

UNIVERZITA PAVLA JOZEFA ŠAFÁRIKA V KOŠICIACH
Prírodovedecká fakulta

ÚSTAV CHEMICKÝCH VIED



JADROVÁ CHÉMIA

UČEBNÉ TEXTY

Autor: RNDr. Andrea Morovská Turoňová, PhD.

Názov: Jadrová chémia

Rozsah strán: 128

Elektronický vysokoškolský učebný text pre Prírodovedeckú fakultu UPJŠ v Košiciach.
Za odbornú a jazykovú stránku tohoto vysokoškolského učebného textu zodpovedá autor.
Rukopis neprešiel redakčnou ani jazykovou úpravou.

Vydavateľ: Univerzita Pavla Jozefa Šafárika v Košiciach
Umiestnenie: <http://www.upjs.sk/pracoviska/univerzitna-kniznica/e-kniznica/elektronicke-publikovanie/ep-pfupjs/>
Dostupné od: 01. 2. 2011

ISBN: 978-80-7097-868-9

OBSAH

PREDSLOV	7
1 ÚVOD DO JADROVEJ CHÉMIE.....	8
1. 1 PREDMET JADROVEJ CHÉMIE	8
1. 2 HISTORICKÝ VÝVOJ JADROVEJ CHÉMIE A VYUŽITIE JADROVÉHO ŽIARENIA.....	8
1. 3 ELEMENTÁRNE ČASTICE.....	10
1.3.1 CHARAKTERISTIKA MIKROČASTÍC.....	12
1.3.2 ÚMERNOSŤ HMOTNOSTI A ENERGIE	13
1. 4 ATÓMOVÉ JADRO.....	13
1.4.1 ATÓMOVÉ JADRO, ŠTRKTÚRA ATÓMU – NÁBOJ, ROZMERY A ZLOŽENIE.....	13
1.4.2 MODEL Y ATÓMOVÉHO JADRA.....	15
1.4.3 HMOTNOSŤ A VÄZBOVÁ ENERIGIA JADRA	16
1.4.4 SPIN A MAGNETICKÝ MOMENT JADRA	16
1.4.5 STABILITA JADIER.....	17
1.4.6 NUKLIDY A IZOTOPY V PRÍRODE	18
2 RÁDIOAKTIVITA A KINETIKA RÁDIOAKTÍVNYCH PREMIEN.....	19
2. 1 RÁDIOAKTIVITA – JADROVÉ ŽIARENIE	19
2.1.1 ZÁKLADNÉ CHARAKTERISTIKY RÁDIOAKTÍVNYCH PREMIEN.....	20
2.1.2 KINETIKA RÁDIOAKTÍVNYCH PREMIEN; ŠTATISTICKÝ CHARAKTER RÁDIOAKTÍVNEJ PREMENY.....	21
2.1.3 POSUNOVÉ PRAVIDLÁ	23
2.1.4 PREMENOVÉ RADY	24
2. 2 DRUHY RÁDIOAKTÍVNYCH PREMIEN	25
2.2.1 PREMENA ALFA	25
2.2.2 PREMENA BETA.....	25
2.2.3 PREMENA GAMA	27
2. 3 PRÍRODNÁ RÁDIOAKTIVITA.....	28
2.3.1 JADROVÁ GEOCHRONOLÓGIA	29

3	FYZIKÁLNE A CHEMICKÉ ÚČINKY JADROVÉHO ŽIARENIA	31
3. 1	INTERAKCIA IONIZUJÚCEHO ŽIARENIA S ATÓMOVÝM OBALOM A JADROM.....	31
3.1.1	PRUŽNÉ ZRÁŽKY.....	32
3.1.2	NEPRUŽNÉ ZRÁŽKY	34
3.1.3	ABSORPČNÁ INTERAKCIA.....	36
3.1.4	INTERAKCIA ALFA ŽIARENIA	37
3.1.5	INTERAKCIA BETA ŽIARENIA.....	37
3.1.6	INTERAKCIA GAMA ŽIARENIA.....	38
3.1.7	INTERAKCIA NEUTRÓNOVÉHO ŽIARENIA	39
3. 2	RADIAČNO NUKLEÁRNE VELIČINY	40
4	JADROVÉ REAKCIE	43
4. 1	KLASIFIKÁCIA JADROVÝCH REAKCIÍ.....	43
4.1.1	TYPY JADROVÝCH REAKCIÍ.....	44
4.1.2	ÚČINNÝ PRIEREZ JADROVÝCH REAKCIÍ	44
4.1.3	CHARAKTERISTIKA JADROVÝCH REAKCIÍ.....	45
4.1.3.1	JEDNODUCHÉ JADROVÉ REAKCIE	45
4.1.3.2	ŠTIEPNE JADROVÉ REAKCIE	46
4.1.4	TRANSURÁNY	47
4. 2	ZDROJE JADROVÉHO ŽIARENIA.....	49
4.2.1	RÁDIONUKLIDOVÉ RADIAČNÉ ZDROJE	49
4.2.2	URÝCHĽOVAČE ČASTÍC.....	50
4.2.3	JADROVÉ REAKTORY	51
5	DETEKCIA A REGISTRÁCIA JADROVÉHO ŽIARENIA	54
5. 1	PRINCÍPY DETEKCIE ŽIARENIA.....	54
5. 2	IONIZAČNÉ METÓDY	55
5.2.1	IONIZAČNÝ PRÚD A JEHO MERANIE.....	55
5.2.2	IONIZAČNÉ KOMORY	56
5.2.3	GEIGER – MÜLLEROVE TRUBICE.....	56
5.2.3.1	FUNKCIA GEIGER–MÜLLEROVÝCH TRUBÍC	57
5.2.3.2	CHARAKTERISTIKY GEIGER–MÜLLEROVÝCH TRUBÍC	58
5.2.4	PROPORCIONÁLNE DETEKTORY.....	59
5. 3	SCINTILAČNÉ METÓDY.....	59

5.3.1 PRINCÍP ČINNOSTI SCINTILAČNÉHO DETEKTORA.....	60
5.3.2 CHARAKTERISTIKY SCINTILAČNÉHO DETEKTORA.....	61
5. 4 POLOVODIČOVÉ DETEKTORY.....	62
6 DOZIMETRIA A JEJ METÓDY.....	64
6. 1 ROZDELENIE DOZIMETRIE.....	64
6.1.1 KVAPALINOVÉ DOZIMETRICKÉ SÚSTAVY.....	64
6.1.2 TUHÉ DOZIMETRICKÉ SÚSTAVY.....	65
6.1.3 PLYNNÉ DOZIMETRICKÉ SÚSTAVY.....	67
6. 2 DETEKCIA JEDNOTLIVÝCH DRUHOV ŽIARENIA.....	68
6.2.1 REGISTRÁCIA ELEKTRICKÝCH IMPULZOV Z DETEKTORA ŽIARENIA.....	69
6. 3 MERANIE JADROVÝCH VELIČÍN A AKTIVITY ŽIARIČOV.....	69
6. 4 PRÍPRAVA VZORIEK NA MERANIE RÁDIOAKTIVITY.....	70
7 VÝROBA RÁDIONUKLIDOV A PRÍPRAVA OZNAČENÝCH ZLÚČENÍN.....	72
7. 1 PRÍPRAVA PRÍRODNÝCH RÁDIOAKTÍVNYCH LÁTOK.....	73
7. 2 VÝROBA UMELÝCH RÁDIONUKLIDOV.....	73
7.2.1 AKTIVAČNÉ JADROVÉ REAKCIE NA PRÍPRAVU RÁDIONUKLIDOV.....	73
7.2.2 TECHNIKA AKTIVÁCIE.....	74
7. 3 PRÍPRAVA RÁDIOAKTÍVNE OZNAČENÝCH ZLÚČENÍN.....	74
7. 4 JADROVÁ CHEMICKÁ TECHNOLOGIA.....	76
7.4.1 TECHNOLOGIA VÝROBY URÁNU.....	77
7.4.2 VÝROBA TÓRIA.....	78
7.4.3 REGENERÁCIA OŽIARENÉHO PALIVA.....	78
7.4.4 LIKVIDÁCIA ŠTIEPNÝCH SPODÍN A RÁDIOAKTÍVNEHO ODPADU.....	78
8 CHEMICKÉ ÚČINKY ŽIARENIA, RADIAČNÁ CHÉMIA.....	80
8. 1 CHEMICKÉ PÔSOBNIE ŽIARENIA.....	80
8. 2 ZDROJE VYSOKOENERGETICKÉHO ŽIARENIA.....	80
8. 3 TECHNIKA RADIAČNEJ CHÉMIE.....	81
8. 4 RADIAČNO-CHEMICKÉ PROCESY.....	82
8.4.1 ELEMENTÁRNE RADIAČNÉ DEJE.....	83
8.4.2 LINEÁRNY PRENOS RADIAČNEJ ENERGIE.....	83
8.4.3 REAKCIE PRIMÁRNYCH RADIAČNÝCH PRODUKTOV.....	84

8. 5	RADIAČNO-CHEMICKÉ REAKCIE	86
8.5.1	RADIAČNÁ CHÉMIA JEDNODUCHÝCH PLYNOV	86
8.5.2	RADIAČNÁ CHÉMIA VODY A VODNÝCH ROZTOKOV	86
8.5.3	RADIAČNÁ CHÉMIA ORGANICKÝCH ZLÚČENÍN	87
8.5.4	RADIAČNÉ EFEKTY V ANORGANICKÝCH LÁTKACH	88
8. 6	BIOLOGICKÉ EFEKTY ŽIARENIA	88
8. 7	VÝROBNÉ APLIKÁCIE RADIAČNEJ TECHNIKY	89
9	APLIKOVNÁ RÁDIOCHÉMIA.....	90
9. 1	POUŽITIE RÁDIONUKLIDOV NA INDIKÁCIU.....	90
9. 2	POUŽITIE RÁDIONUKLIDOV VO VŠEOBECNEJ A FYZIKÁLNEJ CHÉMII	91
9. 3	POUŽITIE RÁDIONUKLIDOV A JADROVÉHO ŽIARENIA V CHEMICKEJ ANALÝZE .	93
9.3.1	NEAKTIVAČNÁ INTERAKČNÁ ANALÝZA.....	93
9.3.2	AKTIVAČNÁ ANALÝZA.....	96
9.3.3	INDIKÁTOROVÉ METÓDY.....	98
10	POUŽITIE JADROVÉHO ŽIARENIA A RÁDIONUKLIDOV NA KONTORLU CHEMICKEJ VÝROBY	101
10. 1	VYUŽITIE OTVORENÝCH ŽIARIČOV	101
10.1.1	INDIKÁTOROVÉ POUŽITIE	101
10.1.2	VYUŽITIE AKTIVAČNÉHO PRINCÍPU	102
10. 2	VYUŽITIE UZAVRETÝCH ŽIARIČOV – RÔZNE METÓDY	103
10.2.1	METÓDY ZALOŽENÉ NA ZMENE POLOHY ŽIARIČA	103
10.2.2	METÓDY VYUŽÍVAJÚCE ABSORPCIU ŽIARENIA.....	103
10.2.3	METÓDY VYUŽÍVAJÚCE ROZPTYL ŽIARENIA	104
10.2.4	IONIZAČNÉ METÓDY.....	104
11	ZÁSADY BEZPEČNOSTI PRÁCE S RÁDIOAKTÍVNymi LÁTKAMI.....	105
11. 1	BIOLOGICKÉ ÚČINKY ŽIARENIA.....	105
11. 2	ZDRAVOTNO-HYGIENICKÉ ZÁSADY A NORMY PRÁCE S RÁDIOAKTÍVNymi LÁTKAMI	107

12 NUKLEÁRNA MEDICÍNA.....	110
12. 1 TECHNIKA VYŠETRENIA CELOTELOVÝM DETEKTOROM.....	111
12. 2 POZITRÓNOVÁ EMISNÁ TOMOGRAFIA V DIAGNOSTIKE NÁDOROV	112
12. 3 VÝZNAM RÁDIOLÓGIE V ONKOLÓGII	113
13 NUKLEÁRNE KATASTROFY	116
13. 1 HAVÁRIA JADROVEJ ELEKTRÁRNE ČERNOBYL'.....	116
13. 2 JADROVÉ ZBRANE.....	119
13.2.1 JADROVÉ VÝBUCHY	123
ZOZNAM POUŽITEJ LITERATÚRY	128

PREDSLOV

Objav rádioaktivity na prelome 19. a 20. storočia stimuloval prudký rozvoj jadrových vied. Na rozhraní jadrovej fyziky a chémie sa sformovali styčné odbory, akými sú rádiochémia, radiačná chémia a jadrová chémia. Na základe historických faktov a ďalších dostupných údajov o súčasnom stave v uvedených oblastiach sa snažíme prispieť k zhromaždeniu daných informácií a k podaniu ich uceleného prehľadu.

Cieľom predmetu Jadrová chémia, ktorý sa vyučuje na PF UPJŠ je poskytnúť základné poznatky, s dôrazom na všeobecnú hodnotu predmetu. Dôležité je sprístupniť základy rozličných metód, techník a ich špecifík pri aplikácii jadrových javov v chémii a v príbuzných odboroch. Dôraz sa kladie aj na použitie správnej terminológie, na poznanie súvislosti vzťahov a základných princípov, doplnených ilustračne konkrétnymi prípadmi.

Výber materiálu je pomerne obtiažny, počítame však s tým, že ďalšie monografie a učebnice zaplnia medzery týchto učebných textov.

V Košiciach, 2011

Autorka

1 ÚVOD DO JADROVEJ CHÉMIE

1.1 PREDMET JADROVEJ CHÉMIE

Objav rádioaktivity, prírodnej a neskôr umelej, vytvoril predpoklady pre vznik jadrových a nukleárných vied a techník, ktoré sú spojené s dejmi viazanými na atómové jadro. Intenzívny rozvoj začal po objave procesu štiepenia niektorých ťažkých atómových jadier a spája sa s prevádzkou jadrových reaktorov.

Získavanie vnútrojadrovej energie atómov znamená využitie rádionuklidov a jadrového žiarenia v rôznych oblastiach vedy a techniky.

Na rozhraní jadrovej fyziky a chémie sa sformovali styčné odbory, obrázok 1:

Rádiochémia – skúma chemické a fyzikálnochemické vlastnosti rádioaktívnych nuklidov, prvkov, zlúčenín, skúma ich výrobu a chemické dôsledky jadrových premien. Do rádiochémie patrí aj použitie rádioaktívnych nuklidov prvkov a zlúčenín v chémii $\Rightarrow$ *aplikovaná rádiochémia*

Radiačná chémia - zaoberá sa chemickými účinkami jadrového žiarenia; medzi radiačnou chémiou a rádiochémiou je voľná spojitosť, pretože zdrojmi žiarenia v radiačnej chémii sú prevažne rádioaktívne nuklidy

Jadrová chémia – je súhrnné označenie vedných odborov, ktoré sa zaoberajú chémiou izotopov – stálych aj rádioaktívnych

Spolu sú to vedy, ktoré majú charakter rádionukleárnej a nukleárnej vednej disciplíny.

1.2 HISTORICKÝ VÝVOJ JADROVEJ CHÉMIE A VYUŽITIE JADROVÉHO ŽIARENIA

Vývoj jadrových vied a jadrovej techniky bol v období niekoľkých desaťročí svojej krátkej histórie veľmi rýchly a prudký. Prvé objavy sa začali dostávať na verejnosť v rokoch 1895.

Prehľad vývoja jadrového výskumu a jadrovej techniky je nasledujúci:

1895 - objav röntgenového žiarenia - Röntgen

1896 - objav rádioaktivity - Becquerel

1897 - identifikácia elektrónu - Thomson

1898 - objav rádioaktívnych prvkov - rádium, tórium, polónium - Curie

1899 - objav α a β žiarenia - Rutherford

1900 - objav γ žiarenia - Villard

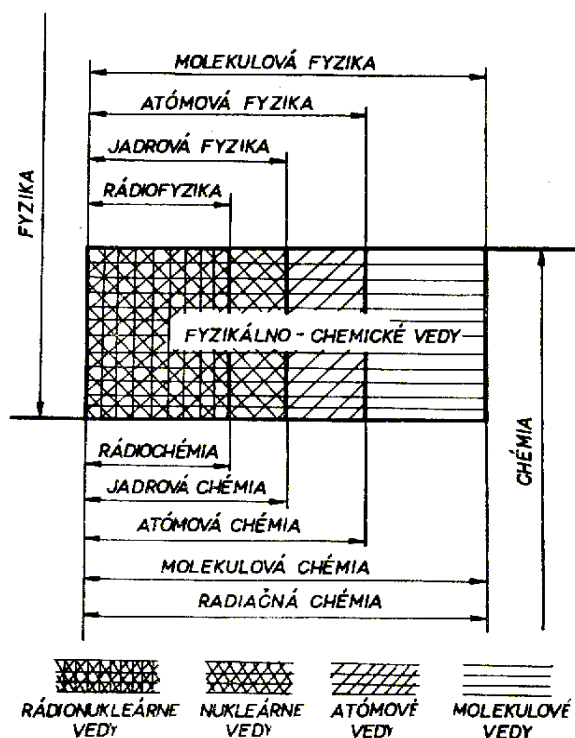
- identifikácia β častíc ako elektrónov - Rutherford

- 1905 - špeciálna teória relativity - Einstein ($E=mc^2$)
- 1912 - termín "nucleus" - jadro - Rutherford
- 1913 - návrh pojmu "izotop" - Soddy, Fajans
- 1919 - prvá zámerne vyvolaná jadrová reakcia - Rutherford
- 1920 - návrh pojmu "protón" - Rutherford
- 1931 - vynález cyklotrónu - Lawrence, Livingstone
 - postavenie prvého elektrostatického generátora - urýchľovača - van de Graaf
- 1933 - rozpracovanie teórie rádioaktívneho rozpadu - Mandelštam, Leontovič
- 1934 - objav umelej rádioaktivity - Joliot - Curie
- 1938 - návrh mechanizmu jadrovej syntézy vo hviezdach - Bethe, Weizsacker
- 1940 - objav plutónia a neptúnia - McMillan, Seaborg
- 1944 - objav amerícia a curia - Seaborg, James
- 1945 - konštrukcia a vojenské použitie atómovej bomby - USA
- 1946 - použitie rádionuklidov v poľnohospodárstve a pri hľadaní ropy
- 1947 - použitie urýchľovačov v priemysle
 - radiačná sterilizácia farmaceutických prípravkov
- 1952 - objav einsteinia
- 1953 - objav fermia
- 1954 - prvá jadrová elektrárňa na svete uvedená do chodu - Obninsk - ZSSR
- 1955 - prvé použitie jadrovej energie na pohon lodí
- 1960 - začiatok radiačného konzervovania potravín
- 1964 - zabránenie klíčivosti zemiakov radiačným spôsobom
- 1966 - aktivačná a α - rozptylová analýza povrchu Mesiaca
- 1970 - röntgenovo - fluorescenčný analyzátor na Lunochode analyzuje povrch Mesiaca
- 1972 - spustenie prvej československej jadrovej elektrárne v Jaslovských Bohuniciach
- 1985 - spustený prvý reaktor v jadrovej elektrárni Dukovany
- 1986 - spustený druhý reaktor v jadrovej elektrárni Dukovany
- 1987 - spustený tretí reaktor v jadrovej elektrárni Dukovany

Využitie energie atómového jadra sa uplatňuje v jadrovej energetike a v jadrovej technike. Využíva sa uvoľňovanie vnútrojadrovej energie pri štiepných jadrových reakciách, ktoré sa uskutočňujú v štiepných jadrových reaktoroch. Konkrétne ide o výrobu energie v jadrových elektrárňach. Izotopové techniky sú vhodné pre riešenie problémov v priemyselnej sfére, vo výžive, zdravotníctve, vo vede a technike.

Veľmi zaujímavý odbor je **nukleárna medicína**, kde sa využívajú umelé rádioizotopy na klinické vyšetovanie pacienta. Rádioizotopom označenú látku môžeme po podaní do

organizmu sledovať počas celého priebehu jej metabolizmu v tele. Vyhodnotenie stopového experimentu sa prevádza zmeraním rádioaktivity v orgánoch pacienta.



Obr. 1 Schéma začlenenia jadrových vied.

1. 3 ELEMENTÁRNE ČASTICE

Elementárne častice sú všetky mikročastice s výnimkou zložených atómových jadier. Elementárne častice môžeme podľa druhu a hmotnosti rozdeliť do skupín:

- elektromagnetické vlnenie - γ - častica gama (fotón)
- korpuskulárne žiarenie
 - leptóny – neutríno, antineutríno, elektrón (negatrón), pozitron, mióny
 - mezóny - π^+ mezón, π^0 mezón, π^- mezón
 - baryóny – protón, antiprotón, neutrón, antineutrón

V prehľadovej tabuľke 1 sú popísané názvy všetkých elementárnych častíc, ich spin a náboj.

Skupina	Názov	Symbol		Spin	Pokožová hmotnosť	Poznámky	
		častica	antičastica				
Elektro-magnetické	fotón (všeobecne)	f		1	0	stále	
	gama-fotón		γ				
Ľahké častice (leptóny)	neutrino		ν		1/2	0	stále
	elektrón		e ⁻	e ⁺	1/2	1	stále
	negatrón	pozitrón	β ⁻	β ⁺			
	mión		μ ⁻	μ ⁺	1/2	207	
Stredné častice (mezóny)	pión	π ⁰		0	264		
		π ⁺	π ⁻		273		
	kaón	K ⁰	K ⁻⁰		965		
		K ⁺	K ⁻		967		
Ťažké častice (baryóny)	protón	p	p̄	1/2	1836	stále	
	neutrón	n	n̄	1/2	1838	T=17 min	

Tab. 1 Prehľad elementárnych častíc.

Termín elektrón sa bežne používa na označenie záporného elektrónu – negatrónu. Elektróny sa ľahko odštiepujú z atómov a molekúl. So vzájomným premiestňovaním a pôsobením elektrónov súvisia chemické reakcie.

Negatrón (elektrón) nesie záporný náboj $e^- = -1,602 \cdot 10^{-19}$ C.

Nositeľom elementárneho kvanta kladnej elektriny je kladný elektrón – pozitron e^+ . Vzájomná interakcia častíc a antičastíc sa nazýva **anihilácia**. Napríklad, anihilácia pokojového pozitronu s elektrónom vedie ku vzniku dvoch kvánt gama fotónov:



Z tabuľky 1 je zrejmé, že k stabilným časticiam patria fotón, elektrón, neutrino a protón a im zodpovedajúce antičastice.

Z nukleónov je nestabilný neutrón, ktorý podlieha pomalej premene:



Mezóny sa premieňajú podľa nasledovnej schémy (3):



Mióny sa premieňajú na elektróny:



Uvedené premeny patria k typu tzv. **slabých** interakcií.

Stredné sú elektromagnetické interakcie prostredníctvom elektromagnetického poľa.

Silné jadrové interakcie sú medzi mezónmi a baryónmi.

Mezóny sa uvoľňujú pri zrážkach atómových jadier s vysokou kinetickou energiou, akú má napríklad kozmické žiarenie. Primárne kozmické žiarenie je prúdom atómových jadier, najmä protónov, urýchlených vesmírnymi elektromagnetickými poľami do energie 10 GeV, ktoré padajú do horných vrstiev atmosféry (nad 20 km). Tam tvoria zrážkami s atómami dusíka a kyslíka mezóny, ktoré sa rýchlo rozpadávajú podľa schémy (3), takže do dolnejších vrstiev atmosféry sa dostávajú už iba mióny. Sekundárne kozmické žiarenie sa skladá na úrovni mora zo 70 % miónov a zvyšok tvoria elektróny a fotóny (častice gama).

1.3.1 CHARAKTERISTIKA MIKROČASTÍC

Pohyb mikročastíc, napríklad elektrónov, sa kvalitatívne odlišuje od pohybu makroskopických objektov. Elektróny môžu mať vlastnosti častice, korpuskule alebo vlnenia. Korpuskulárne vlastnosti charakterizujeme veličinami **hybnosťou** a **energiou**. Vlnenie je charakterizované **vlnovou dĺžkou** a **frekvenciou**. Fotón pokladáme za kvantum elektromagnetického žiarenia.

Kvantum žiarenia je najmenšia hodnota energie, ktorá sa pohlcuje alebo vyžaruje pri danom kmitočte žiarenia:

$$E = h \cdot \nu \quad (5)$$

Fotón môžeme pokladať za časticu, ktorej prislúcha istá hmotnosť

$$m = \frac{E}{c^2} \Rightarrow \lambda = \frac{c}{\nu} \quad (6)$$

Pre elektrón, korpuskulu platí Broglieho vzťah

$$\lambda = \frac{c}{\nu} = \frac{h}{m \cdot v} \quad (7)$$

kde v je rýchlosť e^- , λ je dĺžka fázovej vlny, h je Planckova konštanta.

Mikročastice a zákonitosti ich pohybu opisuje kvantová mechanika pomocou **vlnových funkcií**. Matematické riešenie vlnových funkcií vyžaduje, aby sa mikročasticiam okrem pokojovej hmotnosti, hybnosti a náboja priradili ďalšie charakteristické veličiny: spin, parita, osobitosť a izotopový spin. Z nich iba spin, t.j. magnetický moment hybnosti mikročastice, možno formálne spojiť s predstavou rotácie okolo vlastnej osi, pričom s je spinové kvantové číslo, ktoré môže nadobúdať hodnoty 0, $\frac{1}{2}$, 1.

$$\text{spin} = s \cdot \frac{h}{2\pi} \quad (8)$$

Parita je znamienko, ktoré charakterizuje zmenu vlnovej funkcie pri súčasnej zmene smeru všetkých koordinačných osí (pri ich inverzii). Izotopový (izobarový) spin T sa používa na opis jednej častice v rôznych stavoch, ktoré sa líšia elektrickým nábojom.

1.3.2 ÚMERNOSŤ HMOTNOSTI A ENERGIE

Štúdium vlastností rýchlo sa pohybujúcich častíc ukázalo, že ich hmotnosť nie je stála, ale rastie so zvyšovaním rýchlosti. Tento jav vysvetľuje teória relativity.

Medzi hmotnosťou častice m a jej rýchlosťou platí vzťah

$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \quad (9)$$

kde m_0 je hmotnosť častíc v pokoji (pokojuv hmotnosť) ak $v = 0$, c je rýchlosť svetla vo vákuu. Toto je osobitný prípad vzájomnej súvislosti medzi hmotnosťou a energiou; celková energia objektu E je spojená s hmotnosťou objektu m **Einsteinovým zákonom**

$$E = m \cdot c^2 \quad (10)$$

pričom m je mierou obsahu energie.

V pokoji má objekt zásobu energie, ktorá zodpovedá jeho pokojovej hmotnosti. Vo väčšine fyzikálnych procesov sa pokojová energia nezúčastňuje na premenách, pri chemických reakciách a pri jadrových reakciách sa premieňa na „aktívnu“ energiu pohybu častíc, **kinetickú energiu**.

Ako vedľajšia jednotka energie, ale najčastejšie používaná, je **elektrónvolt**. Elektrónvolt, eV je energia, ktorú získa častica s elementárnym nábojom (napr. elektrón alebo protón), ak prejde v elektrickom poli potenciálovým rozdielom 1 V. Hodnota je súčinom elementárneho náboja a jednotkového potenciálu: **$1\text{eV} = 1,60 \cdot 10^{-19} \text{ J}$**

1. 4 ATÓMOVÉ JADRO

1.4.1 ATÓMOVÉ JADRO, ŠTRKTÚRA ATÓMU – NÁBOJ, ROZMERY A ZLOŽENIE

Atóm je najmenšia látková častica, ktorá si zachováva všetky chemické vlastnosti prvku. Nie je jedinou časticou, ale je súborom častíc. Nukleárny model atómu hovorí o tom, že atóm sa skladá z malého, elektricky kladne nabitého jadra a z obalu elektricky záporne nabitých častíc (elektrónov), ktoré obklopujú jadro.

Atómové jadro je centrálna časť atómu, je to kvantovomechanická sústava jadrových častíc, **nukleónov**. Základnými formami nukleónov sú elektricky kladne nabité protóny a elektricky neutrálne neutróny. Sú vzájomne viazané vnútrojadrovými silami.

Predstavu o atóme vysvetlil Rutherford. Zistil, že ak látkami prechádzajú kladne nabité častice (alfa), časť z nich sa značne vychýľuje od pôvodného smeru pohybu. Dalo sa to vysvetliť iba tým, že na svojej dráhe sa stretávajú s miestami, kde je sústredený kladný náboj a dochádza k ich silnému odpudzovaniu. Rozmer týchto častíc bol malý. Podľa modelu sa atóm skladá z jadra s priemerom 10^{-14} m a z elektrónového obalu s priemerom 10^{-10} m.

Na charakterizovanie jadra a jeho zloženia sa používajú nasledovné veličiny:

- **protónové číslo Z** – atómové číslo - udáva počet protónov v atómovom jadre; počet protónov súčasne vyjadruje náboj jadra, resp. počet elektrónov v obale neutrálneho atómu a tým i poradové číslo prvku v periodickej sústave prvkov
- **neutrónové číslo N** – udáva počet neutrónov v atómovom jadre, pre pomer neutrónov a protónov v jadre spravidla platí $N \geq Z$
- **nukleónové číslo A** - hmotnostné číslo – udáva počet nukleónov (súčet protónov a neutrónov) v atómovom jadre. Pre pomer nukleónového a protónového čísla v nuklidoch platí $A \geq Z$. Nukleónové číslo je teda súčtom protónového a neutrónového čísla ($A=Z+N$).

Druh atómov, ktoré majú určitý počet protónov, ako aj určitý počet neutrónov (t.j. rovnaké zloženie jadra), sa nazýva **nuklid**, označuje sa ako A_ZX , kde X je symbol chemického prvku, Z je protónové a A je nukleónové číslo. Nuklidy toho istého prvku s rozličným počtom neutrónov v jadre sú **izotopy**, napríklad nuklidy ${}^3_2\text{He}$ a ${}^4_2\text{He}$ sú izotopy hélia, nuklidy ${}^{233}_{92}\text{U}$, ${}^{235}_{92}\text{U}$, ${}^{238}_{92}\text{U}$ sú izotopy uránu. Na označenie niektorých nuklidov sa používajú osobitné symboly. V prípade izotopu vodíka ide o ${}^1_1\text{H}$ – prócium, ${}^2_1\text{H}$ – deutérium D , ${}^3_1\text{H}$ – trícium T .

Nuklidy s rovnakým počtom neutrónov a rôznym počtom protónov sú **izobary**, majú rovnaké nukleónové číslo, ale rôzne protónové číslo, napríklad ${}^3_1\text{H}$ a ${}^3_2\text{He}$; ${}^{14}_6\text{C}$ a ${}^{14}_7\text{N}$.

Nuklidy, ktoré majú rovnaký počet neutrónov sú **izotóny**, napríklad ${}^{30}_{15}\text{P}$ a ${}^{31}_{16}\text{S}$.

Jadrové izoméry (izobarické izotopy) sú nuklidy s rovnakými protónovými aj nukleónovými číslami. Majú rovnaký počet protónov aj neutrónov, líšia sa iba vzájomnou konfiguráciou v atómovom jadre. Jadrové izoméry sa líšia energetickými stavmi, parametrami jadrových premien a podobne. Vyšší izomér, čiže jadro s vyššou energiou, sa označuje malým ***m*** (metastabilný) za nukleónovým číslom ${}^A_mZ X$, napr.

${}^{80m}_{35}\text{Br}$ $A=80$, $Z=35$, $N=45$, polčas premeny 4,4 h

${}^{80}_{35}\text{Br}$ $A=80$, $Z=35$, $N=45$, polčas premeny 18 min

1.4.2 MODELÝ ATÓMOVÉHO JADRA

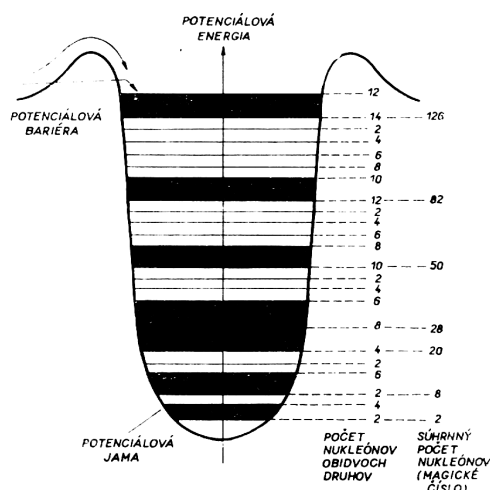
Mnohočasticová kvantová sústava akou je atómové jadro, je veľmi zložitý a mnohotvárný objekt. Sily, ktoré viažu v jadre navzájom nukleóny sú **vnútrojadrové sily**. Osobitným charakterom týchto síl je, že ich dosah je podstatne kratší, ako dosah coulombovských síl. Druhou zvláštnosťou je ich nasýtenosť. To znamená, že každý nukleón v jadre je vo vzájomnom pôsobení len s určitým obmedzeným počtom susedných nukleónov. Vnútrojadrové sily sú nezávislé od náboja. Teória, ktorá charakterizuje vnútrojadrové sily sa nazýva **mezónová teória**. Pôsobenie medzi nabitými časticami sprostredkuje elektromagnetické pole, pôsobenie medzi nukleónmi zabezpečuje **mezónové silové pole**. Bolo vytvorených niekoľko modelov atómového jadra, ktoré hovoria o rozmiestnení nukleónov v jadre, o ich pohybe a o reakcii na vonkajšie silové pôsobenie.

1. Kvapkový – štatistický model:

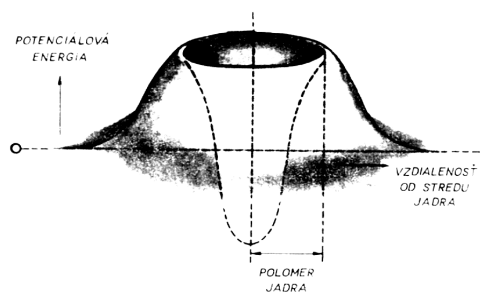
- vychádza z prirovnávania atómového jadra ku kvapke kvapaliny, t.j. objem jadra je úmerný počtu nukleónov, z ktorých je jadro zložené, podobne ako objem kvapky je úmerný hmotnosti kvapaliny. Protóny a neutróny sú rozložené štatisticky a sú v intenzívnom, neusporiadanom pohybe a vo vzájomnej neustálej interakcii

2. Sférický (hladinový) model:

- odvodzuje sa z predstavy pravidelnej konfigurácie nukleónov v atómovom jadre. Jadro má teda konkrétnu štruktúru. Hladinový model predpokladá, že v jadre ide o pravidelný pohyb nukleónov po určitých kvantovomechanických hladinách. Okolo jadra vzniká potenciálová bariéra, čo je prekážka pre nabitú časticu pri ich emisii z jadra alebo pri ich vniku do jadra.



Obr. 2 Energeticko-nukleónová schéma atómového jadra



Obr. 3 Priestorový model silových pomerov v atómovom jadre

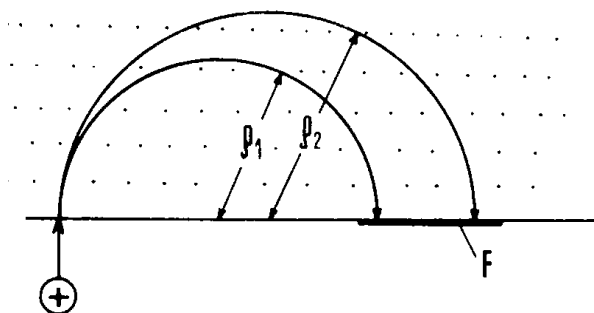
1.4.3 HMOTNOSŤ A VÄZBOVÁ ENERIGIA JADRA

Pokoiová hmotnosť elektrónov je 1836-krát menšia ako pokoiová hmotnosť nukleónov, teda väčšia časť hmotnosti nuklidu je sústredená v atómovom jadre.

Presné hmotnosti nuklidov sa určujú pomocou hmotnostných spektrografov podľa princípu, že kruhová dráha nabitých častíc v priečnom magnetickom alebo elektrickom poli závisí od hmotnosti a náboja častíc. Dráha ľahšieho iónu sa zakrivuje silnejšie ako dráha ťažšieho iónu, čo sa registruje na fotografickej doske v rôznych miestach, obrázok 4.

Porovnávaním vzdialenosti ich dopadu môžeme porovnávať ich hmotnosti a platí

$$\frac{\rho_1}{\rho_2} = \sqrt{\frac{m_1}{m_2}} \quad (11)$$



Obr. 4 Dráha iónov v magnetickom poli.

1.4.4 SPIN A MAGNETICKÝ MOMENT JADRA

Prejavom možnej asymetrie jadier sú jadrové momenty. Vlastný mechanický moment jadra sa nazýva **jadrový spin I**. Je to vektorový súčet orbitálnych momentov hybnosti a spinov nukleónov. Jadrá so spinom sa odlišujú od nuly, majú magnetický moment μ , ktorý je úmerný jadrovému spinu:

$$\mu = \gamma \cdot \frac{I \cdot h}{2\pi} \quad (12)$$

γ je konštanta úmernosti, nazýva sa **gyromagnetický pomer** a je pre rôzne jadrá rozličná. Existencia spinu a magnetického momentu má význam pre metódu jadrovej magnetickej rezonancie (NMR) v chémii, ktorou možno sledovať vplyv elektrónového obalu a susedných jadier na schopnosť orientácie jadra vo vonkajšom magnetickom poli. Najčastejšie sa využíva pri jadrách, ktorých spin je $\frac{1}{2}$.

1.4.5 STABILITA JADIER

Atómové jadro je všeobecne súbor nukleónov. Súdržnosť nukleónov v jadre vyjadruje ich väzbová energia. Atómové jadrá môžu byť v rozdielnych energetických stavoch. Základný energetický stav zodpovedá jeho najnižšej energii. Nuklidy s vyššou energiou sú v energeticky vzbudenom stave. U nuklidov s protónovým číslom menším ako 20 sa najväčšou väzbovou energiou vyznačujú jadrá, ktoré majú približne taký počet neutrónov ako protónov (tzv. pravidlo symetrie).

Nuklidy, ktoré sú schopné trvalej existencie a nejavia známky istej samovoľnej premeny, sa nazývajú **stabilné**. Stabilné nuklidy sú napríklad ľahké prvky ${}^4_2\text{He}$, ${}^8_4\text{Be}$, ${}^{12}_6\text{C}$, ${}^{16}_8\text{O}$. Stabilitu jadra určuje pomer neutrónov a protónov. Pri ľahkých prvkoch je $N/Z=1$, pri ťažkých prvkoch je pomer $N/Z=3/2$.

Niektoré jadrá sa však samovoľne premieňajú na iné atómové jadrá a majú veľký nadbytok protónov alebo neutrónov a tie sú nestále - **rádioaktívne**. Druhom samovoľnej premeny je rádioaktivita. Ide o premenu, ktorou si rádionuklidy samovoľne upravujú pomer protónov a neutrónov v prospech stabilnejšej konfigurácie.

Také rádioaktívne jadrá, ktorých premena je spojená s emisiou korpuskulárnej častice, sú **labilné**. Ak ide o vysielanie gama fotónu z nuklidu, čiže ide o prechod jadra z vyššieho energetického stavu do nižšieho, takéto jadro je **metastabilné**.

Skutočná hmotnosť atómového jadra (m_j) je menšia, ako zodpovedá súčet hmotnosti jeho nukleónov, teda protónov a neutrónov:

$$m_j = m_p \cdot Z + m_n \cdot N - B \quad (13)$$

kde B je hmotnostný úbytok a jeho hodnota je podľa teórie relativity úmerná väzbovej energii jadra

$$E_j = B \cdot c^2 \quad (14)$$

Vznik atómového jadra je exotermický dej. Celková väzbová energia vyjadruje stabilitu jadra. Väzbová energia sa môže vzťahovať na jeden nukleón, pričom stredná väzbová energia jadra pre jeden nukleón je vyjadrená ako

$$E_n = \frac{E_j}{A} \quad (15)$$

Energia atómového jadra je zhruba úmerná jeho hmotnosti. Energia sa vyjadruje v jednotkách elektrónvolt, eV.

1.4.6 NUKLIDY A IZOTOPY V PRÍRODE

V súčasnosti poznáme asi 1300 nuklidov, z ktorých je 270 stabilných. Nuklidy môžu mať párný alebo nepárny počet nukleónov. Rozlišujeme 4 typy nuklidov:

p-p – má párne protónové číslo, párne neutrónové číslo (${}^4_2\text{He}$)

p-n – má párne protónové číslo, nepárne neutrónové číslo

n-p – má nepárne protónové číslo, párne neutrónové číslo

n-n – má nepárne protónové číslo, nepárne neutrónové číslo (${}^2_1\text{H}$, ${}^6_3\text{Li}$, ${}^{10}_5\text{B}$, ${}^{14}_7\text{N}$)

Pre stabilitu izobarov platí Mattauchovo pravidlo, ktoré hovorí o tom, že z dvoch susedných izobarov je aspoň jeden rádioaktívny, napríklad ${}^3_2\text{He}$ nie je a ${}^3_1\text{H}$ je rádioaktívne. Vyše 90% hmotnosti zemskej kôry a meteoritov tvoria nuklidy typu p-p ${}^{16}_8\text{O}$, ${}^{24}_{12}\text{Mg}$, ${}^{28}_{14}\text{Si}$, ${}^{40}_{20}\text{Ca}$, ${}^{56}_{26}\text{Fe}$.

Pokiaľ ide o zloženie známej časti vesmíru, zastúpenie majú nuklidy ${}^1_1\text{H}$, ${}^4_2\text{He}$.

Izotopy sú modifikácie chemických prvkov s rozličnými atómovými váhami. Ich rozdielne fyzikálno-chemické vlastnosti charakterizujú izotopový jav. Napriek rozličnému charakteru žiarenia a atómových hmotností ich nemožno rozdeliť nijakou metódou. Existencia izotopov sa skúma metódou hmotnostnej spektrografie. Izotopová analýza prírodných prvkov dokázala, že väčšina z nich sa skladá z viacerých izotopov. Ako monoizotopné sa javia napr. ${}^9\text{Be}$, ${}^{27}\text{Al}$, ${}^{59}\text{Co}$, ${}^{127}\text{I}$, ${}^{232}\text{Th}$.

Prírodná rádioaktivita hornín je v podstate určovaná aktivitou ${}^{40}\text{K}$, ktorý patrí k najrozšírenejším rádionuklidom v prírode. Jeho aktivita je väčšia ako aktivita ostatných prírodných rádionuklidov spolu. Je jedným z piatich prvkov v prírode, ktorého nuklid má nepárny počet protónov ako aj nepárny počet neutrónov. V prírode sa vyskytuje viac ako 60 rádioaktívnych prvkov, len 18 s atómovým číslom menším ako 80. S výnimkou ${}^{14}\text{C}$, ktorý je v atmosfére neustále syntetizovaný majú všetky ostatné dĺžku života dlhšiu ako 10^9 roka. Ďalších 45 prírodných rádioaktívnych izotopov má atómové číslo väčšie ako 80.

2 RÁDIOAKTIVITA A KINETIKA RÁDIOAKTÍVNYCH PREMIEN

2.1 RÁDIOAKTIVITA – JADROVÉ ŽIARENIE

Takmer každý dej jadrovej premeny je spojený s vysielaním častíc alebo fotónov z atómového jadra. Častice, emitované atómovým jadrom, sa pohybujú veľkou rýchlosťou a predstavujú určitý druh žiarenia, **jadrového žiarenia** alebo **rádioaktívneho žiarenia**.

Poznáme niekoľko druhov jadrového žiarenia. Okrem rádioaktívneho tu patrí aj deuterónové, neutrónové a protónové žiarenie. **Neutrónové žiarenie** je charakterizované neutrónmi, ktorých prírodným zdrojom je kozmické žiarenie. Neutróny taktiež vznikajú ako produkty jadrových reakcií. Neutróny sú častice bez elektrického náboja a podľa veľkosti energie sa rozdeľujú na relativistické ($E > 20$ MeV), veľmi rýchle (10 MeV $< E < 20$ MeV), rýchle ($0,5$ MeV $< E < 10$ MeV), stredne rýchle (1 keV $< E < 500$ keV), pomalé ($E < 1$ keV). Pomalé neutróny môžu byť rezonančné ($E > 0,1$ eV) a tepelné ($E < 0,1$ eV).

Protónové žiarenie je prúdom najľahšieho izotopu vodíka ^1_1H . **Deuterónové žiarenie** je prúdom stredne ťažkého izotopu vodíka ^2_1H . Protóny aj deuteróny sa uvoľňujú pri jadrových reakciách. Spoločný termín pre alfa žiarenie, protónové a deuterónové žiarenie je iónové žiarenie.

Z hľadiska charakteru rozlišujeme žiarenie korpuskulárne a elektromagnetické. Korpuskulárne sa delí podľa hmotnosti častíc na ľahké (negatróny, pozitrony), stredné (protóny, neutróny, deuteróny, alfa častice) a ťažké (urýchlené ióny, štiepne jadrové trosky), elektromagnetické žiarenie je zastúpené gama-žiarením.

Spoločným znakom všetkých druhov žiarenia je vysoká energia, preto sa označuje ako žiarenie s vysokou energiou. Podobné je röntgenové žiarenie, ktoré má ale pôvod v elektrónovom obale atómu. V prípade jadrového a röntgenového žiarenia ide o ionizujúce žiarenie.

Žiarenie s veľkou energiou				
Jadrové žiarenie				Röntgenové žiarenie
Korpuskulárne žiarenie			fotónové žiarenie	
ľahké	stredné	ťažké		
beta - negatrónové - pozitronové	protónové alfa deutrónové neutrónové	urýchlené ióny štiepne trosky	gama	

Tab. 2 Žiarenie s veľkou energiou.

2.1.1 ZÁKLADNÉ CHARAKTERISTIKY RÁDIOAKTÍVNYCH PREMIEN

Nuklidy, ktoré podliehajú samovoľným rádioaktívnym premenám, sa nazývajú rádioaktívne nuklidy a samotný jav je rádioaktivita.

Rádioaktívne premeny sa vyznačujú niekoľkými charakteristikami:

- a) rádioaktívna premena je samovoľná, uvoľňuje sa pri nej energia
- b) rádioaktívna premena je vlastnosťou atómu a nezávisí od chemickej formy zlúčeniny
- c) počet druhov rádioaktívnych premien je obmedzený
- d) všetky druhy rádioaktívnych premien sa podriaďujú spoločnému základnému zákonu

Základný zákon rádioaktívnej premeny platí pre ľubovoľný rádioaktívny nuklid. Hovorí o tom, že za istý časový interval (napr. za 1 sekundu) sa premení vždy konštantný podiel z prítomného počtu atómov rádionuklidu.

Tento podiel sa nazýva **premenová konštanta** alebo **rádioaktívna rozpadová konštanta** a označuje sa λ .

$$\lambda = \frac{\Delta N / N}{\Delta t} \quad (16)$$

kde N je prítomný počet atómov istého rádionuklidu, ΔN je počet premenených atómov a Δt je časový interval premeny. Jednotkou premenovej konštanty je *becquerel Bq* alebo *curie Ci*, kde $1\text{Ci} = 3,7 \cdot 10^{10} \text{ s}^{-1}$. Premenová konštanta je najdôležitejšou charakteristikou každého rádionuklidu a jej hodnota nezávisí od vonkajších podmienok, teploty, tlaku, elektrického poľa, magnetického poľa ani od chemického stavu, v ktorom sa rádionuklid nachádza.

Inak by sme zákon rádioaktívnej premeny mohli charakterizovať tak, že v dôsledku samovoľnej premeny rádioaktívneho prvku ubúda s časom počet jeho atómov.

Pre časové ubúdanie počtu rádioaktívnych nuklidov platí:

$$dN = -\lambda \cdot N \cdot dt \quad (17)$$

kde N je počet rádioaktívnych nuklidov v čase t a dN je počet nuklidov, ktoré sa premenia za časový interval dt .

Ak integrujeme rovnicu na $t=0$ a ak $N=N_0$, potom pre počet rádioaktívnych nuklidov N_t v ľubovoľnom čase t sa získa vzťah:

$$N_t = N_0 \cdot e^{-\lambda t} \quad (18)$$

Počet premieňajúcich sa nuklidov sa zisťuje podľa počtu častíc emitovaných z atómového jadra. Počet častíc, ktoré opustia jadro za časovú jednotku sa považuje za **radiačnú intenzitu**

$$I_t = I_0 \cdot e^{-\lambda t} \quad (19)$$

Počet rádioaktívnych nuklidov alebo radiačná intenzita látky klesá exponenciálne s časom.

Mierou rádioaktivity pre istý počet atómov rádioaktívneho nuklidu je **aktivita**. Aktivita udáva rýchlosť rádioaktívnej premeny, t.j. udáva počet premenených atómov za sekundu. Pre aktivitu platí

$$A = \frac{\Delta N}{\Delta t} \quad \lambda = \frac{A}{N} \quad A = \lambda \cdot N \quad (20)$$

Aktivita je mierou intenzity rádioaktivity vzorky, ktorá obsahuje istý počet atómov daného rádionuklidu s premenovou konštantou λ . Hlavnou jednotkou aktivity je recipročná sekunda s^{-1} , často sa používa vedľajšia jednotka curie, Ci.

2.1.2 KINETIKA RÁDIOAKTÍVYCH PREMIEN; ŠTATISTICKÝ CHARAKTER RÁDIOAKTÍVNEJ PREMENEY

Premenová konštanta λ má stredneštatistický charakter. Pri istom počte atómov rádionuklidu za čas Δt sa nepremení presne $\lambda \cdot \Delta t$ časť atómov, ako by to vyplývalo zo základného zákona rádioaktívnej premeny, ale počet premien bude fluktuovať okolo istej strednej hodnoty.

Zo vzťahu (16) vyplýva, že

$$\frac{\Delta N}{N} = \lambda \cdot \Delta t \quad (21)$$

pričom výraz $\lambda \cdot \Delta t$ určuje teda podiel premenených atómov a pôvodného počtu atómov.

Presnejšie je to stredná (priemerná) hodnota tohto podielu a nazýva sa **pravdepodobnosť premeny p rádioaktívneho atómu** za čas Δt :

$$p = \lambda \cdot \Delta t \quad (22)$$

Pre pravdepodobnosť, že sa rádioaktívny atóm premení je možné odvodiť vzťah, kde platí, že pravdepodobnosť premeny p_i atómu istého rádionuklidu za krátky časový interval Δt_i je

$$p_i = \lambda \cdot \Delta t_i \quad (23)$$

Pre doplňujúcu pravdepodobnosť q_i , že atóm sa za rovnaký časový interval nepremení, platí:

$$q_i = 1 - p_i = 1 - \lambda \cdot \Delta t_i \quad (24)$$

Pre hľadané pravdepodobnosti v čase t platí

$$q_t = e^{-\lambda t} \quad p_t = 1 - e^{-\lambda t} \quad (25)$$

kde q_t je pravdepodobnosť, že atóm sa nepremení za čas t a p_t je pravdepodobnosť, že atóm sa premení za čas t .

Nestabilita atómov alebo metastabilných častíc sa charakterizuje **strednou dobou života τ** a predstavuje najpravdepodobnejšiu dobu života ktoréhokoľvek atómu uvažovaného rádioaktívneho prvku

$$\tau = \frac{1}{\lambda} \quad (26)$$

Kinetiku jednoduchej rádioaktívnej premeny môžeme vyjadriť tak, že predpokladáme, že sa atómy rádionuklidu X premieňajú na atómy nuklidu Y, ktoré sú stabilné $X \xrightarrow{\lambda} Y$.

Ak v čase $t=0$ vzorka obsahuje len atómy nuklidu X, potom pre ľubovoľný čas t platí

$$N + N_Y = N_0 \quad (27)$$

kde N_0 je počet atómov nuklidu X v $t=0$, N je počet nepremených atómov v čase t a N_Y je počet premenených atómov nuklidu X.

Ak podľa pravdepodobností q a p , platí:

$$N = N_0 \cdot q(t) \quad N_Y = N_0 \cdot p(t) \quad (28)$$

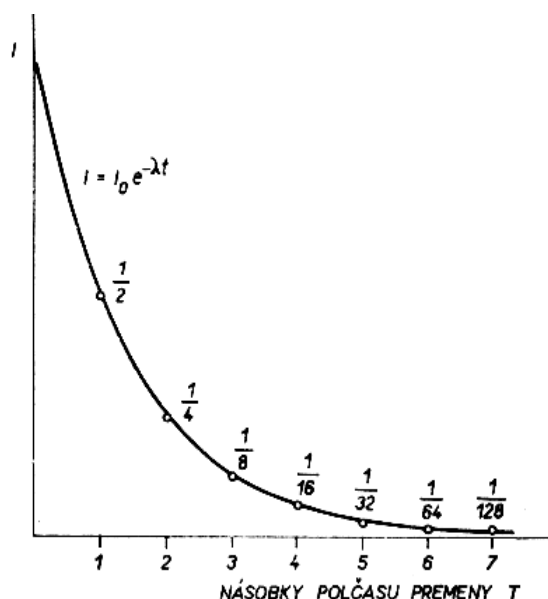
potom počet nepremených atómov rádionuklidu sa mení s časom podľa **exponenciálneho zákona rádioaktívnej premeny**:

$$N_T = N_0 \cdot e^{-\lambda t} \quad (29)$$

Kinetiku rádioaktívnej premeny charakterizuje **polčas premeny** alebo **polčas rozpadu T** . Je to priemerná doba, za ktorú sa počet rádioaktívneho nuklidu zmenší na polovicu. Je to určitý časový interval, za ktorý pôvodný počet rádioaktívnych atómov N_0 poklesne na polovičnú hodnotu N_T .

$$N_T = \frac{N_0}{2} \Rightarrow \frac{N_0}{2} = N_0 \cdot e^{-\lambda T} \Rightarrow \lambda \cdot T = \ln 2 \Rightarrow T = \frac{\ln 2}{\lambda} = \frac{0,693}{\lambda} \quad (30)$$

Polčas premeny sa môže názorne vyjadriť graficky na kinetickej krivke rádioaktívnej premeny, obrázok 5.



Obr. 5 Krivka rádioaktívneho rozpadu vo vzťahu k polčasu.

Premena rádioaktívnej látky prebieha teoreticky do nekonečna. Počet rádioaktívnych atómov však po určitej časovej dobe klesne na nemerateľné hodnoty a za čas, ktorý sa rovná 10-násobku polčasu rozpadu $t=10.T$, zodpovedá vzťahu

$$N_{10T} = N_0 \cdot 2^{-10} \quad (31)$$

Znamená to, že za tento čas poklesne radiačná intenzita asi na tisícinu pôvodnej hodnoty. Desaťnásobok polčasu rozpadu sa preto považuje za čas, za ktorý sa pôvodne rádioaktívna látka stáva takmer neaktívnou. V prípade extrémne krátkeho alebo extrémne dlhého polčasu premeny sa robí jeho určovanie inými metódami. Podľa polčasu premeny sa hovorí o krátkožijúcich a dlhožijúcich rádioaktívnych nuklidoch.

2.1.3 POSUNOVÉ PRAVIDLÁ

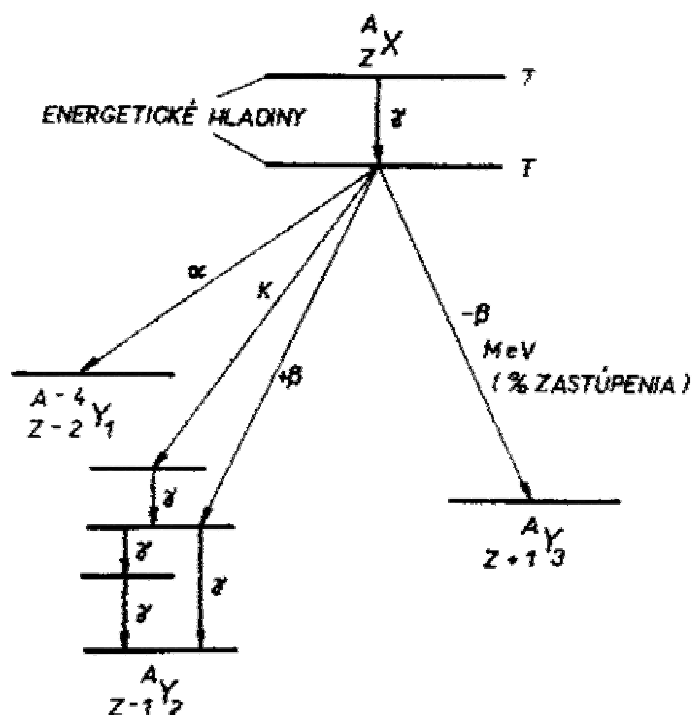
Pri rádioaktívnej premene atómov sa menia niektoré ich vlastnosti a konštanty. Väčšinou sa mení aj chemický charakter pôvodnej látky. Zmena poradového čísla prvku sa prejaví posunom jeho polohy v periodickej sústave prvkov. Tieto posuny sú vyjadrené v **posunových pravidlách**. Týkajú sa alfa, beta a gama premien.

1. Pri alfa premene sa protónové číslo prvku zníži o 2 jednotky a nukleónové číslo o 4 jednotky; prvok sa posunie v periodickej sústave prvkov o dve miesta doľava ${}_Z^AX \rightarrow {}_{Z-2}^{A-4}Y + \alpha$
2. Pri zápornej beta premene sa protónové číslo zvýši o 1 a nukleónové číslo ostáva bez zmeny. Prvok sa posunie o jedno miesto doprava ${}_Z^AX \rightarrow {}_{Z+1}^AY + e^-$
3. Pri kladnom beta rozpade sa protónové číslo prvku zmenší o 1 a nukleónové číslo ostáva bez zmeny. Prvok sa posunie o jedno miesto doľava ${}_Z^AX \rightarrow {}_{Z-1}^AY + e^+$
4. Pri gama žiarení a izomérnej premene atómového jadra sa nemení ani protónové ani nukleónové číslo prvku, preto sa nemení ani poloha prvku v periodickej sústave prvkov ${}_Z^mAX \rightarrow {}_Z^AX + \gamma$
5. Pri zachytení elektrónu sa protónové číslo zmenší o 1 a nukleónové číslo sa nemení ${}_Z^AX + e^- \rightarrow {}_{Z-1}^AY$

Premena rádioaktívneho prvku sa znázorní **schémou rádioaktívnych premien**, obrázok 6.

Energetické hladiny atómových jadier východiskového prvku a produktov rozpadu sa označujú vodorovnými čiarami. Vzďialenosti medzi nimi sú úmerné energii žiarenia, ktoré jadro vysiela. Vyššie umiestnené čiary zodpovedajú vyššej energii jadra. Vedľa čiary sa uvádza polčas premeny. Typ jadrovej premeny je vyjadrený smerom šípky a symbolom α , β^+ , β^- , γ a K (pre zachytenie elektrónu). Zvislá šípka znázorňuje jadrovú premenu, pri ktorej sa

nemení protónové číslo jadra. Šípky smerujúce doľava znamenajú znižovanie protónového čísla a šípky smerujúce doprava znamenajú zvyšovanie protónového čísla jadra.



Obr. 6 Všeobecná schéma rádioaktívnych premien.

2.1.4 PREMENOVÉ RADY

Väčšina umelých rádioaktívnych nuklidov prechádza jednostupňovou jadrovou premenou na stabilný nuklid. Z prírodných rádioaktívnych nuklidov sa takto premieňajú prvky so stredným protónovým číslom, napr. ${}_{19}^{40}\text{K}$, ${}_{37}^{87}\text{Rb}$, ${}_{49}^{115}\text{In}$.

Po rozpade ťažkých prírodných rádioaktívnych nuklidov často vznikajú znova rádioaktívne jadrá. Z **materského** nuklidu teda vzniká **dcérske** nuklid. Ak sa rádioaktívny materský nuklid rozpadáva na rádioaktívny dcérske nuklid a tento dej sa opakuje dovtedy, kým rozpadový produkt nebude stály nuklid, všetky nuklidy tohto prírodného rádioaktívneho rozpadového procesu sú členmi **rádioaktívneho premenového radu**.

Známe sú 4 rádioaktívne premenové rady, prvé tri sú prírodné, posledný je umelý.

1. Uránový – začína nuklidom $\text{U I } ({}_{92}^{238}\text{U})$ $T=4,51 \cdot 10^9$ r 14 premien

- končí nuklidom $({}_{82}^{206}\text{Pb})$

2. Aktíniový – začína nuklidom $({}_{92}^{235}\text{U})$ $T=7,13 \cdot 10^8$ r 11 premien

- končí nuklidom $({}_{82}^{207}\text{Pb})$

3. Tóriový – začína nuklidom $\text{Th} \left({}^{232}_{90}\text{Th} \right)$ $T=1,39 \cdot 10^{10}$ r 10 premien

- končí nuklidom $\left({}^{208}_{82}\text{Pb} \right)$

4. Neptúniový – začína nuklidom $\left({}^{237}_{93}\text{Np} \right)$ alebo $\left({}^{241}_{99}\text{Cm} \right)$ a $\left({}^{241}_{94}\text{Pu} \right)$

$T=2,14 \cdot 10^6$ r 11 premien

- končí nuklidom $\left({}^{209}_{83}\text{Bi} \right)$ (izotop bizmutu)

2. 2 DRUHY RÁDIOAKTÍVNYCH PREMIEN

Spontánne jadrové premeny sú exotermické procesy a ich základné formy sú **alfa**, **beta** a **gama** rádioaktívne premeny. K týmto procesom patrí aj neskôr objavené **samovoľné štiepenie** atómových jadier.

2.2.1 PREMENA ALFA

Premena alfa je rádioaktívna premena nuklidov, pri ktorej jadrá vysielajú častice alfa, t. j. jadrá atómov ${}^4_2\text{He}$. Alfa častica má dva kladné náboje, dva protóny a dva neutróny. Táto konfigurácia v jadre je mimoriadne pevným zoskupením. Alfa častice sú z jadra emitované s určitou hodnotou energie (až do 9 MeV). Alfa rozpad je charakteristickou vlastnosťou nestálych atómových jadier s vysokým protónovým číslom. Alfa rádioaktivita je vyjadrená ako



Energiu alfa žiarenia určujú vlastnosti rádioaktívneho jadra, ktoré žiarenie emituje. Alfa žiarenie vysielané rádioaktívnymi atómami rovnakého druhu je **monoenergetické**, preto má čiarové spektrum, t. j. častice alfa majú rovnakú energiu.

Alfa žiarenie sa odchyľuje v silnom elektrickom a magnetickom poli. Dĺžka dráhy alfa častice v určitom prostredí sa nazýva **dosah žiarenia**. Dosah žiarenia sa vyjadruje veličinou hrúbky d v m alebo plošnou hmotnosťou m_s v $\text{kg} \cdot \text{m}^{-2}$ prostredia, ktorým žiarenie prechádza

$$m_s = \frac{m}{S} = d \cdot \rho \quad (32)$$

kde m je hmotnosť vrstvy látky, S je veľkosť plochy vrstvy, d je hrúbka vrstvy a ρ je merná hmotnosť látky.

2.2.2 PREMENA BETA

Premena beta je rádioaktívna premena atómov, pri ktorej sa nemení počet nukleónov v jadre atómu, ale o jednotku sa mení počet protónov. Je charakterizovaná emisiou

negatrónu, teda pri relatívnom prebytku neutrónov v jadre, jeden neutrón sa mení na protón a vyžaruje sa negatrón. Proces sa označuje β^- a ide o **negatrónovú premenu** β^- .

Symbolicky ju môžeme zapísať ako $n \rightarrow p + e^-$ alebo vzťahom ${}_Z^AX \rightarrow {}_{Z+1}^AY + e^-$, napr. ${}_{15}^{32}P \rightarrow {}_{16}^{32}S + e^-$.

Pri relatívnom prebytku protónov sa jeden z nich zmení na neutrón a vyžaruje sa **pozitrón** β^+ a ide o **pozitrónovú premenu** β^+ , teda $p \rightarrow n + e^+$ alebo ${}_Z^AX \rightarrow {}_{Z-1}^AY + e^+$, napr. ${}_{15}^{30}P \rightarrow {}_{14}^{30}Si + e^+$.

V inom prípade môže dochádzať k **zachyteniu e^- , negatrónu**. V tomto prípade jadro, ktoré má relatívny nadbytok protónov, zachytí elektrón z elektrónového obalu vlastného atómu, $p + e^- \rightarrow n$ alebo aj ${}_Z^AX + e^- \rightarrow {}_{Z-1}^AY$, napr. ${}_4^7Be + e^- \rightarrow {}_3^7Li$.

Zachytenie je najpravdepodobnejšie zo sféry K, ktorá je najbližšie k jadrú. Po zachytení nasledujú sekundárne procesy. Na príslušnej hladine ostane prázdne miesto a zaplní ho ďalší elektrón vyššej kvantovej vrstvy, ktorého miesto zaplní ďalší elektrón. Tento proces vyvoláva **sprievodné röntgenové žiarenie**.

Beta žiarenie má elektrický náboj, preto sa emitované častice v elektrickom a magnetickom poli odchyľujú. Energia emitovaných častíc, negatrónov, má zvyčajne hodnotu do 10 MeV. Emitované pozitróny majú energiu do 4 MeV. Negatróny emitujú prírodné aj umelé rádionuklidy. Pozitróny sú charakteristické len pre umelé rádionuklidy.

Ak by všetku energiu uvoľnenú z jadra pri jeho rádioaktívnej beta premene predstavovali emitované elektróny, žiarenie by bolo **monoenergetické**. Beta žiarenie má však **spojité spektrum**. Vyskytujú sa v ňom elektróny s rôznou hodnotou energie od 0 po určitú maximálnu hodnotu $E_{\beta\max}$. Stredná hodnota energie beta žiarenia $\bar{E}$ je približne tretina z hodnoty maximálnej energie beta žiarenia

$$\bar{E} \doteq \frac{E_{\max}}{3} \quad (33)$$

Vysvetlenie energetického spektra beta žiarenia vychádza z predpokladu, že súčasne s beta časticami jadro uvoľňuje **neutríno ν** . Schémy vnútrojadrových premien potom sú takéto:

- negatrónové žiarenie $n \rightarrow p + e^- + \nu$
- pozitrónové žiarenie $p \rightarrow n + e^+ + \nu$
- zachytenie elektrónu $p + e^- \rightarrow n + \nu$

Celková energia premeny je rozdelená medzi emitovaným elektrónom a neutrínom

$$E_{\beta\max} = E_e + E_\nu \quad (34)$$

2.2.3 PREMENA GAMA

Premena gama je samovoľná premena atómov, pri ktorej sa nemení hmotnostné ani protónové číslo. Keď nuklid emituje alfa alebo beta časticu, nemusí sa sústava nukleónov v nuklide nevyhnutne dostať do základného energetického stavu s najnižšou energiou. Zvyškový nuklid je obyčajne vo vyššom energetickom stave, teda je v **excitovanom stave**. Atómové jadro sa zbavuje zvyšku energie vysielaním elektromagnetického žiarenia, ktorého energia zodpovedá rozdielu dvoch energetických hladín ($E_1 - E_2$).

Energertické kvantá tohto elektromagnetického žiarenia sa nazývajú gama fotóny a žiarenie je gama žiarenie. Energia gama fotónu dosahuje hodnoty do 5 MeV a vyjadríme ju ako:

$$E_\gamma = E_1 - E_2 = h \cdot \nu_h \quad (35)$$

Vyžiarenie zvyšku energie nuklidu môže nastať v jedinom stupni prechodu do základného energetického stavu, ale aj v niekoľkých stupňoch, kaskádach, s rozličnou energiou gama fotónov. Gama žiarenie sa svojí fyzikálnym charakterom najviac podobá röntgenovému žiareniu. Rozdiel medzi nimi je v tom, že gama žiarenie pochádza z atómového jadra má zvyčajne vyššiu energiu ako röntgenové žiarenie, ktoré má svoj pôvod v elektrónovom obale atómu.

Priemerná životnosť excitovaného stavu atómového jadra býva extrémne krátka, 10^{-13} až 10^{-14} sekundy, preto gama fotón sa vyžiari súčasne s jeho alfa premenou alebo beta premenou. V určitých prípadoch a v určitých energetických hladinách môže byť životnosť excitovaného jadra aj relatívne dlhá. Ak stredná doba života vzbudeného jadra je väčšia ako 10^{-11} s, hovoríme o **metastabilnom stave**, jadrá sa nazývajú metastabilné a označujú sa ${}^{\text{Am}}_Z\text{X}$.

Atómy nuklidov ${}^{\text{Am}}_Z\text{X}$ a ${}_Z^{\text{A}}\text{X}$ sú jadrové izoméry a sú to atómy toho istého nuklidu, ktoré sa odlišujú rádioaktívnymi charakteristikami. Samovoľný prechod jadrového izoméru z excitovaných hladín na nižší energetický stav sa nazýva **izomérny prechod**. Ak medzi dvomi jadrovými izomérmi istého nuklidu existuje izomérny prechod, hovoríme o **geneticky spojených izoméroch**.

Emisia žiarenia gama nie je jediný spôsob, ako sa vzbudené jadro zbavuje energie. Vzbudené jadro môže energiu jadra priamo odovzdať niektorému elektrónu z elektrónového obalu, zo sféry K. Navonok sa dej prejaví uvoľnením vysokoenergetického elektrónu z obalu. Dej sa nazýva **vnútorná konverzia** a uvoľnený elektrón je **konverzný elektrón** a je monoenergetický.

Po vnútornej konverzii sa výsledný atóm nachádza vo vzbudenom ionizovanom stave s nábojom $1+$. Preskokom elektrónu z vyššej hladiny na prázdne miesto po konverznom

elektróny sa uvoľňuje röntgenové žiarenie. Pri emisii gama fotónu sa nemení protónové ani nukleónové číslo vysielajúceho nuklidu ďalej beží podľa schémy ${}^A_mZ X \rightarrow {}^A_Z X + \gamma$.

Elektromagnetické žiarenie sa v spojitosti s jadrovými premenami teda môže prejaviť ako:

- vnútorná konverzia
- gama žiarenie – je vysielané metastabilnými nuklidmi a je to monoenergetické žiarenie
- brzdné žiarenie – vzniká vtedy, ak nabitá častica prechádza silovým poľom nuklidov absorbujúceho prostredia a má spojité energetické spektrum
- röntgenové žiarenie – charakteristická zložka tohto žiarenia vzniká pri deexcitácii atómov na vnútorných sférach elektrónového obalu
- anihilačné žiarenie – je výsledkom interakcie negatónu s pozitónom

2. 3 PRÍRODNÁ RÁDIOAKTIVITA

Z hľadiska pôvodu môžeme rádioaktívne nuklidy nachádzajúce sa v prírode zdeliť do troch skupín:

1. Prírodné nestabilné nuklidy primárneho pôvodu; t.j. rádionuklidy, ktorých polčasy premeny sú porovnateľné s vekom zeme.
2. Krátkožijúce rádioaktívne nuklidy, ktoré vznikajú rádioaktívnymi premenami z primárnych rádionuklidov.
3. Rádioaktívne nuklidy vznikajúce pri jadrových reakciách vplyvom kozmického žiarenia.

Prírodné rádioaktívne nuklidy nevychádzajúce do premenových radov sú nestabilné a podliehajú premenám. Medzi takéto patrí napríklad ${}^{40}\text{K}$ alebo ${}^{87}\text{Rb}$. Neskôr bolo zistené, že takýchto nuklidov je asi 14, polčas premeny je v intervale 10^{10} - 10^{16} rokov. Rádionuklidy, ktoré vznikajú neprestajne účinkom kozmického žiarenia na atmosféru zeme sú kozmogénne rádionuklidy. Ich doby života a polčasy premeny sú krátke, napr. ${}^{14}\text{C}$ - $T=5,7$ r., ${}^3\text{H}$ - $T=12,3$ r., ${}^{10}\text{Be}$ - $T=2,7 \cdot 10^6$ r.

Medzi prirodzené zdroje ionizujúceho žiarenia patrí aj kozmické žiarenie. Dopadá na zemský povrch z vesmíru a z vrstiev zemskej atmosféry. Radiačné pole v atmosfére je tvorené tromi zložkami. Prvou je **žiarenie zemských radiačných pásov**. Sú to vplyvom magnetického poľa Zeme vytvorené oblasti, v ktorých dochádza k záhytu elektricky nabitých častíc. Podľa vzdialenosti od povrchu Zeme ich rozdeľujeme na vonkajšiu radiačnú zložku, tá je tvorená pásmi protónov a elektrónov s energiami niekoľko MeV a vnútornú radiačnú zložku, ktorá je tvorená dvomi menšími Van Allenovými pásmi, z ktorých jeden obsahuje elektróny a druhý protóny. **Solárna zložka kozmického žiarenia** je tvorená väčšinou protónmi, časticami alfa a niektorými ľahkými iónmi, ktoré sú emitované pri erupcii na Slnku. **Galaktická zložka** je tvorená prevažne protónmi (87%) a v menšej miere alfa časticami

(12%), ďalej ťažkými jadrami (asi 1%), elektrónmi a protónmi. V období slnečnej erupcie sa vplyvom magnetického poľa Slnka tieni galaktická zložka a v období nízkej slnečnej aktivity sa táto hodnota zhruba zdvojnásobí.

Pri interakcii kozmického žiarenia s atmosférou a litosférou dochádza k jadrovým reakciám, ktorých typ závisí od zloženia atmosféry a litosféry a od zloženia energetického spektra kozmického žiarenia. Vzhľadom k našej planéte rozlišujeme dve zložky kozmického žiarenia. Je to *primárna zložka* zložená predovšetkým z protónov a alfa častíc, ktoré prevládajú nad hranicou atmosféry a *sekundárna zložka*, ktorá vzniká interakciou primárnej zložky s molekulami atmosféry. Produkcia kozmogénnych rádionuklidov nie je vo všetkých zemepisných šírkach rovnaká. Magnetické pole Zeme vychyluje prichádzajúce kozmické častice smerom k pólom, preto intenzita kozmického žiarenia a následná produkcia kozmogénnych rádionuklidov narastá s rastúcou zemepisnou šírkou. Vzniknuté rádionuklidy sú veľmi efektívne zachytené atmosferickými aerosólmi a zúčastňujú sa pohybu vzdušných mäs, až kým sa nedostanú do nižších vrstiev. Vo výške oblakov sú potom zachytávané kvapkami vodných pár a pri zrážkovej činnosti dôjde k ich vymývaniu a transportu na zem.

2.3.1 JADROVÁ GEOCHRONOLÓGIA

Rádioaktívne premeny sa využívajú na stanovenie veku minerálov a hornín. Vek minerálu možno vyrátať z údajov o obsahu istého rádionuklidu a produktu jeho rádioaktívnej premeny v minerále, ak je známy **polčas premeny** rádionuklidu.

Na stanovenie geologických vekov sa používajú tieto základné rádioaktívne nuklidy:

- uránový premenový rad - $^{238}\text{U} \rightarrow ^{206}\text{Pb} + 8^4\text{He}$
- aktinouránový premenový rad - $^{235}\text{U} \rightarrow ^{207}\text{Pb} + 7^4\text{He}$
- tóriový premenový rad - $^{232}\text{Th} \rightarrow ^{208}\text{Pb} + 6^4\text{He}$

Vychádzajúc z týchto rádioaktívnych premien boli vypracované metódy **jadrovej geochronológie**:

1. Metóda založená na stanovení obsahu hélia v mineráloch obsahujúcich urán, resp. tórium – héliová metóda
2. Metóda založená na stanovení obsahu olova v mineráloch obsahujúcich urán, resp. tórium – Pb – metóda
3. Metóda založená na stanovení obsahu draslíka a argónu v mineráloch obsahujúcich urán, resp. tórium – argónová metóda
4. Metóda založená na stanovení obsahu rubídia a stroncia v mineráloch obsahujúcich urán, resp. tórium – stronciová metóda

5. Metóda založená na stanovení obsahu uhlíka v mineráloch – rádiouhlíková metóda stanovenia veku skamenelín

Rádiouhlíková metóda sa využíva dodnes na stanovenie veku skamenelín. Princíp tejto metódy spočíva v tom, že v atmosfére vzniká rádionuklid ^{14}C . Za každú sekundu nad 1 m^2 zemského povrchu vzniká $2,4 \cdot 10^4$ atómov rádiouhlíka ^{14}C . Takmer všetky neutróny sekundárneho kozmického žiarenia sa zachytávajú jadrami atmosferického dusíka so vznikom ^{14}C , podľa schémy $^{14}_7\text{N} + ^1_0\text{H} \rightarrow ^{14}_6\text{C} + ^1_1\text{p}$. Rádionuklid ^{14}C sa potom samovoľne premieňa emisiou negatrónu $^{14}_6\text{C} \rightarrow ^{14}_7\text{N} + \beta^-$, kde je polčas rozpadu $T=5720$ rokov.

Ak rýchlosť vzniku atómov ^{14}C bude konštantná počas 5 až 10 polčasov premeny ^{14}C , teda nezmení sa intenzita kozmického žiarenia, ustáli sa stav analogický **vekovej rádioaktívnej rovnováhe**, keď rýchlosť premeny ^{14}C je rovné rýchlosti vzniku ^{14}C . Atómy ^{14}C , ktoré vznikajú v atmosfére sa okamžite oxidujú na $^{14}\text{CO}_2$. Molekuly $^{14}\text{CO}_2$ sa premiešavajú s atmosferickým neaktívnym CO_2 . Atmosferický CO_2 sa vymieňa s uhlíkom nachádzajúcim sa v oceáne a na zemskom povrchu, prebieha fotosyntéza a takto sa ^{14}C rovnomerne distribuuje v týchto hlavných zdrojoch tzv. výmenného uhlíka.

Množstvo výmenného uhlíka bolo odhadnuté asi na 83 kg na m^2 zemského povrchu. Ak sa objekt, ktorý obsahuje výmenný uhlík, prestane zúčastňovať na výmene, odumiera a prestáva si zabezpečovať prísun ^{14}C . Merná aktivita uhlíka sa znižuje exponenciálne s polčasom premeny ^{14}C :

$$a = a_r \cdot e^{\frac{-0,693}{T} \cdot t} \quad (36)$$

pričom a je merná aktivita uhlíka odumretého objektu, a_r je rovnovážna merná aktivita uhlíka a t je čas, ktorý uplynul od odumretia. Hodnota a_r je rovná 275 Bq na 1 kg C , pretože obsah rádioaktívnej látky v tele je konštantný. Z pomeru a/a_r teda možno vypočítať čas, kedy organizmus odumrel. Všeobecne je možné na výpočet veku minerálu použiť vzťah:

$$N_s = n \cdot N_r \left(e^{\frac{0,693 \cdot t}{T}} - 1 \right) \quad (37)$$

kde N_s je počet atómov stabilného izotopu, n je počet rozpadov, N_r je počet atómov pôvodného prvku, t je vek minerálu a T je polčas rozpadu. Takto bol určený aj vek Zeme na $4,5$ až $5,5$ miliardy rokov a mnohé ďalšie archeologické a paleontologické objekty a vzorky.

3 FYZIKÁLNE A CHEMICKÉ ÚČINKY JADROVÉHO ŽIARENIA

3. 1 INTERAKCIA IONIZUJÚCEHO ŽIARENIA S ATÓMOVÝM OBALOM A JADROM

Jadrové žiarenie sa vyznačuje veľkou energiou. Po prechode látkami dochádza k vzájomnému pôsobeniu, interakcii, s atómami a molekulami, pri ktorom vysokoenergetické častice odovzdávajú časť alebo aj celú svoju energiu obalovým elektrónom alebo atómovým jadrám.

Keď žiarenie prechádza prostredím, nastáva medzi nimi vzájomné pôsobenie. Žiarenie sa môže pri interakcii absorbovať, rozptýliť alebo sa jeden druh žiarenia premení na iný druh. Vzájomné pôsobenie žiarenia a prostredia sa môže týkať interakcie s atómovými jadrami, obalovými elektrónmi, voľnými časticami alebo silovým poľom. Interakcia môže mať rozličný charakter, prehľad interakčných dejov je uvedený v tabuľke 3.

Pružná zrážka je zrážka, pri ktorej sa nemení vnútorná alebo celková kinetická energia častíc alebo fotónov, nemení sa vnútorný stav ani počet zrážajúcich sa častíc. Pružný rozptyl nabitých častíc na jadrách má prevažne charakter **Rutherfordovho rozptylu**, pri neutrónoch ide o **spomaľovanie** (moderovanie), kým v prípade gama žiarenia je to väčšinou **Rayleighov rozptyl** na elektrónovom obale.

Nepružná zrážka spôsobuje zmenu vnútornej energie jedného alebo viacerých zložiek kolidujúcej sústavy alebo zmenu celkovej kinetickej energie sústavy. Prípade nepružnej zrážky, v ktorej sa dopadajúce žiarenie celkom pohltí sa nazýva **absorpcia žiarenia**. Nepružný rozptyl má viacero variantov. V prípade nabitých častíc ide o **ionizáciu** a **excitáciu**, pri gama žiarení ide o **Comptonov rozptyl**. Na jadrách má nepružný rozptyl v prípade beta žiarenia charakter **brzdného žiarenia** a v prípade neutrónov a fotónov ide o **rezonančný rozptyl**.

Absorpcia žiarenia má na jadrách charakter **jadrovej reakcie**:

- výmennej – alfa žiarenie a neutrónové žiarenie
- záchytnej – neutrónové žiarenie
- fotodezintegrácie – fotónové žiarenie
- zachytenie elektrónu – beta žiarenie

Absorpciou fotónového žiarenia v silovom poli atómového jadra môže vzniknúť elektrónový pár. Absorpcia v elektrónovom obale atómu môže byť anihilačný jav (pozitrónové žiarenie) alebo fotoelektrický jav (gama žiarenie).

Interakcia žiarenia s elektrónovým obalom atómov prostredia je podmienená elektrónovou hustotou prostredia, ktorým žiarenie prechádza. Je vyjadrená výrazom $N_A \cdot \frac{Z}{A}$, kde pomer Z/A je úmerný elektrónovej hustote a je pre všetky nuklidy rovný hodnote približne 0,5, iba pre izotop ^1_1H je rovný 1.

Žiarenie	Interagujúca zložka	Typ prevládajúcej interakcie		
		pružná zrážka	nepružná zrážka	absorpcia
Alfa	atómové jadro	Rutherfordov rozptyl	brzdné žiarenie (nepatrné)	výmenná jadrová reakcia
	obal	-	ionizácia, excitácia	-
Elektróny	atómové jadro	Rutherfordov rozptyl (základ spätného rozptylu)	brzdné žiarenie (najmä s vysokým Z)	zachytenie elektrónu
	obal	-	ionizácia, excitácia	anihilácia (pri pozitróne)
Neutróny	atómové jadro	Spomaľovanie neutrónov	Jadrový rezonančný rozptyl (excitácia)	Záchytná jadrová reakcia, výmenná jadrová reakcia
	obal	-	-	-
Fotóny	atómové jadro	-	jadrová rezonancia (Mössbauerov jav)	fotodezintegrácia
	obal	Rayleighov rozptyl	Comptonov rozptyl	fotoelektrický jav
	silové pole	-	-	vznik elektrónového páru

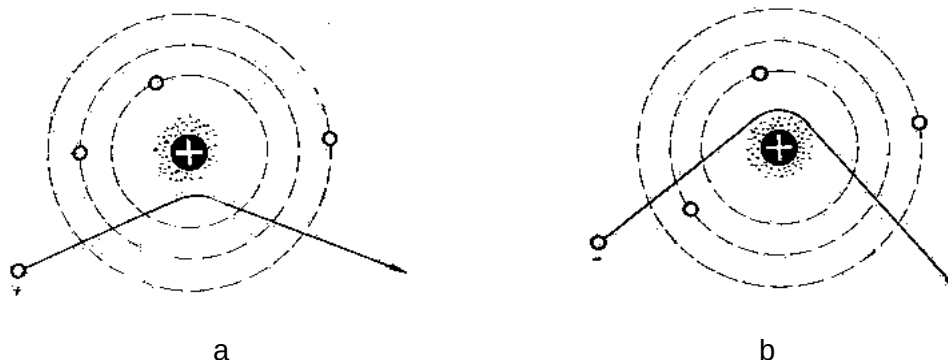
Tab. 3 Prehľad interakčných dejov podľa typu žiarenia a zrážky.

3.1.1 PRUŽNÉ ZRÁŽKY

K pružným zrážkam zaraďujeme Rutherfordov rozptyl, moderovanie – spomaľovanie neutrónov a Rayleighov rozptyl.

Rutherfordov rozptyl je prípad pružnej coulombovskej interakcie častice s atómovým jadrom. V prípade alfa častice, teda častice s kladným nábojom, ide o zmenu smeru žiarenia od nuklidu, obrázok 7 a, ak je častica nabitá záporne, teda ide o beta žiarenie, nastáva zmena smeru žiarenia k nuklidu, obrázok 7 b.

Keďže pri zrážke je celková kinetická energia systému konštantná a atóm je mnohonásobne ťažší ako elektrón, energia beta častice pred zrážkou a po nej je takmer rovnaká. Rutherfordov rozptyl ako interakčný dej je primárnou príčinou spätného rozptylu beta žiarenia.

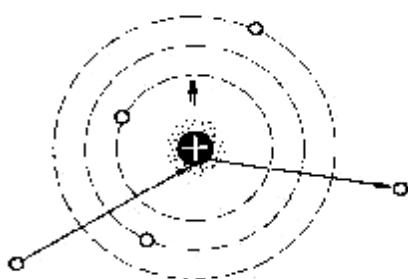


Obr. 7 Schéma Rutherfordovho rozptylu a) kladnej častice, b) zápornej častice.

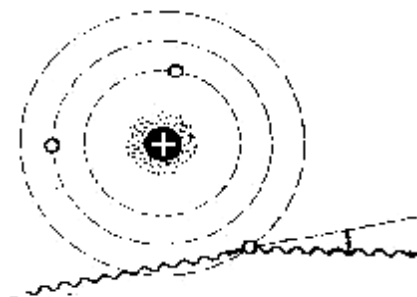
Moderovanie (spomaľovanie) neutrónov je výsledkom pružnej interakcie neutrónov s atómovým jadrom. V procese pružnej zrážky medzi neutrónom a nuklidom sa nemení celková kinetická energia sústavy. Kinetická energia neutrónu sa zmenší o hodnotu, o ktorú vzrastie kinetická energia nuklidu v dôsledku zrážky. Mení sa aj smer neutrónu pred a po zrážke. Schéma pružnej zrážky je na obrázku 8. Pre vzájomný vzťah kinetickej energie dopadajúceho neutrónu, rozptýleného neutrónu a odrazeného atómového jadra platí

$$E_{dn} = E_m + E_{oj} \quad (38)$$

Rayleighov rozptyl sa uplatňuje na elektrónovom obale v prípade fotónového žiarenia s nízkou energiou. Ak energia fotónov nestačí na Comptonov rozptyl alebo na fotoelektrický jav, zrážka je pružná a energia fotónu pred zrážkou a po zrážke je rovnaká. Odchýlka fotónu je len veľmi malá. Schéma Rayleighovho rozptylu je na obrázku 9.



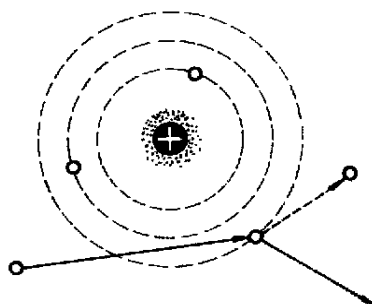
Obr. 8 Schéma pružnej zrážky.



Obr. 9 Schéma Rayleighovho rozptylu.

3.1.2 NEPRUŽNÉ ZRÁŽKY

Radiačná ionizácia je forma nepružnej interakcie s obalovým elektrónom na vonkajšej hladine, obrázok 10. Pri tomto procese sa uvoľní príslušný obalový elektrón. Z pôvodne neutrálnej sústavy atómu alebo molekuly vzniká kladný ión. Na odtrhnutie elektrónu je potrebná ionizačná energia.



Obr. 10 Schéma radiačnej ionizácie.

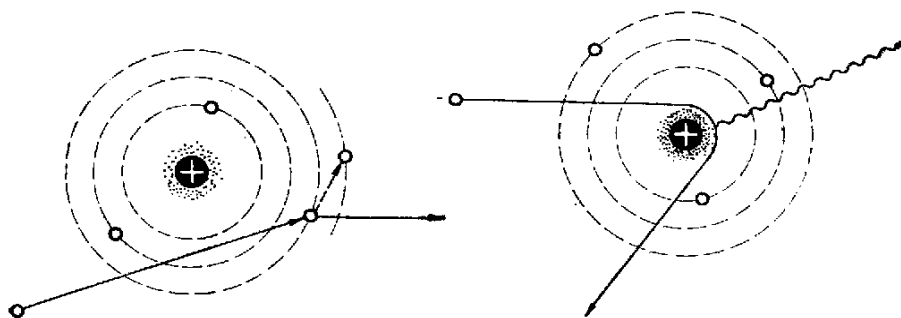
Energia častice pred zrážkou E_0 je vyššia ako po zrážke E_z a to o hodnotu väzbovej energie uvoľneného elektrónu v obale atómu E_{ev} a hodnotu jeho kinetickej energie:

$$E_z = E_0 - \left(E_{ev} + \frac{1}{2} m_e v^2 \right) \quad (39)$$

Uvoľnený elektrón postupne stráca kinetickú energiu a pri dostatočne nízkej energii spojením s atómom alebo molekulou vytvorí záporný ión. Pri radiačnom uvoľnení elektrónu z atómu mu môže jadrové žiarenie odovzdať takú vysokú hodnotu kinetickej energie, že vyrazený elektrón je schopný sám sa ionizovať, nastáva **sekundárna ionizácia** a elektróny tvoria **delta žiarenie**.

Radiačná excitácia je vlastne vzбудenie atómov alebo molekúl, obrázok 11. Pri tomto deji sa vyrážajú elektróny v atómoch alebo molekulách absorbujúcej látky z nižších kvantových hladín na vyššie. Excitovaný stav atómu alebo molekuly je pre zvýšený obsah energie nestály a zbavuje sa nadbytočnej energie spätným preskokom elektrónov, pričom súčasne vysiela **fotóny**.

Brzdné žiarenie je produktom nepružnej interakcie beta častíc s atómovým jadrom. Je dôsledkom interakcie elektrónov s coulombovským poľom atómového jadra. Má spojité energetické centrum, obrázok 12.



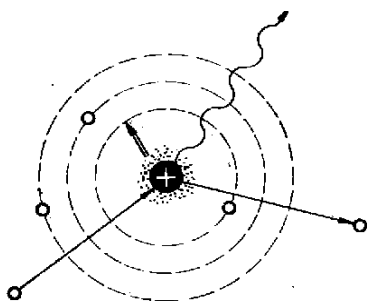
Obr. 11 Schéma radiačnej excitácie.

Obr. 12 Schéma vzniku brzdného žiarenia.

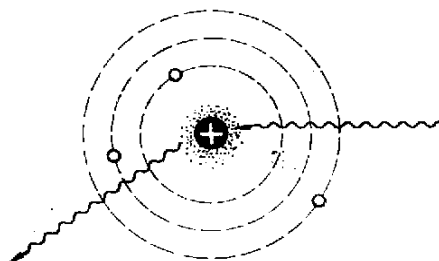
Nepružný rezonančný rozptyl neutrónov na atómových jadrách predstavuje stratu kinetickej energie v dôsledku jej prenosu na nuklid, ktorý sa potom dostáva do excitovaného stavu, obrázok 13. Neutrón sa zrazí s nuklidom, z ktorého sa uvoľní iný neutrón so zníženou kinetickou energiou. Časť energie, ktorú stráca dopadajúci neutrón spôsobuje excitáciu nuklidu. Tento nadbytok energie jadra sa vyžiarí vo forme gama fotónu a platí

$$E_{dn} = E_{rn} + E_{oj} + E_{\gamma} \quad (40)$$

Jadrová rezonancia je nepružný rozptyl fotónov, ak frekvencia vnútrojadrového pohybu je v súlade s kmitočtom dopadajúceho gama žiarenia. Je to interakcia s atómovým jadrom, pri ktorom z excitovaného jadra je fotón reemitovaný s nepatrne pozmenenou energiou a nazýva sa Mössbauerov efekt, obrázok 14.



Obr. 13 Schéma nepružnej zrážky neutrónu.

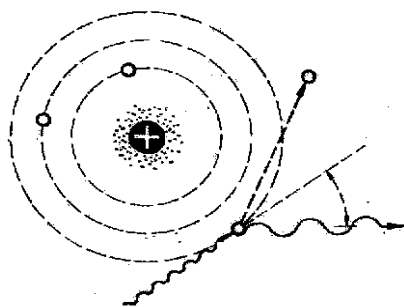


Obr. 14 Schéma jadrovej rezonancie.

Comptonov rozptyl sa týka fotónov so strednou hodnotou energie (0,5 - 1 MeV), obrázok 15. Pri interakcii fotónu s nízkoenergetickým obalovým elektrónom na vonkajšej hladine, časť energie sa preniesie z fotónu na elektrón, fotón zmení smer pohybu a stratí časť energie, platí

$$E_D = h \cdot \nu - h \cdot \nu' \quad (41)$$

kde E_D je energia fotónu, $h \cdot \nu$ je fotón pred interakciou a $h \cdot \nu'$ je fotón po Comptonovom rozptyle. Odchýlený fotón so zníženou energiou môže znova interagovať s absorbujúcim prostredím. Jeden gama fotón sa podieľa na niekoľkonásobnej Comptonovej interakcii.



Obr. 15 Schéma Comptonovho rozptylu.

3.1.3 ABSORPČNÁ INTERAKCIA

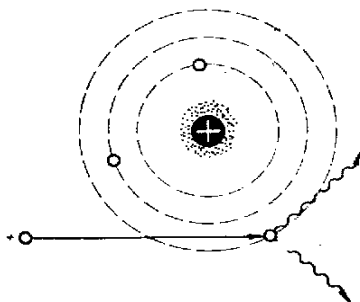
Výmenná jadrová reakcia (transmutácia) je jadrová reakcia, v ktorej sa nuklid jedného prvku mení na nuklid iného prvku a ide o absorpčný interakčný proces jadra a alfa častice.

Zachytenie elektrónu sa uplatňuje vtedy, ak je v jadre hodnota pomeru neutrón – protón veľmi nízka a stabilizácia jadra nemôže nastať emisiou pozitrónu. Nuklid sa stabilizuje zvýšením pomeru v dôsledku pohltienia jedného elektrónu zo sféry K, t. j. K – elektrónu.

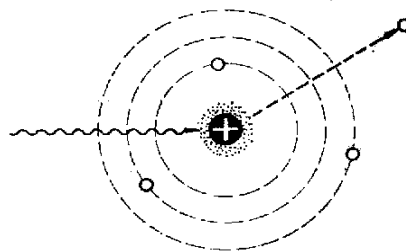
Anihilácia je interakcia pozitrónu s obalovým elektrónom, interagujú teda dve antičastice. Zanikajú obe častice za vzniku elektromagnetického žiarenia vo forme dvoch fotónov, obrázok 16. Korpuskulárna forma žiarenia sa mení na elektromagnetické vlnenie.

Záchytné jadrové reakcie sú interakcie medzi neutrónmi a atómovými jadrami, pri ktorých sa dopadajúca častica absorbuje partnerským nuklidom.

Fotodezintegrácia je zrážka vysokoenergetického fotónu s atómovým jadrom. Fotón sa absorbuje nuklidom, z ktorého sa emituje neutrón, protón alebo alfa častica, obrázok 17.



Obr. 16 Schéma anihilácie pozitrónu.



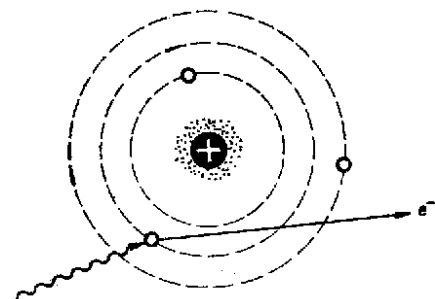
Obr. 17 Schéma fotodezintegrácie.

Fotoelektrický jav je interakcia nízkoenergetických fotónov s obalovým elektrónom. Celková energia fotónu sa preniesie na elektrón, ktorý opustí atóm, ide o ionizáciu atómu. Vzniká pri tom iónový pár, obrázok 18. Kinetická energia fotoelektrónu sa potom vyjadří ako

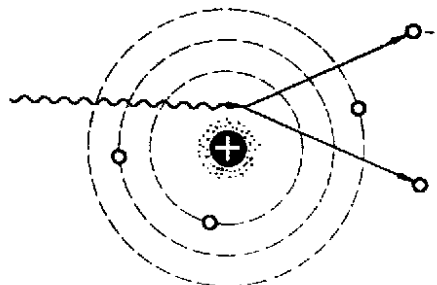
$$\frac{1}{2}m_e v^2 = E_\gamma - E_{ev} \quad (42)$$

kde E_γ je energia gama fotónu a E_{ev} je väzbová energia elektrónu v obale atómu.

Vznik elektrónového páru je absorpčná interakcia vysokoenergetického fotónu so silovým poľom atómového jadra. Fotónové žiarenie sa v silnom elektrickom poli jadra mení na dvojicu negatrón - pozitron, obrázok 19. Tvorbu elektrónového páru sprevádza vznik **anihilačného žiarenia**.



Obr. 18 Schéma fotoelektrického javu.



Obr. 19 Schéma vzniku elektrónového páru.

3.1.4 INTERAKCIA ALFA ŽIARENIA

Interakcia alfa častíc, pri ktorej ide o prenos energie na atómy absorbujúceho prostredia, sa deje prevažne formou nepružnej zrážky s ich obalovými elektrónmi. V tomto prípade ide o **radiačnú ionizáciu** alebo **excitáciu**. Alfa častica stráca pritom svoju energiu postupne po častiach. Keďže alfa častica má relatívne veľkú hmotnosť, preto si pri interakciách zachováva svoj pôvodný smer a dráha častice je priamočiara. Alfa žiarenie spôsobuje veľmi hustú **ionizáciu**. Ióny sú rozložené v blízkosti dráhy častice. Až ku koncu dráhy sa častica neutralizuje postupne dvoma elektrónmi a stráca svoju identitu tým, že sa mení na neutrálny héliový atóm. Počet alfa častíc pri prenikaní absorbujúcim prostredím náhle poklesne.

Pri veľmi vysokých energiách sa pri interakcii alfa žiarenia uplatňuje interakcia s atómovým jadrom vo forme **Rutherfordovho rozptylu**, **výmennej jadrovej reakcie** alebo vo forme **brzdného žiarenia**. Podobne ako alfa žiarenie interagujú s prostredím aj protóny, deuteróny, ľahké ióny a štiepne trosky.

3.1.5 INTERAKCIA BETA ŽIARENIA

Základnými formami nepružného prenosu energie beta žiarenia sú **excitácia** a **ionizácia**. Interakcia beta žiarenia s atómovými jadrami má charakter **Rutherfordovho rozptylu** a **brzdného žiarenia**. Hmotnosť elektrónu je nižšia ako hmotnosť alfa častíc, preto lineárna ionizácia má nižšiu hodnotu. S tým súvisí vyššia prenikavosť beta žiarenia. Pri

prechode látkovým prostredím intenzita beta žiarenia klesá, pričom pokles intenzity sa vyjadrí ako

$$I = I_0 \cdot e^{-\mu_l d} \quad (43)$$

kde I je intenzita beta žiarenia po prechode látkou hrúbky d , I_0 je intenzita dopadajúceho žiarenia a μ_l je lineárny súčiniteľ zoslabenia [m^{-1}].

Súčiniteľ zoslabenia μ_l je určený hustotou prostredia ρ . Zavádza sa veličina **hmotnostný súčiniteľ zoslabenia** μ_m [$m^2 \cdot kg^{-1}$]

$$\mu_m = \frac{\mu_l}{\rho} \quad (44)$$

Hrúbka absorbujúceho prostredia sa vyjadrí ako plošná hmotnosť m_s [$kg \cdot m^{-2}$]

$$m_s = d \cdot \rho \quad (45)$$

a potom platí

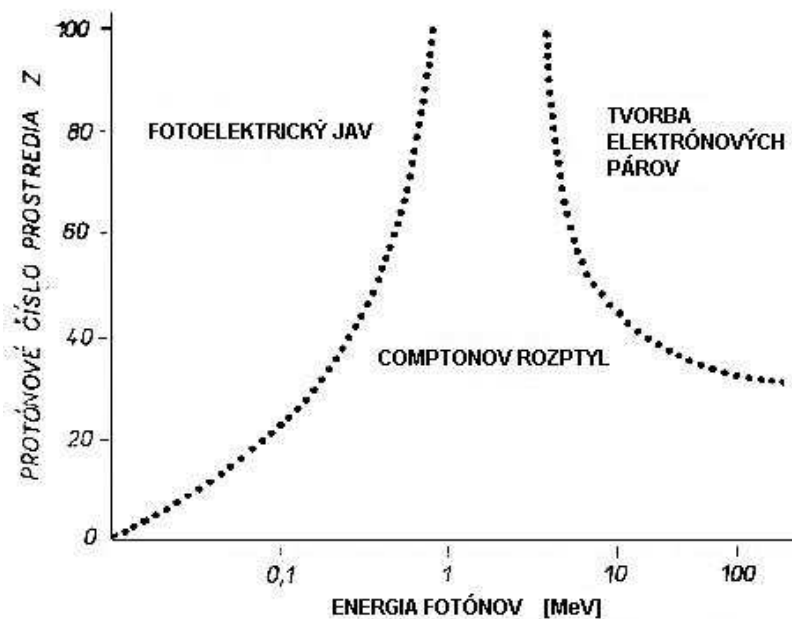
$$I = I_0 \cdot e^{-\mu_m m_s} \quad (46)$$

Absorpcia beta žiarenia sa charakterizuje takou hrúbkou absorbujúcej látky, ktorá znižuje pôvodnú intenzitu žiarenia na polovičnú hodnotu a hovoríme o **polhrúbke** $d_{1/2}$. Vrstva, ktorá zníži intenzitu beta žiarenia takmer na nulu sa nazýva **úplne absorbujúca vrstva**.

3.1.6 INTERAKCIA GAMA ŽIARENIA

Gama žiarenie má vlnový charakter, a preto sa jeho interakcia odlišuje od korpuskulárneho žiarenia. Prenos energie medzi gama časticami a elektrónovým obalom je charakterizovaný **fotoelektrickým javom** a **Comptonovým rozptylom**, interakcia so silovým poľom spôsobuje vznik **elektrónového páru**. Pri fotoelektrickom jave sa energia gama fotónu preniesie na obalový elektrón, pričom sa uvoľní fotoelektrón.

Nízkoenergetické gama žiarenie (do 0,1 MeV) môže interagovať s elektrónovým obalom absorbujúceho žiarenia aj vo forme **Rayleighovho rozptylu**. Interakcia gama žiarenia s atómovými jadrami absorbujúceho prostredia môže vyvolať jadrovú reakciu a dochádza k **photodezintegrácii jadra**. Radiačná intenzita gama žiarenia klesá podľa vzťahu (43). Na zoslabení radiačnej intenzity gama žiarenia pri prechode látkovým prostredím sa podieľajú tri základné formy interakcie gama fotónov. V prípade mäkkého gama žiarenia sa uplatňuje fotoelektrický jav, pri strednej energii gama fotónov prevláda Comptonov rozptyl a v prípade tvrdého gama žiarenia prevláda tvorba elektrónového páru. Ktorý z dejov prevláda, závisí od energie gama žiarenia a od protónového čísla. Často sa tieto interakcie prelínajú, nie sú určené hraničné podmienky, obrázok 20.



Obr. 20 Vplyv absorbujúcej látky a energie žiarenia na charakter interakčného deja gama fotónov.

3.1.7 INTERAKCIA NEUTRÓNOVÉHO ŽIARENIA

Neutrónové žiarenie má korpuskulárny charakter, ale bez elektrického náboja. Pri prechode látkou neutróny skoro vôbec nevstupujú do interakcie s elektrónovým obalom prostredia. Základnými formami prenosu energie neutrónov na atómové jadrá látky sú **rozptylové deje**, ktoré môžu mať charakter pružnej alebo nepružnej zrážky alebo sú to **záchytné** a **výmenné jadrové reakcie**. Pri týchto reakciách atómové jadro absorbujúceho prostredia pohltí dopadajúci neutrón a vzniká zložené jadro. Neutrón zaniká ako častica a stáva sa súčasťou zloženého jadra.

Interakcia neutrónov závisí od druhu neutrónov a od energie neutrónov, tabuľka 4.

<i>Druh neutrónov</i>	<i>Energia</i>	<i>Základná interakcia</i>
Tepelné	0,025 eV	záchytná jadrová reakcia pružný rozptyl, záchytná
Rezonančné	0,5 eV až 10 keV	jadrová reakcia a výmenná jadrová reakcia
Rýchle	10 keV až 10 MeV	pružný rozptyl
Relativistické	> 20 MeV	trieštivé jadrové reakcie

Tab. 4 Interakcia neutrónového žiarenia s látkou.

3. 2 RADIAČNO NUKLEÁRNE VELIČINY

Základná veličina je **aktivita** vyjadrujúca priemerný počet spontánných jadrových premien ΔN z daného energetického stavu rádionuklidu za malý časový interval Δt , delený týmto intervalom

$$A = \frac{\Delta N}{\Delta t} \quad (47)$$

Keďže pri rádioaktívnej premene látky ide o rozpad, teda o úbytok rádioaktívnych nuklidov, platí diferenciálna forma

$$A = -\frac{dN}{dt} \quad (48)$$

pre exponenciálnu premenu $A = \lambda N$, kde λ je konštanta premeny. Jednotkou aktivity je 1 Bq = 1 rozpadu za sekundu [s^{-1}] alebo 1 Ci = $3,7 \cdot 10^{10}$ Bq, pričom Ci je staršou jednotkou, ktorá sa už nepoužíva.

Rádioaktívne látky obsahujú okrem rádioaktívnych nuklidov aj stále nuklidy, rádioaktivita takejto látky je **hmotnostná aktivita**, ktorá vyjadruje podiel aktivity rádionuklidu a príslušnej hmotnosti

$$c_A = \frac{A}{m} \quad (49)$$

Jednotkou je [$Bq \cdot kg^{-1}$].

Objemová aktivita je podiel aktivity rádioaktívnej látky a jej objemu

$$c_v = \frac{A}{V} \quad (50)$$

Jednotka je [$Bq \cdot m^{-3}$].

Plošná aktivita je podiel aktivity plošne rovnomerne rozloženej homogénnej rádioaktívnej látky a príslušnej plochy

$$c_s = \frac{A}{S} \quad (51)$$

Jednotka je [$Bq \cdot m^{-2}$].

Lineárna aktivita je podiel aktivity dĺžkovo rovnomerne rozloženej homogénnej rádioaktívnej látky a príslušnej dĺžky l

$$c_l = \frac{A}{l} \quad (52)$$

Jednotka je [$Bq \cdot m^{-1}$].

Molárna aktivita je podiel aktivity daného množstva rádioaktívnej látky a príslušného množstva látky n

$$a_m = \frac{A}{n} \quad (53)$$

Jednotka je $[\text{Bq mol}^{-1}]$.

Konštanta premeny je pravdepodobnosť premeny v malom časovom intervale delená týmto intervalom, kde N je počet rádioaktívnych atómov v čase t a $\lambda = 1/\tau$. Je to teda konštanta úmernosti medzi časovým úbytkom počtu rádionuklidov samovoľnej premeny a celkovým počtom rádionuklidov N ,

$$\frac{dN}{dt} = -\lambda N \quad (54)$$

Stredná doba života je čas potrebný na to, aby sa počet rádioaktívnych atómov N zmenšil na N_0/e , platí to pre exponenciálnu premenu $N = N_0 e^{-\lambda t}$ a $\tau = 1/\lambda$

$$N = \frac{N_0}{e} \quad (55)$$

Doba polpremeny (polčas rozpadu) je priemerný časový interval potrebný na premenu jednej polovice atómov vzorky rádionuklidu

$$T_{1/2} = \frac{\ln 2}{\lambda} \quad (56)$$

Absorbovaná dávka je pre každé ionizujúce žiarenie podiel strednej energie odovzdanej elementu ožiarenej látky a hmotnosti tejto látky m

$$D = \frac{\Delta E_D}{\Delta m} \quad (57)$$

Jednotka je $[\text{J kg}^{-1}] = 1 \text{ Gy}$.

Dávkový ekvivalent je súčin D , Q a N v danom bode tkaniva, kde D je absorbovaná dávka, Q je faktor kvality a N je súčin ostatných modifikujúcich faktorov

$$H = D \cdot Q \cdot N \quad (58)$$

jednotkou je sievert Sv, $1 \text{ Sv} = 1 \text{ J/kg}$

Príkon absorbovanej látky je vyjadrený ako

$$\dot{D} = \frac{\Delta D}{\Delta t} \quad (59)$$

kde ΔD je prírastok absorbovanej dávky v časovom intervale Δt . Jednotka je $[\text{Gys}^{-1}] = [\text{W kg}^{-1}]$

Lineárny prenos energie je pre priamo ionizujúce častice podiel energie odovzdanej v danom mieste látky, pri prechode malej vzdialenosti cez látku a tejto vzdialenosti. Udáva pokles energie častice na dráhovom elemente (dx)

$$L = \frac{dE}{dx} \quad (60)$$

Expozícia je to pre fotóny alebo gama častice podiel vytvoreného elektrického náboja iónov jedného znamienka všetkých zabrzdených elektrónov (negatívnych alebo pozitívnych) v danom mieste, uvoľnených fotónmi v elemente vzduchu a hmotnosti tohto elementu.

Vyjadruje sa pomerom

$$X = \frac{\Delta Q}{\Delta m} \quad (61)$$

Jednotka je [C.kg⁻¹]. Skôr používaná jednotka bol 1 Röntgen = 1R = 2,58.10⁻⁴ C.kg⁻¹.

Expozičný príkon je vyjadrený ako

$$\dot{X} = \frac{dX}{dt} \quad (62)$$

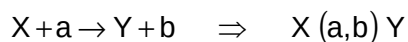
Lineárna ionizácia je podiel počtu iónových párov vytvorených jednou časticou pozdĺž dráhy dĺžky x

$$N_l = \frac{\Delta N}{\Delta x} \quad (63)$$

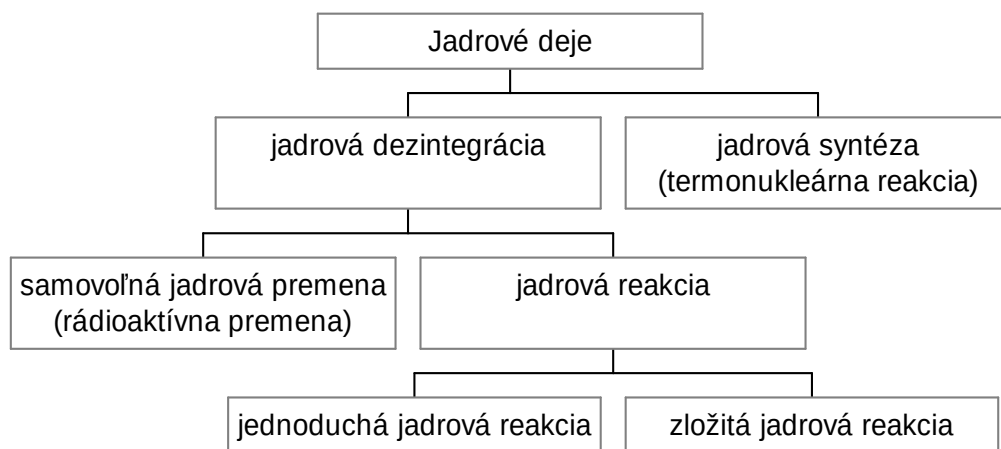
4 JADROVÉ REAKCIE

4.1 KLASIFIKÁCIA JADROVÝCH REAKCIÍ

Jadrová reakcia je proces prebiehajúci pri interakcii atómového jadra s iným atómovým jadrom alebo elementárnou časticou, výsledkom ktorej je vznik jedného alebo niekoľkých nových jadier a často aj elementárnych častíc. Môžeme ju zapísať ako

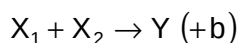


Terčové jadro X býva najčastejšie stály nuklid. Terčové jadrá podľa nukleónového čísla sú ľahké ($A < 25$), stredne ťažké ($25 < A < 80$) a ťažké ($A > 80$). Ostreľujúce častice a môžu byť alfa častice, protóny, deuteróny, neutróny a gama fotóny. Jadrové strely musia mať dostatočne veľkú energiu, aby mohli vniknúť do jadra a vyvolať jadrovú reakciu. Výsledné novovzniknuté jadro Y môže byť stále alebo rádioaktívne. V prípade, že produktom jadrovej reakcie je rádioaktívne jadro, ide o rádioaktívnu reakciu (aktiváciu). Emitovaná častica b je spravidla častica alfa, protón, neutrón, gama fotón, zriedkavejšie je to deuterón. V atómových jadrách môžu prebiehať rôzne procesy, znázornené sú v schéme na obrázku 21.



Obr. 21 Schéma jadrových dejov.

Osobitný typom jadrových reakcií sú syntézy atómových jadier, termonukleárne reakcie. Pri týchto reakciách sa kondenzujú najľahšie jadrá, napr. H, D, T, na ťažšie nuklidy, za uvoľnenia veľkého množstva energie:



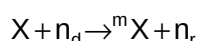
4.1.1 TYPY JADROVÝCH REAKCIÍ

Základnou požiadavkou jadrovej reakcie je zásah terčového jadra ostreľujúcou časticou. Častica musí mať dostatočne veľkú energiu, aby prekonala potenciálovú bariéru, vnikne do jadra za vzniku **zloženého jadra** terčového prvku. Zložené jadro má teda nadbytok energie a stráca ho týmito spôsobmi:

- a) nepružným rozptylom
- b) výmennou jadrovou reakciou
- c) záchytnou jadrovou reakciou
- d) štiepnou jadrovou reakciou
- e) trieštivou jadrovou reakciou

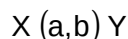
Z jadra sa potom pri reakcii emituje nukleón, ktorého emisija je energeticky najpriaznivejšia.

Nepružný rozptyl je nepružná zrážka neutrónov s terčovým jadrom. Terčové a výsledné jadro sú jadrovými izomérmi:

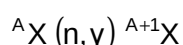


kde n_d je dopadajúci a n_r rozptýlený neutrón. Príklad : ${}^{87}\text{Sr} (n_d, n_r) {}^{87m}\text{Sr}$

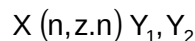
Výmenná jadrová reakcia je proces, kde terčové a výsledné jadro sa líšia v protónovom čísle, nukleónovom čísle alebo v oboch číslach. Reakcie teda produkujú výsledné nuklidy iného prvku, ako je terčové jadro, prípadne jeho izotopy:



Záchytná jadrová reakcia je dej, pri ktorom terčové jadro absorbuje ostreľujúci neutrón, vzniká zložené jadro, ktoré vyšle nadbytok energie vo forme gama fotónov, produktom je spravidla rádioaktívny nuklid:



Štiepna jadrová reakcia je jadrový proces, počas ktorého sa rozštiepi ťažké terčové jadro na dve stredne ťažké jadrá:



Pri **trieštivej jadrovej reakcii** je jadro bombardované vysokoenergetickou časticou. Pri vysokej energii ostreľujúcej častice sa podstatne zvyšuje aj energia zloženého jadra. Z neho sa emituje väčší počet častíc, je to až niekoľko desiatok. Výsledné atómové jadrá sa značne odlišujú od terčového jadra.

4.1.2 ÚČINNÝ PRIEREZ JADROVÝCH REAKCIÍ

Jadrové reakcie sú výsledkom ostreľovania atómových jadier terčovej látky elementárnymi časticami. Výťažok jadrovej reakcie sa vyjadruje **pravdepodobnosťou**

účinného zásahu. Vychádza sa z predstavy, že častice sú bodové útvary a jadrá sú kruhové kotúče, ktoré stoja kolmo na smer ostreľujúcich častíc. Ak každý zásah znamená jadrovú reakciu, plocha jadra vyjadruje pravdepodobnosť účinnej zrážky a súčasne aj **výtlačok** jadrovej reakcie, ktorý sa nazýva **účinný prierez jadrovej reakcie** σ a má rozmer plochy [m²]:

$$\sigma = \frac{R}{I \cdot n \cdot x} \quad (64)$$

kde R je počet jadier zúčastňujúcich sa na jadrovom procese, I je počet častíc dopadajúcich na terč, n je počet jadier v objemovej jednotke terča, x je hrúbka terča.

Účinný prierez nezávisí len od geometrie terčového nuklidu, ale aj od štruktúry a vlastností jadra a od energie ostreľujúcich častíc.

Účinný prierez jadra sa môže **rovnať** hodnote geometrickej plochy jadra v prípade, že reakcia je vyvolaná rýchlymi neutrónmi. Ak je reakcia vyvolaná pomalými neutrónmi môže byť účinný prierez jadra **väčší** a v prípade kladne nabitých častíc zase **menší** ako hodnota geometrickej plochy jadra. Ak sa účinný prierez jadra vzťahuje na jediný terčový nuklid, hovoríme o **mikroskopickom** priereze. **Makroskopický** prierez je podiel súčtu účinných prierezov reakcie určitého typu pri všetkých atómoch v danom objeme a tohto objemu.

4.1.3 CHARAKTERISTIKA JADROVÝCH REAKCIÍ

Základné jadrové strely môžu vyvolávať rôzne typy jadrových reakcií, tabuľka 5. Ostreľujúcimi časticami môžu byť neutróny, protóny, deuteróny, alfa alebo gama častice.

Ostreľujúca častica	Emitovaná častica					
	α	p	n	2n	γ	štiepenie (f)
n	n, α	n, p	-	n, 2n	n, γ	n, f
p	p, α	-	p, n	-	n, γ	-
d	d, α	d, p	d, n	-	-	d, f
α	-	α , p	α , n	α , 2n	-	α , f
γ	γ , α	γ , p	γ , n	γ , 2n	-	-

Tab. 5 Typy jadrových reakcií.

4.1.3.1 JEDNODUCHÉ JADROVÉ REAKCIE

Jadrové reakcie alfa častíc sú syntetickej povahy, výsledné jadro máva o dva až tri nukleóny viac ako terčové jadro. Produkt reakcie (α ,p) a (α ,n) je stály, napr. $^{14}_7\text{N}(\alpha, \text{p})^{17}_8\text{O}$,

${}^9_4\text{Be}(\alpha, n){}^{12}_6\text{C}$. Alfa častice s vysokou energiou vyvolávajú aj reakcie typu $(\alpha, 2n)$, kde produktom reakcie je alfa žiarič ${}^{206}_{82}\text{Pb}(\alpha, 2n){}^{208}_{84}\text{Pb}$.

Pri **jadrových reakciách deuterónov** typu (d, α) a (d, n) je produktom reakcií stály nuklid, ${}^{16}_8\text{C}(d, \alpha){}^{14}_7\text{N}$, ${}^2_1\text{D}(d, n){}^3_2\text{He}$, v prípade reakcie typu (d, p) vzniká negatrónový žiarič, ${}^2_1\text{D}(d, p){}^3_1\text{T}$.

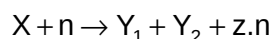
Jadrové reakcie protónov vyžadujú protóny s vysokou energiou. Ich produktom môže byť negatrónový žiarič, je to v prípade reakcie (p, α) , ${}^{19}_7\text{F}(p, \alpha){}^{16}_6\text{C}$, pozitronový žiarič a zachytenie elektrónu vzniká pri reakcii (p, n) , ${}^7_3\text{Li}(p, n){}^7_4\text{Be}$ alebo ak vzniká stály nuklid, prebieha reakcia typu (p, γ) , ${}^{11}_5\text{B}(p, \gamma){}^{12}_6\text{C}$.

Pri **jadrových reakciách neutrónov** má neutrón najvýhodnejšie vlastnosti ako ostreľujúca častica na vyvolanie jadrových reakcií, pretože je bez elektrického náboja a ľahko vnikne do atómového jadra. Reakcie typu (n, p) a (n, α) sú charakteristické pre rýchle neutróny, príkladom sú reakcie ${}^{31}_{15}\text{P}(n, p){}^{31}_{14}\text{Si}$, ${}^{31}_{15}\text{P}(n, \alpha){}^{28}_{13}\text{Al}$. Reakcia typu $(n, 2n)$, napr. ${}^{31}_{15}\text{P}(n, 2n){}^{30}_{15}\text{Al}$, prebieha len vtedy, ak neutróny vnesú do jadra dostatočnú energiu. Pri reakciách (n, γ) , napr. ${}^{31}_{15}\text{P}(n, \gamma){}^{32}_{15}\text{P}$, ide o radiačné zachytenie elektrónu a sú charakteristické pre pomalé neutróny. Ak je energia bombardujúceho neutrónu blízka energii vzbudenia zloženého jadra, nastáva tzv. rezonančné pohltienie pomalých neutrónov. Produktom reakcií neutrónov je najčastejšie negatrónový žiarič. Účinný prierez neutrónovej zachytnej reakcie je v intervale nízkych energií neutrónov nepriamo úmerný rýchlosti neutrónov. Pri konkrétnych hodnotách energie neutrónov, účinný prierez vykazuje ostré, tzv. rezonančné maximum.

Jadrové reakcie gama fotónov sa nazývajú fotodezintegračné reakcie alebo im hovoríme jadrový fotoefekt. Gama fotón musí mať určitú energiu rovnajúcu sa väzbovej energii emitovaného nukleónu, aby mohol vyvolať jadrovú premenu. Pri reakciách typu (γ, n) a (γ, α) vzniká pozitronový žiarič, napr. ${}^9_4\text{Be}(\gamma, n){}^8_4\text{Be}$, ${}^{37}_{17}\text{Cl}(\gamma, \alpha){}^{33}_{15}\text{P}$, pri reakcii (γ, p) dochádza k vyrazeniu protónu a tento jav je podobný ako fotoelektrický jav, napr. ${}^7_3\text{Li}(\gamma, p){}^6_2\text{He}$.

4.1.3.2 ŠTIEPNE JADROVÉ REAKCIE

Pri štiepných jadrových reakciách sa jadrá štiepia pod účinkom rýchlych neutrónov s energiou asi 1 MeV a vyššou. V jednoduchých jadrových reakciách z nuklidov terčových prvkov sa emituje jedna, prípadne dve častice. Pre niektoré ťažké nuklidy sú však charakteristické také jadrové reakcie, pri ktorých sa terčový nuklid štiepi asymetricky na dve stredne ťažké zvyškové jadrá.



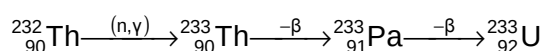
Y_1 a Y_2 sú štiepne trosky, z je počet sekundárnych rýchlych neutrónov emitovaných pri štiepení atómového jadra. Štiepne trosky bývajú bohaté na neutróny a sú rádioaktívne. Zápornou beta premenou sa rozpadávajú na ďalšie jadrá, z ktorých postupne vznikajú stabilné nuklidy.

V prírode sa vyskytuje nuklid ^{235}U , ktorý možno štiepiť tepelnými neutrónmi

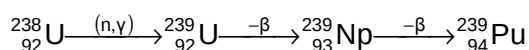


Pomocou tepelných neutrónov možno štiepiť aj niektoré ďalšie ťažké nuklidy, ktoré sa však v prírode nevyskytujú a pripravujú sa v jadrových reaktoroch (^{233}U , ^{239}Pu , ^{241}Pu).

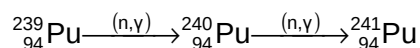
Urán ^{233}U sa pripravuje z tória ^{232}Th



Plutónium ^{239}Pu sa pripravuje z uránu ^{238}U



Plutónium ^{241}Pu sa pripraví z ^{239}Pu , resp. z ^{238}U

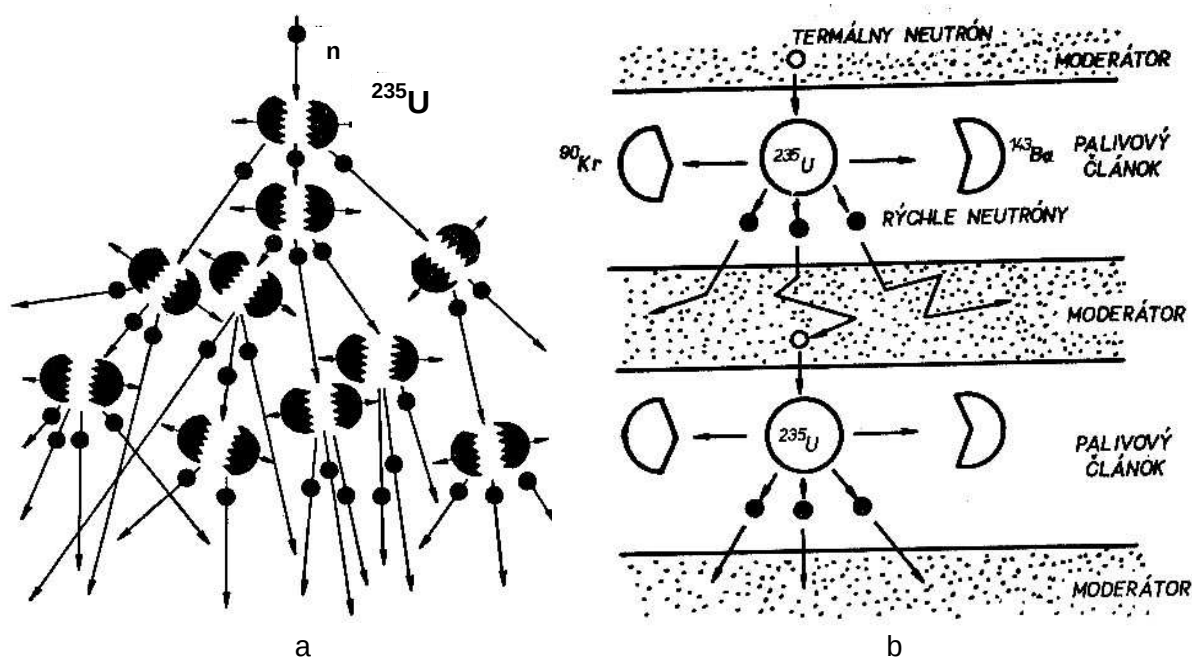


Pri štiepných reakciách vznikajú dva alebo aj viac neutrónov, pričom vlastný štiepny proces je vyvolaný jedným neutrónom. Počet neutrónov sa znásobuje. Pri priaznivých podmienkach môže štiepna jadrová reakcia pokračovať lavínovito reťazcovým reakčným mechanizmom, obrázok 22 a, b.

Reťazové štiepenie nastáva ak $k \geq 1$, kde k je **multiplikačný koeficient**, ktorý udáva pomer počtu neutrónov daného reakčného štádia k počtu neutrónov v predchádzajúcom reakčnom štádiu.

4.1.4 TRANSURÁNY

Transurány sú prvky s vyšším protónovým číslom ako má urán ($Z=92$). Rozšírenie periodickej sústavy sa začalo ostreľovaním uránového terča neutrónmi, po ktorom vznikajú početné izotopy transuránov s protónovými číslami $Z > 92$, tabuľka 6. V súčasnosti je záujem o supertiažké prvky s protónovými číslami 110-115.



Obr. 22 a) Schéma reťazovej štiepnej jadrovej reakcie, b) schéma reťazového mechanizmu štiepenia nuklidu ^{235}U .

Z	Značka	Názov	Rok objavy	Najdlhší známy polčas premeny
93	Np	Neptúnium	1940	^{237}Np , $2,14 \times 10^6$ r
94	Pu	Plutónium	1941	^{244}Pu , $8,00 \times 10^7$ r
95	Am	Amerícium	1945	^{243}Am , 7370 r
96	Cm	Curium	1944	^{247}Cm , $1,56 \times 10^7$ r
97	Bk	Berkélium	1949	^{247}Bk , 1380 r
98	Cf	Californium	1950	^{251}Cf , 898 r
99	Es	Einsteinium	1952	^{252}Es , 471,7 d
100	Fm	Fermium	1952	^{257}Fm , 100,5 d
101	Md	Mendelevium	1955	^{258}Md , 51,5 d
102	No	Nobelium	1958	^{259}No , 58 min
103	Lr	Lawrencium	1961	^{262}Lr , 3,6 h
104	Rf	Rutherfordium	1964/69	^{261}Rf , 65 s
105	Db	Dubnium	1970/71	^{262}Db , 34 s
106	Sg	Seaborgium	1974	^{266}Sg , 21 s
107	Bh	Bohrium	1981	^{267}Bh , 17 s
108	Hs	Hassium	1984	^{277}Hs , 11 min
109	Mt	Meitnerium	1982	^{276}Mt , 0,72 s

110	Ds	Darmstadtium	1994	²⁸¹ Ds, 9.6*s
111	Rg	Roentgenium	1994	²⁸⁰ Rg, 3.6 s*
112	*	-	1996	²⁸⁵ 112, 34 s*
113	**	-	2004	²⁸⁴ 113, 0.48 s
114	**	-	1999/00	²⁸⁹ 114, 2.7 s
115	**			²⁸⁸ 115, 87 ms
116	**	-	2000/01	²⁹³ 116, 53 ms
117				
118	**	-	2002/05	²⁹⁴ 118, 1.8 ms

* Nazvanie je v procese schvaľovania UIPAC

** Objav čaká na potvrdenie

Tab. 6 Transurány.

4. 2 ZDROJE JADROVÉHO ŽIARENIA

Radiačné zdroje možno zaradiť do dvoch skupín. Sú to **rádionuklidové zdroje** a **technické zdroje žiarenia**. Medzi technickými radiačnými zdrojmi sa rozlišujú urýchľovacie zariadenia jadrových častíc a jadrové reaktory.

4.2.1 RÁDIONUKLIDOVÉ RADIAČNÉ ZDROJE

Rádionuklidové radiačné zdroje zahrňujú prírodné aj umelé rádioaktívne nuklidy, preto ich výber podľa požiadaviek použitia môže byť značne široký. Rádionuklidy môžu byť zdrojom alfa žiarenia, beta žiarenia, prípadne kombinovaného žiarenia alfa-gama, beta-gama.

Kombináciou beta žiariča s terčovou látkou s veľkým protónovým číslom sa získa zdroj **brzdného žiarenia**, teda elektromagnetické žiarenie, ktorého vlastnosti sú blízke röntgenovému žiareniu, preto sa nazývajú rádionuklidové röntgenové zdroje.

Kombinácia rádionuklidov s vhodným terčovým nuklidom môže byť zdrojom **neutrónového žiarenia**. Neutróny vznikajú jadrovou reakciou typu (α , n) alebo (γ , n).

Podmienkou reakcie (α , n) je, aby energia alfa častíc bola dostatočná na prekonanie potenciálovej bariéry terčového nuklidu. Ako zdroje alfa žiarenia slúžia prírodné rádionuklidy (Ra, Po) alebo umelé rádionuklidy (Pu, Am). Ako terčový materiál slúžia ľahké prvky (Be, Li, B). Vlastný zdroj neutrónového žiarenia je zmesou oboch zložiek.

Podmienkou reakcie (γ , n) je, aby energia gama fotónu presahovala energiu väzby neutrónu v terčovom jadre. Najnižšia väzbová energia neutrónu je v nuklidoch ^9Be (1,666 MeV) a D (2,226 MeV). V týchto fotoneutrónových zdrojoch sa vo funkcii zdrojov gama žiarenia používajú väčšinou rádionuklidy ^{124}Sb , ^{24}Na , ^{140}La , Ra. Ako terčový nuklid slúži Be a D_2O .

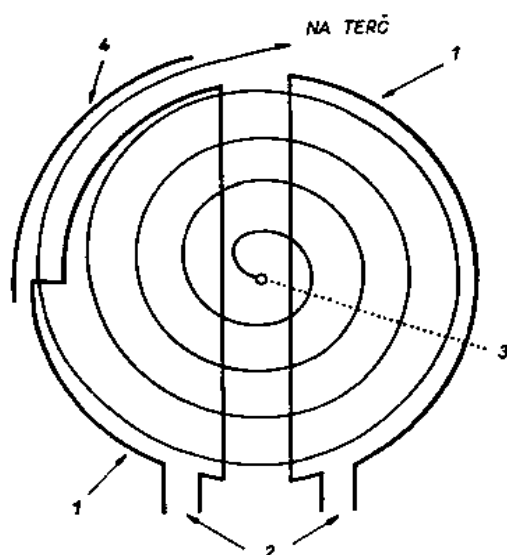
4.2.2 URÝCHĽOVAČE ČASTÍC

Uskutočňovanie jadrových reakcií vyžaduje intenzívne žiarenie s vysokou energiou. Zariadenia pomocou ktorých sa získavajú elektróny, protóny, deuteróny alebo alfa častice sa nazývajú **urýchľovače častíc**. Urýchľovače sa rozdeľujú podľa toho, či sú častice urýchľované po **lineárnej dráhe**, sem patria urýchľovacie trubice, vysokofrekvenčné urýchľovače a lineárne urýchľovače s vlnovodmi. Ak sa častice urýchľujú po **kruhovej** alebo **špirálovej** dráhe ide o cyklotrón, synchrociklotrón, betatrón, elektrónový a protónový synchrotrón.

Urýchľovače sa skladajú z niekoľkých funkčných častí. Je to elektrónový, iónový oblúkový alebo vysokofrekvenčný zdroj, urýchľovacie elektródy a zberná alebo terčíková elektróda. Konštrukčne jednoduchý lineárny urýchľovač má tvar rúrky a je základnou časťou van de Graafovho generátora.

Mnohostupňové urýchľovanie častíc sa uplatňuje v zariadení, ktoré sa nazýva **cyklotrón**. Urýchľuje častice na kruhovej dráhe, na ktorej magnetické pole udržiava častice, obrázok 23. Medzi pólmi kruhového magnetu je evakuovaná komora s dvomi dutými polkruhovitými elektródami duantami (1), ktoré sú pripojené na vysokofrekvenčný oscilátor (2). Častice zo zdroja (3) sa urýchľujú elektrickým poľom medzi duantami. Prúd urýchlených častíc sa vychyľuje elektródou (4) a po prechode okienkom dopadá na terč.

V cyklotrónoch pri veľkých rýchlostiach relativisticky narastá hmotnosť urýchľovaných častíc, tým sa predlžia obehové časy a naruší sa synchronizácia. Preto boli navrhnuté nové konštrukcie urýchľovačov. Pre urýchľovanie elektrónov je to betatrón a pre urýchľovanie protónov synchrotrón. Urýchľovače častíc sa využívajú aj ako zdroje neutrónového žiarenia v neutrónových generátoroch. V týchto zariadeniach sa urýchlenými časticami (deuterónmi alebo protónmi) ostreľujú vhodné terčíky a v nasledujúcej reakcii vznikajú neutróny.



Obr. 23 Schéma cyklotrónu: 1 – duanty , 2 – vysokofrekvenčný oscilátor, 3 – zdroj iónov, 4 – vychýľovacia elektróda.

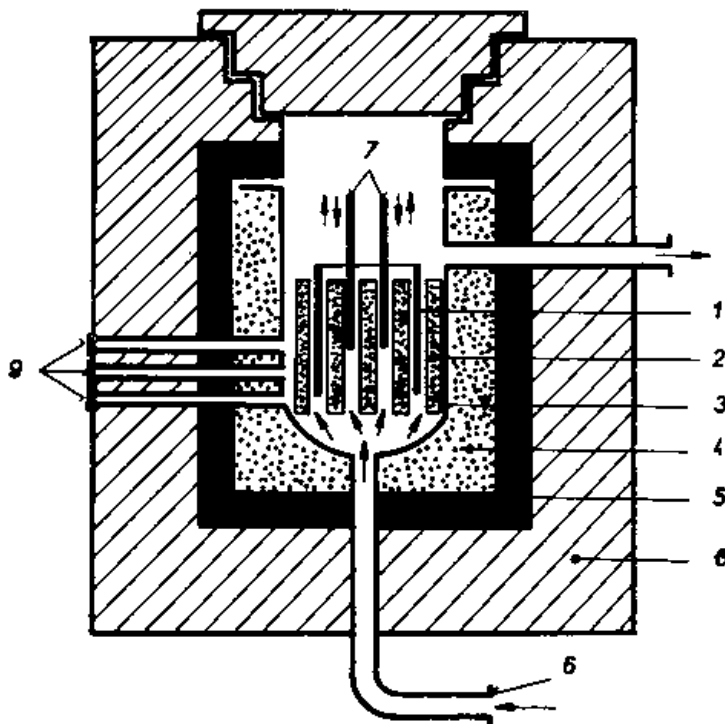
4.2.3 JADROVÉ REAKTORY

Jadrové reaktory sú zariadenia, v ktorých prebieha reťazová štiepna reakcia. Regulovaným spôsobom sa pri štiepení niektorých izotopov ťažkých prvkov uránu, tória a plutónia uvoľňuje vnútrojadrová energia. Slúžia predovšetkým na výrobu tepla a elektrickej energie, ale využitie našli aj napríklad pri odsoľovaní morskej vody. Schéma jadrového reaktora je na obrázku 24.

Aktívna zóna, jadro reaktora, je vnútorná časť reaktora, v ktorej je uložený štiepateľný materiál, tzv. **jadrové palivo** (1) a **moderátor**, spomaľovač rýchlych sekundárnych neutrónov (2). Na moderovanie neutrónov sa používa ťažká voda, obyčajná voda, grafit a berýlium. Spomaľovanie rýchlych neutrónov je najúčinnnejšie pružnými zrážkami. Aktívna zóna je hermeticky uzavretá v kovovom **tlakovom obale** (3). Aktívna zóna sa obloží **reflektorom** (4), ktorý odráža neutróny späť do aktívnej zóny, aby sa zabránilo účinku neutrónov.

Ako reflektor sa používa voda, ťažká voda, berýlium a grafit. Pri štiepnej jadrovej reakcii sa uvoľňuje teplo, ktoré sa odvádza z aktívnej zóny. **Chladiaci systém** (6) sa skladá z prírodného a odvodného potrubia. Chladiacou sústavou prúdi chladiaca látka, ktorou môže byť CO₂, voda, ťažká voda, taveniny kovov Pb, Bi alebo zliatin Na, K. Aktívna zóna spolu reflektorom a chladiacim systémom sú uložené v **reaktorovej nádobe** (5). Rýchlosť štiepnej reťazovej reakcie sa reguluje regulačným systémom s **regulačnými prvkami** (7), ktoré sú z kadmia samária, gadolína alebo bóru a absorbujú nadbytočné neutróny. Reaktorové teleso je uložené v rozmernom ochrannom **tieniacom obale** (8) z betónu s prímiesami barytu

a železnej rudy, cez ktorý vedú do aktívnej zóny horizontálne a vertikálne **ožarovacie kanály** (9).



Obr. 24 Schéma jadrového reaktora: 1-jadrové palivo, 2-moderátor, 3-tlaková nádoba, 4-reflektor, 5-reaktorová nádoba, 6-chladiaci systém, 7-regulačné tyče, 8- biologická ochrana, 9-ožarovacie kanály.

Jadrové reaktory sa delia podľa viacerých hľadísk.

Podľa **energie neutrónov**, vyvolávajúcich štiepnu reakciu, poznáme reaktor:

- tepelný – jadrové reakcie sú vyvolávané tepelnými neutrónmi s energiou 0,025 eV,
- epitermálny - jadrové reakcie sú vyvolané epitermálnymi neutrónmi s energiou 1 - 10^3 eV,
- rýchly - jadrové reakcie sú vyvolávané rýchlymi neutrónmi s energiou vyše 1 MeV, tieto reaktory pracujú bez moderátora.

Podľa **typu paliva** môže reaktor pracovať na báze:

- prírodného uránu, ktorý obsahuje 0,71 % štiepiteľného izotopu ^{235}U ,
- obohateného uránu, pričom obohatenie vzhľadom na izotop ^{235}U môže byť aj 90 %,
- čistého štiepiteľného materiálu.

Podľa **konštrukcie aktívnej zóny** môže byť reaktor:

- homogénny, ak palivo a moderátor vytvárajú homogénnu fázu,
- kvázihomogénny, ak je palivo vo forme jemných zŕn rovnomerne rozptýlené v moderátore,

- heterogénny, ak je palivo prítomné v tuhom alebo kvapalnom moderátore vo forme samostatných oddelených konštrukčných článkov.

Vo funkcii **moderátora** môže reaktor obsahovať:

- vodu alebo ťažkú vodu,
- grafit,
- berýlium alebo oxid berylnatý,
- organický moderátor.

Chladivom môže byť:

- plyn (CO_2),
- voda alebo ťažká voda,
- tavenina kovu (Na).

Podľa **účelu použitia** rozonávame:

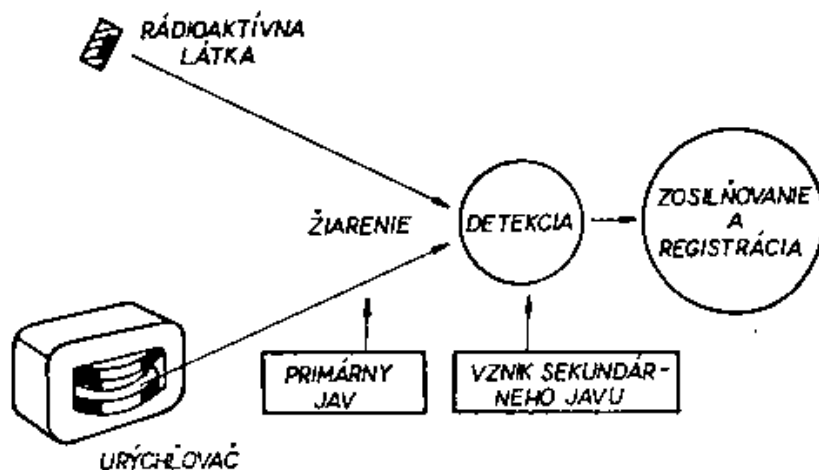
- výskumný reaktor, ktorý má malý výkon a využíva sa na výskumné účely, na výrobu izotopov, na meranie účinných prierezov, hustota neutrónového toku je $10^{16} \text{ m}^{-2}\text{s}^{-1}$,
- materiálový reaktor sa používa na radiačné výskumy konštrukčných materiálov, hustota neutrónového toku je $10^{18} \text{ m}^{-2}\text{s}^{-1}$,
- množivý reaktor sa využíva na výrobu štiepneho materiálu, ktorý sa získava z uránu (^{239}Pu a ^{241}Pu) alebo z tória (^{233}U),
- energetický reaktor sa používa na výrobu tepla alebo elektrickej energie,
- nulový reaktor sa používa na skúmanie jadrových procesov v aktívnej zóne.

5 DETEKCIA A REGISTRÁCIA JADROVÉHO ŽIARENIA

5. 1 PRINCÍPY DETEKcie ŽIARENIA

Rádionuklidy a jadrové žiarenie v chémii sa využívajú na meranie niektorej z jadrových veličín, najmä rádioaktivity, radiačnej expozície alebo radiačnej absorbovanej dávky. Nukleárne meracie zariadenia majú dve základné funkčné časti. Je to radiačno – detekčný prvok a registračno – merací prvok.

Detekcia sa zakladá na interakcii žiarenia a detekčného prostredia, ktorým žiarenie prechádza. Tento jav sa označuje ako **primárny** jav detekcie. Dôsledok interakcie sa mení v detektore v rámci **sekundárneho** javu detekcie na niektorú dobre definovanú a výhodne merateľnú fyzikálnu alebo chemickú veličinu, ktorá sa po zosilnení **regisruje**, obrázok 25.



Obr. 25 Schéma detekcie a registrácie žiarenia.

Dôležitým interakčným javom medzi jadrovým žiarením a prostredím je **radiačná ionizácia** atómov alebo molekúl prostredia. Mení sa tým vodivosť absorbujúcej látky, čo je základom pre sledovanie a meranie jadrového žiarenia. Takto pracujú ionizačné komory, proporcionálne detektory a Geiger – Müllerove trubice.

Druhým interakčným javom je **excitácia** atómov alebo molekúl prostredia. Deexcitácia je spojená s emisiou fotónov viditeľného svetla alebo ultrafialového svetla. Toto využíva scintilačná technika.

Ak jadrové žiarenie vyvoláva v prostredí **radiačno-chemické** zmeny alebo **fyzikálno-chemické** zmeny, dajú sa tieto zmeny použiť na detekciu s využitím chemických dozimetrov, sklených a fotometrických dozimetrov. Ak jadrové žiarenie pri prechode látkou

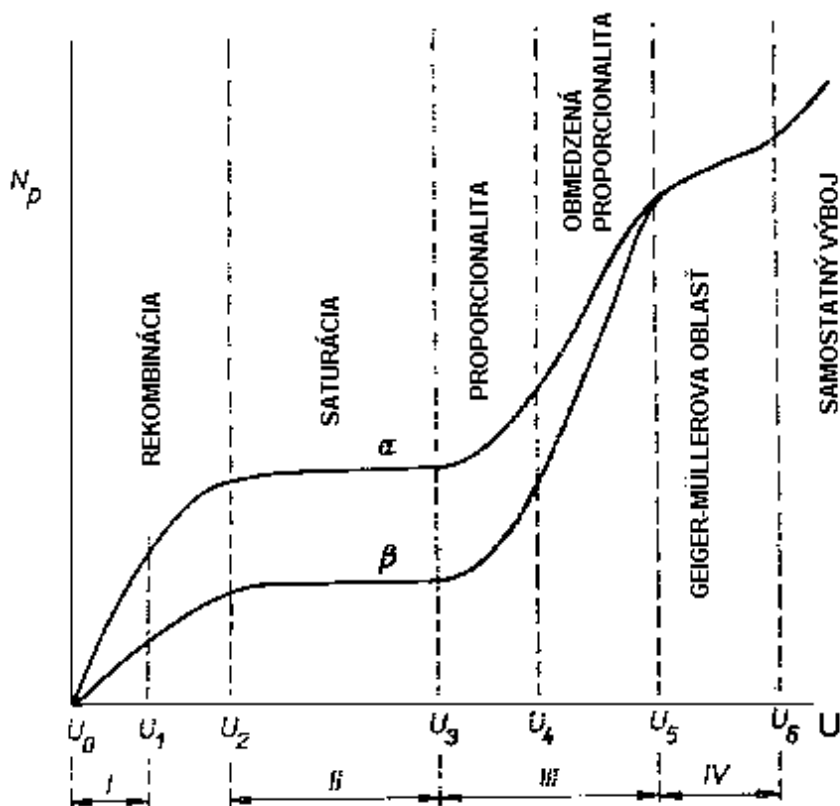
spôsobuje jej zohriatie, potom **radiačno-tepelné** efekty sú základom kalorimetrickej detekcie.

5. 2 IONIZAČNÉ METÓDY

Ionizačné detekčné metódy sa zakladajú na ionizujúcom pôsobení jadrového žiarenia najmä v plynoch. Radiačná ionizácia môže byť priama alebo nepriama. V prípade priamej radiačnej ionizácie ide o interakciu žiarenia, ktoré je prúdom elektricky nabitých častíc, pri nepriamej radiačnej ionizácii ide o ionizáciu pôsobením sekundárnych elektrónov, teda ide o interakciu gama žiarenia a látky.

5.2.1 IONIZAČNÝ PRÚD A JEHO MERANIE

Ak je plyn, ktorý je vystavený účinkom žiarenia, v priestore medzi nabitými elektródami, na radiačne vytvorené ióny pôsobí **elektrostatické pole**. Na dvojicu elektród sa privádza zo zdroja prúdu určité napätie. Ak sa medzi elektródy vloží zdroj ionizujúceho žiarenia (rádioaktívna látka), prechádza okruhom elektrický prúd, **ionizačný prúd**. Počet iónových párov dosahujúcich elektródy N_p je funkciou napätia na elektródach U , obrázok 26.



Obr. 26 Krivka ionizačného prúdu.

Interval U_0-U_6 je oblasť ionizácie. Pri napätí $U > U_6$ ide o oblasť samostatného elektrického výboja. Úsek I, (U_0-U_1) je oblasť **Ohmovho zákona**. Oblasť (U_0-U_2) sa nazýva interval **rekombinácie**. Časť iónov medzi elektródami sa rekombinuje a nedostáva sa k elektródam, preto sa táto oblasť nevyužíva na detekciu ionizujúceho žiarenia. Úsek II (U_2-U_3) znázorňuje oblasť, kde sa všetky ióny dostávajú k elektródam a odovzdávajú im svoj náboj, prúd je konštantný a nazýva sa **nasýtený ionizačný prúd**. Oblasť III zodpovedá nárazovej ionizácii a úsek (U_3-U_5) sa nazýva **proporcionálna oblasť**. Je tvorená oblasťou úplnej proporcionality (U_3-U_4) a úsek (U_4-U_5) je oblasť čiastočnej proporcionality. V tejto časti je celkový počet iónov po zosilnení priamo úmerný počtu primárne vytvorených iónov. Oblasť IV (U_5-U_6) sa nazýva **Geiger-Müllerova oblasť** a neplatí v nej vyššie spomínaná úmernosť.

5.2.2 IONIZAČNÉ KOMORY

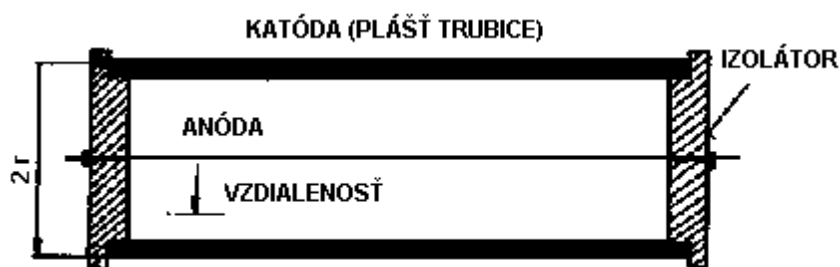
Ionizačné komory sú vhodné na detekciu všetkých druhov žiarenia. Pracujú v oblasti nasýteného ionizačného prúdu (II). Spravidla sú plnené vzduchom a argónom pri rôznych tlakoch. Sú tvorené dvojicou elektród a plášťom. Ten môže byť súčasne jednou z elektród, druhá sa nachádza vo vnútri plášťa.

Rozmery ionizačných komôr na meranie alfa rádioaktivity sú malé, čo je dané malým dosahom alfa žiarenia ($< 0,1$ m). Vzorka sa umiestňuje dovnútra komory. Rozmery komôr na meranie beta rádioaktivity sú väčšie. Vzorky môžu byť umiestnené v komore alebo mimo nej a potom sa beta žiarenie dostáva do komory cez tenké hliníkové okienko. Na meranie gama rádioaktívnych preparátov sa používajú pretlakové komory plnené vzduchom, argónom alebo kryptónom pod tlakom až $15 \cdot 10^5$ Pa. Vzorka sa umiestňuje mimo komory.

Ionizačné komory sa delia na prúdové a impulzové ionizačné komory. Prúdové ionizačné komory sa využívajú pri vyšších radiačných intenzitách, meria sa nimi celkový ionizačný prúd. Impulzové komory sa používajú pri malých aktivitách a počítajú sa v nich jednotlivé prúdové impulzy spôsobené nabitými časticami.

5.2.3 GEIGER – MÜLLEROVE TRUBICE

Geiger-Müllerove trubice patria medzi najvýznamnejšie detektory jadrového žiarenia. Pracujú v napäťovej oblasti nárazovej ionizácie (III), čím sa dosahuje 10^3 až 10^8 násobné zosilnenie pôvodného, radiačne vyvolaného ionizačného efektu, čo umožňuje počítanie jednotlivých ionizujúcich častíc. Schéma Geiger-Müllerovej trubice je na obrázku 27.



Obr. 27 Konštrukčná schéma Geiger-Müllerovej trubice.

Geiger-Müllerova trubica je plnená plynmi, má dve elektródy. Centrálne vlákno slúži ako anóda, tá je zvyčajne zbernou elektródou a je pripojená na zosilňovač. Katóda je valcovitého tvaru. Elektrické pole medzi vláknovou anódou a valcovou katódou nie je homogénne, ale intenzita poľa rastie nepriamo úmerne so vzdialenosťou r od vlákna. Platí vzťah

$$E = \frac{V}{r \cdot \ln \frac{r_k}{r_a}} \quad (65)$$

kde V je potenciál na elektródach, r_k je polomer katódy a r_a je polomer anódy. Intenzita elektrického poľa v blízkosti anódy je mimoriadne veľká.

Plášť Geiger-Müllerovej trubice môže byť sklenený a pokrytý vrstvičkou Cu alebo kovový. Na detekciu gama žiarenia sa používa **plášťová trubica**, ktorej hrúbka plášťa je väčšia, anódou je tenké volfrámové, platínové alebo ocelové vlákno. Trubica sa naplňa argónom alebo héliom. Na meranie beta žiarenia sa používa **okienková trubica**. Má sklenený plášť s kovovým povlakom a anódové vlákno je na jednom konci zatavené, druhý koniec tvorí malá sklenená alebo kremenná guľôčka, okienko je väčšinou sfudové a je pritmelené k plášťu.

5.2.3.1 FUNKCIA GEIGER-MÜLLEROVÝCH TRUBÍC

Pri vniknutí ionizujúcej častice do Geiger-Müllerovej trubice vzniká interakciou s molekulou plynu argónu alebo hélia kladný ión a voľný elektrón. Vo veľmi silnom elektrickom poli trubice elektrón získa takú veľkú kinetickú energiu, že vyvolá novú sekundárnu ionizáciu. Elektróny dopadnú na anódu za veľmi krátky čas (10^{-7} až 10^{-8} s). Niektoré interakcie ionizujúcich častíc vyvolávajú aj excitované stavy molekúl plynovej náplne trubice. Vzbudené molekuly sa zbavujú nadbytočnej energie vysielaním **fotónov**. Tie interagujú s molekulami plynovej náplne trubice, ale najmä pri dopade na katódu vyvolávajú **fotoelektrický jav**. Takto vznikajú elektróny, ktoré vyvolávajú ďalšie lavínovité výboje. Celý objem detektora je tak naplnený elektrickým výbojom.

Kladné ióny sú ťažšie ako elektróny, sú menej pohyblivé. Po priblížení ku katóde z nej vytrhávajú elektróny a rekombinujú sa na molekuly plynovej náplne. Rekombinované molekuly sú v excitovanom stave a vysielajú fotóny, tie spôsobujú vznik fotoelektrónov a nových iónových lavín.

Jednou časticou vyvolaný náboj trvá dovtedy, kým sa nejakým zásahom **nepreruší**. Metódy na zhášanie výboja sú dve a podľa toho sa Geiger–Müllerovej trubice delia na trubice samozhášajúce a nesamozhášajúce. V **nesamozhášajúcich** trubiciach sa výboj preruší vonkajším zásahom. Používa sa elektrický zhášajúci obvod, ktorý po každom impulze zrazí napätie na elektródach a vzápätí ho znova obnoví, aby sa mohla detekovať ďalšia častica a zaznamenať ďalší impulz. V **samozhášajúcich** trubiciach sa výboj preruší dôsledkom vnútornej príčiny a to tak, že sa k plynu v trubici pridávajú vhodné plynné prímеси, ktoré majú úlohu zhášajúcej zložky. Sú to mnohoatómové plyny a pary (alkoholy, metán, etylén, ketóny, étery) alebo halogény (chlór, bróm). Základná požiadavka na zhášajúcu zložku je, aby jej ionizačný potenciál bol menší ako potenciál základnej plynovej náplne.

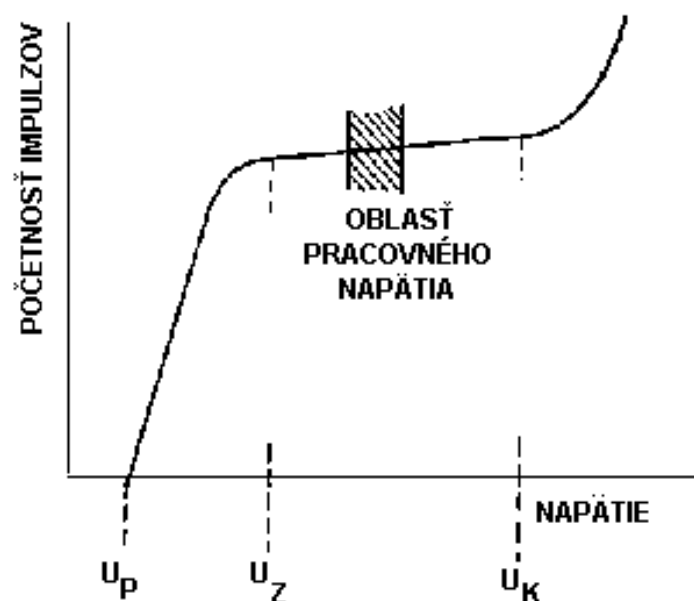
Molekuly zhášajúcej zložky pohltia fotóny, ktoré sú vyslané excitovanou molekulou v tesnej blízkosti anódy. Fotóny sa teda nedostanú ku katóde a nevyvolávajú tam fotoefekt. Tým sa výboj nerozšíri na celý objem trubice, ale obmedzí sa iba na oblasť anódy. V blízkosti anódy sa nahromadia kladné ióny, ktoré sa pomaly približujú ku katóde, lebo sú oveľa ťažšie ako elektróny. Oblak kladných iónov tak zatieni elektrostatické pole a výboj sa preruší.

5.2.3.2 CHARAKTERISTIKY GEIGER–MÜLLEROVÝCH TRUBÍC

Vlastnosti Geiger–Müllerovej trubice sa charakterizujú niekoľkými údajmi. Je to **pracovná krivka trubice**, ktorá udáva závislosť počtu výbojov – impulzov – za časovú jednotku od napätia na trubici, obrázok 28.

Krivka sa získa tak, že sa postupne zvyšuje napätie na elektródach trubice v intervale napätia a meria sa príslušný počet impulzov za časovú jednotku. Okolo hodnoty prahového napätia U_p začína trubica detekovať ionizujúce častice. Od začiatočného napätia U_z až po koncové napätie U_k sa nachádza plošina – plató trubice, kde je počet detekovaných impulzov málo závislý od napätia.

Pracovné napätie sa volí tak, aby bolo v polovici plošiny. Každá trubica dáva určitý počet vlastných impulzov, ktorý sa nazýva nulový chod alebo **pozadie trubice**. Je spôsobené kozmickým žiarením a rádioaktivitou okolia a materiálu, z ktorého je trubica vyrobená.



Obr. 28 Pracovná krivka Geiger–Müllerovej trubice.

Čas, ktorý je potrebný na dosiahnutie minimálneho detekčného napätia sa nazýva **mŕtvym časom trubice**. Počas jeho trvania trubica nie je schopná zaregistrovať ďalší impulz. Posledným údajom, ktorým je charakterizovaná Geiger–Müllerovej trubica je **detekčná účinnosť**. Je to pomer počtu častíc zaznamenaných trubicou a počtu všetkých častíc, ktoré vniknú do trubice.

5.2.4 PROPORCIONÁLNE DETEKTORY

Proporcionálne detektory sa svojim funkčným princípom a možnosťou použitia zaraďujú niekde na rozhranie medzi ionizačnými komorami a Geiger–Müllerovými trubicami. Pracujú v oblasti nárazovej ionizácie prúdu (III). Sú to detektory, v ktorých sa častice vytvorené priamou radiačnou ionizáciou v elektrostatickom poli znásobujú, ale tak, aby celkový počet iónových párov bol úmerný počtu primárne vzniknutých iónov. Keďže sa podobajú Geiger–Müllerovej trubici, plynovú náplň tvoria metán, propán, zmes argónu a metánu alebo zmes hélia a butánu, majú nízky mŕtvý čas a nízke pozadie.

5. 3 SCINTILAČNÉ METÓDY

Keď jadrové žiarenie prechádza látkou, radiačná energia sa prenáša zväčša elektrónovou excitáciou atómov alebo molekúl absorbujúceho prostredia. Excitované útvary sa zbavujú nadbytku energie emisiou fotónov ultrafialového, viditeľného alebo infračerveného žiarenia. Tento dej môže mať povahu fotoluminiscencie alebo

fosforescencie. Pri scintilačnej metóde sa využívajú všetky uvedené javy deexcitácie na vznik **scintilácie**, t.j. záblesku. Radiačná energia sa teda premieňa na svetelnú energiu.

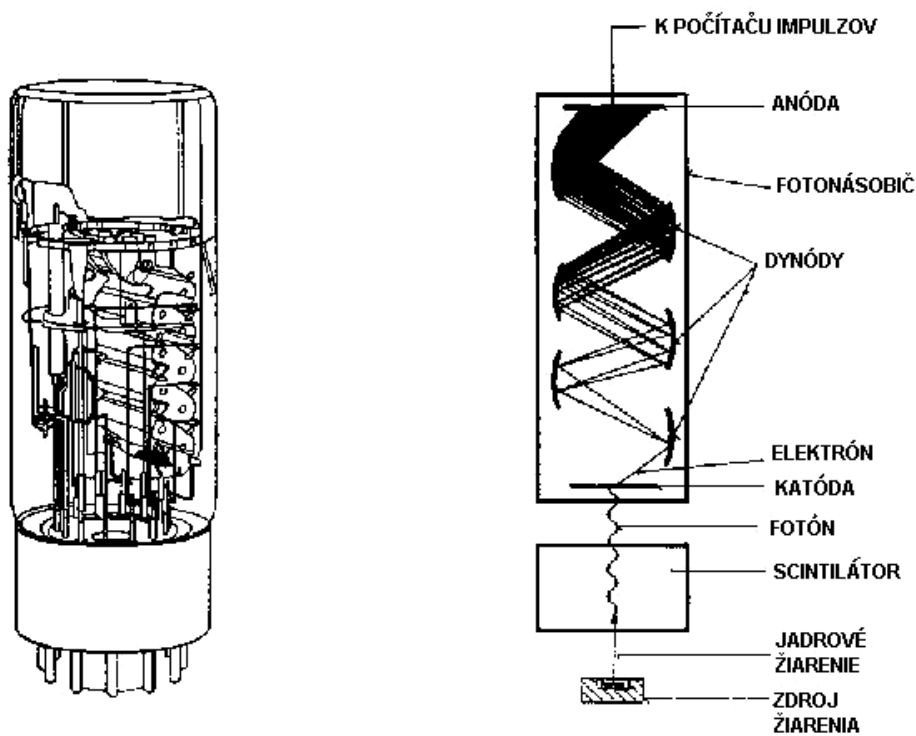
5.3.1 PRINCÍP ČINNOSTI SCINTILAČNÉHO DETEKTORA

Scintilačná sonda sa skladá z dvoch základných funkčných častí. Zo **scintiátora**, ktorý má funkciu detektora žiarenia a z **fotonásobiča**, ktorý premieňa záblesky a zosilňuje ich efekt. Iónové žiarenie, beta žiarenie a elektromagnetické žiarenie vyvoláva pri dopade na scintilátor scintilačné javy. Časť fotónov vysielaných molekulami scintilátora dopadá na fotokatódu fotonásobiča, kde sa v procese fotoelektrického javu uvoľňujú fotoelektróny. Emisia fotoelektrónov je veľmi slabá, preto sa znásobujú vo fotonásobiči, aby sa dali registrovať. Fotonásobič sa skladá z fotokatódy a z množstva elektród, dynód. Tieto po dopade urýchlených elektrónov emitujú sekundárne elektróny. Každá zo série dynód (je ich 8 až 16) má v porovnaní s predchádzajúcou kladnejší potenciál. Počet elektrónov sa od dynódy k dynóde zvyšuje, až silný prúd elektrónov, po 10^5 až 10^8 násobnom zosilnení, dopadne na anódu fotonásobiča.

Takto vzniknutý impulz sa vedie do registračného zariadenia. Aby sa znížila strata fotónov, scintilátor a fotokatóda sú navzájom spojené svetlovodom.

Scintilátormi môžu byť rôzne látky, ktoré účinne absorbujú primárne žiarenie, majú vysoký svetelný výťažok, zanedbateľne absorbujú fotóny deexcitácie a ktoré majú krátky čas záblesku. Môžu mať rôzne tvary, napríklad ploché kotúče, valce, zrezané kužele, studnicové formy, taktiež je známy aj prietokový scintilátor.

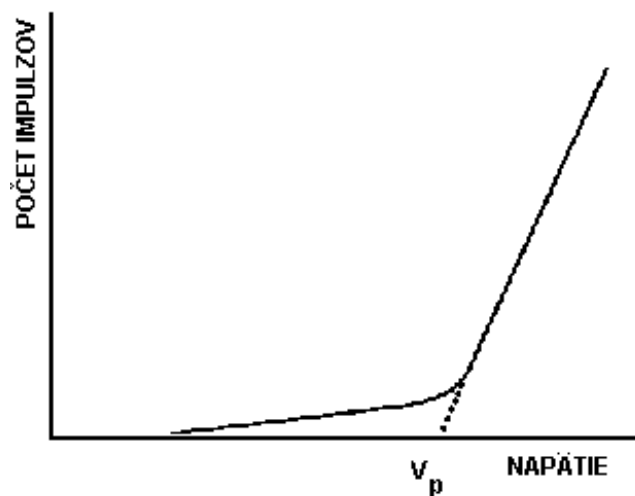
Rozdelíme ich na anorganické, organické, kvapalné a polymérové scintilátory. K anorganickým tuhým scintilátorom patria anorganické kryštály, ktoré obsahujú aktivátor, napr. monokraštál NaI (Tl), CsI (Tl), KI (Tl), LiI (Sn), ZnS (Cu), CdS (Ag). Organické tuhé scintilátory majú výhodu oproti anorganickým, pretože nie sú hygroskopické, patria tu kryštály antracénu, naftalénu, stilbénu, fenantrénu, difenylu a podobne. Organické roztoky sa delia na tuhé plastické scintilátory, sem patrí napr. tetrafenyl v polystyréne a na kvapalné scintilátory, napr. antracén v toluéne, terfenyl v xyléne. Využívajú sa na registráciu nízkoenergetického žiarenia. Polymérové scintilátory sú najvýhodnejšie, lebo nie sú hygroskopické a ani krehké, ako v niektorých iných prípadoch.



Obr. 29 Schéma fotonásobiča a scintilačnej detekčnej sondy.

5.3.2 CHARAKTERISTIKY SCINTILAČNÉHO DETEKTORA

Vlastnosti scintilačného detektora sa charakterizujú viacerými údajmi. Je to **pracovná charakteristika**, ktorá má tvar krivky, obrázok 30. So stúpajúcou hodnotou napätia počet detegovaných častíc alebo registrovaných impulzov narastá najskôr pomaly, po prekročení prahového napätia šumu V_p je stúpanie výraznejšie.



Obr. 30 Pracovná charakteristika scintilačného detektora.

Ďalšou charakteristikou je **účinnosť využitia energie**. Jej maximálna hodnota je 13 až 15 %. Pri anorganických monokryštáloch je účinnosť 8 – 10 %, pri organických asi 3 – 5 %. **Čas trvania záblesku** sa v prípade anorganických a organických scintilátorov odlišuje. Hodnoty pri anorganických kryštáloch sa pohybujú v rozmedzí 10^{-5} až 10^{-6} sekundy, pri organických a kvapalných scintilátoroch je to 10^{-9} sekundy. Medzi základné charakteristiky patrí **optická priehľadnosť, látková čistota** a tak ako pre všetky druhy jadrového žiarenia aj **detekčná účinnosť**. Výhodou scintilačných detektorov oproti Geiger–Müllerovým trubiciam je vyššia účinnosť detekcie elektromagnetického žiarenia a veľmi krátky mŕtvy čas (10^{-7} až 10^{-9} s). Amplitúda impulzov je funkciou energie, preto je scintilačná detekcia vhodná aj na spektrometrické účely.

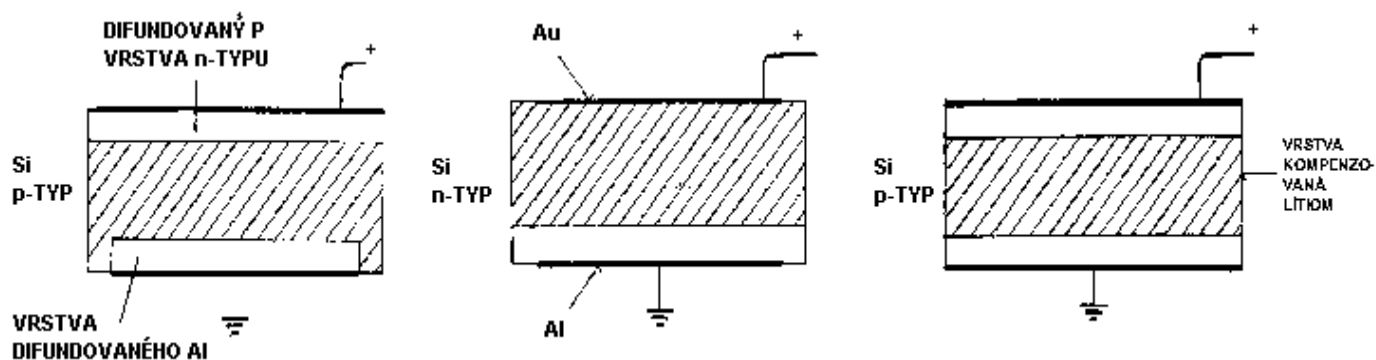
5. 4 POLOVODIČOVÉ DETEKTORY

Polovodiče sú tuhé látky, ktorých elektrická vodivosť je väčšia ako majú izolanty, ale menšia ako elektrická vodivosť kovov. Elektrický prúd sa v polovodičoch umiestnených v elektrickom poli prenáša pomocou dvojice **elektrón-diera**, ktorých koncentrácia a tým aj vodivosť veľmi závisí od teploty. Táto vodivosť sa nazýva vlastná vodivosť polovodiča.

Polovodiče sú dvojakého typu. Typ n – negatívny obsahuje nadbytok záporného náboja (elektróny), typ p – pozitívny má nadbytok kladného náboja (diery).

Polovodičové vlastnosti súvisia s poruchami kryštálovej mriežky. Poruchy môžu byť spôsobené aj niekoľkými prímiesami cudzích atómov, pričom môže vzniknúť elektrónová alebo dierová vodivosť. Ako polovodiče sa uplatňujú najmä germánium a kremík. Germániový polovodič s prímiesou prvkov piatej skupiny N, P, As, Sb, Bi je negatívny typ polovodiča, kremíkový s prímiesou prvkov tretej skupiny B, Al, In, Ge je pozitívny typ polovodiča.

Princíp polovodičov pri detekcii jadrového žiarenia je podobný činnosti ionizačných komôr s tým rozdielom, že ionizačné komory sú plynné detektory a polovodičové detektory patria do skupiny tuhých detektorov ionizujúceho žiarenia. Preto ich tiež nazývame tuhé ionizačné komory. Polovodičový detektor v sebe zjednocuje výhody ionizačnej a scintilačnej detekcie. Známe sú nasledujúce typy polovodičových detektorov. **Detektor s difúznym spojom**, vo vnútri ktorého sa nachádza vrstva difundovaného hliníka a fosforu, obidva typy nečistôt sa nechajú difundovať do protihľých stien polovodičového kryštálu. V **detektore s povrchovou bariérou** sa jedna strana kryštálu polovodiča typu n okyslíčí vrstvou SiO_2 , potom sa pokryje napareným zlatom a oxidovaná vrstva sa správa ako polovodič typu p. **Detektor kompenzovaný lítiom** je kremíkový alebo germániový kryštál, obsahujúci stopy lítia, ktorého ióny sa pohybujú ak je detektor v elektrickom poli.



Obr. 31 Schémy polovodičových detektorov.

Výhodou polovodičových detektorov je ich relatívne nízka spotreba energie. Na vznik jedného páru elektrón – diera je potrebná energia 3 eV, pre porovnanie, množstvo energie pri ionizačnej detekcii je 30eV a pri scintilačnej detekcii 300-700 eV. Nevýhodou sú ich malé rozmery, čo sa prejaví nízkym stupňom absorpcie radiačnej energie.

Okrem už spomenutých ešte poznáme iné druhy detektorov. Je to **jadrovo-fyzikálna emulzia**, ktorá sa skladá zo zrníek bromidu strieborného v želatíne, pričom AgBr radiačne disociuje. Známe sú taktiež **bublínkové** a **hmlové komory**.

6 DOZIMETRIA A JEJ METÓDY

6. 1 ROZDELENIE DOZIMETRIE

Predmetom dozimetrie je sledovanie radiačnej energie, prenesenej na prostredie, ktorým žiarenie prechádza. Podľa zmien vyvolaných v prostredí sa predpokladá množstvo energie vyžiarené zo zdroja. Radiačná dozimetria, čiže meranie radiačných dávok patrí do detekcie jadrového žiarenia. Jej úlohou je stanovovať absorbovanú radiačnú energiu. Metódy radiačnej dozimetrie sú absolútne, zakladajú sa na priamom meraní absorbovanej dávky a metódy relatívne, ich podkladom sú sekundárne štandardy.

Radiačné zmeny, ktoré sa zaznamenávajú môžu byť fyzikálnej, chemickej alebo biologickej povahy. Podľa toho je možné rozlišovať aj dozimetriu na fyzikálnu a chemickú.

Fyzikálna dozimetria je bežná metóda **osobnej dozimetrie**. Zakladá sa na radiačnej ionizácii a pracuje sa pomocou ionizačných komôrok. Komôrkové dozimetre sú tenkostenné a malorozmerové detektory. Elektródy komôrky sa nabíjajú na napätie 100 až 150 V. Radiačná ionizácia komôrku vybíja úmerne s absorbovanou radiačnou dávkou. Sú vhodné na meranie gama žiarenia, pri veľmi tenkej stene aj na beta žiarenie. Hranica použiteľnosti je $26\text{--}52 \mu\text{C.kg}^{-1}$, s presnosťou $\pm 10 \%$.

Chemická dozimetria sa používa na meranie veľkých absorbovaných dávok žiarenia. Zakladá sa na chemických účinkoch žiarenia v prostredí, ktorým žiarenie preniká. Dozimetrickým účelom vyhovuje každá radiačno – chemická premena, pri ktorej vznik určitého množstva produktu s definovaným zložením zodpovedá absorbovanej radiačnej dávke. Metódy chemickej dozimetrie sa delia podľa skupenstva dozimetrickej sústavy na kvapalinové dozimetrické sústavy, tuhé dozimetrické sústavy a plynné dozimetrické sústavy.

6.1.1 KVAPALINOVÉ DOZIMETRICÉ SÚSTAVY

Medzi **kvapalinové dozimetrické sústavy** patrí najviac používaný **železnato–železitý dozimeter**, Frickeho dozimeter. Zakladá sa na vodnom roztoku FeSO_4 , NaCl a H_2SO_4 . Pri ožiarení roztoku ióny Fe^{2+} sa oxidujú na ióny Fe^{3+} pomocou rádiolytických produktov vody. Radiačno-chemický výťažok reakcie je $G_{\text{Fe}^{3+}} = 15,6$ iónov/100 eV (absorpciou 100 eV energie žiarenia gama sa oxiduje 15,6 iónov Fe^{2+} na ióny Fe^{3+}). Ióny Fe^{3+} sa stanovujú spektrofotometricky v oblasti UV žiarenia a ióny Fe^{2+} sa stanovujú kolorimetricky.

Ceričitý dozimeter je založený na redukcii vodného roztoku síranu ceričitého. Redukcia Ce^{4+} na Ce^{3+} je úmerná absorbovanej radiačnej dávke. Radiačno-chemický výťažok reakcie je $G_{\text{Ce}^{3+}} = 2,5\text{--}3,0$ iónov/100 eV.

Na určovanie radiačných dávok sa využíva taktiež **radiačný rozklad organických zlúčenín**. Takto pracuje **chloroformový (Taplinov) dozimeter**. Ožiareníím sa z chlorovaných uhlíkovodíkov odštiepuje chlorovodík, ktorý prejde do vodnej fázy a mení jej pH. Hodnota $G_{\text{HCl}} = 40$. **Chlórbenzénový dozimeter** pracuje na podobnom princípe, ale chlorovodík sa odštiepuje z chlórbenzénu. **Kyselina šťaveľová** je vhodná na meranie radiačnej dávky na základe jej radiačnej oxidácie. **Metylénová modrá** pracuje na základe odfarbenia jej vodného roztoku pod vplyvom žiarenia. Kvapalinové chemické dozimetre sú uvedené v tabuľke 7.

Dozimetrický systém	G (pre ^{60}Co)	Dávkový rozsah [10 mJ kg^{-1}]	Dávkový príkon [$2,78 \mu\text{W kg}^{-1}$]	Presnosť [$\pm \%$]	Poznámky
Síran železnatý	15,6	$5 \cdot 10^3$ až $5 \cdot 10^4$	$5 \cdot 10^3$ až 10^6	2	
Síran železnato-meďnatý	0,7	$5 \cdot 10^3$ až 10^7	$5 \cdot 10^3$ až 10^{10}	2 až 20	
Síran ceričitý	2,5	$5 \cdot 10^4$ až $2 \cdot 10^8$	$5 \cdot 10^3$ až $8 \cdot 10^9$	20 až 5	vhodný na meranie vysokých dávok
Chloroform	40,0	do 10^6	-	5	má niekoľko modifikácií
Chlórbenzén	-	$5 \cdot 10^4$ až $4 \cdot 10^6$	do $9 \cdot 10^6$	-	
Kyselina šťaveľová	4,9	$2 \cdot 10^6$ až $2 \cdot 10^8$	-	5	
Metylénová modrá	1,6	10^4 až $6 \cdot 10^6$	-	5 až 2	

Tab. 7 Kvapalinové chemické dozimetrické sústavy.

6.1.2 TUHÉ DOZIMETRICKÉ SÚSTAVY

Prvú skupinu tuhých dozimetrických sústav tvoria **plastické dozimetre**. Tieto sú vhodné na stanovenie vysokých dávok žiarenia a ich použitie sa zakladá na ich radiačne vyvolaných farebných zmenách, ktoré majú nevratnú povahu. Na meranie radiačných dávok sa využíva aj proces **radiačnej polymerizácie**, na takomto princípe pracuje styrénový-polystyrénový dozimeter alebo sa využívajú javy **radiačného zosieťovania**, prípadne

odbúravanja polymérov. Odbúravanje je základom princípu polyizobutylénového dozimetra. Prehľad dôležitých plastických dozimetrických sústav je v tabuľke 8.

<i>Dozimetrický systém</i>	<i>Druh žiarenia</i>	<i>Radiačný efekt</i>	<i>Meranie</i>	<i>Forma</i>	<i>Rozsah [10 mJ kg⁻¹]</i>	<i>Presnosť [± %]</i>
Polyvinylchlorid	β, γ	sfarbenie	spektrofotometicky	fólia	$5 \cdot 10^5$ až $6 \cdot 10^6$	8
Polymetylmetakrylát	β, γ	sfarbenie	spektrofotometicky	fólia	10^5 až 10^6	2
Polyetylén-tereftalát	β, γ	sfarbenie	spektrofotometicky	fólia	10^6 až $2 \cdot 10^8$	-
Acetát celulózy	β, γ	sfarbenie	spektrofotometicky	fólia	10^6 až $2 \cdot 10^8$	10
Polyvinylidénchlorid	β, γ	sfarbenie	spektrofotometicky	fólia	10^4 až 10^7	-
Polyetylén	β, γ	sfarbenie	spektrofotometicky	fólia	10^7 až 10^{10}	-
Polyizobutylén	γ	odbúrание	viskozimetricky	roztok	$3 \cdot 10^4$ až 10^{10}	1
Styrén-polyester	γ	zosieťovanie	gélóvatenie	v ampulke	10^3 až 10^8	-

Tab. 8 Plastické dozimetrické sústavy.

Veľmi rozšírenou technikou osobnej dozimetrie je **filmová a fotografická dozimetria**. Metóda je založená na radiačnom sčernaní emulzie halogenidov striebra (AgBr). Na radiačnú dozimetru sa využívajú hlavne dvojstranné röntgenové filmy, ktoré sú vhodné na meranie röntgenového žiarenia, žiarenia gama a beta. Prehľad parametrov filmovej dozimetrie je v tabuľke 9.

Do tuhých dozimetrických sústav zaraďujeme ešte **luminiscenčné a fosforescenčné dozimetre**. Ich podstatou je striebrom aktivované fosforečné alebo kobaltové sklá, ktoré sa ožarovaním zafarbiajú a toto zafarbenie sa meria fotometricky. Fosforečné sklá aktivované striebrom vykazujú radiačnú fluorescenciu, gama fotónmi ožiarené sklo po osvetlení fosforeskuje. Prehľad luminiscenčných a sklených dozimetrov je v tabuľke 10.

<i>Dozimetrický systém</i>	<i>Druh žiarenia</i>	<i>Radiačný efekt</i>	<i>Meranie</i>	<i>Forma</i>	<i>Rozsah [10 mJ kg⁻¹]</i>	<i>Presnosť [± %]</i>
Röntgenový film	α, β, γ, n	sčernanie	po vyvolaní fotometicky	film	10^2 až 10^3	25
Röntgenový film	β, γ	sčernanie	vykopírovanie	film	10^4 až 10^8	10

Tab. 9 Filmové dozimetre.

<i>Dozimetrický systém</i>	<i>Druh žiarenia</i>	<i>Radiačný efekt</i>	<i>Meranie</i>	<i>Forma</i>	<i>Rozsah [10 mJ kg⁻¹]</i>	<i>Presnosť [± %]</i>
Fosforečné sklo (Ag)	β, γ termické neutróny	rádiofoto- luminiscen- cia	fluorometria	platnička	$3 \cdot 10^2$ až 10^3	5
CaF ₂ (Mn)	β, γ termické neutróny	termolumi- niscencia	luminiscenčné meranie	prášok	10^{-3} až 10^5	-
Kobaltové sklo	γ	sfarbenie	spektrofoto- metricky	platnička	10^3 až 10^7	2
Fosforečné sklo (Ag)	γ	sfarbenie	spektrofoto- metricky	platnička	$5 \cdot 10^3$ až $2 \cdot 10^6$	5

Tab. 10 Luminiscenčné a sklené dozimetrické sústavy.

6.1.3 PLYNNÉ DOZIMETRICKÉ SÚSTAVY

Plynné systémy sú vhodné najmä na meranie vysokých radiačných dávok. Metánový dozimeter pracuje na princípe rozkladu a uvoľňovania plynného vodíka. Oxid dusný sa ožiarením rozkladá a vzniká N₂, O₂ a NO₂. Dávka žiarenia sa určuje na základe merania zmeny tlaku v dozimetri, prípadne kolrimetricky alebo plynovou chromatografiou. Prehľad plyných dozimetrov je v tabuľke 11.

<i>Dozimetrický systém</i>	<i>Druh žiarenia</i>	<i>Radiačný efekt</i>	<i>Meranie</i>	<i>Forma</i>	<i>Rozsah [10 mJ kg⁻¹]</i>	<i>Presnosť [± %]</i>
Metán	α, β, γ	rozklad	plynová analýza	ampulka	10^6 až 10^7	10
Oxid dusný	α, β, γ, n	rozklad	plynová analýza, kolorimetria	ampulka	10^4 až 10^{10}	5

Tab. 11 Plynné dozimetrické sústavy.

6. 2 DETEKCIA JEDNOTLIVÝCH DRUHOV ŽIARENIA

Hlavným problémom pri **detekcii alfa žiarenia** je jeho veľmi krátky dosah. Ak ale vnikne do detekčného priestoru, v dôsledku jej veľkej mernej ionizácie spôsobuje takmer 100 % účinnosť. Na detekciu alfa žiarenia sa môže požiť ionizačná komôrka, proporcionálna trubica, Geigerova-Müllerova trubica, scintilačný detektor alebo polovodičový detektor.

Pri **detekcii beta žiarenia** je potrebné uvažovať o troch skupinách beta žiarenia. Mäkké beta žiarenie s $E_{\max.} < 0,2$ MeV má krátky dosah a preto sa detekuje podobne ako alfa žiarenie. Na detekciu sa používajú prietokové Geiger-Müllerove trubice alebo špeciálne konveržno-metánové Geiger-Müllerove trubice. Čisté beta žiarenie je bez sprievodného gama žiarenia a má energiu $E_{\max.} > 0,2$ MeV. Má menšiu lineárnu ionizáciu ako alfa žiarenie, preto je dosah beta žiarenia väčší. Detekcia sa robí okienkovými alebo plášťovými Geiger-Müllerovými trubicami. Kombinované beta žiarenie a gama žiarenie je možné detekovať beta alebo gama detektormi.

Na **detekciu gama žiarenia** sa využívajú scintilačné detektory a polovodičové detektory, v niektorých prípadoch sa využívajú aj vysokotlakové ionizačné komory a proporcionálne trubice.

Detekcia neutrónového žiarenia je založená na interakčných dejoch neutrónového žiarenia. Na detekciu termických neutrónov sa používa ionizačná komora, proporcionálna trubica, Geigerova-Müllerova trubica, prípadne scintilátory s obsahom bóru. Rýchle neutróny sa detekujú štiepnymi detektormi, ionizačnými komorami, proporcionálnymi trubicami alebo scintilačnými detektormi.

6.2.1 REGISTRÁCIA ELEKTRICKÝCH IMPULZOV Z DETEKTORA ŽIARENIA

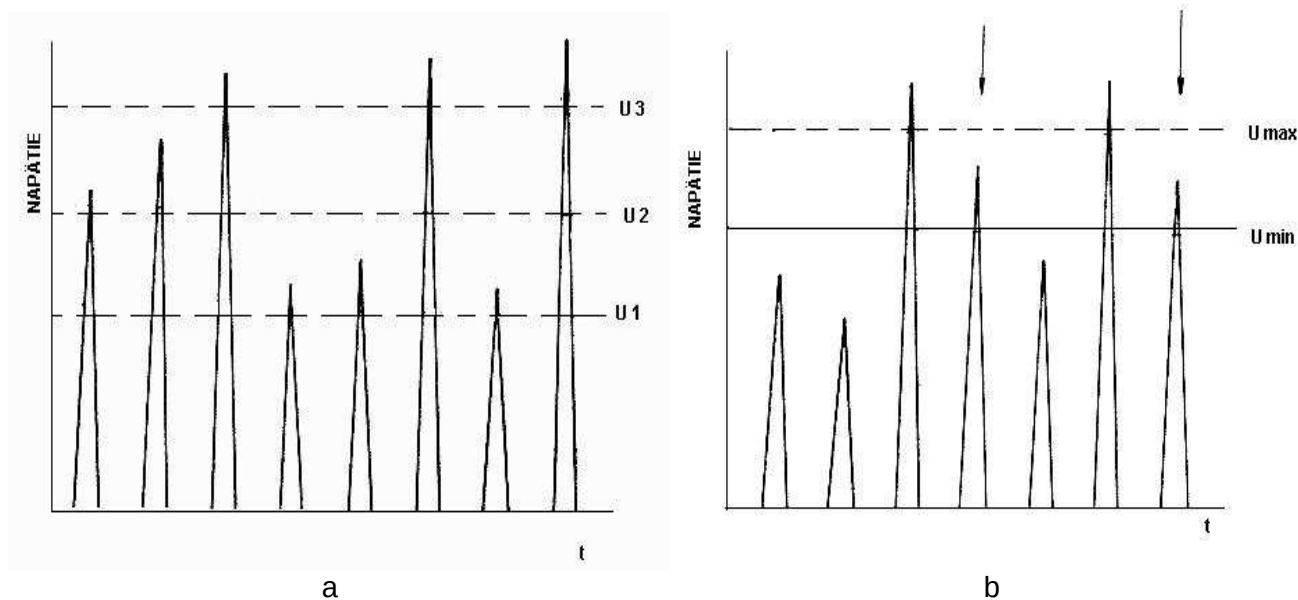
Detektory žiarenia poskytujú elektrický signál, ktorý je výsledkom interakcie žiarenia s látkou. Sú to vlastne generátory impulzov v ktorých vznikajú impulzy s rôznym časovým trvaním a rôznou amplitúdou. Nábojové impulzy sa pozorujú na výstupe z detektora a keďže niektoré majú veľmi malé amplitúdy, je potrebné ich zosilňovať vo vhodných elektronických zariadeniach, v **sčítavačoch** alebo v **integrátoroch**. Na registráciu impulzov sa v najjednoduchšom prípade používa **elektromagnetické počítadlo** alebo **rýchle mechanické počítadlo**. Vysokú rozlišovaciu schopnosť majú **reduktory impulzov**, ktoré môžu byť binárne alebo dekadické. Binárne reduktory sú zariadenia, kde dvom impulzom na vstupe zodpovedá jeden impulz na výstupe. Jeden stupeň teda redukuje počet impulzov na polovicu. Zapojením n redukčných stupňov je na výstupe 2^n -krát menej impulzov. V prípade dekadických reduktorov jeden redukčný stupeň prepúšťa každý desiaty impulz. Počet impulzov za jednotku času sa odčítava v **integrátoroch**. Elektrické impulzy, ktoré poskytujú detektory sú úmerné detekovanej energii a triedia sa podľa amplitúdy. Analyzujú sa v **amplitúdových analyzátoroch**, v ktorých sa rozdeľovanie impulzov robí pomocou integrálneho alebo diferenciálneho diskriminátora. V **integrálnom amplitúdovom analyzátore** sa na výstupe objaví signál len vtedy, ak amplitúda výstupného signálu prevyšuje vopred stanovenú diskriminačnú hladinu, obrázok 32 a.

V polohe diskriminačného napätia U_1 sa do počítadla dostane každý impulz, v polohe U_2 len päť signálov a v polohe U_3 iba tri signály. Takto sa môže odstrániť nežiadúci šum fotonásobiča. V diferenciálnom amplitúdovom analyzátore sa na výstupe objaví signál len tých impulzov, ktorých amplitúdy sa nachádzajú medzi dvomi prahovými hodnotami $U_{\min}$ a $U_{\max}$. Ich rozdiel sa nazýva šírka kanála amplitúdového analyzátora, obrázok 32 b. V praxi sa využívajú jednoduchšie jednakanálové alebo mnohakanálové spektrometre, ktoré môžu mať až niekoľko tisíc kanálov.

6. 3 MERANIE JADROVÝCH VELIČÍN A AKTIVITY ŽIARIČOV

Identifikácia rádionuklidov je možná iba v tom prípade, že je daný rádionuklid jednoznačne určený druhom žiarenia, polčasom rádioaktívnej premeny, energiou žiarenia a aktivitou rádioaktívneho preparátu. **Druh žiarenia** rádionuklidu sa môže jednoducho určiť porovnávaním prenikavosti žiarenia v rozličných prostrediach. Alfa žiarenie sa určuje vzdialenosťou detektora od preparátu. Pri vzdialenosti väčšej ako 10 cm sa alfa žiarenie už nedetekuje a jeho prítomnosť sa potvrdzuje detekciou alfa scintilátormi.

Beta žiarenie sa od gama žiarenia rozlišuje absorpčným filtrom z plastickej hmoty hrúbky 5-10 mm, ktorý sa vkladá medzi preparát a detektor. Filtrom potom prechádza len gama žiarenie.



Obr. 32 Amplitúdové spektrum impulzov pomocou a) integrálneho, b) diferenciálneho amplitúdového analyzátoru.

Polčas rádioaktívnej premeny sa určuje z grafického vyjadrenia rozpadovej krivky v semilogaritmických súradniciach. **Energia žiarenia** je najdôležitejším údajom pri identifikácii rádionuklidu. Energia alfa žiarenia sa určuje podľa dosahu v rozličnom prostredí, napr. vzduch, hliník. Energia beta žiarenia sa určuje magnetickým spektrometrom. Beta žiarenie sa absorbuje v hliníku a energia sa určuje pomocou maximálneho dosahu technikou celkovej alebo polovičnej absorpcie. Gama žiarenie sa určuje absorpčnou metódou v olove, hliníku alebo v medi pomocou gama spektrometrov. **Aktivita** sa udáva počtom nukleárných premien za sekundu. Môže sa vyjadrovať ako celková alebo merná aktivita. V mnohých prípadoch, napríklad pri meraní beta rádioaktivity, však nie je potrebné poznať hodnotu aktivity preparátu, ale stačí merať len početnosť impulzov.

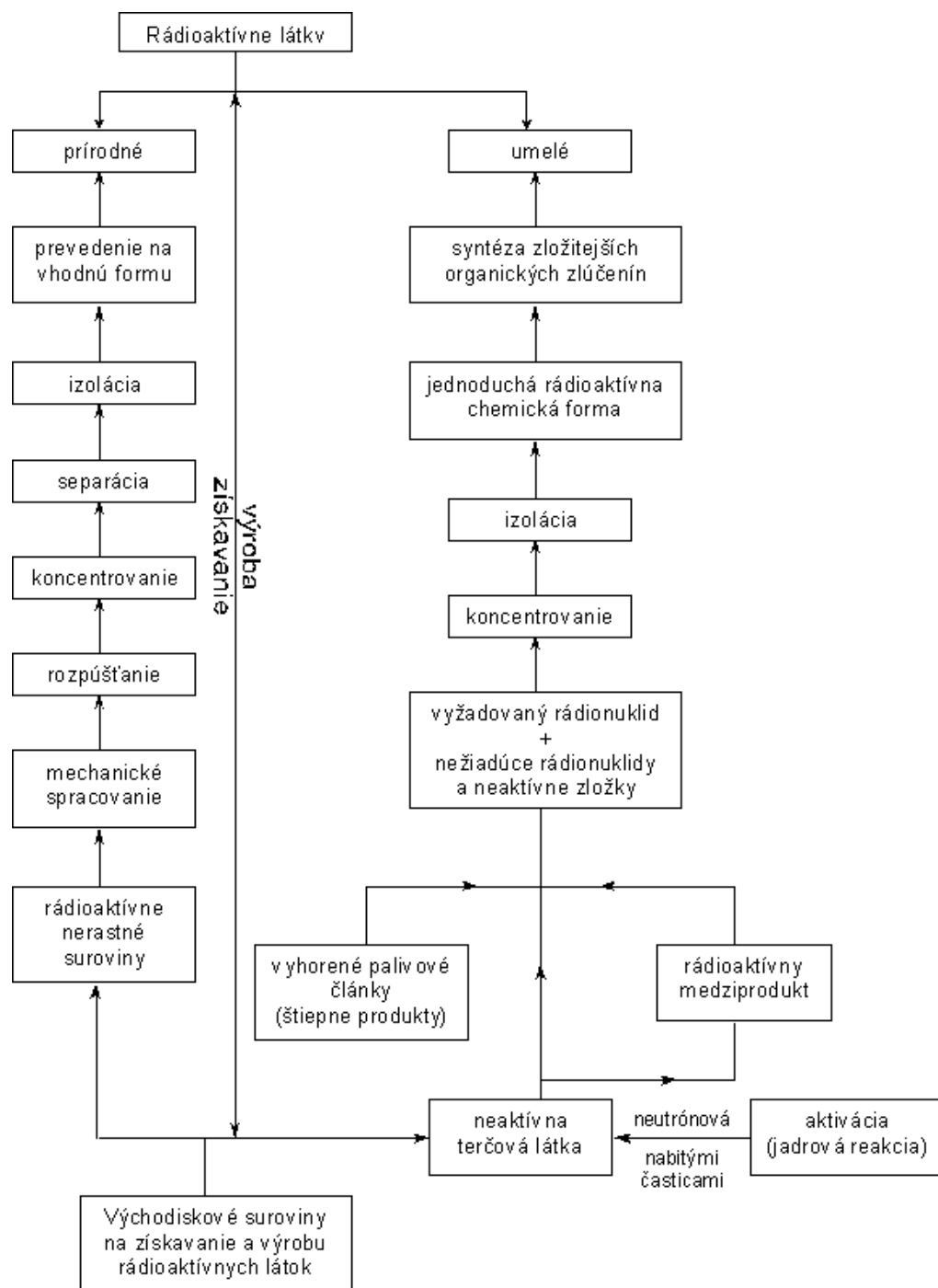
6. 4 PRÍPRAVA VZORIEK NA MERANIE RÁDIOAKTIVITY

Dôkladná príprava rádioaktívnych vzoriek si vyžaduje geometrickú a fyzikálnu rovnorodosť. Počet impulzov je totiž funkciou hrúbky vzorky, veľkosti a tvaru preparátu. Vzorky na meranie môžu byť v tuhom, kvapalnom alebo plynnom skupenstve. Tuhé vzorky sa z roztokov pripravujú odparovaním, zrážaním alebo elektrolytickým vylučovaním.

Kvapalné vzorky majú výhodu v tom, že sú homogénne a teda sú najlepšie reprodukovateľné. Aktivita kvapalných vzoriek sa meria v prietokových Geiger-Müllerových trubiciach alebo v kvapalinových scintilačných detektoroch. Tu je predpokladom rozpustnosť vzorky v toluéne alebo v dioxáne. Ak sú rádioaktívne vzorky nerozpustné, môžu sa dispergovať vo vhodnej kvapaline vo forme jemnej suspenzie. Plynné vzorky sa merajú tak, že sa zavádzajú dovnútra detektora.

7 VÝROBA RÁDIONUKLIDOV A PRÍPRAVA OZNAČENÝCH ZLÚČENÍN

Rádioaktívne látky sa rozdeľujú na prírodné a umelé. Prírodné sa získavajú z východiskových nerastných surovín, umelé sa vyrábajú umelo vyvolanými jadrovými reakciami, obrázok 33.



Obr. 33 Schéma získavania prírodných a výroby umelých rádioaktívnych látok.

7. 1 PRÍPRAVA PRÍRODNÝCH RÁDIOAKTÍVNYCH LÁTOK

Prírodné rádioaktívne nuklidy sa nachádzajú v prírode vo forme nerastov. Získavajú sa rádiochemickými a fyzikálnochemickými separačnými metódami. Ide o koncentrovanie rádioaktívneho nuklidu, o jeho oddelenie od ostatných aktívnych a neaktívnych zložiek.

Voľba preparačnej metódy závisí od polčasu rozpadu príslušného rádionuklidu.

Rádionuklidy s dlhým polčasom rozpadu (^{232}Th , ^{238}U , ^{235}U , ^{234}U , ^{230}Th , ^{231}Pa , ^{226}Ra , ^{227}Ac , ^{210}Pb , ^{228}Ra , ^{228}Th) sa získavajú metódami anorganickej preparačnej chémie. Vyžívajú sa hlavne na výrobu uránu a tória. **Rádionuklidy s krátkym polčasom rozpadu** (^{226}Rn , ^{220}Rn , ^{216}Rn , ^{234}Th , ^{224}Ra , ^{223}Ra , ^{228}Ac) sa pripravujú laboratórnymi preparatívnymi metódami.

7. 2 VÝROBA UMELÝCH RÁDIONUKLIDOV

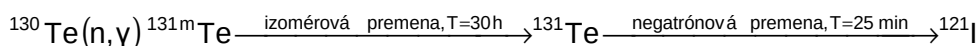
Výroba umelých rádionuklidov je rozdelená na tri etapy. Najskôr je dôležité pripraviť vyžadovaný rádionuklid zo stabilných nuklidov terčovej látky jadrovými reakciami. Ďalej je potrebné oddeľovanie, koncentrovanie a izolovanie nuklidu a nakoniec je to syntéza zložitejších označených zlúčenín, do ktorých je včlenený rádionuklid, pripravený v prvých dvoch etapách.

7.2.1 AKTIVAČNÉ JADROVÉ REAKCIE NA PRÍPRAVU RÁDIONUKLIDOV

Neutrónová aktivácia sa uskutočňuje pomalými (tepelnými neutrónmi) alebo rýchlymi neutrónmi. Pri reakcii typu (n,γ) s tepelnými neutrónmi ide o radiačné zachytenie tepelných neutrónov. Výhodou je vysoký výťažok reakcie, nevýhodou je malá merná aktivita získanej látky. Reakcie s rýchlymi neutrónmi sú reakcie typu (n,α) , (n,p) , $(n,2n)$. Ich výhodou je to, že pripravené látky majú vysokú mernú aktivitu a nuklid je v čistej forme pripravený chemickou separáciou. Takýmto spôsobom sa pripravujú ^{14}C , ^{32}P , ^{35}S .

Pri **aktivácii urýchlenými iónmi** ide o reakciu s protónmi, deuterónmi, heliónmi, ktoré sa urýchľujú pomocou urýchľovačov. Reakciou typu (d,p) sa získa najvyšší výťažok reakcie, reakciami (d,n) , (d,α) a $(d,2n)$ vzniknuté produkty možno lepšie chemicky oddeliť od terčového prvku. Pomocou **štiepných a trieštivých reakcií** sa získavajú len niektoré rádionuklidy, napríklad ^{89}Sr , ^{90}Sr , ^{90}Y , ^{131}I , ^{137}Cs , ^{144}Ce , ^{147}Nd , ^{147}Pm .

Rádioaktívne premeny sa využívajú ako nepriamy spôsob výroby rádionuklidov. Jadrovou reakciou sa získa rádioaktívny medziprodukt, ktorý svojim rozpadom poskytuje vyžadovaný rádionuklid, napr.



7.2.2 TECHNIKA AKTIVÁCIE

Pri výrobe umelých rádionuklidov je dôležitá forma terčovej látky a jej vlastnosti. Jadrové vlastnosti majú zabezpečiť to, že pri aktivácii má vzniknúť požadovaný rádionuklid. Chemická forma terčovej látky je rôznorodá. Uprednostňuje sa elementárna forma kovov alebo oxidov, hydroxidov, uhličitanov, síranov, dusičnanov. Fyzikálne vlastnosti sú dôležité z hľadiska skupenského stavu. Ďalšími požiadavkami na terčovú látku sú čistota, termická a radiačno-chemická stabilita.

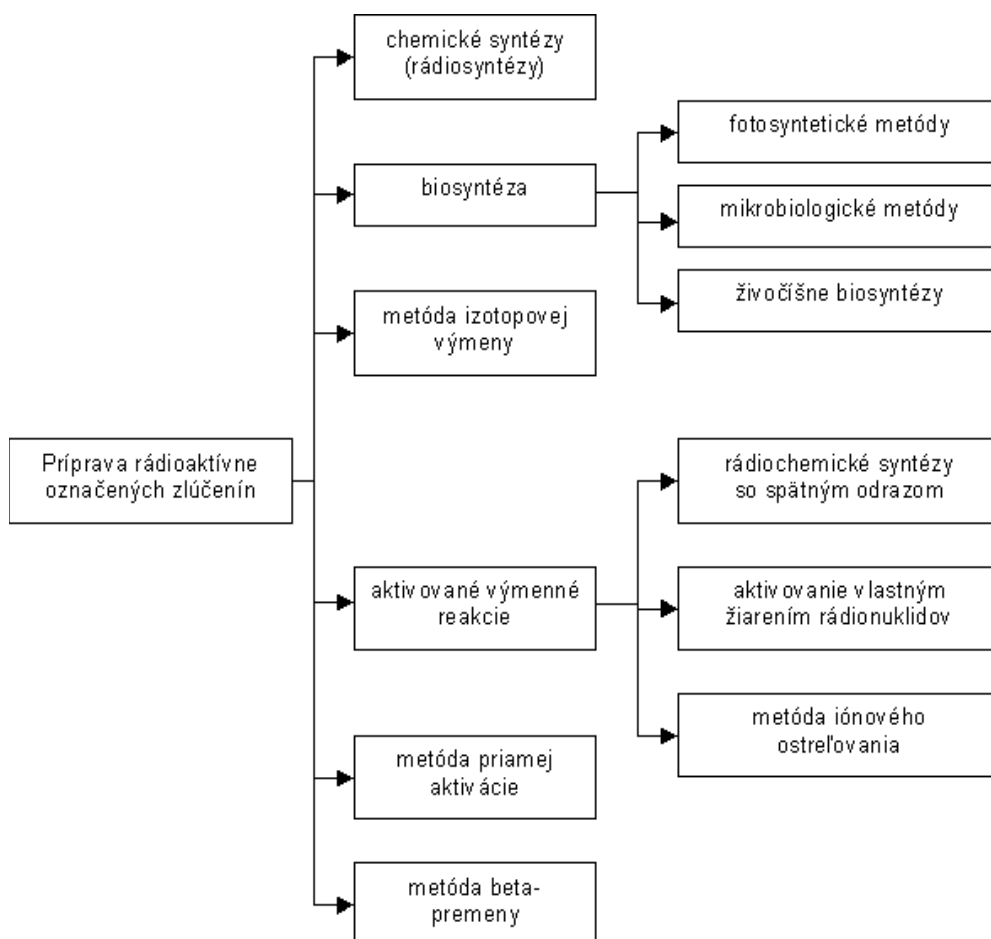
Technika aktivácie spočíva v aktivácii neutrónmi alebo urýchlenými iónmi. Pri **aktivácii neutrónmi** môžu byť vzorky v tuhom, kvapalnom alebo plynnom skupenstve. Sú uzavreté v obaloch, ktorým neutrónové žiarenie ľahko preniká (sklo, hliníková fólia, kremeň, polyetylén, polystyrén). Ako zdroje neutrónov sa používajú rádionuklidové neutrónové zdroje a taktiež urýchľovače, ktoré sa používajú na výrobu krátkožijúcich rádionuklidov. Sú to neutrónové generátory typu $^2\text{H}(\text{d},\text{n})^3\text{He}$, $^9\text{Be}(\text{d},\text{n})^{10}\text{B}$. Ďalej sa využívajú jadrové reaktory. Tu sa rádionuklidy získavajú dvomi spôsobmi. Terčové látky sa aktivujú tokom neutrónov alebo rádionuklidy vznikajú vo forme štiepných produktov priamo v jadrových palivových článkoch. Zo štiepných produktov sa vyrábajú rádionuklidy s dlhým alebo krátkym polčasom rozpadu, najčastejšie sa takto pripravuje ^{131}I a ^{137}Cs . **Aktivácia urýchlenými iónmi** získaných pomocou urýchľovačov (cyklotrónu) umožňuje získať rádionuklidy, ktoré nemožno vyrobiť v reaktore, napr. ^{18}F , ^{22}Na , ^{52}Mn , ^{67}Ga , ^{74}As .

Aktivovaný terčový materiál býva väčšinou zmesou rádioaktívnych a stabilných nuklidov. Neaktívne makrozložky aktivovanej terčovej látky znižujú mernú aktivitu produktu, preto je potrebné žiadaný rádionuklid **chemicky spracovať**, napríklad koncentrovať. Metódy koncentrácie, separácie a izolácie sú rôzne, využívajú sa na to rozličné chemické analytické metódy. Kontrola chemickej čistoty rádioaktívnych preparátov sa uskutočňuje spektrálnymi metódami, papierovou alebo tenkovrstvovou chromatografiou, elektroforézou a podobne.

7. 3 PRÍPRAVA RÁDIOAKTÍVNE OZNAČENÝCH ZLÚČENÍN

Rádioaktívne označené zlúčeniny sú látky, ktoré v určitom počte molekúl majú niektoré atómy nahradené rádionuklidmi. Najčastejšie sa používajú zlúčeniny označené týmito rádionuklidmi: ^3H , ^{14}C , ^{32}P , ^{35}S , ^{36}Cl , ^{82}Br a ^{131}I . Podľa miesta začlenenia označeného atómu rozoznávame **špecificky označené** organické zlúčeniny, v ktorých je rádionuklid zabudovaný do jednej, určitej polohy v molekule a **všeobecne označené** organické zlúčeniny. Tieto obsahujú rádionuklid vo všetkých možných polohách molekuly, v závislosti od použitej metódy syntézy. Pripravujú sa chemickou a biologickou syntézou, výmennými reakciami, metódami priamej aktivácie a metódou beta premeny, schéma 34.

Chemické syntézy alebo rádiosyntézy označených zlúčenín sú vhodné na zavedenie rádioaktívneho nuklidu do vopred určenej polohy v molekule. Zlúčeniny sú najčastejšie značené nuklidom ^{14}C , ^3H , ^{32}P a ^{35}S . Pri syntéze zlúčenín označených radiouhlíkom ^{14}C sa ako zdroj rádioaktívneho uhlíka používa $\text{Ba}^{14}\text{CO}_3$, z ktorého sa pripravujú ďalšie zlúčeniny $^{14}\text{CO}_2$, K^{14}CN , kyseliny R^{14}COOH , značený acetylén, značený etanol a iné.

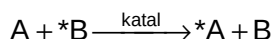


Obr. 34 Schéma prípravy rádioaktívne označených zlúčenín.

Pri syntéze zlúčenín označených trícium ^3H sa využíva redukcia nenasýtených zlúčenín plynným trícium, redukcia esterov a amidov pôsobením LiAl^3H_4 alebo dekarboxylácia karboxylových kyselín. **Biosyntéza** organických zlúčenín je založená na tom, že živému organizmu sa podá rádioaktívna látka a organizmus ju premieňa na zložitejšie produkty obsahujúce rádioaktívne nuklidy. Podľa druhu organizmu poznáme metódy fotosyntetické, mikrobiologické a živočíšne. Fotosyntetickými metódami sa pripravujú monosacharidy, polysacharidy, bielkoviny a označené aminokyseliny a používa sa pri nich značený $^{14}\text{CO}_2$. Pri mikrobiologických metódach prípravy označených zlúčenín sa využíva metabolizmus mikroorganizmov, napr. *E. Coli*. Možno tak pripraviť aminokyseliny a peptidy. Živočíšne metódy sa používajú na biosyntetickú prípravu označených zlúčenín. Ako vhodný materiál sa

považujú napríklad krysy, zajace alebo izolované živočíšne tkanivá, krv zajacov, rezy z pečene krýs a podobne. Živočíšnou biosyntézou sa pripravujú krvné bielkoviny (albumín, fibrín, globulín), nukleotidy, kyselina močová a iné.

Metóda izotopovej výmeny spočíva v tom, že na označenie organických zlúčenín sa používajú výmenné reakcie medzi neaktívnou látkou A a rádionuklidom *B



Na značenie sa používa trícium ${}^3\text{H}$, ${}^{35}\text{S}$ a rádioaktívne halogény. Ak je molekula zlúčeniny aktivovaná, označovanie je veľmi účinné.

K **aktivovaným výmenným reakciám** sa zaraďujú rádiochemické syntézy so spätným odrazom a metódy iónového ostreľovania. Najčastejšie sa využíva aktivácia vlastným žiarením rádionuklidu. Využíva sa trícium, ktoré sa včleňuje do molekuly organickej zlúčeniny a vystupuje aj ako zdroj vnútorného ožiarenia, ktorý vyvoláva radiačno-chemické efekty. Táto Wilzbachova metóda sa používa na značenie polypeptidov, bielkovín, enzýmov a vitamínov. Pri **metóde priamej aktivácie** sa určitý atóm molekuly priamo aktivuje vhodnou jadrovou reakciou. Príkladom je premena atómu dusíka ${}^{14}\text{N}$ na rádioaktívny uhlík ${}^{14}\text{C}$ podľa reakcie ${}^{14}\text{N}(\text{n},\text{p}){}^{14}\text{C}$. Pri využití **metódy beta premeny** označovaná zlúčenina obsahuje rádioaktívny materský nuklid, ktorého beta premenou vzniká rádioaktívny dcérske nuklid. Na získanie informácie o tom, na ktorom mieste molekuly organickej zlúčeniny je začlenený rádionuklid, sa využíva metóda **degradácie**. Postupným odbúravaním označenej látky a meraním aktivity degradačných produktov zistíme jeho koncentráciu.

7. 4 JADROVÁ CHEMICKÁ TECHNOLOGIA

Jadrová chemická technológia sa zaoberá spracovaním surovín na materiály jadrovej čistoty, čím sa zabezpečuje výroba rádioaktívnych a stabilných izotopov. Do jadrovej technológie patria nasledovné základné výroby.

Výroba a spracovanie jadrového paliva zahŕňa spracovanie uránových rúd na čisté zlúčeniny uránu s prírodným izotopovým zložením, výrobu kovového uránu, rozdeľovanie izotopov uránu ${}^{238}\text{U}$ a ${}^{235}\text{U}$, spracovanie tóriových rúd, výrobu kovového tória, spracovanie ožiareného jadrového paliva a výrobu plutónia, výrobu uránu ${}^{233}\text{U}$, spracovanie a likvidáciu štiepných produktov. **Výroba pomocných materiálov jadrovej techniky a výroba moderátorov** je dôležitá z hľadiska prípravy ťažkej vody, nukleárneho grafitu, berýlia a jeho zlúčenín, z hľadiska výroby zirkónu, nukleárneho vápnika, horčíka, alkalických kovov, bóru, kadmia a podobne. K **výrobe rádioaktívnych a stabilných izotopov a špeciálnych čistých chemikálií** zaraďujeme výrobu rádioaktívnych žiaričov z ožiarených terčových materiálov a zo štiepných produktov, prípravu stabilných izotopov na vedecké a technické účely, prípravu luminiscenčných látok.

K **najdôležitejším chemickým problémom** spojeným s výrobou energie v jadrových reaktoroch patrí získavanie uránu a jeho rafinácia; získavanie tória z rúd a jeho rafinácia; izolovanie a čistenie sekundárnych štiepateľných materiálov ^{239}Pu , resp. ^{233}U , spojené s regeneráciou jadrového paliva a likvidácia rádioaktívneho odpadu a štiepných splodín.

7.4.1 TECHNOLOGIA VÝROBY URÁNU

Urán patrí medzi takzvané litofilné prvky a nachádza sa takmer vo všetkých horninách. V každej tоне horniny sa nachádzajú priemerne 4 g uránu. V súčasnosti je známych viac ako sto minerálov obsahujúcich urán, napríklad smolinec, karnotit (vanadičnan uranylodraselný), tujamunit (vanadičnan uranylovápenatý), torbenit, autunit. Urán sa často vyskytuje ako prímes v niektorých sedimentoch, v rašelinách a bridliciach.

Spracovanie uránovej rudy rozdeľujeme na tieto etapy:

- fyzikálno-chemická úprava uránových rúd (obohacovanie, drvenie, žíhanie)
- výroba chemického koncentrátu
- rafinácia chemického koncentrátu
- výroba požadovanej uránovej zlúčeniny

Uránová nerastná surovina sa obohacuje **fyzikálnymi metódami** a po tepelnej úprave pri 500-600 °C, ktorá sa používa na odstránenie uhlíkatých látok a síry, sa upravuje a jemne rozdrví. Takto postupuje na **výrobu chemického koncentrátu**. Chemické spracovanie sa začína vylúhovaním uránu zo suroviny. Na vylúhovanie sa používa H_2SO_4 alebo roztok Na_2CO_3 . Na separáciu uránu z čistého výluhu sa používajú zrážacie postupy, t.j. zrážanie dvojuránu sodného z uhličitanového výluhu; extrakčné postupy, kde sa uránová zlúčenina extrahuje z kyslých roztokov pomocou petrolejových roztokov alebo ionexové postupy. Pri týchto sa aniónové komplexy uránu sorbujú na anexoch, potom sa urán eluuje slabými kyslými chloridovými alebo dusičnanovými roztokmi. Uránový koncentrát sa potom **rafinuje**, aby sa znížil obsah prímies, ktoré absorbujú neutróny. Uránový koncentrát sa rozpúšťa v HNO_3 a roztok sa extrahuje organickým petrolejovým roztokom tributylfosfátu. Z organickej fázy sa urán reextrahuje deionizovanou vodou a vodný roztok sa odparuje do sucha. Uránová soľ sa termicky rozkladá na UO_3 . Ten sa potom pri vysokej teplote redukuje vodíkom alebo amoniakom na UO_2 , ktorý môže slúžiť ako reaktorové palivo na výrobu palivových článkov. Z UO_2 sa pôsobením suchého fluorovodíka **vyrába** fluorid uraničitý UF_4 , z ktorého sa získava fluorid uránový UF_6 , ktorý je základnou látkou pri obohacovaní uránu izotopom ^{235}U . Ďalej je z UF_4 možné získať kovový urán a to redukciou horčíkom alebo vápnikom v inertnej atmosfére pri vysokej teplote. Často sa v rýchlych reaktoroch využíva aj karbid uránu UC.

7.4.2 VÝROBA TÓRIA

Tórium patrí tiež k litofilným prvkom, ale jeho rozptýlenosť v zemskej kôre je väčšia. Základný tóriový minerál je monazit. Monazitové piesky sa obohacujú a získavajú sa koncentráty s vysokým obsahom tória. Monazitový koncentrát sa varí v roztoku NaOH, čím sa rozpustia fosforečnany a zostáva tam iba nerozpustný hydroxid toričitý $\text{Th}(\text{OH})_4$, vzácne zeminy a urán. Zrazenina sa rozpustí v horúcej HCl, zneutralizuje sa, aby sa vyzrážal iba čistý $\text{Th}(\text{OH})_4$. Tóriový koncentrát obsahuje až 99 % tória, z neho sa vyrába oxid toričitý a kovové tórium.

7.4.3 REGENERÁCIA OŽIARENÉHO PALIVA

Pri regenerácii ožiareného jadrového paliva sa sekundárny štiepateľný materiál oddeľuje od palivovej suroviny, ako aj od produktov štiepenia. Ide o delenie zmesí, ktoré obsahujú ^{239}Pu , ^{238}U , nevyhorený ^{235}U a štiepne splodiny alebo ^{233}U , ^{232}Th a štiepne splodiny, resp. ^{233}Pa . Ožiarené palivo je vysokoreaktívne, preto sa palivové články spracúvajú po sto dňovom „chladnutí“. Po vychladnutí článkov sa proces začína ich rozpustením. Palivové články sa rozoberajú na ochranný obal a palivové tyče s druhým obalom. Kovový obal sa odstraňuje mechanicky alebo chemicky. Hliníkové obaly sa rozpúšťajú v NaOH, horčíkové v HNO_3 a nerezové v H_2SO_4 . Samotné palivo sa rozpúšťa v HNO_3 a v lúčavke kráľovskej. Získaný roztok ožiareného paliva postupuje na ďalšie spracovanie, z ožiareného paliva sa získava plutónium. Pri **výrobe plutónia** sa využíva metóda oddeľovania plutónia od uránu, ktorá sa zakladá na ich rozdielnych oxidačno-redukčných vlastnostiach. Plutónium Pu^{IV} a Pu^{VI} je možné v prítomnosti U^{VI} selektívne redukovať na Pu^{III} . Potom sa chemické vlastnosti plutónia podstatne líšia od uránu. Známe sú dve metódy. Purex proces sa zakladá na extrakcii Pu^{IV} a U^{VI} petrolejovým roztokom z kyslého vodného roztoku HNO_3 . Plutónium sa potom redukuje z oxidačného čísla štyri Pu^{IV} na oxidačné číslo tri Pu^{III} . Pri redox procese sa do základného roztoku pridáva dvojchróman, vzniká Pu^{VI} , ktoré sa spolu s U^{VI} extrahuje. Plutónium Pu^{VI} sa redukuje na Pu^{III} . Laboratórne sa na takéto postupy využívajú zrážacie, tzv. suché procesy, napr. vákuová sublimácia, extrakcia roztavenými kovmi, zónové tavenie a iné.

7.4.4 LIKVIDÁCIA ŠTIEPNYCH SPLODÍN A RÁDIOAKTÍVNEHO ODPADU

Vysoká aktivita ožiarených palivových článkov je zapríčinená najmä aktivitou štiepných splodín, ku ktorým patria rádioizotopy asi tridsiatich prvkov. Okrem štiepných splodín pri

výrobe jadrovej energie prichádzajú do úvahy aj iné zdroje aktívnych odpadov, t.j. odpadové vody z reaktora alebo laboratórny rádioaktívny odpad.

Spôsob likvidácie odpadov závisí od ich mernej aktivity a množstva. Veľké množstvá vysokorádioaktívnych odpadov je žiadúce **koncentrovať**, **fixovať** na chemicky inertných látkach a **uložiť** na dlhodobú úschovu v geologicky stabilných štruktúrach. Menšie množstvá možno **zriedovať** a **dispergovať**. Na koncentrovanie sa používa metóda odparovania a metóda sorpcie na zrazeninách hydroxidov alebo na prírodných materiáloch (pieskoch, íloch,...). Takéto materiály sú uchovávané v nádobách z nerezovej ocele, ktoré sú potom uložené v **podzemných betónových komorách**. Úložisko rádioaktívnych odpadov v zásade môže byť narušené tektonickou alebo sopečnou činnosťou, eróziou. No úložisko hlbšie ako 300 m môže byť dostatočne chránené pred týmito vplyvmi. Jediné riziko predstavuje podzemná voda, ktorá by mohla dopraviť rádionuklidy z úložiska do biosféry. Vhodným miestom sú taktiež **podzemné soľné formácie**, ktoré sú suché a izolované od použiteľných zdrojov podzemnej vody. V soľných komorách, v dôsledku tepla a tlaku, ktoré vyvíjajú rádioaktívne odpady, dochádza k rekryštalizácii soli a za niekoľko rokov sa kontajnery do soli hermeticky zatavia.

Skladovanie v **ľadových formáciách** je výhodné z toho hľadiska, že odpad si teplom, ktoré vyvíja pretaví cestu až k hlbokým skalným formáciám, kde zostane uzavretý pod obrovskými masami ľadu.

V mnohých prípadoch sa betónové kontajnery zhadzujú do **morí a oceánov**. Aby sa obal nedemoloval, sú sudy opatrené otvormi a pretože pri klesaní rastie vonkajší tlak vody, vniká dovnútra. Aj v prípade, že odpad má pri klesaní čas rozpustiť sa, stúpajúci vonkajší tlak nedovolí, aby z obalu unikal. Pod hornou vrstvou vody v moriach, ktorá siaha maximálne do 100 m, je vrstva v pokoji, jej premiešavanie s vodami vyššie položenými je veľmi pomalé. Zvislý pohyb vody smerom hore je 2 až 5 metrov za rok. V hĺbkach väčších než 2000 m zostáva voda bez pohybu 200 až 1000 rokov. Rádionuklidy, ktoré by unikli, by sa skôr rozptýlili difúziou do veľkých objemov, ako by prenikli do vyšších vodných vrstiev. Doba prieniku je taká dlhá, že by medzitým vymreli aj dlhožijúce rádionuklidy. Často sa odpady uchovávajú v **tuhej forme**, predtým je však potrebné zabezpečiť fixáciu štiepnych splodín. Štiepne splodiny sorbované na hydroxidoch sa žihajú a fixujú sa vo forme oxidov, štiepne splodiny sorbované na íloch alebo iných prírodných materiáloch sa fixujú zahrievaním alebo žíhaním. Pri likvidácii odpadov sa využíva vo veľkej miere ich použitie. Niektoré rádionuklidy, napríklad ^{137}Cs sa používa ako zdroj žiarenia gama a ^{144}Ca , ^{90}Sr a ^{85}Kr ako zdroj žiarenia beta.

Na Slovensku máme v Mochovciach povrchové regionálne úložisko na nízke a stredné rádioaktívne odpady a v Jaslovských Bohuniciach sú vybudované linky na spracovanie rádioaktívnych odpadov (závod JAVYS, a. s.).

8 CHEMICKÉ ÚČINKY ŽIARENIA, RADIAČNÁ CHÉMIA

8. 1 CHEMICKÉ PÔSOBNIE ŽIARENIA

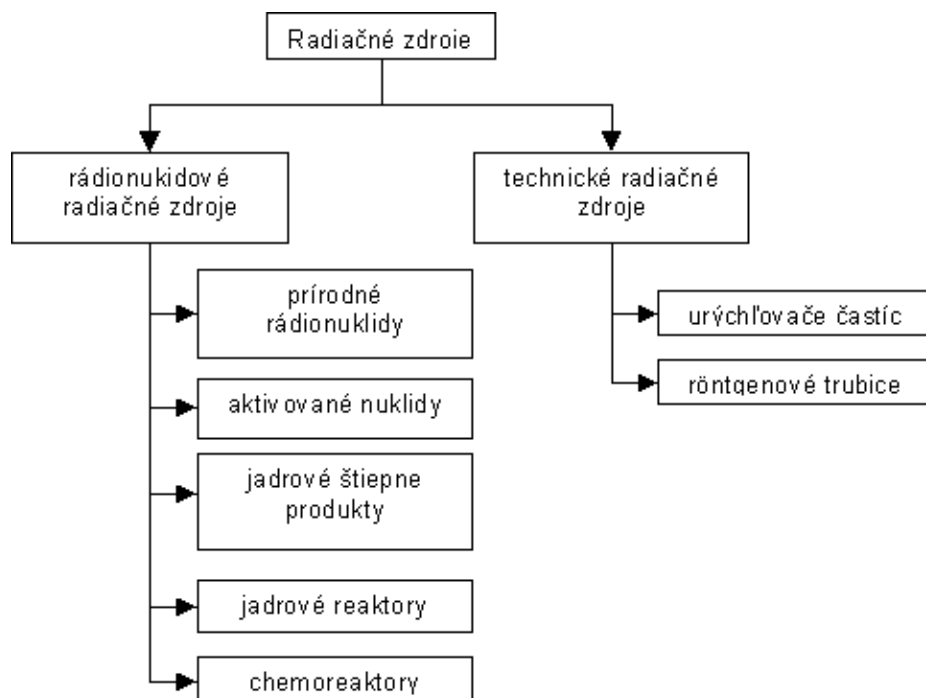
Žiarenie pri prechode látkou vyvoláva rôzne premeny fyzikálneho, fyzikálno-chemického, chemického prípadne biologického charakteru. Účinkami, zmenami a výskumom chemických reakcií vyvolaných žiarením sa zaoberajú dva základné odbory, fotochémia a radiačná chémia. **Fotochémia** sa zaoberá výskumom chemických reakcií spôsobených nízkoenergetickým žiarením s energiou $E < 5 \text{ eV}$, t.j. viditeľným a ultrafialovým svetlom. Pri interakcii nízkoenergetického žiarenia nastáva väčšinou elektrónová excitácia atómov alebo molekúl zložiek ožiarenej sústavy. Vo fotochémii, interagujúci fotón excituje len jednu molekulu ožiarenej sústavy. Radiačná energia sa rovnomerne absorbuje v celom objeme sústavy. **Radiačná chémia** skúma chemické efekty spôsobené interakciou vysokoenergetického žiarenia s látkou, ktorou žiarenie prechádza. Podľa energie 20-30 eV ide o žiarenie, uvoľňované pri jadrových premenách alebo produkované pomocou urýchľovačov častíc. Interakcia vysokoenergetického žiarenia s látkou sa neviaže k jej určitým atómom, teda absorpcia nie je selektívna. Žiarenie s vysokou energiou nielen excituje, ale aj ionizuje atómy a molekuly prostredia, ktorým prechádza. Absorpciou vysokoenergetického žiarenia vznikajú rôzne medziprodukty, ktoré však nie sú rozptýlené v celom ožiarenom systéme, ale sústreďujú sa pozdĺž dráhy častice v ožiarenej látke.

8. 2 ZDROJE VYSOKOENERGETICKÉHO ŽIARENIA

V radiačnej chémii sa za radiačný zdroj považuje látka alebo zariadenie, ktoré vysiela žiarenie s vysokou energiou a dostatočnou intenzitou žiarenia. Zdroje poznáme rádionuklidové a technické, obrázok 35. Zdroje je možné rozčleniť aj podľa toho aké žiarenie emitujú, teda to môže byť fotónové žiarenie, elektrónové, iónové, neutrónové alebo kombinované žiarenie.

K **rádionuklidovým radiačným zdrojom** patria prírodné rádionuklidy, ^{226}Ra , ^{222}Rn , ^{210}Po a aktivované nuklidy, ktoré sú vyrobené reakciami typu (n, γ) , ^{60}Co , ^{137}Cs , ^{170}Tm , ^{46}Sc , ^{116}In . Ďalej tu zaraďujeme cirkulujúce rádionuklidy, tieto sa pripravujú v radiačno-chemickej slučke jadrového reaktora, žiarič v nej cirkuluje, aktivuje sa a potom sa využíva jeho energia, sem patria ^{46}Sm , ^{56}Mn , ^{80}Br a iné. Za rádionuklidové zdroje považujeme taktiež štiepne produkty, ktoré ostávajú vo vyhorených palivových článkoch a sú zdrojom gama a beta žiarenia, potom jadrový reaktor, ktorý sa používa ako zdroj intenzívneho sekundárneho žiarenia v radiačnej chémii a produkuje gama a beta žiarenie a chemické jadrové reaktory

(chemoreaktory), ktoré sa využívajú na fixáciu vzdušného dusíka a na vznik hydrazínu z amoniaku a podobne.



Obr. 35 Rozdelenie radiačných zdrojov.

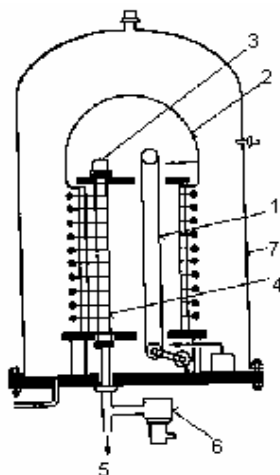
Technické radiačné zdroje využívajú hlavne urýchléné elektrónové žiarenie a röntgenové žiarenie. Urýchľovače sú založené na elektrostatickom urýchľovaní prúdu elektrónov v evakuovanom priestore. Na urýchľovanie sa používajú elektrostatické generátory, vysokonapäťové transformátory, napäťové násobiče, lineárne urýchľovače a iné zariadenia. Najznámejší je Van de Graafov generátor, obrázok 36. Elektrické náboje sa privádzajú z napäťového zdroja na bežiaci pás (1). Ten prenáša náboj na dutú, vysokonapäťovú zbernú elektródu (2). Častice z iónového alebo elektrónového zdroja (3) sú urýchľované v urýchľovacej rúre (4), na konci ktorej vychádza prúd urýchlených častíc (5) cez okienko. Urýchľovacia rúra je evakuovaná vákuovým čerpadlom (6) a všetko je uložené v tlakovej nádobe (7).

Medzi urýchľovače patrí taktiež rezonančný transformátor, Cockroftov-Waltonov urýchľovač, dynamitrón, lineárny urýchľovač a vo veľkej miere sa využívajú röntgenové trubice.

8. 3 TECHNIKA RADIAČNEJ CHÉMIE

Pracovná metodika radiačnej chémie je vlastne metodikou fyzikálnej chémie. Experimentálne práce v radiačnej chémii sa začínajú prípravou ožarovacích nádobiek,

dôležitá je preparácia látky na ožiarenie, vlastné ožiarenie a končí sa to analýzou radiačno-chemických produktov. Reprodukovateľnosť výsledkov je určovaná aj čistotou ožiarенých látok. Analýza produktov sa robí metódou hmotnostnej spektrometrie, UV absorpčnej spektroskopie, IČ spektroskopie, plynovej chromatografie, metódou elektrónovej paramagnetickej rezonancie (EPR) a jadrovej magnetickej rezonancie (NMR). Pri ožiarení je dôležitý **výber vhodného radiačného zdroja**. Podľa usporiadania radiačného zdroja a ožarovanej sústavy môžeme uvažovať o vnútornom ožarovaní, kedy sa využívajú rádionuklidové zdroje a o vonkajšom ožarovaní, s využitím technických zdrojov.



Obr. 36 Schéma Van de Graafovho generátora.

8. 4 RADIAČNO-CHEMICKÉ PROCESY

Radiačno-chemické pôsobenie sa skladá z mnohých čiastkových dejov, ktoré majú rôznu rýchlosť i časové trvanie. Súhrn dejov radiačného pôsobenia sa delí na fyzikálnu etapu, fyzikálno-chemickú etapu a chemickú etapu. Toto rozdelenie je určované povahou interakcie žiarenia a látky a charakterom reakcií medzi produktov. **Fyzikálnu etapu** charakterizujú rýchle deje s trvaním menším ako 10^{-13} s. Ide o deje, pri ktorých sa bezprostredne prenáša radiačná energia na molekuly ožiarenej sústavy. V ožiarenej sústave potom vznikajú útvary bohaté na energiu, t.j iónové páry a vzбудené molekuly. **Fyzikálno-chemická etapa** má trvanie 10^{-11} až 10^{-10} s. Ióny sa tu rekombinujú a vzбудené molekuly podliehajú rôznym premenám. Výsledkom premien sú stále molekuly ale najmä vysoko reaktívne voľné radikály. Prítomnosť voľných radikálov v ožarovovaných sústavách je dokazovaná optickými metódami, hmotnostnou spektrometriou a metódou EPR. **Chemická etapa** trvá 10^{-6} až 10^{-3} s, keď sa sústava dostáva do stavu chemickej rovnováhy. Energia sa využíva na vyvolávanie chemických reakcií, ďalšia časť radiačnej energie sa stráca vo forme tepla a energie. V biologických sústavách existuje aj **biologická etapa** radiačného pôsobenia, pri ktorej vznikajú bioradikály a biomolekuly. K radiačno-chemickým procesom

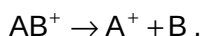
zaraďujeme elementárne radiačné deje, lineárny prenos radiačnej energie a reakcie primárnych radiačných produktov.

8.4.1 ELEMENTÁRNE RADIAČNÉ DEJE

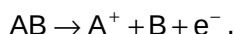
Základnými spôsobmi prenosu radiačnej energie na molekuly ožiareného prostredia sú ionizácia a excitácia. Pri **radiačnej ionizácii** vzniká kladný ión a elektrón



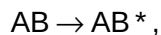
kde sa AB^+ a e^- považujú za iónový pár. Vzniknuté ióny sú nestabilné a podliehajú disociácii



pričom A, B môžu mať povahu voľného radikálu alebo molekuly. Ak celý dej prebehne naraz, ide o **disociačnú ionizáciu**



Ak energia spôsobuje elektrónové vzбудenie molekuly, ide o **radiačnú excitáciu**,

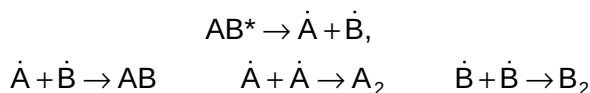


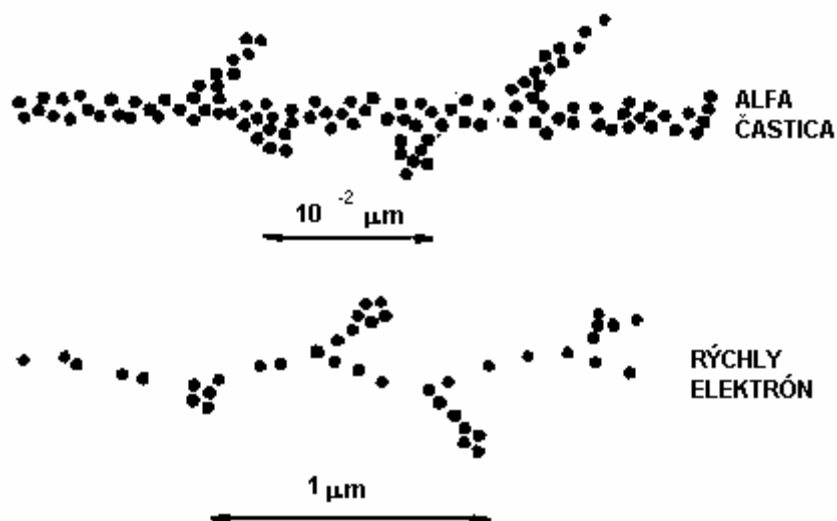
kde AB^* je radiačne excitovaná molekula.

8.4.2 LINEÁRNY PRENOS RADIAČNEJ ENERGIE

Prenos radiačnej energie sa v ožiarenej sústave koncentruje na **radiačnú stopu častice** a nie je rozptýlený v celom objeme osvetleného systému. Podľa toho aj ióny sú nehomogénne lokalizované v objeme ožiarenej sústavy. Radiačná stopa častice sa skladá z elektrónovo vzбудených atómov, molekúl a iónových párov. Schéma hustoty ionizácie a excitácie v stope častice a tvar stopy pre alfa časticu a elektrón je zobrazený na obrázku 37.

Hustota ionizácie teda **lineárna merná ionizácia** je podstatne vyššia v prípade interakcie alfa častice než elektrónu. Charakterizuje sa veličinou **lineárneho prenosu energie LET** pozdĺž dráhy častice. Je to vlastne strata energie častice v dôsledku jej prenosu na molekuly prostredia, ktorá sa vyjadruje poklesom jej kinetickej energie E na dráhovom elemente dx, teda výrazom $(-dE/dx)$. Častica prenikajúca určitým prostredím sa zabrzdí tým rýchlejšie, čím väčší je jej náboj a čím menšia je jej rýchlosť. Alfa častice majú preto vyššiu hodnotu lineárneho prenosu energie (LET) ako elektróny. Pri pôsobení žiarenia s nízkym LET prevládajú reakcie voľných radikálov, ktoré oddifundovali zo stopy častice. Ak má žiarenie vysokú hodnotu LET, prevládajú reakcie okamžitej rekombinácie radikálov na stále produkty. Zo vzbudenej molekuly AB^* vznikajú voľné radikály, ktoré potom navzájom reagujú



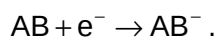


Obr. 37 Radiačná stopa alfa častice a rýchleho elektrónu.

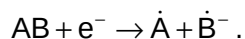
8.4.3 REAKCIE PRIMÁRNYCH RADIAČNÝCH PRODUKTOV

Pri dejoch, ktoré spôsobujú prenos radiačnej energie na molekuly ožiarenej sústavy, vznikajú útvary s nadbytkom energie, t.j. **ióny, vzbudené molekuly a voľné elektróny**. Primárne radiačné produkty sú teda veľmi reaktívne a podliehajú nasledujúcim reakciám.

a) Ak ide o **zachytenie voľného elektrónu** jeden z produktov radiačnej ionizácie je voľný elektrón, ktorý má zvyčajne zvýšenú energiu. Interakciou s prostredím postupne svoju energiu stráca a ak dosiahne energiu 0,04 eV, elektrón sa môže viazať na kladné ióny v prostredí. Môže sa taktiež naviazať aj na neutrálnu molekulu a tak vznikne záporný ión. V tomto prípade ide o **jednoduché** elektrónové zachytenie



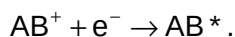
Môže nastať aj **disociačné** elektrónové zachytenie, pričom vzniká voľný radikál A a voľnoradikálový ión B, to môže byť halogén alebo kyanidová skupina



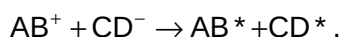
Ak sú produkty schopné vyvolať ďalšie reakcie, radiačnochemický výťažok reakcie sa zvýši.

b) Iónové reakcie prebiehajú v ožiarených sústavách, kde vznikajú okrem záporných elektrónov alebo iónov aj kladné ióny, ktoré sú zvyčajne reaktívnejšie. Rekombinačné reakcie útvarov s opačným nábojom môžu mať charakter deja ión-elektrón a ión-ión.

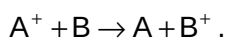
Rekombinácia ión-elektrón nastáva vtedy, ak sa elektrón dostane do silového poľa kladného iónu, pričom vzniká excitovaná molekula s vysokým obsahom energie



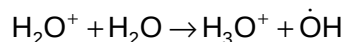
Pri rekombinácii ión-ión vznikajú molekuly v excitovanom stave



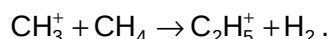
Ďalšia iónová reakcia je prenos náboja (e^-)



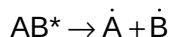
K iónovým reakciám patrí tiež reakcia typu *ión-molekula*, t.j. abstrakcia vodíka



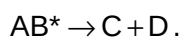
a kondenzačná reakcia



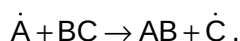
c) Reakcie excitovaných molekúl prebiehajú vtedy, ak dané excitované molekuly majú vysoký obsah energie. Podliehajú ďalším reakciám, môže sa jednať o disociáciu na voľné radikály



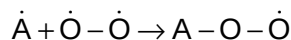
a o disociáciu na molekulové produkty



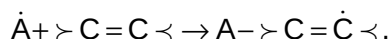
d) K reakciám voľných radikálov patria prenosové reakcie



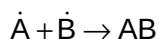
reakcie s kyslíkom



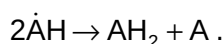
a adičné reakcie



Terminačné reakcie môžu mať charakter kombinácie

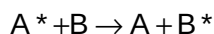


alebo disproportionácie

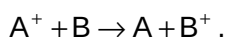


e) Reakcie prenosu energie prebiehajú vtedy, ak sa energia absorbuje molekulami jednej zložky, ale chemické zmeny sa viažu na molekuly inej zložky.

Prenos excitačnej energie potom môžeme vyjadriť reakciou typu



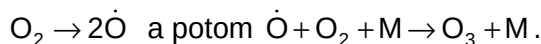
a *prenos náboja* reakciou typu



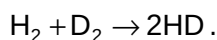
8. 5 RADIAČNO-CHEMICKÉ REAKCIE

8.5.1 RADIAČNÁ CHÉMIA JEDNODUCHÝCH PLYNOV

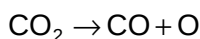
V ožiarených plynoch sa uplatňuje ionizácia a excitácia. **Kyslík** sa pri ožiarení mení na ozón



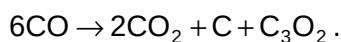
Vodík podlieha výmennej reakcii atómov ľahkého a ťažkého vodíka v ich molekulách



Reakcia **oxidu uhličitého**



sa uplatňuje v jadrových reaktoroch, pričom môže vznikať až suboxid uhlíka, ktorý je veľmi reaktívny

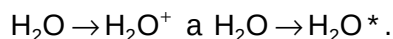


Amoniak umožňuje vznik hydrazínu podľa reakcie

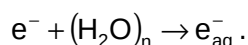


8.5.2 RADIAČNÁ CHÉMIA VODY A VODNÝCH ROZTOKOV

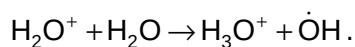
Voda je najčastejším rozpúšťadlom a účinok vysokoenergetického žiarenia na vodu má osobitý význam. Pod pojmom **radiolýza** rozumieme súbor chemických zmien, ktoré nastávajú v látke v dôsledku absorpcie ionizujúceho žiarenia. Pri **radiolýze vody a vodných roztokov** prebiehajú primárne procesy spôsobené ionizujúcim žiarením a môžeme ich zapísať ako



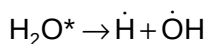
Vzbudené molekuly vznikajú v dôsledku priameho vzbudenia žiarením, ale i po neutralizácii radikálových iónov H_2O^+ . Časť sekundárnych elektrónov môže vytvárať hydratovaný elektrón $(\text{H}_2\text{O})_n^-$, resp. e_{aq}^- , teda



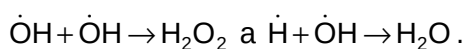
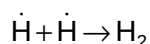
Potom bimolekulovou reakciou radiakálneho iónu H_2O^+ so susednými molekulami vody vznikajú radikály $\dot{\text{O}}\text{H}$ podľa reakcie



Disociáciou vzbudených molekúl vody vznikajú radikály $\dot{\text{H}}$ a $\dot{\text{O}}\text{H}$

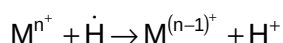
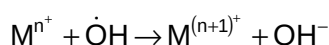


Ak nie sú prítomné iné látky, radikály sa vzájomne rekombinujú za vzniku stabilných produktov, H_2 a H_2O_2

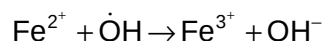


Rádiolýza je ovplyvňovaná druhom žiarenia, hodnotou pH a hodnotou lineárneho prenosu energie.

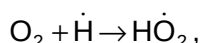
V prípade, že voda obsahuje rozpustené látky, tieto reagujú s radikálmi $\dot{H}$ a $\dot{O}H$ a zabraňujú regenerácii vody. Vznikajú nové zlúčeniny, kde sa radikál $\dot{O}H$ správa ako oxidant a $\dot{H}$ ako reducent. Prebiehajú reakcie



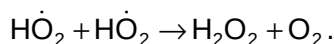
Tieto reakcie sú známe v dozimetrii, kde prebieha radiačná oxidácia roztokov Fe^{2+}



Kyslík je v tomto prípade dôležitý akceptor voľných radikálov, pričom sa redukuje na radikál HO_2 podľa reakcie

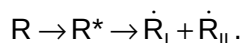


potom radikály reagujú navzájom

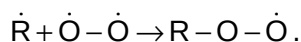


8.5.3 RADIAČNÁ CHÉMIA ORGANICKÝCH ZLÚČENÍN

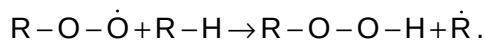
Ožarovaním organických látok vznikajú plynné produkty, viacmolekulové produkty a dvojité väzby. Najdôležitejšiu úlohu majú voľné radikály, ktoré vznikajú rozpadom excitovaných molekúl



Pri disociácii vzбудených molekúl organických látok vzniká zmes rôznych radikálov v závislosti od toho, ako sa pretrhne chemická väzba. Radikály sa prevažne nerekombinujú navzájom, ale reagujú s molekulami pôvodnej látky. Vplyv na radiačno-chemické reakcie organických látok má vzdušný kyslík, keď pri reakcii vzniká peroxidový radikál, ktorý je pomerne stály



Môže však odštepovať od iných molekúl vodíkový atóm, za vzniku nových radikálov



Vznik organických peroxidov pri ožiarení na vzduchu je preto typickou radiačno-chemickou reakciou. Ožiarené môžu byť nasýtené a nenasýtené uhľovodíky, aromatické zlúčeniny. Radiačným pôsobením na polyméry dochádza k sieťovaniu a odbúravaní makromolekúl, čo sa označuje ako proces radiačnej kopolymerizácie.

8.5.4 RADIAČNÉ EFEKTY V ANORGANICKÝCH LÁTKACH

Radiačné pôsobenie v tuhých anorganických látkach sa prejavuje narušením kryštalickej štruktúry, pričom vzniká štrukturálny defekt. K defektom patria vakancie, intersticiálne poruchy, znečisťujúce atómy, ionizačné efekty a pod.

Mriežkové vakancie vznikajú v dôsledku zrážky vysokoenergetickej častice s atómom mriežky. Intersticiálny defekt vzniká vtedy, ak po zrážke sa atóm zachytí v inej, nerovnovážnej polohe, ako bol pred zrážkou. Znečisťujúce atómy vznikajú neutrónovým ožiarením, keď zachytnou reakciou vzniká nový nuklid.

Radiačné poruchy sa prejavujú zmenou **fyzikálnych konštánt** kryštalickej mriežky, napríklad v skle sa radiačné efekty prejavujú jeho zafarbením (zhnednutie), čo sa využíva v dozimetrii.

8. 6 BIOLOGICKÉ EFEKTY ŽIARENIA

Žiarenie s vysokou energiou pôsobí na biologické sústavy. Sledujú sa jednak negatívne účinky žiarenia a jednak sa výskumy zameriavajú na využitie žiarenia pre potreby výživy. Radiačnými procesmi je možné ovplyvňovať mutácie rastlín, inaktivovať insekt, enzýmy a vírusy, ďalej môžeme zabrániť klíčivosti a využívať ich na pasterizáciu, sterilizáciu potravín a na sterilizáciu liečiv.

Radiačná technika vo výžive sa uplatňuje pri pasterizácii, teda pri krátkodobom uskladňovaní potravín a pri dlhodobom konzervovaní, sterilizácii potravín. Potraviny, v ktorých sa rýchlo rozmnožujú škodlivé mikroorganizmy sa ožarujú pasterizačnou dávkou, pri ktorej sú zlikvidované. Využíva sa veľkosť dávky v intervale 50 J.kg^{-1} až 50 kJ.kg^{-1} , podľa toho aký efekt sa má dosiahnuť. Na dosiahnutie rovnakého efektu je potrebná tým vyššia absorbovaná dávka, čím nižší je vývojový stupeň organizmov, ktoré chceme ožarovať. Radiačné konzervačné postupy sú výhodné preto, lebo sa konzervuje za studena, prípadne konzervácii podlieha už zabalený produkt. Potraviny vo vákuových obaloch majú takmer neobmedzenú skladovateľnosť, ide o rôzne druhy mäsa a mäsových výrobkov, mlieka, mliečnych výrobkov, zeleniny, ovocia, alkoholických a nealkoholických nápojov.

Biopozitívne radiačné efekty sa využívajú pri zušľachtňovaní rastlín. Ožiareníím semien niektorých plodín, napr. pšenice, cukrovej repy, tekvice, uhoriek, sa zamedzuje ich

nadmernej klíčivosti. Pri ožiarení dávkou $1-10 \text{ J.kg}^{-1}$ sa dosahuje až 7 až 30 % prírastok na výnose. Predlžovanie skladovateľnosti poľnohospodárskych plodín (zemiakov a cibule) vyžaduje radiačnú dávku 10 až 100 J.kg^{-1} , čím sa brzdí proces klíčenia.

Radiačná technika v zdravotníctve, teda radiačná sterilizácia, je účelná najmä pri citlivých liečivách, ako sú antibiotiká, vitamíny, enzýmy, hormóny, krvná plazma. Radiačný proces však nesmie znižovať účinnosť liečiva, ani spôsobovať v ňom premeny s toxickými následkami. Radiácia sa uplatňuje pri sterilizácii obväzového a chirurgického materiálu a nástrojov (tampóny, chirurgické nite, rukavice, injekčné striekačky) dávkou $20-30 \text{ kJ.kg}^{-1}$.

8. 7 VÝROBNÉ APLIKÁCIE RADIAČNEJ TECHNIKY

Radiačná technika sa v praxi využíva v preparatívnom a technickom zameraní a vo výrobných technológiách. V technologickom meradle sa využívajú radiačno-chemické syntézy, radiačná chémia makromolekulových sústav a biologické efekty radiácie.

Technické aplikácie **radiačno-chemických syntéz** sa týkajú radiačnej halogenizácie, sulfochlorácie, oxidácie, telomerizácie a iných procesov. Významnou technickou syntézou je výroba etylbromidu, keď bromovodík HBr a etylén sa privádzajú do reakčnej nádoby a sú ožarované zdrojom radiačného žiarenia. Proces je kontinuálny a produkt sa odvádza z reakčného prostredia nepretržite. Podobne prebieha aj sulfochlorácia, kde reaguje SO_2 a Cl_2 .

Technické aplikácie **využitia radiačnej chémie v oblasti makromolekulových látok** sa týkajú radiačnej polymerizácie a kopolymerizácie. Využívajú sa pri zosieťovaní polymérov a pri vulkanizácii. Ďalej je známe radiačné vytvrdzovanie plastických povlakov z nenasýtených polyesterov. Medzi novšie aplikácie patrí radiačná kombinácia polymérov s inou zložkou. Takto vznikajú drevopolyméry (drevo sa impregnuje monomérom, ktorý sa ožiarení polymerizuje), drevoplasty, betonopolyméry, ktoré majú lepšie mechanické, chemické a fyzikálne vlastnosti. Pri sietíovaní polyméru sa ožiarení stáva mliečne zakalený polyetylén nepriehľadným, vzniká polyetylénová fólia, ktorá si po napnutí zachováva tvar a napnuté rozmery. Využíva sa v baliacej technike a pri výrobe izolačných materiálov. Vulkanizácia kaučuku je reakcia, kde namiesto väzby -S-S- vzniká väzba -C-C-. Táto je pevnejšia a aj produkt (kaučuk) je pevnejší a chemicky a tepelne odolný.

Využitie **biologických efektov žiarenia v zdravotníctve a vo výžive** bolo viac popísané v predchádzajúcej kapitole. V zdravotníctve ide o kontinuálne sterilizačné ožarovanie a v poľnohospodárstve je významné pri pestovaní nových odolnejších odrôd s rozličnými genetickými vlastnosťami.

9 APLIKOVNÁ RÁDIOCHÉMIA

Vysoká citlivosť a jednoduchosť merania jadrového žiarenia poskytuje možnosti na jej využitie vo všeobecnej, fyzikálnej, analytickej chémii a pri kontrole chemickej výroby. Hovoríme tu o **aplikovanej rádiochemii**.

9.1 POUŽITIE RÁDIONUKLIDOV NA INDIKÁCIU

Indikátorová metóda sa zakladá na označovaní objektov, ktorými sa chceme zaoberať. Na indikáciu sa najskôr používali farbivá. Indikujúce farbivo musí odrazu zmeniť farbu v určitom dobre definovateľnom štádiu chemickej reakcie. Prítomnosť farbiva však nesmie ovplyvniť a narušiť fyzikálne a chemické vlastnosti sústavy. Na takomto podobnom princípe pracujú aj izotopové stopovače. Používajú sa stabilné aj nestabilné nuklidy. Množstvá izotopových stopovačov môžu byť podstatne nižšie než v prípade farbív, pretože detekčné metódy sú tu veľmi citlivé. Stopové množstvá rádioaktívnych indikátorov neovplyvňujú termodynamické a kinetické vlastnosti označenej zložky v skúmanej sústave.

Metódy rádioaktívnej indikácie a technické postupy na označenie pomocou rádionuklidov sa rozdeľujú podľa veľkosti označenej zložky. **Makroindikácia** je označenie makroskopickej zložky systému. Indikátor sa spravidla nerozptýli v sústave homogénne. **Mikroindikácia** je označenie mikroskopických zložiek, atómov a molekúl. Nazýva sa tiež atómová a molekulová indikácia. Vyžaduje si homogénnu distribúciu rádioaktívnych izotopov v označenej sústave. Mikroindikácia sa môže ďalej deliť na **jadrovo-izomérovú indikáciu**, kde rádioaktívne indikátorové atómy a označované atómy sú rovnakej hmotnosti, líšia sa iba svojim energetickým obsahom, **izotopovú indikáciu**, kde rádioaktívny indikátor je izotopom sledovaného prvku a izotopové vlastnosti značujúcej a označenej zložky sú veľmi podobné. Pri **izochemickej indikácii** indikátor a sledovaný prvok majú podobné chemické vlastnosti, pri **fyzikálnej indikácii** medzi indikátorom a označenou zložkou sú fyzikálne podobnosti a pri označení sústavy neprebiehajú nijaké chemické procesy a reakcie.

Výber izotopového indikátora závisí od fyzikálnych a chemických podmienok a taktiež od *polčasu rozpadu*. Nepoužívajú sa indikátory, ktoré majú polčas rozpadu príliš krátky alebo veľmi dlhý. Najviac sú využívané tie, ktorých polčas je niekoľko dní alebo mesiacov. Ďalej závisí od *druhu a energie žiarenia*. Rádionuklidy emitujúce alfa žiarenie sa zvyčajne nepoužívajú pre jeho krátky dosah, gama žiarenie je tiež nevýhodné, pretože veľká prenikavosť žiarenia spôsobuje problémy v bezpečnosti práce. Najviac sa využívajú rádionuklidy emitujúce beta žiarenie, účinnosť je v tomto prípade vysoká. Pri výbere izotopového indikátora je potrebné brať do úvahy *možnosti prípravy rádionuklidu*. Ich príprava by mala byť jednoduchá, preto sa najčastejšie pripravujú v jadrových reaktoroch.

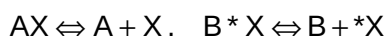
Indikátor musí byť *chemicky aj rádioaktívne čistý*, nečistoty spôsobujú chyby výsledkov. Závisí aj od *chemickej formy indikátora*, t.j. či ide o kov, oxid, hydroxid a taktiež závisí od toho, či ide o vodný roztok, roztavené kovy alebo tuhé látky.

9. 2 POUŽITIE RÁDIONUKLIDOV VO VŠEOBECNEJ A FYZIKÁLNEJ CHÉMII

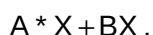
Rádionuklidy sú výskumným prostriedkom pri riešení problémov vo všeobecnej a fyzikálnej chémii. Používajú sa napríklad pri výmenných reakciách medzi chemicky identickými atómami, kde sa procesy sledujú použitím izotopov. Tieto medzimolekulové výmeny atómov alebo iónov sa nazývajú **izotopové výmenné reakcie**. Reaguje tu označená zlúčenina s neoznačenou a meria sa aktivita jednotlivých zlúčenín pred a po reakcii. Podľa toho je možné zhodnotiť, do akej miery reakcia prebehla. Ak X a X* sú izotopy, potom platí



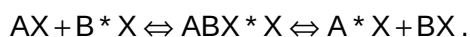
Izotopové výmenné reakcie môžu byť homogénne, heterogénne, jednoduché a komplexné. Izotopová výmena môže prebiehať viacerými spôsobmi a to ako **iónová výmena**



pričom produkty reakcie sú



Výmena tvorbou prechodných zlúčenín je popísaná schémou



Elektrónová výmena sa dá schematicky zapísať ako



Vo **fyzikálnej chémii a všeobecnej chémii** sa rádionuklidy využívajú na sledovanie difúzie a samodifúzie, na skúmanie mechanizmu chemických reakcií, na výskum kinetiky chemických reakcií, ďalej na výskum štruktúry molekúl a na stanovenie fyzikálno-chemických veličín.

Reakcie, ktoré majú heterogénny charakter sú často spojené s procesom **difúzie** a **samodifúzie**. Difúzny prenos látok na fázových rozhraniach sa sleduje rádionuklidovou indikáciou. Sledovanie látkového prenosu na základe merania zmeny koncentrácie na fázovom rozhraní je zložité, preto sa metóda zjednodušuje na meranie zmeny aktivity látok na fázovom rozhraní. Ak nastáva prenikanie dvoch rôznych látok navzájom, ide o samodifúziu. Sledovanie tohto deja sa zjednoduší na zisťovanie rýchlosti prenikania rádioaktívnych atómov medzi neaktívne atómy tej istej látky. Zmena aktivity sa meria v závislosti od hrúbky difúznej vrstvy a od doby difúzie.

Pri **skúmaní mechanizmu chemických reakcií** sa sleduje proces, ktorým sa východiskové látky menia na produkty, ako táto reakcia prebieha, v koľkých stupňoch a podobne. Sledujú sa reakcie, ktorých mechanizmus môže závisieť od termodynamických a kinetických parametrov. Určité druhy atómov sa označia rádionuklidom a na základe emitovaného žiarenia sa sleduje ich cesta v reakčnej sústave. Takto sa sledujú reakcie organických zlúčenín, polymerizačné reakcie, katalytické reakcie, biochemické procesy, reakcie anorganických zlúčenín, reakcie komplexných zlúčenín v roztokoch a podobne.

Výskum kinetiky chemických reakcií sa zaoberá meraním reakčnej rýchlosti a vplyvov, ktoré môžu zmeniť smer a rýchlosť chemickej reakcie. Stanovujú sa rýchlostné konštanty reakcií, poriadok reakcie, počet a charakter prechodných molekúl, vplyv rozpúšťadla, je možné stanoviť aktivačnú energiu a iné charakteristiky reakcií. Ak sa jedna z reakčných zložiek rádioaktívne označí, v určitých časových intervaloch sa izolujú reakčné produkty a potom sa meria aktivita týchto produktov.

Výskum molekulovej štruktúry sa opiera o metódy röntgenografickej a elektronografickej analýzy. Rádioindikátorovou metódou sa zisťuje to, či väzby atómov určitého prvku v molekule sú rovnocenné alebo nie. Využívajú sa na to dve metódy. Prvá metóda je založená na stanovení rýchlosti izotopovej výmeny. Nerovnocenné atómy sú v molekule odlišne viazané, preto sa vymieňajú rôznou rýchlosťou. Z merania rýchlosti výmenných reakcií je možné určiť o aké väzby v molekule ide. Druhá metóda je založená na syntéze a rozklade skúmanej zlúčeniny. Skúmaná zlúčenina sa pripraví z dvoch zložiek, ktoré majú atómy rovnakého prvku. V jednej zložke sú atómy prvku rádioaktívne označené. Ak je mólová aktivita rozkladných produktov rovnaká, ide o nerovnocenné väzby v danej molekule. K štúdiu štruktúry molekúl sa zaraďuje aj **emanačná metóda**. Emanačnou metódou sa skúma uvoľňovanie rádioaktívnych aerogénov, t.j. vzácnych plynov Rn, Tn, An, *Ar, *Kr, *Xe, ktoré boli predtým včlenené do tuhej látky alebo tam vznikli z materských rádionuklidov. Uvoľňovanie aerogénov z tuhej látky je charakterizované emanačnou schopnosťou. Emanačná schopnosť je pomer počtu atómov plynu uvoľneného na povrch, k celkovému počtu atómov plynu vytvorených v tuhej látke za jednotku času. Emanačná metóda má široké využitie. Zaujímavá je pre **výskum štruktúry a premien tuhých látok**. Tuhá látka je sústava zŕn, medzi ktorými sú póry. Molekuly plynu sa cez tieto póry dostávajú von z tuhej látky. Podľa toho, koľko atómov plynu z látky uniká, môže ísť o dobre vyvinutý kryštál, ktorý nemá póry alebo o amorfnú látku, ktorá má veľa pórov a teda aj veľkú emanačnú schopnosť. Pri **výskume kryštalickej štruktúry kovov a ich zliatin** sa meria teplotný priebeh emanačnej schopnosti, ktorý závisí od mechanického spracovania kovov (valcovanie, spekanie, rekryštalizácia a podobne). Emanačná metóda sa využíva aj pri **výrobe skla**, kde sa zisťuje napríklad jeho odolnosť voči vlhkosti, chemickým činidlám a teplote.

Pri stanovení **fyzikálno-chemických veličín** je možné využívať rádionuklidy na určovanie rozpustnosti, rozdeľovacieho koeficientu, veľkosti povrchu kryštalických zrazenín, tlaku nasýtených pár a prevodových čísel iónov. Napríklad, pri určovaní rozpustnosti rádioindikátorovou metódou sa pripraví nasýtený roztok skúmanej látky označenej rádioizotopom jedného z prvkov. Z nasýteného roztoku sa odoberie vzorka s objemom V , odmeria sa jeho aktivita A . Potom sa odmeria aktivita štandardu A_{st} , ktorý obsahuje známe množstvo rádioizotopom označeného prvku m_{st} . Rozpustnosť v $[kg \cdot m^{-3}]$ sa potom dá vypočítať podľa vzťahu

$$S = \frac{A \cdot m_{st} \cdot M_r}{A_{st} \cdot V \cdot A_r} \quad (66)$$

9. 3 POUŽITIE RÁDIONUKLIDOV A JADROVÉHO ŽIARENIA V CHEMICKEJ ANALÝZE

Nukleárna analytická chémia využíva pri kvalitatívnej a kvantitatívnej analýze jadrové charakteristiky príslušných nuklidov. Spoločným znakom všetkých nukleárných analytických metód je stanovenie látok detekciou a meraním jadrového žiarenia. Ide tu buď o **interné žiarenie**, ktoré vysiela látky alebo ich rádioaktívny izotop, prítomný, pridaný alebo vzniknutý aktiváciou alebo ide o **zmeny externého žiarenia** po jeho dopade, odraze, absorpcii alebo rozptyle na skúmanú látku. Pri kvantitatívnej analýze je dôležitá priama úmernosť medzi látkovým množstvom rádioaktívnej látky a intenzitou meraného žiarenia. Pri kvalitatívnej analýze neznámy žiarič identifikujeme určením polčasu rozpadu a na základe druhu a energie žiarenia. Rádioaktivita má vhodné vlastnosti na stanovovanie látok, má vysokú citlivosť, veľkú selektivitu a výhodou je aj jednoduchosť merania.

Analytické postupy sa delia na **izotopové metódy**, k tejto metóde zaraďujeme indikátorovú analýzu a na **interakčné metódy**, ku ktorým patrí interakčná neaktivačná analýza a aktivačná analýza. **Neaktivačné metódy** sa zakladajú na tom, že analyzovaná vzorka neobsahuje rádionuklid. Využívajú sa tu interakčné deje jadrového a röntgenového žiarenia s látkou, ktoré spôsobujú jeho absorpciu a rozptyl. Patrí tu aj Mössbauerova a fotoelektrónová spektrometria. Pri **aktivačnej analýze** sa vzorka aktivuje ožiaraním časticami alebo gama fotónmi a **indikátorová metóda** využíva rádionuklidy ako indikátory.

9.3.1 NEAKTIVAČNÁ INTERAKČNÁ ANALÝZA

Neaktivačná interakčná analýza je založená na interakcii jadrového žiarenia s látkou. Členenie metód neaktivačnej interakčnej analýzy je zobrazené v schéme na obrázku 38.

Analýza založená na rozptyle častíc alfa. Ak alfa častica prechádza prostredím, nastáva interakcia vo forme Rutherfordovho rozptylu, ionizácie a excitácie. Analytické využitie Rutherfordovho rozptylu je založené na tom, že kinetická energia dopadajúcej častice po pružnej zrážke je rozdielna od pôvodnej kinetickej energie. V spektre rozptýleného alfa žiarenia zodpovedá každému prvku charakteristický vrchol. Z polohy vrcholov možno určiť látky prítomné vo vzorke a z ich výšky, obsah príslušných prvkov. Metóda sa použila v roku 1966 na chemickú analýzu povrchu Mesiaca, ako zdroj alfa žiarenia sa použilo ^{242}Cm a detekcia sa robila pomocou polovodičových detektorov.

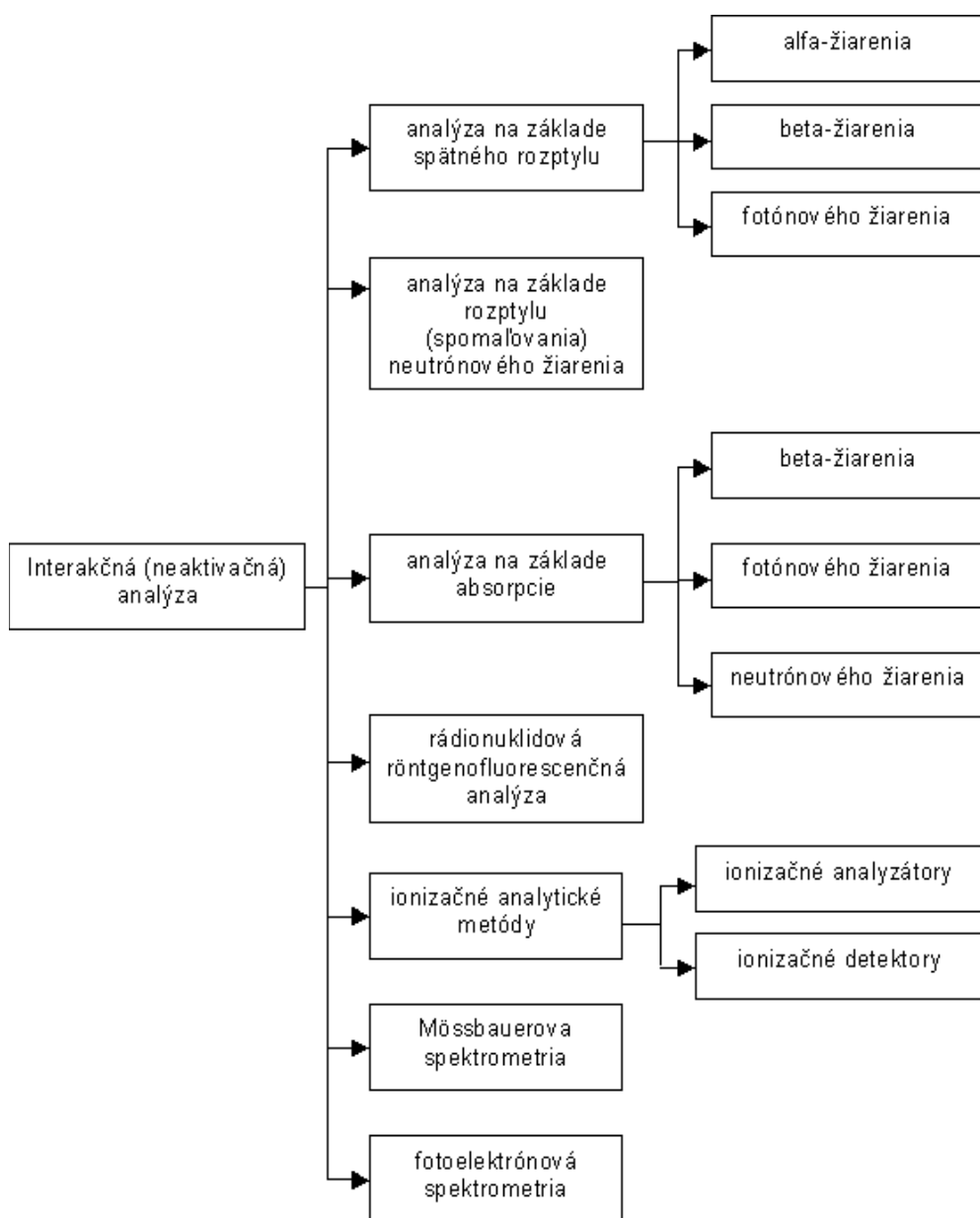
Beta rozptylová analýza. Pri prechode látkou strácajú beta častice svoju energiu a rozptyľujú sa. Beta rozptylovú metódu možno použiť na analýzu dvojzložkových systémov, zliatin, rúd, roztokov a suspenzií. Ako zdroj beta žiarenia sa používa ^{204}Tl a kombinovaný žiarič ^{90}Sr - ^{90}Y .

Analýza na základe spätného rozptylu fotónového žiarenia. Spätné fotónové žiarenie sa skladá z elektromagnetického žiarenia a z elektrónov. Intenzitu rozptýleného žiarenia gama určuje energia dopadajúceho žiarenia, protónové číslo stanovovanej zložky, hrúbka vzorky a geometria detekcie. Pri spätnom rozptyle sa uplatňuje Comptonov jav. Rast protónového čísla stanovovanej zložky v analyzovanej vzorke zvyšuje intenzitu odrazeného gama žiarenia. Používa sa na stanovenie popolnatosti uhlia, t.j. na rozlíšenie popolotovných látok od hlušiny na základe rôzneho protónového čísla.

Analýza na základe rozptylu a spomaľovania neutrónov. Atómové jadro vodíka (protón) pri pružnej zrážke s neutrónom môže prevziať časť jeho energie. Pri interakcii dochádza k spomaľovaniu neutrónov, pričom počet spomaľovaných neutrónov je úmerný obsahu vodíka vo veľkom rozsahu koncentrácie. Metóda je vhodná na stanovenie látok s vysokým obsahom vodíka, t.j. na stanovenie vody a uhľovodíkov. Meranie vlhkosti na základe intenzity pomalých neutrónov je presnejšie ako pri práci s rýchlymi neutrónmi.

Beta absorpčná analýza. Pri prechode beta žiarenia látkou klesá jeho intenzita. Miera absorpcie závisí od elektrónovej hustoty látky, čo sa vyjadruje pomerom protónového čísla Z a nukleónového čísla A . Hodnota tohto pomeru je pre väčšinu prvkov rovná 0,5, okrem vodíka, ktorý znižuje intenzitu beta žiarenia dvojnásobne. Metóda sa využíva pri analýze uhľovodíkov.

Analýza založená na absorpcii fotónového žiarenia sa robí v oblastiach nízkych energií (<100keV), pričom miera absorpcie nízkoenergetického žiarenia jednotlivými prvkami v analyzovanej vzorke je základom ich stanovenia. Berie sa do úvahy hmotnostný súčiniteľ oslabenia žiarenia, ktorý je určený energiou žiarenia a protónovým číslom absorbujúceho prostredia. Používa sa na stanovenie H_2 , H_2O , S, Co, Pb, halogénov, Au, Cu v zliatinách atď.



Obr. 38 Rozdelenie metód neaktivačnej interakčnej analýzy.

Neutrónová absorpčná analýza. Intenzita neutrónového žiarenia, ktoré prechádza látkou, klesá vplyvom absorpcie a rozptylu tým viac, čím väčší je celkový účinný prierez nuklidov tvoriacich danú vzorku. Niektoré prvky majú veľký absorpčný účinný prierez a tieto veľmi ovplyvňujú absorpciu neutrónov. Podľa stupňa absorpcie neutrónového žiarenia možno určiť množstvo príslušného prvku.

Rádionuklidová röntgeno fluorescenčná analýza. Podľa energie emitovaného röntgenového žiarenia je možné určiť prvok, z atómu ktorého pochádza príslušné energetické kvantum. Charakteristické röntgenové spektrum skúmanej vzorky obsahuje jednotlivé čiary röntgenového spektra prvkov prítomných vo vzorke. Intenzita čiar je daná koncentráciou príslušných prvkov. Metóda sa používa na stanovenie Co, Cr, Cu, Fe, Mn, Ni,

Pb a Zn so zdrojom ^{238}Pu , potom na stanovenia Mo, Nb, Zr so zdrojom ^{109}Cd a na stanovenie obsahu popola a síry v uhlí, železa a niklu v rudách a medi, zinku a niklu vo vodných kaloch.

Analýza založená na využití ionizujúcich efektov rádioaktívneho žiarenia. Na analýzu zmesi plynov možno využiť ich ionizáciu rádioaktívnym žiarením. Analyzovaný plyn sa nachádza medzi dvoma elektródami ionizačnej komory a žiarením sa ionizuje. Intenzita ionizačného prúdu je lineárnou funkciou koncentrácie jednej zo zložiek zmesi. Využíva sa to v plynovej chromatografii a prístroje sa nazývajú ionizačné detektory. Zariadenia, ktoré analyzujú zmes plynov na základe rôznych ionizačných vlastností sú ionizačné analyzátory. Na tieto účely sa používajú alfa ionizačné analyzátory a beta ionizačné analyzátory.

Mössbauerova spektrometria je jadrová fluorescenčná spektrometria, ktorá sa zakladá na využití Mössbauerovho efektu. Je to rezonančný rozptyl gama žiarenia bez odrazu atómového jadra. Využitie Mössbauerovho efektu sa zakladá na ovplyvňovaní jadrových dejov charakterom kryštalickej látky, ktorej súčasťou je atómové jadro. Pomocou Mössbauerových spektier možno získať informácie o chemických vlastnostiach skúmaných látok, o charaktere chemických väzieb, o oxidačných stavoch, o štruktúrálnej stavbe molekuly, o symetrii a podobne. Podľa rozptylového gama rezonančného spektra sa dá určiť obsah kovov v rudách (Fe, Ti, Sn), dá sa určiť, či ide o železnú alebo titánovú rudu, je možné analyzovať cínovec (kasiterit).

Fotoelektrónová spektrometria sa zakladá na analýze elektrónov emitovaných pri ožarovaní skúmanej látky gama žiarením alebo UV žiarením. Počet fotoelektrónov je úmerný energii a zo spektier sa získajú informácie o energetických hladinách molekúl, o štruktúre a chemickej povahe vzoriek. Metóda sa používa na stanovenie ťažkých prvkov v organických zlúčeninách, napr. Co vo vitamíne B₁₂.

9.3.2 AKTIVAČNÁ ANALÝZA

Metódou aktivačnej analýzy možno stanoviť množstvo skúmaných prvkov na základe vytvárania ich umelých rádioaktívnych izotopov vo vzorke a to bombardovaním neutrónmi alebo nabitými časticami vysokej energie, prípadne gama žiarením. Vzniknuté rádionuklidy sa líšia polčasom rozpadu, druhom a energiou žiarenia, na základe ktorých možno jednotlivé prvky identifikovať. Analyzovať takto možno tuhé i kvapalné vzorky.

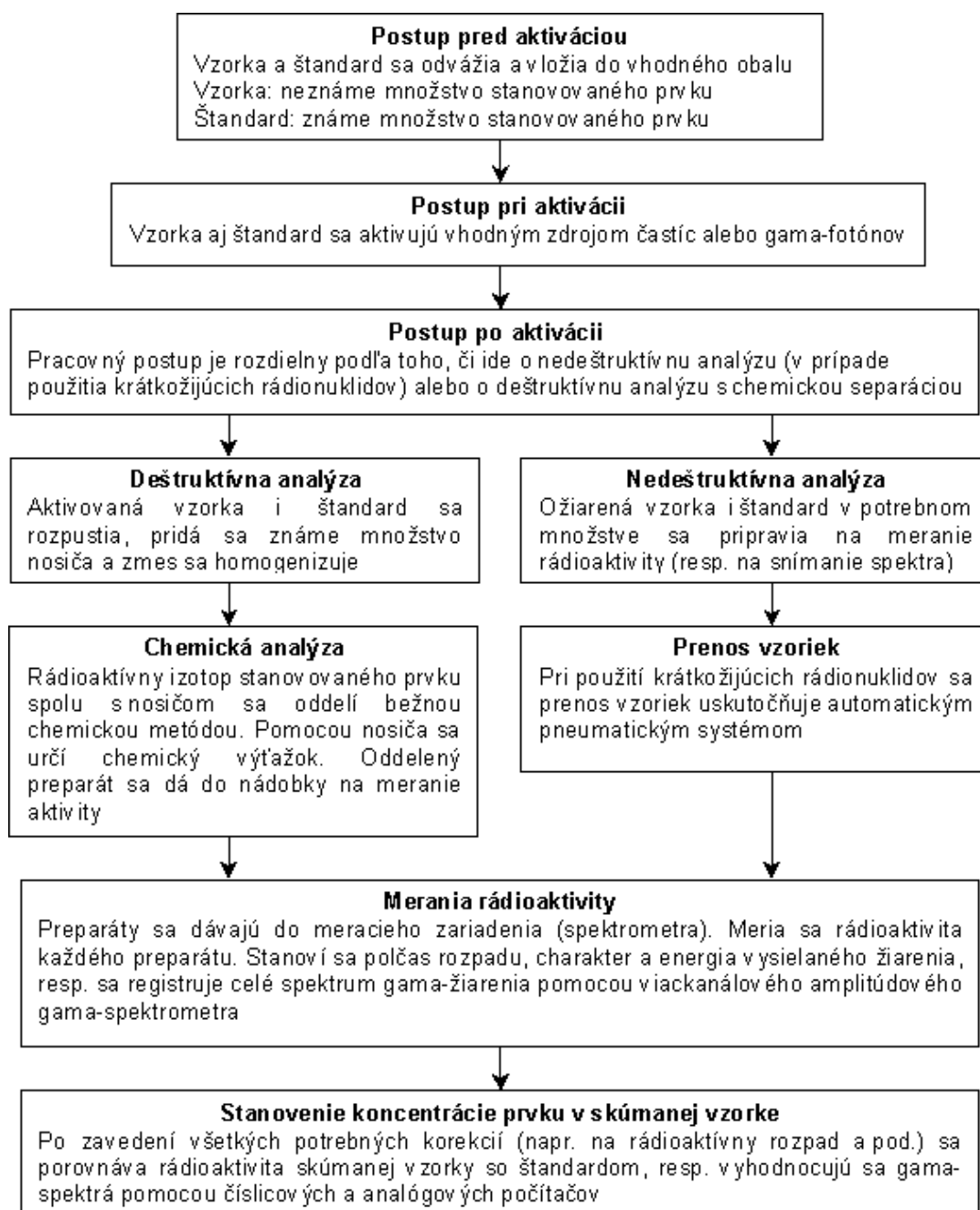
Skúmaná vzorka sa vloží do vhodného obalu a aktivuje sa. Najčastejšie sa aktivuje tepelnými alebo rýchlymi neutrónmi, preto sa metóda označuje ako neutrónová aktivačná analýza. Aktivačná analýza sa uskutočňuje absolútnou alebo relatívnou metódou. Ďalší postup je znázornený v schéme na obrázku 39.

Pri **absolútnej** metóde sa z indukovanej aktivity počíta množstvo stanovovaného prvku. Častejšie sa používa metóda **relatívna**, t.j. porovnávacia. Porovnáva sa aktivita skúmanej vzorky s aktivitou štandardného preparátu.

Platí tu vzťah

$$m_{vz} = m_{st} \cdot \frac{A_{vz}}{A_{st}} \quad (67)$$

kde m_{vz} je množstvo stanovovanej zložky vo vzorke, m_{st} je množstvo stanovovanej zložky v štandarde, A_{vz} je aktivita stanovovanej zložky vo vzorke a A_{st} aktivita stanovovanej zložky v štandarde. Vlastná analýza sa môže vykonať deštruktívnym spôsobom.



Obr. 39 Postup aktivačnej analýzy.

Použitie aktivačnej analýzy je výhodné z hľadiska rýchlosti uskutočnenej analýzy. Pre analytickú chémiu je dôležitá citlivosť metódy, čo sa využíva v mikroanalýze a stopovej analýze. Aktivačnú analýzu možno použiť na stanovenie rôznych kovov v rudách, prímiesi v uhlí alebo nežiadúcich prvkov v rope, na stanovenie nečistôt v organických látkach, na štúdium biochemických procesov a podobne. Taktiež sa uplatnila pri analýze polovodičových materiálov, v metalurgii, v hutníctve, v geochemii, kozmochémii, ďalej v biochemii a medicíne. V potravinárstve a poľnohospodárstve sa táto metóda používa na stanovenie biologicky dôležitých látok, ktoré sa vyskytujú v stopových koncentráciách. Aktivačná analýza umožňuje sledovať archeologické nálezy, mince, sklo, mramor, keramické materiály. Zaujímavé je jej využitie v kriminalistike. Stanovením stopových množstiev prvkov je možné určiť výrobcu farieb, pôvod a typ skla, papiera, vlasov. Využíva sa nedeštruktívny spôsob analýzy, aby sa dôkazový materiál uchoval a predkladal pri súdnych pojednávaniach.

9.3.3 INDIKÁTOROVÉ METÓDY

Indikátorové metódy rozdeľujeme podľa schémy na obrázku 40.

Analýza na základe merania prírodnej rádioaktivity. Analyzované vzorky obsahujú prírodné rádioaktívne nuklidy. Meria sa prírodná rádioaktivita a využíva sa na stanovenie obsahu draslíka, ktorý je zmesou izotopov, z ktorých ^{40}K je rádioaktívny. Využíva sa na analýzu farmaceutických prípravkov, pri analýze priemyselných draselných hnojív a podobne.

Izotopová zried'ovacia analýza sa zakladá na tom, že merná aktivita známeho rádioaktívneho izotopu sa znižuje pridaním inaktívnych izotopov toho istého prvku. Uvažovaný prvok sa izoluje v čistej forme a z mernej aktivity čistej zložky možno určiť množstvo stanovovanej látky v pôvodnej zmesi.

Metóda jednoduchého izotopového zriedenia sa využíva na kvantitatívnu analýzu veľmi podobných látok, ktoré sa od seba ťažko oddeľujú. Metóda obráteného izotopového zriedenia sa používa na stanovenie rádioaktívnych látok v zmesiach viacerých aktívnych látok a na zistenie čistoty rádioaktívnych preparátov. Metóda izotopového zriedenia za vzniku rádioaktívnych derivátov je založená na tom, že do skúmanej látky sa pridáva rádioaktívne činidlo, s ktorým všetky stanovované zložky tvoria rádioaktívne deriváty. Používa sa to na analýzu a stanovenie množstva aminokyselín v zmesiach, pri stanovení zmesi prvkov vzácnych zemín atď.

Rádiometrické titrácie. Titračné stanovenia sú založené na zrážacích reakciách. Reakčný produkt sa potom odstraňuje extrakciou alebo inými metódami. Sledovanou veličinou je rádioaktivita jednej zložky, resp. fázy, ktorú sledujeme v závislosti od množstva

pridávaného odmerného roztoku. Okrem zrážacích titrácií poznáme ešte extrakčné a komplexometrické titrácie.

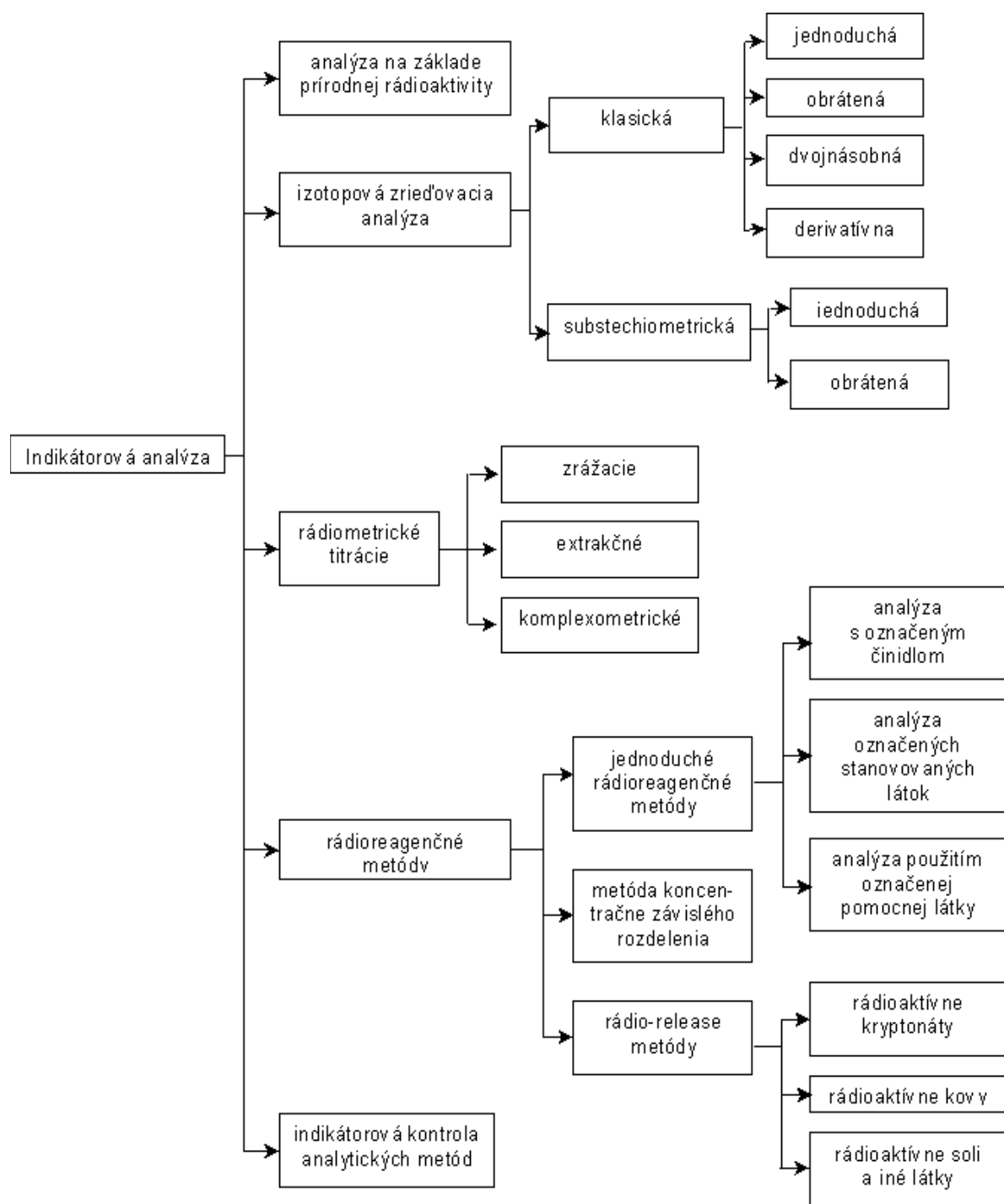
Analýza rádioaktívnymi činidlami – rádioreagenčné metódy. Pri týchto metódach sa stanovovaná látka uvedie do styku s vhodným reakčným činidlom. Meranie aktivity sa používa na určenie množstva alebo podielu zreagovanej rádioaktívne označenej látky, ktoré je závislé od množstva stanovovanej látky. Metódy rozdeľujeme na jednoduché rádioreagenčné metódy, na metódy koncentračne závislého rozdelenia a na metódy založené na uvoľnení a meraní rádioaktívnych reakčných produktov (radio-release metódy).

Pri **jednoduchých rádioreagenčných metódach** sa používajú reakcie, kde stanovovaná látka alebo činidlo sa pri reakcii celkom spotrebujú a vznikajú zlúčeniny definovaného zloženia. Môžu sa vyskytnúť tri prípady analýzy, analýza s označeným činidlom, analýza označením stanovovaných látok a analýza použitím označenej pomocnej látky.

Metódou koncentračne závislého rozdelenia sa stanovujú látky, kde sa využíva rozdelenie medzi vodnou fázou a organickým rozpúšťadlom, medzi vodnou fázou a ionexom, medzi zrazeninou a roztokom a podobne.

Metódy založené na uvoľňovaní a meraní rádioaktívnych reakčných produktov sa nazývajú **radio-release metódy** a pri týchto metódach sa nerádioaktívna stanovovaná látka uvedie do styku s rádioaktívnym činidlom a v dôsledku chemickej reakcie sa časť rádioaktívneho činidla uvoľní, t.j. prejde do kvapalnej fázy alebo z kvapalnej do plynnej fázy. Podľa druhu používaných činidiel sa metódy rozdeľujú na tri skupiny. Ide o metódy, ktoré využívajú rádioaktívne kryptonáty (^{85}Kr), rádioaktívne kovy (^{204}Tl , $^{110\text{m}}\text{Ag}$) a rádioaktívne soli a iné látky. Napríklad, ak chemický alebo fyzikálny proces poruší mriežku kryptonátu, spôsobí uvoľnenie úmerného množstva plynneho rádioaktívneho kryptónu a teda sa meria aktivita uvoľneného kryptónu. Používa sa to na analýzu plynov, ozónu alebo kyslíka.

Kontrola analytických metód pomocou rádioaktívnych indikátorov. Rádioaktívne indikátory sa nakoniec používajú aj na overenie správnosti analytických postupov. Možno takto zistiť či daná separačná metóda poskytuje kvantitatívne oddeľovanie látok (napr. pri oddeľovaní bária od stroncia) a či pri oddeľovaní a koncentrovaní nevznikajú straty skúmaného prvku.



Obr. 40 Metódy indikátorovej analýzy.

10 POUŽITIE JADROVÉHO ŽIARENIA A RÁDIONUKLIDOV NA KONTORLU CHEMICKEJ VÝROBY

Použitie rádionuklidov a jadrového žiarenia v chemickej výrobe má veľký význam pre kontrolu rôznych parametrov technologických procesov a na riešenie problémov čiastkových úsekov výroby. Zdroje sa môžu používať ako otvorené alebo uzavreté žiariče. Rozdelenie a ich využitie je zhrnuté v nasledujúcich kapitolách.

10. 1 VYUŽITIE OTVORENÝCH ŽIARIČOV

V chemických technológiách sa používajú otvorené žiariče pri **laboratórnych výskumoch**, kde sa vyžadované výsledky získajú pri nižších nákladoch ako pri iných metódach, pri **technologických výskumoch** na lokalizáciu miestnych porúch a na odstraňovanie nedostatkov vo výrobe a pri kontinuálnej **kontrole chemických procesov vo výrobe**, kde sa nevyžaduje odoberanie vzoriek, ani prerušenie výrobného procesu a poskytujú sa priame výsledky, ktoré možno prístrojmi registrovať.

10.1.1 INDIKÁTOROVÉ POUŽITIE

V praxi sa často uskutočňuje **homogenizácia** zložiek zmesí, medzi ktorými často prebieha chemická reakcia. Stupeň premiešavania sa klasickými metódami robí tak, že počas miešania sa v určitých časových intervaloch odoberá vzorka a analyzuje sa. Indikátorovou metódou sa proces uľahčí a to tak, že jedna zo zložiek sa označí rádioaktívnym indikátorom a potom sa počas miešania sleduje aktivita pomocou detektorov umiestnených v miešacom zariadení alebo aj mimo neho. Ak hodnota rádioaktivity je konštantná, homogenizácia je ukončená. Využitie tejto metódy sa uplatnilo v homogenizácii uhlíkatých zmesí na výrobu elektród, na miešanie olejov, mazív, benzénu, na homogenizáciu zložiek práškov na pranie, čokolády, krmív a podobne.

Rádioindikátorovou metódou možno kontrolovať **oddel'ovacie procesy**, t.j. zrážanie, filtráciu, destiláciu, kryštalizáciu, extrakciu. Ku skúmanej zmesi látok A a B sa pridajú rádioaktívne indikátory. Účinnosť oddeľovacieho procesu sa kontinuálne sleduje meraním rádioaktivity indikátora zložky A v produkte B a indikátora zložky B v produkte A. Metóda sa využíva pri procese čistenia odpadových vôd filtráciou a pri destilácii ropy.

Transportné procesy sa využívajú pri kontrole správneho chodu a dopravy materiálov, napríklad potrubím. Meranie rýchlosti prúdenia kvapaliny alebo plynu v potrubí sa robí tak, že rádioaktívny indikátor sa vstriečne a potom sa sleduje jeho prechod v dvoch bodoch

potrubia. Meria sa čas, ktorý indikátor potrebuje na prekonanie vzdialenosti medzi týmito bodmi. Podobný princíp sa uplatní pri kontrole pohybu katalyzátora a pri kontrole dopravy zemného plynu v ropovodoch. Podobne sa zisťuje aj netesnosť potrubí. Do dopravovanej kvapaliny alebo plynu sa pridá vhodný indikátor a prenosnými detektormi sa vyhľadávajú miesta, kde kvapalina alebo plyn uniká. Takto sa kontrolujú potrubia na povrchu alebo aj v zemi, keďže gama žiarenia prechádza až na povrch.

Rádioaktívne indikátory sa používajú na určenie stredného času, počas ktorého prechádza kvapalina nádržou, v ktorej prebieha chemická reakcia, pričom výroba závisí od tohto času.

Skúmanie vetrania a prúdenia plynov, pričom je kontrolovaný smer a čas prúdenia sledovaného plynu, je taktiež možné meraním rádioaktivity plynu na kontrolovaných bodoch. Sledovaný plyn sa najskôr označí ^{85}Kr a ^{82}Br a potom podlieha meraniu.

Pomocou rádioaktívnych indikátorov možno výhodne zisťovať **koróziu a eróziu**, účinok protikorozívnych prostriedkov a podobne. Rádioaktívnymi indikátormi sa kontroluje nepriepustnosť lokálnych ochranných vrstiev. Najčastejšie sa to využíva pri kontrole oceliarskych pecí a odlievacích panví. Pece sú vystielané keramickými tehliami, tieto keramické výstelky sa rádioaktívne označia a ich aktivita sa meria zvonka detektormi. Zmenšenie intenzity žiarenia signalizuje úbytok časti výstelky v dôsledku korózie alebo erózie. Ak sa intenzita zníži na určitú hranicu, je potrebné výstelkový materiál, t.j. výmurovku pece, vymeniť.

Inou aplikáciou využitia indikátorov je určenie účinnosti prác prostriedkov. Skúšobné tkaniny sa kontaminujú baktériami, ktoré sú označené rádionuklidom. Po praní a vysušení sa zmeria ich zvyšková aktivita a takto sa porovnávajú účinky prác prostriedkov. Podobne aj pri určovaní trvanlivosti voskov na podlahoviny sa do voskov zavádza rádionuklid a premeriava sa jeho aktivita. Opatrebovanie voskov sa prejaví znížením aktivity.

10.1.2 VYUŽITIE AKTIVAČNÉHO PRINCÍPU

Aktivačný princíp možno použiť na kontinuálnu kontrolu chemického procesu tam, kde kontrolované látky poskytujú krátkožijúce rádionuklidy s polčasom rozpadu menším ako jedna minúta.

Kontinuálna **kontrola zloženia prúdiacich látok** sa využíva tam, kde sa vyžaduje nepretržité stanovovanie určitého prvku. Konkrétne je to pri stanovovaní obsahu rôznych kovov v rudách, prímiesí v uhlí, nežiadúcich prvkov v rope, pri stanovovaní síry v rope, prvkov v morskej vode, v leteckom benzíne a pri kontrole výrobkov farmaceutického priemyslu.

Aktivačný princíp je vhodný pri **kontrole procesu miešania** dvoch látok, pričom produkt miešania sa aktivuje. Využíva sa taktiež **aktivačný prietokomer**. Meraný roztok prechádza

aktivačnou komorou a potom detekčnými komorami. Z rozdielu aktivít nameraných v prvej a druhej detekčnej komore a zo známeho polčasu rozpadu sa dá určiť prietoková rýchlosť danej látky.

10. 2 VYUŽITIE UZAVRETÝCH ŽIARIČOV – RÔZNE METÓDY

V praxi sú známe štyri základné metódy, kde sa využívajú uzavreté žiariče. Sú to metódy založené na zmene polohy žiariča, metódy využívajúce absorpciu žiarenia, metódy využívajúce rozptyl žiarenia a ionizačné metódy.

10.2.1 METÓDY ZALOŽENÉ NA ZMENE POLOHY ŽIARIČA

Pri metódach založených na zmene polohy žiariča sa mení vzdialenosť medzi zdrojom žiarenia a detektorom, pričom dochádza k zmene kontrolovanej veličiny, napríklad pri meraní vzdialenosti a posunu hladiny.

Pri **meraní hladiny** sa radiačný zdroj umiestni ako plavák do nádrže, kde podľa stavu hladiny stúpa alebo klesá. Na vrchu nádrže je umiestnený detektor. Intenzita žiarenia dopadajúceho na detektor je tým vyššia, čím menšia je vzdialenosť medzi zdrojom a detektorom, t.j. čím vyššie je hladina kvapaliny. Podobným plavákovým spôsobom sa meria aj **hustota kvapalín**. Čím je kvapalina hustejšia, tým menej sa mení vzdialenosť plaváka od detektora.

Na meranie **viskozity kvapalín** sa používa Höpplerova metóda. Gulka viskozimetra sa indikuje vhodným gama žiaričom, najčastejšie sa používa ^{60}Co . Viskozimeter sa obalí oloveným tieniacim plášťom s dvomi štrbinami a meria sa čas pádu guľôčky pomocou detektorov umiestnených v štrbinách.

V otáčkomeroch sa pri **meraní otáčok** na rotujúcu časť stroja umiestni rádioaktívny preparát, ktorého žiarenie sa pri každej otáčke zaregistruje.

Rýchlosť prúdenia kvapalín alebo plynov sa meria tak, že označený plavák sa vpustí do potrubia a v daných vzdialenostiach sa nad potrubím umiestnia detektory. Tie zaznamenávajú dobu, kedy plavák týmto miestom prechádza.

10.2.2 METÓDY VYUŽÍVAJÚCE ABSORPCIU ŽIARENIA

Defektoskopia sa zaoberá kontrolou povrchových a vnútorných chýb materiálu. Uskutočňuje sa pomocou gama žiaričov. Kontrolovaný výrobok sa vloží medzi zdroj žiarenia a fotografickú platňu. V miestach porúch vznikne rozdielna absorpcia gama žiarenia a na fotografickej platni vznikne rozdielne sčernenie.

Meranie hrúbky sa využíva pri výrobe celulózy, papiera, textilu a fólií. Zdroj žiarenia sa uloží na jednu stranu materiálu, detektor na druhú stranu. Meria sa závislosť intenzity žiarenia od hrúbky materiálu, ak sa mení hrúbka, mení sa aj intenzita žiarenia.

Pri **meraní hladiny** sa zdroj žiarenia dáva pod dno nádrže a detektor na hladinu. Intenzita žiarenia sa mení podľa hrúbky absorbujúcej vrstvy.

Zaujímavou aplikáciou je **kontrola plnenia cigariet tabakom**. Množstvo žiarenia, ktoré prejde cez papier a tabak v cigarete je mierou množstva tabaku v cigarete. Taktiež pri **kontrole plnenia obalov, pri počítaní a triedení výrobkov** je na jednej strane dopravného pásu umiestnený zdroj, na druhej strane je detektor a takto sa kontroluje hladina výrobkov v obaloch a počet výrobkov.

10.2.3 METÓDY VYUŽÍVAJÚCE ROZPTYL ŽIARENIA

Spätný rozptyl beta žiarenia a gama žiarenia sa využíva na meranie hrúbky. Meria sa intenzita spätne rozptýleného žiarenia, pričom s rastúcou hrúbkou materiálu rastie intenzita rozptýleného žiarenia.

Meranie vlhkosti uhlia, koksu, železnej rudy je možné realizovať s využitím spomaľovania a rozptylu neutrónového žiarenia.. Pod dopravník sa umiestni zdroj rýchlych neutrónov tak, že neutróny prechádzajú vrstvou vlhkého dopravovaného materiálu a hustota ich toku sa mení podľa obsahu vlhkosti. Ako detektor sa používa BF_3 proporcionálny detektor. Početnosť impulzov sa vyjadruje v percentách vlhkosti.

10.2.4 IONIZAČNÉ METÓDY

Ionizačné metódy sú vhodné na **odstraňovanie statickej elektriny**. Statická elektrina vzniká vtedy, keď sa pri výrobe rýchle pohybujú látky s dobrými izolačnými vlastnosťami, ktoré sa pritom trú o iný druh nevodivého materiálu. Trením vznikajú veľmi silné elektrostatické náboje, ktoré môžu ľahko zapríčiniť požiar alebo výbuch. Náboj možno odvieť, ak obklopujúci vzduch je vodivý. Preto sa využíva priame ožarovanie nabitej látky alebo presávanie radiačne ionizovaného vzduchu v mieste vzniku náboja. Takýto vzduch sa po ionizácii fúka na elektricky nabitý materiál.

Meranie **rýchlosti prúdenia plynov**. Pri prúdení plynu sa časť iónov dostáva mimo priestoru komory, keď sa zvyšuje rýchlosť plynu, ionizačný prúd sa znižuje.

11 ZÁSADY BEZPEČNOSTI PRÁCE S RÁDIOAKTÍVNÝMI LÁTKAMI

11. 1 BIOLOGICKÉ ÚČINKY ŽIARENIA

Človek je počas života trvalo vystavený pôsobeniu ionizujúceho žiarenia z vnútorných alebo vonkajších prírodných zdrojov. K vnútorným zdrojom patrí radón, rádioaktívny uhlík a draslík, vonkajším zdrojom je radón vo vzduchu a kozmické žiarenie. Radiačné zmeny v živom organizme spôsobuje aj žiarenie z umelých zdrojov, t.j. z televízie, svietiacich displejov, pri röntgenovom vyšetrení alebo z rádioaktívnej kontaminácie životného prostredia. Radiačné pôsobenie na živý organizmus sa rozdeľuje na niekoľko fáz.

Prvá fáza, ktorú je možné sledovať v organizme je **excitácia a ionizácia molekúl**, pri ktorej sa tvorí molekulový vodík a peroxid vodíka. Takto vznikajú radikálové produkty rádiolýzy vody. Pôsobenie prvej fázy možno odstrániť zavedením senzibilizujúcich látok do organizmu, ktoré odstraňujú radikály z tela. Ďalšou fázou sú **chemické zmeny**, ktoré zapríčiňujú stratu špecifických vlastností zasiahnutej molekuly alebo bunky. Druhú fázou môžu modifikovať reparačné enzýmy. Neskôr dochádza k **modifikácii** biochemických a fyziologických procesov v latentnej fáze a poslednou fázou sú **pozorovateľné vonkajšie zmeny**, ktoré je možné len veľmi ťažko odstrániť.

Primárne reakcie sú deje, pri ktorých sa mení žiarivá energia na biologicky aktívne formy. Je to súhrn chemicko-biologických dejov, ktoré prebiehajú v ožiarenom organizme. Východiskovými látkami primárnych reakcií sú voľné radikály $\dot{H}$ a $\dot{OH}$, ktoré vzniknú po ožiarení vody a peroxidu vodíka. Pri reakciách dochádza k deštrukcii zložiek biologických látok, čo sa prejavuje v zmenách v metabolických procesoch. **Sekundárne reakcie** sú biologické prejavy následkov ožiarenia. Sú to zmeny, ktoré spôsobila radiácia v predchádzajúcich štádiách ožiarenia a prejavuje sa v zmenách v respiračnej a látkovej výmene, v zmenách biochemizmu krvi a tkanív.

Choroba z ožiarenia sa nazýva následok z ožiarenia vyšších organizmov, keď je ožiarené celé telo alebo len jeho časť. Príznaky choroby a jej priebeh môžu mať rôzny charakter a rôzny rozsah, v závislosti od dávky žiarenia a od dávkového príkonu. **Akútna** choroba z ožiarenia vyvoláva po krátkej dobe prudké zmeny v organizme, ide o ožiarenie dávkou vyše 15 mC.kg^{-1} , t.j. 50 R. Akútna choroba prebieha v štyroch fázach. Najskôr sa prejaví telesná slabosť, vracanie, bolesti hlavy, poruchy spánku a zvýšená teplota, potom sa prejaví zmeny v krvnom obraze, V ďalšej fáze sa opäť dostaví horúčka, vracanie, krvácanie a aj zmeny orgánov s nekrózami, ktoré spôsobujú smrť. Väčšina pacientov v tomto období umiera. Tí ktorí prežijú sa buď uzdravia alebo choroba prechádza do chronickej formy. Pri

podozrení na chorobu z ožiarenia sa robia krvné testy. Najskôr sa choroba prejaví v krvnom obraze vzostupom bielych krviniek, neskôr nasleduje ich prudký pokles. Metódy liečenia sú náročné, ide predovšetkým o transplantáciu kostnej drene od zdravých darcov a transfúziu separovaných trombocitov a leukocitov. Podávajú sa antibiotiká, hormóny, železo a utišujúce lieky.

Chronická choroba vzniká po ožiarení malými dávkami ale dlhodobo, zmeny sa prejavujú po dlhom čase. Priebeh choroby závisí od toho, ktoré orgány boli zasiahnuté, ako je organizmus citlivý, aký je vek organizmu a jeho zdravotný stav. Jednou z hlavných radiačných porúch v organizme je zastavenie bunkového delenia, prípadne odumieranie buniek. Rozpadové produkty z odumretých buniek potom prechádzajú do krvného systému. Chronická choroba má podobné prejavy ako akútna choroba, pacient pociťuje slabosť, únavu a bolesti hlavy. Ďalšie štádium je charakterizované vznikom nádorov, leukémie a genetickými poruchami. Vplyv absorbovanej dávky na zdravotný stav osôb je naznačený v tabuľke 12.

<i>Dávka [Gy]</i>	<i>Príznaky</i>	<i>Hospitalizácia a zdravotný stav osôb</i>
0 – 0,7	Po 6 hodinách nepatrný výskyt prechodných bolestí hlavy, nútenie na vracanie asi u 5 % ožiarených osôb.	Hospitalizácia nie je nutná, osoby sú schopné bežných činností.
0,7 – 1,5	Po 3 až 6 hodinách prechodné mierne bolesti hlavy, vracanie u 50 % ožiarených osôb.	Hospitalizácia 20 – 30 dní, predovšetkým ak je dávka vyššia ako 100 Gy. Úmrtia sa nepredpokladajú.
1,5 – 4,5	Po 3 hodinách bolesti hlavy, nútenie na vracanie, únava, slabý výskyt hnačky, vracanie u viac ako 50 % osôb.	Hospitalizácia 30 – 90 dní u 100 % osôb, úmrtnosť je 5 - 50%.
4,5 – 8	Po hodine silné vracanie, hnačka, pri hornej hranici uvedenej dávky ožiarenia horúčka.	Hospitalizácia 90 – 120 dní u 100 % osôb, 50 % úmrtnosť. Ak je dávka vyššia, úmrtnosť narastá, do 45 dní všetky úmrtia.
8 – 30	Po 0,5 hodine silné vracanie, hnačky a horúčky.	Nutná je hospitalizácia všetkých osôb, do 14 dní dochádza ku 100 % úmrtnosti.
30 – 80	Po 5 minútach silné vracanie, horúčka a vyčerpanie, v závere kŕče.	Nutná je hospitalizácia všetkých osôb, do 5 dní dochádza k 100 % úmrtnosti.
80 – 180	Okamžité príznaky, do 5 minút úplná neschopnosť pohybu.	Nutná je hospitalizácia všetkých osôb, do 15 až 46 hodín dochádza k 100 % úmrtnosti.
nad 180	Okamžitá neschopnosť pohybu.	Do 2 až 24 hodín dochádza k 100 % úmrtnosti.

Tab. 12 Vplyv absorbovanej dávky na zdravotný stav osôb.

Bunka vystavená ionizujúcemu žiareniu odumrie alebo zmutuje. Mutácia, môže byť dočasná alebo trvalá. Po ožiarení môže bunka stratiť schopnosť reprodukcie, ale zároveň môže začať produkovať hormón alebo enzým, ktorý pred ožiareníím neprodukovala, pričom je reprodukčná schopnosť bunky zachovaná, a tak ďalej produkované bunky vylučujú už

nový enzým alebo hormón, čo môže zapríčiniť chronické ochorenia a zmeny, ktoré sa zvyčajne spájajú so starším vekom. Jednou z týchto zmien je mutácia, pri ktorej sa bunka nekontrolovateľne delí. Táto neschopnosť bunky zastaviť svoj reprodukčný proces vzniká už pri proliferácii, pre leukémiu je charakteristická abnormálna proliferácia leukocytov, pre polycytémiu abnormálna proliferácia erytrocytov.

Ak nastane mutácia v zárodkovej bunke, prenesie sa na všetky bunky nového organizmu, ktoré vznikli pohlavnou cestou. O somatickej mutácii hovoríme vtedy, keď nastáva v telovej bunke. Keďže mutovaný gén nie je v zárodkovej bunke, neprenáša sa na ďalšie generácie a rozšíri sa len na určitý okruh buniek. Predpokladá sa, že aj rakovina alebo leukémia sa začína ako somatická mutácia v niektorej bunke, či už samovoľne vplyvom rádioaktívneho žiarenia, alebo vplyvom chemických rakovinotvorných látok. S poškodením DNA a RNA sa všeobecne znižuje tolerancia na zmeny prostredia a schopnosť zotavovania sa pri chorobách. Žiarenie môže takisto poškodiť aj plod už počas tehotenstva a dieťa sa narodí s vrodenými malformáciami. Príkladov ako ukázať prepojenie medzi poškodenou bunkou a vzniknutou chorobou je niekoľko. Napríklad štítna žľaza obsahuje bunky produkujúce tyroxín, ktorý je vylučovaný do krvi a vplýva na trávenie, dýchanie, aj na reakcie na stres. Pri nadbytku hormónu, hypertyroidizme, sa zvyšuje pulz, dochádza k strate hmotnosti, častá je nervozita, podráždenie, u žien sa zvyšuje frekvencia menštruačného cyklu. Podobne môže dôjsť k zníženej produkcii tyroxínu a s tým súvisiacimi ťažkosťami. Pri prijíme rádioaktívneho jódu ^{129}I alebo ^{131}I , dochádza k jeho kumulácii v štítnej žľaze. Rádioaktívny jód emituje gama žiarenie, ktoré ničí alebo poškodzuje bunky produkujúce tyroxín a tým dochádza k zníženej produkcii hormónu, resp. k zmenám v jeho chemickom zložení. Mierne vystavenie väčšieho množstva populácie rádioaktívnemu jódu môže zapríčiniť zníženie priemeru množstva tyroxínu a zvýšiť priemernú telesnú hmotnosť.

11. 2 ZDRAVOTNO-HYGIENICKÉ ZÁSADY A NORMY PRÁCE S RÁDIOAKTÍVNymi LÁTKAMI

Akákoľvek dávka žiarenia môže byť spojená s rizikom poškodenia organizmu, preto je potrebné dbať na to aby nedochádzalo k ožiareniam. Najvyššie prípustné dávky sú také, aby nezapríčinili poškodenie organizmu.

Biologická účinnosť žiarenia vyjadruje ako **dávkový ekvivalent**, ktorého jednotkou je **sievert (Sv)**. Dávkový ekvivalent alebo tiež biologický ekvivalent sa rovná dávke vynásobenej akostným súčiniteľom.

$$\text{dávkový ekvivalent} = \text{dávka} \times \text{akostný súčiniteľ} \quad (69)$$

Dávka je pritom fyzikálne merateľná veličina a akostný súčiniteľ hovorí o tom, ako rýchlo prechádza žiarenie prostredím a je funkciou lineárneho prenosu energie (LET).

Pre beta a gama žiarenie má hodnotu rovnú jednej, pre iné žiarenia sú tieto hodnoty vyššie, tabuľka 13. Dávky z externých zdrojov žiarenia nesmú prevyšovať nasledujúce prípustné dávky, tabuľka 14. Pre profesionálne osoby sú spojené s veľmi malou pravdepodobnosťou poškodenia zdravia. Z nich sú odvodené všetky medzné dávky pre jednotlivcov (tvoria 10%). Pre gonády, aktívnu kostnú dreň, oči a pri celotelovom ožiarení sú najvyššie prípustné dávky u pracovníkov 50 mSv a pre obyvateľstvo je to 5 mSv ročne. V prípade zasiahnutie kože, štítnej žľazy a kostí je prípustná dávka 300 mSv pre pracovníkov a 35 mSv ročne pre obyvateľstvo. Ak je zasiahnutý iný orgán alebo tkanivo najväčšia prípustná dávka je 150 mSv ročne pre pracovníkov a 15 mSv ročne pre obyvateľstvo.

<i>Druh žiarenia</i>	<i>Akostný faktor</i>
Fotóny gama žiarenia a röntgenového žiarenia	1
Elektróny a častice beta s $E > 30$ keV	1
Elektróny a častice beta s $E < 30$ keV	1,7
Tepelné neutróny	3
Rezonančné neutróny	2,5
Neutróny stredných energií	8
Rýchle neutróny	10
Protóny a alfa častice	10
Odrazené jadrá a štiepne fragmenty	20

Tab. 13 Hodnoty akostného faktora pre rôzne druhy žiarenia.

<i>Orgány a tkanivá</i>	<i>Najväčší prípustný dávkový ekvivalent pre pracovníkov so žiarením ročne (mSv)</i>	<i>Medzný dávkový ekvivalent pre jednotlivcov ročne (mSv)</i>
Rovnomerne ožiarené celé telo, kostná dreň	50	5
Štítna žľaza, kosť, koža	300	35
Ruky, predlaktia, nohy, členky	750	75
Akýkoľvek iný orgán alebo tkanivo	150	15

Tab. 14 Najvyššie prípustné dávky a medzné dávky ionizujúceho žiarenia.

Ak organizmus obsahuje rakovinové bunky, ktoré sú citlivé voči ionizujúcemu žiareniu, je možné pacientovi pri rádioterapii aplikovať dávku až do 50 Sv, čo je obrovský zásah do organizmu. Pacient takúto terapiu nemusí zvládnuť, aj keď je ožarovaná iba určitá časť tela. Pre porovnanie, pri röntgenovom vyšetrení je organizmus ožiarený dávkou 1 mSv až 10 mSv.

Pri práci s rádioaktívnymi látkami sa bežne **rádioaktívne kontaminujú** laboratórne predmety, no náhodne sa kontaminuje aj stabilné laboratórne zariadenie a pracovníci. Hlavné formy rádioaktívnej kontaminácie pri práci s otvorenými žiaričmi sú kontaminácia pracovnej atmosféry rádioaktívnymi plynmi alebo aerosólmi a kontaminácia povrchov kvapalnými alebo tuhými rádioaktívnymi látkami. Ochrana pred ožiareními môže byť zabezpečená vzdialenosťou, tienením alebo skrátením pracovnej doby. Ak ku kontaminácii dôjde, metódy **dekontaminácie** sú buď mechanické alebo ide o dekontamináciu vodou, prípadne tlakovou vodou, kyselinami, lúhmi, organickými rozpúšťadlami, mydlami, emulgátormi.

Dôležitou súčasťou práce s rádioaktívnymi látkami je aj **likvidácia rádioaktívneho odpadu**. Na rádiochemických pracoviskách sa vyskytujú rádioaktívne odpady vo všetkých troch skupenských stavoch. K **tuhým odpadom** patrí laboratórne sklo, filtračný papier, rukavice, textílie a kontaminované laboratórne predmety. Odpady sa rozdeľujú na spáliteľné a nespáliteľné a podľa rádionuklidov na krátkožijúce a dlhožijúce. **Kvapalné odpady** s vyššou aktivitou sa zbierajú do osobitných nádob na ďalšie spracovanie, nízkoaktívne kvapalné odpady sa likvidujú rôznymi spôsobmi. Jedným zo spôsobov je zriedovanie. Pri veľmi nízkom stupni aktivity sa odpad vypúšťa do verejných tokov. Kvapalný odpad možno čistiť zrážaním alebo spoluzrážaním a potom filtrovaním alebo pomocou vymieňačov iónov. Najúčinnnejšou metódou je odparovanie, ktoré sa používa pre odpad stredne aktívny. **Plynný rádioaktívny odpad** sa vypúšťa do atmosféry, aktívne aerosóly sa môžu zadržať pomocou špeciálnych filtrov.

12 NUKLEÁRNA MEDICÍNA

Odbor nukleárnej medicíny sa uplatňuje v patofyziológii, rádiológii, onkológii, ďalej sa využíva v biochémií a biológii. V nukleárnej medicíne sa používajú žiariče s polčasom rozpadu niekoľko hodín alebo dní. Aby bolo možné diagnostikovať pacienta, je potrebné najskôr **žiarič aplikovať** do tela chorého. Rádioaktívne preparáty sú aplikované perorálne alebo intravenózne. Vyšetrovacie metódy sú potom založené na meraní vzoriek telesných tekutín, konkrétne cirkulujúcej krvi alebo erytrocytov. Iný spôsob vyšetrovania je meranie aktivity orgánov. Meria sa teda kinetika značenej látky v orgáne a aktivitu meriame z povrchu tela. Takto je možné sledovať obrat rádioželeza v kostnej dreni, je možné vyšetrenie žilovej a tepnovej cirkulácie a teda aj vyšetrenie orgánového prekrvenia.

Pri vyšetrení **štítnej žľazy** sa používajú izotopy ^{123}I , ^{125}I , ^{131}I a ^{132}I . Pri funkčnom vyšetrení môžeme sledovať priebeh a stupeň akumulácie rádiojódu v štítnej žľaze vonkajším meraním. Ďalej je možné sledovať percento, ktoré sa vylúči obličkami, hladinu rádiojódu viazaného na bielkoviny a zmeny týchto parametrov po stimulácii činnosti žľazy podaním TSH hormónu (hormónu predného laloku hypofýzy) a je tiež možné sledovať potlačenie produkcie TSH podaním hormónu štítnej žľazy, tyroxínu.

Vyšetrenie obličiek. Obličky vylučujú z tela odpadové produkty metabolismu. Často sa využíva vyšetrovanie celkovej funkcie oboch obličiek z koncentrácie zvoleného indikátora v moči a v plazme. Okrem toho sa vyšetruje aj každá oblička zvlášť, moč sa potom cytoskopicky odoberá z každej obličky osobitne. Najčastejšie sa na vyšetrenie používa ^{131}I .

Vyšetrenie pečene a žlčového systému. V pečeni prebiehajú syntetické a detoxikačné reakcie. Odpadové produkty pečene vylučuje do žlče, ktorá je potom odvádzaná do dvanástnika a do žlčníka. Izotopovým vyšetrením, s použitím ^{131}I a koloidného zlata ^{198}Au , sa posudzuje detoxikačná funkcia pečenných buniek, poruchy prekrvenia pečene.

Testy malignity slúžia k rozpoznaní zhubného bujnenia od nenádorových ochorení pomocou rádioizotopov. Ako indikátor sa tu používa rádiofosfor ^{32}P . Fosfor sa do organizmu začleňuje v RNA a DNA a v makroergických fosfátoch, fosfolipidoch a fosfoproteínoch. Využíva sa pri tom skutočnosť, že nádorové tkanivo má v porovnaní s okolitým tkanivom vyšší metabolizmus. Rast nádoru je rýchlejšia, preto aj rýchlosť zmeny fosforu medzi vnútrobunkovým prostredím a extracelulárnou tekutinou bude väčšia. Ak do tela extracelulárnou tekutinou vpravíme ^{32}P , v nádorových bunkách bude mať vyššiu aktivitu. Takéto testy malignity sa používajú pri kožných chorobách, v očnom lekárstve, v tráviacom ústrojenstve a podobne.

Rádioizotopy v liečbe ožarováním. Liečba rádioizotopmi využíva biologické účinky žiarenia. Princíp účinku je v tom, že je potrebné funkčne poškodiť bunku, prípadne zasiahnuť bunku tak, aby zanikla. Funkčné poškodenie sa využíva pri zvýšenej činnosti štítnej žľazy, o úplné zničenie buniek sa snažíme pri liečbe zhubných nádorov. Rádioaktívny izotop sa podáva vo forme soli alebo organickej zlúčeniny. Organizmus ho nevie odlíšiť od neaktívneho, zaradí ho do metabolizmu a tak sa rádioizotop usadí v rôznych orgánoch s rôznou koncentráciou. Umelé rádionuklidy nahradili prírodné, t.j. namiesto Ra sa pri liečbe leukémie a na priame ožarovanie napadnutého orgánu používa ^{137}Cs , ^{131}I (liečba štítnej žľazy), ^{32}P (pri nadprodukcii červených krviniek), koloidný roztok rádiozlata ^{198}Au , ^{90}Y , ^{60}Co (v očnom lekárstve), ^{90}Sr a iné.

12. 1 TECHNIKA VYŠETRENIA CELOTELOVÝM DETEKTOROM

Za určitých okolností potrebujeme poznať obsah rádioaktívnej látky v tele vyšetrovanej osoby. Je to hlavne vtedy, ak chceme dokázať vnútorné rádioaktívne zamorenie. Celotelový detektor je v najčastejších prípadoch zväčšený scintilačný detektor alebo niekedy Geiger-Müllerov detektor. Pri vyšetovaní kostného systému, pri scintigrafii skeletu sa využíva ^{85}Sr , ^{18}F a ^{47}Ca .



Obr. 41 Vyšetrenie celotelovým detektorom

Vyšetrením nervového systému pomocou ^{133}Xe sa sleduje prekrvenie mozgu. Pri scintigrafii mozgu sa používa ^{131}I , ^{99}Tc , ^{113}In , ^{197}Hg . Nezobrazuje sa takto mozgové tkanivo, ale využíva sa nešpecifické hromadenie rádioizotopu. V mieste patologického ložiska v mozgu je

porušená hematoencefalická bariéra a ak žiarič aplikujeme do mozgu, do zdravého mozgového tkaniva prenikne iba veľmi malá časť. Značený preparát teda ostane iba v patologicky pozmenenom tkanive.

12. 2 POZITRÓNOVÁ EMISNÁ TOMOGRAFIA V DIAGNOSTIKE NÁDOROV

Pozitrónová emisná tomografia (PET) je jedna zo špeciálnych zobrazovacích metód nukleárnej medicíny. Pre onkologickú diagnostiku je to veľmi vysoko citlivá metóda, ktorá sa stala už aj u nás dostupná, ale zatiaľ len v obmedzenej miere. Všeobecná nedostupnosť tejto zobrazovacej metódy je zapríčinená tým, že zatiaľ nemáme vlastnú výrobu vhodných krátkožijúcich rádionuklidov a príslušnú detekčnú techniku.

Metódy nukleárnej medicíny významnou mierou prispievajú do diagnostického procesu takmer všetkých systémov a zasahujú do mnohých odborov, kde majú dôležité miesto, pretože zobrazujú na biologickej, teda funkčno-morfologickej, až na metabolickej a molekulárnej úrovni. **Gamagrafické** (scintigrafické) zobrazenie nádorov na funkčno-morfologickej úrovni predpokladá dostatočne výdatné hromadenie rádioaktívne značkovanej látky (rádiofarmaka) v nádore v porovnaní s okolitým tkanivom. Zobrazenie nádorov na tomto princípe je najstarším spôsobom zviditeľnenia nádorov, najjednoduchším príkladom je gamagrafia tkaniva štítnej žľazy rádioaktívnym jódom.

Podstatou týchto metód je princíp tzv. **stopovacej metódy**. Tento princíp spočíva v sledovaní rádioaktívnym prvkom označených molekúl, resp. zlúčenín, ktoré sa môžu vhodnými detektormi detekovať. Na diagnostiku a liečbu v nukleárnej medicíne sa využívajú umelé rádioaktívne prvky vyrábané v jadrovom reaktore, v urýchľovači typu cyklotrónu alebo sa získavajú priamo na pracovisku v rádionuklidovom generátore. Ak sa značkované rádioaktívne látky využívajú na *in vivo* diagnostiku, musia byť upravené do formy liečiva a musia vyhovovať liekopisu. Takéto rádioaktívne liečivá, nazývané rádiofarmaká, musia obsahovať dobre prenikavé a detekovateľné žiarenie, aby bolo možné ich hromadenie zobraziť v podobe dvojrozmerného obrazu (gamagram alebo scintigram) alebo vo forme trojrozmerného (tomografického) obrazu. Metóda sa nazýva **emisná počítačová tomografia**, ECT. Pokiaľ sa klasická tomografická gamagrafia vykonáva pomocou primárneho gama žiariča (napr. rádioaktívny jód, technécium, gálium, tálium, indium), nazýva sa **jednofotónová emisná počítačová tomografia**, SPECT. Pokiaľ sa ECT vykonáva pomocou pozitronových žiaričov, nazýva sa **pozitrónová emisná tomografia PET**, pri ktorej sa detekujú dva súčasne vzniknuté a zaregistrované gama fotóny vznikajúce anihiláciou, teda spojením emitovaného pozitronu (beta+) a okolitého elektrónu (beta-).

Vďaka prudkému rozvoju rádiofarmácie a prípravy nových rádiofarmák došlo k najväčšiemu rozvoju nukleárno-medicínskej diagnostiky práve v nukleárnej onkológii, kde

je dôležité zobrazenie nádorov skeletu osteotropnými rádiofarmakami, gamagrafické zobrazenie niektorých nádorov rádioaktívnym gáliom alebo táliom. Dostupné u nás sú aj zložité organické rádiofarmaká dovoľujúce pomerne špecificky gamagraficky zobraziť napríklad neuroendokrinné nádory. Takýmto rádiofarmakom je ^{111}In – Octreoscan alebo ^{123}I – metajodobenzylguanidín (MIBG) na zobrazenie malígnych karcinoidov a nádorov. Rádiofarmakum teda musí mať určitý funkčný alebo metabolický vzťah k zobrazovanému nádoru a to vďaka jeho perfúzii, metabolizmu a pôvodu.

Spoločným menovateľom pre všetky tieto spôsoby gamagrafického zobrazenia nádorov je schopnosť rádiofarmaka hromadiť sa v nádoroch v závislosti na ich aktivite, pretože zobrazenie sa uskutočňuje na základe funkčného mechanizmu a výsledok vyšetrenia odráža funkčno-morfologickú úroveň nádoru.

Pozitrónová emisná tomografia. Geniálnosťou využitia pozitronových žiaričov biogénnych prvkov (uhlík, dusík, kyslík, vodík) je skutočnosť, že sa pomocou nich dajú teoreticky označovať všetky organické zlúčeniny, resp. biomolekuly v organizme. Využívajú sa žiariče biogénnych prvkov ^{11}C –uhlík s polčasom rozpadu 20 minút, ^{13}N –dusík 10 minút, ^{15}O –kyslík 2 minúty a namiesto vodíka sa využíva ^{18}F –fluór s polčasom rozpadu 110 minút. Tieto rádioaktívne prvky sa vyrábajú v cyklotróne a začali sa využívať v 70. rokoch v neurofyziológii a neurológii. Po období používania ^{11}C –glukózy a ^{11}C –aminokyselín sa podarilo označovať glukózu, resp. deoxyglukózu namiesto krátkožijúcim ^{11}C –uhlíkom rádioaktívnym fluórom ^{18}F , ktorý má dlhší polčas rozpadu. Mohla sa teda využívať myšlienka, že čím je nádor zhubnejší, tým je jeho cukrový metabolizmus vyšší. Došlo aj k poznaniu, že ^{18}F –fluorodeoxyglukóza je ešte výhodnejšia a to z dôvodu nepatrne odlišného metabolizmu v nádorovej bunke v porovnaní so značkovanou glukózou. PET vyšetrenie s ^{18}F –fluorodeoxyglukózou je však omnoho citlivejšie, kvalitnejšie, zobrazuje celotelovo tomograficky a vďaka krátkemu polčasu premeny je radiačné zaťaženie vyšetřovaného pacienta nižšie. Na Slovensku patria medzi najčastejšie vyskytujúce sa ochorenia malígne lymfómy, karcinómy hrubého čreva, gynekologické nádory, ďalej sú to primárne nádory mozgu, karcinómy štátnej žľazy, karcinómy pľúc, pankreasu, karcinóm prsníka, testis a podobne.

12. 3 VÝZNAM RÁDIOLÓGIE V ONKOLÓGII

Pred viac ako 100 rokmi objavil W.C. Röntgen žiarenie X. Položil tak základ pre vznik nového medicínskeho odboru, rádiológie, ktorý sa začal dynamicky rozvíjať. Z veľkého množstva rôznych technických metódík využívajúcich X lúče si v posledných 30 rokoch zaslúžil najväčšiu pozornosť zosilňovač štítového obrazu a objav počítačovej tomografie.

V rádiodiagnostike sa uplatňujú aj zobrazovacie metódy využívajúce iné fyzikálne princípy ako ionizujúce žiarenie. Sú to ultrazvuk a magnetická rezonancia.

Zobrazovacie diagnostické metódy najmä rádiologické, majú za cieľ potvrdiť, prípadne stanoviť očakávanú klinickú diagnózu. Okrem stanovenia diagnózy sa zobrazovacie metódy používajú aj na stanovenie rozsahu onkologického ochorenia. Tento informuje o vlastnom nádore, lymfatických uzlinách a o metastázach. Najmodernejšie metódy, ako ultrazvuk (UZ), počítačová tomografia (CT), digitálna subtrakčná angiografia (DSA), magnetická rezonancia (MR), zobrazujú už veľmi malé nádory (1-2 mm).

Zobrazovacie metódy môžeme rozdeliť podľa viacerých kritérií. Podľa fyzikálnych princípov, na podklade ktorých vzniká výsledný obraz, podľa používania kontrastných látok a podľa orgánových lokalít. Podľa druhu energie použitej k tvorbe obrazu rozdeľujeme zobrazovacie metódy na klasické röntgenové, ultrazvukové a na magnetickú rezonanciu. Vo všetkých troch skupinách môžeme vyšetrovať bez použitia kontrastných látok alebo aplikovaním špeciálnych kontrastných médií. Podľa orgánových lokalít rozdeľujeme diagnostické postupy na diagnostiku ochorení pľúc, prsníkov, gastrointestinálneho traktu, hlavy a krku, muskuloskeletálneho systému, centrálného nervového systému a diagnostiku lymfatického systému.

Klasické röntgenové techniky využívajú pre tvorbu obrazu jav absorpcie RTG žiarenia. X lúče sa pri prechode vyšetrovaným objektom čiastočne pohltia priamo úmerne hustote hmoty a takto oslabené žiarenie dopadá na film alebo detektory, ktoré ho registrujú. Výsledkom je RTG snímka (skiagram) alebo počítačom spracovaný obraz (sken). Tieto techniky sa používajú v diagnostike ochorení hrudníka a skeletu. Okrem toho sú veľmi rozšírené techniky, ktoré využívajú na zobrazenie dutých orgánov, dutín alebo ciev kontrastné látky. Tu patria kontrastné vyšetrenia gastrointestinálneho systému (vyšetrenia žalúdka, hrubého a tenkého čreva) a uropetického systému. Vyšetrenia cievneho systému sú zaradené do tzv. invazívnych metód (angiografia, lymfografia). Medzi významné metódy, ktoré využívajú RTG žiarenie, patria aj zložitejšie diagnostické techniky, ku ktorým rátame predovšetkým počítačovú tomografiu a digitálnu subtrakčnú angiografiu. Metódy majú vysokú výpovednú hodnotu, jedinou nevýhodou je to, že röntgenové žiarenie patrí do kategórie zdraviu škodlivého ionizačného žiarenia.

Ultrazvukové zobrazovacie techniky využívajú energiu mechanického vlnenia častíc, vysielaných z kryštálov na základe piezoelektrického javu. Vyhodnocujú odraz akustického signálu od rozhraní jednotlivých štruktúr vyšetrovaných tkanív. Ultrazvuk nemá vlastnosti zdraviu škodlivého žiarenia. Svoje miesto má v diagnostike ochorení orgánov brušnej dutiny, žlčníka a žilových ciest, obličiek, v gynekológii ale aj v oftalmológii, reumatológii, v oblasti diagnostiky ochorení krku, štítnej žľazy, slinných žliaz, v diagnostike ochorení prsníkov,

v diagnostike povrchových, hlbokých a orgánových ciev. Najnovšie ultrazvukové prístroje umožňujú zobrazovanie objektov v dvoch (2D) i v troch (3D) rovinách.

Pri **technike magnetickej rezonancie** je vznik výsledného obrazu založený na schopnosti atómových jadier niektorých prvkov (vodíka, fluóru), vystavených pôsobeniu silného magnetického poľa, absorbovať energiu vysokofrekvenčného signálu. Tým sa poruší ich rovnovážny stav, dôjde k excitácii a pri návrate k normálu sa vyžiarí prebytok energie v podobe signálu, ktorý sa registruje. Jav magnetickej rezonancie bol objavený v roku 1945 a prvé priestorové snímky boli zhotovené v roku 1973. Vyšetrovacie postupy magnetickej rezonancie zahŕňajú diagnostiku všetkých orgánov, najrozšírenejšie boli a sú v oblasti centrálného nervového systému. Rozvinula sa aj funkčná diagnostika mozgu. Prednosťou magnetickej rezonancie je výborná tkanivová rozlíšiteľnosť, vysoká senzitivita a pomerne vysoká špecifita. Nezanedbateľnou výhodou je aj to, že vyšetrenie neohrozuje ľudský organizmus a nie je zdraviu škodlivé. Nevýhodou je vysoká cena prístroja a finančná náročnosť vyšetrenia. Diagnostický proces onkologického ochorenia je komplexný, nemožno zamieňať jednu zobrazovaciu metodiku za inú, pretože jednotlivé vyšetrenia sa navzájom dopĺňajú.

13 NUKLEÁRNE KATASTROFY

13.1 HAVÁRIA JADROVEJ ELEKTRÁRNE ČERNOBYL'

V roku 1986 zlyhal jeden z černobyľských reaktorov jadrovej elektrárne. Toto zlyhanie v minúte zmenilo život tisícok ľudí Ukrajiny, ale aj ďalších okolitých štátov. Hoci vtedajšia vláda, ale aj súčasná, zakázali bývanie a teda aj návrat do zamorených oblastí, dnes tu žije, často v polorozvalinách domov ešte dosť ľudí a nikto ich odtiaľ nevyháňa a načo aj, životy ich drahých, či ich zdravie im aj tak už nikto nevráti.

Z hľadiska úniku rádioaktívnych látok do prostredia išlo o doteraz najväčšiu haváriu v histórii jadrovej energetiky. Podľa predbežného odhadu odborníkov v priebehu havárie uniklo veľké množstvo rádioaktívnych látok z paliva, kryptón a xenón. Z paliva uniklo asi 10-20 % rádionuklidov jódu, cézia a telúru a úniky rádionuklidov bária, stroncia, plutónia a céru a pohybovali v rozmedzí 3-6 %.

K hlavným príčinám, ktoré viedli k havárii patrilo odpojenie automatického havarijného systému, prevádzka na neprístupne nízkych hladinách výkonu a zlyhanie obsluhy. Prevádzkovatelia štvrtého a najnovšieho jadrového reaktora elektrárne Černobyľ začali prvý deň špeciálneho testu. Chceli preskúmať či by zvyšková energia rotujúcej turbíny mohla poskytnúť dostatok sily v prípade núdzového uzavretia a straty vonkajšej energie. V záujme tohto testu prevádzkovatelia odpojili bezpečnostné systémy a porušili prevádzkové postupy, aby mohli uskutočniť tento test. Každá zmena spôsobila odchýlenie od plánovanej prevádzky elektrárne, spôsobujúc jej väčšiu nestabilitu. Výkon reaktora poklesol na 6 % svojej normálnej úrovne, bezpečnostný chladiaci systém bol odstavený, ďalšie bezpečnostné systémy odpojené a všetky kontrolné tyče usmerňujúce štiepnu reakciu boli čiastočne vytiahnuté s úmyslom nechať reaktor pracovať.

Havária ľahkovodného varného jadrového reaktora s grafitovým moderátorom nastala 26.4.1986 o 1.23 hodine. Prevádzkovatelia stlačili bezpečnostný gombík známy ako AZ-5, ktorý posielal kontrolné tyče späť do jadra reaktora, aby zastavili štiepnu reakciu. Ale kontrolné tyče celkom nezapadli do už zničeného jadra. O niekoľko sekúnd neskôr bolo možné cítiť otrasy v kontrolnej miestnosti, skoro okamžite nasledované dvoma veľkými explóziami. Sovietsky predstavitelia uvádzajú, že za 4,5 sekundy narástol energetický potenciál reaktora 2000-krát na 120-násobok svojej projektovanej kapacity. Tisíc tonový betónový kryt nad reaktorom sa odsunul a zdeformoval sa a okolití pozorovatelia videli výnimočný ohňostroj, horúce palivo a grafit rútiace sa do nočnej oblohy.

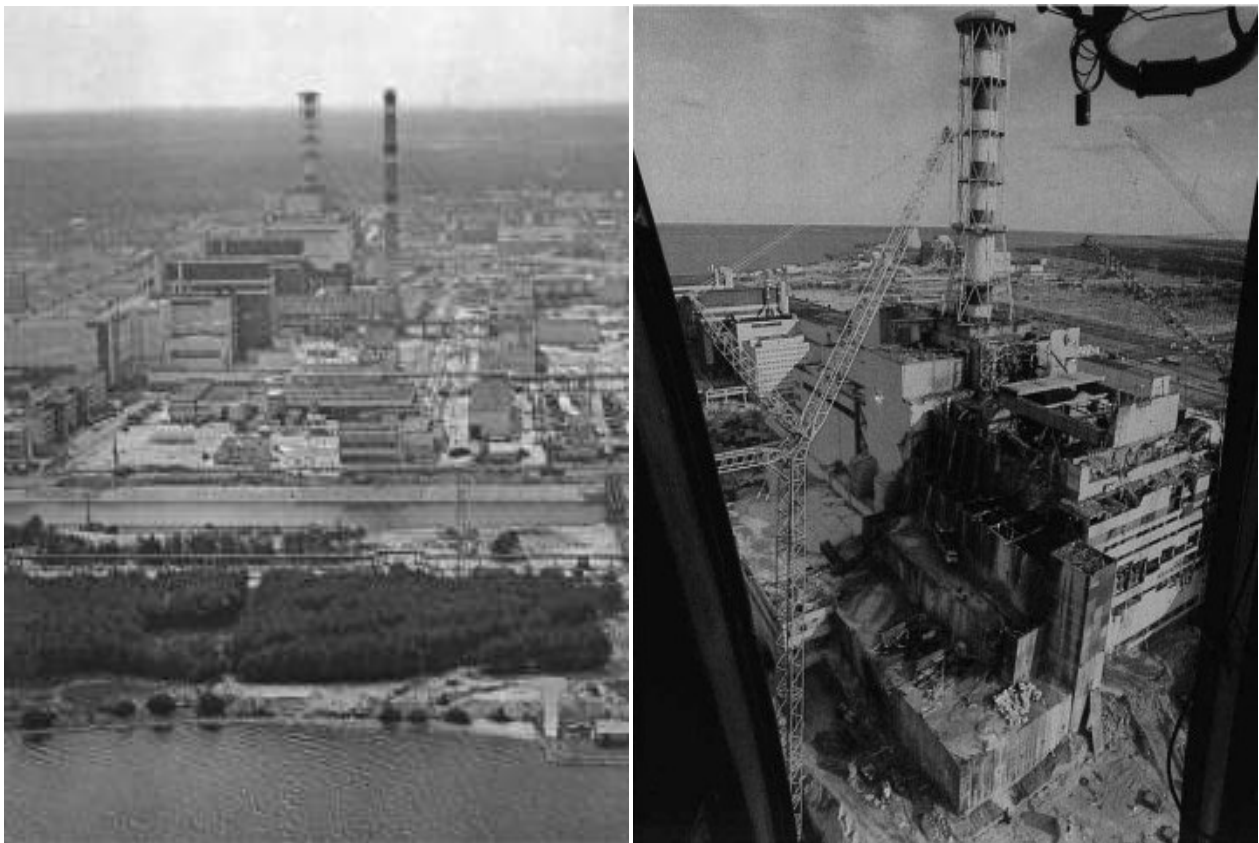
Pri následnej vzniknutej dehermetizácii a postupnej tlakovej a tepelnej deštrukcii reaktora došlo k úniku rádioaktívnych látok. Je známe, že voda sa na hasenie horiaceho grafitu

neosvedčila, čo viedlo k ďalším výbuchom. Preto sa 28.4. začalo zasypávanie reaktorovej šachty rôznymi materiálmi. Boli to napr. karbid bóru, ako pohlcovač neutrónov, dolomit prospeievajúci odvodu tepla a na tlmenie horiaceho grafitu, hlina a piesok k vytvoreniu filtračnej vrstvy pre unikajúce rádioaktívne materiály a nakoniec olovo k absorpcii tepla. Definitívnym dlhodobým riešením bolo vybudovanie budovy zo špeciálneho, tepelne odolného betónu, tzv. sarkofágu na pochovanie zvyšku havarovaného reaktora, obrázok 42 a 43. Okamžitými obeťami černobyľskej nehody boli pracovníci elektrárne a záchranári, ktorí prišli na miesto deja v prvých hodinách katastrofy. Väčšina z 29 ľudí umrela na chorobu z ožiarenia počas prvých niekoľko málo mesiacov. Spolu bolo hospitalizovaných 237 ľudí s akútnymi chorobami z ožiarenia, ktorí boli vystavení dávkam. U týchto a ďalších obetí je po celý ich život významne zvýšená pravdepodobnosť výskytu rakoviny.

V čase výbuchu bola verejnosť o tejto tragédii informovaná minimálne, alebo skôr nebola informovaná vôbec. Tí postarší boli o pár dní po výbuchu, povinne v prvomájovom sprievode, netušiac, čo je vo vzduchu, lebo správa o tejto tragédii a hroziacom nebezpečí bola tabu, jednoducho sa o nej nehovorilo, veď neoslavovať prvý máj by bola v tom čase hrozná vec.

Následky výbuchu v Černobyle mali porovnateľný rozmer ako výbuch bomby v Hirošime a Nagasaki v Japonsku. Po rokoch sa svet dozvedel, že s evakuáciou sa začalo v Černobyle až z 3-tieho na 4-tého mája 1986, teda skoro týždeň po výbuchu. Evakuované bolo všetko obyvateľstvo, celkom 135 tisíc osôb žijúcich do vzdialenosti 30 km od elektrárni. Rádioaktívne látky sa dostali do atmosféry a vetrom boli roznesené po celej Európe. Veľký rozruch vo svete nastal až vtedy, keď v severských štátoch zaznamenali prístroje obrovské zvýšenie radiácie a Sovietsi museli priznať, čo sa stalo. Možno by sa bol svet dozvedel o tejto tragédii ešte neskôr, nebyť vetra. Informáciu svet zabezpečil vietor, ktorý sa otočil a rádioaktívny oblak hnal práve na severské krajiny. Dažd'om sa spláchli zo vzduchu na zem. V prvých týždňoch po nehode mala zelenina v mnohých európskych krajinách úroveň rádioaktivity nad limity stanovené príslušnými inštitúciami.

Navyše dobytok pasúci sa na kontaminovanej tráve začal čoskoro produkovať mlieko so zvýšenými úrovňami rádioaktívnych materiálov a aj mäso zvierat, ktoré sa pásli v zamorených oblastiach bolo zdravotne závadné. Odhaduje sa, že katastrofou bolo priamo zasiahnutých 1,7 milióna ľudí a 2,4 milióna ľudí žije na kontaminovanom území stále, nepočítajúc 2,4 milióna obyvateľov Kyjeva. Vedci sa zhodujú, že väčší počet úmrtí bude spôsobených rakovinami zapríčinenými vystavením živých tkanív ionizujúcemu žiareniu, ktoré ničí genetický materiál buniek, pozorované boli príznaky poškodenia krvotvorby a tráviaceho ústrojenstva. V prvých dňoch spôsoboval najviac obáv široko rozptýlený Jód 131, pretože sa koncentruje v štítnej žľaze, kde môže zapríčiniť vznik uzlín, ktoré o niekoľko rokov môžu byť rakovinotvorné. Ďalšie rádioizotopy vylúčené z Černobyľa budú mať mnoho



Obr. 42 Jadrová elektrárň v Černobyle pred a po havárii.



Obr. 43 Betónový kryt havarovaného reaktora, tzv. sarkofág.

dlhšiu životnosť. Napríklad Céziu 137 má polčas rozpadu 30 rokov, Stroncium 90 - 280 rokov a Plutónium 239 - 24 000 rokov. Céziu predstavuje dlhodobu najväčšiu hrozbu. Je biologicky aktívne a bolo vylúčené v obrovských množstvách. Aj keď blok reaktora zaliali do betónového plášťa, je rádioaktivita v okolí Černobyľu stále vysoká. Široká oblasť okolo jadrovej elektrárne zíva prázdnotou a pravdepodobne bude zívať ešte celé desaťročia, je to mŕtva zóna. Pomedzi polorozpadnuté dediny sa túľajú zdivočelé zvieratá, človek by si pomyslel, že sú to jediné živé tvory v tejto oblasti. Omyl, hoci je sem oficiálne zakázaný vstup, žijú tu ľudia. Po uzatvorení oblasti vstup na toto územie strážili rampy, pri ktorých stáli vojaci. Dnes, na mnohých miestach už žiadne rampy nenájdete, nanajvýš je tu takmer nečitateľný nápis na tabuli, ktorý oznamuje zákaz vstupu na toto územie, z dôvodu radiácie. V oblasti Černobyľu sa za posledné roky neúmerne zvýšila rakovina štítnej žľazy nielen u dospelých ľudí, ale aj u detí, vyskytli sa mnohé degeneratívne zmeny organizmu, obrázok 44. V roku 1994 sa oficiálne obeť na životoch priamo spojených s Černobyľom odhadovali na 125 000, rátajúc len Ukrajinu. V súčasnosti, ale neexistuje dostatočne dôveryhodný údaj o počte mŕtvych.

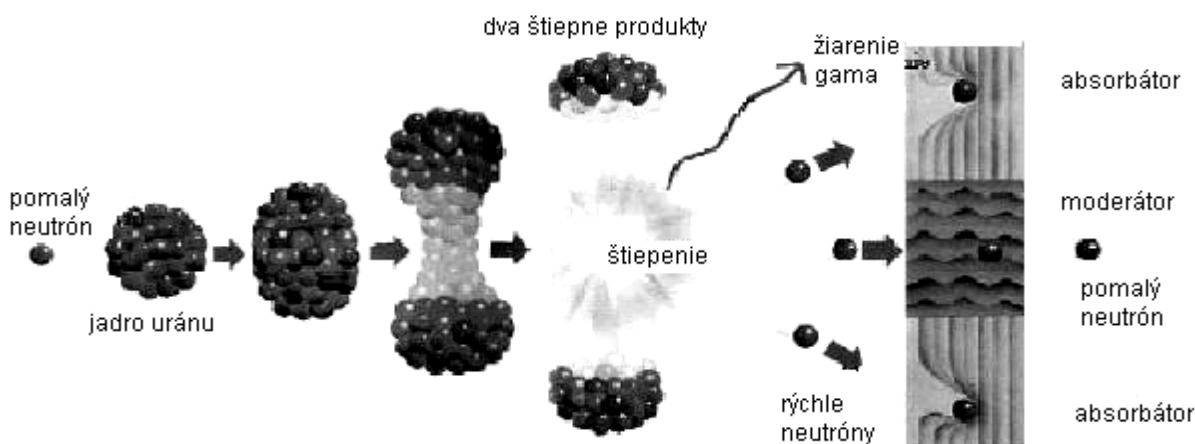


Obr. 44 Postihnutie obyvateľstva únikom radiácie.

13. 2 JADROVÉ ZBRANE

Jadrové zbrane, založené na využití energie jadier atómov, sú najúčinnnejšie prostriedky hromadného ničenia. Ide o úplné zariadenia, ktoré sú vo svojej konečnej podobe schopné uskutočniť plánovanú jadrovú reakciu a uvoľniť energiu. Súčasné jadrové zbrane sa skladajú z vlastnej výbušnej jadrovej nálož, prostriedku na jej dopravu na cieľ a systémov riadenia a navedenia na cieľ. Vlastné výbušné jadrové zbrane sú založené na využití vnútrojadrovej energie, ktorá sa uvoľňuje pri umelo vyvolaných jadrových reakciách a je určené na ničenie živej sily, zbraní a bojovej techniky, dôležitých objektov a obyvateľstva. Základom jadrových zbraní je jadrová munícia, ktorá obsahuje štiepnu alebo termonukleárnu nálož.

V prípade **štiepnej bomby** prebieha reakcia neutrónu s jadrom (n, f), obrázok 45.



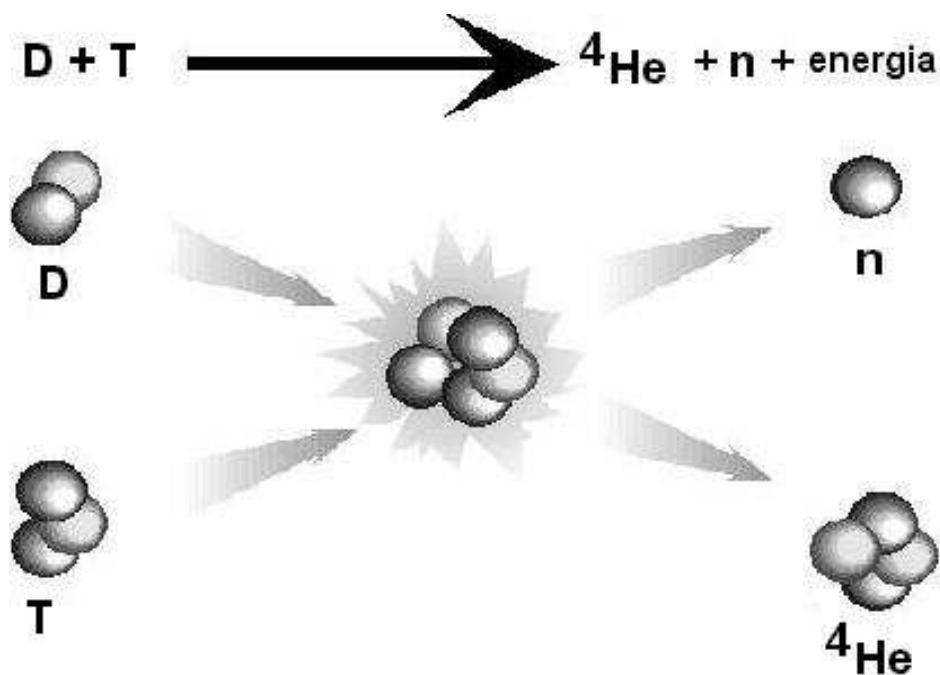
Obr. 45 Štiepna jadrová reakcia (n, f). Štiepením sa pôvodné jadro rozdelí na dve väčšinou nerovnaké časti a uvoľnia sa 2 – 3 neutróny a gama žiarenie.

Štiepením sa pôvodné jadro rozdelí na dve väčšinou nerovnaké časti a uvoľnia sa 2 – 3 neutróny a gama žiarenie. Z praktického hľadiska má význam štiepenie ťažkých jadier pomalými (tepelnými) neutrónmi, ktoré sa stalo základom funkcie štiepných jadrových náloží a jadrových reaktorov. K štiepeniu tepelnými neutrónmi môže dôjsť len pri niektorých ťažkých jadrách (^{235}U , ^{239}Pu a transuránoch s vysokým protónovým číslom). Proces štiepenia spočíva v rozdelení jadra na dva alebo viacej atómov s hmotnosťami i atómovými číslami podstatne menšími ako pri východiskovom jadre. V prvom štádiu reakcie dochádza k pohlteniu neutrónu $^{235}\text{U} + ^1_0\text{n} \rightarrow (^{236}\text{U})^*$. Jadro $(^{236}\text{U})^*$, ktoré je v excitovanom stave, môže emitovať gama žiarenie bez štiepenia. Na vytvorenie pomerne stabilného izotopu ^{236}U , ktorý má polčas rozpadu $2,4 \cdot 10^7$ rokov, prispieva 16 % z celkového počtu zachytených neutrónov a ostatných 84 % pohltенých neutrónov vyvoláva štiepenie. Štiepenie ^{236}U môže prebiehať rôznymi spôsobmi (približne 40 spôsobov). Produkty štiepenia majú dve dôležité vlastnosti, sú rádioaktívne a majú kinetickú energiu.

Štiepne produkty majú príliš vysoký pomer počtu neutrónov k počtu protónov a sú preto nestabilné. Aj keď sa uvoľní okamžitý neutrón, pomer počtu neutrónov k počtu protónov vo vzniknutom jadre býva obvykle stále mimo oblasť stability pre príslušné hmotnostné číslo. Preto takmer všetky vzniknuté jadrá sú rádioaktívne a emitujú záporné častice beta so sprievodným gama žiarením. Rádioaktívne bývajú i priame produkty rozpadu vzniknutých jadier. Dĺžka rozpadových radov býva rôzna, v priemere vzniknuté jadro prechádza tromi

rozpadovými štádiami, než sa utvorí stabilné jadro. Celková energia, ktorá sa uvoľňuje pri štiepení jedného jadra ^{235}U je asi 200 MeV. Podstatná časť tejto energie (asi 85 %) sa prejavuje vo forme kinetickej energie štiepných produktov. Pri procese spomaľovania dochádza k intenzívnej ionizácii. 15 % energie uvoľnenej pri štiepení sa prejavuje vo forme žiarenia alebo kinetickej energie neutrónov emitovaných štiepnymi produktmi v okamžiku štiepenia.

Fúzna bomba je systém, kde je potrebné priblížiť jadrá čo najbližšie k sebe, aby začali pôsobiť jadrové príťažlivé sily a mohlo dôjsť k jadrovej fúzii, teda k spojeniu jadier, obrázok 46. Tomu ale bránia elektrostatické odpudivé sily spôsobené kladnými nábojmi protónov v jadrách. Preto také priblíženie, ktorého následkom je splynutie dvoch ľahších jadier v jedno ťažšie, je možné, ak sa jadrá pohybujú obrovskou rýchlosťou, rádovo tisíce km.s^{-1} . Vhodné sú ľahké jadrá, pretože čím menej obsahujú protónov, tým sú odpudivé sily menšie. Túto rýchlosť im možno udeliť ohriatím na extrémnu teplotu (státisíce až desiatky miliónov stupňov). Preto týmto reakciám hovoríme aj termonukleárne (termojadrové). Rýchlosť pohybu úzko súvisí s teplotou. Čím je teplota vyššia, tým je chaotický pohyb častíc rýchlejší a pravdepodobnosť ich tesného priblíženia väčšia. Na začatie týchto reakcií sa používajú štiepne jadrové reakcie, ktoré pri výbuchu štiepnej munície poskytujú práve takéto vysoké teploty. Pri nich sa všetky molekuly vodíka rozpadávajú na atómy a vzájomným pôsobením sa od nich oddeľujú všetky elektróny. Atómy sú tak ionizované a vodík sa vplyvom teploty mení na plazmu ako elektrónojadrový plyn.



Obr. 46 Fúzia deutéria a trícia.

Na fúziu (syntézu) jadier ťažších než vodík sú potrebné vyššie teploty. Napríklad pre kyslík sú to rádovo desiatky až stovky miliárd kelvinov. Na účinnejší priebeh fúznej reakcie je popri vysokej teplote potrebná aj vysoká koncentrácia jadier. Čím bude viac jadier v určitom objeme, tým dôjde k väčšiemu počtu ich vzájomných zrážok a uvoľní sa viac energie. Myšlienka uskutočniť termonukleárne reakciu vznikla skôr ako možnosť štiepenia jadier ťažkých prvkov. Podnietili ju najmä vedomosti z pozorovania vesmíru.

Je celý rad možných fúzných (termonukleárných) reakcií, ale iba niektoré môžu byť zdrojom energie pri termonukleárnom výbuchu. Napríklad fúzia štyroch protónov za vzniku jadra hélia, dvoch pozitronov (a dvoch neutrín), vytvára 24,7 MeV energie.

Iným druhom jadrovej zbrane sú tzv. **špinavé bomby** (dirty bombs). Jedná sa o bomby s rádioaktívnym spádom, nenukleárne bomby, ktorých výbuch rozptýli rádioaktívnu látku uloženú vo vnútri. Rozptýl rádioaktívneho materiálu spôsobuje znečistenie a následné zdravotné riziko. Bomby sú na technologicky vyspelej úrovni a ich použitie na určitom území môže túto oblasť spraviť neobývateľnou po mnoho rokov, dokonca desaťročí.

Ďalšie typy moderných zbraní obsahujú vonkajší kryt z uránu. Neutróny produkované pri fúzii spôsobia štiepenie prírodného, neobohateného uránu a mnohonásobné zväčšenie výnosu zbrane.

Kobaltová bomba je založená na princípe syntézy ľahkých jadier. Konštrukčne je usporiadaná tak, že časť (napríklad obal) je vyrobená z takých nuklidov, v ktorých emisia rýchlych neutrónov emitovaných pri termonukleárnom výbuchu indukuje aktivitu takého polčasu rozpadu, aký je nutný na dosiahnutie požadovanej intenzity ionizujúceho žiarenia. Ožiarene nuklidy, teraz už rádionuklidy, sú pri explózii rozmetané do okolia a spôsobujú kontamináciu takého stupňa, ktorý niekoľkokrát presahuje stupeň spôsobený štiepnou náložou rovnakej mohutnosti. Pretože jedným z najvhodnejších prvkov je kobalt, ktorého nuklid ^{60}Co má požadované vlastnosti, nazýva sa táto nálož kobaltová. Nie vždy sa ale musí použiť kobalt. Rôzny rádioaktívny spád závisí od druhu pridaných izotopov. Pre krátkodobý rádioaktívny spád bolo navrhnuté zlato, pre mesiace trvajúci rádioaktívny spád nikel a tantal. Aby boli tieto izotopy vhodné, musia byť bohaté na prirodzené elementy a po zrážke s neutrónom produkt musí byť silný gama žiarič. Primárnym účelom tejto zbrane je vytvoriť extrémne rádioaktívny spád a tým zároveň zabrániť vstupu armáde. Takáto kobaltová, ani iná podobná bomba, nebola nikdy podrobená atmosferickým testom a ako je zároveň aj známe verejnosti, nikdy takúto bombu nevyrobili. Pri napriek jednoduchej dostupnosti je nepravdepodobné, že takáto bomba bude niekedy vyrobená. Aj keď Veľká Británia testovala bombu, do ktorej experimentálne včlenili kobalt, toto 1 kt zariadenie a celý experiment s ním, prevedený na testovacom mieste v Austrálii, bol považovaný za omyl, a už nikdy sa nezopakoval. S polčasom rozpadu 5 rokov by sa museli ľudia pod zemou ukrývať veľmi dlhý

čas, čo by zapríčinilo v extrémnom prípade, pri použití veľkého množstva takýchto bômb možno až vyhubenie ľudskej rasy.

Neutrónová bomba je malá termonukleárna zbraň. Pri fúzii dochádza k produkcii neutrónov, ktoré sú uvoľnené do vonkajšieho prostredia pomocou röntgenových zrkadiel. Kryt je vyrobený z niklu alebo chrómu. Takéto intenzívne uvoľnenie neutrónov má vysoko ničivé účinky. Bomba je zároveň štandardnou termonukleárnou zbraňou, len s nižším účinkom. Neutróny sú prenikavejšie ako iné druhy radiácie, takže len málo tieniacich materiálov účinných proti gama žiareniu je účinných aj pre neutróny. Zbraň spôsobuje malé materiálne škody, avšak čo sa týka biologických škôd je na poprednom mieste. Kým jadrové zbrane, zvlášť stredných a veľkých mohutností vyradujú organizmy prevažne kombinovanými účinkami svetelného žiarenia, tlakovej vlny, prenikavej radiácie a spôsobujú ničenie techniky, objektov, materiálu a kontamináciu terénu, pri neutrónových zbraniach je hlavným ničivým faktorom prenikavá radiácia, teda tok neutrónového žiarenia so širokým energetickým spektrom. Maximálny dosah neutrónového žiarenia vo vzduchu je 1200 až 1300 metrov, pretože neutróny v atmosfére vstupujú do interakcií s jej zložkami a sú spomaľované, rozptyľované a zabrzdené. Pri neutrónových zbraniach je účinok ostatných ničivých faktorov podstatne nižší ako pri klasických štiepnych jadrových zbraniach. Rádioaktívna kontaminácia terénu je pri neutrónovej zbrani približne 1000-krát menšia ako pri klasickej štiepnej náloží.

13.2.1 JADROVÉ VÝBUCHY

Tak ako navrhnuť jadrovú bombu, rovnako dôležité je matematicky modelovať procesy, ktoré vedú k explózii. Potom nastupuje počítačová simulácia, pričom treba vziať do úvahy množstvo výpočtov, ktoré je potrebné urobiť. Vždy je stanovených niekoľko predpokladov, ale bez otestovania nie je žiadny z nich absolútne správny. Čím je testovaná zbraň komplikovanejšia, tým viac testov treba vykonať. Druhy testov jadrových zbraní používané na overenie predpokladov a vytvorenie matematického modelu sa rozdeľujú do niekoľkých skupín. Sú to **hydrodynamické testy**, ktoré nepoužívajú štiepny materiál alebo používajú podkritické množstvá. Predpona „hydro“ sa používa, pretože plutónium sa správa ako tekutina pod silným tlakom a teplotou, ktoré sa dosahujú. **Hydronukleárne testy** používajú štiepny materiál, výnos je nízky, kolíše medzi kg až niekoľkými tonami a **subkritické testy**, tieto používajú štiepny materiál, výnos je nulový.

Podľa spôsobu testovania jadrovej zbrane rozdeľujeme testy na testy vykonané na zemskom povrchu, atmosferické testy, testy vykonané pod vodou a podzemné testy (výbuch náložie môže byť vykonaný v šachtách (vertikálne) alebo v tuneloch (horizontálne)).

Pri pozemnom jadrovom výbuchu sa tlaková vlna šíri od epicentra výbuchu v pologuľovitých plochách. Čelo tlakovej vlny pôsobí rovnobežne s povrchom terénu. Časť energie výbuchu sa spotrebuje na seizmické vlnenie, ktoré spôsobuje otrasy pôdy (tak ako pri zemetrasení). Otrasy pôdy zaznamenávajú seizmické stanice. Samozrejme, signál, ktorý zachytí stanica pri jadrovej explózii je iného charakteru ako signál pri zemetrasení a dá sa ľahko rozlíšiť. Pri atmosferickom výbuchu nárazová vlna prenesie len malý zlomok z celkovej energie ako seizmickú energiu. Dôležitá je v tomto prípade hustota vzduchu a zeme, ktorá je u oboch rôzna. Jadrové zariadenie, ktoré exploduje len niekoľko metrov pod zemou, oproti atmosferickému výbuchu s rovnako veľkou silou, znásobí svoju energiu oveľa efektívnejšie a vytvára oveľa intenzívnejšie a ničivejšie seizmické otrasy.

Pozemný ako aj atmosferický jadrový výbuch sprevádzajú niektoré charakteristické znaky, ktoré sú postrehnuteľné ľudskými zmyslami, obrázok 47. Je to predovšetkým okamžitý osľňujúci záblesk, vytvorenie ohnivej oblasti, ktorá po niekoľkých sekundách hasne, vytvorenie oblaku a tlaková vlna. Okrem toho je výbuch sprevádzaný ďalšími prejavmi, ktoré môžeme našimi zmyslami postrehnúť spravidla len sprostredkovane, pomocou špeciálnych prístrojov, t.j. prenikavou radiáciou, elektromagnetickým impulzom a rádioaktívnou kontamináciou. Popísaný vonkajší obraz je do značnej miery závislý na druhu a mohutnosti použitej zbrane.

Predpoklady na vytvorenie atómovej bomby sú prísnejšie ako na vybudovanie jadrového reaktora. Kým prvý jadrový reaktor v Chicagu v roku 1942 sa zaobišiel bez vysoko obohateného uránu ^{235}U , v atómovej bombe musí byť podiel štiepiteľných izotopov uránu na celkovom obsahu uránu podstatne väčší ako v jadrovom reaktore. Prírodné zásoby uránu obsahujú až 99,3 % neštiepiteľného ^{238}U a len 0,7 % štiepiteľného ^{235}U . Ak by sa teda mala atómová bomba vyhotoviť len z prírodného uránu, muselo by byť jeho množstvo také obrovské, že by sa bomba už nedala prakticky dopraviť na miesto použitia. Preto prvoradou úlohou bolo vyvinúť vhodnú techniku obohacovania uránu a získania dostatočného množstva ^{235}U . Na priebeh reakcie musí byť objem rádioaktívneho štiepiteľného materiálu taký veľký, aby každý voľný neutrón mohol pôsobiť na ďalší atóm. Takzvaný kritický objem je minimálne množstvo potrebné na udržanie reťazovej reakcie. Tento objem sa v najjednoduchších konštrukciách atómových bômb dosahuje tak, že sa spoja dva podkritické objemy do nadkritického množstva odpálením pomocných náloží klasickej výbušniny. Nastáva explózia a detonáciou sa uvoľní veľké množstvo energie, vzniká teplota dosahujúca viac ako 14 miliónov stupňov.

Dňa 16. júla 1945 americkí vedci vyskúšali v Alamogorde v štáte Nové Mexiko atómovú bombu a vzápätí 6. až 9. augusta sa stala pohromou pre japonské mestá Hirošimu a Nagasaki. Spojené štáty sa rozhodli použiť tento krajný prostriedok, aby urýchlili koniec konfliktu, pretože Japonsko bolo rozhodnuté pokračovať vo vojne. Najskôr vybuchla

v Hirošime prvá atómová bomba. Druhým cieľom mala byť Kokura, mesto so 400 000 obyvateľmi, kde pracovali najväčšie zbrojovky v krajine.

Lietadlo B-29 Superfortress, označované ako obranná zbraň západnej pologule, vzlietla s ťažkým nákladom. Keď uvideli obrysy Kokury vystúpili do bombardovacej výšky 9000 metrov. Nad mestom sa vznášala vrstva oblačnosti a bomba mohla byť zvrhnutá iba pri dokonalej viditeľnosti. Zbrojársky závod v Kokure bežal na plné obrátky keď mračná dymu zastreli výhľad. Prvý nálet bol zrušený a keď protiletadlová obrana ukázala, že Kokura je jedno z najlepšie strážených pásiem v japonskej ríši, z druhého a ani z tretieho pokusu nebolo napokon nič. Americké vojská sa dohodli na druhom ciele – Nagasaki. Zásoby paliva dovoľovali posádke jediný prelet, rozhodnutie bolo na kapitánovi, ktorý dal príkaz vypustiť bombu, aj keď Nagasaki pôvodne nefigurovalo medzi štyrmi cieľmi Hirošima, Niigata, Kokura a Kjótó.



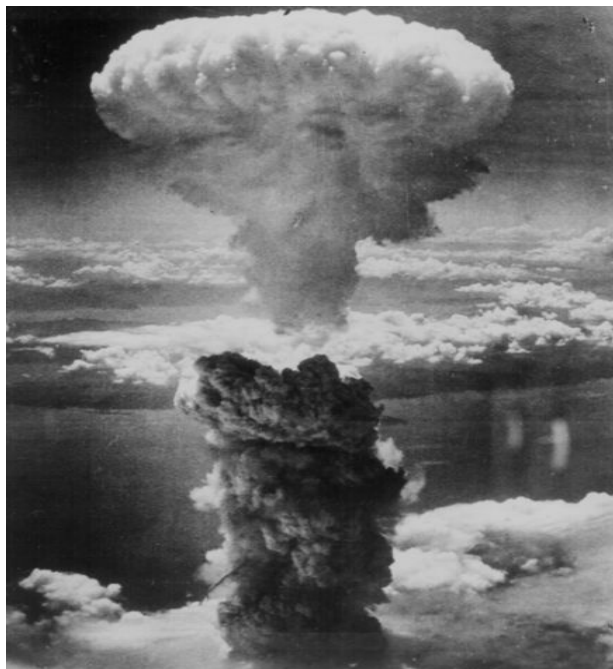
Obr. 47 Jadrový výbuch, atmosferické testy, podvodné testy.

V bombe začali pracovať hodinové mechanizmy, ktoré zabraňovali predčasnému výbuchu. Vnútorňý radarový systém kontroloval stratu výšky. Dĺžka pádu bola 52 sekúnd, bomba explodovala päťsto metrov nad terénom. Pri explózii sa v prvej milióntine sekundy mení bomba na kľbko plynov a pár, ktorých teplota dosahuje až 110 miliónov stupňov Celzia. V tomto okamihu je 75% energie vydané ako tepelné žiarenie. Plyny sa začnú prudko rozpínať a za niekoľko sekúnd, pri bombe so silou 1 Mt vytvoria rozžeravenú guľu o priemere asi 2000 m. Guľa stúpa do výšky rýchlosťou 300–500 km/h. Na konci prvej minúty po výbuchu má táto guľa priemer 7000 m. Svietiť prestáva asi po 7 minútach, keď jej teplota dostatočne poklesne, jej priemer vtedy dosahuje až 25 km a výšku 20 km. Toto náhle rozpínanie vytvorí tlakovú vlnu, ktorá s pribúdajúcou vzdialenosťou od miesta výbuchu slabne. Rýchlosť tlakovej vlny môže dosiahnuť niekoľko 100 km/h. S tlakovou vlnou sú spojené dva súčasne prebiehajúce javy. Statický pretlak, t.j. náhle zvýšenie tlaku vytvoreného nárazovou vlnou. Pretlak na danom mieste je priamo úmerný hustote vzduchu vo vlně. Dynamické tlaky tlačia, búrajú a vytrhávajú objekty. Tlaková vlna takto vyprázdnila okruh deväťsto metrov okolo nultého bodu, ale aj vo vzdialenosti piatich kilometrov rozmetala steny a strechy obydlí.

Intenzívne teplo žeravej gule spálilo každý horľavý povrch do vzdialenosti niekoľkých km. Oheň, ktorý takto vzniká spotrebuje veľké množstvo kyslíka a spôsobí búrku, ktorá je známa ako „ohňová búrka“. V Hirošime sa takáto búrka vytvárala 20 minút po detonácii. Búrka má silu víchrice a postupuje z centra všetkými smermi. Žeravá guľa potom stúpa a vytvára sa z nej hríbovitý oblak vysoký asi 30 km, ktorý chladne a rozpína sa, obrázok 49. Jeho maximálna šírka je 85 km. Tak ako guľa chladne, vyparený materiál, na ktorom sa usadili rádioaktívne produkty jadrového výbuchu, tuhne a padá v podobe rádioaktívneho prachu. Ľahšie častice môže vietor zaniest niekoľko stoviek km od miesta výbuchu. Asi po 96 hodinách od chvíle výbuchu dopadajú na zem. Toto je miestny rádioaktívny spád. Okrem toho menšie rádioaktívne častice, ktoré stúpajú do horných vrstiev atmosféry, sú rozšírené okolo celej zemegule a tvoria globálny spád. Množstvo materiálu, ktoré sa dostane do atmosféry, závisí od výšky výbuchu nad povrchom zeme. Hirošimská atómová bomba uvoľnila celkovo 3,2 milióna kWh energie. Uvoľnená energia sa delí na tri druhy, asi 35 % tvorí tepelné žiarenie, 50 % tvorí energiu tlakovej vlny a 15 % zostáva na rôzne druhy rádioaktívneho žiarenia. Všetky tri formy energie majú časovo a priestorovo rozdielne ničivé účinky, ktorých dosah závisí od miesta detonácie. Účinky 20-kilotonovej atómovej bomby hirošimského typu majú následky na ľudí a zariadenia na zemskom povrchu. Tepelný účinok vychádza najskôr zo svetelného záblesku a potom trvá asi len 10 sekúnd. Za tento čas roztaví v okruhu asi 1000 m kovové predmety a v okruhu do 2500 m spáli všetky horľavé predmety.

Medzi ľuďmi, ktorí bývali v okruhu menšom ako je dvadsať kilometrov od centra výbuchu, bolo vyše percento leukemikov, viac bolo prípadov rakoviny štítnej žľazy, šedého zákalu, kožných chorôb, porúch nervovej sústavy a predčasného starnutia. Tri kilometre od štvrte Urakami je v kultúrnom stredisku niekoľko pozostatkov po katastrofe, pokrútené rámy, kamene, ktoré sa doslova „uvarili“ a ďalšie zaujímavosti. Vzhľadom na rozsiahle ničivé účinky predstavuje atómová bomba pre ľudstvo obrovskú hrozbu.

Na hodnotenie udalostí na jadrových zariadeniach existuje medzinárodná stupnica INES.



Obr. 48 Takzvaný „hríb“ prachu, plynov a pár.



Obr. 49 Hirošima po výbuchu.

ZOZNAM POUŽITEJ LITERATÚRY

1. Varga Š., Tölgyessy, J.: Rádiochémia a radiačná chémia, Základy a aplikácie, Alfa, Bratislava, 1976
2. Tölgyessy J., Varga Š.: Nukleárna analytická chémia, 1. vydanie, Bratislava, 1971
3. Šáro Š., Tölgyessy, J.: Rádioaktivita prostredia, ALFA VTEL, Bratislava 1985
4. Mikulaj V., Macášek F., Kopunec R.: Základy rádiochémie, Prírodovedecká fakulta UK, Bratislava, VŠ skriptá, 1980
5. Andrysek O., Zámečník J.: Radioizotopové metody, Avicenum - Zdravotnické nakladatelství, Praha, 1972
6. Tölgyessy J.: Otázky a odpovede z jadrovej chémie a technológie, Alfa, Bratislava, 1987
7. Gosman A.: Jaderné metody v chemickém výzkumu, Academia, Praha, 1989
8. Navrátil O.: Jaderná chemie, Academia, Praha, 1985
9. Majer V. a kol.: Základy jaderné chemie, SNTL, Praha, 1981
10. Jandl J., Petr I. : Ionizující záření v životním prostředí, SNTL – nakladatelství technické literatury, PRAHA 1998
11. Sedlák L., Glončák P., Durdiak J.: Jadrové a chemické zbrane (História a súčasnosť). VVTŠ Liptovský Mikuláš, 1988
12. http://en.wikipedia.org/wiki/Nuclear_chemistry
13. http://www.chem.duke.edu/~jds/cruise_chem/nuclear/nuclear.html
14. <http://chemed.chem.purdue.edu/genchem/topicreview/bp/ch23>
15. <http://www.nitrogenorder.org/lessons/nuclear.shtml>
16. http://en.wikipedia.org/wiki/Nuclear_weapon