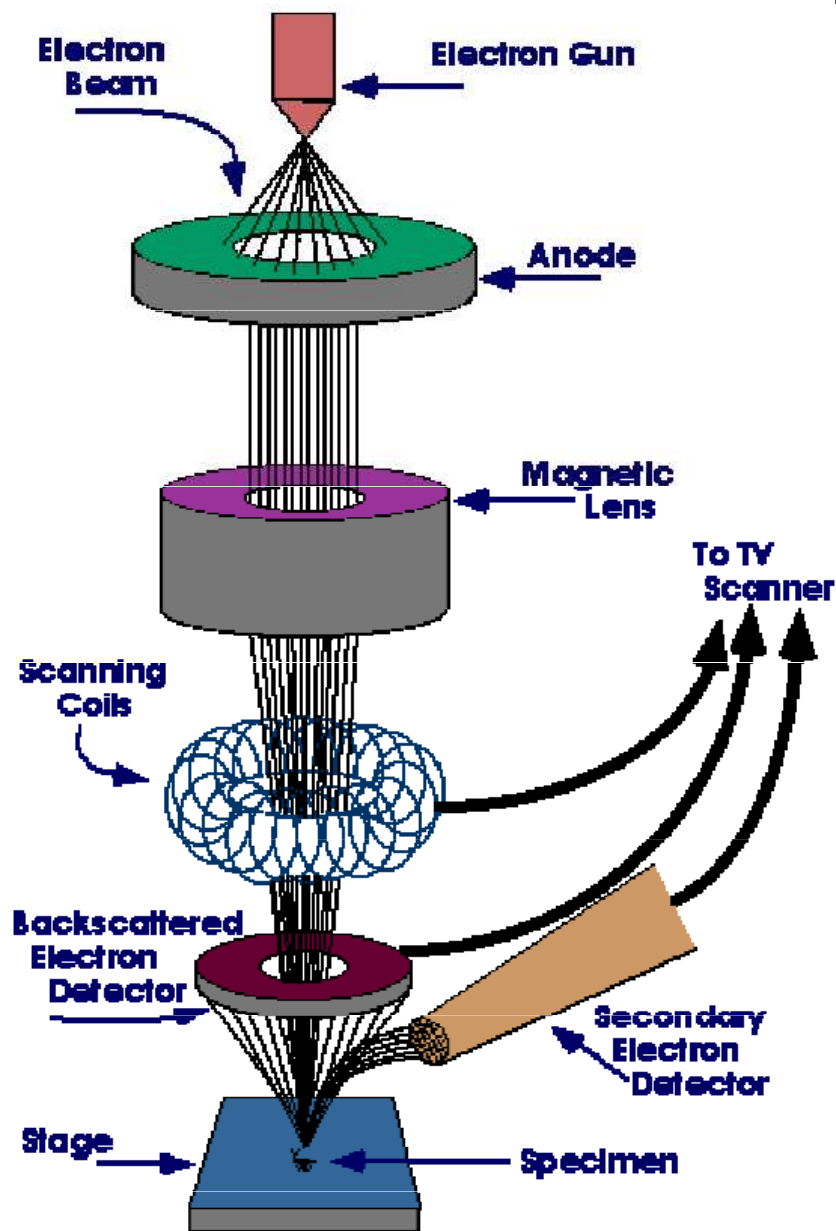
Nevýhoda:

Magnetické pole v dutině cívky (čočky) se mění (podle obrázku) a to vede k vadám zobrazení:

- sférická vada
- chromatická vada



# Konstrukční provedení REM



PŘÍMO ŽHAVENÁ KATODA (W)

## Typické parametry REM:

- RS 5 až 10 nm při UN 30kV
- zvětšení 5 až 200 000x
- UN volitelné od 1 do 50 kV
- Elektron-optický systém
- 2 kondenzory se spol. buzením
- 1 objektiv
- elektromagnetický stigmátor (osmipólový)
- vychylovací (rastrovací) systém
- Detektor SE a BSE

# Obraz v režimu odražených elektronů (BSE)

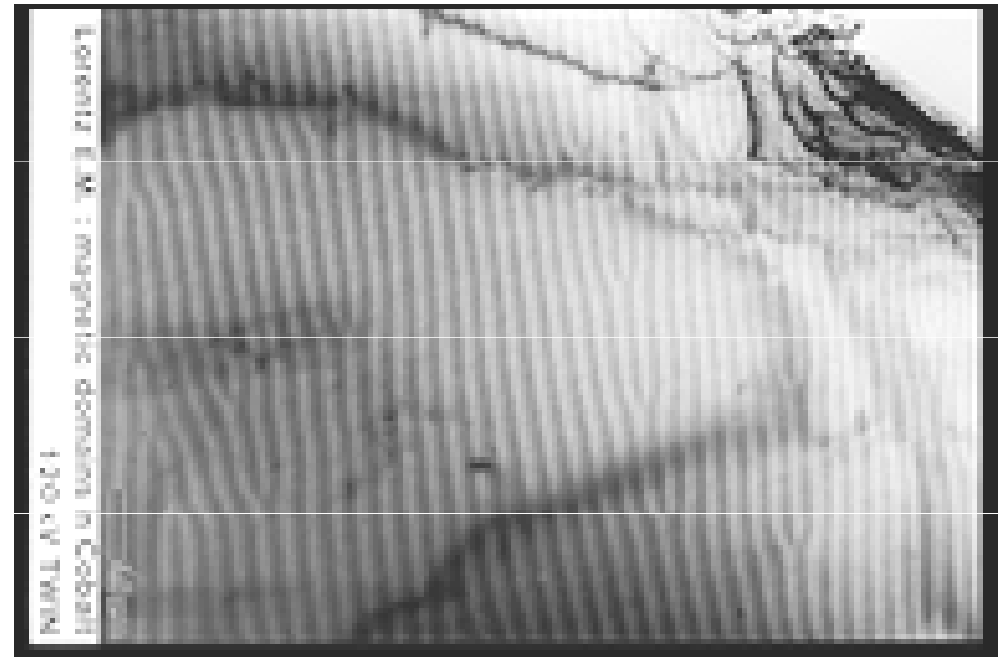
- **Topografický kontrast** – obraz povrchových nerovností je zbaven detailů v důsledku přímočarého pohybu elektronů.
- **Materiálový kontrast** – signál odražených elektronů závisí na průměrném atomovém (protonovém) čísle  $Z$ . Pro větší  $Z$  je intenzivnější.
- **Užití:** k „mapování“ prvků ve spojení s elektronovou mikroanalýzou.



Obraz v režimu BSE  
slitina Al-Cu  
Al ( $Z = 13$ ) – tmavší oblasti  
Cu ( $Z = 29$ ) – světlejší oblasti

# Magnetický kontrast

- Možnost pozorovat kontrast na doménových stěnách kubických a jednoosých feromagnetik
- Účinek Lorentzovy síly vyvolané magnetickým polem uvnitř domén (elektrony stočené dovnitř vzorku x elektrony usměrněné k povrchu)



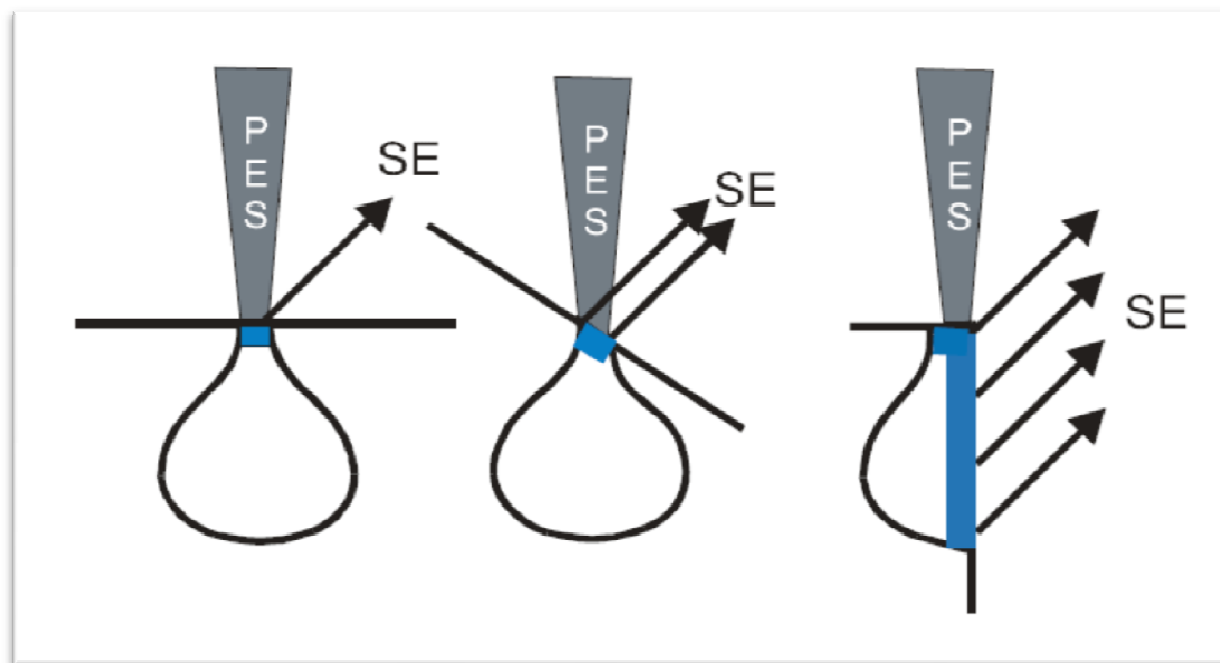
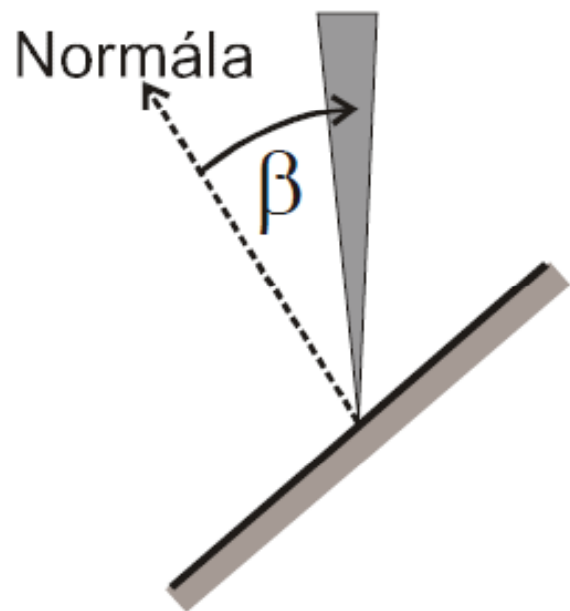
Magnetické domény v kobaltu

# Obraz vytvořený sekundárními elektrony (SE)

- SE – energie do 50 eV, emise z povrchové vrstvy o tloušťce do 50 nm. Detekovány jsou SE generované primárními elektrony (tzv. pravé SE) i nízkoenergetické SE generované odraženými elektrony.
- Dráhu SE je možné upravit účinkem elektrického pole.

# Topografický kontrast v režimu SE

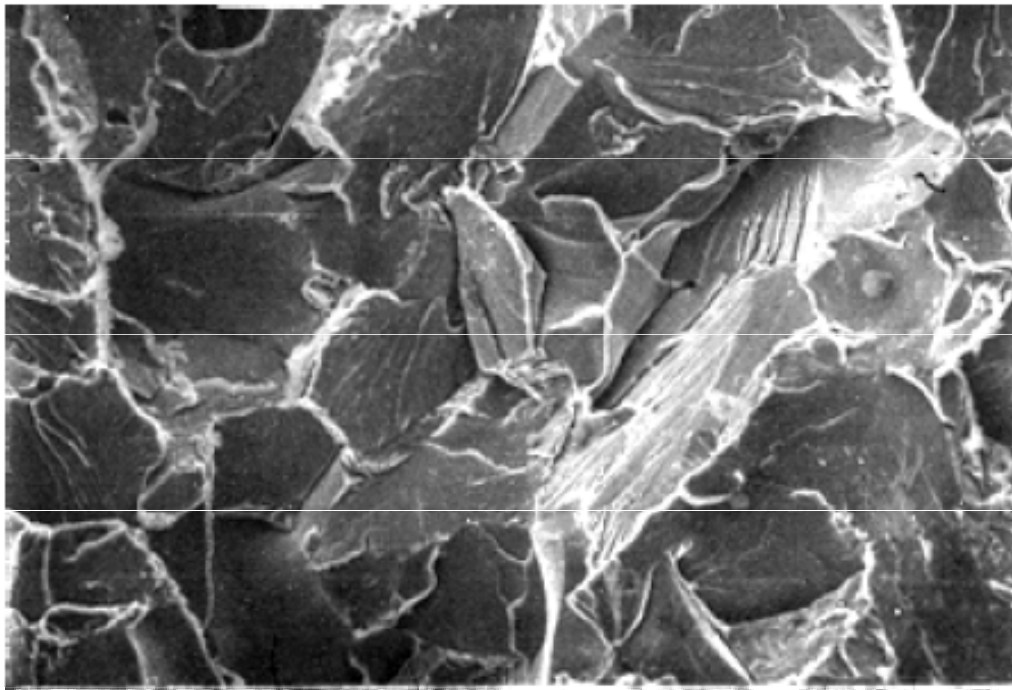
Emise SE je citlivá na úhel dopadu PES



závislost  $\beta$  (náklonu) na emisi SE

Výtěžek emise  $\delta = \frac{\textit{konst.}}{\cos \beta}$

# Topografický kontrast v režimu SE



vliv sklonu lomových ploch na emisi sekundárních elektronů

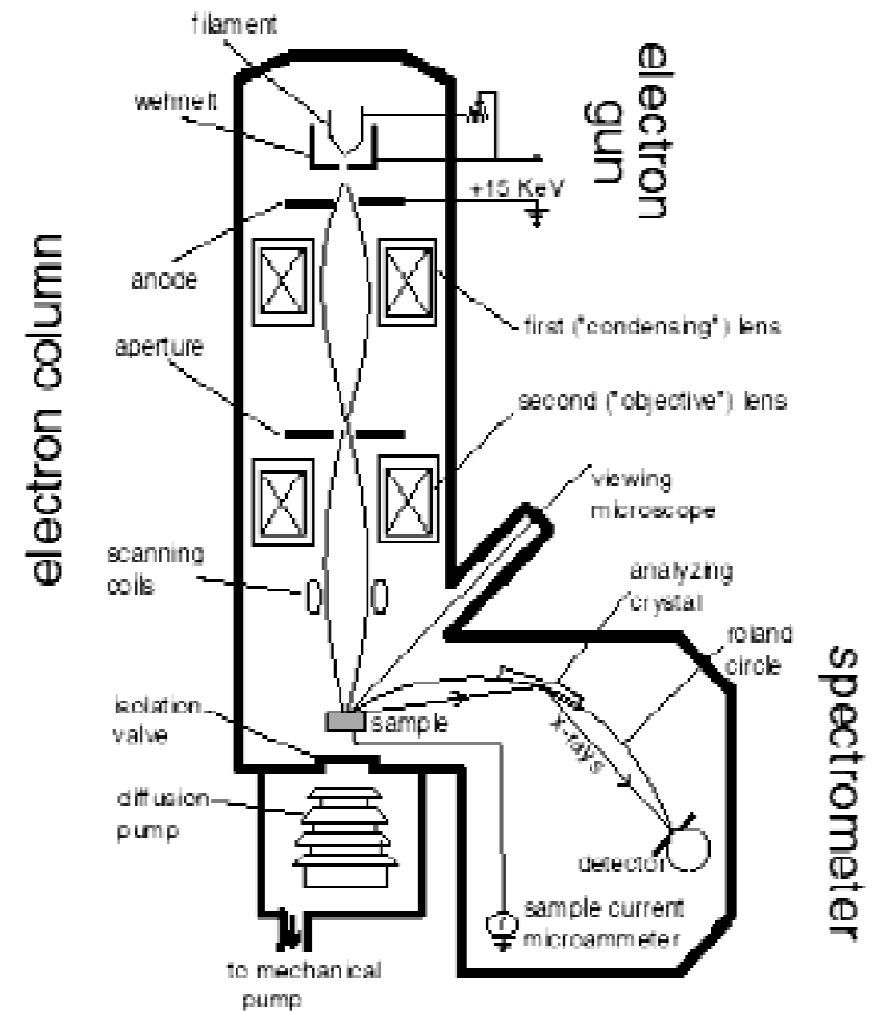
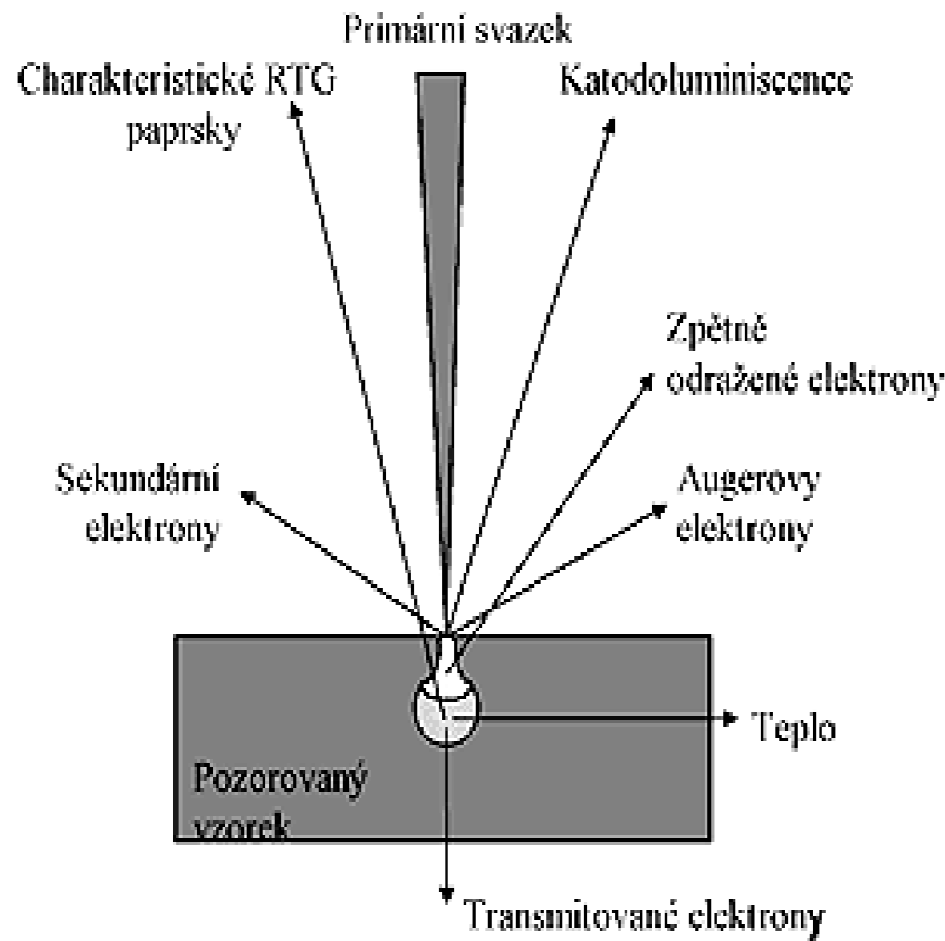


zrnko pylu

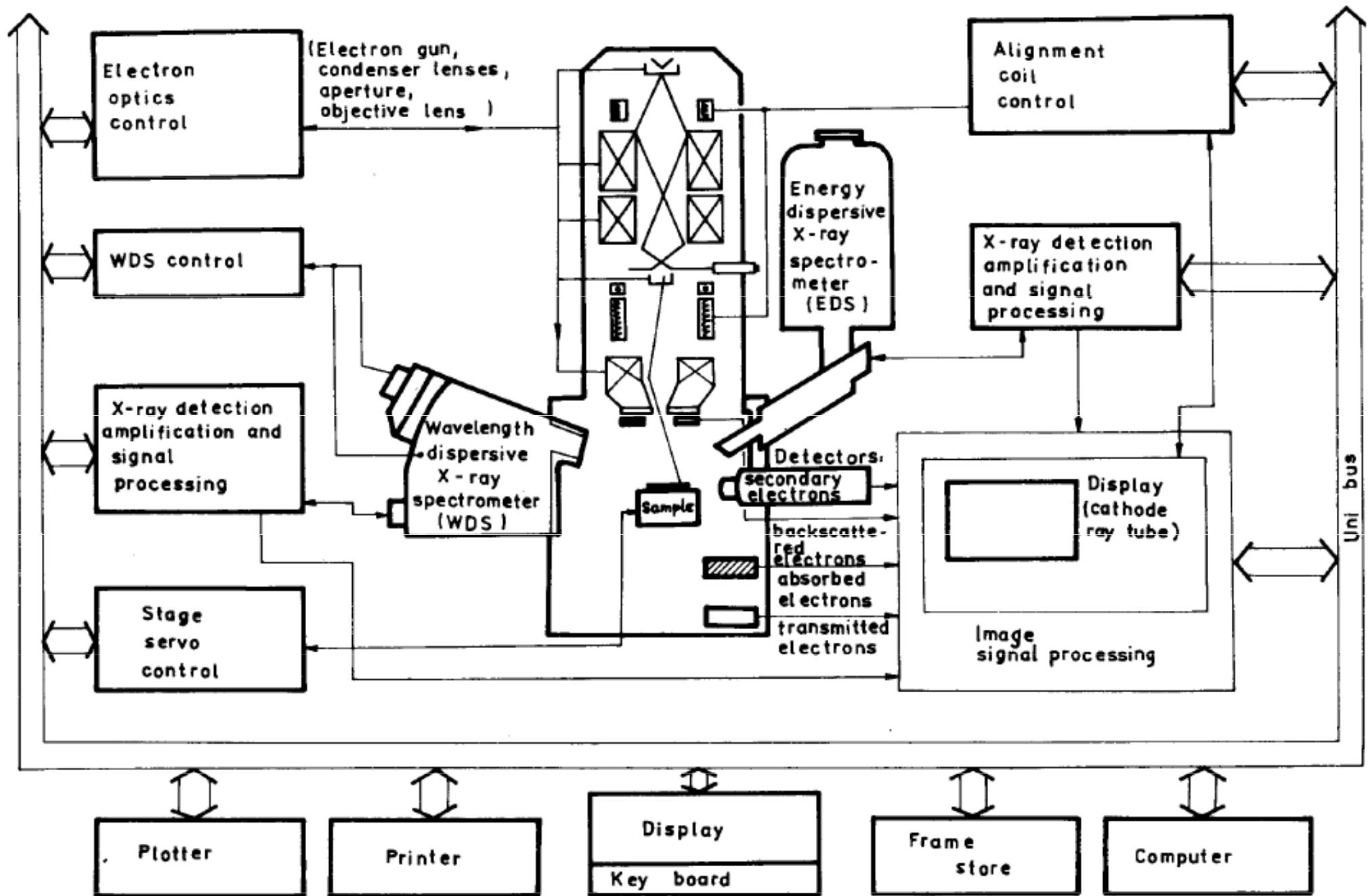
# Elektronová mikroanalýza - EMA

- EMA – zahrnuje dva způsoby jak získat informaci o složení a struktuře vzorku prostřednictvím rtg. záření:
  - WDS (Wavelength Dispersive Spectrometr) – rozklad záření podle vlnových délek.
  - EDS (Energy Dispersive Spectrometer) – rozklad podle energie rtg. záření.
- WDS – úzké svazky rtg. paprsků dopadají na krystalový detektor a jejich  $\lambda$  (energie) je dána Braggovým vztahem (při známém  $d$ )
- EDS – vyhodnocuje celé spektrum rtg. záření emitovaného ze vzorku. Detektor EDS je pevnolátkový (podle energie rtg. záření generuje dvojice elektron-díra). Signál z detektoru je veden do multikanálového analyzátoru

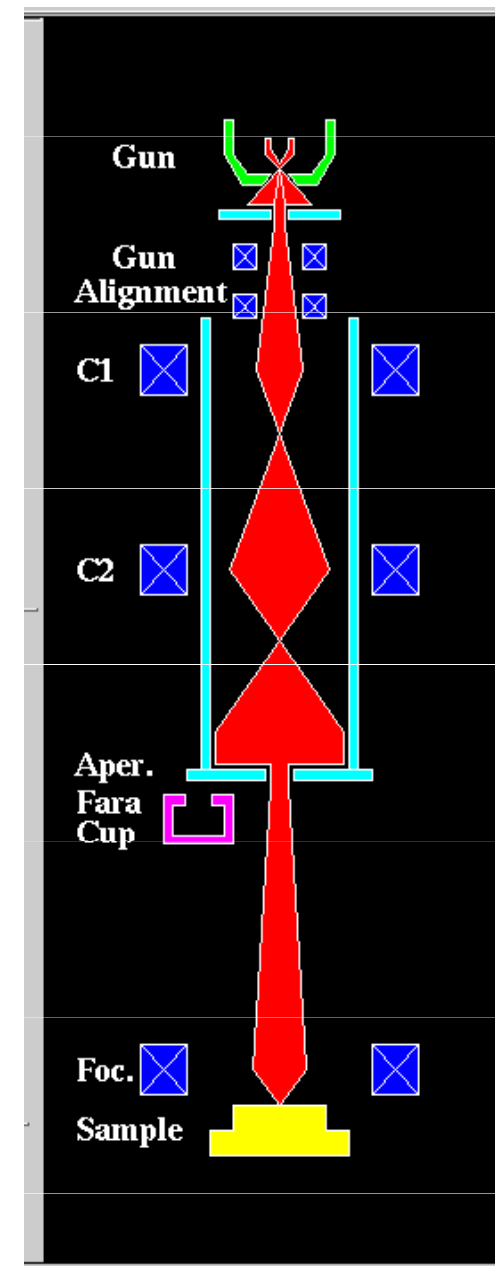
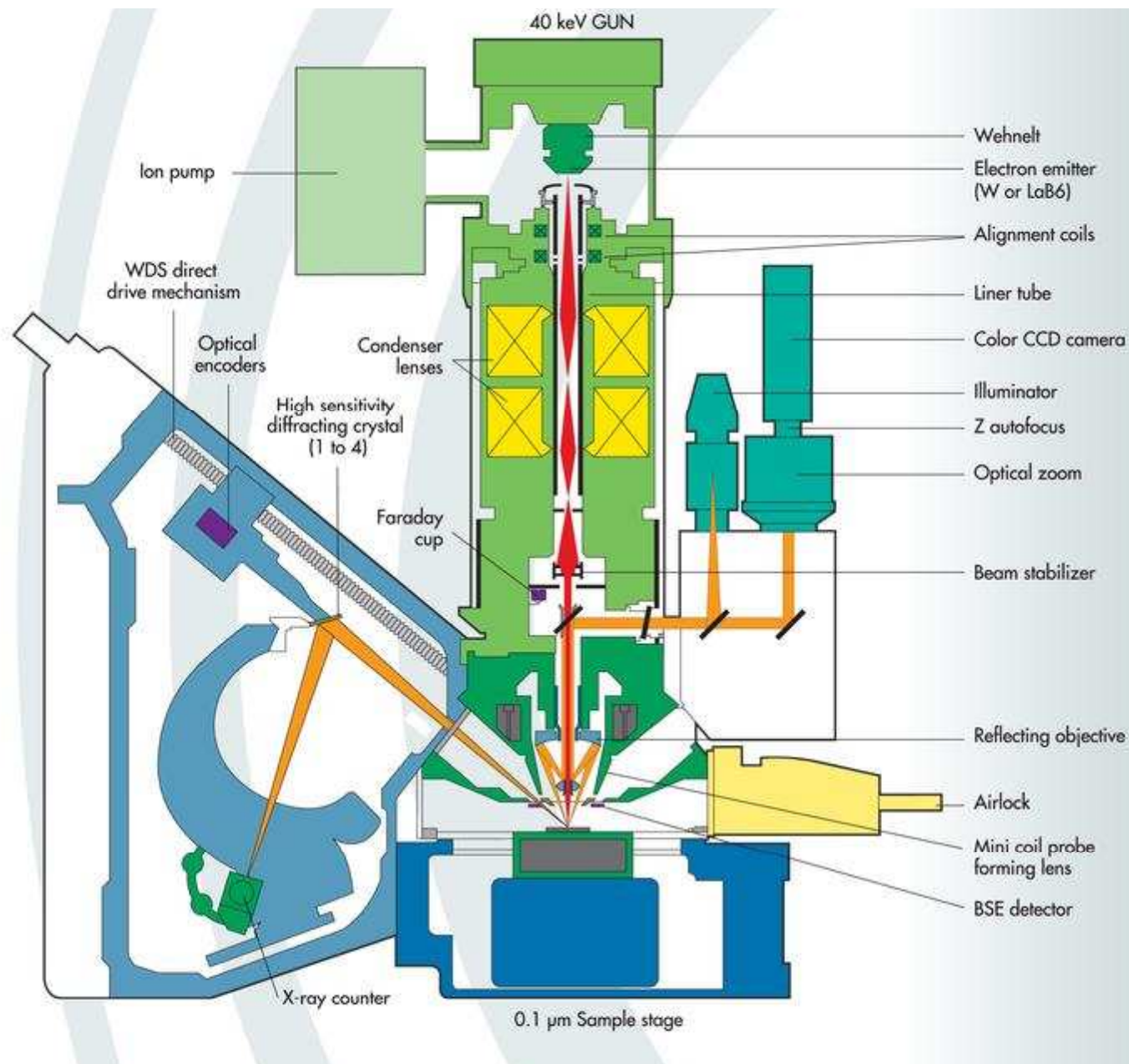
# Elektronová mikrosonda







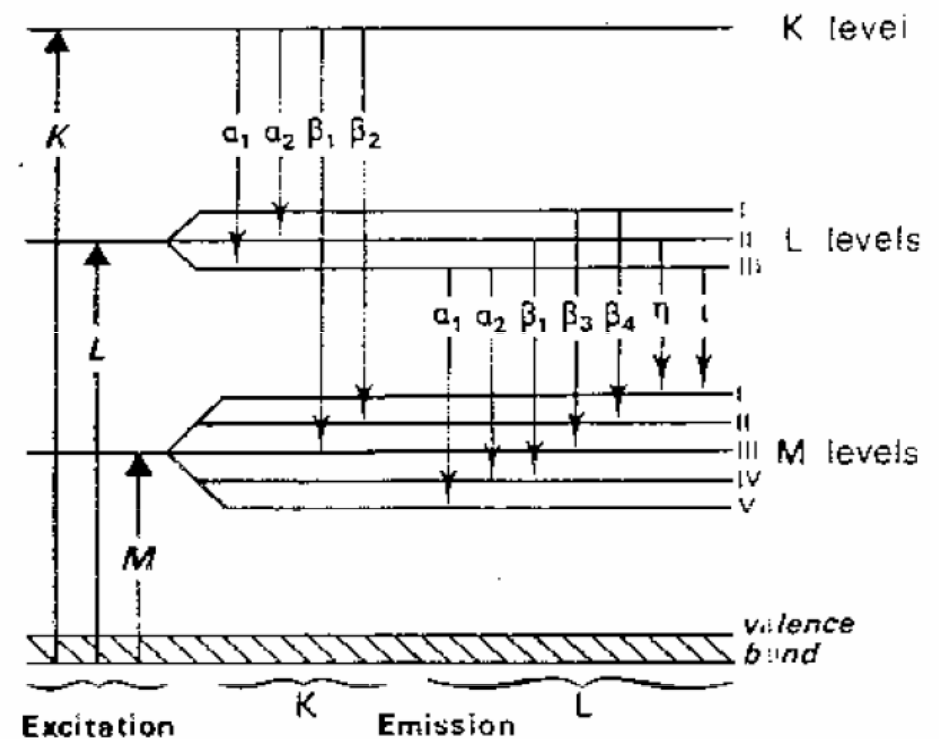
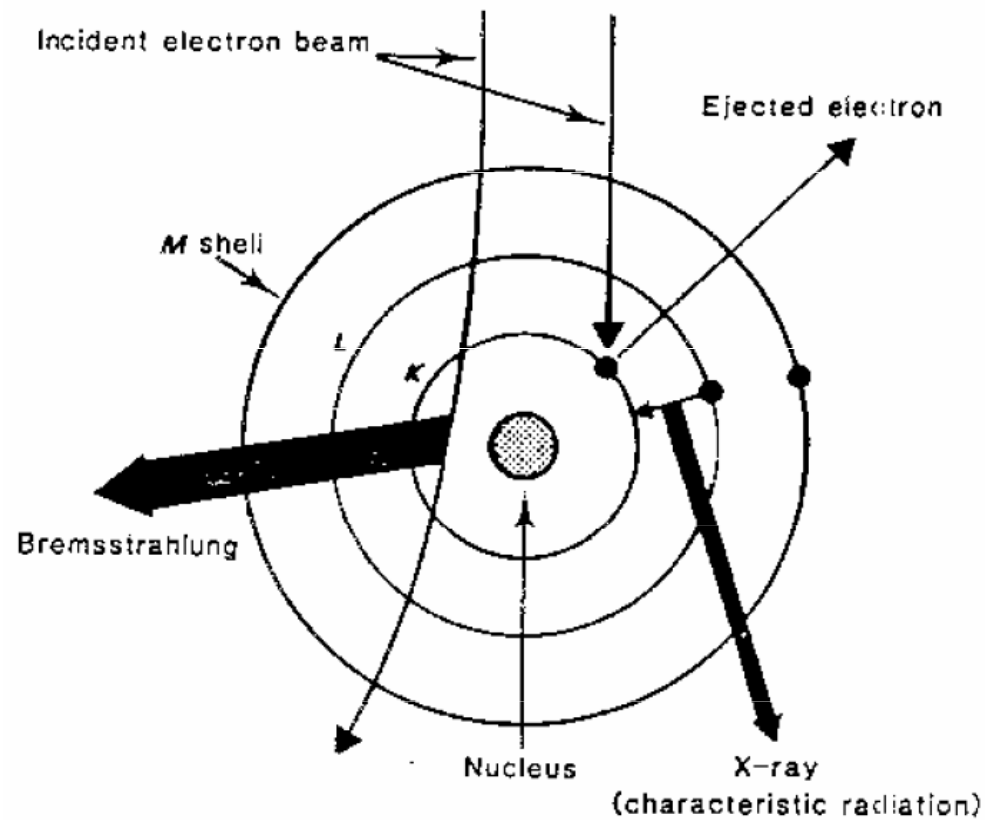
# Schéma přístroje Cameca SX 100



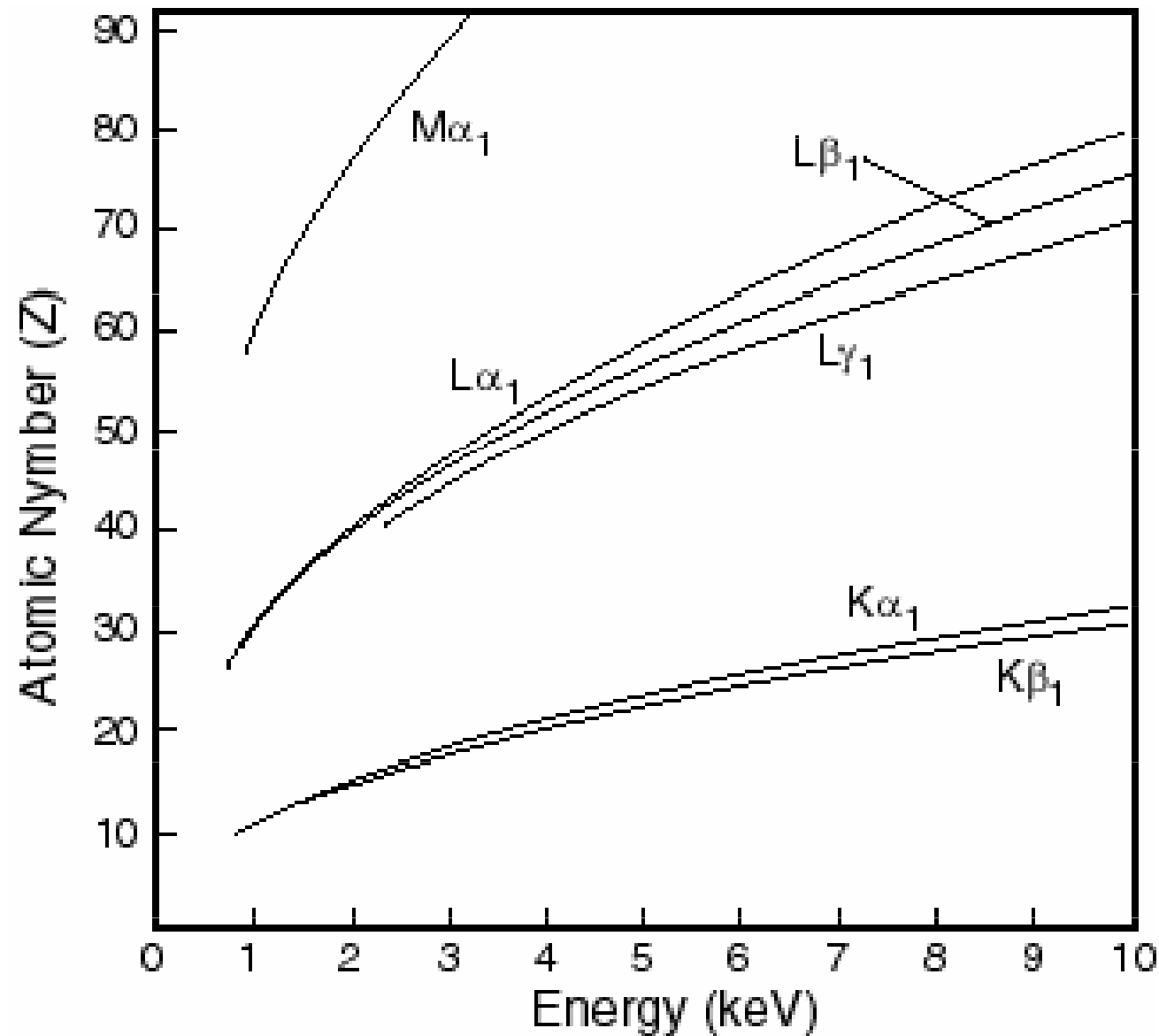
# Elektronová mikrosonda



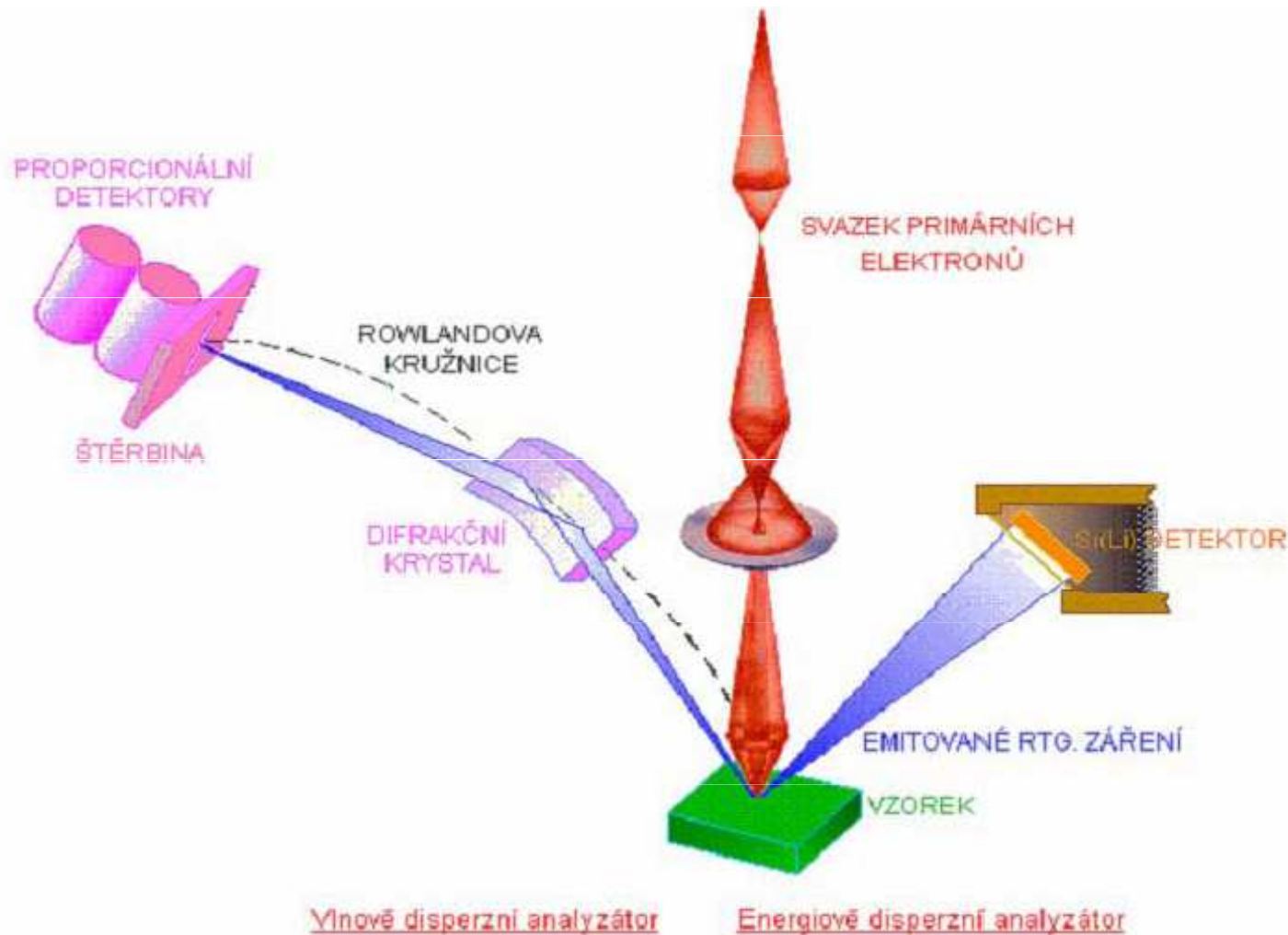
# Vznik charakteristického záření



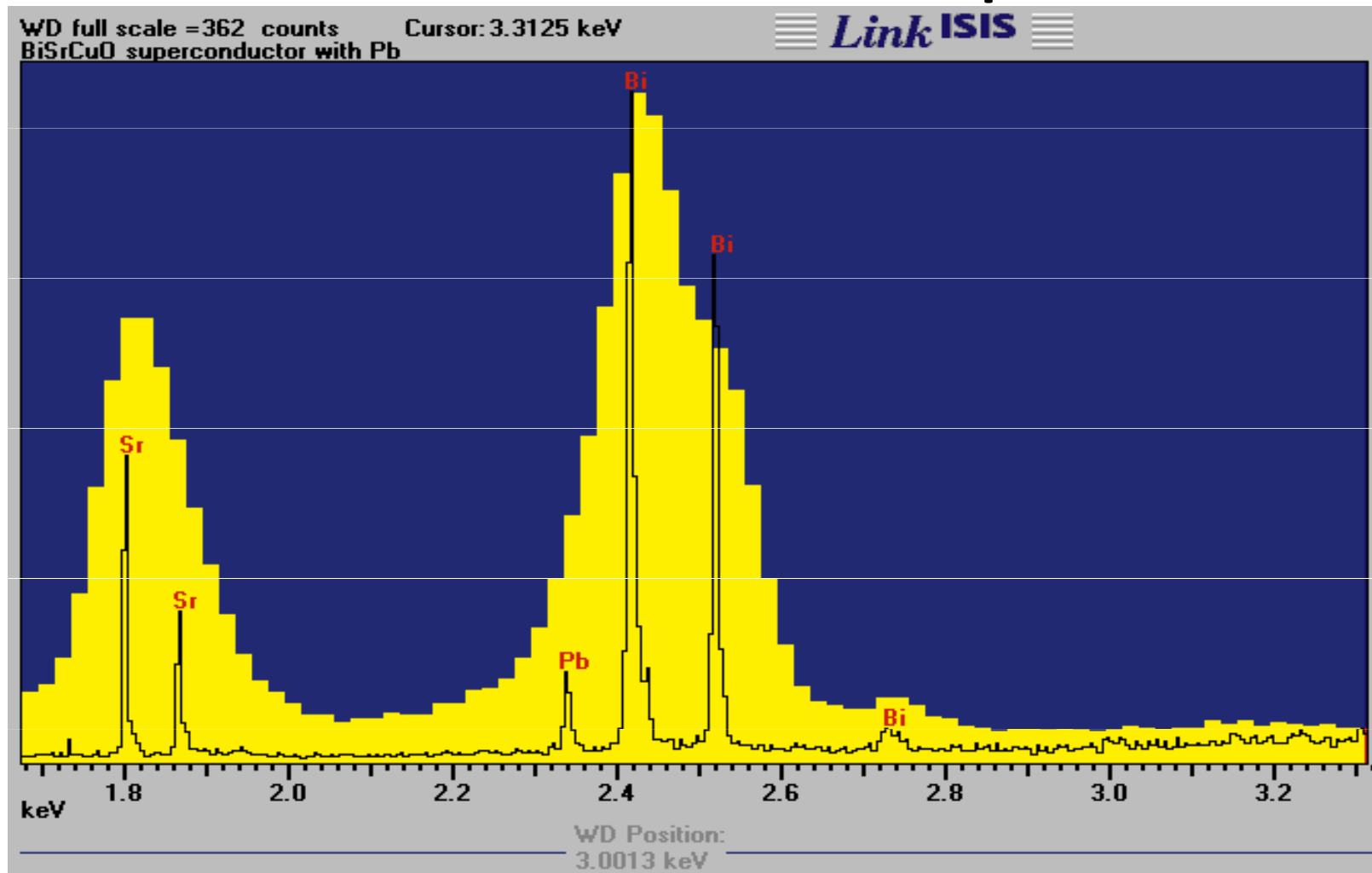
# Závislost energie emitovaného RTG-záření na protonovém čísle prvku



# Elektronová mikroanalýza – dvě možnosti detekce RTG záření



# Rozdíl mezi ED a WD spektrem



ED: načteno najednou, horší rozlišení –  
typicky 150 eV (větší šířka píků), nižší  
poměr signál/šum (->vyšší meze detekce –  
cca 0,1 %)

WD: načítání mnohem pomalejší, lepší rozlišení  
– typicky 5 eV (píky užší), vyšší poměr  
signál/šum (->nižší meze detekce – od 50 ppm u  
Fe po 0,X% u B)

# Energiově disperzní analýza rtg záření

## Energiově disperzní analyzátor rtg. záření



### Technické parametry

Typ detektoru

polovodičový Si-Li detektor, chlazený kapalným dusíkem, systém PENTAFET

Vstupní četnost  
(pro lineární detekci)

max. 50 000 pulsů/sec.

Spektrální rozlišovací  
schopnost

138 eV (měřená na  $K\alpha$ -čáře Mn)

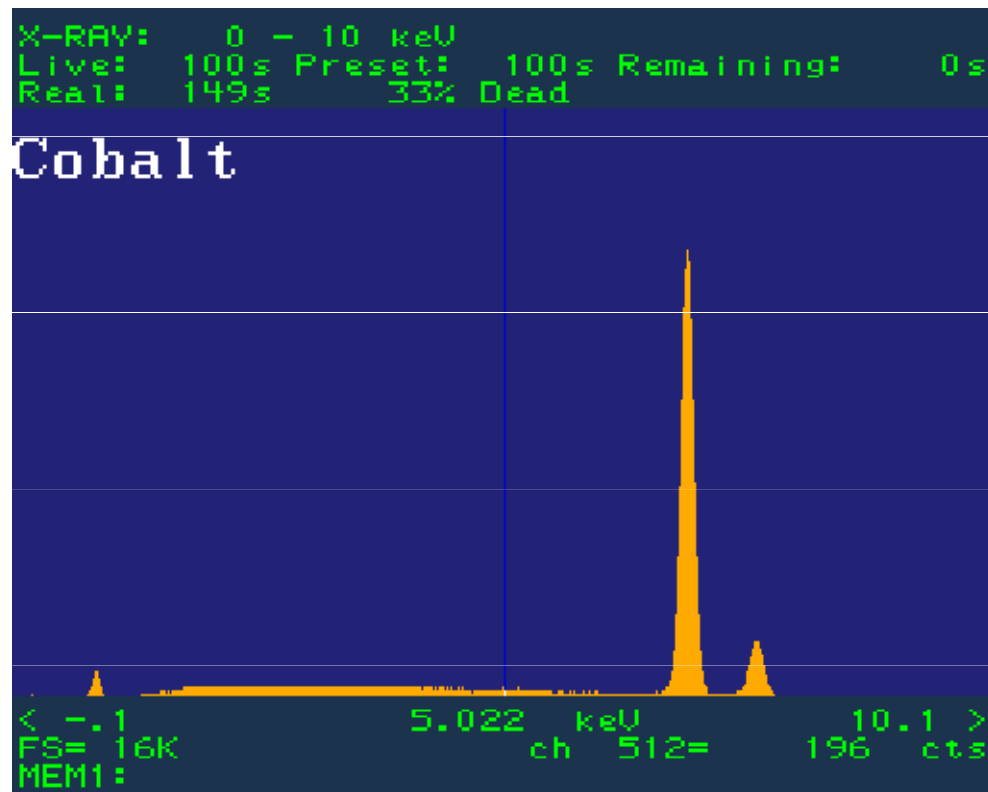
Rozsah analyzovaných  
prvků

od sodíku po uran

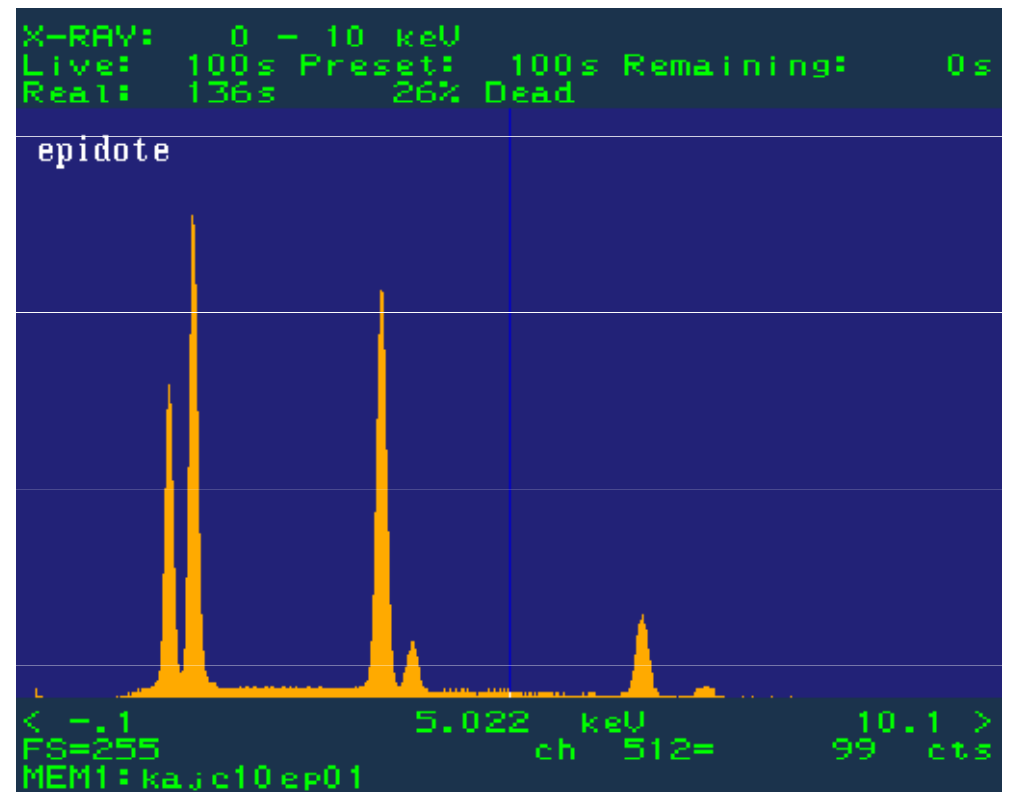


# EDS spektra

Sledování proudu pomocí Co standardu



Spektrum minerálu (epidot)

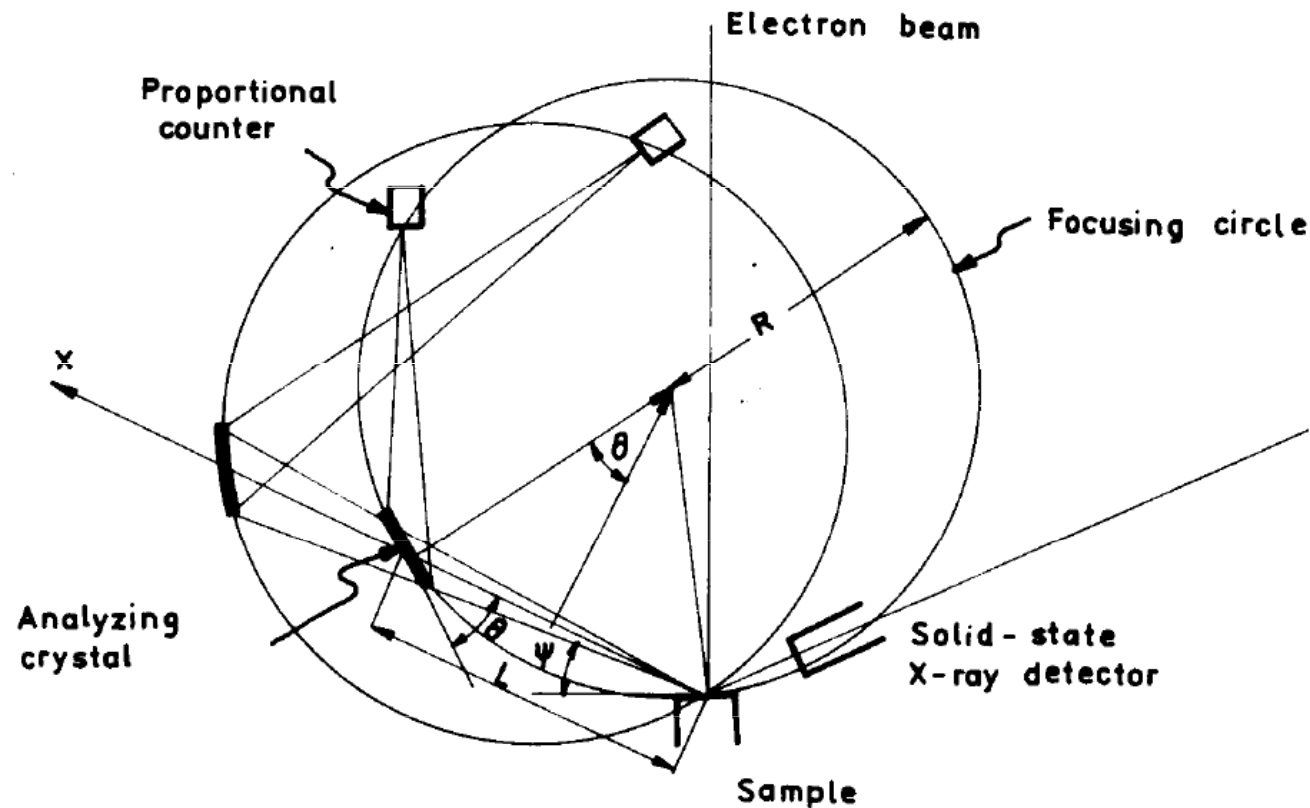


# Obtíže detekce rtg. záření v EDS

- **nastavení geometrie** – uspořádání detektoru a vzorku (možnost z – posuvu a náklonu)
- **artefakty při nabírání spektra** – nadměrná mrtvá doba detektoru, překrývání píků, „únikové píky“ - rtg. záření vyrazí v detektoru (Si) elektrony z hladiny K, jejichž energie redukuje měřenou energii (energie absorpční hrany Si = 1,84 keV; skutečná energie píku Fe K $\alpha$  = 6,40 keV; naměřená energie Fe K $\alpha$  = 4,56 keV).
- **Překrytí píků** – spektrální rozlišení EDS je definováno hodnotou FWHM píku Mn K $\alpha$   $\cong$  150 eV. Proto rozlišení některých píků je slabé. Příklad: Mn K $\beta$  je blízko Fe K $\alpha$ .
- **Nadměrná mrtvá doba** – těsná vzdálenost detektoru a vzorku a vyšší energie svazku mohou vést k zahlcení detektoru, případně k posuvu píků.

# Vlnově disperzní spektrometrie (Wavelength Dispersive Spectrometry – WDS)

Metoda určená k přesnému určení chemického složení mikroobjemů ( $\mu\text{m}^3$ )

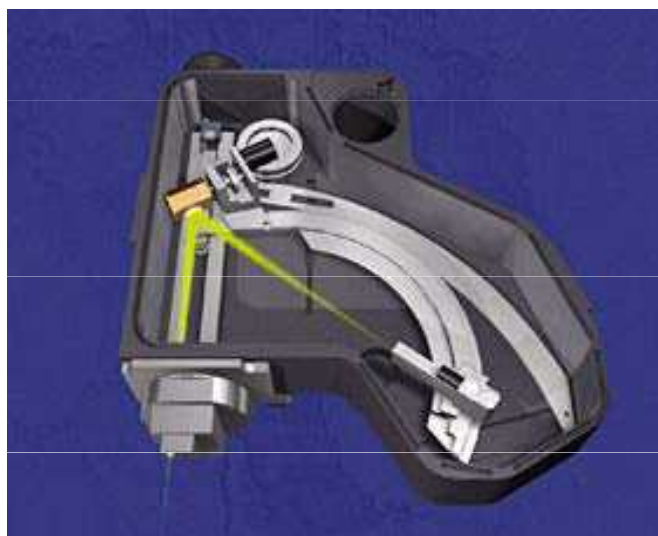
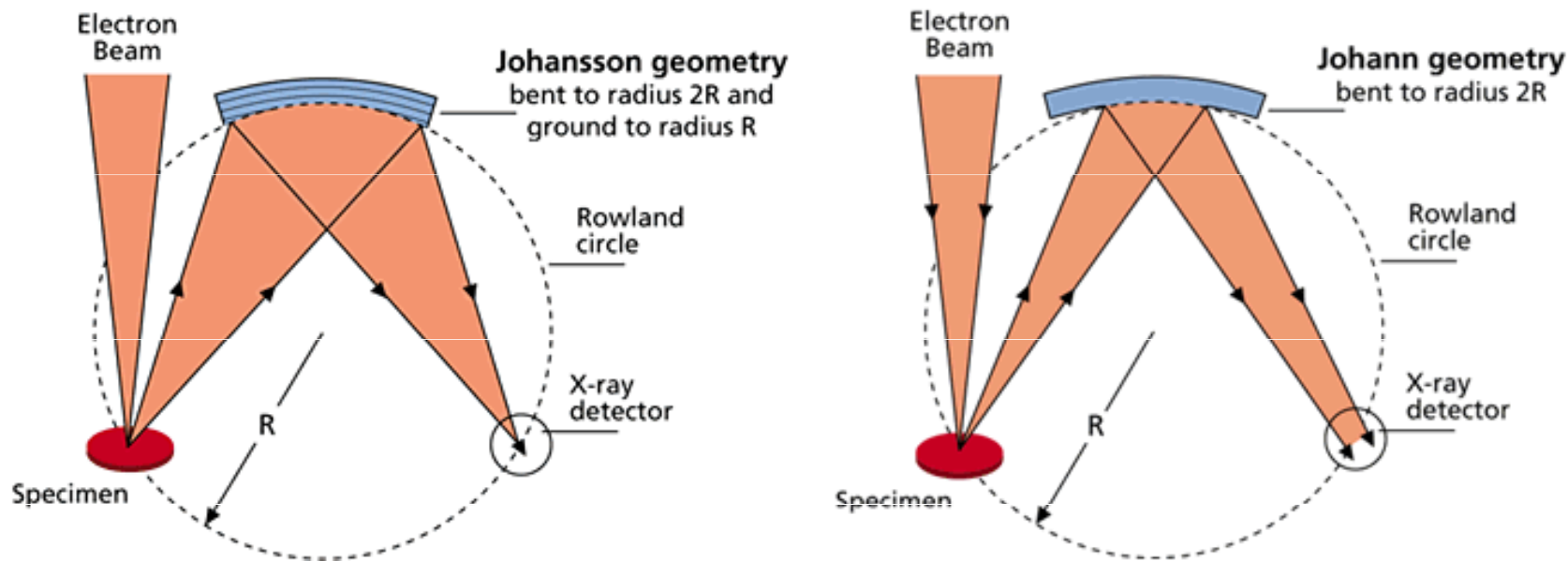


Princip detekce charakteristického rtg. záření u WDS

# Použití krystalových (WD) spektrometrů

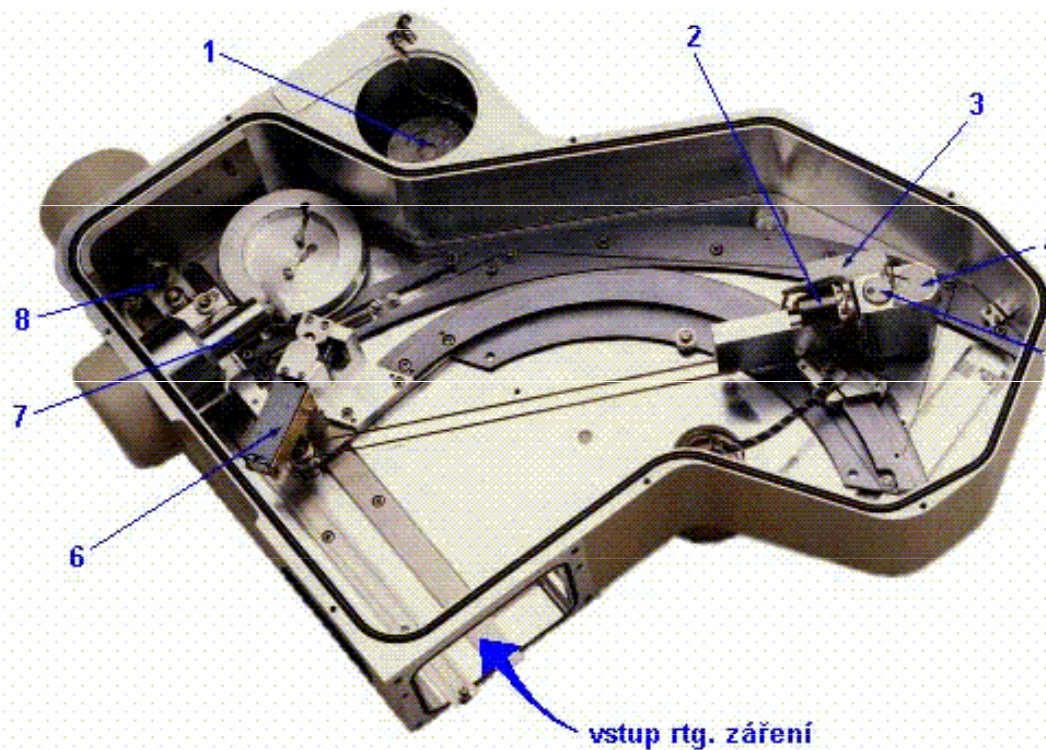
- krystalové spektrometry mají díky použití monochromátorů podstatně vyšší spektrální rozlišení, FWHM se pohybuje v řádu  $10^{-3}$ , jejich účinnost je však podstatně nižší než energiově disperzních (ED) spektrometrů zejména pro k nízkou odrazivost krystalů.
- mechanická konstrukce je složitější, musí zajistit přesný pohyb krystalu a detektoru. Podíváme-li se na obrázek spektrometru, můžeme si představit, že krystal je pevně přilepen na Rowlandovu kružnici a zdroj a detektor se po ní pohybují symetricky. Zdroj záření je však v mikroanalyzátoru nebo rastrovacím mikroskopu pevně fixován, takže celý spektrometr se při změně úhlů dopadu musí otáčet kolem zdroje. K tomu přistupuje požadavek, aby se všechny vlnové délky snímaly pod stejným úhlem, což konstrukci dále komplikuje. Takový spektrometr se nazývá *lineární*. Většinou se při konstrukci mikroskopů musí s touto okolností počítat. Poloha spektrometru pro dva různé úhly je na obrázku.

# Chod paprsku ve WD spektrometru



# Vlnově disperzní analyzátor rtg záření

## Vlnově disperzní analyzátor rtg. záření OIMAG WDX - 400



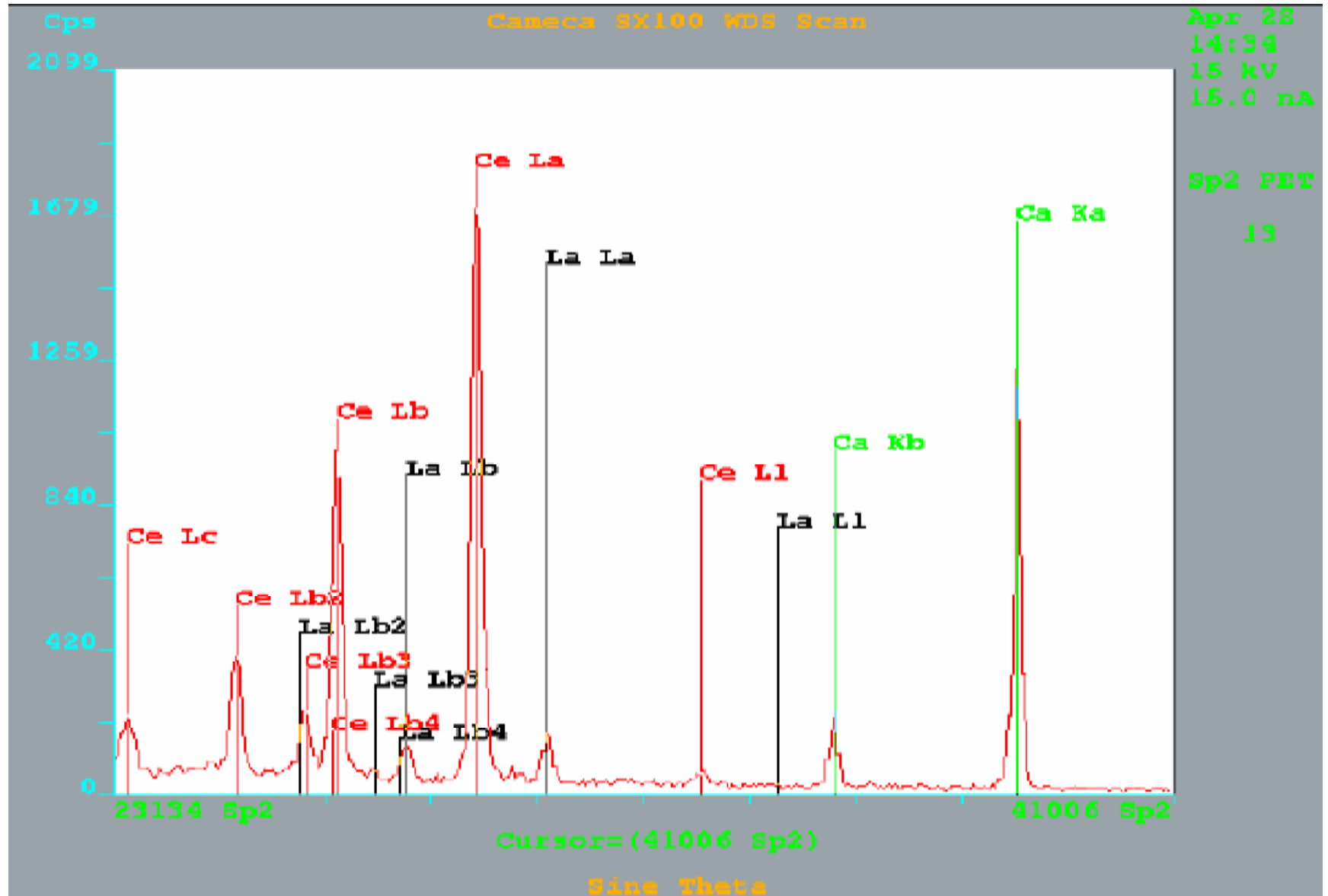
### Technické parametry

Typ	<u>plně fokusační - čtyřkrystalový</u>
Uspořádání	Johan - Johansson
Difrakční krystaly	LiF, PET, TAP, LOD
Detektory	zatavený a průtok. proporcionální
Rozsah analyz. prvků	<u>od bóru po uran</u>

### Popis spektrometru

1 motor pohonu spektrometru	2 ovládání šířky štěrbin	3 předzesilovač	4 zatavený proporcionální detektor
5 průtokový proporcionální detektor	6 difrakční krystaly	7 mechnika výměny krystalu	8 ovládání pozice štěrbin

# WDS spektrum –parisit $(\text{Ce, La})_2\text{Ca}(\text{CO}_3)_3\text{F}_2$





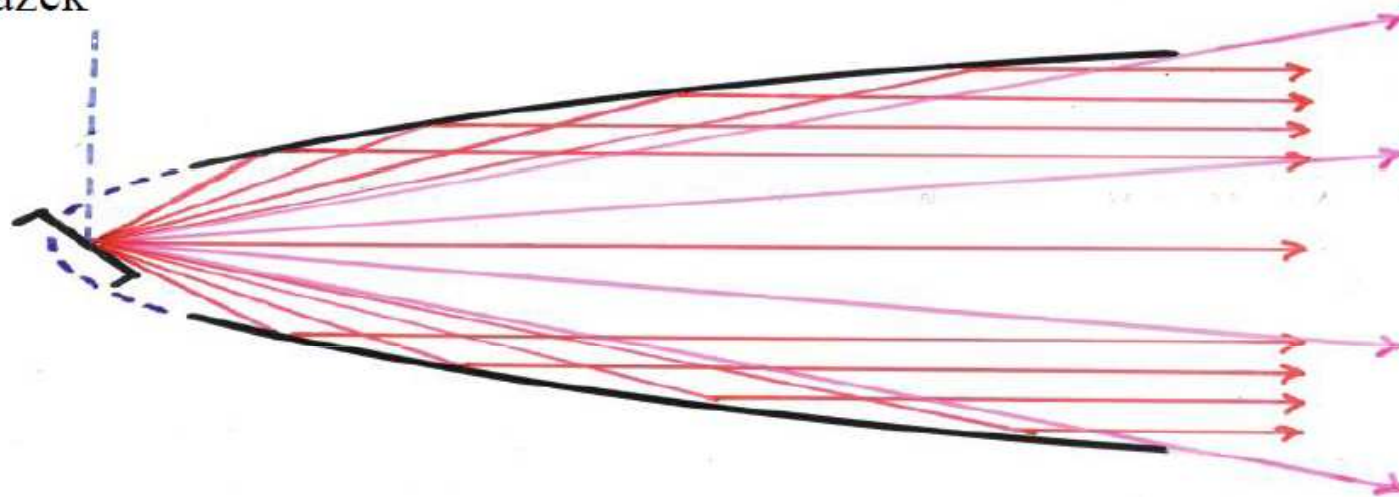
# Další typy WD spektrometrů

- složité krystalové (WD) spektrometry není jednoduché připojit k mikroskopům, u nichž se s touto možností při konstrukci nepočítalo. Protože ale jejich použití je někdy nezbytné (zejména při analýze těžkých prvků, které emitují velké množství rtg. čar a např. v případě vzácných zemin se často překrývají), byly vyvinuty spektrometry využívající rtg. zrcadla nebo kapiláry. V obou případech se využívá totálního odrazu při přechodu rtg. záření z vakua (nebo vzduchu) do hmotnějšího prostředí kdy index lomu je menší než 1 (ale o velmi málo). Úhly dopadu pak musejí být velmi malé, kolem  $0,5^\circ - 5^\circ$ .

# Zrcadlový WD spektrometr

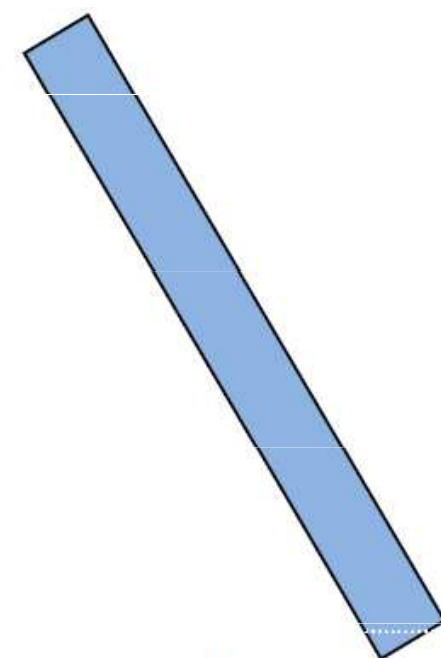
- Rtg. zrcadla mají tvar rotačních paraboloidů, v jejichž ohnisku je umístěn zdroj záření. Paraboloidy jsou velmi protáhlé kvůli malému úhlu dopadu, takže mají tvar protáhlé trubičky o průměru cca 2 cm. Aby mohly snímat záření ve větším rozsahu vlnových délek (používají se zejména pro záření prvků od B do Si), vkládají se až tři paraboloidy do sebe. Divergentní svazek rtg. paprsků je parabolickým zrcadlem koncentrován do paralelního svazku, takže jako monochromátor slouží rovinný krystal.

elektronový  
svazek



*Parabolické rtg. zrcadlo.*

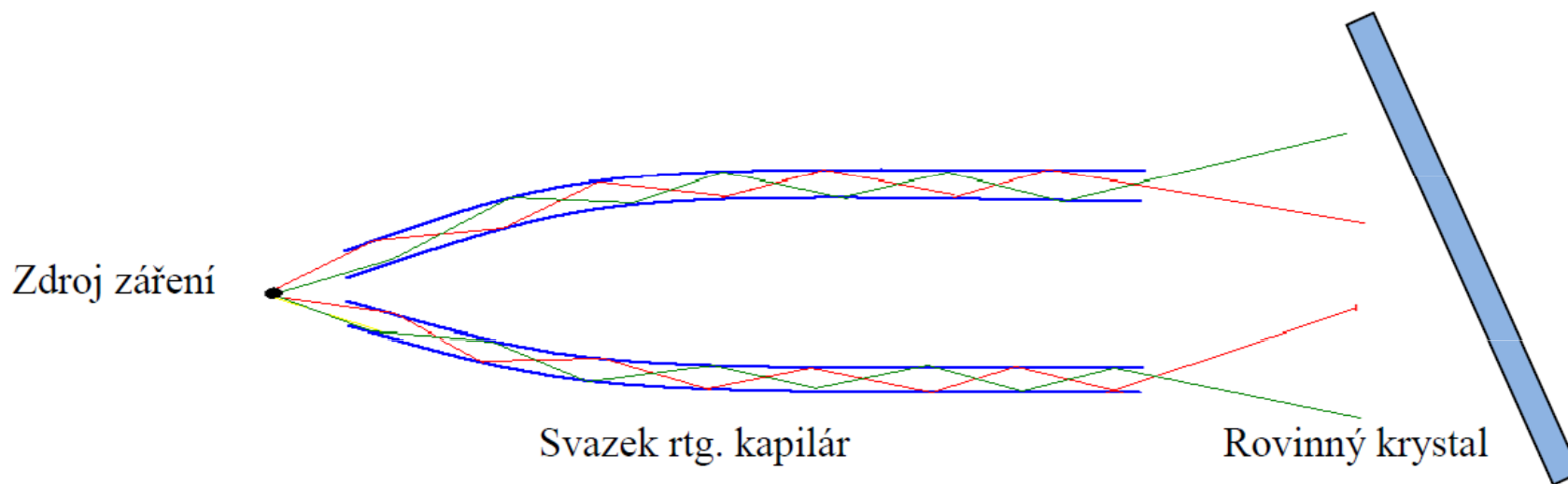
prof. Otruba



rovinný krystal

# Kapilární optika WD spektrometru

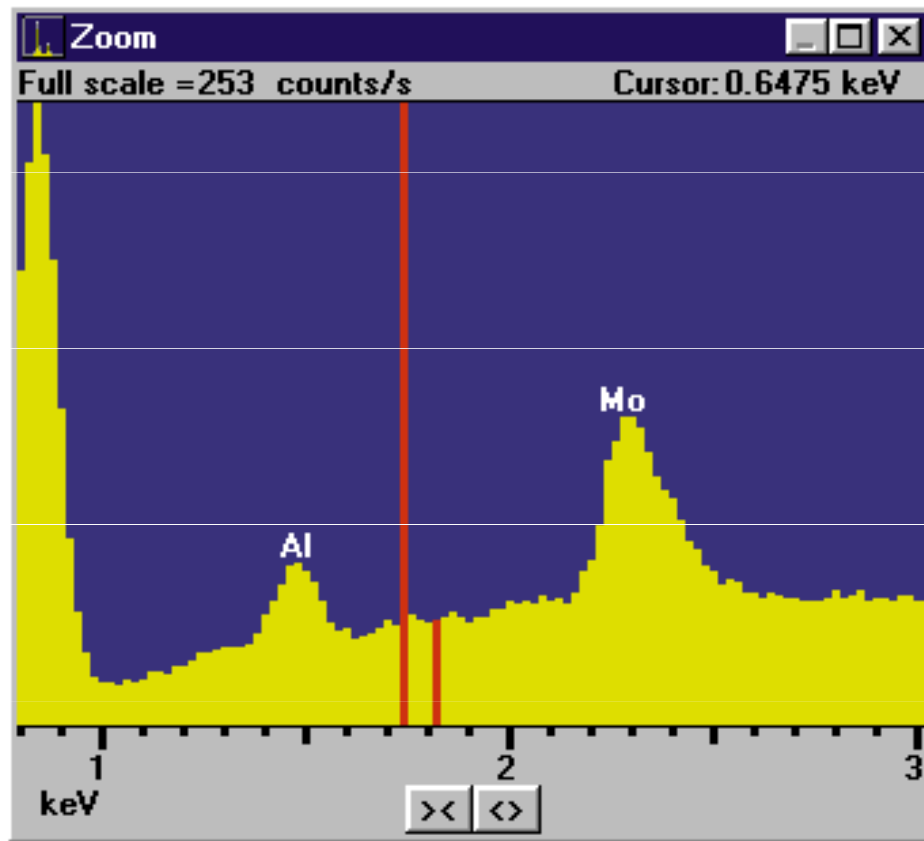
- Jinou variantou je použití tenkých kapilár, ve kterých dochází k mnohonásobnému totálnímu odrazu a které mohou být mírně ohnuty (aby se nezvětšil úhel, při kterém k totálnímu odrazu dochází), takže se svazek kapilár může přiblížit těsně ke zdroji a snímat velký prostorový úhel.



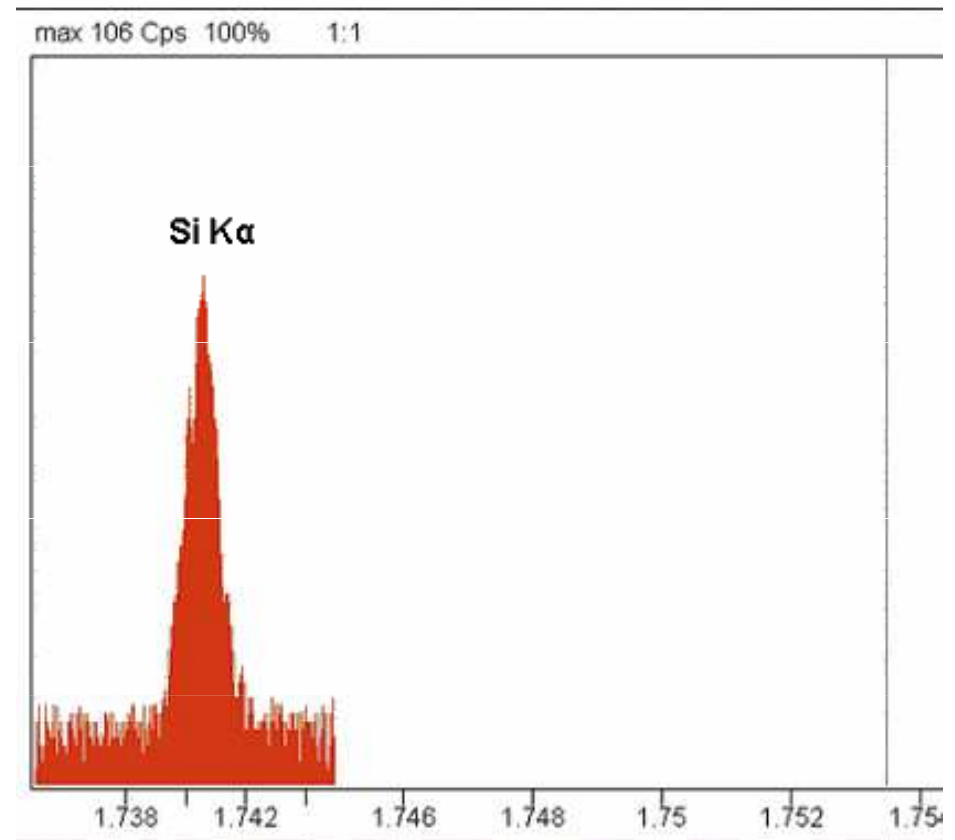
# Zrcadlová a kapilární optika

- Výhoda uvedených spektrometrů je v jednodušší konstrukci a malých rozměrech, soustavu paraboloidů nebo svazek kapilár o průměru asi 2 cm je možné snadno instalovat do téměř každého rastrovacího elektronového mikroskopu blízko zdroje záření čímž se zajistí snímání do velkého prostorového úhlu, vnější vzhled je velmi podobný energeticky disperznímu (ED) spektrometru, navíc bez chlazení. Není nutná fokusace, za otočným rovinným krystalem je umístěn detektor (obvykle proporcionální počítač), který při otáčení krystalu pouze udržuje úhel dopadu. Vnitřní plochy jak paraboloidů, tak kapilár musejí být dokonale lesklé.
- Kromě krystalů a multivrstev je možné k monochromatizaci použít i ryté mřížky (zejména pro dlouhovlnná záření), ale úhly dopadu kvůli totálnímu odrazu musejí být velmi malé ( pro skleněnou mřížku 12 úhlových minut pro  $\text{Cu K}\alpha$  ,  $1^\circ$  pro  $\text{Mg K}\alpha$ ,  $6^\circ$  pro  $\text{C K}\alpha$ , takže pro dosažení potřebné účinnosti by musely být příliš velké

# Meze stanovitelnosti



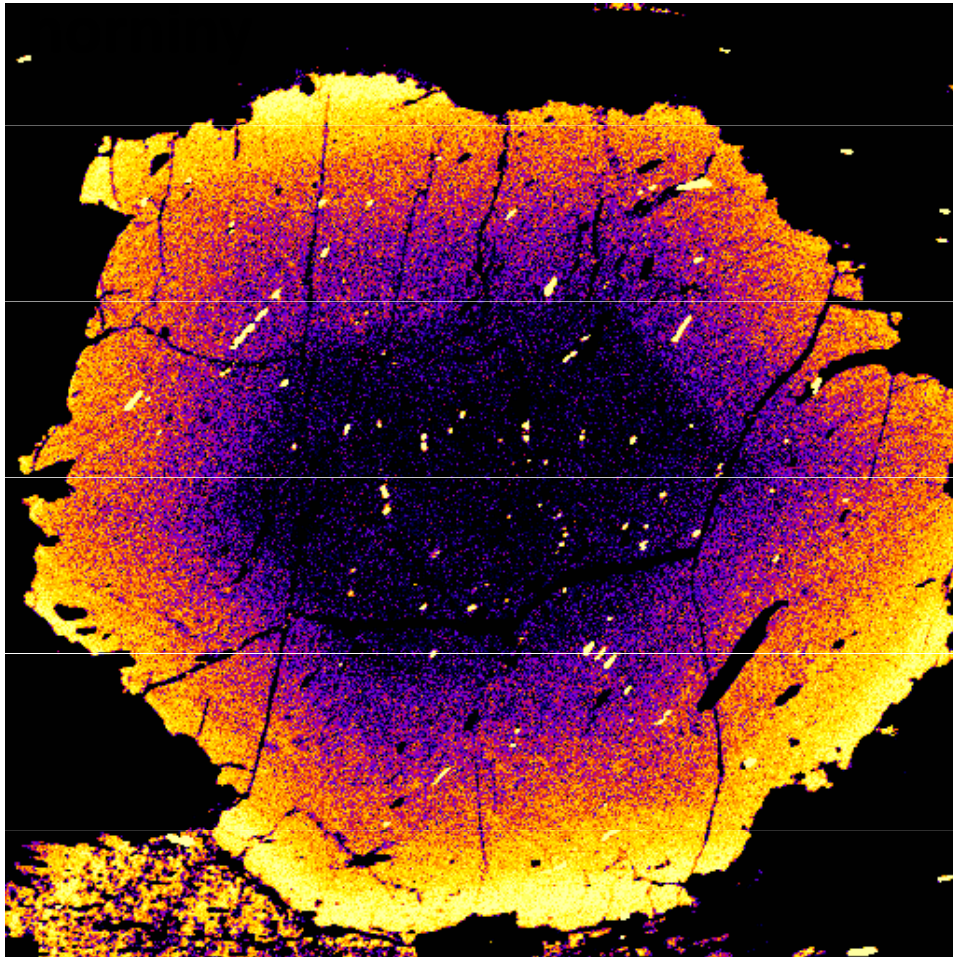
ED spektrum slitiny s příměsí 0,15% Si – v oblasti vyznačené červenými čarami



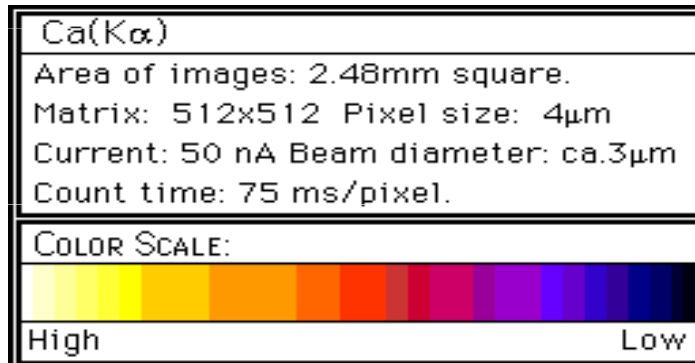
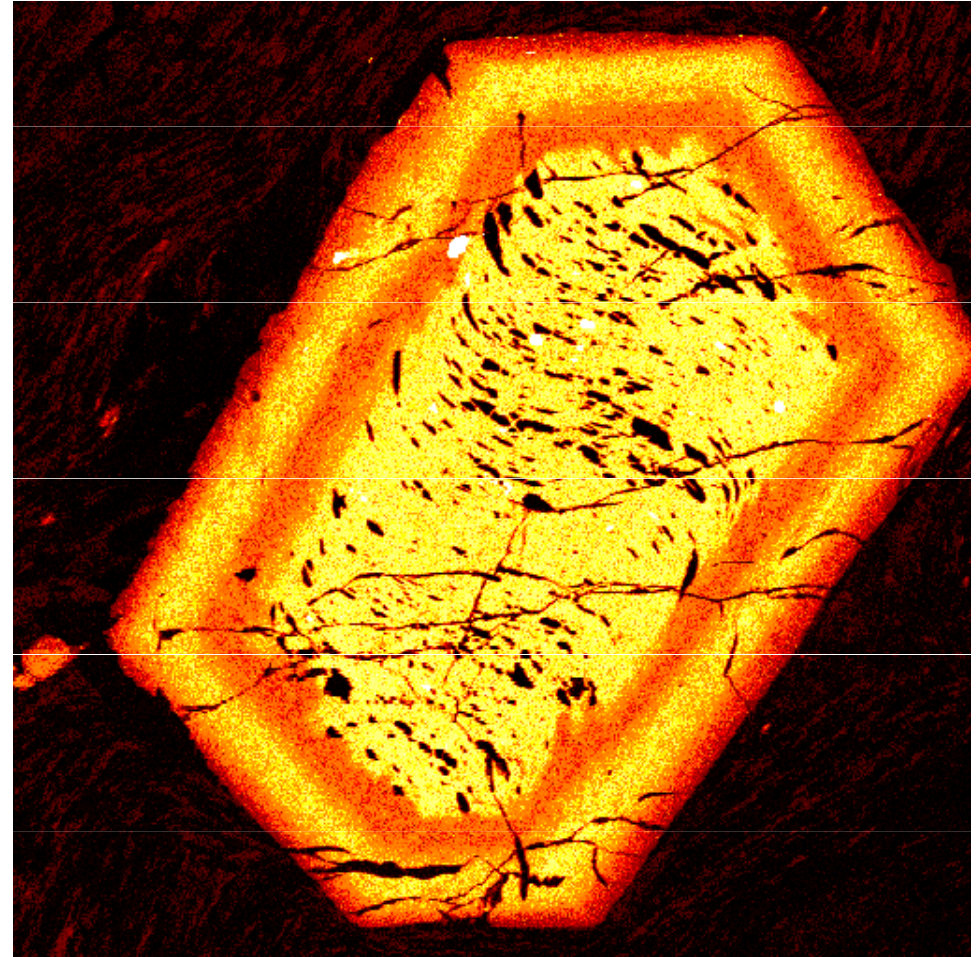
Pík Si na WD spektru těže slitiny



## Distribuce Ca v granátu z prográdně metamorfované

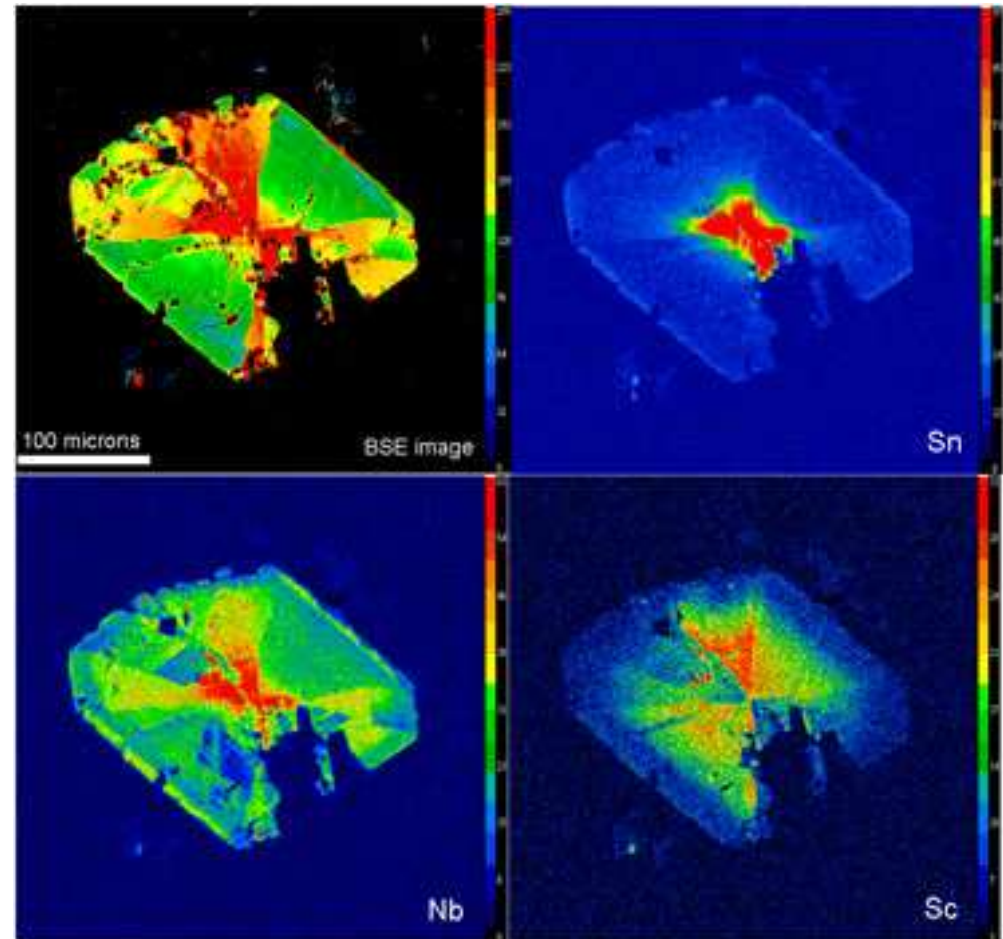


## Distribuce Ca v granátu se složitou metamorfní historií



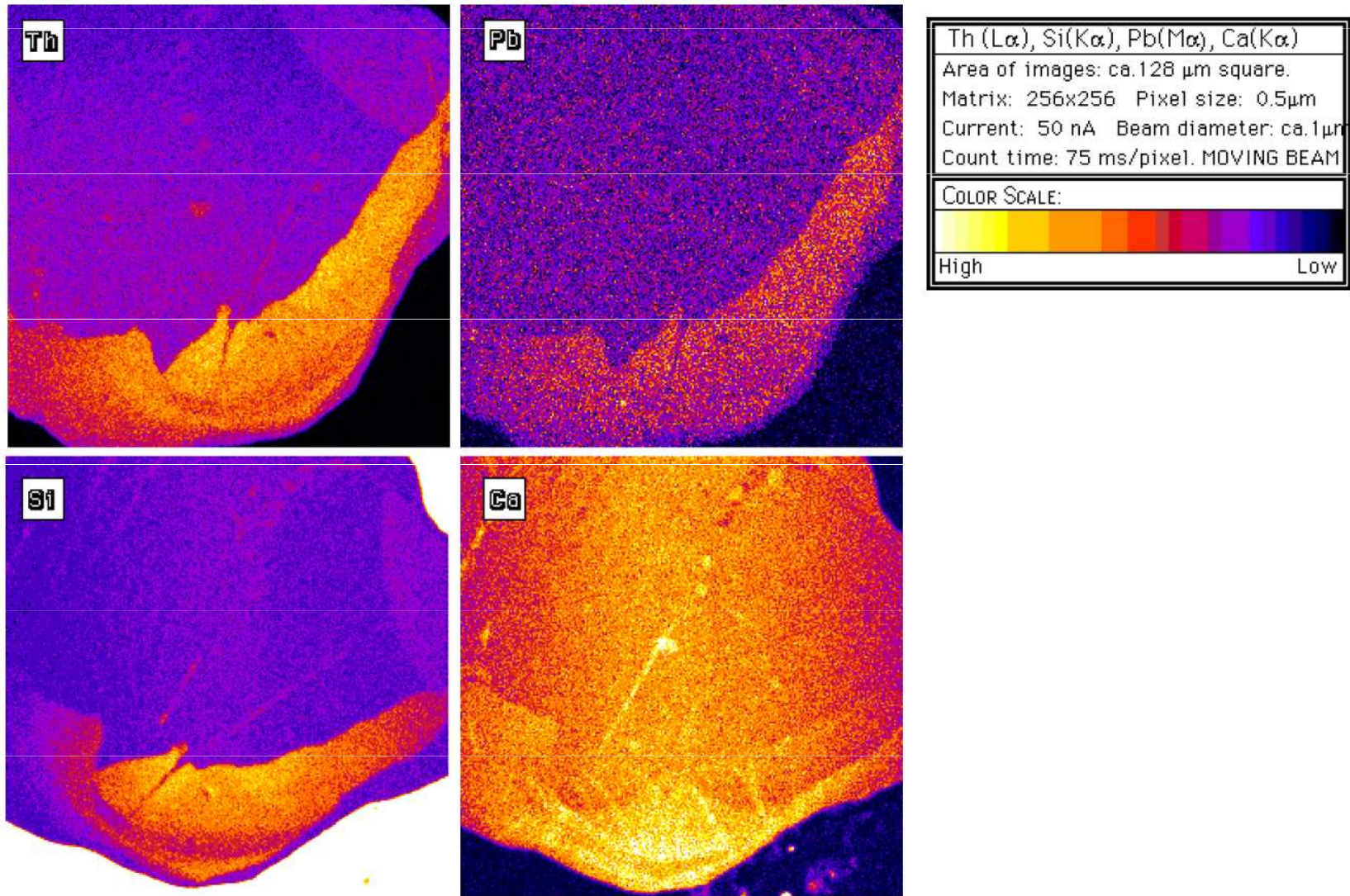
# Examples of Cameca SX100 applications

- This example shows an artificially coloured backscattered electron (BSE) image and three X-ray maps showing the distribution of tin (Sn), niobium (Nb), and scandium (Sc) in a small grain of tin- and scandium-bearing titanite in a sample of rhyolite from north Wales. The grain displays sector zoning. Scale bar = 100 $\mu$ m.





# Distribuce Th, Pb, Si, Ca v monazitu



# Porovnání WDS a EDS mikroanalytických metod

<b>WDS</b>	<b><u>EDS</u></b>
1. Vysoké spektrální rozlišení (2-6 eV)	1. Nízké spektrální rozlišení (130-155 eV)
2. Nižší účinnost při nabírání spektra (pomalejší)	2. Vysoká účinnost při nabírání spektra (rychlejší)
3. Vyšší citlivost na změnu geometrie vzorku	3. Nižší citlivost na změnu geometrie vzorku
4. Řídké artefakty ve spektru	4. Časté artefakty ve spektru
5. Nevyžaduje LN <sub>2</sub>	5. Vyžaduje LN <sub>2</sub>
6. Dochází k pohybu mechanických částí	6. Nedochází k pohybu mechanických částí
7. Je nutná relativně vysoká energie svazku	7. Nízká energie svazku není problémem
8. Nákladné zařízení	8. Méně nákladné zařízení

# EBSD - Difrakce zpětně odražených elektronů

EBSD – Electron Backscattered Diffraction“, neboli difrakce zpětně odražených elektronů je technika, založená na získávání difrakčních obrazců z objemových vzorků v skenovacím elektronovém mikroskopu. Primární svazek elektronů dopadá na nakloněný vzorek a odražené elektrony tvoří difrakční obrazce, které jsou zachyceny na fluorescenčním stínítku.

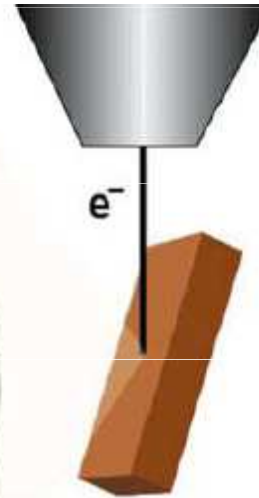


Schéma uspořádání vzorku, dopadajícího elektronového svazku a stínítka v EBSD

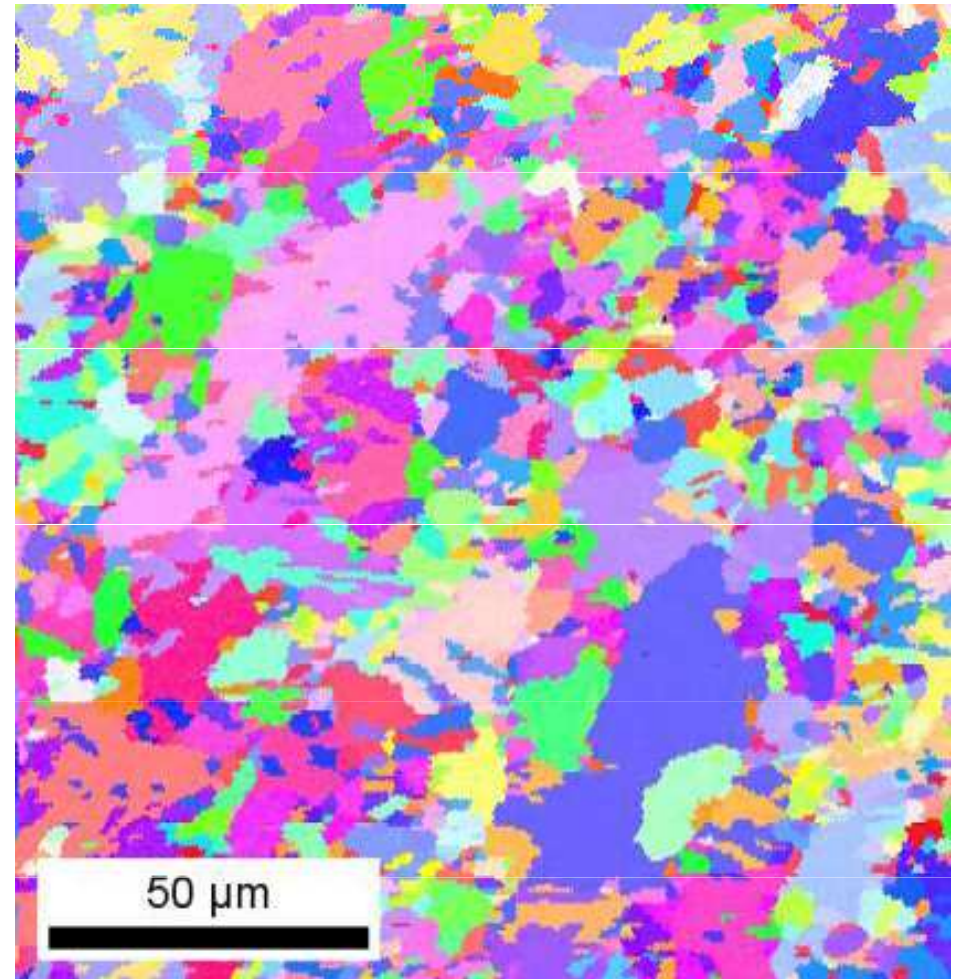
EBSD difrakční obrazec





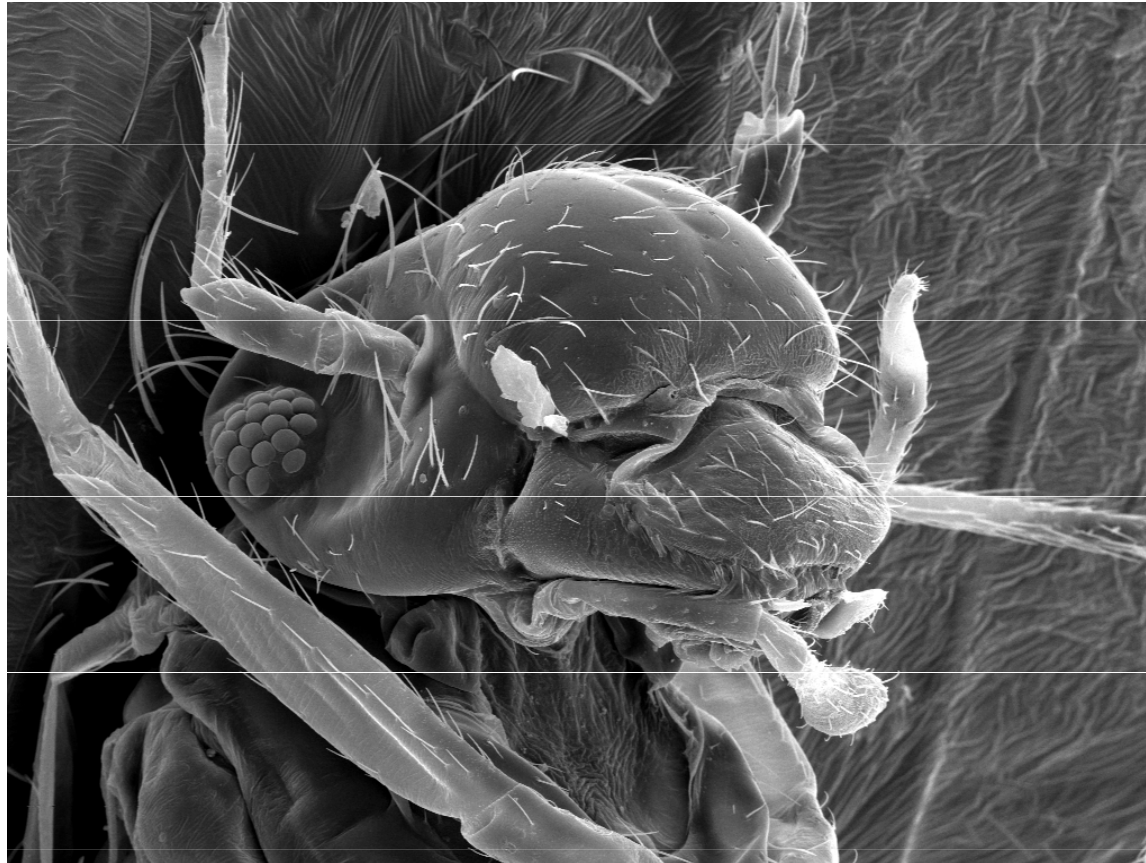
# Orientation image mapping

- Výhodou použití skenovacího mikroskopu je, že elektronový svazek může skenovat po vzorku v určitých krocích a difrakční obrazce mohou být zaznamenávány v každém bodě rastru. Tímto způsobem lze získat data z velkého množství bodů skenované plochy (rastru). Výsledkem je pak mapa orientace krystalů na zvolené ploše



Mapa krystalové orientace, každá barva značí jinou orientaci

# Environmentální rastrovací mikroskop



HV: 30.0 kV  
Vega ©Tescan

DET: SE Detector  
DATE: 12/14/00

200  $\mu$ m

ÚHE LF MU v Brně

Když tlak v komoře vzorku mikroskopu environmental SEM zvýšíme až nad 609 Pa (tlak nasycených vodních par při 0°C) můžeme pozorovat vzorky obsahující vodu bez nutnosti jejich vysoušení a následného pokovování, případně použití jiných preparačních technik. Poškození biologických vzorků lze ještě snížit připouštěním vodní páry a tím zpomalit jejich vysoušení a prodloužit tak možnou dobu jejich pozorování.