

České vysoké učení technické v Praze
Fakulta jaderná a fyzikálně inženýrská

Katedra jaderných reaktorů



Jaderné inženýrství v praxi
Magisterské studium

STÁTNICOVÉ OTÁZKY

Rok: 2025

Ahojky, dostávají se ti do rukou státnicové otázky ze předmětu Jaderné inženýrství v praxi. Prosím, měj na paměti, že celkový přehled není v některých tématech ucelený a že se v textu můžou vyskytovat (a stoprocentně vyskytují) chyby jak gramatické, tak faktické. Ale i přestože text má k dokonalosti hodně daleko, předávám ho dál a věřím, že třeba někomu pomůže :)))

T.K. (2023)

No nazdar, jestli tenhle text čteš, tak se ti do rukou dostaly opravené, obohacené, vylepšené a hlavně aktuální otázky dle okruhů na magisterské SZZ v roce 2024. Opět platí to samé co nahoře, je tam spousta chyb, ale snad by měl text poskytovat intenzivnější vhled do problematiky.

Budeme rádi za jakékoli doplnění, opravu nebo komentář a držím palce ke státnicím!!!

J.M. + Š.J. (2024)

Jenom jsem provedl menší textové úpravy a doplnil pár mých poznámek. Veškerý kredit patří těm nade mnou.

J.S. (2025)

Obsah

1	Rentgeno fluorescenční analýza	4
1.1	Princip metody	4
1.2	Vlnově disperzní RFA	5
1.3	Energiově disperzní RFA	6
1.4	Požadavky na vzorek pro RFA analýzu	6
1.5	Detektory pro RFA	7
2	Aplikace rentgeno fluorescenční analýzy	8
2.1	Kvalitativní analýza	8
2.2	Kvantitativní analýza	8
2.3	Matricové jevy	9
2.4	Metody kompenzace Matricových jevů	9
3	Elektronová mikrosonda	11
3.1	Princip	11
3.2	Typy elektronového mikroskopu:	12
3.3	Využití	13
3.4	Výhody a nevýhody elektronového mikroskopu	13
4	Aplikace ionizujícího záření v geologii a geofyzice	15
4.1	Radiometrické datování hornin	15
4.2	Jaderná karotáž (well logging)	15
4.3	Metody využívající zpětný odraz gama	17
5	Využití iontových svazků v materiálovém výzkumu	20
6	Využití jaderně-fyzikálních metod v materiálovém výzkumu	21
7	Jaderně-fyzikální metody v nukleární medicíně	22
8	Využití synchrotronového záření v materiálovém výzkumu	23
9	Jednotky a veličiny v dozimetrii	24
10	MVyužití detektorů v metrologii aktivity	25
11	Koincidenční metoda & spektrometrie gama	26
12	Metrologie neutronů & manganová lázeň	27
13	Jaderná bezpečnost & ochrana do hloubky	28
14	Klasifikace událostí na jaderných zařízeních	29
15	Legislativa jaderné bezpečnosti	30

1 Energiově a vlnově dispersní rentgenfluorescenční analýza

1.1 Princip metody

Nedestruktivní metoda zjišťování chemického (prvkového) složení zkoumané látky.

Je založena na detekci charakteristického RTG záření, jež je emitováno příslušnými atomy prvků obsažených ve zkoumané látce. Nejprve je látka vystavena dopadajícím fotonům (RTG záření například z rentgenky nebo gama z vhodného radionuklidu). Tyto fotony pak vyřadí elektrony (nejčastěji z vnitřní slupky K, popř. L). Poté dochází k přeskokům elektronů z vyšší slupky na toto prázdné místo a rozdíl energií je vyzářen v podobě fluorescenčních fotonů RTG záření, které je specifické pro daný prvek.

Kvalitativní analýza: je možné díky detekci charakteristického RTG záření, jež je specifické pro daný prvek (detekujeme energii a vlnovou délku).

Kvantitativní analýza: množství emitovaných fotonů charakteristického záření je přímo úměrné množství atomů daného druhu a je tedy mírou koncentrace daného prvku. Kvantita je dána intenzitou jednotlivých píků fluoroscenčního záření.

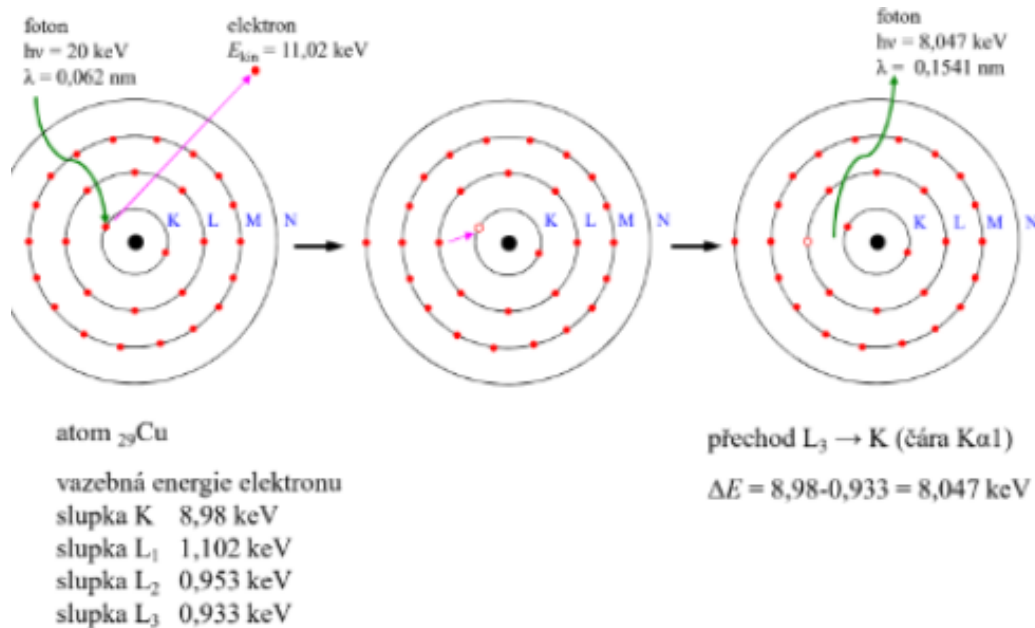
Vlnová délka charakteristického RTG záření je klesající s rostoucím Z číslem prvků a naopak energie se zvyšuje se Z číslem. Metoda RFA/XRF je dobrá pro prvky s větším Z , jelikož se lépe detekují.

Výhody:

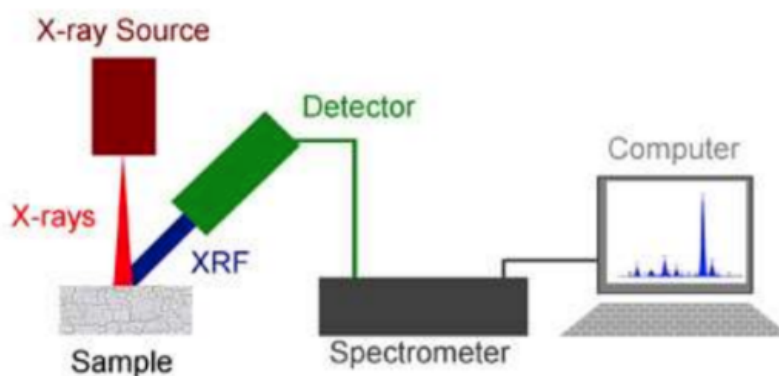
- Rychlost, přesnost a reprodukovatelnost
- Vzorky mohou být v jakémkoliv skupenství
- Nedestruktivní metoda
- Multiprvková analýza
- Dobré pro zkoumání složení uměleckých předmětů

Nevýhody:

- Obtížná detekce prvků lehčích než $Z < 13$
- Nerozpozná chemické sloučeniny
- Omezení na pouhý povrch zkoumaného materiálu



Obrázek 1: Princip RFA 1



Obrázek 2: Princip RFA 2

1.2 Vlnově disperzní RFA

Ze sekundárního charakteristického záření se izolují jednotlivé vlnové délky (čáry) spektra přes difrakci na krystalu. Poté je možné měřit intenzitu jednotlivých čar pro jednotlivé prvky postupně. Pokud máme multikrystal (složený z různých vrstev), pak je možné provádět analýzu současně.

Používá se při kvantitativní analýze prvků B po U (materiál v podobě pevné, zrnité i kapalné)

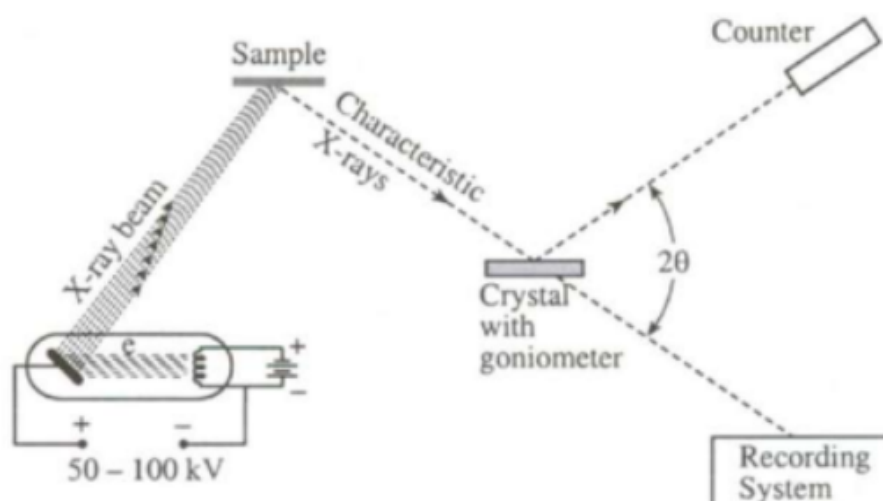
Vyžaduje velké rozměry přístrojů, vysokou spotřebu energie, ale dosahuje velmi dobrých technických parametrů.

Sekundární záření se odráží na krystalu a dopadá do detektoru/čítače (difrakce je dána Braggovým zákonem).

V závislosti na Z prvků, které chci měřit, tak se volí krystaly:

- Pro těžké a středně těžké prvky (= krátké vlnové délky) je používají LiF, NaCl, Ge, InSb.
- Pro lehčí prvky se využívají soli organických kyselin s těžkým kovem (ten tvoří uzlové body v krystalové mřížce).
- Pro velmi lehké prvky se používají uměle připravené multivrstevnaté krystaly (kde se do matrice lehkého prvku (Si) vkládají vrstvy těžkého kovu).

Výsledné spektrum je pak funkcí intenzity na vlnové délce či na difrakčním úhlu 2θ .



Obrázek 3: Vlnově disperzní RFA

1.3 Energiově disperzní RFA

Jedná se o menší a levnější přístroje, kde je analyzováno celé spektrum pomocí polovodičového detektoru (detekovaná energie je úměrná elektrickému impulsu a počet signálů o dané energii je roven intenzitě záření. Amplituda impulsů je úměrná energii).

Obvykle se využívá Si(Li) detektor, kde jsou vznikající impulsy zesíleny a tříděny dle velikosti pomocí MCA (četnost impulsů v kanálech = intenzita fotonů = kvantita).

Jsou zde horší detekční limity pro lehké prvky, takže spíše detekce prvků od Na po U (obecně nelze použít pro $Z < 13$).

1.4 Požadavky na vzorek pro RFA analýzu

- Pokud je vzorek v tuhé formě, měl by být ideálně zcela hladký a vyleštěný, aby se tam nepletla např. koroze a jiné blbosti (prach, apod..) → V zásadě jako metalografický výbrus.
- Zrnitý materiál se namele, aby byla zajištěna stejná distribuce částic a pak se lisuje do matrice/tablet.
- Kapalné vzorky jsou v pohodě.

- Aerosoly se taky dají, například pomocí záchytu na filtru, které se pak měří.
- Kapalně a práškově vzorky se měří za přítomnosti He.
- Stanovení lehkých prvků jde za přítomnosti vakua, protože lehké prvky mají sekundární záření o malé energii, takže se těžko detekují.

1.5 Detektory pro RFA

Scintilační: Monokrystal NaI(Tl), KI(Tl) + fotonásobič (základní měření)

Polovodičové: čisté Si nebo Ge dopovaného Li (přesnější měření, nejčastěji využívané):

- Nejčastěji Si(Li) chlazené dusíkem.
- RTG foton vyvolá vznik páru elektron-díra a počet párů je pak úměrný energii fotonu. Hlavní výhodou je vysoké energetické rozlišení.
- Vysoké rozlišení, využívá MCA.
- Si(Li) – mají větší detekční plochu a vyšší energetické rozlišení.
- SiPIN (Silicon pin diode detectors) – pracují blízko pokojové teploty a stačí chlazení Peltierovým článkem, menší detekční plocha a srovnatelné energetické rozlišení (stále se vyvíjejí, využití v průzkumu kosmu), horší detekční účinnost.
- Laboratorní XRF – obvykle ve vakuu, používají se však i mobilní XRF analyzátory (viz exkurze KDAIZ) → žádná příprava vzorku, měření na vzduchu, na různých místech, velmi rychlé. Ve formě pistolky, která obsahuje zdroj (rentgenku) a zároveň detektor.

Plynové ionizační detektory: už se spíše nevyužívají, mají horší rozlišení:

- Např. proporciální detektory
- Průtokový či uzavřený detektor naplněný Ar, W anoda → měří se ionizační proud.

2 Zpracování spekter při použití rentgenfluorescenční analýzy, kvalitativní a kvantitativní analýza, matricové jevy

2.1 Kvalitativní analýza

Nevím přesně o co jde, ale čekal bych to, že při detekci nebudu detekovat jen jednotlivé píky, ale i spojitý kus spektra. Ten je způsoben průchodem elektronu skrze prostředí, které ho zpomaluje, čemuž se říká brzdné záření. Jednotlivé píky jsou pak přisuzovány detekovaným prvkům ve vzorku zkoumaného materiálu.

Podle velikosti energie, popř. vlnové délky, je zjištěno, co je to za prvek, neboť energie fluorescenčního RTG záření je tzv. charakteristické RTG záření a je specifická pro daný prvek. Následně pomocí MCA jsou dle energie rozděleny jednotlivé píky, přičemž jejich amplituda/velikost odpovídá intenzitě, neboli kvantitě. Tím je zajištěno kvalitativní i kvantitativní analyzování vzorku.

V případě vlnově disperzní RFA tak analyzují většinou jen jednu vlnovou délku, takže tam mám kvalitativní analýzu na ten jeden prvek a kvantita odpovídá velikosti píku.

2.2 Kvantitativní analýza

Závisí na:

- obsahu prvku ve vzorku,
- intenzitě primárního fotonového záření (čím vyšší tok primárních fotonů, tím vyšší fluorescenční tok),
- vlnové délce/energii primárních fotonů (je vhodné, aby energie primárního záření byla jen o málo větší než vazebná energie elektronů ve slupce, neboť tehdy je nejvyšší účinný průřez pro fotoefekt → to znamená, že pro různě těžké prvky musím mít různé ozařovací zdroje):
 - Pro lehké prvky se dá využít RTG lampa a radionuklidy s měkkým zářením (Fe-55, Cm-244).
 - Pro středně těžké prvky: Am-241.
 - Pro těžké prvky (Au, W, U, Pb, apod.): Co-57, Cs-137, Ce-144.
- RF výtěžek (fluorescenční výtěžek + výtěžek Augerových elektronů),
- ztráty záření,
- matrice vzorku = matricové jevy (dají se potlačit, kompenzovat a nebo za určitých podmínek zanedbat).

Kalibrace pro kvantitativní analýzu většinou vyžaduje mít k dispozici alespoň jeden referenční materiál známého složení.

Koncentrace ve vzorku zkoumaného materiálu a neznámého složení se stanoví přímým srovnáním s měřením ref. materiálů (trojčlenka). Tento způsob ale nebere v potaz matricové jevy.

2.3 Matricové jevy

Matricové jevy představují to, jak nám do naměřené koncentrace daného prvku zasahuje vliv koncentrace ostatních prvků, neboli vliv matrice.

Výrazně se projevují při měření kovů a velmi málo, nebo vůbec, se neprojevují u měření tenkých vrstev, či při měření malých koncentrací zkoumaného prvku v dané matrici. Matricové jevy mohou mít za následek snížení, nebo zvýšení signálu, který pak neodpovídá skutečné koncentraci.

Zvýšení signálu:

- Primární zesílená excitace = excitovaný prvek A emituje čáry, které mohou excitovat jiný prvek B, a já pak detekuji vyšší koncentraci prvku B. Podmínkou je, aby $Z_A > Z_B$.
- Sekundární zesílená excitace = excitovaný prvek A zesíleně excituje prvek B, a ten zase prvek C. Dostávám pak zesílenou excitaci prvku C. Podmínkou je, aby: $Z_A > Z_B > Z_C$.

Snížení signálu:

- Zeslabení primárního excitačního záření.
- Zeslabení fluorescenčního záření.
 - Zeslabené charakteristického záření prvku A absorpcí na prvku B. Pod podmínkou, že $Z_A > Z_B$.

2.4 Metody kompenzace Matricových jevů

Absolutní metody kompenzace:

Používají se pro energiově disperzní XFA/RFA, kdy je známo celé spektrum vzorku → dopředu vím, co vzorek obsahuje.

Stanovení obsahu prvku na základě výpočtu z intenzity spektrální čáry charakteristického RTG záření daného prvku. K tomu musím znát:

- Energetické a intenzitní složení spektra,
- Fluorescenční výtěžek,
- Zeslabovací koeficient pro primární i sekundární záření,
- Přístrojové konstanty.

Metoda alfa koeficientů:

Pokud by se matricové jevy neuplatňovaly, koncentrace prvků by se stanovovaly snadno. Např. koncentrace by byla přímo úměrná intenzitě charakteristického záření. Změnami složení matrice je však intenzita charakteristického záření zkoumaného prvku ovlivněna (absorpcí záření, nebo zesilujícími jevy).

$C_i \sim N_i$ - bez matricových jevů

$C_i \sim N_i(1 + \sum_j \alpha_{ij}C_j)$ - s korekcí

→ Koeficient α_{ij} vyjadřuje, jak prvek matrice j ovlivní stanovení koncentrace analytu i , určovány experimentálně → vyžaduje to velké množství referenčních materiálů.

Zředovací metoda:

Přidání většího množství látky o známém složení a zeslabení záření ve vzorku je dáno vlastnostmi známé přidané látky.

Podle toho, jestli přidávaná látka zeslabuje více či méně, tak ji tam dám méně či více. Metoda je vhodná pro látky, které lze obecně dobře homogenizovat (např. rozpustné látky), a také pro takové látky, které samy neprodukují charakteristické záření (např. voda).

Tato metoda sice snižuje vliv matricových jevů, ale také klesá intenzita charakteristického RTG záření, které chceme měřit.

Metoda vnitřního standardu:

Přidání známého množství prvků nebo sloučeniny do zkoumaného vzorku, avšak přidávané prvky nesmí být totožné jako ty, co jsou ve stanovovaném vzorku.

Vhodný vnitřní standard je $Z - 1$ nebo $Z + 1$ oproti stanovovanému prvku (prvek s podobnými absorpčními a excitačními vlivy jako má zkoumaný prvek se přidává ke vzorku, poté se měří se poměr intenzit).

Nevýhodou je obtížné stanovování v případě velkého počtu prvků ve vzorku.

Metoda přídavku standardu:

Přidání známého množství prvku, který má být ve vzorku stanoven. Tím, že to přidám, se mi zvýší signál/intenzita. Interpolací naměřených hodnot k nulové intenzitě charakteristického RTG záření pak dostávám zápornou hodnotu koncentrace tohoto prvku. Tím mohu stanovit kvantitu před tím, než jsem tam přidal něco navíc.

Metoda tenké vrstvy:

Vzorek ve velmi tenké vrstvě → předpokládá se zde eliminace rušivých vlivů matrice.

Metoda Comptonova rozptylu:

Odhadnutí absorpčních vlastností matrice na základě intenzity rozptýleného záření z Comptonova jevu.

Fotoelektrický jev je silně závislý na Z prvku, zatímco Comptonův jev není. Proto látka s nízkým Z produkuje více rozptýleného záření a jeho intenzita je přibližně nepřímo úměrná hmotnostnímu součiniteli zeslabení.

3 Elektronová mikrosonda

= Elektronový mikroskop

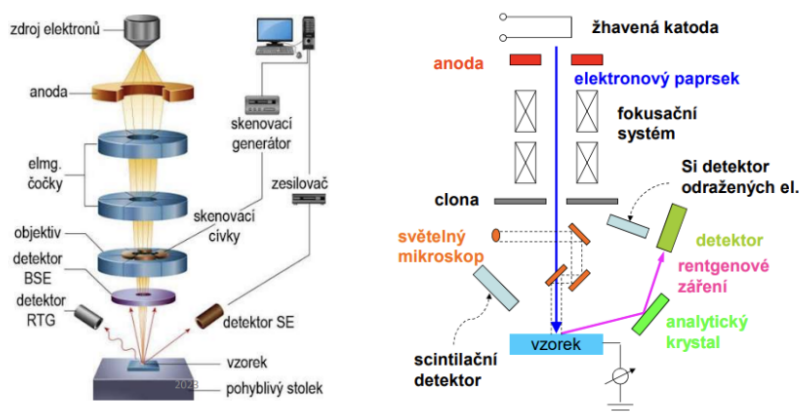
3.1 Princip

Jedná se v zásadě o elektronový mikroskop s kombinací RTG analýzy (obsahuje modul pro detekci a analyzování RTG).

Elektronová mikroskopie, neboli SEM (Scanning Electron Microscopy = skenovací/rastrovací elektronová mikroskopie) obsahuje soubor metod/možností, co lze v materiálu zkoumat, a to na základě detekce různých signálů. Urychlené elektrony bombardují povrch vzorku a elektronový paprsek z elektronového mikroskopu je fokusován na velmi malou plochu.

Základní komponenty elektronového mikroskopu jsou:

- Elektronové dělo
 - TEG (Thermionic Emission Gun, W, LaB₆) – katoda je zahřívána na několik tisíc stupňů K, emituje termoelektrony. Menší rozlišení kvůli velikosti emitoru, ale je levnější.
 - FEG (Field Emission Gun, velmi tenký krystal W) – využívá se elektronového tunelování k emisi elektronů o velmi dobré koherentnosti, tedy mám velmi dobré rozlišení, stačí pokojová teplota. Problém je, že je drahá a krystal kontaminují plyny vzniklé ionizační elektrony.
 - SEG (Schottky Emission Gun, W + ZrO potah) – podobný princip jako FEG, ale nemá takovou adsorpci plynů a má velmi silný proud. Rozlišení skoro tak dobré jako FEG, je to vlastně FEG za vysokých teplot.
- Série elektromagnetických čoček – usměrňují svazek elektronů a to jak ve smyslu urychlení, tak i co se týče jeho průměru. Také ho navádí, resp. umožňuje skenování povrchu vzorku.
- Systém vakua
- Detektory pro záznam příslušného signálu
- Systém pro zpracování signálu a jeho vykreslení včetně PC



Obrázek 4: Elektronová mikrosonda

Rozlišení a rozlišovací schopnost, stejně jako přiblížení, jsou značně lepší (cca 1000x) a větší než v případě LOM, což je dáno právě použitými elektrony. Rozlišovací schopnost je dána vlnovou délkou elektronů, která je značně kratší (de Broglie 0,01 nm).

Vlnová délka závisí urychlovacím napětím.

Co vzniká při dopadu elektronů na povrch zkoumaného vzorku:

- BSE – jedná se o elektrony, jež dopadají a odrazí se od povrchu vzorku, nebo prochází do materiálu do určité hloubky. Zde se srážkami odrazí, tvoří SE a pak se v materiálu odrazí a letí zpět, čímž se dostanou zpátky do sondy.
 - Slouží například pro fázovou analýzu.
 - Lehké atomy méně odrazí elektrony, což se projeví tmavým obrazem. Naopak těžší atomy lépe odrazí a obraz je pak světlejší.
- SE – jedná se o sekundární elektrony, neboli elektrony, které vznikají v důsledku BSE, které je vyraží z atomů v materiálu.
 - Zobrazení povrchu vzorku, často jsou detekovány scintilačním detektorem. Podávají informaci o rovnosti materiálu. Pokud je materiál vlnitý a hrubý, tak absorbuje více elektronů a proto je obraz tmavý. Pokud je hladký a rovný, tak se více elektronů odrazí a proto je povrch světlý a lesklý.
- Charakteristické RTG záření – při vyražení elektronu ze slupky K nebo L dochází k zaplnění díry z vyšší slupky. Rozdíl energií je vyzářen v podobě charakteristického RTG záření, jež následně detekujeme. Tím máme možnost dělat analýzu chemického složení zkoumaného materiálu.
 - Podává info o povrchové koncentraci prvku. Mohu si například zvolit v jakém směru chci měřit, což je užitečné, pokud mám materiál z více vrstev (např. pokrytí paliva). V druhém případě si mohu dělat i celé mapy daného povrchu s koncentrací jednotlivých prvků.
- Katodoluminiscence (vznik viditelného záření)
- AE – Augerovy Elektrony

3.2 Typy elektronového mikroskopu:

- SEM (Scanning Electron Microscopy):
 - Urychlené a usměrňované elektrony skenují povrch zkoumaného vzorku a způsobují tvorbu SE, BSE, RTG, Katodoluminiscence a AE. Signály jsou poté zaznamenány příslušným detektorem a analyzovány.
 - SEM poskytuje trojrozměrné obrazy povrchu a je užitečný při studiu morfologie vzorků.
 - Zobrazení povrchu pomocí sekundárních elektronů nebo zpětně odražených elektronů.
 - Urychlovací napětí: 0,1-30 keV
- TEM (Transmission Electron Microscopy):
 - Zobrazení pomocí prošlých elektronů.

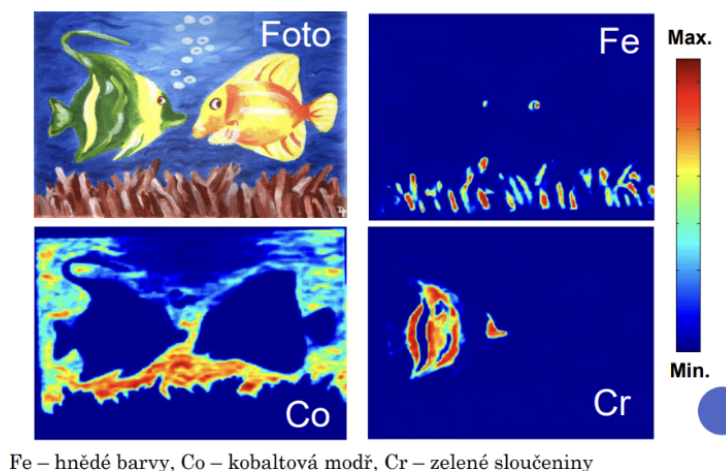
- Urychlovací napětí (100-400 keV) musí být dostatečně velké, aby elektrony měly dostatečnou energii a prošly skrz.
- Tenké vzorky, do kterých se pak dělá malinká dírkka skrz kterou projdou elektrony (s tou dírkou si nejsem jistý).

Pozn.1: Abych mohl dělat elektronovou mikroskopii, tak je potřeba, aby zkoumaný materiál byl vodivý, resp. alespoň povrch, jelikož penetrace a vznik všech těch věcí je řádově jednotky, max. 10-15 mikronů. Nevodivé vzorky se tak buď oblepují ze stran vodivou páskou, a nebo se pokrývají tenkou vrstvou Al, či Au.

Pozn.2: Kromě klasické elektronové mikroskopie SEM, tak je ještě EBSD – Electron Backscatter Diffraction, který nám dává mapy s natočením jednotlivých zrn ve struktuře. EDS a WDS jsou energiově a vlnově disperzní spektrometrie a TEM je transmisivní elektronová mikroskopie, kdy elektrony prochází skrze velmi tenký vzorek (elektrony jsou hodně urychleny – 60 keV → u SEM je to okolo 15-30 keV). TEM má lepší rozlišení a to až na úrovni jednotlivých atomů.

3.3 Využití

- Kvantitativní analýza prvkového složení u zkoumaného materiálu na mikro měřítku.
- Umožňuje měřit prvky těžší než Li (i stopová množství, min. 100 ppm) s přesností okolo 1-2 %.
- Společně s elektronovým mikroskopem jde o nástroj pro zkoumání nejen prvkového složení a jejich koncentrace, ale také topografie materiálu, natočení zrn, fázové složení apod.



Obrázek 5: Využití elektronové mikrosondy v praxi

3.4 Výhody a nevýhody elektronového mikroskopu

Výhody:

- Vysoké rozlišení – pracují s elektromagnetickými čočkami namísto optickými, což umožňuje dosahovat mnohem vyššího rozlišení než světelné mikroskopy. To je zvláště užitečné při studiu malých struktur na mikro a nano úrovni.

- Velké zvětšení – díky schopnosti pracovat s krátkou vlnovou délkou elektronů mohou elektronové mikroskopy dosáhnout velkých zvětšení.
- Podrobný pohled na vnitřní struktury – TEM umožňuje podrobný pohled na vnitřní struktury vzorků, což je užitečné pro studium buněčné a materiálové biologie.
- Trojrozměrný obraz: SEM poskytuje trojrozměrný obraz povrchu vzorku, což je užitečné pro studium morfologie.
- Široká škála aplikací - materiálový výzkum, umění, archeologie, částečně i geologie a biologické předměty.

Nevýhody:

- Vysoké náklady – elektronové mikroskopy jsou nákladné na pořízení, údržbu a provoz.
- Složitá obsluha – obsluha elektronových mikroskopů vyžaduje odborné znalosti a dovednosti a proto vyžaduje školený personál.
- Vakuové prostředí – pro správnou funkci je nutné pracovat ve vakuovém prostředí, což může omezit studium některých živých vzorků.
- Příprava vzorků – příprava vzorků může být složitá a vyžaduje speciální postupy, jako je například nástřík tenké vrstvy kovu pro TEM.
- Rozměry a hmotnost – elektronové mikroskopy jsou obvykle velké a těžké zařízení, což omezuje jejich přenosnost a umístění do menších laboratoří.

4 Aplikace ionizujícího záření v geologii a geofyzice

4.1 Radiometrické datování hornin

Uran – olovo:

= Výhradně pro vulkanické horniny, k datování se používá $Zr \rightarrow ZrSiO_4$.

- 1) Máme zirkon $ZrSiO_4$, který obsahuje malé množství U-238 a U-235.
- 2) Dochází k jejich rozpadu \rightarrow vznik stabilních izotopů olova.
- 3) Zirkon krystalizuje z magmatu \rightarrow silně vytlačuje veškeré olovo \rightarrow předpoklad: po vyvření není ve vyvřelině žádné olovo \rightarrow uzavřený systém pro U i Pb.
- 4) Jakékoliv olovo, co je detekováno, poté odpovídá rozpadu uranu (tzv. radiogenní olovo).
- 5) Určí se poměr U/Pb \rightarrow hmotnostní spektrometrie .

Burial dating method – Al a Be:

- 1) Máme kosmogenní izotopy ^{26}Al a ^{10}Be – vznik interakcí kosmického záření – akumulace v horninách jako křemen
- 2) Vznikne zhruba konstantní poměr ^{26}Al a ^{10}Be .
- 3) Po pohřbení \rightarrow odstínění od kosmického záření \rightarrow poločas hliníku: 729 000 let, u beryllia: 1,39 milionů let \rightarrow hliník se rozpadá rychleji .
- 4) Z poměru můžeme určit stáří.
- 5) Limitace na látky obsahující křemen, stáří v stovkách tisíc až milionech let.

Letecké monitorování = spektrometrické měření záření gama ze svrchní vrstvy půdy. Umožňuje získat informace o vlastnostech hornin a půd a zejména o jejich obsahu přírodních radionuklidů (především K, U, Th).

Můžeme využít i při vyhledávání ložisek uranu, měření v dolech. Dále lze gamma spektrometrii využít v závodě na zpracování uranu, kde jsou jednotlivé vozíky/haldy uranu rozřazovány podle intenzity záření.

Ve stavebnictví využívám při měření radonu. Ten kromě jiného může být měřen při vyhledávání zlomů v půdě, neboť cestuje vzhůru právě skrz zlomy.

4.2 Jaderná karotáž (well logging)

Karotáž je metoda v geofyzice, která se používá k měření fyzikálních vlastností hornin v podzemí, zejména při průzkumu a těžbě ropy a zemního plynu. Radiometrická karotáž je jedním z typů této metody, která využívá radioaktivních vlastností hornin.

Princip spočívá v detekci a měření radioaktivního záření emitovaného horninami. Toto záření pochází z přirozeně se vyskytujících radioaktivních prvků, jako jsou uran, thorium a K-40, které

jsou součástí hornin. Tyto prvky emitují gama záření, které lze detekovat a měřit pomocí vhodných detektorů umístěných na vrtacích zařízeních.

Při radiometrické karotáži se na vrtací nástroje (karoty) umístí detektory, které registrují gama záření vysílané z hornin. Intenzita tohoto záření může poskytnout informace o složení hornin. Například vysoký obsah uranu může indikovat přítomnost uranových rud, což může být důležité pro průzkum ložisek uranu.

Nuclear borehole logging (jaderná karotáž) je metoda, která využívá velké prostupnosti neutronů a gama záření. Využívá se v průmyslu pro ropu, zemní plyn a uran. Jedná se o metody, které umožňují detekci nestabilních izotopů, a nebo metody, které takovéto izotopy vytváří, což se pak detekuje. Výhodou je dobrá penetrace záření, díky čemuž záření snadno projde skrze obalové materiály. Tyto metody je možné využívat i pokud je vrt vyplněn kapalinou.

Metody:

- **Gama karotáž:** Nejvíce využívané, jedná se o pasivní metodu. V zásadě jen přijímáme měření. Nejčastější aplikace je v lithologii (nauka o výzkumu a popisu usazených hornin) a v stratigrafii (určování stáří hornin). Zaznamenává se celkové gama záření detekované ve vrtu, neboli expoziční příkon v hornině, či stanovení obsahu jednotlivých radioaktivních prvků v rudním průzkumu.

Hlavní radioizotopy: thorium (Th-230 a Th-232), draslík (K-40) a uran (U-235 a U-238).

Pokud signál je zesílený → asi břidlice, pokud zeslabený → pískovec, vápenec, dolomit – můžu mít ještě spektrální gamma karotáž, čímž stanovím obsah radioaktivních prvků ve vrtu.

- **Gama-Gama karotáž:** Jedná se o aktivní metodu, kde je potřeba učinit nějakou "akci". Gama záření je vyzářeno ze zdroje v zavedené sondě ve vrtu. Toto záření pak prochází okolními šutrama, interaguje, a pomocí Comptonova rozptylu je zpětně detekováno v detektorech, které se taktéž nachází v zavážené sondě. Výsledkem je stanovení hustoty, pórovitosti atd.

Platí totiž, že odezva bude nepřímo úměrná elektronové hustotě. Detektor v karotážní sondě měří intenzitu gama záření, které se vrací k sondě po interakci s horninou. Nižší intenzita detekovaného záření indikuje vyšší hustotu horniny, protože více záření bylo rozptýleno nebo absorbováno. Naopak vyšší intenzita naznačuje nižší hustotu horniny.

Druhá možná varianta je detekce sekundárního záření vzniklé fotoefektem, čímž se stanovuje obsah těžkých prvků jako Ba, Sb, Pb. Zdrojem gama záření je často Cs-137. Detektory jsou vhodně odstíněny od záříče.

- **Neutronová karotáž:** Obsahuje neutronový zdroj v zavedené sondě a detektory pro záznam interakcí, ke kterým dochází v blízkosti vrtu, do kterého je sonda zavedená. Emitované vysokoenergetické neutrony jsou postupně zpomalovány (nejvíce na jádrech vodíku) a následně mohou být absorbovány v materiálu a nebo v detektoru neutronů. Proto lze hovořit o **neutron-gama karotáži** (měřím charakteristické gamma vzniklé při interakci neutronu s horninou) a o **neutron-neutron karotáži**, kdy detekují zpomalené tepelné neutrony, které difundovaly až k detektoru. Většina těchto interakcí závisí na množství přítomného vodíku, a tedy i vody v šutrácích, které jsme provrtali při vrtání vrtu. Nejčastější zdroj vysokoenergetických neutronů je AmBe.

Neutronová karotáž je obecně souhrn pro neutron-neutron karotáž (zdroj rychlých neutronů → zpomalení v hornině → stanovení pórovitosti hornin (zpomalení na vodíku)).

Dále sem patří neutron-gama karotáž (radiální záchyt neutronů, stanovení pórovitosti, rozhraní plyn-ropa a plyn-voda a také některých prvků Cl, Ni, Fe, Cu, Ti, Mn) a na závěr sem patří Neutronová aktivační karotáž (v podstatě aktivační analýza a měříme charakteristické záření vzniklého radioaktivního izotopu → stanovení Cu, Mn, Al, Si, F).

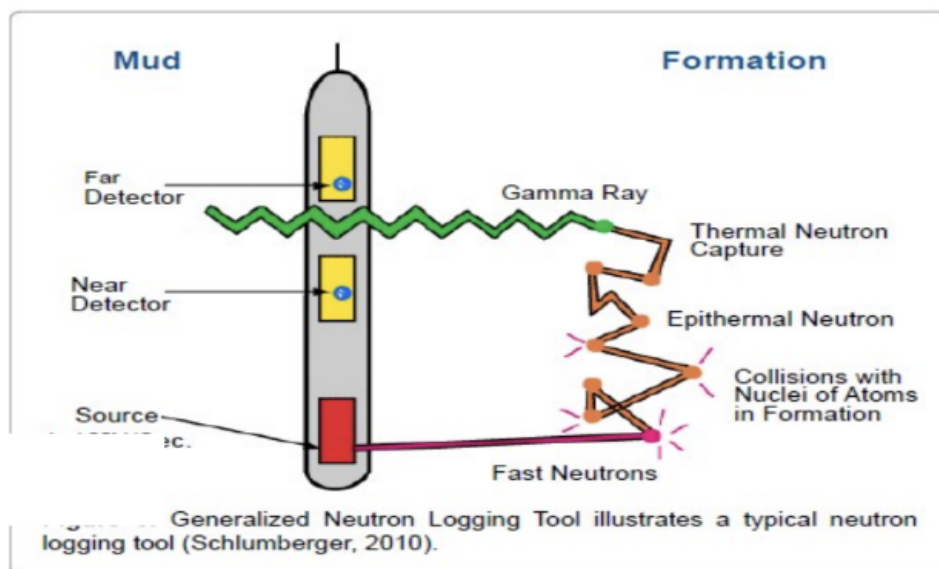
Vodohospodáři využívají radionuklidy k měření průtoků v řekách i vodovodních potrubích. Do vody nebo vodního toku je vstříknut radioizotop (bez zátěže ŽP) a následně je tento izotop detekován v místě s různými detektory (můžou být různě podél břehu i v hloubce). Na základě času a koncentrace lze stanovit průtok. Používám, když nemohu použít standardní metody.

Rozlišuji:

- metodu časové distribuce – sleduji za jak dlouho se mi vzorek dopravil z bodu A do bodu B a v jaké koncentraci,
- metodu ředění – podle toho, jak se koncentrace v toku mění, určím průtok.

Ozařováním je možno ošetřit také odpadní vody obsahující některé nebezpečné látky ještě před přivedením do běžných čističek odpadních vod. Zářiče s radiokobaltem zabraňují množení nežádoucích mikroorganismů, které snižují kvalitu pitné vody ve studních.

Neutron logging tool



Obrázek 6: Neutronová karotáž

4.3 Metody využívající zpětný odraz gama

Stanovení obsahu popela v uhlí:

Zpětný rozptyl záření gama se například využívá pro stanovení obsahu popela v uhlí, kde využívá energetické závislosti píku zpětně odraženého gama záření. Princip je vlastně identický jako u gamma-gamma karotáže:

- 1) Emitované fotony interagují s materiálem (uhlí) → Comptonův rozptyl, část fotonů odražena zpět.
- 2) Detektorem měřím intenzitu odražených fotonů.
- 3) Míra rozptylu závisí na hustotě elektronů v materiálu, což je ovlivněno atomovým složením a hustotou.
 - uhlí – především H, C, O, N a S & popel → těžší sloučeniny – oxidy křemíku, hliníku, železa, vápníku etc.
 - popel – větší Z → více elektronů & větší hustota → větší elektronová hustota → pravděpodobnější rozptyl a absorpce → pokles intenzity.
- 4) Naopak tam, kde je hodně uhlí a málo popela → vysoká intenzita odraženého gamma.

Řízení přívodu uhlí do elektrárny:

- Provoz elektrárny vyžaduje přívod uhlí o specifické výhřevnosti. V případě jakékoliv odchylky může dojít ke ztrátě výkonu nebo dokonce k výpadku kotle.
- Obsah popela uhelného uhlí a výhřevnost je sledována před plněním sila, aby byla zajištěna dostatečná kvalita uhlí pro správný provoz kotle.
- V případě, že on-line balance kvality uhlí neodpovídají požadavkům kotle, lze do některých sil nakládat uhlí různé kvality.
- Parametry veškerého uhlí, které je pro kotel k dispozici, slouží obsluze k úpravě pracovních parametrů kotle podle potřeby.

In-situ analýza a kontrola těžby:

V některých případech je možné gamma záření využít pro in-situ analýzu hornin během těžby. Speciální zařízení mohou měřit intenzitu gamma záření přímo na místě a poskytovat okamžitou zpětnou vazbu o kvalitě rudy. To umožňuje optimalizovat proces těžby a zpracování nerostů tím, že těžba může být řízena na základě skutečné kvality vytěženého materiálu.

- In-situ leaching: roztok kyseliny rozpouští uran z rudy → následně je monitorována koncentrace uranu v roztoku, optimalizováno pro co nejmenší dopad na ŽP a efektivnost práce.
- Lze také při klasické těžbě - monitorují jednotlivé "vozíky" s rudou.

Pásová analýza (nebo-li analýza materiálu v průběhu toho co mi běží na běžícím páse a mohu tak online stanovovat kvalitu uhlí): Metoda stanovení obsahu popela v uhlí pomocí gama záření využívá principu měření intenzity gama záření, které prochází vzorkem uhlí. Popel v uhlí má specifické vlastnosti, které ovlivňují absorpci a rozptyl gama záření. Na základě těchto změn lze určit obsah popela ve vzorku.

Analýza kalů (slurry analysis):

Gama záření se používá k měření koncentrace pevných částic v kalu. Princip je podobný jako u měření obsahu popela v uhlí či stanovování hustoty, ale také se využívá při loggingu (karotáž, viz Vrtání do země, psáno výše).

Pozn.: Jak odhalím podíl prvku ve sloučenině? Pokud je prvek dostatečně těžký, resp. všechny prvky, co jsou ve sloučenině, není nic jednoduššího než použít RFA a využít detekci charakteristického RTG záření. Pokud je ovšem třeba jen jeden prvek ze dvou, tak to jde taky tak udělat a od celkového množství odečtu to, co naměřím, čímž získám zbytek. Možností je také využít rozdíl mezi fotoefektem a comptonovým rozptylem, kde fotoefekt má vyšší pravděpodobnost pro těžší atomy, a proto se na celkovém podílu reakcí více podílí pro lehké atomy Comptonův rozptyl. Poslední možností je, pokud to umožňuje, využít neutronovou aktivační analýzu.

5 Využití iontových svazků v materiálovém výzkumu: Základní typy urychlovačů, Metody RBS, kanálování, PIXE, PIGE, ERDA a NRA

- 6 Využití jaderně-fyzikálních metod v materiálovém výzkumu: Mössbauerova spektrometrie, elektron-pozitronová anihilační spektroskopie, neutronová aktivační analýza

7 Jaderně-fyzikální metody v nukleární medicíně: gama kamera, CT, PET

8 Využití synchrotronového záření v materiálovém výzkumu: získávání synchrotronového záření a jeho vlastnosti, příklady experimentálních technik

9 Jednotky a veličiny v dozimetrii, základy legální metrologie, etalony a stanovená měřidla

10 Využití proporcionálních detektorů a kapalných scintilátorů v metrologii aktivity radionuklidů

11 Koincidenční metoda stanovení aktivity a spektrometrie záření gama jako sekundární metoda měření aktivity

12 Metrologie neutronů a metoda manganové lázně včetně zpracování výsledků měření a zdrojů chyb a nejistot

13 Základní principy jaderné bezpečnosti a ochrana do hloubky

14 Klasifikace událostí na jaderných zařízeních a rozbor vybraných událostí

15 Postavení provozovatele, státního dozoru a IAEA v jaderné bezpečnosti, legislativní rámec jaderné bezpečnosti