

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 | 5 |
| 1.1 | Princip metody | 5 |
| 1.2 | Vlnově disperzní RFA | 6 |
| 1.3 | Energiově disperzní RFA | 7 |
| 1.4 | Požadavky na vzorek pro RFA analýzu | 7 |
| 1.5 | Detektory pro RFA | 8 |
| 2 | Aplikace rentgeno fluorescenční analýzy | 9 |
| 2.1 | Kvalitativní analýza | 9 |
| 2.2 | Kvantitativní analýza | 9 |
| 2.3 | Matricové jevy | 10 |
| 2.4 | Metody kompenzace Matricových jevů | 10 |
| 3 | Elektronová mikrosonda | 12 |
| 3.1 | Princip | 12 |
| 3.2 | Typy elektronového mikroskopu: | 13 |
| 3.3 | Využití | 14 |
| 3.4 | Výhody a nevýhody elektronového mikroskopu | 14 |
| 4 | Aplikace ionizujícího záření v geologii a geofyzice | 16 |
| 4.1 | Radiometrické datování hornin | 16 |
| 4.2 | Jaderná karotáž (well logging) | 16 |
| 4.3 | Metody využívající zpětný odraz gama | 18 |
| 5 | Využití iontových svazků v materiálovém výzkumu | 21 |
| 6 | Využití jaderně-fyzikálních metod v materiálovém výzkumu | 22 |
| 7 | Jaderně-fyzikální metody v nukleární medicíně | 23 |
| 8 | Využití synchrotronového záření v materiálovém výzkumu | 24 |
| 9 | Jednotky a veličiny v dozimetrii | 25 |
| 9.1 | Základy legální metrologie | 25 |
| 9.1.1 | Organizace | 26 |
| 9.1.2 | Veličiny a jednotky | 26 |
| 9.2 | Jednotky a veličiny v dozimetrii | 27 |
| 10 | Využití detektorů v metrologii aktivity | 29 |
| 10.1 | Využití proporcionálních detektorů | 29 |
| 10.2 | Využití kapalných scintilátorů | 30 |
| 10.2.1 | TDCR | 30 |
| 11 | Koincidenční metoda & spektrometrie gama | 32 |
| 11.1 | Koincidenční metoda | 32 |
| 11.1.1 | Instrumentální opravy | 34 |
| 11.1.2 | Korekce – Opravy jednoduchého jaderného schématu | 34 |
| 11.1.3 | Metody | 34 |
| 11.2 | Spektrometrie gama jako sekundární metoda měření aktivity | 35 |
| 12 | Metrologie neutronů & manganová lázeň | 38 |
| 12.1 | Zdroje neutronů | 38 |
| 12.2 | Metoda manganové lázně | 38 |
| 12.3 | Metoda registrace doprovodných částic | 39 |
| 12.4 | Metody měření hustoty toku neutronů | 40 |
| 12.4.1 | Detektory tepelných neutronů | 41 |

| | |
|--|-----------|
| 12.4.2 Detektory rychlých neutronů | 41 |
| 12.5 Spektrometrie neutronů | 42 |
| 13 Jaderná bezpečnost & ochrana do hloubky | 43 |
| 14 Klasifikace událostí na jaderných zařízeních | 44 |
| 15 Legislativa jaderné bezpečnosti | 45 |

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 vyrazí 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 fluoriscenčního záření.

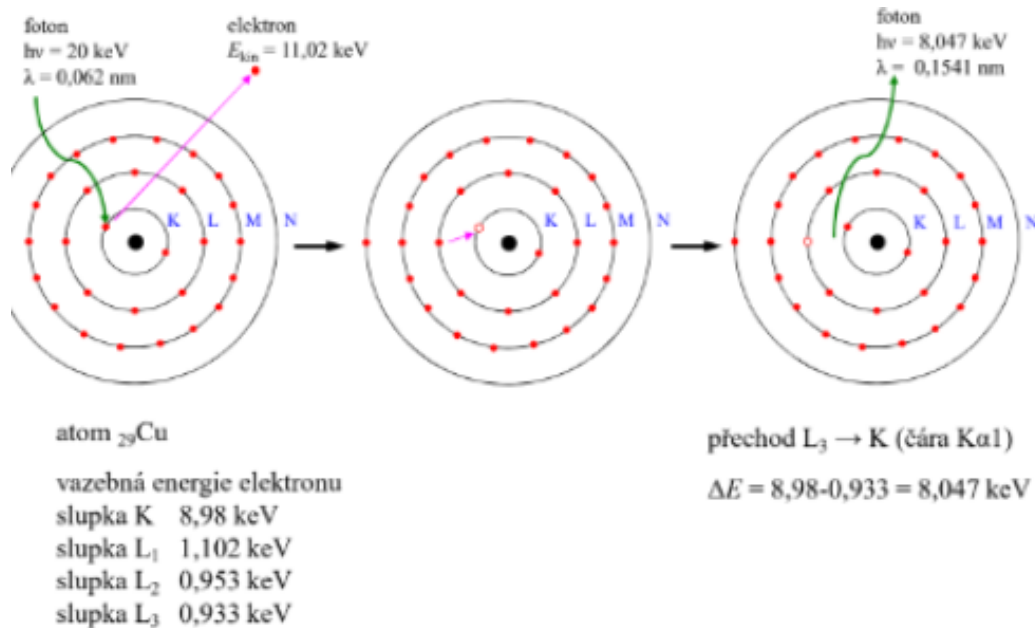
Vlnová délka charakteristického RTG záření je klesající s rostoucím Z číslem prvků a naopak energie se zvyšuje se Z číslem. Metoda RFA/XRF je dobrá pro prvky s větším Z , jelikož se lépe detekují.

Výhody:

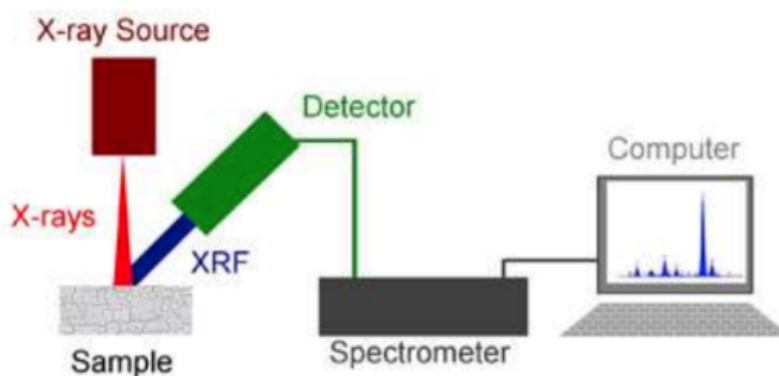
- Rychlost, přesnost a reprodukovatelnost
- Vzorky mohou být v jakémkoliv skupenství
- Nedestruktivní metoda
- Multiprvková analýza
- Dobré pro zkoumání složení uměleckých předmětů

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)

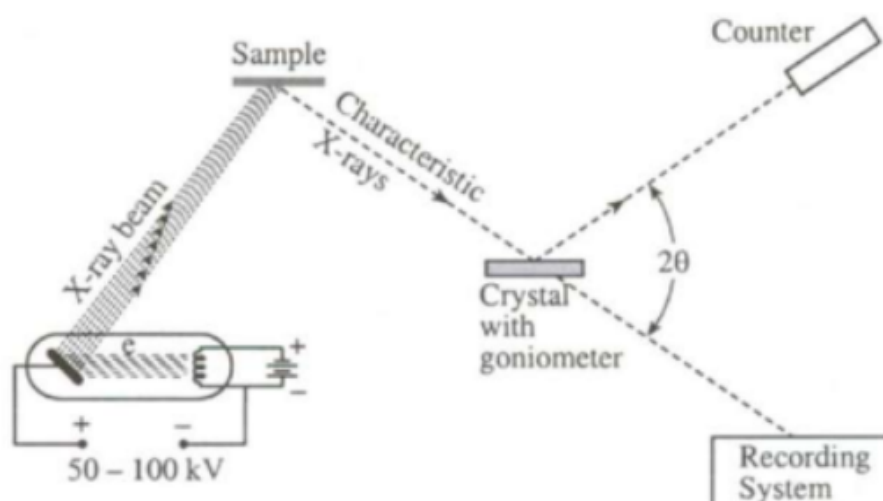
Vyžaduje velké rozměry přístrojů, vysokou spotřebu energie, ale dosahuje velmi dobrých technických parametrů.

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

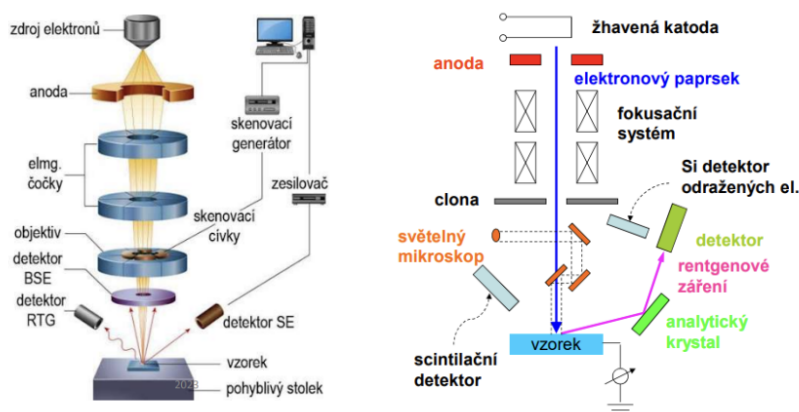
3.1 Princip

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 zahřáta 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.

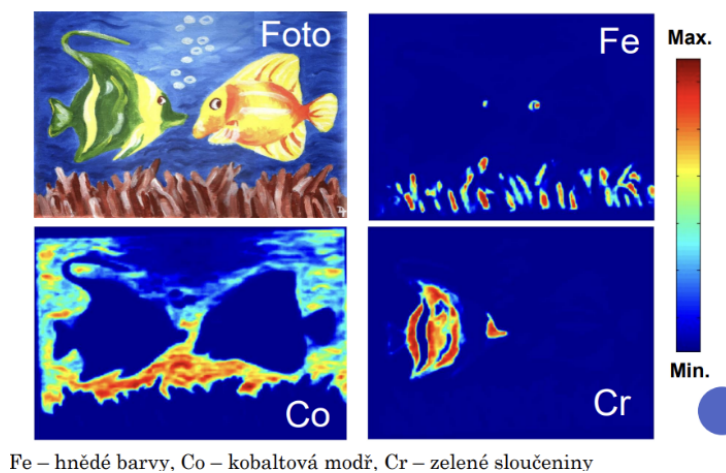
- Urychlovací napětí (100-400 keV) musí být dostatečně velké, aby elektrony měly dostatečnou energii a prošly skrz.
- Tenké vzorky, do kterých se pak dělá malinká dírkka skrz kterou projdou elektrony (s tou dírkou si nejsem jistý).

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 záhyt 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).

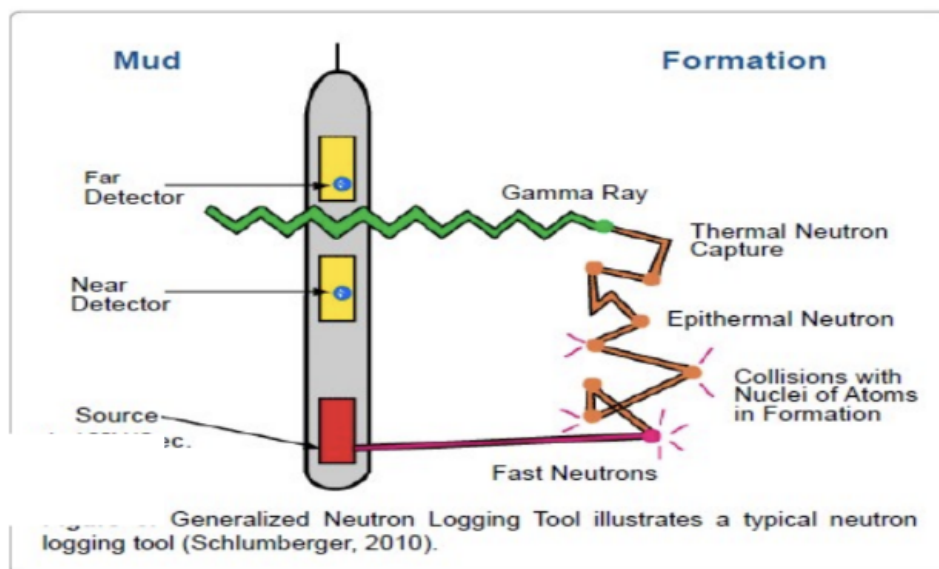
Vodohospodáři využívají radionuklidy k měření průtoků v řekách i vodovodních potrubích. Do vody nebo vodního toku je vstříknut radioizotop (bez zátěže ŽP) a následně je tento izotop detekován v místě s různými detektory (můžou být různě podél břehu i v hloubce). Na základě času a koncentrace lze stanovit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

Metrologie je věda zabývající se měřením . Mezi základní cíle a úkoly patří:

- definice jednotek a jejich realizace pomocí vědeckých metod,
- vývoj a udržování etalonů nejvyšší úrovně,
- zajištění fungování měřidel ve výrobní sféře,
- zajistit správnost měření v úředních nebo obchodních sférách,

9.1 Základy legální metrologie

Hlavním je zákon č. 505/1990 Sb. o metrologii → upravuje práva a povinnosti subjektů a státních orgánů správy pro účely zajištění správnosti a jednotnosti měřidel a měření. Dále jsou důležité prováděcí vyhlášky k samotnému zákonu, a to sice:

- Vyhláška MPO č. 262/2000 Sb., kterou je zajišťována jednotnost a správnost měřidel a měření.
- Vyhláška MPO č. 345/2002 Sb., kterou se stanoví měřidla k povinnému ověřování a měřidla podléhající schvalování.
- Vyhláška MPO č. 264/2000 Sb., o základních měřících jednotkách a ostatních jednotkách a o jejich označování.

Klasifikace měřidel:

- **Etalony** (primární, sekundární, mezinárodní, státní) = objekt či něco jiného, jež obecně slouží k uchování a realizaci dané jednotky (etalon hmotnosti, kde jednotka je kg, tak je snad krystal křemíku, protože umíme přesně určit počet atomů v mřížce).
- **Stanovená měřidla** = Jedná se o měřidla, která MPO (ministerstvo průmyslu a obchodu) vyhláškou stanoví k povinnému ověřování s ohledem na jejich význam (obchod, daně, sankce, tarify, poplatky, medicína, ochrana ŽP, BOZP).
- **Pracovní měřidla** = jedná se o měřidla jež nejsou etalonem ani stanoveným měřidlem.
- **Certifikované a ostatní referenční materiály** = Jedná se o materiály přesně stanoveného a známého chemického složení, které slouží pro ověřování nebo ke kalibraci (často to bývají etalony)

Schvalování typů měřidel je proces, při kterém jsou ověřeny metrologické a technické vlastnosti stanovených měřidel, jež vycházejí z technických norem. Zkoušky pro schválení typu stanoveného měřidla obsahují funkční zkoušky, zkoušky odolnosti proti rušivým vlivům vnějšího prostředí a zkoušky elektromagnetické kompatibility. Výsledkem je certifikát a přidělení značky schválení typu.

Pod pojmem **návaznost** rozumíme: (definice je na hovno) V zásadě se jedná o to, že vezmu např. 8 vah z celého světa, nastavím je pomocí kvalitního etalonu na to, že toto je 1 kg a potom, když něco naměřím já, tak i Karlíkovi z horní dolní můžu věřit, že to má jak já, protože to má nastavený v návaznosti na ten samý etalon a tudíž i v návaznosti na mne.

Ověřování je proces, resp. potvrzení, že měřidlo má požadované metrologické vlastnosti.

Kalibrace je proces, kdy je periodicky upravováno a kontrolováno, že měřidlo měří to co má a případná kalibrace probíhá pomocí certifikovaných a ostatních referenčních materiálu, kterými jsou nejčastěji etalony.

9.1.1 Organizace

ÚNMZ = Ústav pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví

- Zastupování ČR ve věci mezinárodních věcí s ohledem na metrologii.
- Dohled na činnosti ČMI.
- Kontrola dodržování zákona o metrologii.
- Schválení a vyhlášení státních etalonů.
- Poskytování metrologických expertíz.

ČMI

- Uchovávání a rozvoj státních etalonů.
- Schvalování typů a ověřování stanovených měřidel.
- Certifikace referenčních materiálů.
- Kalibrační služby.

9.1.2 Veličiny a jednotky

Existují různé soustavy jednotek, kde nejvíce je rozšířené SI, dále existuje imperiální, americká apod... Stačí znát SI.

V obecnosti jsou základní jednotky SI popsány v Zákoně č. 505/1999 Sb. o metrologii. Obsaženy jsou dále odvozené jednotky, násobky, díky a jiné povolené jednotky.

Základní jednotky a veličiny SI jsou:

- Čas – s,
- Proud – A,
- Svítivost – cd,
- Látkové množství – mol,

- Teplota – K,
- Hmotnost – kg,
- Délka – m.

Odvozené jednotky vyjadřované jednotkami základními jsou např. hustota, objem, plocha, rychlost, ...

Odvozené jednotky se zvláštním označením i názvem jsou např. náboj, síla, aktivita, absorbovaná dávka, ...

Odvozené jednotky vyjádřené jednotkami základními spolu s jednotkami se zvláštním názvem a označením jsou např. Expozice, PDE, dávkový příkon, dávkový ekvivalent, ...

Vlastnosti a výhody SI:

- Systematická a mezinárodně uznávaná soustava veličin a jednotek.
- Pro každou veličinu zavedena pouze jedna jednotka.
- Odvozené jednotky tvořeny součiny mocnin základních jednotek.
- Násobky a díly jednotek vyjádřeny předponami.

Další mimosoustavné jednotky: Jsou použitelné spolu s SI v rámci specifikovaných oborů a nebo výjimečně a tehdy, jeli definován vztah k SI jednotkám: uzel, dioptrie, angstrom, barn, atm, curie, calorie.

Veličiny ve vztahu k atomové a jaderné fyzice: Aktivita, přeměnová konstanta, poločas rozpadu, barn, hustota toku, fluence, absorbovaná dávka, kerma, expozice, dávkový ekvivalent, efektivní dávka, PDE, ...

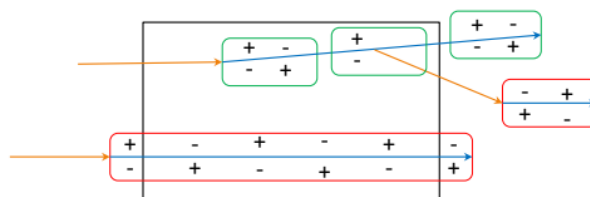
9.2 Jednotky a veličiny v dozimetrii

Expozice:

Definována pro popis ionizujících účinků fotonů ve vzduchu: $[X] = C \cdot \text{kg}^{-1}$.

Expozice je definována jako podíl celkového náboje dQ iontů jednoho znaménka, jež vznikly při úplném zabrzdění všech elektronů a pozitronů uvolněných fotony v malém objemu vzduchu, a hmotnosti tohoto objemu vzduchu dm .

$$X = \frac{dQ}{dm} \quad (1)$$



Obrázek 7: expozice

Absorbovaná dávka

Vyjádřuje střední energii předanou IZ dané látce o jednotkové hmotnosti: $[D] = \text{Gy}$.

$$D = \frac{d\bar{\varepsilon}}{dm} \quad (2)$$

Kerma

Popisuje působení nepřímo ionizujícího záření z hlediska energetických ztrát primárních částic: $[K] = \text{Gy}$.

$$K = \frac{dE_k}{dm} \quad (3)$$

Dávkový ekvivalent, resp. ekvivalentní dávka

Jedná se o veličinu již využívá tzv. faktoru kvality Q , kterým je přenásobena absorbovaná dávka a tento faktor kvality pak popisuje vliv daného IZ na tkáň (bez rozdělování o jakou tkáň se jedná): $[H] = \text{Sv}$.

$Q = 1$ pro elektrony, gama a RTG, dále je $Q = 10$ pro protony, neutrony a $Q = 20$ pro nabitě ionty, alfa částice, štěpné produkty.

$$H = Q \cdot D \quad (4)$$

Efektivní dávka

Jedná se o Dávkový ekvivalent násobený dalším faktorem kvality, a to tentokrát tkáňovým faktorem, který zohledňuje ještě dále, jaká část těla schytala to záření, protože každá část těla je jinak náchylná/odolná. To v praxi znamená, že kostní dřeň je snad nejvíce náchylná, zatímco játra nebo oko, dlaň (kůže) není tolik: $[D] = \text{Sv}$.

$$D \cdot w_r = H, E = \sum_T w_T \cdot H_T \quad (5)$$

10 Využití proporcionálních detektorů a kapalných scintilátorů v metrologii aktivity radionuklidů

Metrologie radioaktivity radionuklidů je dělena do dvou základních skupin:

- Absolutní = Využívá přímé detekce veličiny (Koincidenční metoda, elektrostatická metoda, kalorimetrická metoda, absolutní počítání částic).
- Relativní = Vztah mezi veličinou indikovanou a veličinou měřenou (spektrometrie gama, ionizační komora).

10.1 Využití proporcionálních detektorů

Jedná se o primární metodu měření = vychází z definice veličiny.

Proporcionální detektor je často válcové geometrie a skládá se z anody (tenký drátek z W, Mo, Cu, ocel, Au pokrytí) a katody (tělo detektoru). Díky velkému rozdílu ve velikosti elektrod je mezi nimi velký rozdíl napětí, a to vytváří velmi intenzivní elektrické pole. Pracovním plynem uvnitř detektoru je často Ar, Kr, Xe + zhasací plyn, což je například Metan nebo propanbutan.

Výstupní impuls na detektoru je úměrný deponované energii. Typická náplň je plyn P-10 (90% Ar a 10% CH₄).

Důležité je, aby anodový drátek měl konst. průměr a tloušťku. Výhodou proporcionálního detektoru je, že téměř nemá mrtvou dobu a je tedy hodně dobře schopen detekovat dva signály "naráz".

Je provozován v oblasti proporcionality VA charakteristiky plynového detektoru, kdy měřená četnost téměř nezávisí na napětí (pracovní napětí detektoru je zvoleno v této oblasti). Provoz v této oblasti umožňuje rozvoj townsendovy laviny, jež představuje plynové zesílení.

Plynová náplň v detektoru je přítomna za účelem zesílení vstupního signálu = plynové zesílení. Proto je proporcionální počítač vhodný pro detekci záření malých energií, které je pak třeba zesílit právě přítomným plynem (ionizace plynu k zesílení vstupního signálu, a to řádově E2 až E3).

Proporcionální počítač se používá k měření α a β záření.

Proporcionální počítače lze využít jako prosté detektory čítání, ale také částečně pro spektrometrii/spektroskopii neboť výstupní signál je úměrný vstupnímu, resp. deponované energii (s uvažováním zesílení od plynu).

Druhy proporcionálních počítačů:

- Průtokový:
 - Pracovní plyn protéká detektorem o atmosférickém tlaku a díky tomu je snadná výměna vzorků.
 - Měření α a β záření, zejména pak β .
 - Lze udělat i 4π variantu.
 - Vhodný pro měření nízkoenergetické β a plyných radioaktivních sloučenin i neutronů (pro neutrony je potřeba konverzní materiál).

- Tlakový:
 - Plynová náplň má vyšší hmotnostní číslo a plyn je natlakován do cca 1,5 MPa.
 - Vyšší tlak umožňuje dosáhnout vyšší účinnosti detekce záření (Tím, že je to natlakované, tak se tam vejde více plynu a tím se mi zvyšuje pravděpodobnost interakce záření s plynem).

Korekce:

Zejména pro interní proporcionální počítač, kdy je měřený vzorek uvnitř.

- Koncový efekt = Na okrajích elektrod je elektrické pole deformované. Lze kompenzovat využitím dvou počítačů různé délky a rozdíl odezvy odpovídá četnosti naměřené ideálním detektorem o délce rozdílu jejich délek.
- Stěnový efekt = částice emitovaná v blízkosti stěn nestačí dostatečně ionizovat (oprava na základě měření s několika počítači stejné délky různých poloměrů, vliv klesá s rostoucím tlakem plynové náplně)

10.2 Využití kapalných scintilátorů

Jedná se o scintilační detektor, kde scintilační látka je tekutá/roztok. Jedná se o roztoky scintilačních látek v organických rozpouštědlech + měřený vzorek, který je v tomto taktéž rozpuštěn (podle druhu měřeného vzorku se používají rozpouštědla jako je toulén, xylen, ethalon).

Kapalné scintilátory se používají pro detekci IZ (α a β) o vyšších energiích (minimální detekovatelná energie je 3-10 keV). Využívají se pro tzv. metodu TDCR (triple to double coincidence ratio).

Detekční účinnost je dána účinností fotokatody daného fotonásobiče (kvalita fotonásobiče).

10.2.1 TDCR

Jedná se o koincidenční zapojení tří fotonásobičů, jež funguje na principu poměru trojných a dvojných koincidencí. Tato metoda slouží ke stanovení počítací účinnosti, a to experimentálně bez potřeby kalibračního standardu.

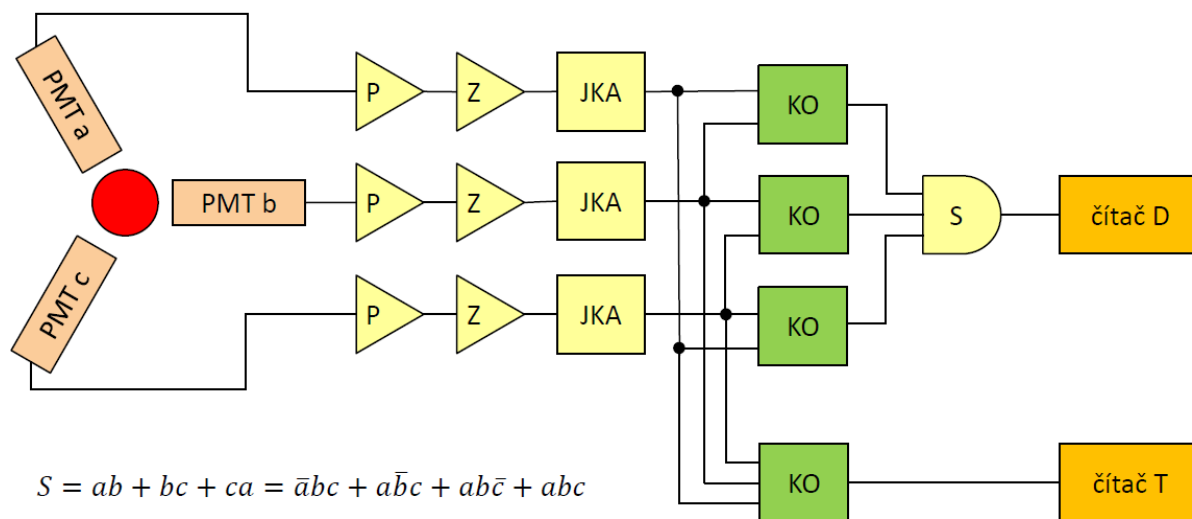
počítací účinnost (ε_D), neboli parametr TDCR (v zásadě detekční účinnost) se určuje na základě srovnání experimentu a modelu \rightarrow v praxi je měřeno TDCR pro různé účinnosti detekce, které mohou měnit defokusací PMT, optickými filtry atd. Tím získávám závislost naměřené aktivity na TDCR (aktivita by měla být nezávislá na TDCR - kritérium správnosti) a dále závislost detekční účinnosti na TDCR (tu detekční účinnost si měním). Ve výsledku srovnáním experimentu a modelu získám účinnost ε_D :

$$\left(\frac{\varepsilon_T}{\varepsilon_D} \right)_{\text{výpočet}} = \left(\frac{N_T}{N_D} \right)_{\text{měření}}.$$

Výsledný počet řešení TDCR parametru se odvíjí od druhu radionuklidu a složitosti jeho kaskády rozpadu.

Výsledná aktivita je získána jako:

$$A = \frac{N_D}{\varepsilon_D}.$$

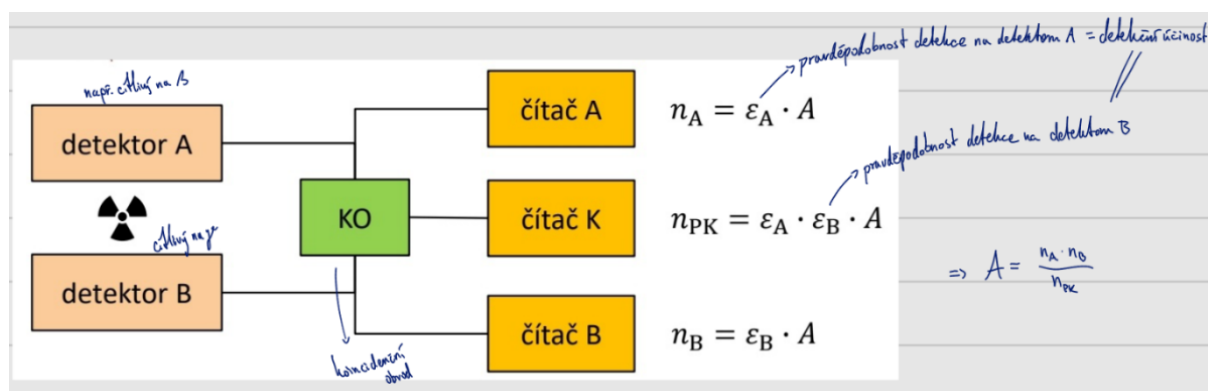
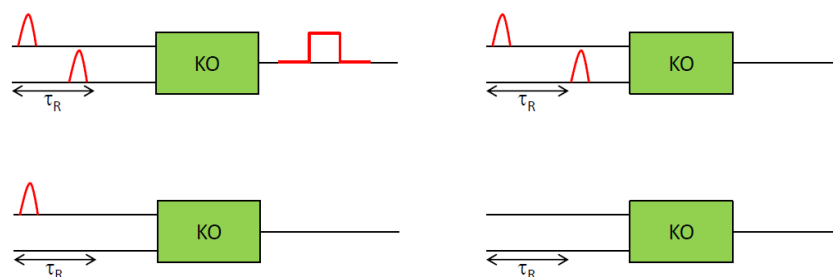


Obrázek 8: TDCR

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

11.1 Koincidenční metoda

Využívá se faktu, že při radioaktivní přeměně nuklidu dochází často k emisi vícero záření/částic. V praxi se jedná o využití dvou detektorů, kdy každý je citlivý na jiný druh záření a výstup, resp. impuls na výstupu čítače koincidencí je jen v případě, když dojde k "současnému" výskytu impulsů na obou detektorech (vstup A i B). Je nutné, aby impulsy byly zaznamenány v rámci tzv. rozlišovací doby. V opačném případě není zaznamenána koincidence, ale pouze výstup na čítači A či B.

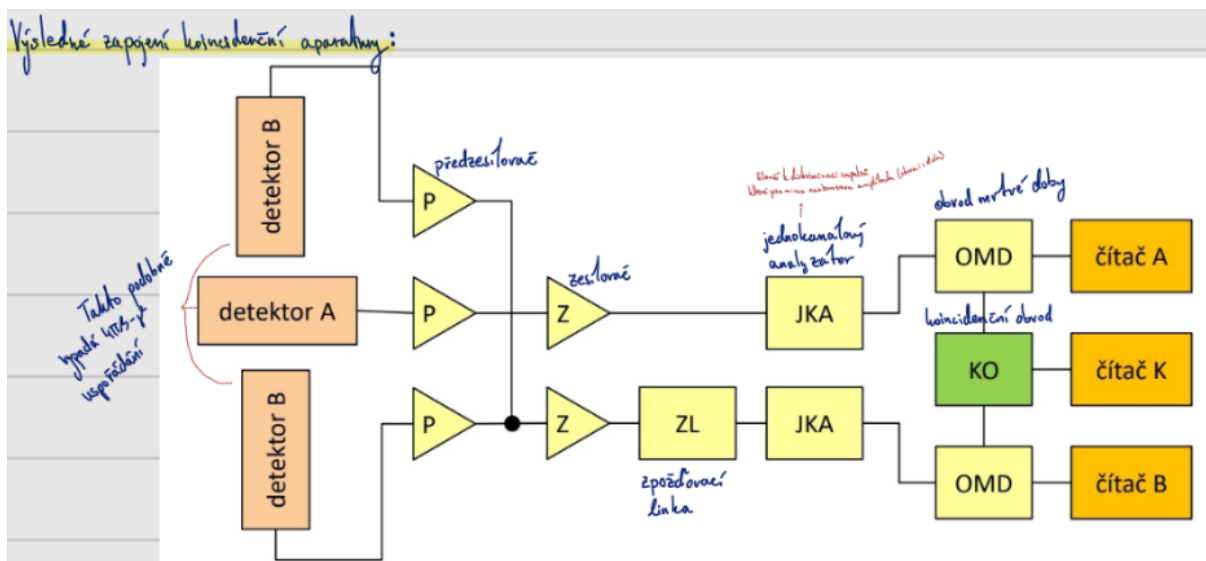


Obrázek 9: jednoduché koincidenční zapojení

Rozlišovací doba může být stanovena dvěma způsoby, a to:

- **Generátor** – Pomocí generátoru si mohou nastavovat časový interval mezi generovanými signály a měřit jak citlivý je detekční systém na různé časové intervaly. Postupně se mění rozlišovací doba a sleduje se, kdy systém správně detekuje koincidence.
- **Náhodné koincidence** – Postupně se snižuje rozlišovací doba a měří se náhodné koincidence. Jakmile začne počet zaznamenaných koincidenzí výrazně klesat, začíná se přibližovat optimální rozlišovací době. Cílem je najít takovou rozlišovací dobu, která minimalizuje počet náhodných koincidenzí zatímco stále zachovává koincidence, které chci měřit.

Důležité je však znovu zdůraznit, že do celkového počtu koincidenzí se mi projeví jak pravé tak náhodné koincidence a proto je žádoucí nastavit rozlišovací dobu správně.



Obrázek 10: Výsledné zapojení koincidenčního obvodu

Dobré vědět k čemu slouží jednotlivé komponenty:

- **Detektor** = záznam/detekce signálu od IZ.
- **Předzesilovač** = Jeho hlavním úkolem je zesílit slabé signály z detektoru na úroveň, která je dostatečná pro další zpracování. Důležité je, aby zesílení proběhlo bez výrazného zvýšení šumu (změnou nastavení impedance), což by mohlo negativně ovlivnit kvalitu signálu. Další úlohou je přivedení pracovního napětí na detektor.
- **Zesilovač** = zvyšuje úroveň signálu, který již byl zesílen předzesilovačem, na úroveň vhodnou pro zpracování dalšími elektronickými obvody, jako je například jednokanálový analyzátor. Musí poskytnout stabilní a lineární zesílení signálu, aby nedocházelo k deformaci (zkreslení) původního signálu
- **Zpožďovací linka** = záměrně zpožďuje signál přicházející z detektoru o určitou dobu. Její hlavní funkcí v koincidenčním měření je zajistit, aby signály z různých detektorů dorazily do koincidenčního obvodu ve správném časovém rozmezí, i když mají různé dráhy nebo rychlosti zpracování. To je důležité pro správnou identifikaci koincidenčních událostí, protože signály musí dorazit téměř současně, aby byly považovány za koincidentní.
- **JKA** = Jednokanálový analyzátor slouží k selekci signálů podle jejich amplitudy, což odpovídá energii detekovaného záření. Signál má tak posléze formu 1 nebo 0, tedy splňuje nebo nesplňuje. Propustí pouze ty signály, jejichž amplituda spadá do definovaného rozsahu (dolní hranice stanovená diskriminací).
- **Obvod mrtvé doby** = Obvod mrtvé doby je navržen tak, aby po detekci jednoho signálu zablokoval možnost detekce dalších signálů po určitou dobu. Mrtvá doba je důležitá pro zabránění registrace falešných koincidenčních událostí způsobených příliš blízkými nebo souběžnými událostmi, které by mohly být mylně považovány za koincidentní.
- **Koincidenční obvod**
- **Čítač**

11.1.1 Instrumentální opravy

- Korekce na pozadí, náhodné koincidence a mrtvou dobu.
- Aplikace koincidenční metody:
 - $4\pi\beta - \gamma$: nuklidy ^{24}Na , ^{42}K , ^{56}Co , $^{59}\text{Fe} \rightarrow$ při této koincidenční metodě je RN vložen do interního počítače (měření β) a okolo počítače jsou např. scintilační detektory pro měření γ . Celé je to posléze stíněné pro minimalizaci vlivu pozadí.
 - $4\pi\alpha - \gamma$: ^{210}Po , ^{241}Am

11.1.2 Korekce – Opravy jednoduchého jaderného schématu

- Vnitřní konverze – vyzáření elektronu z obalu (konverzní elektron) a u toho vzniká ještě doprovodné charakteristické RTG záření = γ detekce KE v β kanálu. Není to to samé jako Beta přeměna. Jedná se o konkurenční proces k emisi fotonu při deexcitaci. Oprava probíhá úpravou vztahu pro výpočet elektronů v β kanálu, tedy poměr naměřených četností/aktivita.
- Citlivost kanálu β na záření γ řeším úpravou koincidenční rovnice. V opačném případě, kdy jsou elektrony v γ kanálu, lze využít například stínění detektorů, kterým částice Beta neprojde.
- Brzdné záření – většinou zanedbatelně malý vliv, ale dělá to vliv záření β na detektor citlivý na γ . Pokud chceme, tak se opět mohou dělat opravy koincidenční rovnice. Možná by se toho šlo zbavit vhodným nastavením diskriminace?

11.1.3 Metody

- **Extrapoláčnická metoda** – Spočívá v uskutečnění série měření pro různé hodnoty detekční účinnosti v kanále β ($\varepsilon_\beta = \frac{n_\beta}{n_\gamma}$), čehož docílíme např. překrytím vzorku filmem či změnou diskriminace/zesílením (upravuji účinnost v kanále β). Výsledná závislost (účinnost na $\frac{n_\beta \cdot n_\gamma}{n_{PK}}$) (viz rovnice níže) je lineárně proložena a extrapolována k nule (s $\rightarrow 0$). Všechny výše zmíněné opravy lze uvažovat ve společném tvaru

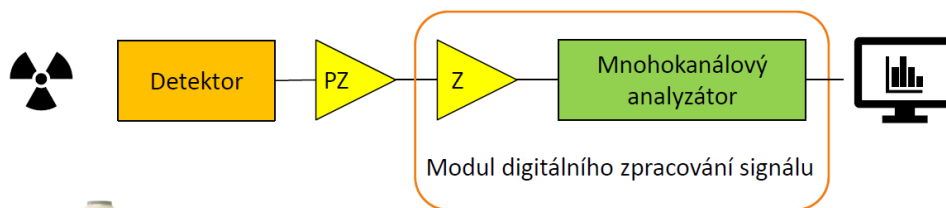
$$M = \frac{n_\beta n_\gamma}{n_{PK}} = A \cdot [1 + S \cdot k]$$

- **Stopovací metoda** – Přimíchám čistý ZIZ β se vzorkem $\beta - \gamma$, použiju princip extrapoláčnické metody (získám měření pro různé poměry aktivity vzorku a celku). V praxi funguje tak, že smíchám čistý zdroj IZ β a vhodný radionuklid s kaskádou $\beta - \gamma$. Posléze měřím celkovou aktivitu směsi (A_{xs}) a aktivitu RN s kaskádou (A_s). Odečtením jednoho od druhého dostanu aktivitu čistého zdroje IZ β (A_x) = γ $A_{xs} = A_x + A_s$.
- záchytové radionuklidy – měřím koincidence záření X_K a X_L - čistý záchyt elektronu
- záchytové radionuklidy – měřím koincidence záření $X - \gamma$ - obdoba kaskádám $\alpha - \gamma$, větší uplatnění korekčních faktorů, oboje měření se záchytovými radionuklidy je těžší na provedení, neboť si zde konkurují různé procesy

11.2 Spektrometrie gama jako sekundární metoda měření aktivity

Interakce fotonů s látkou:

- Fotoelektrický jev (energie fotonů je zpravidla nejmenší) – energie je všechna předána elektronu a dochází k jeho vyražení z elektronového obalu. Jeho prázdné místo je zabráno elektronem z vyšší energetické hladiny/slupky a rozdíl energií je vyzářen v podobě RTG charakteristického záření.
- Comptonův rozptyl: (vyšší energie gama fotonů) – část energie je předána elektronu a dochází k jeho vyražení. Platí, že fotoefekt je závislý na hmotnostním čísle, ale Comptonův jev není, a proto je pro lehká jádra pravděpodobnější Comptonův rozptyl.
- Tvorba elektron-positronového páru – energie iniciujícího fotonu musí být vyšší než je 1,02 MeV (2×511 keV) a ideálně o něco vyšší. Dochází k přeměně fotonu v blízkosti jádra atomu na pár elektron a positron. Přbytek energie je předán jádru v podobě hybnosti. Při jejich zániku rekombinací vzniká tzv. anihilační fotony, které mají $2 \times \gamma$ pod úhlem 180° o velikosti 2×511 keV. Tato energie je tam dána jako podmínka, protože klidová energie, resp. hmotnost elektronu i positronu je 511 keV.



Obrázek 11: Spektrometrická trasa

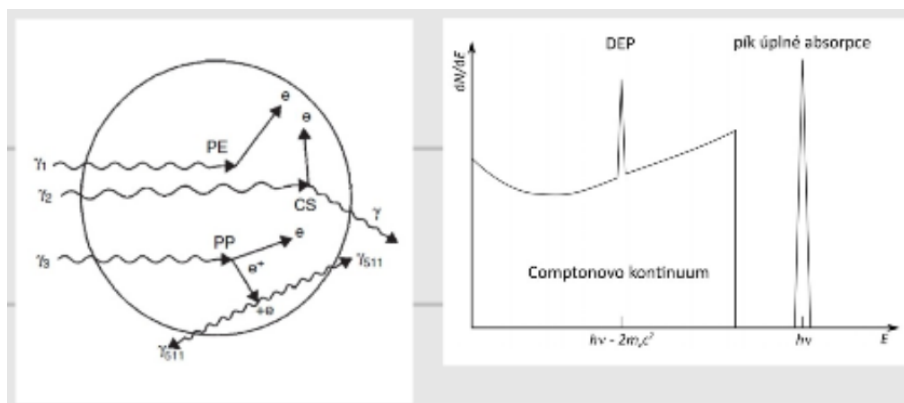
MCA = Mnohokanálový analyzátor – počítá impulzy z detektoru v závislosti na velikosti jejich amplitudy. Umožňuje nastavovat počet kanálů (jejich šířka energií), diskriminace, oprava na mrtvou dobu, zesílení, ...

Detektory pro spektrometrii gamma: jedná se o materiály s vysokým protonovým číslem.

- Scintilační detektory = NaI(Tl), LaBr₃(Ce), CsI(Tl) =, Mají vyšší účinnost a nemusí být chlazeny (možný provoz za pokojové teploty).
- Polovodičové detektory = Vysoké energetické rozlišení, ale nutno při provozu chladit na teplotu kapalného dusíku. (HPGe, Si(Li)).
- Je dobré mít zajištěné vhodné stínění, na což se používají materiály s vysokým hmotnostním číslem a také vícevrstvé řešení (Pb, Cd, Cu).

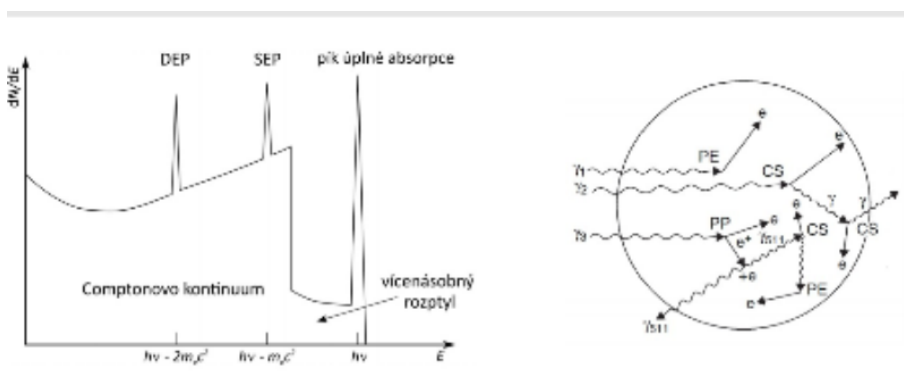
Spektrum detektorů různých velikostí:

- Malé detektory = rozměr je menší než střední volná dráha rozptýleného fotonového záření. Spektrum je tak tvořeno Comptonovým kontínuem, DEP a píkem úplné absorpce.



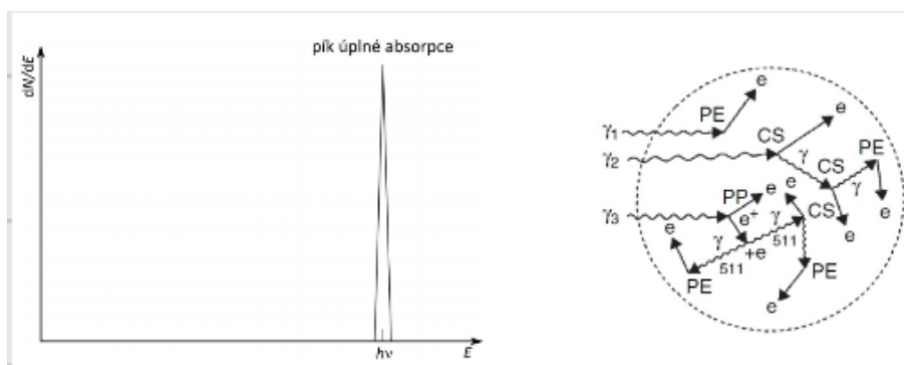
Obrázek 12: malé detektory spektrum

- Středně velké detektory = rozměr je srovnatelný se střední volnou dráhou, a proto spektrum obsahuje to samé co pro malé detektory, ale dále navíc SEP a část spektra náležící vícenásobnému rozptylu.



Obrázek 13: Středně velké detektory spektrum

- Velké detektory = Všechny události přispívají do píku úplné absorpce.



Obrázek 14: Velké detektory spektrum

Spektrometrické stanovení aktivity:

Stanovení aktivity na základě plochy píku, píkové účinnosti, radiačního výtěžku a živé doby měření.

Detekční účinnost se pak ještě dělí na absolutní, vnitřní, celkovou a píkovou, kde detekční účinnost obecně znamená podíl počtu částic, které jsou zaznamenány a počet částic emitovaných zdrojem. Píková detekční účinnost obsahuje pouze interakce, jenž patří do píku úplné absorpce.

$$A = \frac{P}{\varepsilon Y t} \quad (6)$$

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

Z hlediska metrologie neutronů je dobré zmínit nejprve veličiny jako je hustota toku neutronů (ϕ), neutronová fluence (φ) nebo emise radionuklidového zdroje neutronů (S).

Hustota toku neutronů ϕ = to samé co fluence, ale za 1s.

Neutronová fluence φ = podíl počtu neutronů jež dopadnou z libovolného směru na malou kouli a plochy jejího příčného průřezu (kolik neutronů mi projde plochou celkově za celý čas měření)

Emise zdroje S (s^{-1}) = počet částic emitovaných ze zdroje za jednotku času.

12.1 Zdroje neutronů

Radionuklidové zdroje:

- (α, n) , (γ, n) , spontání štěpení
- (α, n) = typicky AmBe s emisí od $10^5 - 10^8$ za sekundu a energií neutronů od 5 do 10 MeV. Dále existuje PuBe
- (γ, n) = SbBe, NaBe nebo D_2O . Výhodou tohoto typu zdrojů je produkce takřka monoenergetických neutronů, avšak za cenu nižší energie.
- spontání štěpení = v praxi se využívá hlavně a snad jen ^{252}Cf , jež má cca 3 % pravděpodobnost spontáního štěpení a zbytek je alfa přeměna.
- Mezi hlavní výhody patří relativně nízká cena, dostupnost, transport, malé rozměry, nízké nároky na provoz a údržbu.
- Nevýhodou je neproměnné spektrum, nižší emise neutronů, doprovodné gama záření a nemožnost vypnutí zdroje.

Generátory neutronů:

Využívají fúzních reakcí ve formě D-D, D-T či T-T reakcí za vzniku ^3He , ^4He a ^4He . Největší energie reakce je při fúzi D-T. V zásadě se jedná o zásobník s plynem částic, které jsou pak urychlovací trubicí (jak urychlovač) urychlovány a dopadají na terčík.

12.2 Metoda manganové lázně

Jedná se o metodu pro standardizaci emise S zdrojů neutronů.

Princip:

- Aktivace ^{55}Mn ve vodném roztoku MnSO_4 pomocí neutronů za vzniku ^{56}Mn
- Rozpad ^{56}Mn s poločasem rozpadu cca 2,5h na železo ^{56}Fe , elektron a gama.

- Mangan se využívá, neboť má vysoký účinný průřez pro absorpci neutronů (tepelné neutrony cca 100 barnů).
- Emise neutronového zdroje S je stanovena na základě saturované aktivity ^{56}Mn , avšak se zohledněním absorpce neutronů na kyslíku, síře, vodíku a dále se musí zohlednit vliv prahových reakcí na jádrech síry a kyslíku (T), korekce na neutrony ztracené ve zdroji a dutinách (C) a na závěr korekce na únik neutronů z lázně (L).
- Saturované aktivity je dosaženo po cca 10 poločasech rozpadu, což zde dělá zhruba jeden den.
- Následně je odebrán vzorek roztoku z promíchané lázně a stanovení aktivity odebraného vzorku buď pomocí koincidenční metody nebo gama spektrometrií a následně přepočít na celkovou aktivitu lázně pomocí trojčlenky.
- Jinou možností měření je vložit detektor přímo do lázně (scintilák nebo GM).
- Z naměřené plochy píku stanovíme aktivitu ^{56}Mn ($A = \frac{P}{\varepsilon t_{live} Y}$), avšak nutno je učinit korekce na přeměnu po dobu přenosu vzorku do spektrometru, na dobu samotného měření (po tyto doby dochází k rozpadu), mrtvá doba detektoru, radiační výtěžek (pravděpodobnost rozpadu tím procesem, který chci měřit).

$$S = A_{Mn} \cdot \frac{[\sigma_{Mn} + \sigma_S + 4 \cdot \sigma_O] \cdot N_{Mn} + [\sigma_H + 1/2 \cdot \sigma_O] \cdot N_H}{\sigma_{Mn} \cdot N_{Mn}} = \frac{A_{Mn}}{f} \rightarrow S = \frac{A_{Mn}}{f \cdot (1 - T - C - L)} \quad (7)$$

$$A_{Mn} = \frac{P \cdot \lambda \cdot \frac{t_{real}}{t_{livey}}}{(1 - e^{-\lambda \cdot t_1}) \cdot e^{-\lambda \cdot (t_2 - t_1)} \cdot (1 - e^{-\lambda \cdot t_{real}}) \cdot \varepsilon \cdot Y} \quad (8)$$

Výhody:

- Měření není ovlivněno asymetrií zdroje.
- vysoký účinný průřez pro absorpci neutronů na ^{55}Mn je znám s vysokou přesností.
- Meto není citlivá na γ záření, neboť neovlivňuje ^{55}Mn .
- V lázni je jen jeden RN.
- Ne příliš dlouhý ale ani krátký poločas rozpadu a jednoduché přeměnové schéma vznikajícího RN činí tuto metodu nenáročnou na praktické měření.

12.3 Metoda registrace doprovodných částic

- Vhodné pro zdroje neutronů založené na urychlování nabitých částic.
- Měření anbitých částic spojených s emisí neutronu.
- Potřeba tenkého terčíku – vyloučení samoabsorpce.

Máme státní etalon emise neutronů – manganová lázeň + scintilační detektor ve speciálním tubusu (nejistota 0,2 %).

12.4 Metody měření hustoty toku neutronů

- Hustota toku ϕ je stanovena pomocí reakční rychlosti $F = N \cdot \sigma \cdot \phi \rightarrow$ musím znát σ s dostatečnou přesností.
- Obecně rozlišuji metody založené na:
 - měření indukované aktivity,
 - počítání reakčních produktů.
- Hlavními problémy při měření jsou:
 - narušení neutronového pole detektorem,
 - anizotropie detektoru nebo nestejnoměrné oozáření,
 - indukování nežádoucí radioaktivity.

Energie neutronů:

- tepelné – v rovnováze s prostředím 0,025 až 1 eV
- intermediální – 0,5 eV až stovky keV
- rychlé – jednotky MeV

| Spektrální skupina | Energie | Spektrální skupina | Energie |
|--------------------|-------------------|--------------------|----------------|
| Chladné | 0 – 0,025 eV | Pomalé | 1 eV – 10 eV |
| Tepelné | 0,025 eV | Rezonanční | 10 eV – 300 eV |
| Epitermální | 0,025 eV – 0,4 eV | Středních energií | 300 eV – 1 MeV |
| Kadmiové | 0,4 eV – 0,6 eV | Rychlé | 1 MeV – 20 MeV |
| Epikadmiové | 0,6 eV – 1 eV | Ultrarychlé | > 20 MeV |

Obrázek 15: Rozdělení neutronů podle energie

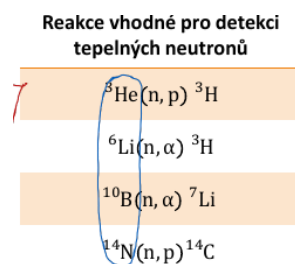
Měření indukované aktivity:

- Aktivita vzniklá v reakcích s neutrony $A(t) = n_R \cdot (1 - e^{-\lambda \cdot t})$.
- Může docházet k parazitním aktivačním reakcím \rightarrow ovlivnění výsledků.
- Měření aktivity: koincidenční metodou $\beta - \gamma$ nebo počítání částic v geometrii 4π .
- Rozsah většinou 10^{10} až 10^{22} cm^{-2} .
- Intermediální neutrony - rezonance \rightarrow překryji detektor kadmiem \rightarrow odfiltruji tepelné neutrony (kvůli ostrým maximům v σ).
- Rychlé neutrony \rightarrow prahovými reakcemi.

Počítání reakčních produktů:

- Většinou využívám (n, α) nebo (n, p) případně (n, f) reakce.
- Fluence z počtu zaznamenaných částic (nutné určení účinnosti).
- Využívám u detektorů:
 - scintilační,
 - proporcionální počítače,
 - štěpné komory,
 - termoluminescenční,
 - samonapájecí,
 - fotografické emulze.

12.4.1 Detektory tepelných neutronů



Obrázek 16: Detekce tepelných neutronů – reakce

- Plynové:
 - heliové a borové proporcionální komory - plynová náplň ${}^3\text{He}$ a ${}^{10}\text{BF}_3$ nebo pokrytí stěny ${}^{10}\text{B}$,
 - štěpné ionizační komory - stěny pokryté obohaceným uranem (velká kinetická energie fragmentů),
- scintilační – konverzní materiál součástí scintilátoru (např. ${}^6\text{LiI}(\text{Eu})$),
- polovodičové – konverzní vrstva na povrchu detektoru,
- termoluminiscenční – LiF obohacený o ${}^6\text{Li}$,
- detektory stop v pevné fázi,
- aktivační – (n, γ) ,
- samonapájecí.

12.4.2 Detektory rychlých neutronů

- Dlouhý počítač – založeno na principu moderace.
- Závislost odezvy na energii nalétávající částice je "po dlouhou dobu stejná" od určité energie.

12.5 Spektrometrie neutronů

- Většinou se používají Bonnerovy sféry.
- Detektor tepelných neutronů se umístí do středu PE koule s různým průměrem – ty slouží jako moderátor.
- Postupně se nabírají spektra.
- Následně \rightarrow unfolding = proces, kdy je uhadnuté spektrum neutronů jako vstup a je následně stanoveno "skutečné".
- Je to vleklá magie, náročné na měření.
- Na reaktoru používám pouze jednu bonnerku jako měřidlo dávkového příkonu.

Máme státní etalon **fluence neutronů** a **hustoty toku neutronů**.

- Etalon fluence:
 - zdroje neutronů: ^{252}Cf , $1\text{E}8\text{ s}^{-1}$ a AmBe $2\text{E}10\text{ s}^{-1}$ a generátor 14 MeV $1\text{E}9$ až $1\text{E}10\text{ s}^{-1}$,
 - kalibrační lavice, Bonnerův spektrometr,
 - měřidlo prostorového dávkového ekvivalentu neutronů (to samé na VR-1 – ta těžká bílá koule).
- Etalon hustoty toku tepelných neutronů:
 - grafitová prizma – RN zdroje vkládám do moderujícího prostředí (viz neutronová laborka),
 - vytvářím pole tepelných neutronů pro potřeby kalibrace a ověřování měřidel.

DOPSAT ZPRACOVÁNÍ VÝSLEDKŮ A ZDROJE NEJISTOT (ASI V JINÉ PREZENTACI)

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