

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 nadě mnou.

J.S. (2025)

Obsah

1 Rentgenofluorescenční analýza	6
1.1 Princip metody	6
1.2 Vlnově disperzní RFA	7
1.3 Energiově disperzní RFA	8
1.4 Požadavky na vzorek pro RFA analýzu	8
1.5 Detektory pro RFA	9
2 Aplikace rentgenofluorescenční analýzy	10
2.1 Kvalitativní analýza	10
2.2 Kvantitativní analýza	10
2.3 Matricové jevy	11
2.4 Metody kompenzace Matricových jevů	11
3 Elektronová mikrosonda	13
3.1 Princip	13
3.2 Typy elektronového mikroskopu:	14
3.3 Využití	15
3.4 Výhody a nevýhody elektronového mikroskopu	15
4 Aplikace ionizujícího záření v geologii a geofyzice	17
4.1 Radiometrické datování hornin	17
4.2 Jaderná karotáz (well logging)	17
4.3 Metody využívající zpětný odraz gama	19
5 Využití iontových svazků v materiálovém výzkumu	23
5.1 Základní typy urychlovačů	23
5.2 Metoda RBS	24
5.3 Kanálování	28
5.4 PIXE	28
5.5 PIGE	29
5.6 ERDA	30
5.7 NRA	31
6 Využití jaderně-fyzikálních metod v materiálovém výzkumu	33
6.1 Mossbauerova spektrometrie	33
6.1.1 Princip	33
6.1.2 Zpětný ráz	33
6.1.3 Pravděpodobnost jevu	34
6.1.4 Uspořádání experimentu	35
6.1.5 Využití	36
6.1.6 Hyperjemné interakce	37
6.1.7 Kalibrace	38
6.1.8 APlikace Mossbauerovy spektrometrie	39
6.2 Elektron-pozitronová anihilační spektroskopie	39
6.2.1 Experimentální techniky	40
6.3 Neutronová aktivační analýza	40
6.3.1 Nastavení experimentálních parametrů	42
7 Jaderně-fyzikální metody v nukleární medicíně	44
7.1 Zdroje záření	44
7.2 Diagnostika	44
7.3 Gamma kamera	45
7.4 Počítačová tomografie – CT	46
7.4.1 Princip	46
7.4.2 Základní součástky CT tomografu	47
7.5 PET	47

7.5.1	Základní součástky PET tomografu	47
7.6	Rozlišení obrazu	48
8	Využití synchrotronového záření v materiálovém výzkumu	49
8.1	Schéma uspořádání synchrotronu	49
8.2	Tvorba synchrotronového záření	49
8.3	Vlastnosti synchrotronového záření	50
8.4	XFEL	51
9	Jednotky a veličiny v dozimetrii	53
9.1	Základy legální metrologie	53
9.1.1	Organizace	54
9.1.2	Veličiny a jednotky	54
9.2	Jednotky a veličiny v dozimetrii	55
10	Využití detektorů v metrologii aktivity	57
10.1	Využití proporcionálních detektorů	57
10.2	Využití kapalných scintilátorů	58
10.2.1	TDCR	58
11	Koincidenční metoda & spektrometrie gama	60
11.1	Koincidenční metoda	60
11.1.1	Instrumentální opravy	62
11.1.2	Korekce – Opravy jednoduchého jaderného schématu	62
11.1.3	Metody	62
11.2	Spektrometrie gama jako sekundární metoda měření aktivity	63
12	Metrologie neutronů & manganová lázeň	66
12.1	Zdroje neutronů	66
12.2	Metoda manganové lázně	66
12.3	Metoda registrace doprovodných částic	67
12.4	Metody měření hustoty toku neutronů	68
12.4.1	Detektory tepelných neutronů	69
12.4.2	Detektory rychlých neutronů	69
12.5	Spektrometrie neutronů	70
13	Jaderná bezpečnost & ochrana do hloubky	71
13.1	Princip 3S	71
13.2	Principy bezpečného využívání jaderné energie	73
13.2.1	Bezpečnostní funkce	73
13.2.2	Přístup tříступňové ochrany	74
13.2.3	Definice poruch	74
13.2.4	Rozdělení systémů	75
13.3	Ochrana do hloubky = DID	75
13.3.1	Zajištění DID	75
13.3.2	Strategie DID	76
13.3.3	Úrovně DID	76
13.3.4	Fyzické bariéry DID	77
14	Klasifikace událostí na jaderných zařízeních	79
14.1	Klasifikace událostí na jaderných zařízeních	79
14.1.1	Provozní stavy reaktoru dle Vyhlášky č. 329/2017Sb.	79
14.1.2	Základní bezpečnostní funkce	79
14.1.3	Klasifikace událostí	80
14.2	Nehody	83
14.2.1	Projektové nehody (DBA)	83
14.2.2	Nadprojektové nehody (BDBA)	84
14.2.3	Těžké havárie (SA)	85

14.3 Mezinárodní stupnice – INES	85
14.3.1 Příklady událostí	87
15 Legislativa jaderné bezpečnosti	89
15.1 Životní cyklus jaderných zařízení	89
15.2 Klíčoví hráči při provozu reaktorů	90
15.2.1 International Atomic Energy Agency (IAEA)	92
15.2.2 SÚJB	93
15.3 Legislativní rámec	95
15.3.1 Atomové právo	95
15.3.2 České atomové právo	96
15.3.3 Mezinárodní atomové právo	97

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 vystavěna dopadajícím fotonům (RTG záření například z rentgenky nebo gama z vhodného radionuklidu). Tyto fotony pak vyráží elektrony (nejčastěji z vnitřní slupky K, popř. L). Poté dochází k přeskoku 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.

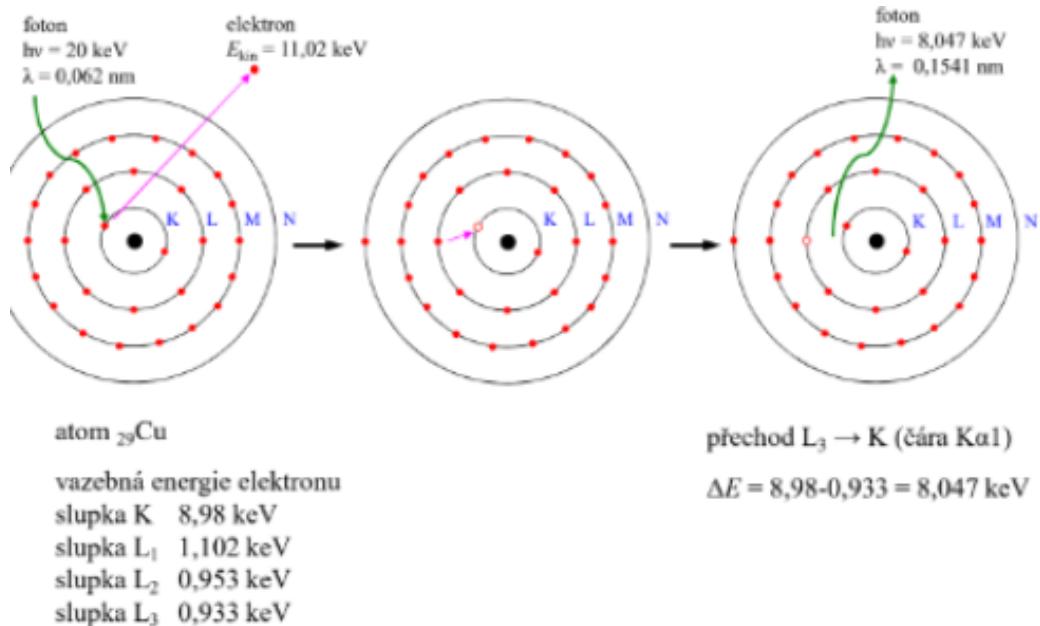
Vlnová délka charakteristického RTG záření je klesající s rostoucím Z číslem prvků a naopak energie se zvyšuje se Z číslem. Metoda RFA/XRF je dobrá pro prvky s větším Z , jelikož se lépe detekují.

Výhody:

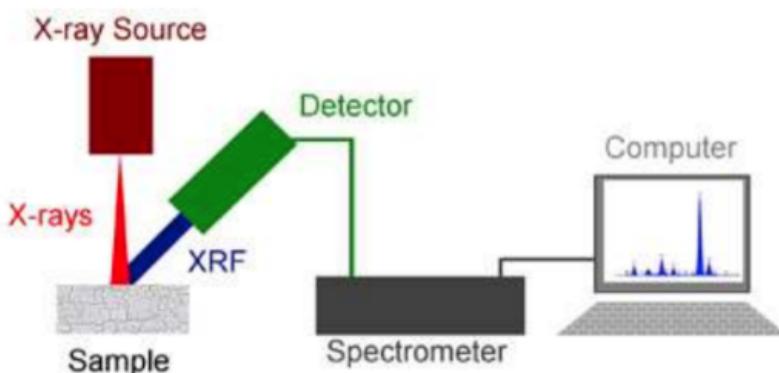
- Rychlosť, přesnost a reprodukovatelnost
- Vzorky mohou být v jakémkoliv skupenství
- Nedestruktivní metoda
- Multiprvková analýza
- Dobré pro zkoumání složení uměleckých předmětů

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 skundárního 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 (složen 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)

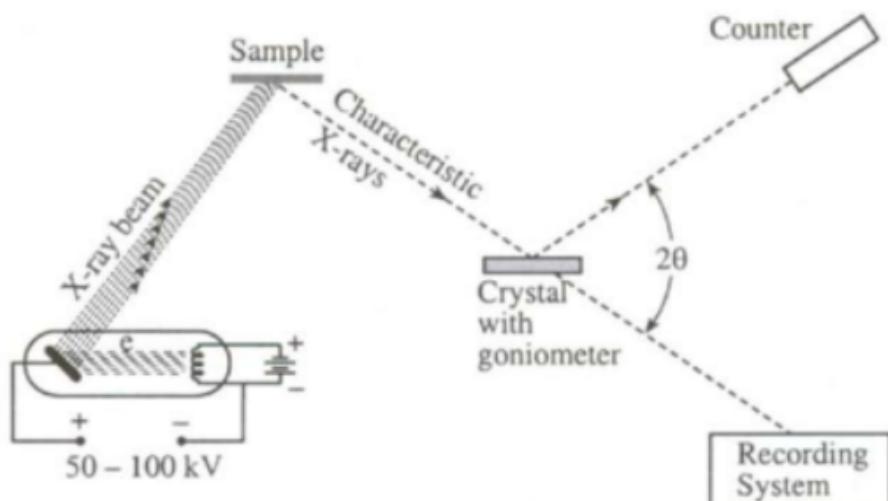
Vyžaduje velké rozměry přístrojů, vysokou spotřebu energie, ale dosahuje velmi dobrých technických parametrů.

Sekundární záření se odráží na krystalu a dopadá do detektoru/cítače (difrakce je dána Bragovým 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 impulzu a počet signálů o dané energii je roven intenzitě záření. Amplituda impulzů je úměrná energii).

Obvykle se využívá Si(Li) detektor, kde jsou vznikající impulsy zesíleny a tříděny dle velikosti pomocí MCA (četnost impulzů 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.
- Kapalné a práškové 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):

- Nejčastější 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 pistolly, která obsahuje zdroj (rentgenku) a zároveň detektor.

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

- Např. proporcionalní 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 páky, ale i spojité kusy spektra. Ten je způsoben průchodem elektronu skrze prostředí, které ho zpomaluje, čemuž se říká brzdné záření. Jednotlivé páky 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 páky, přičemž jejich amplituda/velikost odpovídá intenzitě, neboli kvantitě. Tím je zajištěno kvalitativní i kvantitativní analyzování vzorku.

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

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 photoefekt → 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 nebude 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 neprojeví 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 detekují 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 matice 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.

Zřeďovací 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

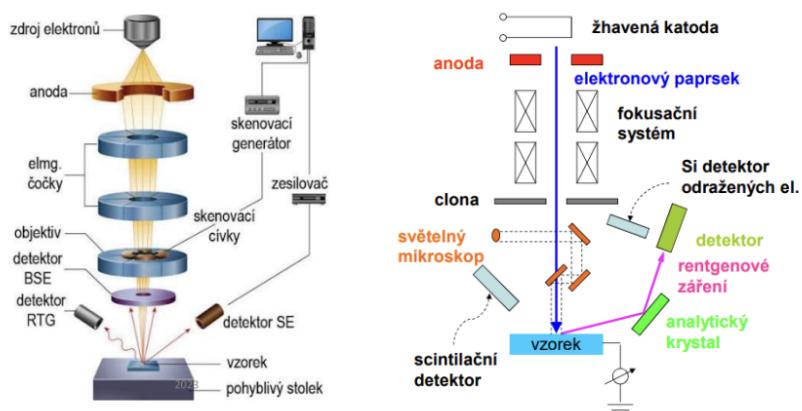
3.1 Princip

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 má velmi dobré rozlišení, stačí pokojová teplota. Problém je, že je drahá a krystal kontaminují plyny vzniklé ionizací elektronů.
 - 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 elektronami. Rozlišovací schopnost je dána vlnovou délkou elektronů, která je značně kratší (de Broglie 0,01 nm).

Vlnová délka závisí urychlovacím napětí.

Co vzniká při dopadu elekttronů na povrch zkoumaného vzorku:

- BSE – jedná se o elektrony, jež dopadají a odráží se od povrchu vzorku, nebo prochází do materiálu do určité hloubky. Zde se srážkami odráží, tvoří SE a pak se v materiálu odraží a letí zpět, čímž se dostanou zpátky do sondy.
 - Slouží například pro fázovou analýzu.
 - Lehké atomy méně odráží elektrony, což se projeví tmavým obrazem. Naopak těžší atomy lépe odráží a obraz je pak světlejší.
- SE – jedná se o sekundární elektrony, neboli elektrony, které vznikají v důsledku BSE, které je vyráží 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 odráží 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 prvků. 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, Katodoluminscence 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.

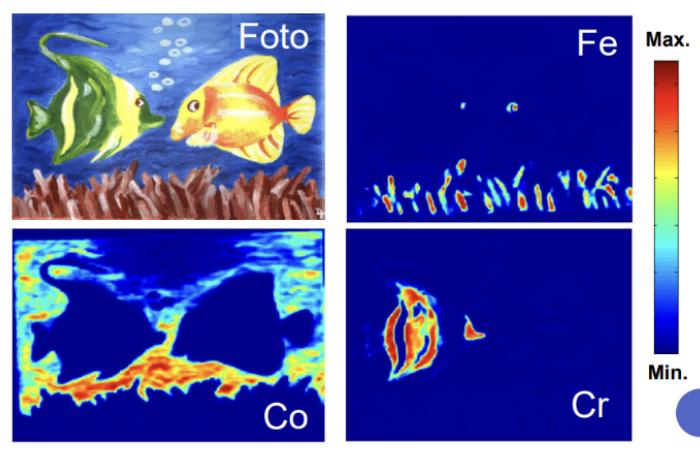
- Urychlovací napětí (100-400 keV) musí být dostatečně velké, aby elektrony měly dostatečnou energii a prošly skrz.
- Tenké vzorky, do kterých se pak dělá malinká dírka skrz kterou projdou elektrony (s tou dírkou si nejsem jistý).

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 Difraction, 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.



Fe – hnědé barvy, Co – kobaltová modř, Cr – zelené sloučeniny

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 nástřik 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 můžu 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).

Můžu 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 detektovat 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 okolníma šutrami, interaguje, a pomocí Comptonova rozptylu je zpětně detekováno v detektorech, které se taktéž nachází v zavážené sondě. Výsledkem je stanovení hustoty, půrovitosti 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 rozptyленo 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 zářice.

- **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 detekuju 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 půrovitosti hornin (zpomalení na vodíku)).

Dále sem patří neutron-gama karotáž (radiační 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).

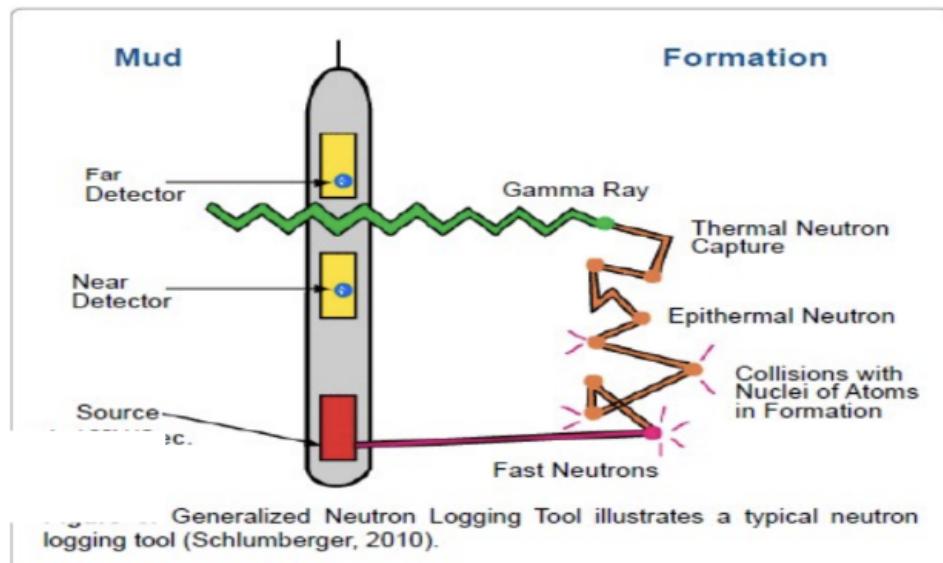
Vodohospodáři využívají radionuklidy k měření průtoků v řekách i vodovodních potrubích. Do vody nebo vodního toku je vstříknut radioizotop (bez zátěže ŽP) a následně je tento izotop detekován v místě s různými detektory (můžou být různě podél břehu i v hloubce). Na základě času a koncentrace lze stanovit 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 čisticek odpadních vod. Zářiče s radiokobalem 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 písku zpětně odraženého gama záření. Princip je vlastně identický jako u gamma-gamma karotáže:

- 1) Emitované fotony interagují s materiélem (uhlí) → Comptonův rozptyl, část fotonů odražena zpět.
- 2) Detektorem měřím intenzitu odražených fotonů.
- 3) Míra rozptylu závisí na hustotě elektronů v materiu, 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 absorpcie → 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 dostačná kvalita uhlí pro správný provoz kotle.
- V případě, že on-line bilance 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 - monitoruji 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 rozdílu 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 Comptonovův 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

5.1 Základní typy urychlovačů

Definice: Urychlovač je zařízení, které umožňuje zvýšení kinetické energie nabité (urychlované) částice, a to pomocí elektrické pole, které může být statické nebo proměnné a přitom je vede po stanovené trajektorii, a to pomocí magnetického pole, jež může být opět statické a nebo proměnné. Urychlovat lze pouze nabité částice, stejně tak jako je vést po určité dráze vlivem magnetického/elektromagnetického pole.

Díky případnému konverznímu materiálu lze eventuálně převést nabité částice na jiný typ záření (neutrony, fotony).

Základní komponenty urychlovače:

- Zdroj nabitych častic
- Urychlovací trubice (EM pole)
 - VN zdroj vytvářecí urychlovací napětí a magnety v urychlovači (dipóly = zakřivení dráhy pohybu častic, kvadrupóly = fokusace svazku).
- Systém dodávky EM polí
- Extrakce urychlených častic z urychlovače a soustředění na terčík
- Bombardovaný terčík a detektor/y pro popis parametrů urychleného svazku
- Diagnostika svazku (sledování energie, intenzity, polohy)
- Systém napájení
- Řídicí systém
- Vakuový systém

Rozdělení:

- Dle trajektorie – Dle trajektorie rozdělujeme urychlovače na lineární (elektrostatické vs. rezonanční, pro konstantní vs. proměnné urychlovací napětí) a cyklické (mikrotron, betatron, cyklotron, synchrotron, synchocyklotron, izochronní cyklotron).
- Dle způsobu urychlení – Dle způsobu urychlení rozdělujeme Elektrostatické a Rezonanční, což je například pro lineární urychlovače velmi efektivní a jsme schopni získat jednotky až desítky MeV na jednotkách metrů (1 m je cca jednotky až desítky MeV).
- Dle režimu práce – Kontinuální (časově neměnný svazek) a Impulzní (uvolňování častic po částech/balících).

Princip urychlení a zakřivení:

Velmi to záleží jestli mám cyklický a nebo lineární a pak podle typu napětí EM pole.

- Lineární elektrostatický → v tomto případě mám rovnou trubici, kde mám dánou urychlovací napětí konstatní a částice je na dáne dráze urychlena tak moc, jak je dánou napětí. Magnetické pole pak zde slouží v podobě dipólů nebo kvadrupólů, a to pro korekci svazku, aby se nevychyloval a pro jeho fokusaci. K tomu se pak typicky ale využívá tzv. elektrostatický fokusační systém, který je tvořen 4 elektrodami, jež jsou vždy 2 a 2 naproti sobě se stejným napětím a způsobují, že částice je "odrážena" doprostřed.
- Lineární rezonanční → Přímočará dráha pohybem proměnlivý proud (napětí se cyklicky mění a jednotlivé elektrody mění náboj, aby buď odpuzovaly či přitahovaly), zvětšující se délka urychlovacích segmentů s délkou (částice se hýbe velmi rychle, tak to musí mít nějaký efekt a aby ji to vůbec stihlo urychlit, tak jsou delší a delší). Hodně se to využívá v medicíně, protože na krátké vzdálenosti nabízí částice vysokou energii a poté se využívá např. převod elektronu na RTG či γ . V klidu se dá urychlit na 10-15 MeV/m
- Cyklický (konst. napětí i magnetické pole) → V tomto případě přiletí částice a urychlovacím napětím jí roste energie a magnetickým polem je zakřivena její dráha pohybu, která se s jeho konstatností zvětšuje v poloměru. Celý urychlovač je navržen tak, že při správné energii dosáhne částice maximálního poloměru dráhy pohybu a vyletí ústím ven.
- Cyklický (konst. napětí) → Stejně jako výše, avšak pomocí proměnlivého magnetického pole mohu částici udržovat na stejném poloměru zakřivení.
- Cyklický (obojí proměnlivé) → Má tam například místa, kde když částice projde, tak ji to urychlí a stejně jako u lineárního dochází k periodickému přeplování, aby částice byla odpuzována/přitahována ve správný moment. Proměnlivým magnetickým polem je pak držena na stejném poloměru.

Využití: Materiálový výzkum, čisticová fyzika, Produkce radionuklidů (do medicíny či materiálový výzkum), Produkce neutronů (studium radiačního poškození, difracce neutronů, neutronová fyzika, produkce fotonů (materiálový výzkum-XFEL a medicína).

5.2 Metoda RBS

= Rutherford Backscattering Spectroscopy

Využití pružného rozptylu nalétávajících iontů z monoenergetického svazku ($E=1-3$ MeV) s atomy či jejich elektrony v terčíku.

- Pružný rozptyl = bez ztráty energie na srážku
- Měření počtu a energii odražených iontů dopadajícího svazku, což nám dává info o materiálu terčíku.
- Typické hloubky, kde je RBS schopno identifikovat a lokalizovat různé prvky v matrici jsou desítky až stovky nm.

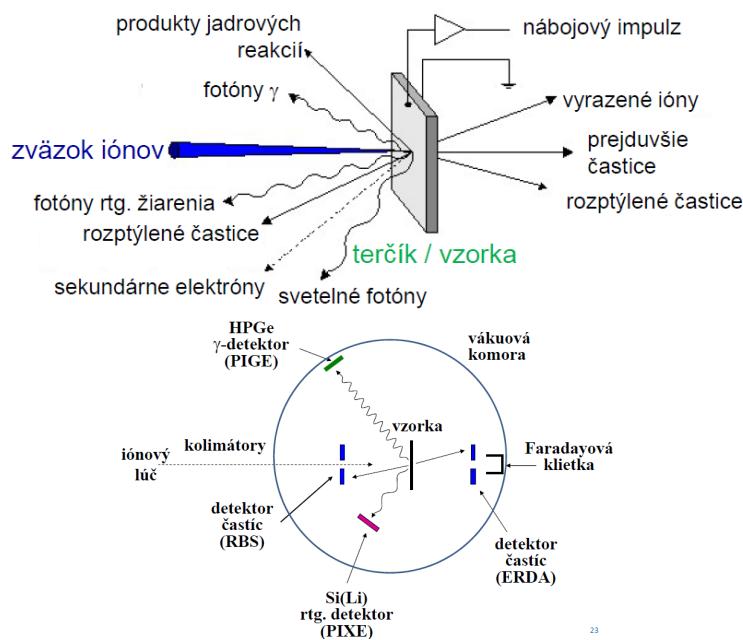
Výhody:

- vysoká citlivost na těžké prvky v lehké matrici
- jednoduché umístění vzorku na vzduchu

- kvalitativní přesnost $\pm 1\%$
- hloubkové rozlišení ± 5 nm se Si(Li) detektorem
- kanálování
- Vysoká přesnost na těžké prvky v lehké matrici
- Schopnost velmi dobře rozlišit dva lehké prvky mezi sebou navzájem (dva lehké prvky s malým rozdílem hmotnosti), a to např. O-18 a F-19, C-13 a N-14

Nevýhody:

- necitlivé na lehké prvky v těžké matrici
- implantování iontů do analyzovaného materiálu
- potřebný urychlovač
- Problém rozlišit dva těžké prvky o podobné hmotnosti (Pb-208 a Au-197), avšak rozlišovací schopnost lze zlepšit zvýšením hmotnosti dopadající částice ($M_1 \rightarrowtail$ citlivost při dopadu alfa částice je lepší v porovnání s protony).



V zásadě existují dva procesy, resp. interakce urychlených iontů s danou látkou:

1) Interakce s jádrem (Elastický Coulombův rozptyl):

- Víme počáteční energii E_0 , víme jeho hmotnost M_1 a měříme jeho energii E_1 po jeho zpětném rozptylu.
- Využijeme $E_1 = K * E_0$, kde K je kinematický faktor a je funkcí hmotností obou interagujících častic a úhlu odrazu zaznamenaného odraženého iontu

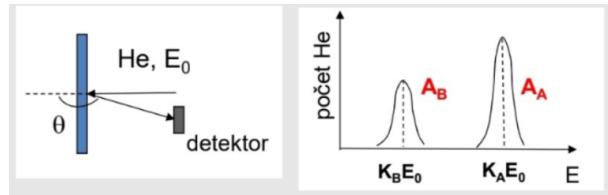
- Neznámou tedy představuje pouze hmotnost M_2 , kterou jsme schopni z toho dopočítat a určit o jaké jádro se jedná.

2) Interakce s elektrony (elektronový rozptyl):

- Lokalizace a určení atomu (M_2) jakožto funkce hloubky, resp. v závislosti na tom v jaké hloubce dojde k rozptylu.
- množství úbytku energie záleží na brzdném účinku látky, tedy na hustotě elektronů v látce a vzdálenosti, kterou nabity iont urazí při průchodu látkou.
- Prvky, které se v materiálu objevují pouze v určité hloubce mají na naměřeném spektru svůj pikk posunuty, ale jsou posunuty o jistou míru/energiu, která představuje vzdálenost, kterou musel iont projít materiélem, aby se k nim dostal.
- Ke stanovení je nutné mít naměřenou energii iontu po odrazu na povrchu a pak následně v dané hloubce. Čím hlouběji iont musel jít, tím více ztratí energie
- Správnost určení rozdílu energií při odrazu na povrchu a v hloubce (ΔE) závisí na energetické rozlišení detektoru, energetický rozptyl urychleného svazku dopadajících iontů a také energetický rozptyl směrem k a od terčíku, příprava povrchu terčíku. Na závěr samozřejmě závisí na materiálu, který je měřen.

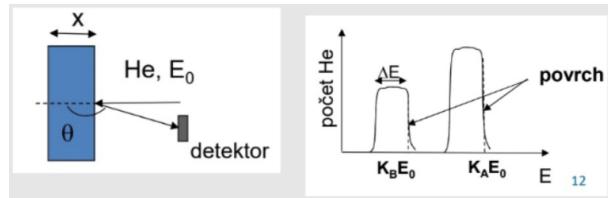
Měřené spektrum podle tloušťky měřeného vzorku materiálu:

- Ultra tenká vrstva (několik atomárních vrstev)



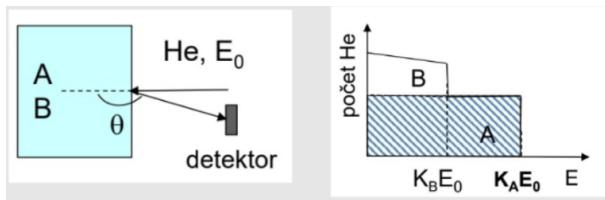
Obrázek 7: ultra tenká vrstva – RBS

- Tenká vrstva (několik stovek až tisíců atomárních vrstev)



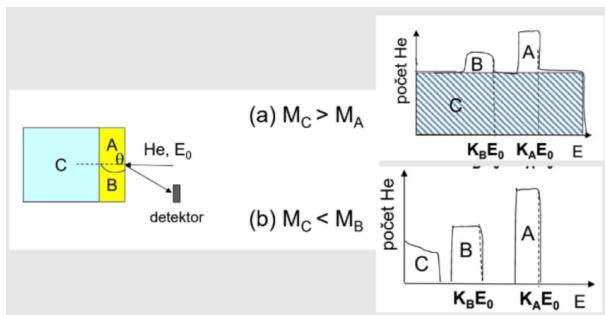
Obrázek 8: Tenká vrstva – RBS

- Hrubá vrstva = toto už jsou mm, v zásadě bulk/objem.



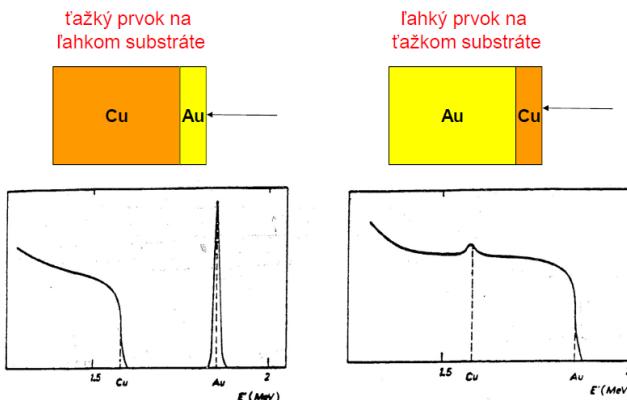
Obrázek 9: Bulk – RBS

- Pokrytí povrchu = bulk materiál, který má na povrchu naneseny různé tloušťky jiného materiálu/materiálů. Zde rozdělujeme 2 varianty (lehký bulk a těžké pokrytí a naopak)



Obrázek 10: Pokrytí – RBS

Kvalitativní analýza:



Výstupem při měření dostáváme z detektoru impulsy, jejichž výška je úměrná energii zpětně odraženého iontu. Z výšky čar výsledného spektra lze stanovit stechiometrické složení vzorku.

Využití:

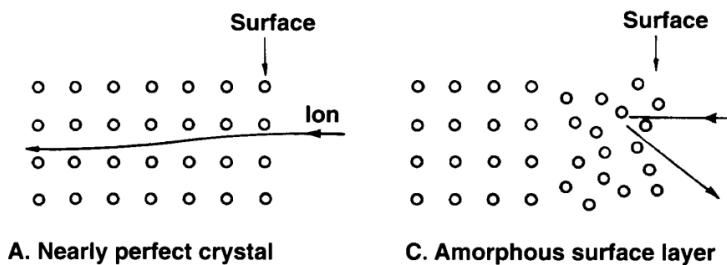
Detektory částic nastavené na RBS jsou často součástí většího celku jehož součásti jsou i detektory na PIGE, PIXE, ERDA a celé to bývá vaukováno, aby nedocházelo k parazitní interakci s částicemi atmosféry (nahoře je ovšem psáno, že RBS jde dělat i na vzduchu, což jde, ale je lepší tam tu parazitní interakci nemít).

Umění, archeologie (sochy, obrazy, předměty – například rozdíl mezi zlatem a pozlacením), materiálový výzkum a geologie.

5.3 Kanálování

Kanálování je speciální mód RBS techniky. Vyžadováno je, aby orientace urychlených iontů byla ve správné poloze vůči krystalografické mříži, a to konkrétně podél hlavní krystalografické osy krystalu.

V čistém a ideálním krystalu by měl iont jakoby "projít rovně skrz a mezi jednotlivými rovinami", avšak v případě přítomnosti poruch či příměsí jsme schopni detekovat jejich polohu v krystalu, jelikož pak dochází k poklesu intenzity detekovaného záření (stínění Coulombovského rozptylu).



5.4 PIXE

= Particle Induced X-Ray Emission

Jedná se nedestruktivní o metodu, která využívá detekce charakteristického RTG záření.

Výhody:

- Nedestruktivní technika schopna měřit tuhé látky, tekutiny i aerosoly
- Vysoká citlivost a rychlosť měření
- Dobrá rozlišovací schopnost = multiprkvková analýza ($Z \geq 13 = Al$)

Nevýhody:

- Nelze analyzovat organické vzorky
- Omezená hloubková informace
- Potřeba urychlovače

Princip:

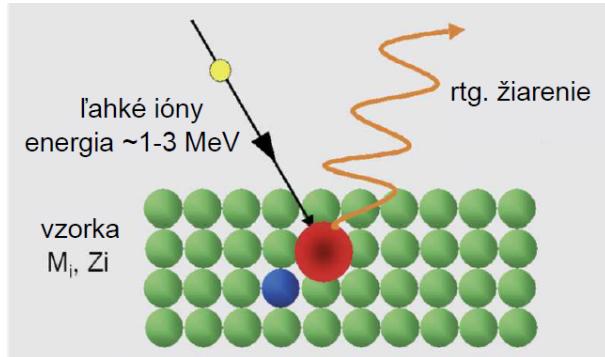
Excitací atomu iontovým svazkem (vyražení elektronu a jeho zabrání elektronem z vyšší energetické hladiny) a produkce charakteristického RTG záření, jehož detekci lze identifikovat původce a identifikovat tak prvek (v zásadě stejně jako u RFA, akorát tady se využívají ionty a ne fotony z radionuklidu nebo rentgenky).

Stejně jako u RFA, tak i zde je Augerův elektron konkurenční jev a dohromady dávají jedničku. Takže existuje klasicky pravděpodobnost, že k vyzáření RTG dojde a ta je dána účinným průřezem pro ionizaci a fluorescenčním výtežkem.

Stejně jako u RFA, tak se projevují matricové jevy, které mi ovlivňují měření, tedy to co naměřím a to co realně je ve zkoumaném materiálu.

Stejně jako u RFA, tak plocha pod čarou je rovna koncentraci prvku

K detekci charakteristického RTG záření se využívá HPGe, Si(Li)



Aplikace a využití:

- Materiálový výzkum
- Geologie
- Umění, architektura
- Monitoring znečištění atmosféry

Speciální případy:

- Mikrosvazek = distribuce prvků ve vzorku (analýza hrubých vrstev s vysokým rozlišením)
→ stopová množství, malé oblasti s vysokým rozlišením.
- Externí svazek = Analýza velkých a komplexních předmětů svazkem z urychlovače, který je vyveden ven do atmosféry na zkoumaný objekt (proto externí svazek) → Louvre, artefakty, obrazy.

5.5 PIGE

=Particle Induced Gamma Emission

Jedná se o nedestruktivní metodu pro stanovení prvkového složení na základě interakce urychlených protonů, popř. d, a málokdy těžkých iontů s jádrem atomu za vzniku gama záření, které poté detekujeme. Toto záření tak je pak v některých případech doprovázeno ještě další reakcí, resp. vznikem další částice/záření.

Nejčastěji se opět měří ve vakuové komoře a nejvíce se využívají urychlené protony.

- Rezonanční záchyt (p, γ) - mohu využít rezonancí prvků, které jsou ve zkoumaném materiálu a pak detekuji jen gamu. To ale vyžaduje, že vím co tam je, resp. vím co v tom hledám, abych danou rezonanci mohl využít.

- nepružný záchyt ($p, p|\gamma$)
- Srážky s přeusporydáním ($p, n\gamma$), ($p, \alpha\gamma$), (p, n)

5.6 ERDA

=Elastic Recoil Detection Analysis

Jedná se o metodu využívající pružný rozptyl lehkých jader po dopadu těžkých iontů. Slouží pro detekci lehkých prvků v těžké matrici (dokáže detektovat vodík v tuhých látkách)

Výhody:

- Dobrá citlivost na lehké prvky.
- Dá se kombinovat s RBS.
- Menší poškození vyšetřovaného materiálu.
- Identifikace 1-H a 2-H hloubkových profilů (pomocí alfa).

Nevýhody:

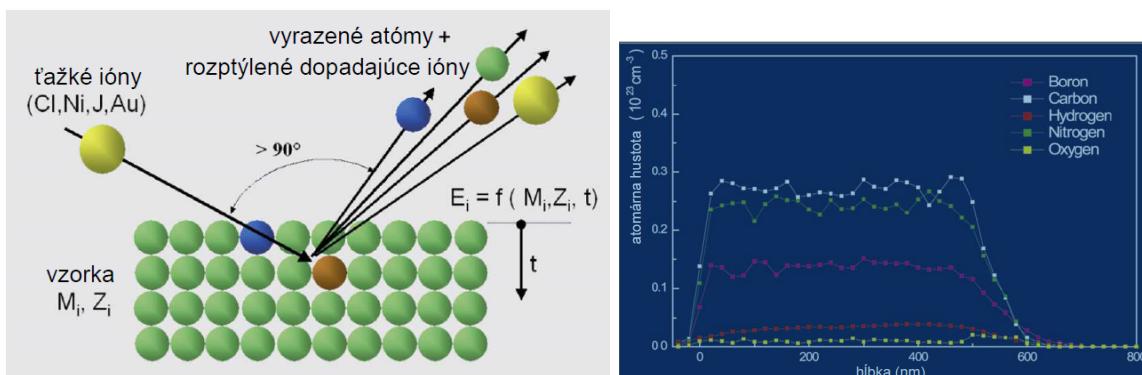
- Menší hloubkové rozlišení a hloubka analýzy (způsobeno hmotností, resp. velikosti těžších iontů) je kvůli rozptylu dopadajících iontů asi několik stovek nm.
- Vzorek musí být spešl připraven + omezená geometrie ozařování a detekce.

Princip:

Pružný rozptyl dopadajících vysokoenergetických a těžkých iontů (MeV), ven jdou odražené ionty a vyražené atomy z materiálu

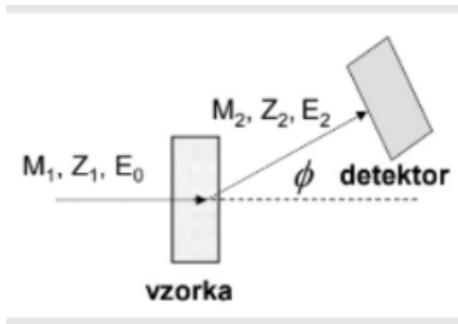
Umožňuje profilování lehkých jader.

S využitím standardů umožňuje i kvantitativní analýzu.



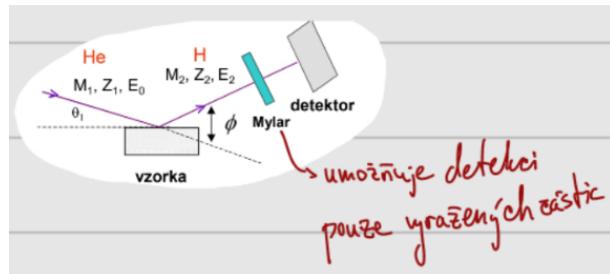
Módy provozu:

- Transmisní: Velmi tenké vzorky



Obrázek 11: transmisní ERDA

- Odraz pod malými úhly = nejčastější metoda



Obrázek 12: odrazová ERDA

V obou geometriích platí, že $E_2 = K * E_0$, kde faktor K závisí na hmotnostech bombradující a vyražené částice a dále na úhlu rozptylu takže pak jen určíme zase hmotnost M_2 .

5.7 NRA

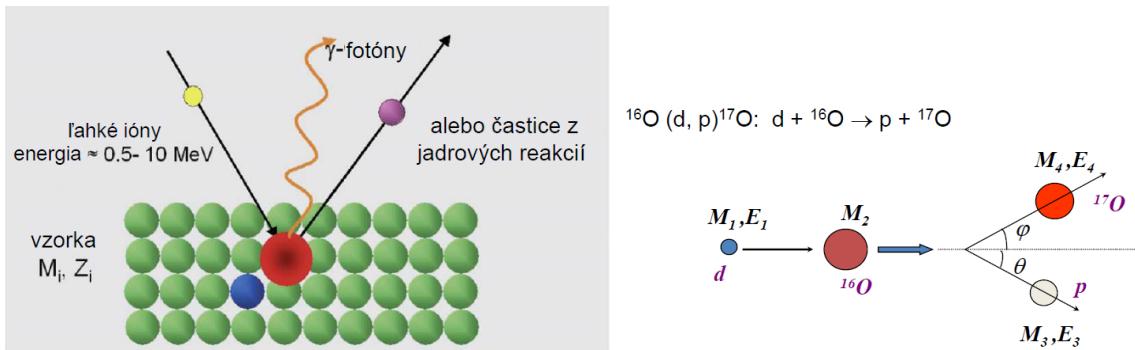
= Nuclear Reaction Analysis

Jedná se o metodu pro detekci lehkých prvků ($Z \leq 18$), jež je izotopicky citlivá a umožňuje identifikaci a lokalizaci stopových prvků. Jedná se o nedestruktivní metodu s analytickou hloubkou několik stovek nm, ovšem jedná se vždy o exotermickou nebo endotermickou reakci a tudíž energetická bilance je vždy nenulová.

Jedná se o nepružný proces, a proto se částice na začátku nerovnají produktům reakce.

Princip:

Jaderná reakce mezi dopadajícím iontem a prvkami v terčíku. Následně dochází k detekci produktů reakce (γ nebo částice).



Detekuju produkty reakce (částice nebo γ) pomocí Si detektoru nebo γ fotony detekuju pomocí Ge či NaI(Tl) detektorů a změřím si energii E_3 pro dané M_1 , E_1 a θ a tím identifikuj M_2 .

Poté si naměřím spektrum E_3 , které mi podá informaci o hloubkovém rozložení M_2 a tím ho lokalizuji v materiálu.

Pozn.: Reakce může probíhat dvojím způsobem, a to sice přes složené jádro (všechny nukleony jsou využity) a nebo jakožto tzv. prímá reakce, kde jen některé nukleony jsou použité (někdy nazýváno trhací reakce).

Pravděpodobnost reakce je klasicky dána příslušným účinným průřezem.

K detekci příslušných jader v hloubce nebo na povrchu se dají využít rezonance, kdy pokud se energie bombardující částice rovná energii rezonance, tak k interakci dojde na povrchu. Pokud je ovšem energie částice vyšší než energie rezonance, tak k interakci dojde v hloubce pod povrchem (cestou do materiálu se energie sníží a až se vyrovná tak interaguje).

Příkladem je analýza vodíku pomocí 15-N za vzniku 12-C + 4-He a γ . Rezonance je při 6,385 MeV a s hloubkou dochází k posuvu rezonance, a proto se využívají energie vyšší než rezonance až např. do 15 MeV.

Využití: Farmacie, archeologie, Geovědy, umění

Srovnání RBS a NRA:

- RBS je pro detekci těžkých prvků v lehké matrici, zatímco NRA je pro detekci lehkých prvků.
- RBS využívá elastický rozptyl dopadajících částic (typicky $\alpha = 2$ MeV), zatímco NRA využívá nepružný rozptyl mezi dopadající částicí a částicí v terčíku (detekce produktů reakce)
- RBS má energetickou bilanci nulovou a NRA nemá
- u RBS jsou jádra terčíku i dopadající částice v základním stavu, zatímco u NRA jsou produkty reakce odlišné od původních, které do reakce vstupují.

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

6.1 Mossbauerova spektrometrie

Byla objevena německým fyzikem Rudolfem Mössbauerem v roce 1958. Je založeno na rezonanční fluorescenci γ záření

Obvykle používané prvky: ^{57}Fe , ^{119}Sn , ^{121}Sb , ^{129}I .

Široká škála aplikací při studiu chemických vazeb, anorganické chemii pevných látek, atd. Hlavní množství článků a studií je ale zaměřeno na železo.

Jedná se o metodu izotopicky citlivou (bezodrazová jaderná rezonanční absorpce/fluorescence gama záření).

6.1.1 Princip

Mossbauerův jev = bezodrazová jaderná rezonanční absorpce gamma záření

- Založeno na emisi a absorpci γ záření emitovaného jádrem bez zpětného rázu.
- Atomy ve zdroji emitující γ záření musí být stejné, jako v atomy ve vzorku.
- Vlastně je to tak, že jádra ve vzorku jsou excitovaná gammou, která je emitovaná při stejné deexcitaci ve zdroji.
- Zde zdroje fotnů jsou generovány fotony o dané energii a pokud je tato energie veeeelmi přesná jako je energie mezi vzbuzeným a základním stavem atomu či jádra ve zkoumaném materiálu, tak dojde k tzv. rezonanční absorpci.
- Poté dochází opět k přechodu zkoumaného jádra do základního stavu emisí fotonu o té samé energii, co to původně vyvolala
- Celé co chceme je dosáhnout překrytu emisní a absorpční čáry, což je velmi složité neboť je šířka píku (energie) velmi malá a komplikuje to celé jev tzv. zpětného rázu.

6.1.2 Zpětný ráz

- Při emisi vysokoenergetické částice z jádra funguje zpětný odraz, část hybnosti je předaná emitujícímu jádru (analogicky u zbraně – taky mě to hodí trochu dozadu).
- Energie gamma záření má proto o trošku nižší energii než je energie resonance, a to o energii tohoto zpětného rázu.
- Pro energii zpětného rázu platí: $E_R = \frac{E_\gamma}{2Mc^2}$, kde M je hmotnost emitujícího jádra a E_γ je energie emitovaného fotonu.
- S narůstající hmotností M klesá energie zpětného odrazu, a proto platí, že jeli energie emitovaného gama záření malá oproti hmotnosti jádra, jež jej emituje, pak se energie

zpětného rázu pohltí a s jádrem to nehne. V opačném případě je třeba tuto energii nějak zohlednit a ideálně ji kompenzovat.

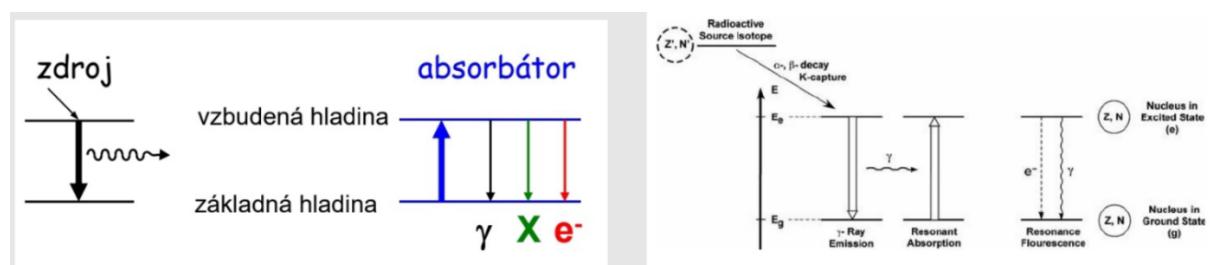
- V případě nevázaného jádra je posun energie značný a není možné Mossbauerův jev pozorovat. Neboli nedojde k překryvu emisní a absorpcní čáry.

Příkladem je známé železo Fe-57 u něhož je šířka čáry 4,6 neV a energie zpětného rázu je 2 meV. To znamená, že emitované gama o velikosti 14.4 keV, které na něj letí s cílem ho excitovat, tak mi je k ničemu, protože energie fotonu je nižší o ty 2 meV a tudíž nedosáhnu překryvu emisní a absorpcní čáry, která je ultra tenounká. Nutno dále zmínit, že o energii zpětného rázu se mi navíc posouvá nejen emisní čára, ale i absorpcní čára, neboť to má vliv i na jádro, jež energii přijíma. Souhrně řečeno: U volného jádra (plynné či kapalné médium) dochází při emisi k zpětnému rázu, o který se sníží energie emitovaného fotonu a pak nevystačuje energie na excitaci cílového jádra.

- Zvýšení hmotnosti jádra, aby byla energie zpětného rázu pohlcena/kompenzována lze dosáhnout uvázáním jádra do krystalické mřížky → zpětný ráz je daleko menší, do hmotnosti se taky připočítávají okolní vázané atomy, neboli mřížka tlumí odraz.

Jak to funguje:

- Mám zdroj, který emituje přesně energii, kterou chci pro excitaci atomu/jádra v mé vzorku (pro tyto účely uvažujme Fe-57).
- Ve vzorku mám atomy/jádra Fe-57, které toto záření absorbují, jsou excitována a poté při deexcitaci emitují gama záření o té samé energii, která je excitovala z mého zdroje (jak bylo řečeno výše, tak zdrojem je to samé jádro, které chci ve vzorku excitovat. Toto jádro, které já beru jako zdroj tak excituju nějakým externím RN zdrojem například).
- Emitované záření ze vzorku je pak emitované do celého prostorového úhlu.



Obrázek 13: Mossbauer excitace jádra

6.1.3 Pravděpodobnost jevu

Celá pravděpodobnost, že nastane tento jev je popsána skrze účinný průřez rezonanční absorpce závisející na spinu základního a excitovaného jádra, vlnové délce fotonů a na šířce čáry.

$$\sigma_0 = \frac{\lambda^2}{2\pi} \cdot \frac{2I_e + 1}{2I_g + 1} \cdot \frac{1}{1 + \alpha},$$

kde $I_{g,e}$ jsou jaderné spiny základního a rezonančního stavu, α koeficient vnitřní koverze a λ vlnová délka fotonu.

Dále hraje roli, tzv f-faktor, který popisuje pravděpodobnost bezfononového procesu. Tento faktor závisí na silách v mřížce a tedy čím více mřížka vibruje, tím více bude f-faktor klesat. Pravděpodobnost Mossbauerova jevu tedy roste se snižující se energií gama fotonu (menší zpětný odraz), roste se snižující se teplotou (menší tepelný pohyb) a roste se zvyšující se Debeyeovou teplotou (popisuje míru síly vazeb mezi jádrem a okolní mřížkou, resp. obecně míru síly vazeb).

Mossbauerovou spektrometrii lze měřit pouze krystalické a amorfnně tuhé látky, zamrznuté roztoky (enmohu kapaliny a plyny).

6.1.4 Uspořádání experimentu

Základní součástí experimentu je zdroj záření, zkoumaný vzorek a detektor. Ne každý izotop je však vhodný pro zkoumání a měření touto metodou (již řečeno).

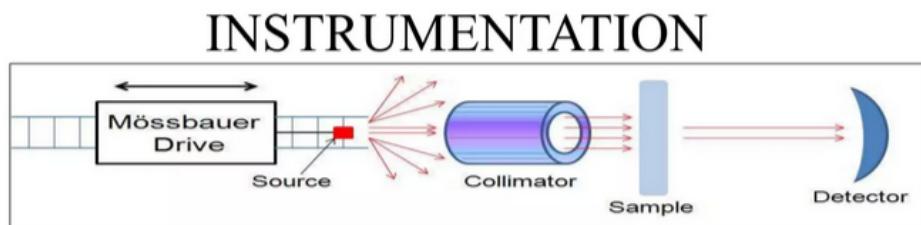
Aparatura se skládá z:

- Zdroj/zářič: Nejvíce využívaný je izotop Fe-57, dále je Sn-119 či Au nebo Eu. Hlavní je ale to železo.
 - Omezení zkoumání vzorků na ty, které obsahují např. právě to Fe-57
 - Energie fotonu musí být v určitém rozmezí energií, a proto to nefunguje pro všechny jádra (nad 180 keV je energie zpětného rázu moc velká a pod 5 keV se neprojevuje rezonanční absorpcí).
 - Potřebuji zdroj fotonů s velmi přesnou energií aby to fungovalo
 - Požadavky na zdroj jsou tedy: Dostupnost, trvanlivost, šířka čáry
- Absorbátor/zkoumaný vzorek: Pokud je vzorek moc tlustý pak dojde k úplné absorpci a nebudu mít žádný signál. Příliš tenký vzorek je ale také špatně, avšak existuje vztah pro výpočet efektivní tloušťky (pro železo je to 1-5 mg/cm² Fe atomů).
- Detektor: V zásadě lze využít širokou škálu detektorů
 - Scintilační NaI(Tl) – nejvíce využívaný scintilák, pak existuje ještě na bázi Ytria, ale ten má na hovno energetické rozlišení a účinnost, ale má rychlou odezvu a je dobrý pro vysoké četnosti. Obecně jsou scintiláky dobré, jelikož jsou rychlé.
 - Proporcionální (plynem plněný) – lepší energetická rozlišovací schopnost (je to pravda?).
 - Polovodičový – na bázi Si či Ge, avšak pro tuto metodu je to možná až moc overkill a zbytečně drahé.
- Pojezd zdroje – Jelikož je překryv energií hodně malý, tak mohu jemnou modulací energie pomocí Dopplerovské modulace doladit, aby došlo k překryvu absorpčního a emisního píku. V praxi to provedu tak, že zdroj umístím na nějakou membránu a pohybují s ním tam a zpět (kmitám) - lze si představit jako membrána u reproduktoru.

Rozdělujeme 3 uspořádání při experimentu:

Měření může v obecnosti trvat hodiny až dny nebo týdny, přičemž podmínky testu jsou statické. Mimo jiné mohu na zkoumaný materiál aplikovat nějaké vnější vlivy = magnetické pole, změna teploty apod.

- Transmisní = Zdroj – vzorek – detektor. Měřím co je za vzorkem. Měřím tzv. emisní spektrum, protože měřím, to co mi ze vzorku vylétává
- Konverzní = Měřím jednak emitované gama záření, ale i RTG či konverzní elektrony, augerovy elektrony, čímž dostávám informace z různé hloubky, ovšem celkově je to stále jen desítky mikrometrů.
- Odrazová = Detektor je mimo osu primárního svazku a tím mám geometrii na odraz



Obrázek 14: Experimentální uspořádání transmisní Mossbauerovy spektrometrie

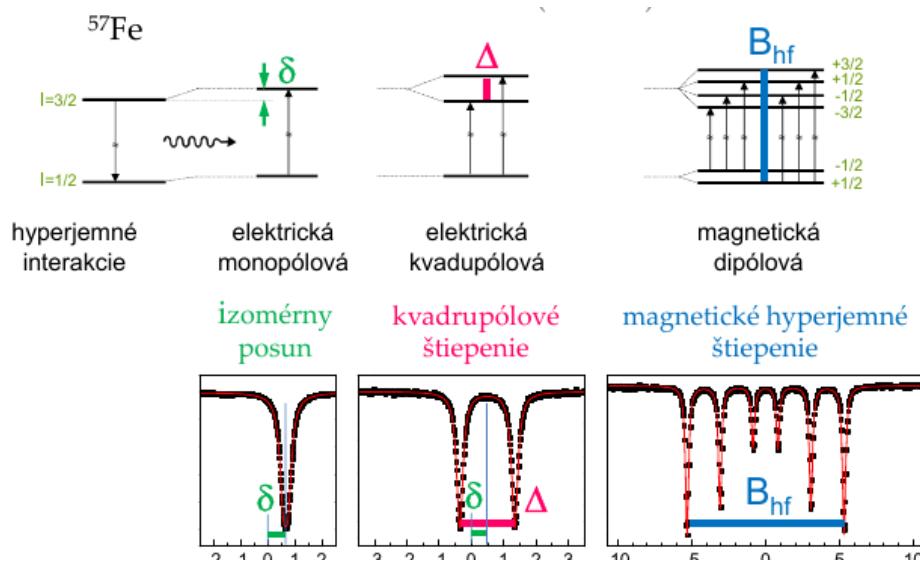
6.1.5 Využití

- Mossbauerovské jádro mi funguje v mé materiálu jako sonda a říká mi informace o jeho okolí = lokální mikrostruktura
- Sledování hyperjmených interakcí Mossbauerovského jádra s jeho okolím = jedná se o interakce, které nějaký způsobem ovlivňují excitační stav - Energetické stavby budou ovlivňovány svým okolím
- Mohu zkoumat vliv např. externího magnetického pole na posun či rozštěpení excitovaného či základního stavu (excitovaný/základní stav mají nějakou hladinu a budou může dojít vlivem externích jevů k jejich posuvu a nebo rozštěpení na více hladit)
- Informace o charakteru vazeb
- Informace o spinu
- Informace o oxidačním stavu
- Kvalitativní (identifikace sloučenin) i kvantitativní (poměrové zastoupení) např. fáze železa a jejich poměrové zastoupení i uspořádání. Interakce konkrétního nuklidu se svým okolím.
- Využívá se především v materiálovém výzkumu a dále geologie, farmaceutický průmysl, biologie/medicín. Spíš ale prostě ten materiálový výzkum a je to.

6.1.6 Hyperjemné interakce

Jedná se o interakce, které nějaký způsobem ovlivňují excitační stavy, a to jak posunem nebo štěpením na více hladin. Bavíme se o:

- elektrické monopólové interakci – izomerický posun
- elektrická kvadrupólová – kvadrupólové štěpení
- magnetická dipólová – magnetické hyperjemné štěpení



Obrázek 15: Hyperjemné interakce

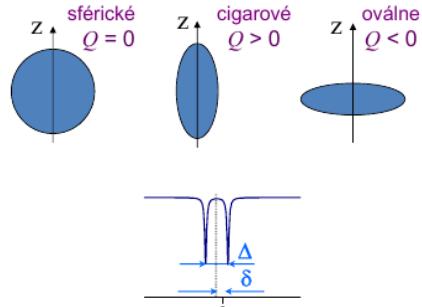
Elektrická monopólová interakce:

- interakce rozložení náboje jádra s hustotou elektronů v prostoru jádra
- izomerní posun $\delta = \frac{2\pi}{5} Z e^2 [R_e^2 - R_g^2] \cdot \rho_a - \rho_s$
- pro excitovaný, resp. základní stav platí, že poloměr jádra se mění, stejně jako hustota
- určuje s ohledem na referenční materiál (bcc-Fe)
- udává informace o charakteru vazeb, spinu, oxidačním čísle, elektronegativitě

Elektrická kvadrupólová interakce:

- interakce mezi jádrovým kvadrupólovým momentem a nehomogenitami elektrického pole
- kvadrupólové štěpení: $\Delta = \frac{1}{2} e V_{zz} (1 + \frac{1}{3} \eta^2)^{1/2}$
- jaderná podmínka: elektrický kvadrupólový moment – $eQ \neq 0$ ($I \neq 1/2$)

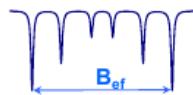
- elektronová podmínka: gradient elektrického pole od elektronů $\neq 0$ (příspěvek od mřížky a valenčních elektronů)
- dává informaci o lokační symetrii, oxidačním stavu, charaktere vazeb, spinovém stavu



Obrázek 16: Elektrické kvadrupolové štěpení

Magnetická dipolová interakce:

- interakce magnetického momentu jádra s vnitřním nebo aplikovaným magnetickým polem
- $E_{m_1} = -\frac{\mu H m_1}{I} = -g_N \beta_N H m_1$
- magnetické štěpení hladin jádra (Zeemanův jev)
- jádrová podmínka: magnetický dipolový moment $\mu \neq 0$ ($I \neq 0$)
- elektronová podmínka: intenzita magnetického pole $H \neq 0$
- platí výběrová pravidla pro jádrový spin a magnetické kvantové číslo



Obrázek 17: Magnetické kvadrupolové štěpení

6.1.7 Kalibrace

- zdroj záření: ^{57}Co v matrici Rh, Pd, Cu, Cr
- kalibrací rychlostní stupnice (převedu rychlost na energii)
- kalibrační absorbátory - bcc-Fe, $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$
- nastavení nulové rychlosti

6.1.8 APlikace Mossbauerovy spektrometrie

- strukturní informace, stechiometrie, substituce, nekrytalické systém
- identifikace fází
- Fe²⁺ a Fe³⁺
- energetické rozlišení 1 : 10¹³
- teplotní a tlakové studie

Mössbauerova spektrometria:

- výhody ☺
 - nedeštruktívna technika
 - vysoký diagnostický potenciál
 - usporiadaná vs. neusporiadaná štruktúra
 - extrémna citlosť
 - široký rozsah aplikácií
 - nevýhody ☹
 - používajú sa rádionuklidy
 - polčas rozpadu
 - bezpečnosť
 - autorizácia
-

6.2 Elektron-pozitronová anihilační spektroskopie

Udává unikátní informace o defektech v pevných látkách (především vakance, dislokace, shluky vakancí, hranice zrn - principiálně se jedná o oblast se sníženou hustotou kladného náboje – od jader :D → potenciálov jáma pro záchyt pozitronů).

Zdroje pozitronů:

- beta+ radionuklidy: jádra bohatá na protony ($p \rightarrow n + \beta^+ + \nu$), Na-22, Cu-64, Co-58
- Produkce e-e+ párů z vysokoenergetických fotonů gama: impuzní zdroj e+
- Jaderné reakce: Cd-113(n, gama)Cd-114, Cu-63(n, gama)Cu-64, kontinuální zdroj s vysokou intenzitou

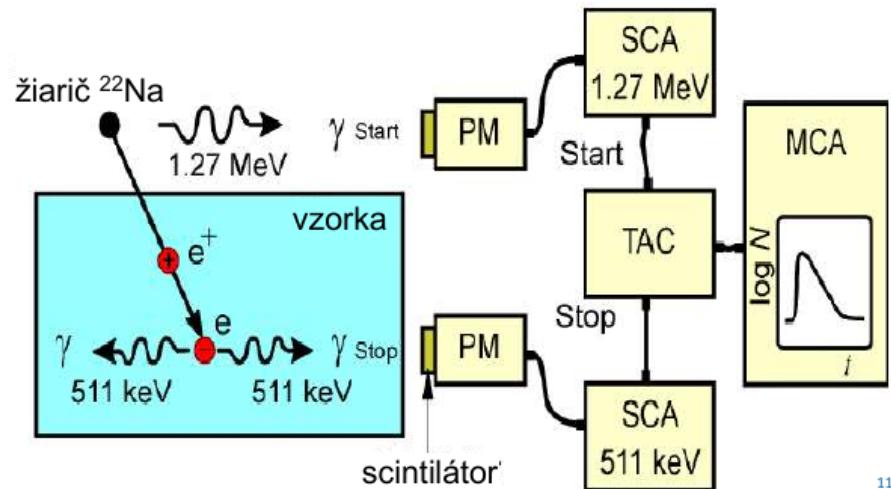
→ Zdroje pro PET: C-11, N-13, O-15, **F-18**, Ga-68 - výroba: nejčastěji cyklotron

Princip anihilace: pozitronový zářič → interakce pozitronu s elektronem → vznik dvou fotonů o energii 511 keV (nejpravděpodobnější proces).

- anihilace nenastává okamžitě - mezikámena: vázaný stav - pozitronium (para a orto pozitronium - podle toho jestli stejný nebo opačný spin pozitronu a elektronu a také podle toho jinak dlouho trvá)

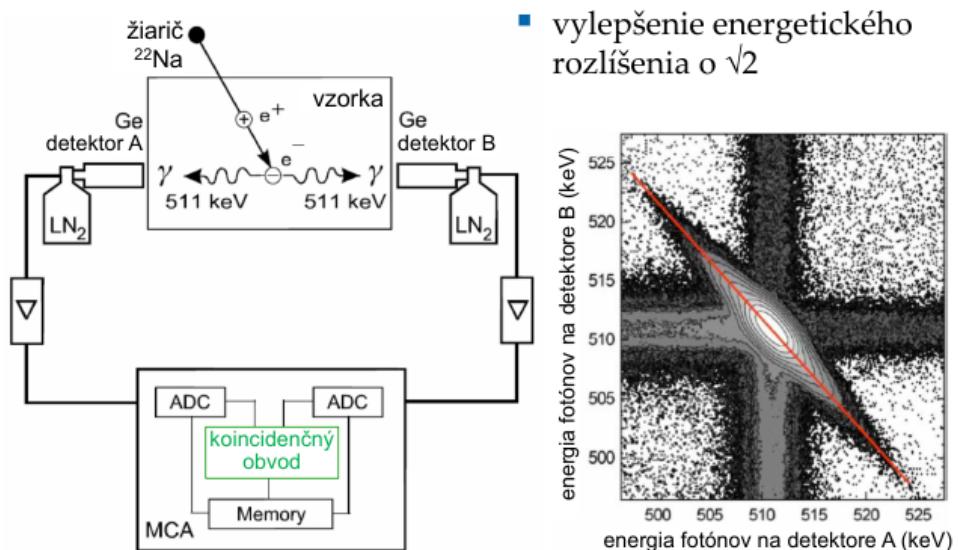
6.2.1 Experimentální techniky

- Doba života pozitronů – vyzářen pozitron a gama → měří se vyzáření pozitornu a gama
- Dopplerovo rozšíření – koincidenční změření energie obou anihilačních fotonů → charakterizace chemického okolí defektů
- Úhlové korelace



11

Obrázek 18: Metoda doby života pozitronů.



Obrázek 19: Metoda Dopplerova rozšíření- koincidenční zapojení

6.3 Neutronová aktivační analýza

- Je založena na aktivaci chemických prvků přítomných v analyzovaném vzorku.

- Jedná se o jednu z nejvíce citlivých metod chemické analýzy
- Obvykle je aplikována s využitím měření následného rozpadu aktivovaných prvků (měření gama)
- Existuje i metoda s měřením okamžitého záření a ta je využívána pokud produkt reakce má velmi krátký poločas rozpadu a nebo vzniká stabilní produkt.
- Pro NAA se dají využít neutrony všech energií, avšak nejčastěji se využívají tepelné, a to kvůli větší dostupnosti neutronů při této energii a také kvůli energetické závislosti účinných průřezů, které mají v této oblasti vysoké hodnoty.
- Množství aktivovaných RA atomů daného prvků ve vzorku je přímo úměrné množství těchto atomů a proto se dá využít i pro kvantitativní analýzu.
- Indukovaná aktivita závisí na době ozařování a poločasu rozpadu, přičemž okolo $10xT_{1/2}$ dosahuje akivita saturované hodnoty.
- Po aktivaci jader v analyzovaném vzorku následuje měření radioaktivity vzorku a identifikace RN na základě energie a intenzity emitovaného gama záření a s ohledem na poločas rozpadu.
- Množství studovaného prvku lze získat z naměřené aktivity s tím, že je nutno brát v potaz:
 - Hustotu toku neutronů (resp. energetické spektrum)
 - Energetickou závislost účinných průřezů
 - Dobu ozařování
 - Poločas rozpadu
 - Detekční účinnost trasy (geometrie, stínění, mrtvá doba atd.)
 - Dobu měření
 - Dobu chladnutí (přesun po ozařování k detektoru)

Rozdělení NAA

- Absolutní
 - Z přímého měření aktivity umožňuje stanovit množství zkoumaného izotopu, avšak vyžaduje k tomu přesnou znalost neutronového spektra, účinných průřezů s ohledem na energetický rozsah neutronového pole.
 - Málo kdy využívaný přístup protože přesná znalost neutronového spektra není v praxi obvykle k dispozici
- Porovnávací:
 - Srovnávání aktivity RN ve zkoumaném vzorku s jeho aktivitou v podobě standardu/etalonu o známé hmotnosti a složení, který byl ozářen za stejných podmínek jako zkoumaný vzorek
 - Při srovnávací metodě se nevyužívají hodnoty účinných průřezů ani neutronový tok a v případě stejně geometrie při detekci/měření tak ani absolutní detekční účinnost (pro oba měřené je to stejné, tak to není vyžadováno)

- Vysoká přesnost, avšak časově náročné pokud vzorek obsahuje více prvků, protože pro každý je nutné mít etalon zvláště.
- k_0 metoda
 - využívá k_0 faktory, které se stanovují na základě jaderných dat v kombinaci s experimentálním stanovením.
 - nezávisí na neutronovém toku a charakteristikách detektoru
- Instrumentální NAA – toto známe a děláme na KJR.
 - Nedestruktivní metoda pro stanovení více prvků v rámci jednoho měření
 - Nežádoucím efektem je vzájemné ovlivňování prvků = Vznik jednoho RN reakcemi na dvou různých prvcích ($^{26}\text{Mg}(n;\gamma)^{27}\text{Mg}$ a $^{27}\text{Al}(n;p)^{27}\text{Mg}$) = Tento problém je ovšem řešitelný v případě, kdy jeden z prvků produkuje i další radioaktivní nuklidu a dále také pokud je rozdíl v energetické závislosti účinných průřezů na energii neutronů, tak se dá použít vhodný filtr jako např. Cd.
 - V praxi se měří tak, že se vzorek ozáří v reaktoru na saturovanou hodnotu, pak se nechá vychladnout (snížení aktivity) pokud je moc naaktivovaný a pak se odnese do gama spektrometru a měří se gama záření z rozpadu RN. Z naměřeného spektra se poté stanovuje kvantita a kvalita složení materiálu.

6.3.1 Nastavení experimentálních parametrů

- V rámci tohoto měření, tak je vhodné mít odladěnou dobu ozařování (ať to není zbytečně moc a aktivita dlouhodobě žijících RN není moc vysoká)
- dobu vymření (chceme minimalizovat aktivitu všech RN kromě toho, který chceme měřit)
- Doba měření (měla by být kratší než nějaký významnější pokles aktivity vzorku - pak mi do toho začne hrát roli pozadí a Rn, K a U)
- při ozařování dochází ke vzniku více aktivačních produktů z jednoho prvku (pro ověření lze měřit dlouho a zaměřit se na ověření přes poločas rozpadu). Popřípadě aktivační produkty obvykle emitují γ fotony o více energiích, čímž je možné taky jednoznačně stanovit.
- Měřící geometrie (mrtvá doba)
- Velikost vzorku: zbytečně velký vzorek představuje riziko samostínění, samoabsorpce gama záření či zbytečně velkou aktivitu nebo problematické manipulace (to platí i pro zbytečně malý vzorek).
- Tok primárních částic přímo ovlivňuje úroveň produkované aktivity.
- Ve výsledném výpočtu reakční rychlosti, resp. obecně měření je nutné zohlednit několik faktorů = plocha pod píkem při měření, počet částic v látce na počátku, oprava na čistou dobu měření, doba ozařování, rozpad při vymírání, rozpad při měření, Radiační výtěžek (oprava na intenzitu gama přechodu), oprava na efektivitu detektoru pro danou geometrii (detekční účinnost). Korekce na nerovnoměrné ozařování, korekce na samoabsorpci.

Využití a aplikace NAA:

- Monitoring životního prostředí
- Zajištění jakosti v průmyslu
- Hygienické studie
- Certifikace referenčních materiálů
- Stopové prvky
- Kvalita půdy
- Analýza uhlí

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

Jedná se o metody založené na využití farmaceutických radionuklidů, a to ve formě absorpcie v těle nebo zavedením do lidského organismu. Jako detektory jsou většinou využívány scintilátory, proto metody dělíme na:

- dynamickou scintilografii – sleduje časové změny rozložení radionuklidů, např. činnost orgánů,
- planární scintilografie – statická vizualizace.

7.1 Zdroje záření

V medicíně lze využívat různé druhy zdrojů:

- radionuklidy
 - γ záření z jaderných reakcí, jsou definovány energií a poločasem rozpadu, musí být vyráběny např. na cyklotronech,
 - ^{99m}Tc – γ -kamera, ^{18}F – PET, ^{123}I – γ -kamera, ^{131}I – terapeutický zdroj (prostě ti to vysmaží mutující buňky v nádoru), ^{11}C – PET, ^{67}Ga – γ -kamera, ^{81}Rb – PET
- každý ten zdroj se používá na něco trochu jiného, na diagnostiku mozku použijí asi nějaký jiný než na diagnostiku sleziny atd.*

7.2 Diagnostika

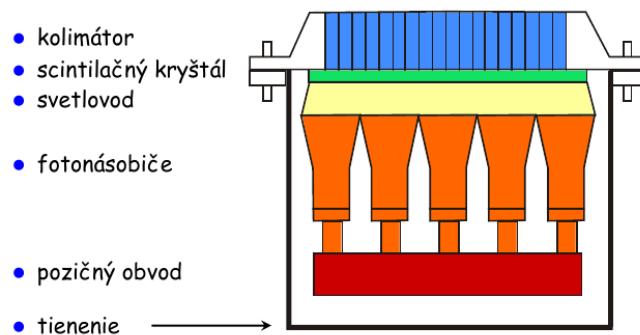
Dělíme podle činnosti:

- morfologická (uspořádání, tvar, velikost),
- funkční (činnost orgánů),
- dynamická (časová závislost).

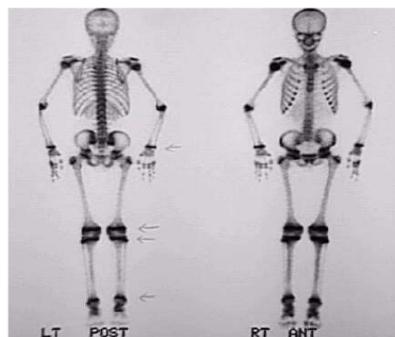
Podle usporádání:

- absorpční – RTG, CT,
- emisní – PET, gamma kamera, magnetická rezonance,
- kombinovaná – NAA, CT+PET.

7.3 Gamma kamera



Obrázek 20: Základní komponenty gamma kamery



Obrázek 21: Celotělový snímek z gamma kamery

Kolimátor:

- paralelní mnohokanálový kolimátor → ovlivní směr fotonů, geometrické zorné pole kamery, prostorový rozptyl, citlivost systému – výběr dle energie registrovaných fotonů, rozlišení, skenovací hloubky a požadované citlivosti
- výsledný obraz – počet otvorů, průměr otvorů, délka jednotlivých trubic, materiál atd.

Výběr radionuklidu:

- poločas rozpadu musí mít několik hodin, produkované γ musí ít stovky keV, lehko zabudovatelný do farmaka, v nemocnici musí vydržet několik dní
- typicky se používá ^{99m}Tc

7.4 Počítačová tomografie – CT

7.4.1 Princip

Založená na zeslabení svazku RTG záření (absorpční metoda):

$$I = I_0 \cdot \exp(-\mu \cdot t).$$

CT: mám sadu j řádků a i sloupců, každý detektor sbírá informaci o zeslabení

$$I_{12} = I_0 \cdot \exp(-(\mu_1 + \mu_2) \cdot \Delta t)$$

$$I_{34} = I_0 \cdot \exp(-(\mu_3 + \mu_4) \cdot \Delta t)$$

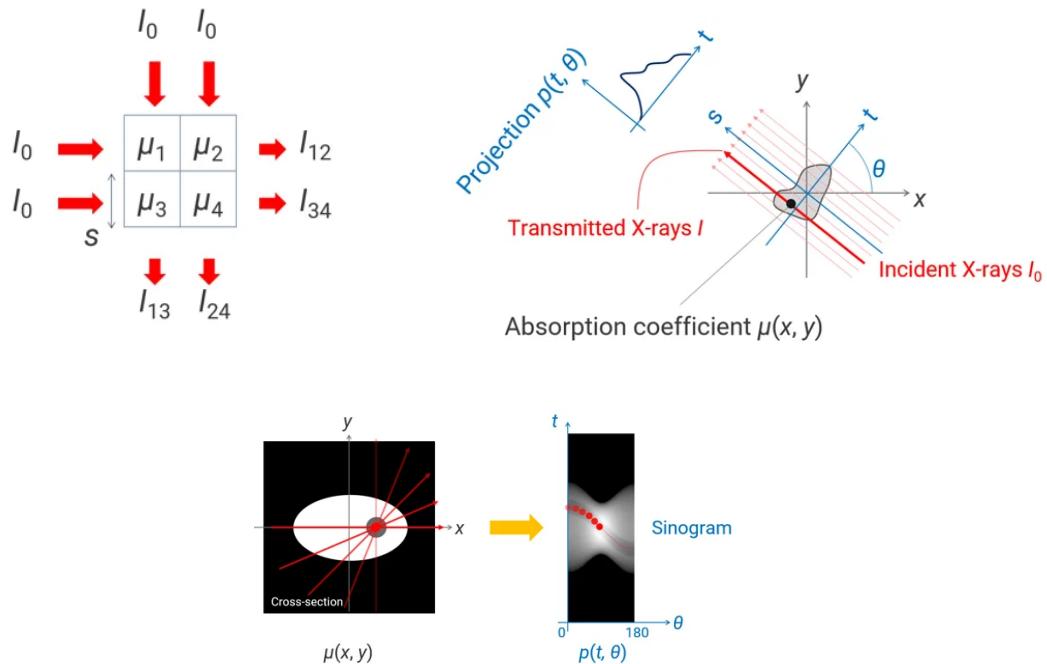
$$I_{13} = I_0 \cdot \exp(-(\mu_1 + \mu_3) \cdot \Delta t)$$

$$I_{24} = I_0 \cdot \exp(-(\mu_2 + \mu_4) \cdot \Delta t)$$

Přes získané intenzity $I_{12}, I_{34}, I_{13}, I_{24}$ jsem schopný zrekonstruovat koeficienty μ_i ve všech blocích. Ve skutečnosti je ale bloků výrazně více

Generované RTG záření prochází tělem, na druhé straně gantry jsou detekován sadou scintilátorů. Získané data tvoří projekci, kompletní sada zeslabení v závislosti na úhlu θ a vzdálenosti t je pak sinogram. Následně je obraz rekonstruován.

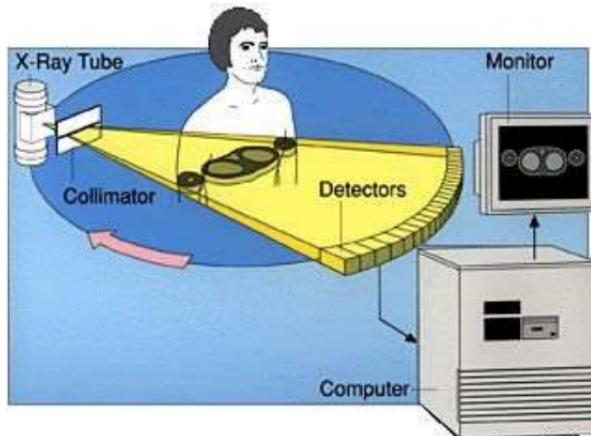
Sinogram je kompletní soubor projekcí, ukazuje grafickou závislost polohy objektu od úhlu projekce.



Kontrast se hodnotí vůči koeficientu zeslabení pro vodu, jednotky Hounsfield. Pokud budu proces opakovat a posouvat spirálou axiálně podél těla → dostanu 3D obraz.

7.4.2 Základní součástky CT tomografu

- gantry,
- RTG trubice,
- kolinátor a filtr,
- detektory,
- systém získávání informací o odezvě,
- vyšetřovací lůžko.



7.5 PET

Metoda založená na pozitron-elektronové anihilaci. Zdroj pozitronů → beta rozpad.

7.5.1 Základní součástky PET tomografu

- gantry,
- vyšetřovací lůžko,
- systém detektorů,
- počítač,
- laserové zaměřovače.

Zdroj pozitronů: nejčastěji ^{18}F v deoxyglukóze. Detektory jsou scintilační detektory (NaI(Tl), berylium germaniový, gadolinium-křemíkový, lutecium-křemíkový), počet detektorů udává rozlišení (tisíce).

Princip je podobný jako u CT, pomocí detekovaných fotonů z anihilace je pro daný úhel vytvořena projekce, kompletnej projekce tvoří sinogram:

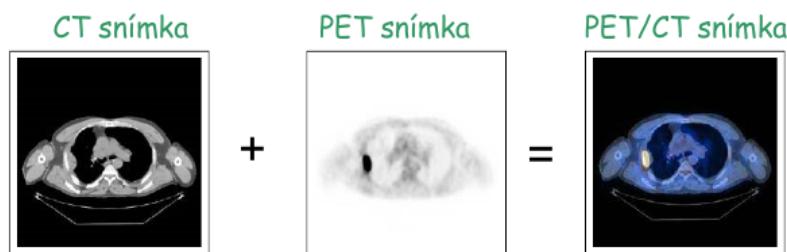
sinogram → rekonstrukční algoritmus → finální obraz.

7.6 Rozlišení obrazu

Co narušuje obraz:

- útlum – dáné tloušťkou tkáně, fotoefektem, Comptonovým jevem (sekundární gamma je tlumeno),
- Comptonův rozptyl,
- náhodná koincidence.

Často mohu kombinovat CT a PET. Z CT získám anatomickou strukturu, z PET biologické procesy.



Obrázek 22: Snímky z CT a PET tomografie

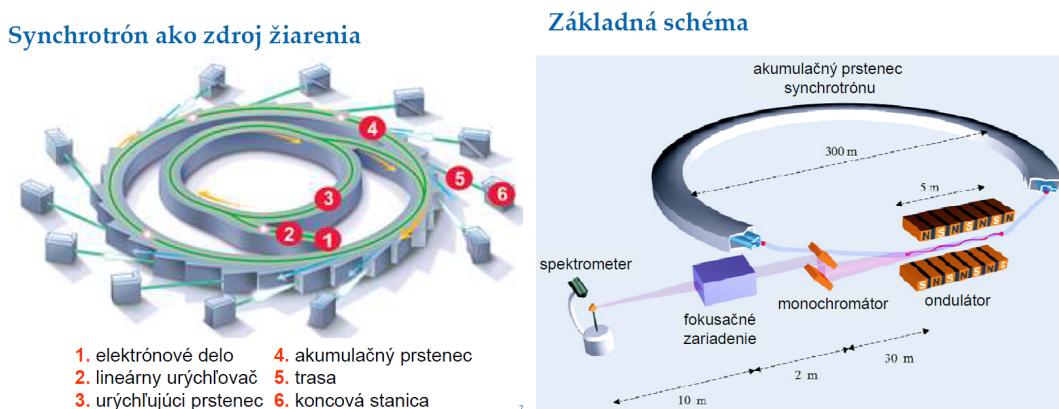
8 Využití synchrotronového záření v materiálovém výzkumu: získávání synchrotronového záření a jeho vlastnosti, příklady experimentálních technik

Synchrotronové záření, někdy také nazývané jako magnetické brzdné záření, je záření vysílané relativistickými elektronami kroužícími v magnetickém poli a vzniká tak při pohybu nabité částice se zrychlením. Dochází tak k uvolňování EM záření. Jelikož je zrychlení vektorové, nemusí docházet ke zpomalování nebo zrychlování nabité částice, ale stačí změna dráhy pohybu a tím se také utváří zrychlení, jež vede na uvolnění části energie do okolí.

Dále platí, že pokud je při změně dráhy pohybu rychlosť částice malá, tak emitované záření je uvolňováno izotropně. Pokud je rychlosť vysoká (v/c je cca 1), tak je záření soustředěno do kuželu ve směru pohybu částice s určitým úhlem rozevření kuželetu, jež závisí na Lorentzovu faktoru, který je neprímo úměrný rychlosći (čím větší rychlosť tím menší rozevření kuželetu).

8.1 Schéma uspořádání synchrotronu

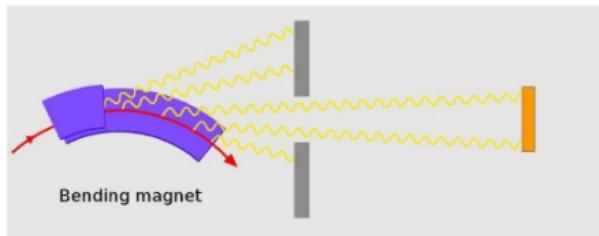
Synchrotron je cyklický urychlovač častic, jež se skládá z elektronového děla, lineárního urychlovače pro prvotní zrychlení částice a posléze ze dvou prstenců (urychlující a akumulační). Vývodem akumulačního prstence je trasa vedoucí do koncové stanice, kde je realizován experiment.



8.2 Tvorba synchrotronového záření

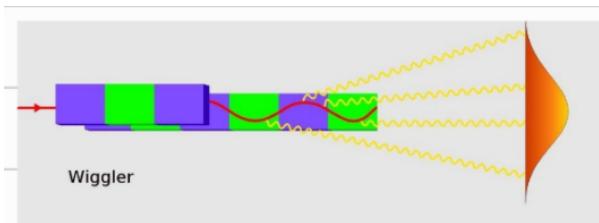
Bylo již řečeno v jakých případech a jak vzniká synchrotronové záření, ale jak se to dělá v praxi? V praxi se využívá tzv. vkládacích zařízení, kterými jsou: ohybací magnet (bending magnet), Wigglery a Ondulátory.

- **Ohybací magnet:** slouží k zakřivení dráhy pohybu nabité částice a přitom je tečně k dráze pohybu uvolňováno záření, které se pak dá kolimovat.



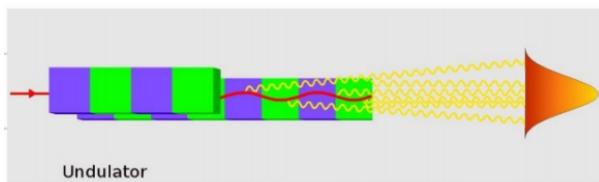
Obrázek 23: ohybací magnet

- **Wiggler:** zařízení, jež je tvořeno větším počtem dvojic permanentních magnetů, které zapříčiní klikacení dráhy pohybu částice a to způsobuje tvorbu širokého svazku nekoherentního záření. Intenzita záření je úměrná N (počet magnetů).



Obrázek 24: Wiggler

- **Ondulátor:** je to to samé co wiggler (opět permanentní magnety), ale magnety jsou slabé a je to asi i delší. Ta částice se tudíž neklikatí takto a výsledná intenzita emitovaného záření je dokonce úměrná N^2 , kde N je počet magnetů



Obrázek 25: Ondulátor

8.3 Vlastnosti synchrotronového záření

- Spojité a velmi široké spektrum (od IR po RTG záření).
- Vysoká monochromatizace.
- Při využití ondulátorů, je záření koherentní.
- Stabilita svazku.
- Impulzní emise (záření je emitované česticemi a podle počtu částic je to více spojité a nebo více impulsní).
- Přeladitelnost (můžeme si vybrat energii) → více stupňová monochromatizace na monokrys-talech Si → Monochromátor s vysokým rozlišením (rozptyl cca 1 meV) → kolimace a fokusace pomocí Be čočky nebo K-B zrcadlo a tím fokusace až na rozměry $4 \times 10 \mu\text{m}^2$.

- Polarizované.
- Brilience = kombinace toku, velikost zdroje, divergence svazku = jedná se v zásadě o trochu komplikovanější Intenzitu pro popis elektromagnetického záření.

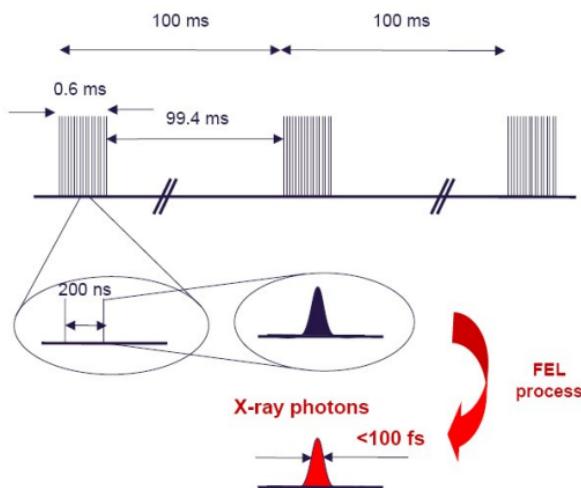
Využití

- Dá se využít pro jaderný rezonanční rozptyl (studium hyperjemných interakcí, vibrační vlastnosti jader, magnetické přechody apod., a to za extrémních vnějších podmínek = magnetické pole, kryo, vysoká teplota apod..).
- RTG mikroskopie – využití RTG svazků s rozlišením v řádu desítek nm a zobrazení tenkých vrstev a povrchů.
- Transmisní X-ray mikroskopie (TXM) – Dobrý kontrast, vysoké rozlišení.
- RTG sepktroskopie = měření chemického složení.
- RTG absorpční spektroskopie = informace o typu a vzdálenostech sousedních atomů.
- RTG tomografie = 3D obrazy drobných objektů s velmi vysokým rozlišením na úrovni mikrometrů.

8.4 XFEL

Zařízení XFEL (X-Ray Free Electron Laser) je zařízení, které je v podobě lineárního urychlovače (European XFEL, SwissFEL) a umožňuje lineárně urychlovat elektrony až na energie 17 GeV. Urychljené elektrony pak projdou ondulátorem a vzníká záření jako ze synchrotronu, které má rozsah energií od 0,01 - 20 keV (velmi malá vlnová délka).

- Velmi malá krátkost pulsů (cca desítky fs)
- O 10 řádů vyšší brilience jako u 3. generace sychotronů.
- V zásadě jsou dány frekvence na balík (jak často přichází balík elektronů, resp. pulsu), ale pak je ještě samotná frekvence v rámci balíku a proto je krátkost pulsů velmi malá.



Obrázek 26: časová struktura pulsů fotonů

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 vemu 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 popsáné v Zákoně č. 505/1999 Sb. o metrologii. Obsaženy jsou dále odvozené jednotky, násobky, díly 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, rychlosť, ...

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, ...

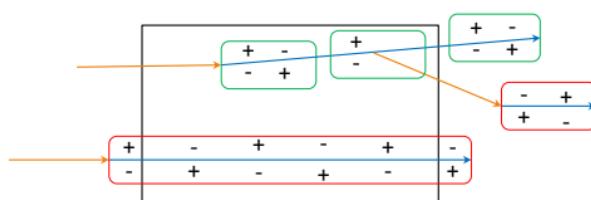
9.2 Jednotky a veličiny v dozimetrii

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 27: expozice

Absorbovaná dávka

Vyjadřuje 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 jž 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 nabité 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 + zhášecí 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 mrvou dobu a je tedy hodně dobře schopen detektovat 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 naplň v detektoru je přítomna za účelem zesílení vstupního signálu = plynové zesílení. Proto je proporcionální počítáč vhodný pro detekci záření malých energií, které je pak třeba zesílit právě přítomným plynem (ionizace plynu k zesílení vstupního signálu, a to řádové E2 až E3).

Proporcionální počítáč se používá k měření α a β záření.

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

Druhy proporcionálních počítáčů:

- 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 plynných 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 natlakováné, tak se tam vejde více plynu a tím se mi zvyšuje pravděpodobnost interakce záření s plynem).

Korekce:

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

- Koncový efekt = Na okrajích elektrod je elektrické pole deformované. Lze kompenzovat využitím dvou počítaců 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 počítací stejně 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 rozpouštěn (podle druhu měřeného vzorku se používají rozpouštědla jako je toulen, 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 účinnosti fotokatody daného fotonásobiče (kvalita fotonásobiče).

10.2.1 TDCR

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

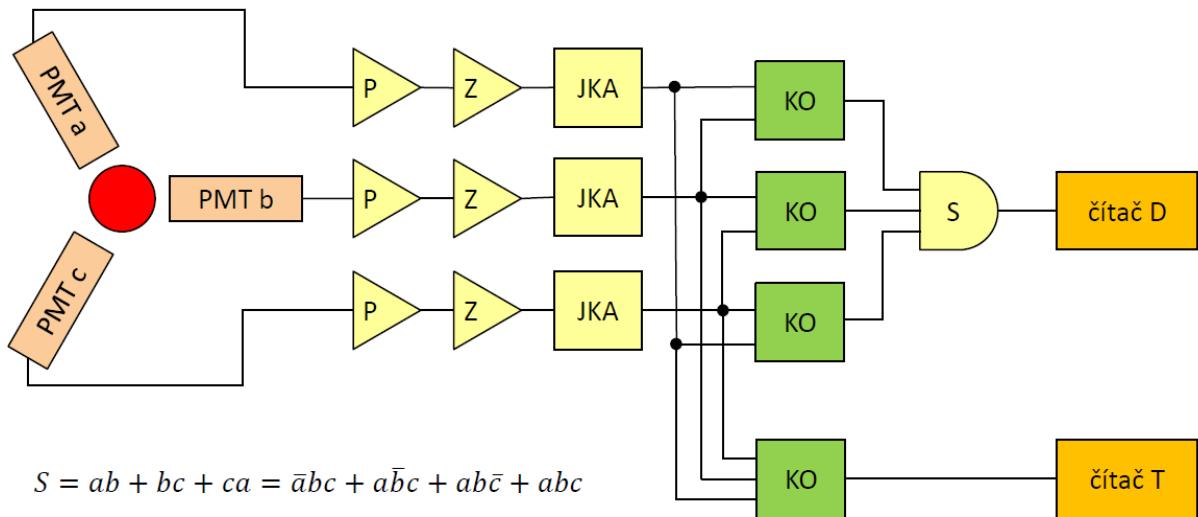
počítací účinnost (ε_D), neboli parametr TDCR (v zásadě detekční účinnost) se určuje na základě srovnání experimentu a modelu → v praxi je měřeno TDCR pro různé účinnosti detekce, které mohu měnit defokusací PMT, optickými filtry atd. Tím získávám závislost naměřené aktivity na TDCR (aktivita by měla 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:

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

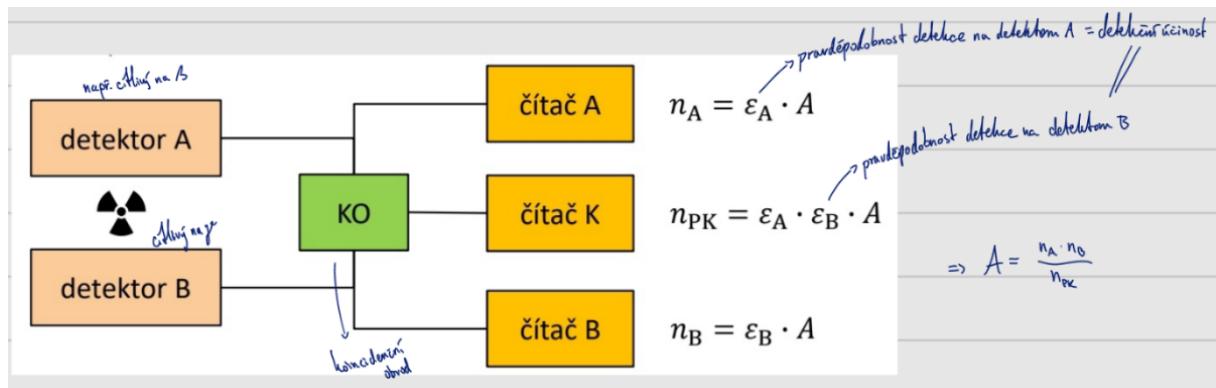
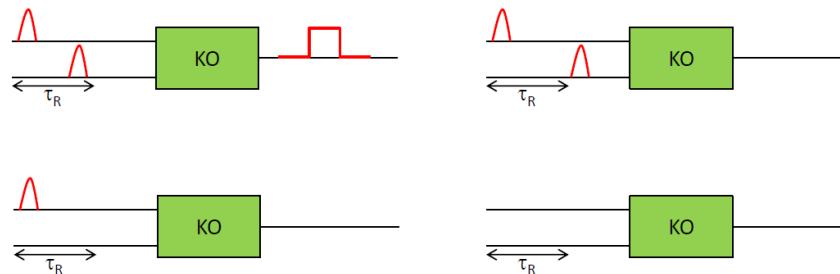


Obrázek 28: TDCR

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 více 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 "současnemu" 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.

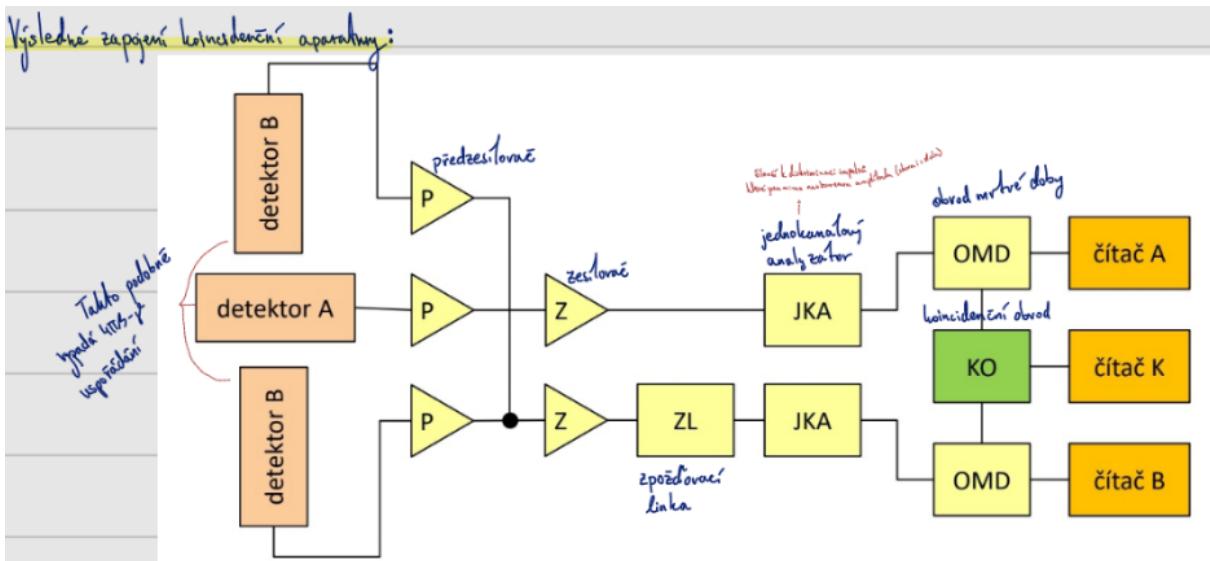


Obrázek 29: jednoduché koincidenční zapojení

Rozlišovací doba může být stanovena dvěma způsoby, a to:

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

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



Obrázek 30: 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 témař 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 mřtvé doby** = Obvod mřtvé doby je navržen tak, aby po detekci jednoho signálu zablokoval možnost detekce dalších signálů po určitou dobu. Mřtvá 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:
 - $4\pi \beta - \gamma$: nuklid ^{24}Na , ^{42}K , ^{56}Co , $^{59}\text{Fe} \rightarrow$ při této koincidenční metodě je RN vložen do interního počítáče (měření β) a okolo počítáče 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 pomér naměřených četností/aktivita.
- Citlivost kanálu β na záření γ řešíme 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

- **Extrapolační metoda** – Spočívá v uskutečnění série měření pro různé hodnoty detekční účinnosti v kanále β ($\varepsilon_\beta = \frac{n_k}{n_\gamma}$), čehož docílíme např. překrytím vzorku filmem či změnou diskriminace/zesílením (upravujíme 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 $\varepsilon_\beta = 0$). Všechny výše zmíněné opravy lze uvažovat ve společném tvaru

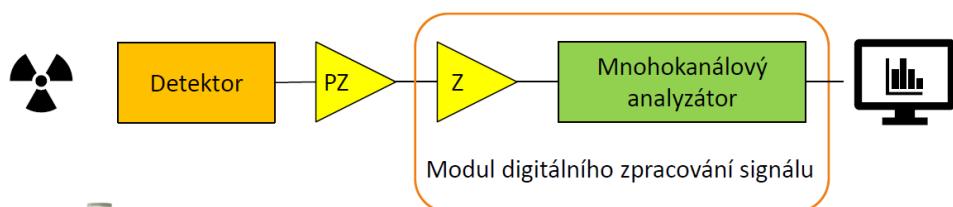
$$M = \frac{n_\beta n_\gamma}{n_{PK}} = A \cdot [1 + S \cdot k]$$

- **Stopovací metoda** – Přimíchám čistý ZIZ β se vzorkem $\beta - \gamma$, použiju princip extrapolační 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) = $\varepsilon_\beta A_{xs} = A_x + A_s$.
- záhytové radionuklidy – měřím koincidenci záření X_K a X_L - čistý záhyt elektronu
- záhytové radionuklidy – měřím koincidenci záření $X - \gamma$ - obdoba kaskádám $\alpha - \gamma$, větší uplatnění korekčních faktorů, oboje měření se záhytovými 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 elektronů 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 (2x511 keV) a ideálně o něco vyšší. Dochází k přeměně fotonu v blízkosti jádra atomu na pár elektron a positron. Přebytek energie je předán jádru v podobě hybnosti. Při jejich zániku rekombinací vzniká tzv. anihilační fotony, které mají $2x\gamma$ pod úhlem 180° o velikosti 2x511 keV. Tato energie je tam dána jako podmínka, protože klidová energie, resp. hmotnost elektronu i positronu je 511 keV.



Obrázek 31: Spektrometrická trasa

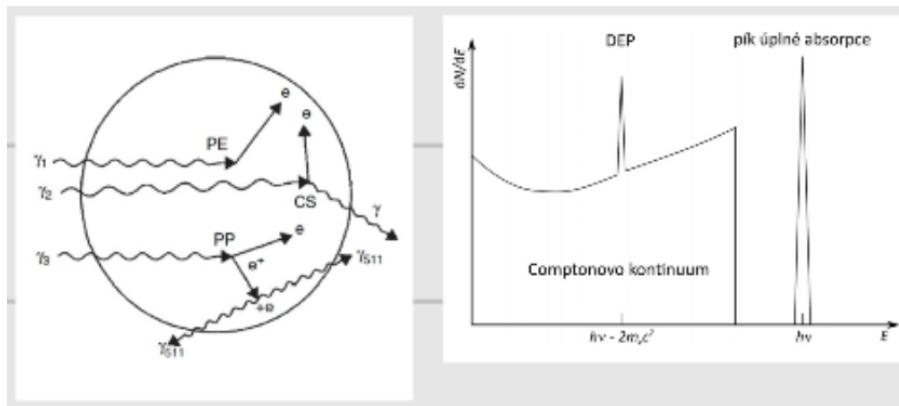
MCA = Mnohokanálový analyzátor – počítá impulzy z detektoru v závislosti na velikosti jejich amplitudy. Umožňuje nastavovat počet kanálů (jejich šířka energií), diskriminace, oprava na mrtvou dobu, zesílení, ...

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 chlazený (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 čež se používají materiály s vysokým hmotnostním číslem a také vícevrstvé řešení (Pb, Cd, Cu).

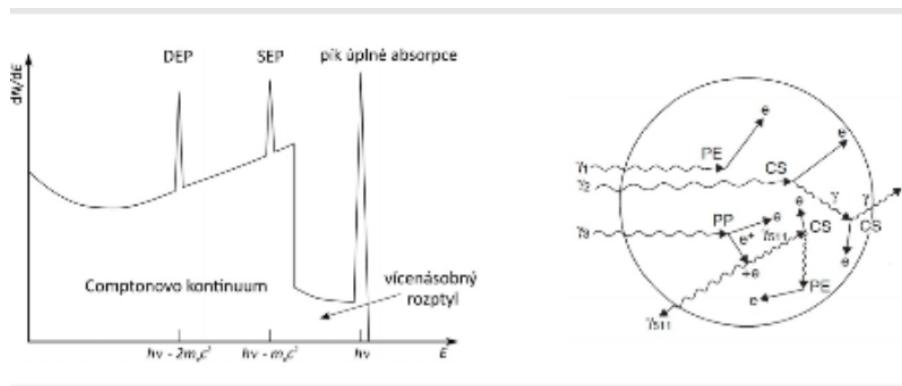
Spektrum detektorů různých velikostí:

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



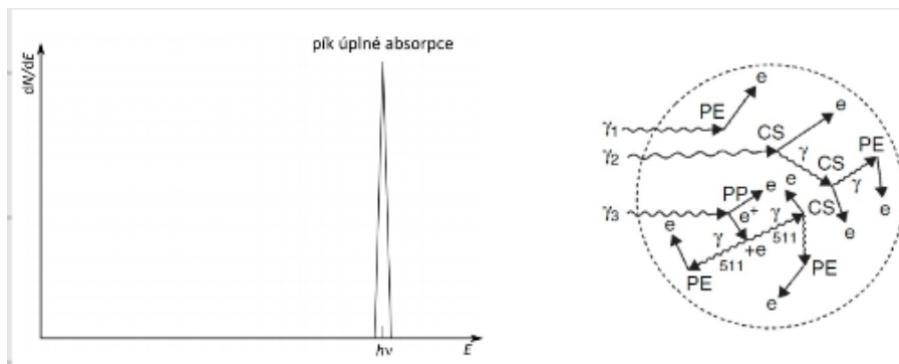
Obrázek 32: male detektory spektrum

- 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 33: Středně velké detektory spektrum

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



Obrázek 34: Velké detektory spektrum

Spektrometrické stanovení aktivity:

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

Deteční 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 spontánního 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 3-He, 4-He a 4-He. 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 jádrex 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 budě pomocí koincidenční metody nebo gama spektrometrií a následně přepočet 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), mrтvá doba detektoru, radiační výtěžek (pravděpodobnost rozpadu tím procesem, který chci měřit).

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

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

Výhody:

- Měření není ovlivněno asymetrií zdroje.
- vysoký účinný průřez pro absorpci neutronů na ^{55}Mn je znám s vysokou přesností.
- Metoda 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 $F = N \cdot \sigma \cdot \phi \rightarrow$ musíme znát σ s dostatečnou přesností.
- Obecně rozlišují metody založené na:
 - meření 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	Střední 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 35: Rozdělení neutronů podle energie

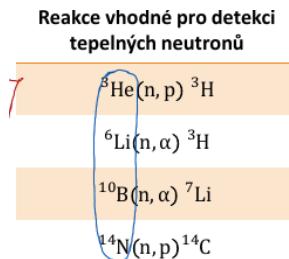
Měření indukované aktivity:

- Aktivita vzniklá v reakcích s neutrony $A(t) = n_R \cdot (1 - e^{-\lambda \cdot t})$.
- Může docházet k parazitním aktivačním reakcím → 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 → překryji detektor kadmiem → odfiltrují tepelné neutrony (kvůli ostrým maximům v σ).
- Rychlé neutrony → 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 36: Detekce tepelných neutronů – reakce

- Plynové:
 - heliové a borové proporcionální komory - plynová náplň ^3He a $^{10}\text{BF}_3$ nebo pokrytí stěny ^{10}B ,
 - štěpné ionizační komory - stěny poryté 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 ^6Li ,
- detektory stop v pevné fázi,
- aktivační – (n, γ) ,
- samonapájecí.

12.4.2 Detektory rychlých neutronů

- Dlouhý počítač – založeno an 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 nabízí spektra.
- Následně → unfolding = proces, kdy je uhodnuté spektrum neutornů” jako vstup a je následně stanovenou ”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

13.1 Princip 3S

3S = Safety, Security, Safe Guards

Pro zajištění mírového a bezpečného využívání jaderné energie a prevenci zneužití jaderných materiálů je nezbytné vytvořit legislativní a regulační rámec. V této souvislosti se v oblasti jaderného průmyslu používají a aplikují tři sféry (pojmy), jež vyjadřují různé formy bezpečnosti:

- **Bezpečnost/Safety** = Dodržovat provozní podmínky, předcházet nehodám a zmírňovat následky nehod. Vše s ohledem na ochranu pracovníků, veřejnosti a životního prostředí.

V praxi to znamená, že zajistit bezpečný provoz znamená prokázat, že jaderné zařízení neohrožuje svým fungováním bezprostřední okolí ani zaměstnance a uživatele reaktoru.

Příklad u nás na reaktoru VR1: Bezpečnost jaderného zařízení je prokazována v oblasti jaderné bezpečnosti, radiační ochrany a havarijní připravenosti. Na pracovišti je vymezeno kontrolované pásmo, ve kterém je zabezpečeno nepřetržité monitorování prostředí i osob. Vstup do kontrolovaného pásma je povolen pouze povoleným osobám splňujícím podmínky vstupu. Prostor haly je monitorován systémem RMS (Radiační monitorovací systém), který je doplněn termoluminiscenčními detektory a potřebným množstvím přenosných přístrojů. Obsluha reaktoru je monitorována pomocí filmového a elektronického dozimetru, ostatní osoby vstupující do kontrolovaného pásma jsou vybaveny elektronickými dozimetry. Roční hodnota efektivní dávky od gama záření je pro pracovníky zpravidla menší než 0,5 mSv (povolená roční efektivní dávka pro radiační pracovníky je stanovena na 20 mSv za rok), u návštěvníků a studentů se pohybuje pod prahem citlivosti měřicích přístrojů

- **Jaderná bezpečnost** = Stav a schopnost jaderného zařízení a fyzických osob obsluhujících jaderné zařízení, aby byla zajištěna kontrola štěpné řetězové reakce, odvod tepla z AZ, zabránění úniku RA látek či IZ do ŽP a omezit následky nehod.

Schopnost zařízení vychází z projektu a konstrukce zařízení, lze zvyšovat pravidelnou inovací a modernizací zařízení. Stav zařízení vystihuje aktuální stav zařízení. Zařízení je v dobrém stavu udržováno díky náležité údržbě a provozním kontrolám (např. kontrola reaktorových nádob a vnitřních částí, stav a provozuschopnost absorpčních tyčí nebo testy systému ochrany). Schopnost obsluhy hodnocena již při výběru vhodných pracovníků, kdy jsou hodnoceny odborné znalosti, ale také odbornostní charakteristiky. Schopnost obsluhy vychází z kvalitní odborné přípravy a je ověřována zkušební komisí SÚJB. Schopnost obsluhy je zvyšována (a ověřována) v rámci další odborné přípravy a periodického školení. Stav obsluhy dán aktuálním fyzickým stavem a psychickým rozpoložením. Díky pravidelnému ověřování osobnostní a zdravotní způsobilosti jsou vytvářeny podmínky, aby stav obsluhy odpovídal vysokým nárokům.

- **Radiační ochrana** = Ochrana pracovníků, veřejnosti a životního prostředí před rizikem ionizujícího záření pomocí technických a organizačních opatření.

- **Připravenost k odezvě na RMU** = Spojeno s rozpoznáním a reakcí na mimořádnou událost, která může při provozu vniknout.

RMU = událost, která vede nebo může vést k překročení limitů ozáření a která vyžaduje opatření, jež by zabránila jejich překročení nebo zhoršování situace z pohledu zajištění radiační ochrany.

- **Radiační mimořádná událost prvního stupně** = RMU zvládnutelná silami a prostředky obsluhy nebo pracovníků vykonávajících práci v aktuální směně osoby, při jejíž činnosti radiační mimořádná událost vznikla.
 - **Radiační nehoda** = RMU nezvládnutelná silami a prostředky obsluhy nebo pracovníků vykonávajících práci v aktuální směně osoby, při jejíž činnosti radiační mimořádná událost vznikla, nebo vzniklá v důsledku nálezu, zneužití nebo ztráty radionuklidového zdroje, která nevyžaduje zavedení neodkladných ochranných opatření pro obyvatelstvo.
 - **Radiační havárie** = RMU nezvládnutelná silami a prostředky obsluhy nebo pracovníků vykonávajících práci v aktuální směně osoby, při jejíž činnosti radiační mimořádná událost vznikla, nebo vzniklá v důsledku nálezu, zneužití nebo ztráty radionuklidového zdroje, která vyžaduje zavedení neodkladných ochranných opatření pro obyvatelstvo.
- **Zabezpeční/Security** = Prevence, detekce a včasná odezva na krádež, sabotáž, neautorizované vstupy, nelegální převoz a další akce zahrnující jaderné a radioaktivní materiály. Neboli: zabezpečení pracoviště je takové aby zabránilo k záměrnému zneužití či poškození zařízení a nebo k neoprávněným manipulacím s jaderným materiálem.
- Příklad u nás na reaktoru VR1: Zabezpečení pracoviště vychází ze základních funkcí fyzické ochrany, jako je včasná detekce útočníka, jeho zpomalení a adekvátní zásah. Fyzická ochrana reaktoru a jaderných materiálů, které se na něm používají, splňuje požadavky vyhlášky SÚJB o zabezpečení jaderných materiálů a jaderných zařízení, která vychází z doporučení Mezinárodní agentury pro atomovou energii.
- **Fyzická ochrana** = Systém technických a organizačních opatření zabraňující neoprávněným činnostem s jaderným zařízením nebo jaderným materiálem.
 - **Kybernetická bezpečnost** = Zajištění bezpečnosti kybernetického prostoru – HW, SW, počítačové sítě, ...
 - **Ochrana informací** = Ochrana a nakládání s citlivými informacemi, jsou to informace ovlivňující bezpečnost (omezené, důvěrné, tajné), souvisí s kybernetickou bezpečností a fyzickou ochranou.
- **Zárukový proces/Safeguards** = Včasné detekce zneužití jaderných materiálů nebo technologií zabránit šíření jaderných zbraní, poskytnutí záruky, že státy využívají jaderný materiál a jaderná zařízení pouze pro mírové účely.
- Znamená: Reaktor, resp. jaderné zařízení musí být provozováno dle pravidel stanovených smlouvou o nešíření jaderných zbraní. Zárukový proces zajišťuje permanentní evidenci a kontrolu všech jaderných materiálů na pracovišti reaktoru.
- Příklad u nás na reaktoru VR1: Základním kamenem zárukového procesu na pracovišti reaktoru je systém evidence a kontroly všech držených štěpných jaderných materiálů. Každá položka jaderného materiálu je sledována, má přesně definované místo svého uložení a svůj inventární záznam. Přesuny a manipulace jaderných materiálů lze provést pouze se souhlasem vedoucího evidence jaderných materiálů a tyto změny musí být zavedeny do evidenčních záznamů.
- Mezinárodní dohody členských států IAEA:
- **Treaty on the Non-Proliferation of Nuclear Weapon** = Dohoda o nešíření jaderných zbraní

- Dohoda o zárukách
- Výměna informací = Hlášení informací spojených se zárukovým procesem národním koordinátorem a IAEA.

Forenzika = Nástroje a metody pro vyšetřování zneužití jaderných materiálů, neschválené aktivity.

Může být těžké rozlišit bezpečnost a zabezpečení. **Zabezpečení** je spojeno se zlým úmyslem, cílenou akcí lidí, která může ohrozit další lidi, hrozba směřuje z okolí směrem do zařízení. **Bezpečnost** zahrnuje širší otázky ohrožení lidí (nebo životního prostředí) radiací, bez ohledu na primární příčinu, hrozba směřuje od zařízení směrem do okolí.

13.2 Principy bezpečného využívání jaderné energie

V rámci bezpečnosti jaderného zařízení, jehož součástí je jaderný reaktor je provozovatel (držitel lince) nucen, aby bylo za každé situace zajištěno plnění základních bezpečnostních funkcí, přičemž v analýzách prokazování uvažuje jednoduchou poruchu a hermetičnost kontejmentu.

13.2.1 Bezpečnostní funkce

Splnění všech bezpečnostních funkcí je nezbytné pro zajištění jaderné bezpečnosti.

- **Kritická bezpečnostní funkce** = ochrana celistvosti jedné nebo více fyzických bariér proti úniku RA látek.
- Musí být zachovány i při selhání nebo nesprávné činnosti jednotlivých zařízení a chybě obsluhy → musí být zahrnuto v projektu.
- Splnění základních bezpečnostních funkcí musí být zajištěno ve všech provozních stavech a ve všech etapách životního cyklu JZ.

Základní bezpečnostní funkce podle §45 odst. 2 AtZ, a §2 písm. b) vyhl. 329/2017 Sb.:

- umožňovat v případě potřeby okamžitě a bezpečně odstavit jaderný reaktor a udržovat jej v podkritickém stavu
- zabránit nekontrolovanému rozvoji štěpné řetězové reakce
- fyzikálně znemožnit vznik kritického a nadkritického stavu mimo vnitřní prostor jaderného reaktoru
- zajišťovat odvod tepla vytvářeného jaderným palivem a technologickými systémy
- zajistit stínění a zabránit úniku radioaktivní látky a šíření ionizujícího záření do životního prostředí

Základní bezpečnostní principy:

- **Administrativní opatření** = opatření pro řízení a ověřování bezpečnosti

- **Technická opatření** = technické principy uplatněné v celém životním cyklu zařízení
 - **Diverzita** = různorodost, různé principy, technologie, výrobci → snaha o vyloučení poruchy ze společné příčiny
 - **Redundance** = zálohování, vícenásobné použití → omezení jednoduché poruchy, eliminace stochastických poruch
 - **Nezávislost** = využití rozdílných metod, zdrojů
 - **Separace** = fyzické oddělení systémů → ochrana proti externím vlivům (společná příčina)
- **Kultura bezpečnosti** = Soubor charakteristik a postojů organizace i jednotlivců zajišťující, že otázkám ochrany a bezpečnosti je věnována priorita odpovídající jejich významu. Individuální i kolektivní závazek k bezpečnosti ze strany personálu na všech úrovních (včetně vedení a středního managementu). Odpovědnost organizace i jednotlivců za dodržování pravidel bezpečnosti. Podpora vzdělávání a budování prostředí otevřeného dotazům spojeným s plněním bezpečnosti. Chování managementu funguje jako vzor v pozitivním i negativním smyslu.

Principy kultury bezpečnosti:

- Individuální i kolektivní závazek k bezpečnosti ze strany personálu na všech úrovních (včetně vedení a středního managementu).
- Osobní odpovědnost za bezpečnost.
- Vedoucí pracovníci demonstrují svoje postoje k bezpečnosti.
- Respekt vůči jaderné technologii.
- Při rozhodování platí ”bezpečnost na prvním místě”.
- Trvalé ověřování úrovně bezpečnosti..
- Poučení se z chyb

13.2.2 Přístup tříступňové ochrany

- **Prevence** = Základ všeho. Předchází vzniku problémů a snahou je vyhnout se provozním stavům, které mohou vést k poškození paliva/AZ a úniku RA látek. Jedná se tak např. o: Využívání inherentních prvků (např. záporné koeficienty reaktivity), ochrané a bezpečnostní limity, pravidelné bezpečnostní hodnocení, výcvik a zajištění jakosti (dobré materiály, pořádný projekt, připravenost na nejrůznější scénáře).
- **Ochrana** = zabránit nebo potlačit nepříznivé jevy, málo pravděpodobné události a přechodové procesy, které mohou vést k poškození paliva a malým únikům RA látek. Zařízení musí mít k dispozici systémy pro zvládnutí všech myslitelných událostí (postulované události).
- **Zmírnění následků** = zahrnuje bezpečnostní systémy a systémy pro zvládání těžkých nehod, které mají zastavit nebo maximálně omezit dopady na obyvatelstvo a ŽP.

13.2.3 Definice poruch

- **Jednoduchá porucha** = událost vedoucí ke ztrátě schopnosti prvku zařízení vykonávat svou funkci, ale ostatní prvky pracují správně.

- **Porucha ze společné příčiny** = porucha nebo selhání dvou a více prvků zařízení ze stejné příčiny.
- **Deterministická porucha** = lze identifikovat a odstranit, chyby obsluhy, v projektu, v konstrukci, ve výpočtech.
- **Stochastická porucha** = nahodilá, nejsou předem známy důvody, např. nedosednutí odlehčovacího ventilu.

13.2.4 Rozdělení systémů

- **Aktivní systémy** = činnost aktivních prvků, vyžadují zdroj el. energie, např. spuštění čerpadla.
- **Pasivní systémy** = samovolný účinek, neobsahují aktiv. prvky, netřeba pohon či zdroj, např. hydroakumulátory.
- **Inherentní opatření** = využití fyzikálních zákonů a principů, např. snížení moderace při zvýšení teploty.

13.3 Ochrana do hloubky = DID

Ochrana do hloubky představuje soubor nezávislých a postupně odstupňovaných úrovní projektových opatření zálohující zajištění základních bezpečnostních funkcí. Je založena na deterministických předpokladech a postupech, ale uvažuje odstupňovaný přístup vycházející z pravděpodobnosti jednotlivých událostí. Narušení funkce projektových opatření v rámci jedné úrovně musí být rozpoznáno a napraveno nebo kompenzováno dalšími nezávislými projektovými opatřeními, implementovanými v následných úrovních.

Ochrana do hloubky je založena na sestavení fyzických bariér mezi zdrojem IZ a životním prostředím. Samotné fyzické bariéry nejsou dostatečné, mohou selhat → je potřeba prostředky na ochranu jednotlivých bariér (bezpečnostní systémy, technické a organizační opatření).

Při správné implementaci žádná jednotlivá porucha, lidská nebo organizační chyba nevede ke škodlivým účinkům, přičemž základní podmínkou je vzájemná nezávislost jednotlivých úrovní ochrany do hloubky.

13.3.1 Zajištění DID

- Efektivní systém řízení se silným závazkem vůči bezpečnosti a dodržování pravidel kultury bezpečnosti.
- Vhodná lokalita pro umístění zařízení, dobrý návrh zařízení doplněný bezpečnostními systémy s využitím diverzity a redundancy – technologie a materiály vysoké kvality a spolehlivosti, řídicí, limitační a ochranný systém, kombinace inherentní bezpečnosti a bezpečnostních systémů.
- Bezpečnostní systémy jsou poslední část prostředků, které zajišťují udržení filozofie ochrany do hloubky.

13.3.2 Strategie DID

Více úrovňovou strategii ochrany do hloubky lze shrnout následovně:

- Předejít a zabránit selhání, poruchám a nehodám.
- Pokud dojde k selhání, zabránit rozvoji nehody a zmírňovat následky.
- Kompenzace potenciálních lidských chyb a selhání zařízení.
- Udržet efektivitu bariér a ochránit veřejnost a ŽP.
- Nezávislost jednotlivých úrovní.

13.3.3 Úrovně DID

Konkrétní bezpečnostní úrovně ochrany do hloubky jsou následující:

- 1) Úroveň = Zabránění vzniku abnormálních stavů a selhání systémů důležitých z hlediska bezpečnosti → prevence.
 - Design zařízení, konstrukce, údržba, způsob provozu – konzervativní přístup.
 - Definice podmínek, které vedou k nechtěným únikům.
 - Zvážení vnitřních a vnějších rizik.
 - 1) úroveň ochrany do hloubky je zajištována normálními provozními systémy.
- 2) Úroveň = Kontrola abnormálních stavů a detekce poruch.
 - Aplikace postupů pro zvládání odchylek od normálního provozu, postupy pro rychlý návrat do normálu. Využívá se i inherentní bezpečnosti.
 - Zajišťuje včasnu detekci selhání, kontrolu nad vznikem abnormálního provozu a co nejrychlejší navrácení provozu do běžného stavu.
 - Periodické kontroly zařízení a údržba, nedestruktivní testování.
 - Ochranné systémy: snížení výkonu, automatické odstavení, předpisy pro abnormální provoz, systém limitování maximálního výkonu reaktoru, systém kontroly teploty, pojistovací ventily zamezuje velkému převýšení tlaku v primárním a sekundárním okruhu a další řídící a limitační systémy.
 - 2) úroveň ochrany do hloubky je zajištována normálními provozními systémy
- 3) Úroveň = Kontrola projektových nehod (DBA), zabránění poškození AZ, lokalizace RA látek.
 - Bezpečnostní systémy pro zvládání projektových havárií, tyto systémy mají pedevším zabezpečit dostatečné chlazení aktivní zóny a tím předejít jejímu taven.
 - Aplikace základních bezpečnostních principů (diverzita, redundancy, separace, nezávislost).
 - Prevence chyb se společnou příčinou, a jednoduché chyby.
 - Bezpečnostní systémy mají za cíl bránit vzniku DBA, zvládat DBA a bránit především jejich rozvoj do BDBA/DEC A, tj. potlačují rozvoj poruch zařízení a chyb obsluhy.

- Řízení havárie je dáno projektem a probíhá podle havarijních provozních předpisů.
 - Bezpečnostní systémy: systémy havarijního chlazení AZ, systém nouzového napájení PG, systém snižování tlaku v IO (přepouštěcí stanice), systém lokalizace následků havárie (kontejnment, barbotážní věž).
- 4) Úroveň = Kontrola havarijních stavů (BDBA/DEC B, SA), prevence rozvoji havárie do radiační havárie, omezování následků vážných havárií a udržení celistvosti KTMT.
 Cílem 4) úrovně je, za předpokladu, že první tři úrovně ochrany do hloubky nezabrání poškození aktivní zóny, minimalizovat následky nadprojektové havárie a zabránit úniku radioaktivních látek do životního prostředí.
- Cíl je zabránit velkému úniku RA látek z AZ.
 - Ochrana kontejnmentu (chlazení, ventilace).
 - Využití nestandardních prostředků (např. mobilní DG, požární voda pro sekundární chlazení) – významná role operátorů.
 - Bezpečnostní systémy pro zvládání těžkých havárií: lapač roztavené AZ, systém kontroly vodíku – rekombinátory vodíku, systém pasivního odvodu tepla z KTMT, dodatečné filtrační systémy.
- 5) Úroveň = Omezování radiačních následků pro pracovníky a obyvatelstvo při významném úniku RA látek (radiační havárie)
- Tvoří havarijní plány a prostředky pro jejich realizaci, sloužící pro co největší zmírnění následků havárie (evakuace, likvidace havárie atd.).
 - Shromažďování a hodnocení informací o úrovni očekávaných expozic.
 - Krátkodobé a dlouhodobé ochranné akce, příprava adekvátní reakce na situaci (zařazení zodpovědných úřadů).
 - Ukrytí, evakuace, jódová profylaxe, kontrola zemědělství a rybolovu.
 - Řízení připravenosti k odezvě, havarijní plánování, vnitřní a vnější havarijní plán.

13.3.4 Fyzické bariéry DID

Počet jednotlivých bariér závisí na zdrojovém členu (ETE jich má 5), účinnosti bariér, pravděpodobnosti výskytu a závažnosti nepříznivých interních i externích událostí.

Projekt musí zabránit ohrožení integrity fyzických bariér, a to zejména poslední a tím zabránit úniku RA látek do ŽP. Cílem je však zamezení selhání jedné nebo více bariér při ohrožení.

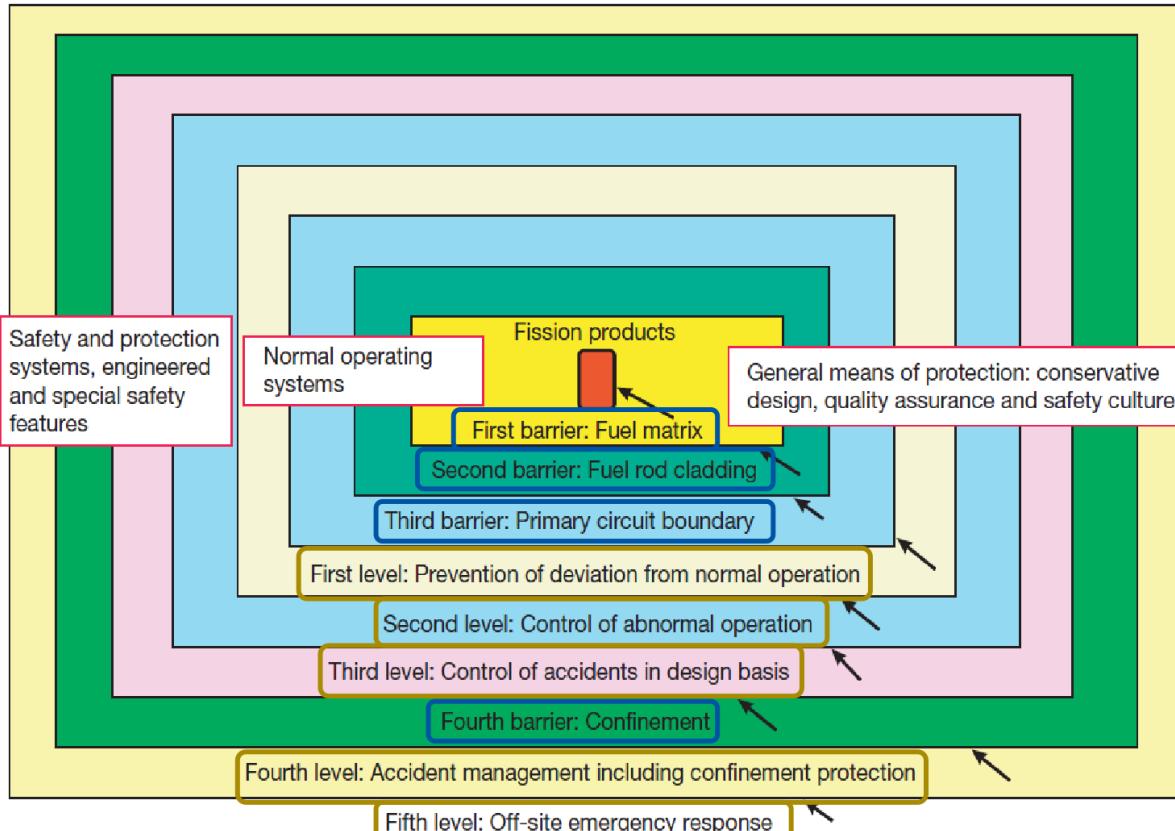
Vyloučit závislost, tj. zabránit selhání jedné bariéry v důsledku selhání jiné bariéry (stejně jako pro jednotlivé úrovně DID).

Není dovolen provoz při selhání jedné z bariér (jedná se o výzmnou událost a je nutné prosetřít).

- a. Palivová tableta – chemická a fyzikální struktura paliva.
 - b. Pokrytí palivových proutků – hermetická hranice.
 - c. Tlaková hranice primárního okruhu.
- d. Kontejnment (nebo jiný systém lokalizace RA látek pokud nemám kontejnment → barbotážní věž).

Úroveň	Stavy JE	Skupiny událostí	Dílčí bezpečnostní cíle	Prostředky úrovní ochrany do hloubky
1	Normální provoz	Provozní režimy a provozní zatížení	<ul style="list-style-type: none"> prevence odchýlení provozního stavu JE od normálních podmínek prevence poruch komponent JE důležitých pro bezpečnost 	<ul style="list-style-type: none"> provozní systémy kontroly a řízení JE konzervativní projekt a vysoká kvalita provedení a provozování JE
2	Abnormální provoz	Očekávané provozní události (AOO)	<ul style="list-style-type: none"> detekce vzniku a zvládání AO prevence přechodu provozního stavu JE do havarijních podmínek 	<ul style="list-style-type: none"> limitační systémy kontroly a řízení JE, a monitorovací funkce, ochrany SKK provozní systémy a postupy
3	a	Základní projektové nehody	Základní projektové nehody s se samostatnou iniciacíí událostí	<ul style="list-style-type: none"> detekce vzniku a zvládání základních projektových nehod a zvládání scénářů vyvolaných AOO (PIU abnormálního provozu)
	b	Rozšířené projektové podmínky	Rozšířené projektové podmínky bez poškození jaderného paliva	<ul style="list-style-type: none"> detekce rozšířených projektových podmínek a jejich zvládání bez závažného poškození jaderného paliva
4	Rozšířené projektové podmínky	Těžké havárie	<ul style="list-style-type: none"> detekce vzniku a zajištění zvládání těžkých havárií prevence vzniku radiační havárie v okolí JE 	<ul style="list-style-type: none"> havarijní informační systémy projektová a alternativní prostředky a příslušné havarijní postupy pro kontrolu a řízení systémů pro zmírnování těžkých havárií
5	Situace při radiační havárii	Radiační havárie	<ul style="list-style-type: none"> detekce a zmírnování následků radiačních nehod a radiačních havárií 	<ul style="list-style-type: none"> havarijní informační systémy projektová opatření podle vnitřního a vnějšího havarijního plánu JE

Obrázek 37: Úrovně ochrany do hloubky.



Obrázek 38: Bariéry a úrovně ochrany do hloubky.

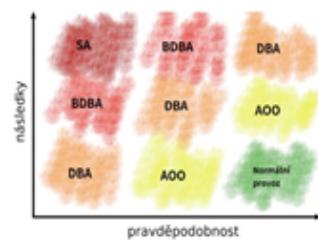
14 Klasifikace událostí na jaderných zařízeních a rozbor vybraných událostí

14.1 Klasifikace událostí na jaderných zařízeních

14.1.1 Provozní stavy reaktoru dle Vyhlášky č. 329/2017Sb.

- **Normální provoz** = V mezích limitů a podmínek, zahrnuje všechny stavy a operace plánovaného provozu.
- **Abnormální provoz** = Odchylky od normálního provozu, které jsou očekávané a nevedou k poškození SKK s vlivem na jadernou bezpečnost
- **Havarijní podmínky** = Stav jaderného zařízení, který není provozním stavem. Často se jedná o události negativně ovlivňující bezpečnost provozu a vedou k poškození zařízení a porušení limitů.
 - **Projektové nehody (DBA)** = Havarijní podmínky, při kterých správná funkce bezpečnostních systémů zajistí, že nedojde k překročení odpovídajících referenčních úrovní nebo limitů ozáření → limitní nehody, poškození AZ a únik RA látek by měl zůstat v rámci limitů, např. LOCA.
 - **Nadprojektové nehody (BDBA)** (v zákoně definováno jako rozšířené projektové podmínky) = Havarijní podmínky vyvolané scénáři závažnějšími než DBA, které jsou zohledněny při projektování jaderného zařízení → vážnější důsledky než DBA, např. LOCA + SBO.
 - **Těžká havárie (SO)** = Havarijní podmínky, při kterých dochází k vážnému poškození jaderného paliva, a to vážným poškozením a nezvratnou ztrátou struktury aktivní zóny (AZ) jaderného reaktoru nebo systému pro skladování jaderného paliva poškozením palivových souborů v důsledku tavení jaderného paliva. =*j* Jednoduše jsou havarijní podmínky, při kterých se vážně poškozuje palivo, ztráci se struktura AZ či systému pro skladování jaderného paliva, a to poškozením souborů v důsledku jeho tavení. Těžká havárie tedy nastává, až když se taví, přičemž platí, že je velmi nízká pravděpodobnost výskytu.
- **Postulovaná iniciační událost** = Odchylka od normálního provozu, která je náhodná, předpokládaná a je zahrnuta do projektových východisek a jejíž rozvoj může vést k abnormálnímu provozu nebo havarijným podmínkám.

Frekvence (r·y)	IAEA SSG-2	NRC 10 CFR	US ANSI 51.1
–	Normální provoz	Normální	Kategorie I
10^{-2} to 1	Očekávané - AOO	AOO	Kategorie II
10^{-3} to 10^{-2}	Možné - DBA		Kategorie III
10^{-4} to 10^{-3}		Nehody	
10^{-6} to 10^{-4}	Neprvděpodobné - BDBA		Kategorie IV
< 10^{-6}	Velmi neprvděpodobné - SA		



14.1.2 Základní bezpečnostní funkce

- Umožňovat v případě potřeby okamžitě a bezpečně odstavit jaderný reaktor a udržovat jej v podkritickém stavu.

Stavy jaderného zařízení (dle projektu)				
Provozní stavy		Havarijní podmínky		
Normální provoz	Abnormální provoz	Základní projektové nehody (DBA)	Rozšířené projektové podmínky	
Kategorie četnosti výskytu postulované IU				
-	Vysoká	Střední	Nízká četnost	Velmi nízká četnost
-	Více než 1x za rok	Nižší než 1x za 10 let	Nižší než 1x za dobu životnosti JZ	Nižší než 1x za stonásobek doby životnosti JZ

- Zabránit nekontrolovanému rozvoji štěpné řetězové reakce
- Fyzikálně znemožnit vznik kritického a nadkritického stavu mimo vnitřní prostor jaderného reaktoru.
- Zajišťovat odvod tepla vytvářeného jaderným palivem a technologickými systémy.
- Zajistit stínění a zabránit úniku radioaktivní látky a šíření ionizujícího záření do životního prostředí.

Asi by bylo dobré zmínit, že hodnocení jaderné bezpečnosti provádíme buď deterministickými nebo pravděpodobnostními hodnoceními.

Deterministický přístup:

- Definice iniciačních událostí → musím aplikovat specifické požadavky.
- Určení dostupnosti SKK, okrajových a počátečních podmínek (jednoduchá porucha, zvládání nehody pouze bezpečnostními systémy).
- Výběr výpočetního kódu.
- Zhodnocení výsledků.

Pravděpodobnostní přístup (PSA):

- Vychází z deterministických analýz, ale beru v úvahu pravděpodobnost.
- Využívám při risk managementu, mám pravděpodobnost, že se něco stane, mohu optimalizovat vůči přínosu.
- CDF, pravděpodobnost úniku RA, pravděpodobnost účinku na veřejnost.

14.1.3 Klasifikace událostí

- Fyzikální přístup
 - Havárie vyvolané kladnou změnou reaktivity (RIA)
 - Havárie se ztrátou chladiva (LOCA)

- Havárie v systému odvodu tepla
- Ostatní havárie
- Vnější vlivy
- Podle iniciačních událostí
- stupnice INES

Havárie vyvolané kladnou změnou reaktivity

Kladná změna reaktivity v kritickém reaktoru vede ke zvýšení výkonu. Ten závisí na rychlosti a velikosti vložené kladné reaktivity, účinku zpětných vazeb a zásahu regulačního systému. Problém je kritičnost na okamžitých neutronech.

Vliv má na jakém výkonu je reaktor před vložením kladné reaktivity:

- Nízký výkon (spouštění) – nepůsobí zpětné vazby, chování systému je dáno dynamikou nulového reaktoru.
- Vysoký (nominální) výkon – zafungují zpětné vazby, které omezí nárůst výkonu (Doppler), ale parametry reaktoru už jsou blízko limitních hodnot (maximální povolené teploty) → často vede na lokální poškození paliva. Proutek to může vydržet ale tabletka se mohla lokálně natavit.

Možné scénáře:

- Nekontrolované vysouvání regulačních orgánů = Závisí na maximální rychlosti vysouvání RO a maximální vázané reaktivitě, přechodový proces závisí na výkonu reaktoru (jiné chování u nulového reaktoru a reaktoru na výkonu), nárůst výkonu je omezen zpětnými vazbami a zpravidla nepředstavuje závažné ohrožení.
- Vystřelení regulačního orgánu = Teoreticky může nastat při prasknutí pouzdra pohonu RO, v důsledku okamžitého poklesu tlaku v pouzdře dojde k vystřelení tyče z AZ, rychlý proces, ale celková reaktivita je menší než u předchozího, je spojeno s únikem chladiva.
- Náhlé uvolnění usazenin absorpčního charakteru (bór) v konstrukci (bór se v průběhu provozu usazuje na konstrukčních částech), při jejich náhlém uvolnění = Kladná změna, rychlý přechodový proces jako vystřelení tyče, závisí na maximální uvolněné reaktivitě.
- Nekontrolované snižování koncentrace rozpustných absorbátorů = Chybné snížení koncentrace nebo připojení trasy s čistým kondenzátem, změny koncentrace jsou pomalé → prostor pro vyřešení situace nebo odstavení reaktoru, významná změna reaktivity je v řádu hodin.
- Chybné zavezení paliva = Dosažení nadkritického stavu z důvodu špatně zavezeného čerstvého PS, vylučuje se zvýšením koncentrace kyseliny borité a administrativní opatření při zavážení PS.
- Vtok studené vody do AZ = Uvolnění kladné reaktivity díky zápornému teplotnímu koeficientu reaktivity chladiva (hodnota závisí na koncentraci kyseliny borité).

- Vliv tlakových změn = Vliv dutinového koeficientu reaktivity, problém je u vody, která je blízko meze sytosti a v části chladiva probíhá bublinkový var, při záporném dutinovém koeficientu zvýšení tlaku vede ke snížení podílu páry a uvolnění kladné reaktivity.

Havárie se ztrátou chladiva

Snížení nebo úplné přerušení chlazení primárního okruhu (SB nebo LB LOCA). Jde o havárie typu LOCA (Loss of Coolant Accident).

Možné scénáře:

- Prasknutí hlavního potrubí IO = LB LOCA, prasknutí potrubí se zachováním plného výtkovového průřezu.
- Prasknutí potrubí s malým nebo středním únikem = SB LOCA, vyšší pravděpodobnost výskytu a odlišný průběh přechodového procesu, může být horší než u LB LOCA.
- Prasknutí trubky v PG = Patří do skupiny progresivních poruch, tj. poruchy, které jsou malé a lokalizované, ale postupně se rozrůstají do vážných rozměrů, šíření poruch ve svazku trubek PG.

Havárie v systému odvodu tepla

Jde o poruchy vedoucí ke snížení odvodu tepla z reaktoru. Týkají se primárního i sekundárního okruhu, i odstaveného reaktoru (zbytkový výkon).

Možné scénáře:

- Selhání HCČ = Snížení průtoku vede ke zvýšení teploty a tlaku chladiva v IO → ROR, pokud nedojde k ROR otevírá se PV na KO a únik do barbotážního systému, průběh závisí na koncepci IO, počtu vypadlých HCČ, setrvačnosti čerpadel, rychlosti odstavení reaktoru, zásahu obsluhy, ...
- Nestability proudění chladiva v AZ = Snížení průtoku v některých kanálech AZ nebo skupině kanálů vede k narušení hydrodynamiky AZ a přehřátí části PP, přičinou havárie může být částečné zablokování průtoku chladiva CP (cizí předmět) nebo vznik varu v některém PS (vyšší hydraulický odpor).
- Selhání dodávky napájecí vody do PG = hodně možností, tj. vyšší relativní četnost poruchy (hlavní příčiny - selhání napájecích čerpadel, výpadek napětí v síti vlastní spotřeby, prasknutí potrubí napájecí vody), havarijní analýzy řeší následek prasknutí hlavního napájecího kolektoru s oboustranným výtokem (Loss of Feedwater - LOFW) → uzavření ventilu na napájecí trase kvůli zamezení výtoku vody z PG, v PG roste tlak, snižuje se hladina na sekundární straně, v IO roste teplota a tlak.
- Prasknutí HPK nebo hlavního parovodu = Nejhorší havárie na parním potrubí IIO, důsledkem je prudký pokles tlaku a teploty na teplotu sytosti v IIO, pokles tlaku v IIO vyvolá signál pro zvýšení výkonu reaktoru a zvýšení dodávek napájecí vody do PG, to vede k snížení teploty, objemu a tlaku v IO a dalšímu zvýšení výkonu díky zpětným vazbám.
- Selhání hlavních systémů odvodu tepla v kondenzátoru = Poruchy chlazení kondenzátorů TG vedou k odstavení TG.

Ostatní havárie

Zahrnuje situace, které mohou nastat při odstávkách nebo v systémech, které přímo nesouvisí s provozem reaktoru. Tyto události mohou vést k rozsáhlému úniku RA látek.

Možné scénáře:

- Havárie při manipulaci s palivem = Čerstvé (havárie s kritičností) nebo ozářené palivo (kritičnost a ztráta chlazení v bazénu VJP).
- Havárie systému zpracování RAO = Události při skladování, přepracování a ukládání RAO.

Vnější vlivy

- Velmi málo pravděpodobné povětrnostní podmínky a živelní pohromy.
- Vlivy vyplývající z lidské činnosti.
- Zemětřesení.
- Záplavy, průtrž mračen, vítr.
- Požáry.
- Tlaková vlna (důsledek výbuchu).
- Pád letadla.
- Sabotáže.

14.2 Nehody

14.2.1 Projektové nehody (DBA)

DBA přestavují základní sadu událostí, které musí být pokryty bezpečnostními systémy, tak aby nedošlo ke překročení odpovídajících referenčních úrovní nebo limitů ozáření.

- Zvládnutí DBA je nezbytné pro vyhodnocení přijatelnosti návrhu reaktoru.
- Při DBA je jedna nebo více bezpečnostních funkcí je napadena.
- Pro zvládnutí události je nutný zásah bezpečnostních systémů.
- DBA by neměly mít dopad na okolí elektrárny a veřejnost.
- Zpravidla se během provozu elektrárny nevyskytne.
- Frekvence výskytu 10^{-4} až 10^{-2} za 1 rok.

Hodnocení bezpečnosti:

- Proces komplexního deterministického hodnocení a PSA.

- Hodnocení prokazuje, že JZ plní v rozsahu projektových východisek požadavky na JB a RO při normálním a abnormálním provozu.
- Plnění bezpečnostních funkcí je v analýzách zajišťováno jen bezpečnostními systémy.
- Musí být zahrnuto kritérium jednoduché poruchy (uvažuje se nejzávažnější možná porucha).
- Dopad PIE na bezpečnostní systémy je konzervativně volen jako nejhorší → nejméně příznivý průběh události.
- Zohledňují se nejistoty a výrobní tolerance.
- Deterministické hodnocení – pro všechny PIE → následky nehody.
- Pravděpodobnostní hodnocení → pravděpodobnost CDF a LRF.

14.2.2 Nadprojektové nehody (BDBA)

Jde o PIE vedoucí k DBA spolu s dalším selháním bezpečnostních systémů → vyvolané scénáři závažnějšími než základní projektová nehoda. Např. ztráta ECCS během LOCA, ATWS (událost spojená s neodstavením reaktoru při vyžádání jeho odstavení, např. selhání pádu tyče), totální ztráta napájecí vody, SBO.

- V odezvě na BDBA se zpravidla objevují akce operátorů na zmírnění důsledků nehody:
 - Odpouštění a doplnování chladiva v IO (snižování tlaku přes KO, doplnování vody přes ECCS).
 - Odpouštění a doplnování chladiva v IIO (PV, havarijní napájení PG).
 - Hermetizace (izolace) KNTM.
 - Odtlakování KNTM (ventilace KNTM).

Hodnocení bezpečnosti:

- Na základě deterministického a pravděpodobnostního hodnocení vybrány bezpečnostně nejvýznamnější BDBA události.
- Jedná se o PIE vedoucí k DBA + rozšířené podmínky, např. nedostupnost ECCS během LOCA, SBO.
- Velmi málo pravděpodobné události.
- V bezpečnostních analýzách se používají méně konzervativní kritéria.
- Mohou být použity realistické předpoklady → best-estimate přístup – neuvažuje se kritérium jednoduché poruchy, počítá se se zásahem systémů, které nejsou bezpečnostní.
- Hodnotí se průběhy i radiační následky (identifikace nutných opatření, podklady pro návody zvládání RMU a výcvik obsluhy, ...)

14.2.3 Těžké havárie (SA)

Důsledkem je poškození AZ, roztavení paliva a případně i významný únik RA látek.

- Procesy v RN: poškození paliva (oxidace Zr při vysokých teplotách, 1200 °C), parní exploze, porušení integrity.
- Poškození RN.
- Procesy mimo RN: zahřívání povrchů, exploze vodíku, interakce betonu s kóriem.

14.3 Mezinárodní stupnice – INES

= The International Nuclear Event Scale

- Vyvinuta v roce 1990 (IAEA).
- Určena pro rychlou orientaci veřejnosti. Je to komunikační nástroj, který usnadňuje komunikaci mezi odbornou a laickou veřejností a médií.
- Používá se pro hodnocení událostí na všech zařízeních souvisejících s jaderným průmyslem.
- Dodatečně rozšířena pro potřeby událostí spojených s dopravou, skladováním a použitím radioaktivních látek a zdrojů záření.
- Zahrnuje ztrátu nebo krádež RA zářičů, nález opuštěných zářičů či neplánované ozáření osob při regulovaných dozorovaných činnostech.
- Neslouží pro srovnávání bezpečnosti jednotlivých elektráren.
- Neslouží pro hodnocení zabezpečení zdrojů IZ.
- Nevztahuje se na události spojené pouze s technickou bezpečností a pro události, které nemají vztah k jaderné nebo radiační bezpečnosti, tj. únik chemikálií, zásah elektrickým proudem, události ovlivňující pohotovost turbíny nebo generátoru, pokud nebyl ovlivněn výkon reaktoru. Jedná se tedy spíše o radiologickou než technologickou stupnici.

Klasifikace do sedmi stupňů:

- Stupeň 4-7 – havárie (accidents).
- Stupeň 1-3 – nehody (incidents).
- Stupeň 0/pod stupnicí – události bez vlivu na bezpečnost.

Bezpečnostní význam mají události 2. a vyššího stupně. Většina hlášených událostí je do 3. stupně.

0) Událost bez vlivu na bezpečnost.

- 1) **Anomálie** = technická porucha nebo odchylka od schváleného režimu, ale se zbývající významnou hloubkovou ochranou.



Obrázek 39: INES

- 2) **Nehoda** = nehoda s významným selháním bezpečnostních opatření, ale se zbývající dostatečnou hloubkovou ochranou k vypořádání se dodatečnými poruchami.
- 3) **Vážná nehoda** = významné vnitřní poškození ovšem bez nutnosti vnějšího zásahu, další porucha bezpečnostních systémů by mohla vést k havarijným podmínkám.
- 4) **Havárie bez významějšího rizika** = havárie vně zařízení, bez významného vlivu na okolí, významné poškození zařízení (např. částečné tavení AZ), ozáření jednotlivců z obyvatelstva na úrovni ročních limitů pro obyvatelstvo, ozáření pracovníků na úrovni možných časných úmrtí.
- 5) **Havárie s rizikem** = havárie vně zařízení, těžké poškození jaderného zařízení (havárie s kritičností, velký požár a exploze), únik významného množství radioaktivity, aplikace opatření pro snížení rizika poškození zdraví u obyvatelstva.
- 6) **Těžká havárie** = velký únik radioaktivity do životního prostředí, plná aktivace opatření pro snížení pravděpodobnosti zdravotních následků u obyvatelstva.
- 7) **Velmi těžká havárie** = únik velmi velkého množství radioaktivity, možnost akutních zdravotních účinků, dlouhodobé poškození životního prostředí, vliv přesahuje hranice států.

Kritéria hodnocení dle INES:

Každá událost se hodnotí vzhledem ke třem kritériím, přičemž výsledné hodnocení je dáno nejvyšším stupněm dle všech tří kritérií.

- Obyvatelé a ŽP (stupně 2-7): Je založeno na dávkách obyvatel, tj. obdržená dávka a počet ozářených osob. Vzhledem k použití havarijných opatření můžou být obdržené dávky velmi nízké
- Radiační bariéry a opatření (stupně 2-5): Je založeno na množství uvolněných radioaktivních látek. Pro zahrnutí širokého spektra radioaktivních izotopů, které se mohou uvolnit do ŽP se používá koncept radiačního ekvivalentu ^{131}I . Jsou definovány konverzní faktory pro jednotlivé izotopy.
- DID (stupně 1-3).

INES poskytuje rychlou zprávu o významu události → klasifikace na základě prvotního odhadu, avšak hodnocení se může měnit podle vývoje situace. Výsledné hodnocení je dáno nejvyšším stupněm podle všech tří kritérií! Ve výsledku se bere nejvyšší stupeň, a to z důvodu, že u jednoho kritéria může být výsledkem stupeň 1, ale z pohledu jiného může být mnohem výše.

Dávky pro jednotlivce:

Kritérium obdržené dávky je nejpřímější kritériem. Definice se vztahují k dávkám, které byly obdrženy, nebo velmi pravděpodobně mohly být obdrženy (tj. zvážit výskyt obdržených dávek, o kterých se nevědělo). Hodnocení vychází z ozáření jedné osoby, ozáření více osob je důvodem ke zvýšení hodnocení až o dva stupně.

- Stupeň 4: výskyt smrtelného deterministického účinku. Pravděpodobný výskyt smrtelného deterministického účinku v důsledku celotělového ozáření (absorbovaná dávka rádu několika Gy).
- Stupeň 3: výskyt nebo pravděpodobný výskyt deterministických účinků, při nichž nedojde ke smrti. Ozáření vedoucí k efektivní dávce vyšší než je 10x stanoveného ročního limitu pro pracovníky se zářením 20 mSv.
- Stupeň 2: ozáření jednoho obyvatele vedoucí k efektivní dávce přesahující 10 mSv. Ozáření pracovníka přesahující stanovené roční limity.
- Stupeň 1: ozáření jednoho obyvatele přesahující roční dávkové limity. Kumulativní ozáření pracovníka nebo obyvatele přesahující stanovené roční limity.

14.3.1 Příklady událostí

- 1) Porušení technických podmínek, nehody bez přímých důsledků, které odhalí nedostatky v organizačním systému nebo kultuře bezpečnosti, menší defekty v potrubí.
- 2) Ishikava (Japonsko), Mihama (Japonsko, 1991), Atucha (Argentina), Forsmark (švédsko), Cadarache (Francie), Pickering A-B (Kanada, 2003)
- 3) Selafield (UK), Paks (Maïarsko, 2002)), Vandellós (španělsko, 1989), Davis Besse-1, (USA, 2002)
- 4) Jaslovské Bohunice (Slovenská rep.), Windscale Pile (VB, 1973), Saint Laurent (Francie, 1980), Tokaimura (Japonsko, 1999)
- 5) TMI2 (USA, 1979), Chalk River (Kanada), Windscale Pile (VB, 1957)
- 6) Kyštym (Majak) (Rusko, 1957) – obohacovací závod
- 7) Chernobyl (Ukrajina, 1986), Fukushima (Japonsko, 2011)

Popis a stupně INES	Obyvatelé a životní prostředí	Radiační bariéry a opatření v zařízení	Ochrana do hloubky
7 Velmi těžká havárie	Velký únik radioaktivních látek s rozsáhlým rozptylem, účinky na zdraví obyvatel a životní prostředí		
6 Těžká havárie	Významný únik radioaktivních látek, pravděpodobně nasazení plánovaných protiopatření		
5 Havárie s širšími následky	Omezený únik radioaktivních látek, pravděpodobně nasazení některých plánovaných protiopatření	Vážné poškození AZ reaktoru, uvolnění velkého množství radioaktivních látek uvnitř zařízení	
4 Havárie s místními následky	Malý únik radioaktivních látek pravděpodobně bez nutnosti nasazení plánovaných protiopatření	Tavení paliva nebo poškození paliva, vedoucí k uvolnění více jak 0,1 % inventáře AZ	
3 Vážná nehoda	Dávka přesahující desetkrát stanovený roční dávkový limit na pracovníka	Dávkové příkony větší než 1 Sv/h v provozním prostoru	„Téměř havarijní stav“, kdy nezůstala k dispozici žádná bezpečnostní opatření
2 Nehoda	Ozáření jednotlivce z obyvatel přesahující 10 mSv, Ozáření pracovníka přesahující roční limity	Úroveň záření v provozním prostoru větší než 50 mSv/h	Významné selhání bezpečnostních opatření (předpisů) bez skutečných následků
1 Anomálie			Malé problémy s bezpečnostními komponenty s významnou zbývající ochranou do hloubky
Žádný bezpečnostní význam (pod stupnicí/stupeň 0)			

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

15.1 Životní cyklus jaderných zařízení

1) Záměr postavit jaderné zařízení

- Důležité zvážit proč stavět jaderné zařízení, k čemu bude sloužit.
- Výstavba a provoz jaderného zařízení je závazek na desítky let.
- Velmi důležité pro země, které začínají s jadernou energetikou.

2) Umístění, hodnocení lokality

- Výběr a zkoumání mnoha lokalit.
- Mnoho kritérií, které musí být posouzeny – zásoby vody, množství spodní vody, seismická činnost, ...
- Z mnoha lokalit se vybere nevhodnější kandidát a následuje velmi detailní vyhodnocení lokality.

3) Design a licencování

- Kombinuje výsledky vývoje vybraného projektu a požadavků pro danou lokalitu.
- Výpočetní ověření projektu.
- Specifikace reaktoru a jeho částí.
- Projekt může mít mezinárodní licenci a pak je dále schvalován státním dozorem.
- Pokud není mezinárodní licence je potřeba projekt licencovat jako součást povolení pro výstavbu.

4) Výstavba

- Stavební práce.
- Výroba jednotlivých komponent reaktoru.
- Instalace jednotlivých komponent a zařízení.
- Kontroly a testy při výstavbě.

5) Uvádění do provozu

- Zprovoznění všech systémů.
- Ověření, že pracují v souladu s projektem.

- Kontrola splnění všech kritérií.

6) Provoz

- Provoz reaktoru zahrnuje všechny činnosti, pro které je zařízení určeno.
- Provoz na výkonu, údržba, výměna paliva, spouštění reaktoru, ...

7) Vyřazování z provozu

- Všechny činnosti, které vedou k zrušení kontroly státního dozoru nad jaderným zařízením.
- Dvě fáze: dekontaminace a rozebrání.
- Vyvezení paliva z reaktoru, odvezení vyhořelého paliva do skladů VJP, rozebrání IO, IIO a IIIO, zrušení pomocných provozů, zboření budov, ...
- Postupuje se od neaktivních provozů a budov k aktivním, IO je poslední

8) Zrušení dozoru nad jaderným zařízením

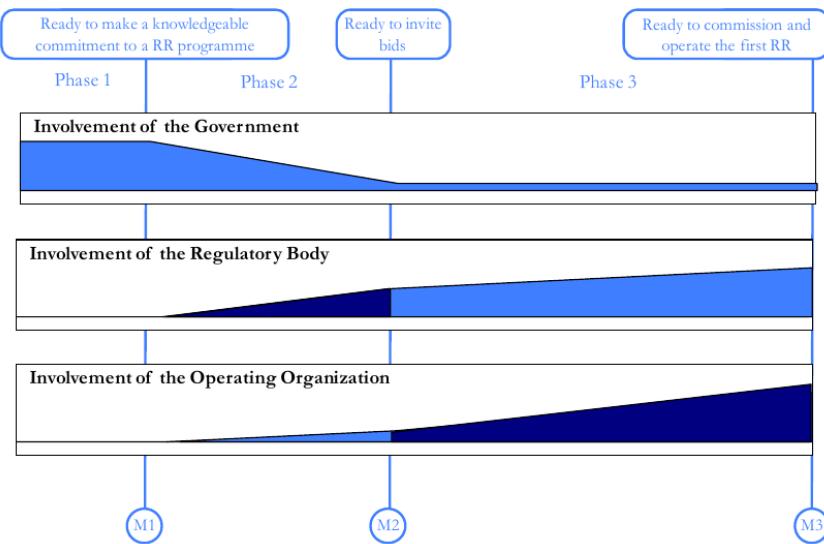
Po odstranění všech radioaktivních materiálů a kontaminovaných komponent není dále důvod pro pravidelné kontroly ze strany státního dozoru.

15.2 Klíčoví hráči při provozu reaktorů

Při provozu jaderné elektrárny, resp. jaderného reaktoru do toho mohou mluvit a mají s tím co dočinění celkově tři klíčový hráči:

- Stát (vláda)
- Státní dozor
- Provozovatel (držitel licence)

Dále bychom neměli opomenout IAEA, možná i NEA a Euratom.



Obrázek 40: Zapojení klíčových hráčů během života JZ.

Stát (vláda)

- Vydává zákony, buduje legislativní rámec, který upravuje provoz jaderných zařízení.
- Zavádí systém inspekcí a posuzování jaderných zařízení za účelem ověření dodržování platných předpisů a podmínek povolení.
- Vynucuje dodržování platných předpisů a podmínek povolení, včetně pozastavení, změny či zrušení povolení.
- Stát také zakládá státní regulační orgán (dozorčí orgán), který je zodpovědný za implementaci této politiky bezpečnosti a definici národních standardů.
- Vláda dále přijímá opatření pro nakládání RAO a vyřazování zařízení z provozu.

Státní dozor

- Jmenovaný vládou státu.
- Je oprávněn k zajištění dohledu, včetně vydávání povolení, nad užíváním jaderné energie a ionizujícího záření, nakládání s radioaktivním odpadem a bezpečností dopravy.
- Provádí inspekce a hodnocení jaderných zařízení, aby se zajistilo dodržování platných předpisů a oprávnění.
- Prosazuje platné předpisy a povolení, včetně pozastavení, změny nebo zrušení povolení.
- Přezkoumává a posuzuje hodnocení bezpečnosti od provozovatele, a to jak před schválením, tak i periodicky během životnosti jaderného zařízení, a to i ve vztahu k úpravám, změnám ve využití a experimentálním činnostem důležitým pro bezpečnost.
- Nezávislost na držiteli licence a dalších organizacích.

- Plní informační roli pro veřejnost (laickou i odbornou).

Provozovatel (držitel licence)

- Provozující organizace, která provádí jedno nebo více z umisťování, projektování, konstrukce, uvádění do provozu, provoz, úpravy a vyřazování jaderného zařízení z provozu = musí být schvalováno regulačním orgánem.
- Má zodpovědnost za bezpečnost zařízení.
- Provozující organizace by měla stanovit vlastní politiku v souladu s požadavky státu, které udělují otázkám bezpečnosti nejvyšší prioritu a podporují silnou kulturu jaderné bezpečnosti.
- Záměr vybudovat jaderné zařízení (feasibility study) je jediná etapa, která nevyžaduje autorizaci a nemusí projít licenčním řízením.
- Zajišťovat odpovídající výcvik a školení pracovníků.
- Vytvořit postupy a zajistit prostředky pro zajištění bezpečnosti zařízení za všech podmínek.
- Ověřit návrh zařízení a zajistit odpovídající kvalitu vybavení a činností souvisejících s provozem.
- Správa radioaktivních odpadů produkovaných při provozu.

Zapojení klíčových hráčů

Vláda a státní dozor mají zodpovědnost za ustanovení legislativního rámce pro ochranu obyvatelstva i životního prostředí před ohrožením plynoucím z provozu jaderných zařízení.

Držitel licence má přímou zodpovědnost za dodržování bezpečnosti a povinnost zajistit bezpečný provoz zařízení.

Mezi další významné hráče patří IAEA.

15.2.1 International Atomic Energy Agency (IAEA)

- Cílem IAEA je spolupracovat s členskými státy a mezinárodními partnery na podpoře bezpečného, zabezpečeného a mírumilovného využívání jaderných technologií.
- IAEA podporuje a zároveň kontroluje využívání jaderné energie.
- ČR je člen od 1993.

Role IAEA – Záruková proces

- Smlouva o nešíření jaderných zbraní: The Treaty on the Non-Proliferation of Nuclear Weapons (NPT), 2005.
- Možnost kontrolovat plnění závazků Smlouvy o nešíření jaderných zbraní je mezi IAEA a jednotlivými státy upravena právními dohodami.

- NPT nejaderné státy:
- NPT jaderné státy: Čína, Francie, Rusko, UK a USA
- Non-NPT státy (státy, které nepodepsaly dohodu o nešíření jaderných zbraní): Indie, Izrael, Pákistán

Role IAEA – Bezpečnost a zabezpečení

- Poradenství pro členské země, využití široké členské základy a rozsáhlé množství zkušeností s mírovým využitím jaderné energie.
- Formuluje doporučení, vhodné praktiky.
- Sdílení informací.
- Pomoc jednotlivým státům na jejich žádost.

Doporučení IAEA

- **Safety standards series** = Přímé podklady pro tvorbu národní legislativy nebo bezpečnostní dokumentace reaktoru, hierarchicky členěné do tří kategorií:
 - **Safety fundamentals** = Základní bezpečnostní cíle a principy ochrany a bezpečnosti.
 - **Safety requirements**:
 - * Rozvíjí základy specifikované v SF.
 - * Definují požadavky nezbytné pro zajištění bezpečnosti obyvatelstva a ŽP teď i v budoucnosti.
 - * Jejich formulace usnadňuje začlenění do národní legislativy.
 - **Safety guides**:
 - * Poskytují návod, jak splnit bezpečnostní požadavky.
 - * Představují mezinárodní doporučení a odrážejí nejlepší praktiky, které pomáhají dosáhnout vysokého stupně bezpečnosti.
- **Safety reports series**, Nuclear energy series, Technical reports series nebo Technical documents = Věnují se různým aspektům návrhu, výstavy a provozu jaderných zařízení, doplňují a rozpracovávají doporučení z dokumentů Safety standards series.

15.2.2 SÚJB

= Státní úřad pro jadernou bezpečnost. Nezávislý ústřední orgán státní správy a dozoru ČR. Garantuje adekvátní úroveň bezpečnosti technologií v ČR.

- Úřad je podřízen vládě ČR a má samostatný rozpočet, který schvaluje Parlament ČR.
- V čele je předseda, který je jmenovaný vládou ČR (od 1.11.1999 Drábová).
- pravomoci a postavení srovnatelné s ministerstvem, v čele předseda (jmeneje a odvolává vládu), podléhá zákonu o státní službě, zastoupení ve vládě předsedou vlády, tj. je podřízen premiérovi.

- Nezávislý orgán státní správy.
- Normotvorná činnost, kontrola.
- Vykonává státní správu a dozor nad využíváním jaderné energie a IZ a v oblasti nešíření jaderných, chemických a biologických zbraní.
- Stanovuje základní podmínky zajištění JB, RO, HP a FO.
- Působnost útvaru upravuje At. zákon 263/2016 Sb. a částečně pak zákon o územním plánování a stavebním rádu nebo také trestní zákon či původní znění At. zákona v věci odpovědností za jaderné škody.
- Hlavní sídlo v Praze, lokální pracoviště – ETE a EDU.

Působnost SÚJB

- Povolení výkonu činností (umisťování a provoz jaderných zařízení a pracovište s velmi významnými zdroji IZ, nakládání se zdroji IZ a RAO či přepravě JM a RN zdrojů).
- Schvalování dokumentace vztahující se k zajištění JB, RO, monitorování radiační situace, ZRMU, zabezpečení a nešíření jaderných zbraní, LaP, přeprava JM a vybraných RN zdrojů.
- Stanovení podmínek a požadavků RO obyvatel a pracovníků se zdroji IZ (stanovení limitů ozáření, vymezení KP), stanovení zóny HP a požadavků na RMU.
- Sledování stavu ozáření obyvatelstva a pracovníků se zdroji IZ.
- Vedení státního systému evidenc a kontroly JM, statních systémů evidence držitelů povolení, dovážených a vyvážených vybraných položek, zdrojů IZ,...
- Spolupráce s IAEA.

Tři sekce, které vycházejí z legislativou definovaných činností:

- **Sekce jaderné bezpečnosti** = zabývá se především kontrolou jaderných zařízení, hodnocením jaderné bezpečnosti a nakládáním s vyhořelým jaderným palivem a radioaktivním odpadem.
- **Sekce radiační ochrany** = zahrnuje kontrolu zdrojů záření, radiační ochranu palivového cyklu a monitorování.
- **Sekce řízení a technické podpory** = má na starost kontrolu nešíření zbraní hromadného ničení a dále zahrnuje odbory, které zajišťují provoz SÚJB, jako jsou ekonomický úsek a právní oddělení.

15.3 Legislativní rámec

Pozn.: Dobré asi vědět definici IZ, když se to všude objevuje v legislativě

Ionizující záření = proud hmotných části nebo elektromagnetického záření doprovázející změnu energetického stavu nebo složení jádra atomu + může vyvolávat změny ve struktuře hmoty, a tedy i v buňkách živých tkání

Účinky IZ:

- **Deterministické/prahové** (potřeba zabít dostatečné množství buněk) = smrt, nemoc z ozáření, popálení, lze reguloval udržením dávek pod prahem, s rostoucí dávkou roste účinek.
- **Stochastické** = buňka není zabita, ale pouze přeprogramována: leukémie, rakovina; nelze reguloval, pouze omezovat; s rostoucí dávkou roste pravděpodobnost vyskytnutí.

Cíl jaderného práva = chránit člověka a životní prostředí před škodlivými účinky IZ. Hlavní součásti infrastruktury jaderné bezpečnosti (analogie antického chrámu):

→ Hlavní sloupy: kompetentní dozor, patřičná úroveň výzkumu a vývoje, inteligentní a schopný provozovatel.

→ Základová deska: mezinárodní spolupráce a zpětné vazby z partnerských hodnocení, kultura bezpečnosti.

→ Propojení prvních dvou sloupů skrze SÚJB.

Právní řád ČR:

- Ústava → Ústavní zákony → Zákony → Vyhlášky → Nařízení vlády → Normy.
- V ČR jsou kromě našich zákonů také závazné mezinárodní úmluvy a smlouvy + evropská legislativa.
- Platí, že bezpečnost jaderných elektráren je v pravomoci jednotlivých států.

15.3.1 Atomové právo

= Soustava speciálních právních norem vytvořených pro regulaci chování právnických a fyzických osob zabývajících se činnostmi spojenými se štěpnými materiály, IZ a ozářením z přírodních zdrojů.

= Systém právních předpisů: regulace mírového využívání JE a IZ, At. zákon definuje základy a vymezuje, avšak dále jsou přiřazeny tzv. prováděcí právní předpisy (vyhlášky), které se specializují a podrobněji popisují konkrétní problematiku.

→ mezinárodní a evropské kořeny

→ implementace mezinárodní doporučení

Klíčové oblasti

- Vydávání povolení k jednotlivým činnostem souvisejícím s využíváním jaderných technologií a stanovení požadavků pro zisk/udržení tohoto povolení.

- Stanovení povinností, které je nutno při těchto činnostech dodržovat.
- Výkon státní správy a dozoru.
- Nápravná opatření.
- Odpovědnost za jaderné škody.
- Ochrana proti přírodnímu ozáření.
- Uvádění/uvolňování radionuklidů do životního prostředí.

15.3.2 České atomové právo

V dnešní době je platný Zákon č. 263/2016 Sb., atomový zákon (účinnost od roku 2017) s tím, že se připravuje další nová verze

Předchozí verzí je Zákon č. 19/1997 Sb., o mírovém využívání jaderné energie a IZ (atomový zákon) a o změně a doplnění některých zákonů (dnes platná a účinná jen jeho ustanovení o odpovědnosti za jadernou škodu).

Atomový zákon jako takový obsahuje dále prováděcí vyhlášky, jež jsou upřesňující vůči nějaké kategorii (vyhláška k RMU, vyhláška o umístění jaderného zařízení, vyhláška o evidenci a kontrole JM, vyhláška o požadavcích na projekt jaderného zařízení apod.)

Atomový zákon

Tři typy regulační nástrojů:

- Povolení = individuální správní akt SÚJB.
- Registrace = evidenční/registrační úkon SÚJB.
- Ohlášení = informační úkon vůči SÚJB.

Zákonem je dále stanovena nutná odpovídající kvalifikace pracovníků při mírovém využívání jaderné energie a IZ: zvláštní odborná způsobilost, vybraní pracovníci, zkoušky (v legislativě je definován například operátor či provozní reaktorový fyzik).

členění dle typů aktivit při mírovém využívání jaderných technologií (využívání jaderné energie, činnosti v rámci expozičních situací, nakládání s RA odpadem, schvalování typu a přeprava, zvládání RMU, zabezpečení, nešíření jaderných zbraní, ...)

Vydávání povolení pro celý životní cyklus JZ

Opět probíhá skrze Atomový zákon s využitím jeho 18 prováděcích vyhlášek, v jejichž souladu vydání povolení probíhá.

- Jaderné zařízení: → Stavba, jehož součástí je jaderný reaktor využívající řetězovou jadernou reakci → Sklad VJP, sklad čerstvého paliva, obohacovací závod, závod na výrobu jaderného paliva, sklad RA odpadu, úložiště RA odpadu → Největší jaderná zařízení v čR: Temelín, Dukovany, sklad čerstvého paliva v ETE, sklad VJP v EDU a ETE
- životní cyklus jaderného zařízení: → Období vykonávání činnosti souvisejících s využíváním jaderné energie od umístění až po vyřazení (umístění, výstavba, fyzikální a energetické spouštění, zkušební provoz, provoz, jdnotlivé etapy vyřazování z provozu).

- Licenční a povolovací diagram:
→ Povolení k umístění, územní rozhodnutí, povolení k výstavbě, stavební povolení, první fyzikální spouštění, první energetické spouštění, zahájení zkušebního provozu, kolaudační souhlas, povolení k zahájení provozu JZ, provoz, jdnotlivé etapy vyřazování z provozu. → Povolení je nutno vydávat/obdržet/žádat si o: při každém provedení změny ovlivňující jadernou bezpečnost, technickou bezpečnost a fyzickou ochranu jaderného zařízení.
- Projekt: → Dokumentovaný návrh JZ a postupy a návody pro činnost související s využíváním jaderné energie během životního cyklu JZ. → Po celou dobu životního cyklu musí být zajištěna jaderná bezpečnost, radiační ochrana, uplatnění ochrany do hloubky, odolnost a ochrana JZ, ... → Součástí je vždy provozní/prováděcí bezpečností zpráva PrBZ.
- Povinnosti držitele povolení: → Oznamovat úřadu neprodleně každou změnu nebo událost důležitou z hlediska JB, RO, technické bezpečnosti, monitorování radiační situace, ZRMU, zabezpečení a nakládání s JM. → Vyšetřit neprodleně každé porušení at. zákona a přjmout opatření k nápravě a zabránění opakování takové situace. → Hodnoti JB, RO, technickou bezpečnost, monitorování radiační situace, ZRMU a zabezpečení. → Zajistit výkon činností důležitých z hlediska JB a RO vybranými pracovníky. → Sledovat, měřit, hodnotit, ověřovat a zaznamenávat veličiny a skutečnosti důležité z hlediska bezpečnosti a informace o nich uchovávat a předávat úřadu. → Zajistit plnění bezpečnostních cílů a bezpečnostních funkcí a principů bezpečného využívání jaderné energie. → Poskytovat součinnost inspektořům IAEA a Evropské komise. → Pravidelně, systematicky a ověřitelným způsobem provádět hodnocení úrovně JB, RO, monitorování radiační situace, ZRMU a zabezpečení + případné zvláštní hodnocení, které je prováděno jen v případě před provedením změny při využívání jaderné energie. → Dále se sem vážou povinosti oznamovat když dojde k havárii, radiační nehodě, porušení LaP, RMU, čerpání LaP.

15.3.3 Mezinárodní atomové právo

Mezinárodní spolupráce: IAEA, NEA, WENRA (West European Nuclear Regulators Association), ICRP (International Commission on Radiological Protection), HERCA (Heads of the European Radiological Protection Competent Authorities), WANO (The World Association of Nuclear Operators).

Globální scéna jaderné bezpečnosti:

→ Národní jaderný dozor zodpovídá za to, že provozovatel zaručuje bezpečnost jaderných zařízení. → Požadavky mezinárodních smluv a úmluv, spojené programy výzkumu a vývoje. → Mezinárodní standardy bezpečnosti. → Účastníci globální scény: mezinárodní organizace (IAEA), asociace dozorů, asociace sdružující provozovatele (WANO), asociace výzkumu a vývoje, veřejnost (sociální sítě a média).

Mezinárodní doporučení: → Jsou právně nezávazná, ale je moudré se jimi řídit (pak se ostatní mračí).

Euroatom = evropské společenství pro atomovou energii

6 zakládajících států (BE, NL, FR, LUX, DE, IT), dnes 27.

Poslání Euratomu = přispět k vytvoření podmínek nezbytných pro rychlé vybudování a růst jaderného průmyslu, ke zvýšení životní úrovně v členských státech a k rozvoji vztahů s ostatními zeměmi.