

RADIOAKTIVITA A IONIZUJÍCÍ ZÁŘENÍ

Jiří Švec

Doplňující učební text pro předměty Bakalářská fyzika,
Aplikovaná fyzika, Ochrana před zářením

OBSAH

OBSAH.....	3
1 IONIZUJÍCÍ ZÁŘENÍ.....	4
2 RADIOAKTIVITA.....	4
2.1 PŘIROZENÁ A UMĚLÁ RADIOAKTIVITA	4
2.2 ROZPADOVÝ ZÁKON. PŘEMĚNOVÁ KONSTANTA. POLOČAS PŘEMĚNY.....	7
2.3 JADERNÉ ZÁŘENÍ A JEHO VLASTNOSTI	9
3 VELIČINY A JEDNOTKY	14
3.1 ÚVOD.....	14
3.2 VELIČINY CHARAKTERIZUJÍCÍ ZDROJE ZÁŘENÍ.....	14
3.3 VELIČINY CHARAKTERIZUJÍCÍ PŮSOBNÍ ZÁŘENÍ NA LÁTKU	15
3.4 VELIČINY POUŽÍVANÉ V RADIAČNÍ OCHRANĚ	15
4 PRINCIPY DETEKCE IONIZUJÍCÍHO ZÁŘENÍ.....	17
4.1 ROZDĚLENÍ DETEKTORŮ	17
4.2 ELEKTRICKÉ DETEKTORY	18
4.3 SCINTILAČNÍ DETEKTORY	23
4.4 FILMOVÉ DOZIMETRY	24
4.5 INTERPRETACE MĚŘENÍ.....	25
5 BIOLOGICKÉ ÚČINKY ZÁŘENÍ	25
6 DÁVKOVÉ LIMITY.....	29
7 VYUŽITÍ IONIZUJÍCÍHO ZÁŘENÍ.....	30
7.1 ÚVOD.....	30
7.2 VYUŽITÍ UZAVŘENÝCH ZÁŘIČŮ.....	30
7.3 VYUŽITÍ OTEVŘENÝCH ZÁŘIČŮ. RADIOAKTIVNÍ INDIKÁTORY.....	33
7.4 RADIAČNÍ TECHNOLOGIE	33
8 POUŽITÁ LITERATURA	34

1 IONIZUJÍCÍ ZÁŘENÍ

Ionizující záření je schopné při průchodu prostředím způsobit jeho ionizaci, tj. vytvořit z původně elektricky neutrálních atomů kladné a záporné ionty (iontové páry). S ohledem na charakter ionizačního procesu lze ionizující záření rozdělit na přímo ionizující a nepřímo ionizující.

Přímo ionizující záření je tvořeno nabitými částicemi (elektrony, pozitrony, protony, částice alfa a beta ap.), které mají dostatečnou kinetickou energii k tomu, aby mohly vyvolat ionizaci. Nepřímo ionizující záření zahrnuje nenabitě částice (fotony, neutrony ap.), které samy prostředí neionizují, ale při interakcích s prostředím uvolňují sekundární, přímo ionizující nabitě částice. Ionizace prostředí je pak způsobena těmito sekundárními částicemi.

Zdroje ionizujícího záření mohou být radionuklidy (přirozené nebo umělé) nebo generátory (RTG lampa, urychlovače a pod). radionuklidy mají nestabilní atomová jádra, rozpadají se a emitují ionizující záření.

2 RADIOAKTIVITA

2.1 Přirozená a umělá radioaktivita

Atomy všech látek se skládají ze tří druhů částic: protonů, neutronů a elektronů. Protony a neutrony tvoří jádro atomu, kde je soustředěna prakticky veškerá hmotnost atomu. Elektrony obíhají kolem jádra po přibližně kruhových drahách v relativně značných vzdálenostech.

Ne všechny kombinace počtu protonů a neutronů tvoří stabilní jádra. Lehká jádra ($A < 20$) se skládají z přibližně stejného počtu protonů a neutronů, v těžších jádrech se podíl neutronů stále zvyšuje. Je to nutné proto, že kladně nabitě protony se navzájem elektrostaticky odpuzují a toto odpuzování je v jádrech s více než deseti protony již tak silné, že ke stabilitě jádra je zapotřebí přebytku neutronů, které vytvářejí přitažlivé síly. Hranicí schopnosti neutronů udržet jádro stabilní je izotop vizmutu $^{209}_{83}\text{Bi}$, který je nejtěžším stabilním nuklidem. Všechna těžší jádra jsou nestabilní a samovolně se rozpadají na jádra lehčí, která jsou stabilní nebo ke stabilní konfiguraci jádra vedou. Tento jev se nazývá přirozená radioaktivita.

Vedle přirozené radioaktivity existuje také radioaktivita umělá, kdy nestabilita atomového jádra je vyvolána uměle (obvykle jadernou reakcí). Umělá radioaktivita se řídí stejnými zákonitostmi jako přirozená radioaktivita.

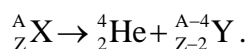
Radioaktivní rozpad má tři významné vlastnosti:

- a) Mění chemickou podstatu látky
- b) Je nezávislý na vnějších podmínkách (tlak, teplota, vlhkost, horotvorné pochody ap.)
- c) Je doprovázen emisí tří druhů záření - alfa (jádra helia), beta (elektrony), gama (fotony) - které působí na hmotu (ionizace, fluorescence, černání fotografických vrstev ap.).

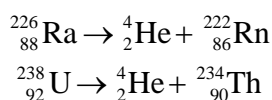
Radioaktivní jádra se mohou rozpadat několika způsoby:

a) α -rozpad

Jádro emituje jádro helia (helion). Hmotnostní číslo prvku se zmenší o 4, atomové číslo se zmenší o 2. Prvek se posune o dvě místa vlevo v periodické soustavě

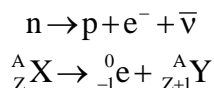


Jako příklady α - rozpadu lze uvést

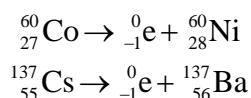


b) β^- - rozpad s emisí elektronu (β^- - rozpad)

Jádro emituje elektron. Vzhledem k tomu, že elektrony v jádře nejsou, předchází β^- - rozpadu přeměna neutronu v jádře na proton, elektron a antineutrino. Hmotnostní číslo prvku se nezmění, atomové číslo se zvětší o jedničku. Prvek se posune o jedno místo vpravo v periodické soustavě:



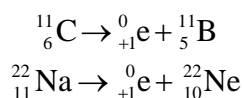
Jako příklady β^- - rozpadu lze uvést



c) β^+ - rozpad s emisí pozitronu (β^+ - rozpad)

Jádro emituje pozitron, který vzniká přeměnou protonu v jádře na neutron, pozitron a neutrino. Hmotnostní číslo prvku se nezmění, atomové číslo se zmenší o jedničku. Prvek se posune o jedno místo vlevo v periodické soustavě. Tento typ rozpadu se vyskytuje převážně u umělých radionuklidů.

Jako příklady β^+ - rozpadu lze uvést



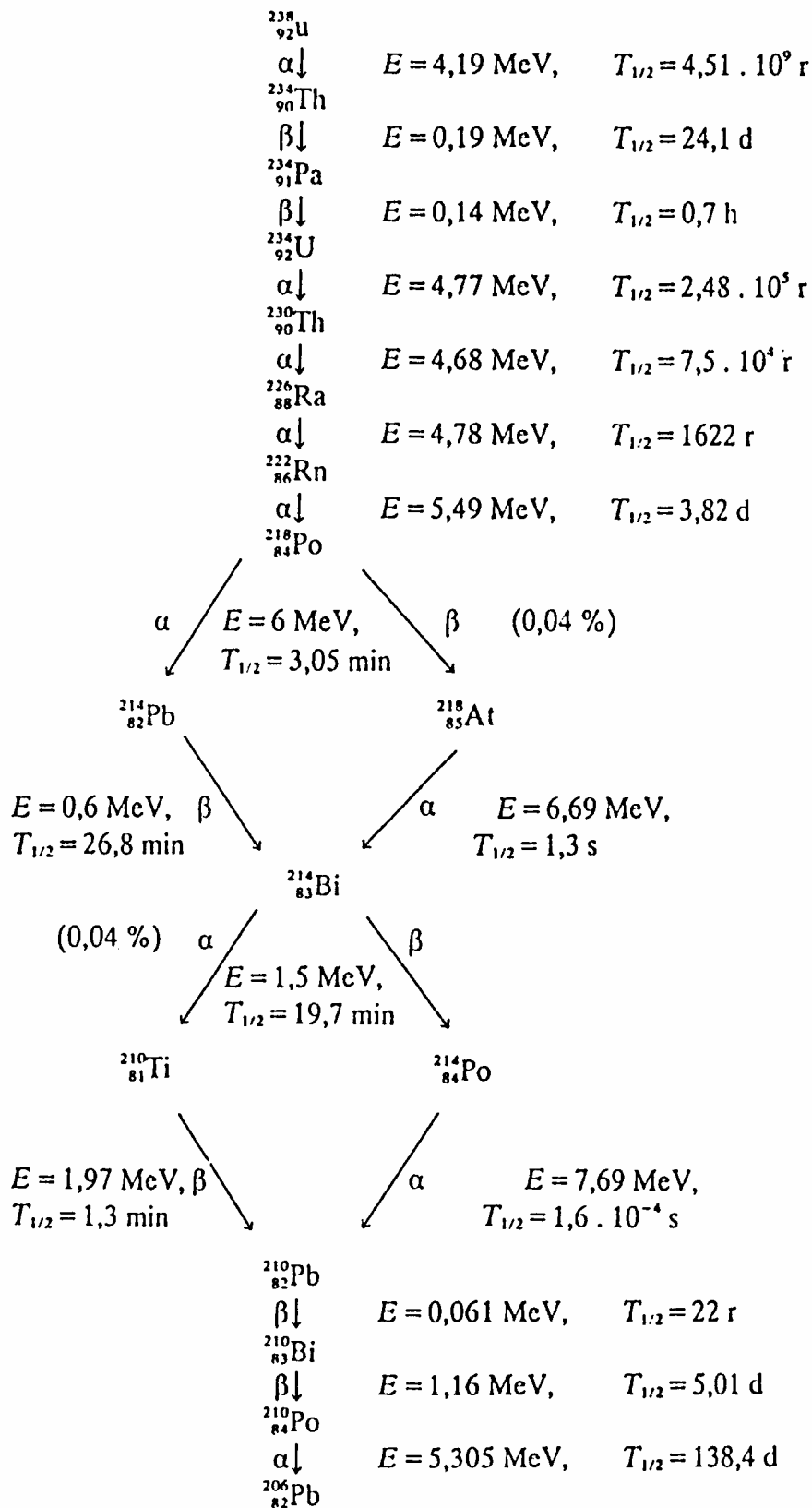
d) Izomerní přechod

Atomové jádro přechází z energeticky vyšší úrovně na nižší úroveň, což je doprovázeno emisí γ - záření. Hmotnostní ani atomové číslo se nemění.

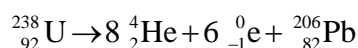
Přírozené radioaktivní prvky můžeme rozdělit na prvky, jejichž rozpadové produkty jsou také radioaktivní a dále se rozpadají (ty vytvářejí radioaktivní rozpadové řady) a na prvky, jejichž produkty rozpadu jsou stabilní (samostatné radioaktivní prvky).

V přírodě existují tři radioaktivní rozpadové řady, které se nazývají podle svých prvních (mateřských) prvků. Jedná se o rozpadovou řadu uranu (${}^{238}_{92}\text{U}$), aktinouranu (${}^{235}_{92}\text{U}$) a thoria (${}^{232}_{90}\text{Th}$).

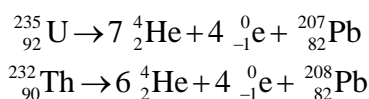
V rozpadové řadě uranu se mateřský prvek ${}^{238}_{92}\text{U}$ postupně mění přes řadu dceřiných radionuklidů po osmi přeměnách α a šesti přeměnách β na stabilní prvek ${}^{206}_{82}\text{Pb}$ (obr.1.)



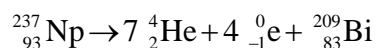
Obr. 1: Rozpadová řada uranu



Podobně lze popsat i rozpadové řady aktinouranu a thoria.



Uměle byla získána rozpadová řada neptunia.



Přirozené rozpadové řady mají některé společné vlastnosti:

- Mateřské prvky mají velmi dlouhé poločasy rozpadu (řádově 10^8 až 10^{10} roků).
- Členy řad jsou vesměs izotopy těžkých prvků, zhruba uprostřed každé řady je však plynný prvek (jedná se o izotopy radonu - zvané emanace).
- Produkty rozpadu emanací jsou krátce žijící radionuklidy, které se rozpadají současně α i β rozpadem, tyto dvojné rozpady větví řady.
- Rozpadové řady končí stabilními izotopy olova.

Vedle radionuklidů, které patří do některé z přirozených rozpadových řad existují i samostatné radionuklidy, jejichž produkty rozpadu jsou stabilní. Jedná se o izotopy prvků, které mají nestabilní poměr protonů a neutronů v atomovém jádře. Samostatné radionuklidy tvoří část přirozeného izotopického složení prvků. K nejznámějším samostatným radionuklidům patří ${}^3\text{H}$, ${}^{14}\text{C}$, ${}^{40}\text{K}$, ${}^{48}\text{Ca}$ a izotopy jódu, kobaltu, cesia a stroncia.

2.2 Rozpadový zákon. Přeměnová konstanta. Poločas přeměny.

Počet atomů radionuklidu při radioaktivním rozpadu ubývá s časem. Úbytek atomů je úměrný celkovému počtu atomů a času.

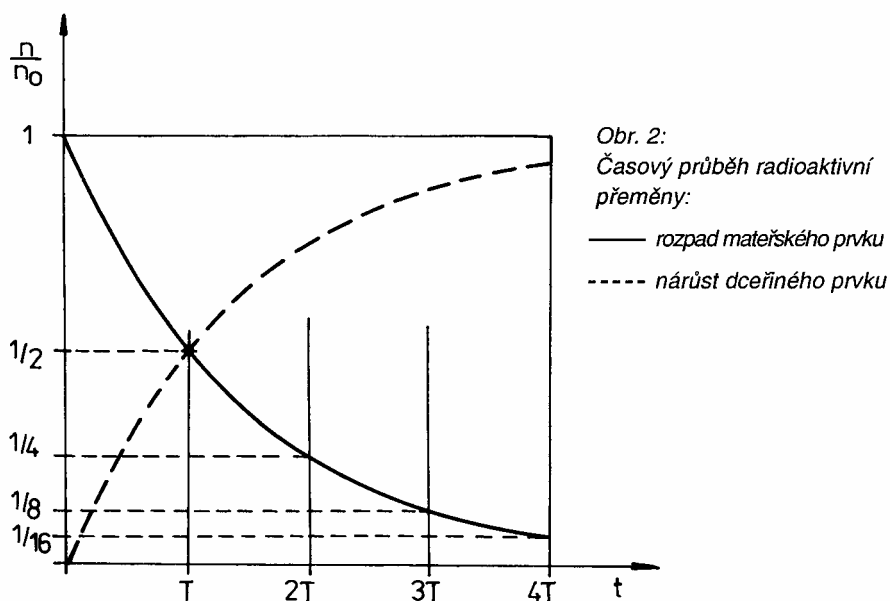
$$dn = -\lambda n dt \quad (1)$$

Po integraci získáme rozpadový zákon

$$n = n_0 e^{-\lambda t} \quad (2)$$

kde n_0 - původní počet atomů prvku existující v čase $t = 0$
 n - počet atomů prvku v čase t
 λ - přeměnová konstanta.

Pokles počtu atomů (resp. hmotnosti) radionuklidu s časem má tedy exponenciální charakter (obr. 2.).



Vypočítáme-li z (1) přeměnovou konstantu, obdržíme vztah

$$\lambda = \frac{-\frac{dn}{dt}}{n} \quad (3)$$

Přeměnová konstanta charakterizuje rychlost rozpadu radionuklidu a udává relativní úbytek počtu atomů za 1 s. Čím je větší přeměnová konstanta, tím rychleji se radionuklid rozpadá. Základní jednotkou přeměnové konstanty je s^{-1} .

Názornější charakteristika radionuklidu je poločas přeměny, který udává dobu, za kterou se rozpadne polovina původního počtu atomů radionuklidu (obr. 2.). Mezi poločasem přeměny a přeměnovou konstantou platí vztah

$$T = \frac{\ln 2}{\lambda} = \frac{0,693}{\lambda} \quad (4)$$

Poločas přeměny radionuklidů se pohybuje v širokém intervalu hodnot od zlomků sekund až po desítky miliard let. Čím je větší poločas přeměny, tím pomaleji se radionuklid rozpadá.

Důležitou charakteristikou radionuklidu je jeho aktivita, která udává počet rozpadlých jader radionuklidu za 1 s. Ze vztahu (1) vyplývá

$$A = -\frac{dn}{dt} = \lambda n \quad (5)$$

Aktivita radionuklidu je tedy dána součinem okamžitého počtu atomů a přeměnové konstanty. Jednotkou aktivity je becquerel (Bq), který má rozměr s^{-1} . Další informace jsou uvedeny v kapitole, která se zabývá veličinami a jednotkami.

2.3 Jaderné záření a jeho vlastnosti

a) Záření alfa

Záření alfa je tvořeno jádery helia (heliony). Částice alfa mají klidovou hmotnost $6,656 \cdot 10^{-27}$ kg, nesou dva elementární kladné náboje. Dosahují rychlosti řádově 10^7 m.s⁻¹ a jejich energie leží v rozmezí 4 MeV a 9 MeV. Vztah mezi energií α - částic (E_α) a přeměnovou konstantou (λ) udává Geiger-Nuttalův vztah

$$\ln \lambda = A + B \ln E_\alpha, \quad (6)$$

kde A, B jsou konstanty.

Z uvedeného vztahu vyplývá, že energie emitovaných alfa částic je tím větší, čím rychleji se radionuklid rozpadá.

Při průchodu alfa částic hmotným prostředím dochází k ionizaci. Částice vytváří při srážkách s atomy kladné a záporné ionty (tím, že vyrazí z elektronového obalu elektron). Při vytvoření jednoho páru iontů ve vzduchu ztratí alfa částice energii 32,5 eV, to znamená, že na celé své dráze vytvoří řádově 10^5 párů iontů.

Dráha, na které ztratí alfa částice veškerou svou energii se nazývá dolet. Vzhledem k tomu, že částice alfa rychle ztrácejí ionizační energii, je dolet alfa záření velmi malý. V plynech je to řádově několik centimetrů, v kapalinách a pevných látkách zlomky milimetrů. Ochrana před zevním ozářením α zářením nepředstavuje tedy větší problém.

Mezi alfa zářiče patří např. ²²⁶Ra, ²³⁹Pu a ²⁴¹Am.

b) Záření beta

Záření beta je tvořeno rychlými elektrony nebo pozitrony se značným rozsahem energií (až 16,6 MeV pro ¹²N). Elektrony jsou z jádra emitovány při samovolné přeměně jaderného neutronu na proton, elektron a antineutrino. Záření beta má spojité energetické spektrum, to znamená, že obsahuje částice s energiemi od nuly až po určitou maximální energii, která je pro daný nuklid charakteristická. Hodnoty maximální energie u běžně používaných β zářičů činí desítky keV až jednotky MeV.

Při průchodu beta částic hmotným prostředím mohou nastat tyto jevy:

- **Elastický (pružný) rozptyl**

Vlivem elektrických sil dochází k rozptylu β -záření jak na elektronech v obalu, tak na atomových jádrech. Výsledkem je změna směru β -záření. Rozptyl se uplatňuje hlavně u pomalých (nízkoenergetických) elektronů.

- **Ionizace**

Je hlavní příčinou ztráty energie beta částic při průchodu hmotným prostředím. Ionizační schopnost beta záření je výrazně nižší než ionizační schopnost alfa záření.

- **Brzdné záření**

Brzdění rychle letících elektronů (beta záření) při průchodu elektrickým polem jádra je spojeno se vznikem brzdného rentgenového záření (jedná se o jev prakticky shodný se vznikem rentgenového záření v RTG – lampách). Tímto způsobem vzniká elektromagnetické záření s pronikavostí podstatně větší než původní beta záření. Výtěžek i energie brzdného záření závisí - vedle energie beta záření - na atomovém čísle absorbující látky (u těžkých látek je výrazně

vyšší než u látek lehkých). Tuto skutečnost je nutné brát v úvahu při výběru stínících materiálů pro zářiče beta. Vhodné jsou látky obsahující lehké prvky (např. plexisklo).

Beta částice jsou relativně velmi malé a lehké (ve srovnání s částicemi alfa), proto jsou při průchodu hmotným prostředím velmi často rozptylovány jenom s malými ztrátami energie a jejich dráha může tedy být značně klikatá. Pokud je absorbující prostředí složeno z lehkých prvků, nezávisí dolet záření beta prakticky vůbec na konkrétním chemickém složení prostředí. Pro ilustraci lze uvést, že beta záření s maximální energií 2 MeV má dolet ve vzduchu přibližně 8 m, ve vodě 1 cm a v hliníku 4 mm.

K nejčastěji používaným beta zářičům patří např. ^{35}S , ^{63}Ni , ^{85}Kr , ^{90}Sr + ^{90}Y a ^{204}Tl .

Při průchodu β^+ záření hmotným prostředím se pozitron po ztrátě energie spojí s elektronem a dochází k tzv. anihilaci. Výsledkem jsou dva fotony gama záření o energii 511 keV (anihilační záření). Každý pozitronový zářič i jeho obal a okolní materiál jsou tedy současně zdrojem pronikavého fotonového anihilačního záření. Tuto skutečnost je třeba brát v úvahu při ochraně před pozitronovým zářením.

b) Záření gama

Záření gama je elektromagnetické záření (fotony) s velmi krátkou vlnovou délkou řádu 10^{-11} až 10^{-13} m. Vzniká při jaderných reakcích nebo radioaktivním rozpadu přechodem jádra z vyššího do nižšího energetického stavu, přičemž se jádro zbavuje své excitační energie. Čistých gama zářičů je velmi málo, záření gama obvykle doprovází alfa nebo beta záření. Energie fotonů gama záření je dána vztahem

$$E = h \frac{c}{\lambda}, \quad (7)$$

kde h - Planckova konstanta, $6,64 \cdot 10^{-34}$ J.s

c - rychlost elektromagnetického záření ve vakuu, $3 \cdot 10^8$ m.s $^{-1}$

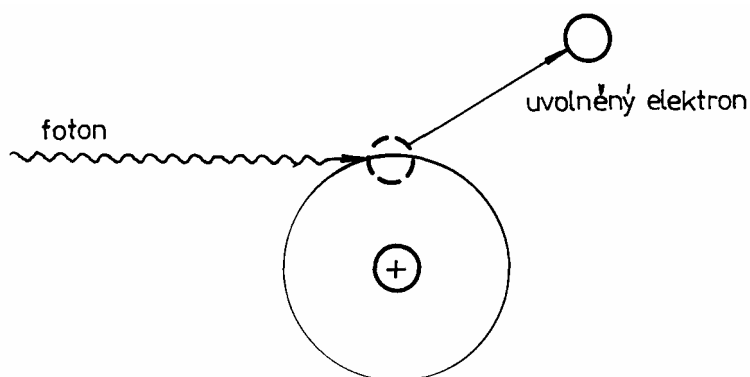
λ - vlnová délka záření

Záření gama má čárové spektrum, to znamená, že daný radionuklid emituje pouze fotony s určitými energiemi, které jsou pro jeho přeměnu charakteristické. U prakticky používaných zdrojů záření gama činí jeho energie desítky keV až jednotky MeV. K nejčastěji používaným zdrojům gama záření patří ^{60}Co a ^{137}Cs .

Interakce gama záření s hmotným prostředím se výrazně odlišuje od interakce elektricky nabitých částic. Při průchodu prostředím uvolňují fotony elektricky nabitě částice a předávají jim energii dodatečnou k tomu, aby byly schopné prostředí ionizovat a excitovat. Gama záření je tedy záření nepřímo ionizující a vyvolává následující tři interakce.

1. Fotoefekt (obr. 3)

Foton gama záření předá veškerou svou energii elektronu v atomovém obalu a tím - je-li tato energie větší než výstupní práce elektronu - elektron z obalu uvolní. Je-li elektron uvolněn z některého vnitřního orbitu, zaplní se uprázdněné místo elektronem z vyššího orbitu a přebytek energie se vyzáří ve formě fotonu. Ten má však velmi malou energii a většinou se pohltí se v okolním materiálu. Z tohoto důvodu lze fotoefekt považovat za prakticky úplnou absorpci gama záření. Pravděpodobnost fotoefektu se zmenšuje s rostoucí energií gama záření a roste s atomovým číslem materiálu. Projevuje se tedy hlavně u fotonů s nižší energií (řádově několik keV) a látek s vysokým atomovým číslem.

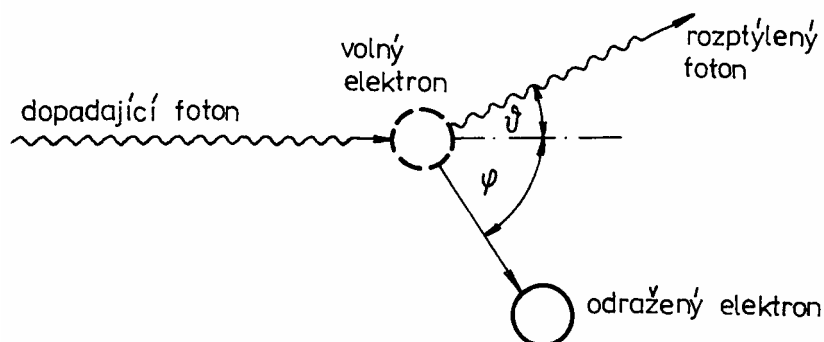


Obr. 3: Schéma fotoefektu

2. Comptonův rozptyl (obr. 4)

Je to interakce fotonů gama záření s volnými nebo jen velmi slabě vázanými elektrony (na rozdíl od fotoefektu, kde se jedná o interakci fotonu s pevně vázaným elektronem). Foton gama záření předá část své energie volnému elektronu a posune ho. Rozptýlený foton pak s nižší energií (tj. větší vlnovou délkou) pokračuje v pohybu v odlišném směru.

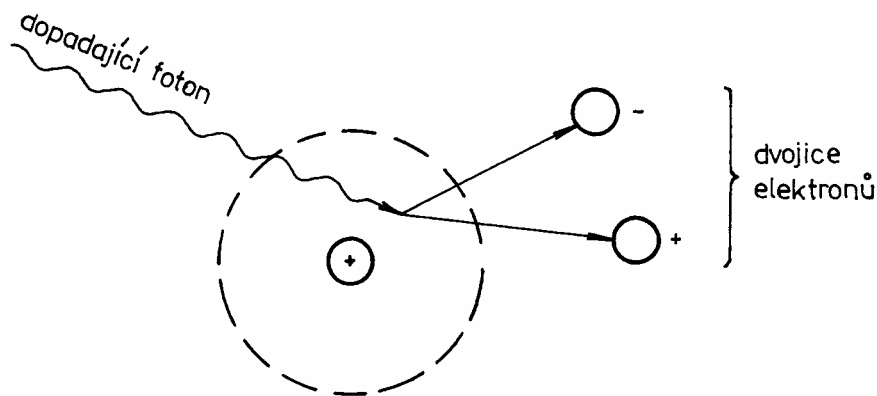
Comptonův rozptyl je převládajícím typem interakce gama záření středních energií s látkami s malým atomovým číslem.



Obr. 4: Schéma Comptonova rozptylu

3. Tvorba párů elektron - pozitron (obr. 5)

Má-li foton gama záření větší energii než 1,02 MeV (což je energetický ekvivalent dvou klidových hmotností elektronu) může být za určitých podmínek zcela pohlcen v elektrickém poli atomového jádra a přitom vznikne dvojice elektronů - elektron a pozitron. Případný přebytek energie pohlceného fotonu se projeví ve formě kinetické energie vytvořeného elektronového páru.



Obr. 5: Schéma tvorby elektronového páru

Z předchozího výkladu je zřejmé, že při průchodu určitého záření hmotným prostředím může dojít k různým typům interakcí. Veličina, která charakterizuje pravděpodobnost vzniku určité interakce v daném případě se nazývá účinný průřez. Tak např. při ozařování látek s vysokým atomovým číslem gama zářením o energii řádově v kiloelektronvoltech má vysoký účinný průřez fotoefekt a nízký účinný průřez Comptonův rozptyl a tvorba párů. Účinný průřez závisí na atomovém čísle ozařované látky a velmi výrazně na energii záření (často rezonančně).

V následující tabulce jsou uvedeny významné radionuklidy a jejich charakteristiky.

Tabulka 1.

Přehled vybraných radionuklidů a jejich fyzikální vlastnosti

Radionuklid	Poločas rozpadu	Způsob rozpadu	Energie částic (keV)	Energie gama (keV)
³ H	12,3 r	beta ⁻	18	-
¹⁴ C	5 730 r	beta ⁻	155	-
²² Na	2,6 r	beta ⁺	545	511 1 275
⁶⁰ Co	5,27 r	beta ⁻	318	1 173 1 333
⁶³ Ni	100 r	beta ⁻	66	-
⁶⁵ Zn	0,67 r	K - záchyt		1 115
⁸⁵ Kr	10,7 r	beta ⁻	695	-
⁹⁰ Sr	28,8 r	beta ⁻	546	-
⁹⁰ Y	64,1 h	beta ⁻	2 290	-
¹⁰⁹ Cd	1,24 r	K - záchyt		88
¹³⁷ Cs	30,2 r	beta ⁻	514	662
¹⁴⁷ Pm	2,62 r	beta ⁻	225	-
¹⁷⁰ Tm	0,35 r	beta ⁻	884 968	84
¹⁹² Ir	0,20 r	beta ⁻	240 536 672	296 308 317 468 a další
²⁰⁴ Tl	3,77 r	beta ⁻	763	-
²¹⁰ Pb	22,3 r	beta ⁻	15 61	47
²¹⁰ Bi	5,01 d	beta ⁻	1 160	-
²¹⁰ Po	0,38 r	alfa	5 310	-
²²⁶ Ra	1 600 r	alfa	4 785 4 601	186
²³⁹ Pu	24 100 r	alfa	5 105 5 143 5 155	-
²⁴¹ Am	433 r	alfa	5 486	60

U beta zářičů je uvedena maximální energie záření.

3 VELIČINY A JEDNOTKY

3.1 Úvod

Znalost fyzikálních veličin a dobrá orientace v nich je v každé oblasti fyziky a techniky velmi důležitá. V problematice ionizujícího záření a radiační ochrany je to o to důležitější, že tyto veličiny a jednotky nejsou obecně příliš známé.

Podívejme se nejprve co vlastně potřebujeme popsat. Jedná se prakticky vždy o tuto situaci: Je dán zdroj záření, který vyzařuje záření do svého okolí (pole záření) a toto záření působí jednak na libovolnou látku a jednak na člověka. Potřebujeme tedy veličiny, které charakterizují

- zdroje záření
- pole záření
- působení záření na látky
- působení záření na člověka.

V následujících odstavcích jsou postupně probrány veličiny a jednotky týkající se zdrojů záření, působení záření na látky a působení záření na člověka.

3.2 Veličiny charakterizující zdroje záření

- a) Poločas přeměny ... T (s, min, h, r)

Udává dobu, za kterou klesne počet atomů radionuklidu na polovinu původního počtu atomů.

- b) Přeměnová konstanta ... λ (s^{-1})

Udává relativní rychlost rozpadu radionuklidu

- c) Aktivita ... A (Bq)

Je počet radioaktivních přeměn (rozpadlých atomů) v radionuklidu za jednotku času.

Jednotkou aktivity je becquerel (Bq), jehož rozměr je s^{-1} . Je to jednotka velmi malá (znamená jednu přeměnu za sekundu), proto se v praxi vesměs používají její násobky (kBq, MBq, GBq atd.). Dříve se používala jednotka curie (Ci), přičemž $1 \text{ Ci} = 3,7 \cdot 10^{10} \text{ Bq}$.

Aktivita radionuklidu není veličina konstantní, ale klesá s časem podle exponenciálního vztahu

$$A_t = A_0 e^{-\frac{0,693}{T} t}, \quad (8)$$

kde A_0 - počáteční aktivita radionuklidu v čase $t = 0$ (Bq)

A_t - aktivita radionuklidu v čase t (Bq)

T - poločas přeměny radionuklidu (s).

Aktivita radionuklidu závisí na jeho hmotnosti. Vztah mezi těmito veličinami lze odvodit ze vztahu (5)

$$A = \lambda n, \quad (9)$$

kde počet atomů nahradíme hmotností

$$n = \frac{m}{M} N, \quad (10)$$

kde m – hmotnost radionuklidu

M – molární hmotnost radionuklidu

N – Avogadrovo číslo ($6,023 \cdot 10^{26}$ kilomol⁻¹).

Dosazením vychází

$$A = \lambda \frac{m}{M} N \quad (11)$$

$$A = \frac{0,693 N}{T M} m \quad (12)$$

kde T – poločas rozpadu radionuklidu.

K přesnější charakteristice radionuklidu je nutné vztáhnout aktivitu k vhodné hmotnostní, objemové nebo plošné jednotce (např. kg, m³, m⁻²). Pak obdržíme

- hmotnostní aktivitu ... a_m (Bq.kg⁻¹)
- objemovou aktivitu ... a_v (Bq.m⁻³, Bq.l⁻¹)
- plošnou aktivitu ... a_s (Bq.m⁻²).

d) Energie emitovaných částic

Jedná se o významnou veličinu jednak proto, že energie emitovaných částic je jednoznačnou charakteristikou radionuklidu, který tyto částice emitují a jednak proto, že vlastnosti záření (např. ionizace, dolet apod.) na energii výrazně závisí. Jednotkou energie je joule (J). Zde se však používá elektronvolt (eV), nebo jeho násobky (keV, MeV atd.), přičemž platí $1 \text{ eV} = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ J}$.

3.3 Veličiny charakterizující působení záření na látku

- Dávka

Je energie záření absorbovaná v hmotnostní jednotce ozařované látky. Označuje se písmenem D . Jednotkou dávky je gray (Gy) s rozměrem J.kg⁻¹. Dávka 1 Gy tedy znamená, že v jednom kilogramu ozařované látky se absorbuje energie záření 1 J. Dříve používaná jednotka byla rad, přičemž $1 \text{ rad} = 0,01 \text{ Gy}$.

- Dávkový příkon

Udává jak rychle se dávka mění. Je definován jako změna dávky za jednotku času.

Označuje se \dot{D} a jeho jednotkou je Gy.s⁻¹.

Dávka a dávkový příkon se používají pro hodnocení přímoionizujícího záření, pro hodnocení nepřímo ionizujícího záření se používají veličiny kerma a expozice.

3.4 Veličiny používané v radiační ochraně

Jedná se o veličiny, které vyjadřují působení ionizujícího záření na člověka. Vychází z dávky a berou v úvahu biologické účinky záření a radiosensitivitu tkání a orgánů.

- Ekvivalentní dávka v tkáni nebo orgánu

Je definována vztahem

$$H_T = w_R D_{TR}, \quad (13)$$

kde D_{TR} - střední dávka záření typu R ve tkáni nebo orgánu T (Gy)

w_R - radiační váhový faktor příslušný záření typu R.

Jednotkou ekvivalentní dávky je sievert (Sv). Radiační váhový faktor vyjadřuje relativní biologickou účinnost jednotlivých typů záření vzhledem k záření fotonovému. Jeho hodnoty jsou uvedeny v následující tabulce.

Tabulka 2.

Hodnoty radiačního váhového faktoru

Záření, energie	w_R
fotonové záření	1
beta záření	1
neutrony < 10 keV	5
neutrony (10 až 100) keV	10
neutrony (100 keV až 2 MeV)	20
neutrony (2 až 20) MeV	10
neutrony, > 20 MeV	5
alfa záření	20

Z tabulky vyplývá, že biologické účinky beta a gama záření jsou stejné a biologické účinky alfa záření jsou dvacetkrát větší než záření beta nebo gama. Dávka 1 mGy vyvolá v případě beta a gama záření ekvivalentní dávku 1 mSv, v případě alfa záření 20 mSv.

Vzhledem k tomu, že radiační váhový faktor pro beta a gama záření je jedna, je v tomto případě dávka číselně rovna ekvivalentní dávce.

- Efektivní dávka

Je definována jako součet vážených středních hodnot ekvivalentních dávek v tkáních nebo orgánech lidského těla

$$E = \sum w_T H_T, \quad (14)$$

kde H_T - ekvivalentní dávka v tkáni nebo orgánu (Sv)

w_T - tkáňový váhový faktor.

Jednotkou efektivní dávky je sievert (Sv).

Tkáňový váhový faktor vyjadřuje relativní příspěvek daného orgánu nebo tkáně k celkové zdravotní újmě způsobené rovnoměrným celotělovým ozářením. Jeho hodnoty jsou uvedeny v následující tabulce.

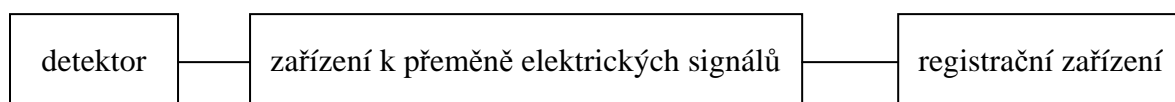
*Tabulka 3.
Hodnoty tkáňových váhových faktorů*

Tkáň, orgán	w_T
gonády	0,20
mléčná žláza	0,05
červená kostní dřeň	0,12
plíce	0,12
štítná žláza	0,05
povrch kostí	0,01
tlusté střevo	0,12
žaludek	0,12
játra	0,05
kůže	0,01
ostatní tkáně a orgány	0,05

4 PRINCIPY DETEKCE IONIZUJÍCÍHO ZÁŘENÍ

4.1 Rozdělení detektorů

Radiometrické přístroje a měřící metody jsou založeny na vlastnostech ionizujícího záření a jeho interakcích s hmotným prostředím. Základní schéma radiometrické aparatury je na obr.6.



Obr. 6: Blokové schéma radiometrické aparatury

V detektoru se mění energie dopadajícího ionizujícího záření na elektrický signál, který se v druhé části aparatury zpracovává tak, aby mohl být v poslední části aparatury zaregistrován a vyhodnocen.

Radiometrická aparatura může pracovat tak, že měří střední hodnotu proudu na detektoru nebo registruje jednotlivé impulsy z detektoru (tj. počítá částice, které prošly detektorem).

Podle účelu měření lze přístroje rozdělit na:

- Radiometry - slouží ke stanovení úrovně radioaktivity v daném prostoru
- Spektrometry - měří energii ionizujícího záření
- Průmyslová radiometrická zařízení - jsou určena k nejrůznějšímu využití radionuklidů v průmyslu, obsahují vhodný zdroj záření a měřicí aparaturu

Detektory můžeme rozdělit na dva základní druhy - kontinuální a integrální. Kontinuální detektory podávají průběžnou informaci o okamžité hodnotě měřené veličiny radiačního pole. Po ukončení ozařování detektoru klesne výstupní signál na nulu. U integrálních detektorů se hodnota signálu zvětšuje s dobou, po kterou je detektor ozařován (tj. úměrně dávce, expozici atp.). Po ukončení ozařování zůstává informace o ozáření v detektoru trvale uchována. Integrální detektory se uplatňují hlavně v osobní dozimetrii, v lékařství a radiační chemii.

Nejpoužívanější detektory ionizujícího záření můžeme rozdělit - dle principu detekce - do tří hlavních skupin:

a) Elektrické detektory

Jsou založeny na látkách, které působením ionizujícího záření mění některé své elektrické vlastnosti (např. vodivost), k těmto detektorům patří ionizační komory, proporcionální a Geiger - Müllerovy počítače, krystalové a polovodičové detektory.

b) Scintilační detektory

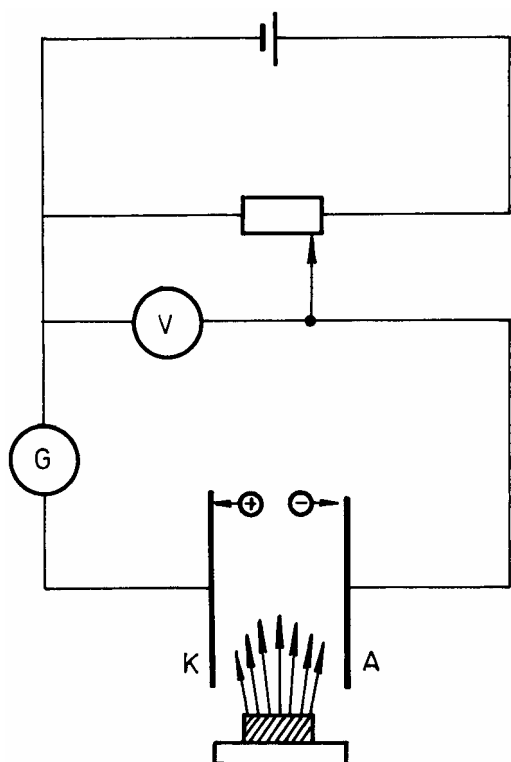
Jsou založeny na látkách, v nichž působením ionizujícího záření vzniká luminiscenční záření (scintilace). Světelný signál se převádí na elektrický a dále se zpracovává.

c) Samostatné detektory

Jsou založeny na látkách, které dlouhodobě mění své vlastnosti (barvu, složení, objem) působením ionizujícího záření. Jedná se vesměs o detektory integrální.

4.2 Elektrické detektory

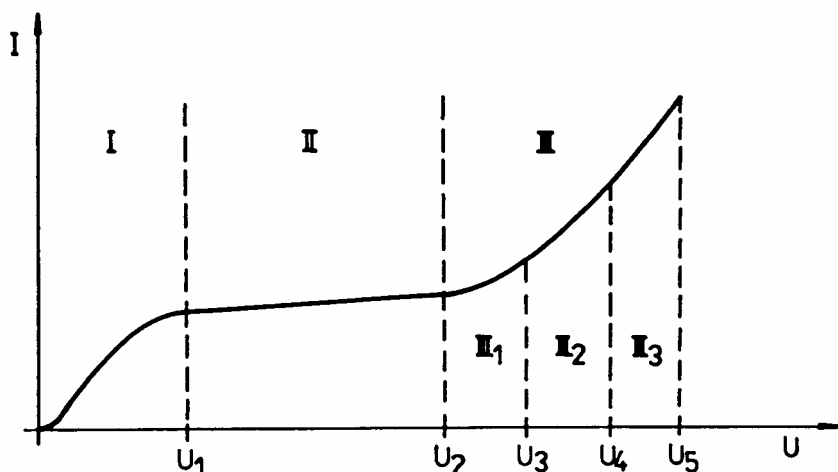
Elektrické detektory jsou vesměs různě upravené válcové nebo deskové kondenzátory. Připojíme-li k elektrodám kondenzátoru (dobře izolovaným vzájemně i vzhledem k okolí) elektrický zdroj, pak tímto obvodem - který je přerušen objemem vzduchu mezi elektrodami - začne procházet měřitelný proud, vložíme-li mezi elektrody zdroj ionizujícího záření (obr. 7). Mezi deskami kondenzátoru pak mohou probíhat následující tři pochody:



Obr. 7: Princip elektrických detektorů

- Ionizace,
ionty, které vytvoří ionizující záření, se pohybují k opačně nabitým elektrodám, v obvodu vzniká ionizační proud.
- Rekombinace,
při setkání kladného a záporného iontu může vzniknout opět neutrální atom nebo molekula. Pravděpodobnost rekombinace klesá s rostoucí rychlostí iontů tj. s rostoucím napětím na deskách kondenzátoru.
- Přídavná (sekundární) ionizace,
primární ionty mohou být urychleny na větší energii, než je ionizační energie plynu mezi deskami kondenzátoru a mohou v tomto prostoru vytvářet nárazovou ionizací další ionty.

Závislost ionizačního proudu na napětí mezi deskami kondenzátoru je znázorněna na obr. 8. Při stálé hustotě toku částic můžeme ionizační účinky ionizujícího záření v plynech rozdělit do tří oborů.



Obr. 8: Ionizační obory

- Obor Ohmova zákona (I),
ionty vzniklé primární ionizací spolu rekombinují, rekombinace klesá s rostoucím napětím a tím roste ionizační proud úměrně s napětím. Pro detektory se tento obor nevyužívá.
- Obor nasyceného proudu (II),
rekombinace ustává, všechny primární ionty se účastní vedení proudu, sekundární ionty ještě nevznikají, ionizační proud je nezávislý na napětí. V tomto oboru pracují ionizační komory.
- Obor přídavné ionizace (III),
primární ionty jsou urychleny do té míry, že vytvářejí další ionty nárazem na neutrální molekuly. Každý urychlený iont vytvoří K sekundárních iontů. Číslo K se nazývá koeficient zesílení (může nabývat až hodnoty 10^{10}).

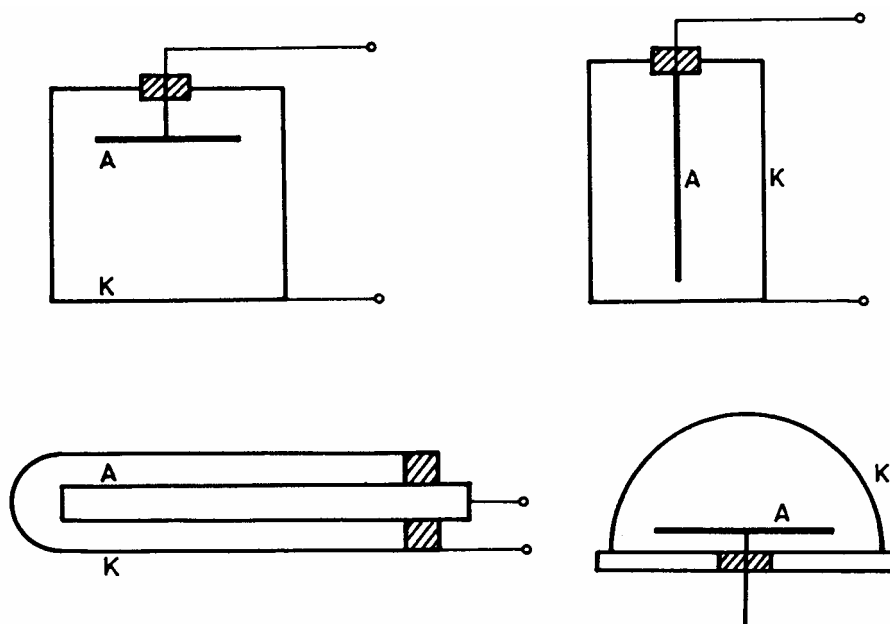
Obor přídavné ionizace můžeme rozdělit na tři části:

- obor úplné proporcionality (III1), kde pracují proporcionalní počítače;
- obor částečné proporcionality (III2), nebývá pro detektory využíván;
- obor Geiger-Müllerův (III3), kde pracují Geiger-Müllerovy počítače, napětí U_4 (obr. 8) se nazývá Geiger- Müllerův práh.

Základní typy elektrických detektorů jsou popsány v dalších odstavcích.

Ionizační komory

Ionizační komora je tvořena dvěma elektrodami (anoda, katoda) různého tvaru (vesměs se jedná o válcové kondenzátory), které jsou umístěny ve vhodné plynové náplni (vzduch nebo i jiné plyny za různého tlaku). Provozní napětí se volí tak, aby ionizační komora pracovala v oboru nasyceného proudu (asi 150 až 200 V). Ionty vytvořené ionizujícím zářením jsou přiváděny elektrickým polem k elektrodám komory a ve vnějším obvodu se projeví buď ionizačním proudem (ionizační komory s konstantní ionizací) nebo krátkým napěťovým impulsem (impulsní ionizační komory). Některé typy ionizačních komor s konstantní ionizací jsou na obr. 9.



Obr. 9: Ionizační komory s konstantní ionizací

Při měření alfa zářičů se vzorek umísťuje přímo do ionizační komory. Vzorky musí být velmi tenké, vzhledem k silné samoabsorpci alfa záření.

Zářiče beta se vkládají buď dovnitř ionizační komory, nebo je komora opatřena vstupním okénkem z materiálu o nízkém absorpčním koeficientu. Ionizační proud závisí na tvaru a konstrukci komory a na energetickém spektru zářiče. V plynové náplni komory je absorbována pouze část energie beta záření (dolet beta částic bývá většinou větší než jsou rozměry komory), zbývající část je pohlcena stěnami komory a k ionizačnímu proudu nepřispívá.

Ionizační komory pro gama záření využívají sekundární ionizace způsobené elektrony, které jsou uvolněny interakcí gama záření s náplní a stěnami ionizační komory. Hodnoty ionizačního proudu se pohybují v rozmezí 10^{-9} - 10^{-16} A. U silnějších zářičů je možno k měření ionizačního proudu použít velmi citlivé galvanometry, většinou se však používají elektrometry.

Při měření zaregistrujeme určitý ionizační proud i tehdy, není-li ionizační komora vystavena účinkům ionizujícího záření. Tento proud se nazývá pozadí ionizační komory a je způsoben:

- kosmickým zářením;
- radioaktivitou materiálu ionizační komory;
- kontaminací komory;
- nečistotami, vlhkostí.

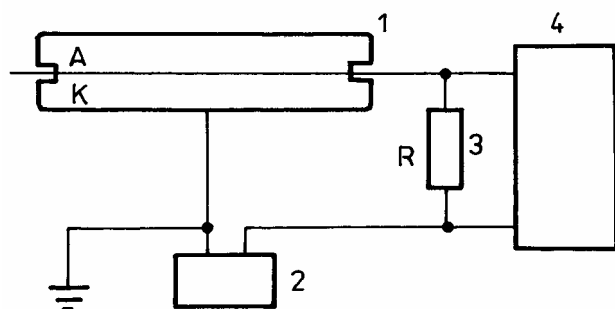
Velikost pozadí se potlačuje stíněním, výběrem vhodného materiálu pro výrobu ionizačních komor, čištěním atd. Úvahy o pozadí a jeho kompenzaci se týkají všech detektorů.

Ionizační komory nacházejí hlavní využití v dozimetrii při stanovení dávky, expozice a kerry ve vzduchu. Nezastupitelné jsou v provozech s vysokými teplotami (válcovny, hutě ap.), kde ostatní známé detektory pracovat nemohou.

Geiger - Müllerovy počítáče

Geiger-Müllerovy počítáče mají tvar trubice s pláštěm z kovu nebo umělé hmoty. Katoda je většinou tvořena válcem z tenkého plechu (o průměru ≈ 10 mm), anodu tvoří tenký drátek (o poloměru $\approx 0,05$ mm), který je napnutý v ose trubice.

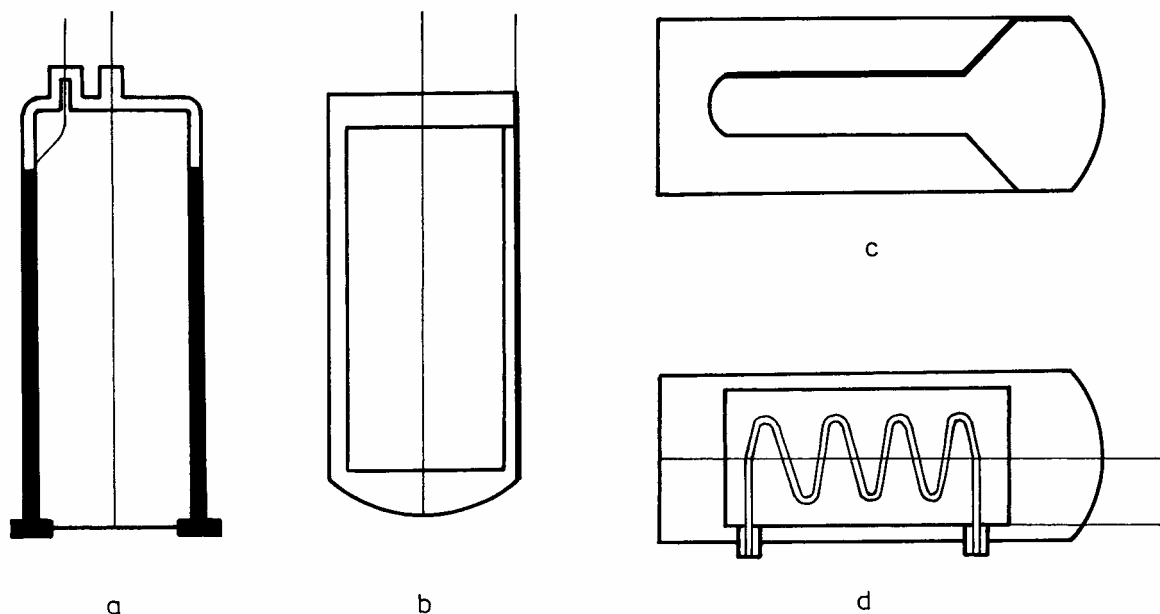
Tyto počítáče pracují v Geiger-Müllerově oboru (viz obr. 8) Schéma zapojení počítáče je na obr. 10. Po vniknutí nabitě částice do počítáče, nastane v počítáči vlivem sekundární ionizace lavinovitě narůstání počtu iontů (koeficient zesílení je až 10^{10}). Průchod každé částice je tedy doprovázen samovolným výbojem v celém objemu počítáče, který vyvolá na připojeném zatěžovacím odporu napěťový impuls, a ten se zpracovává v dalších částech radiometrické aparatury.



1 - Geiger-Müllerův počítáč ; 2 - zdroj stejnosměrného proudu; 3 - zatěžovací odpor; 4 - vyhodnocovací blok

Obr. 10: Schéma zapojení Geiger-Müllerova počítáče

Výboj, který vznikne v počítáči je nutné co nejdříve přerušit, neboť po dobu výboje – vzhledem k poklesu napětí pod Geiger- Müllerův práh (obr. 8) - neregistruje počítáč další částice. Přerušování výboje se nejnáze dosahuje vhodnou plynovou náplní počítáče (samozhášecí počítáče). Časový interval, za který se obnoví pracovní napětí na počítáči (tj. obnoví se schopnost registrovat další částice), se nazývá mrtvá doba (bývá řádově v milisekundách). Konstrukce Geiger-Müllerových počítáčů závisí na typu a energii částic, které má počítáč detekovat. Používají se počítáče okénkové, zvonkové, válcové, kyvetové, průtokové atd.(obr.11).

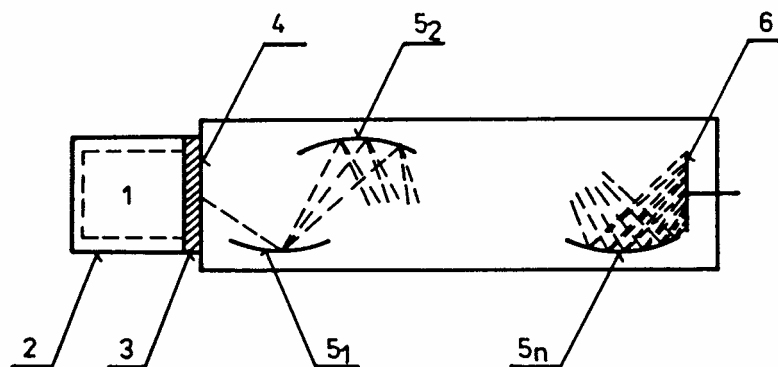


a) okénkový; b) válcový; c) kyvetový; d) průtokový
 Obr. 11: Typy Geiger-Müllerových počítaců

4.3 Scintilační detektory

Dopadá-li ionizující záření na určité látky vyvolává v nich slabé světelné záblesky (scintilace). Scintilace jsou podmíněny existencí luminiscenčních center, která vznikají vniknutím iontů cizího prvku do krystalové mřížky iontového krystalu. Takto vzniká aktivovaný scintilátor, např. ZnS (Ag), ZnS (Cu), NaI (Tl), LiI atd.

Vedle uvedených anorganických látek lze využít i scintilačních vlastností dalších druhů látek. Používají se scintilátory organické (naftalen, stilben, antracen), kapalně (roztoky scintilačních látek v organických rozpouštědlech, např. v xylenu, benzenu ap.) a plastické. Scintilační počítač se sestavuje ze scintilátoru, fotonásobiče a registračního zařízení. Schéma detekčního systému je na obr. 12.



1 – scintilátor; 2 – reflektor; 3 – optický kontakt; 4 – fotokatoda; 5₁ - 5_n – dynody; 6 – anoda
 Obr. 12: Scintilační počítač

Jaderné záření dopadá na scintilátor a vyvolává v něm scintilace. Směr pohybu fotonů těchto scintilací je náhodný, proto se scintilátor obklopuje reflektorem, který odráží unikající fotony zpět do krystalu. Sebrané fotony dopadají po průchodu optickým kontaktem na

fotokatodu fotonásobiče, uvolňují z ní elektrony, které se po urychlení elektrickým polem dostávají na první elektrodu fotonásobiče (dynodu). Povrch dynod je pokryt materiálem s vysokým koeficientem sekundární emise elektronů. Vlivem toho je počet elektronů, které dynodu opouštějí větší, než je počet elektronů, které na dynodu dopadají. Následkem tohoto násobícího procesu vyvolává každý fotoelektron celkem $10^5 - 10^9$ elektronů, které dopadnou na anodu. Na připojeném zatěžovacím odporu tak vznikne napět'ový impuls, který se dále zpracovává v registračním bloku.

Charakteristiky scintilačních počítačů jsou podobné jako charakteristiky G-M počítačů. Mrtvá doba je nižší (řádově 10^{-7} s), pozadí vyšší a závisí na teplotě (vliv termoemise). Účinnost pro nabitě částice a gama částice je vesměs vysoká. Vzniklý napět'ový impuls je úměrný energii dopadající částice, což umožňuje použití těchto detektorů ve spektrometrech.

Výše popisované detektory patří mezi kontinuální, v dalších odstavcích se budeme zabývat integrálními detektory (vesměs nazývanými dozimetry).

4.4 Filmové dozimetry

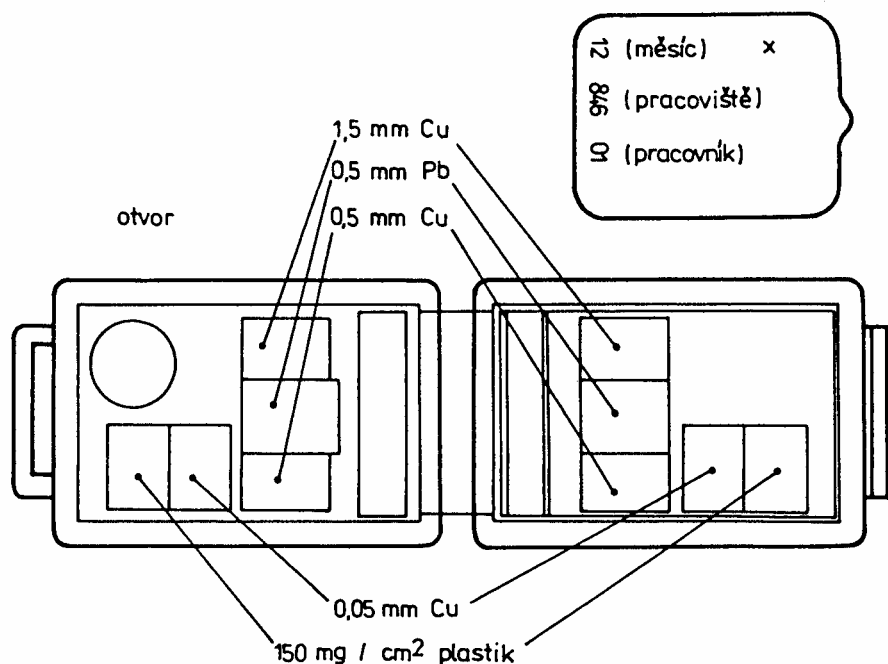
Působením ionizujícího záření vzniká ve fotografickém materiálu latentní obraz, který lze vyvoláním zviditelnit. Optická hustota vyvolaného materiálu může být mírou dávky či expozice. Filmové dozimetry se používají hlavně pro detekci beta, gama a RTG - záření převážně v osobní dozimetrii.

K výhodám této dozimetrické metody patří:

- vysoká citlivost,
- trvalost záznamu,
- možnost získat částečné údaje o způsobu ozáření dozimetru (energie, směr záření, druh záření),
- možnost automatizace odečtu optických hustot a výpočtu dávek,
- nízká cena.

Mezi nevýhody naopak patří:

- nutnost přídatného vyvolávacího procesu (zdlouhavé vyhodnocování),
- relativně vysoká citlivost na vnější vlivy - vlhkost, teplota, chemické látky,
- závislost zčernání filmu na energii záření (k potlačení tohoto vlivu se používají různé filtry - obr. 13),
- malá přesnost
- směrová závislost



Obr. 13: Filmový dozimetr

Filmové dozimetry jsou detektory integrální. K integrálním detektorům patří dále např. termoluminiscenční detektory, stopové detektory a jaderné emulze.

4.5 Interpretace měření

Je však třeba zdůraznit, že detektor či dozimetr s příslušným vyhodnocovacím zařízením nám v nejlepší případě může poskytnout informaci o druhu a energii záření, hustotě toku částic nebo o jiných z nich odvozených fyzikálních veličinách, popřípadě i informaci o přítomnosti více druhů záření. Využití těchto údajů k získání informace o skutečném radiačním poškození ozářeného organismu nebo materiálu je dalším úkolem, většinou složitějším než vlastní detekce. Navíc je-li detekce zpravidla ryze fyzikálním problémem, je interpretace získaných údajů především na živý organismus na pomezí fyziky, chemie, biologie a medicíny.

5 BIOLOGICKÉ ÚČINKY ZÁŘENÍ

Biologické účinky záření závisí na:

1. Druhu a energii záření.
2. Dávce a dávkovém příkonu.
3. Vlastnostech ozářené tkáně nebo orgánů

Add.1) Působení záření na živou hmotu se nejprve řídí obecnými zákony platnými i pro látky neživé. Dochází k ionizaci a excitaci, přičemž je absorbována energie. Na tento fyzikální

proces pak navazuje řada dalších dějů (fyzikálních, chemických, biologických apod.) podmíněných složitou organizací živé hmoty.

Pozorovatelné účinky ionizujícího záření mají svůj počátek vždy v dějích, které vyvolává ionizující záření v buňkách. Poškození buněk závisí především na jejich rozmnožovacích schopnostech. Vliv ionizujícího záření na buňku je tím výraznější, čím má buňka větší schopnost k rozmnožování.

Účinky záření na buňku lze rozdělit do dvou skupin:

- a) smrt buňky (resp. ztráta schopnosti dělení buňky)
- b) změna cytogenetické informace při zachování dalšího buněčného dělení (záření tak vyvolává mutace).

Add.2) Biologické účinky záření závisí na dávce záření, která představuje celkovou energii, kterou záření předalo látce. Buňky však mají jistou schopnost opravit poškození pomocí reparačních mechanismů. Tyto mechanismy se však mohou projevit většinou jen tehdy, není-li přísun energie do buněk příliš rychlý. Proto celkový účinek záření závisí také na dávkovém příkonu. Prakticky to znamená, že při určité dávce je poškození organismu menší, je-li tkáň nebo organismus touto dávkou ozářen nikoliv najednou, ale je-li dávka buď rozprostřena kontinuálně na delší dobu nebo rozdělena na několik menších dávek s časovými prodlevami mezi nimi (frakcionace dávky). V časových prodlevách při frakcionaci, resp. během ozařování při menším dávkovém příkonu se pak reparační procesy mohou uplatnit.

Add.3) Lidský organismus je funkční celek jednotlivých tkání a orgánů, které nemají stejnou citlivost k ozáření tzv. radiosenzitivitu. Při stejné absorbované dávce se v různých tkáních projeví různé biologické účinky. Obecně platí, že zvláště vysokou radiosenzitivitu vykazují tkáně, v nichž probíhá rychlé buněčné dělení. Z hlediska destrukce tkáně ionizujícím zářením jsou nejcitlivější lymfoidní orgány, aktivní kostní dřeň, pohlavní orgány a střevo a z hlediska cytogenetického efektu pak kostní dřeň, žaludek a plíce.

Biologické účinky rozdělujeme na:

- časné (projeví se v krátkém čase po ozáření většími jednorázovými dávkami) a pozdní (projeví se po delším časovém odstupu)
- somatické (týkají se ozářeného jedince) a genetické (týkají se potomstva ozářeného jedince)
- nestochastické (prahové, deterministické) a stochastické (neprahové)

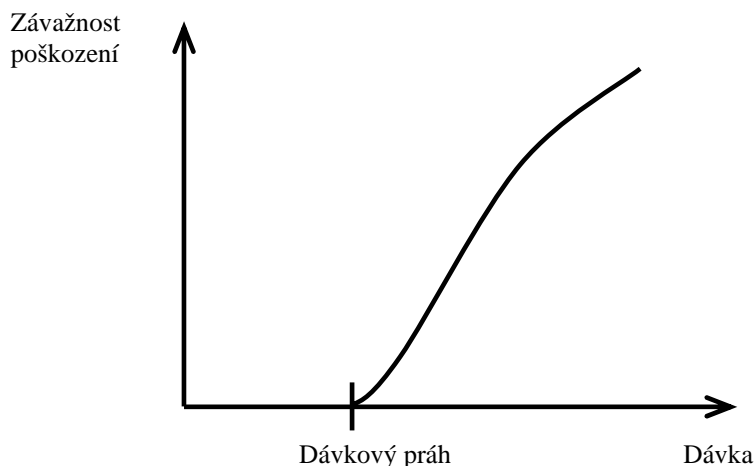
Vzhledem k tomu, že rozdělení účinků záření na stochastické a nestochastické je velmi důležité z hlediska radiační ochrany, jsou tyto účinky v následujících odstavcích probrány podrobněji.

Nestochastické (deterministické) účinky

Jedná se o účinky, k nimž dochází v důsledku smrti nebo ztráty schopnosti dělení velkého počtu ozářených buněk.

Pro tyto účinky platí:

- jedná se o účinky prahové, dochází k nim až po překročení určité prahové dávky (ta je ro různé orgány různá, pro jednorázové ozáření se pohybuje v rozmezí 1 až 3 Gy), pod dávkovým prahem se účinek neprojeví
- po překročení prahové dávky roste závažnost poškození přibližně lineárně s velikostí dávky (obr.14)



Obr. 14: Účinky deterministické

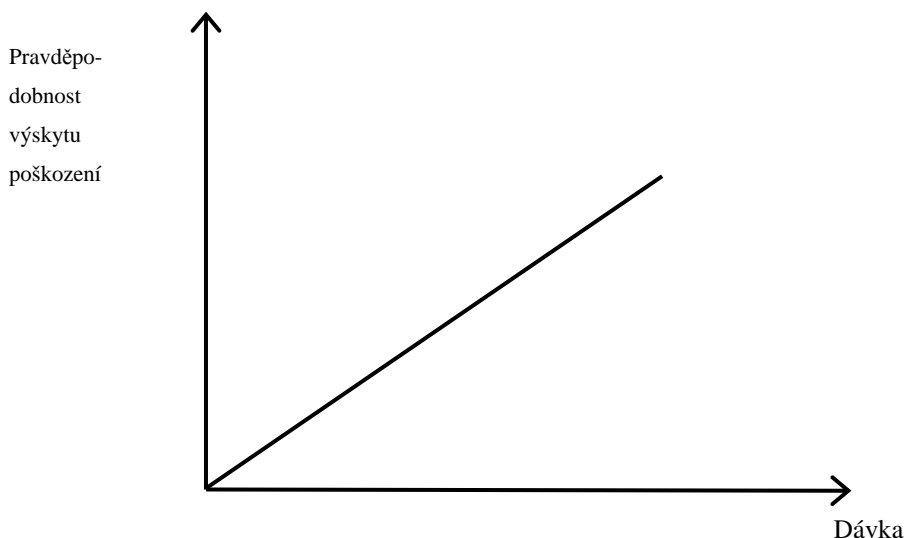
- deterministické účinky jsou většinou lokální, dochází k nim zpravidla jen v těch místech, které byly ozářeny
- je rozdílné, zda ozáření bylo jednorázové (tj. v krátkém časovém intervalu) nebo protražované (tj. během delšího časového období), v druhém případě je organismus odolnější v důsledku reparačních mechanismů buněk a tkání, prahové dávky jsou v tomto případě 2 až 10 krát vyšší
- deterministické účinky mají charakteristický klinický obraz
- k deterministickým účinkům patří různé formy akutní nemoci z ozáření, radiační poškození kůže, poškození plodnosti (časné účinky), chronická radiodermatitida, poškození oční čočky (pozdní účinky).

Stochastické účinky

Jedná se o účinky, které jsou vyvolané změnami v genetické informaci (mutacemi) buněk, které vznikly působením ionizujícího záření na buňky.

Pro tyto účinky platí:

- jedná se o účinky bezprahové
- s rostoucí efektivní dávkou neroste závažnost poškození, ale roste pravděpodobnost výskytu poškození v ozářené populaci (obr. 15)
- ke stochastickým účinkům patří zhoubné novotvary (somatické účinky) a genetické účinky, v obou případech jde o účinky pozdní, doba latence může být mnoho let
- tyto účinky nemají charakteristický klinický obraz (tj. nelze rozeznat, zda účinek vznikl ozářením nebo jiným vlivem)
- u těchto účinků nezáleží na tom, zda byl organismus ozářen jednorázově či protražovaně
- ke vzniku nádoru nemusí dojít v ozářeném místě organismu



Obr. 15. Stochastické účinky

Číslo, které charakterizuje riziko úmrtí na rakovinu vyvolanou ozářením se nazývá koeficient rizika smrti (z hlediska zhoubných nádorů). Tento koeficient byl pro pracovníky se zdroji ionizujícího záření stanoven na $400 \cdot 10^{-4} \text{ Sv}^{-1}$. To znamená, že při ozáření 10 000 osob (tj. každé z nich) efektivní dávkou 1 Sv zemře pravděpodobně 400 z nich na rakovinu z ozáření. Jinak řečeno, pokud je někdo ozářen efektivní dávkou 1 Sv, má 4 % pravděpodobnost, že zemře na rakovinu.

Pro jednotlivce z obyvatelstva byl koeficient rizika smrti ze zhoubných nádorů stanoven na $500 \cdot 10^{-4} \text{ Sv}^{-1}$.

Účinky záření na lidský organismus jsou přehledně uvedeny v tabulce 4.

Tabulka 4.

Účinky záření na lidský organismus

ČASNÉ	POZDNÍ		
SOMATICKÉ			GENETICKÉ
akutní nemoc z ozáření	nenádorová pozdní poškození	zhoubné nádory	genetické účinky u potomstva
akutní lokální změny	<ul style="list-style-type: none"> - chronická radiodermatitida - zákal oční čočky 		
<ul style="list-style-type: none"> - akutní radiodermatitida - poškození plodnosti 			
DETERMINISTICKÉ		STOCHASTICKÉ	

6 DÁVKOVÉ LIMITY

Dávkové limity představují nejvyšší přípustné dávky, které mohou radiační pracovníci i jednotlivci z obyvatelstva obdržet. Jsou to závazné kvantitativní ukazatelé, jejichž překročení není z hlediska radiační ochrany přípustné.

Dávkové limity rozdělujeme na:

- obecné limity (limity pro obyvatelstvo)
- limity pro radiační pracovníky.

Limity pro radiační pracovníky jsou samozřejmě vyšší než limity obecné.

Limity ozáření se nevztahují na:

- ozáření z přírodních zdrojů, kromě ozáření z těch přírodních zdrojů, které jsou vědomě a záměrně využívány (např. těžba uranové rudy)
- lékařské ozáření, zde jsou stanoveny tzv. diagnostické referenční úrovně, které nemají charakter limitů
- havarijní ozáření zasahujících fyzických osob, toto ozáření nesmí překročit desetinásobek limitů pro radiační pracovníky, pokud nejde o případ záchrany lidských životů nebo zabránění rozvoje mimořádné situace s možnými společenskými a hospodářskými důsledky.

V následujících tabulce jsou uvedeny konkrétní hodnoty limitů.

Tabulka 5
Dávkové limity

<u>Obecné limity</u> Efektivní dávka za kalendářní rok za dobu pěti po sobě jdoucích kalendářních roků Ekvivalentní dávka v oční čočce za kalendářní rok v 1 cm ² kůže za kalendářní rok	 1 mSv 5 mSv 15 mSv 50 mSv
<u>Limity pro radiační pracovníky</u> Efektivní dávka za kalendářní rok za dobu pěti po sobě jdoucích kalendářních roků Ekvivalentní dávka v oční čočce za kalendářní rok v 1 cm ² kůže za kalendářní rok	 50 mSv 100 mSv 150 mSv 500 mSv

Efektivní dávka zahrnuje jak vnější tak vnitřní ozáření. Efektivní dávka se týká celotělového ozáření, ekvivalentní dávka pak orgánů, kterými záření do těla vstupuje (kůže, oční čočka).

7 VYUŽITÍ IONIZUJÍCÍHO ZÁŘENÍ

7.1 Úvod

Ionizující záření nachází dnes velmi široké uplatnění ve všech oblastech lidské činnosti. Vedle průmyslových aplikací se jedná hlavně o aplikace v lékařství (jak v diagnostických metodách, tak při terapii). Radionuklidy se používají v podobě uzavřených nebo otevřených zářičů. Uzavřené zářiče slouží jako zdroje záření (alfa, beta, gama, RTG, neutrony). Pro praktické účely je zde využito jevu vyvolaných při průchodu záření látkou, neboť absorpce a rozptyl záření závisí vedle energie záření na vzdálenosti zdroje a detektoru, hustotě a středním atomovém čísle prostředí. Z výsledků uvedených dějů (tj. z rozdílů vlastností záření dopadajícího a prošlého) lze pak stanovit některé parametry nebo chemické a fyzikální veličiny, které tuto látku charakterizují.

Otevřené zářiče se používají jako indikátory (stopovače). Radionuklid se zavádí přímo do soustavy, kterou sledujeme a slouží k prostorovému a časovému studiu procesů, které v soustavě probíhají.

Hlavní přednosti radionuklidových metod jsou:

- Jaderné procesy nejsou závislé na vnějších podmínkách (tlak, teplota, vlhkost)
- Možnost měření bez odebrání vzorků a bezdotykovými metodami
- Vysoká citlivost měření
- Výstupy z detektorů mohou sloužit nejen k přímému měření sledované veličiny resp. optické či akustické signalizaci, ale jsou velmi často použity v regulačních obvodech, které umožňují komplexní automatizaci daného technologického postupu.

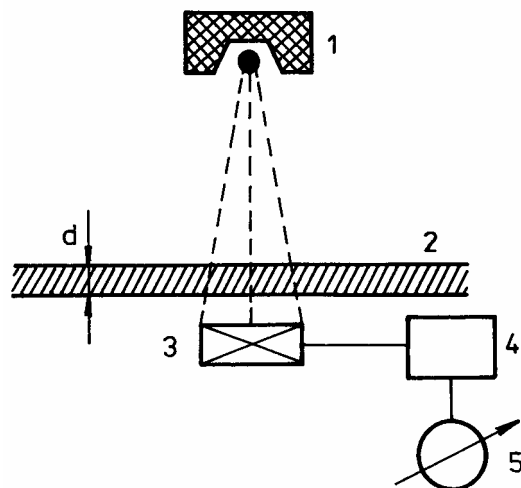
Na druhé straně je však třeba uvážit, že každá praktická aplikace ionizujícího záření může vést k ozáření pracovníků nebo obyvatelstva. Vždy je třeba mít na zřeteli bezpečnostní hledisko a dodržovat všechny požadavky radiační ochrany.

U uzavřených zářičů nepředstavuje obvykle zajištění radiační bezpečnosti větší problém. Zařízení lze většinou dobře zabezpečit proti manipulaci nepovolanými osobami, obsluhu vyškolit a počet ostatních osob, které se mohou se zařízením dostat do kontaktu silně omezit. Při aplikacích otevřených zářičů může být zajištění radiační ochrany podstatně složitější.

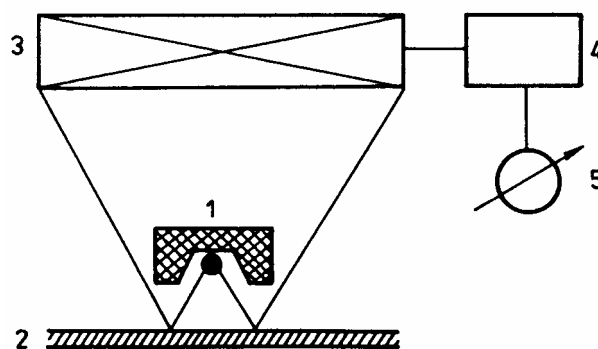
7.2 Využití uzavřených zářičů

Měření tloušťky

K měření tloušťky materiálu se využívá absorpce (obr. 16) nebo rozptylu (obr. 17) záření. Volba zářiče závisí na tloušťce a povaze materiálu. Pro tenké materiály (papír, fólie) lze využít beta záření, např. zářiče ^{85}Kr , ^{204}Tl , ^{90}Sr + ^{90}Y , k měření silnějších materiálů se používá gama záření, např. zářiče ^{137}Cs , ^{60}Co . Metody založené na absorpčním principu jsou přesnější a citlivější, rozptylové metody se s výhodou používají tam, kde je měřený objekt přístupný jen z jedné strany (stěny kotlů a uzavřených nádob, potrubí).



1 - zářič s kolimátorem; 2 - měřený předmět; 3 – detektor; 4 – zesilovač; 5 - indikační přístroj
Obr. 16:Princip absorpční metody měření tloušťky



1 - zářič s kolimátorem; 2 - měřený předmět; 3 – detektor; 4 – zesilovač; 5 - indikační přístroj
Obr. 17:Princip rozptylové metody měření tloušťky

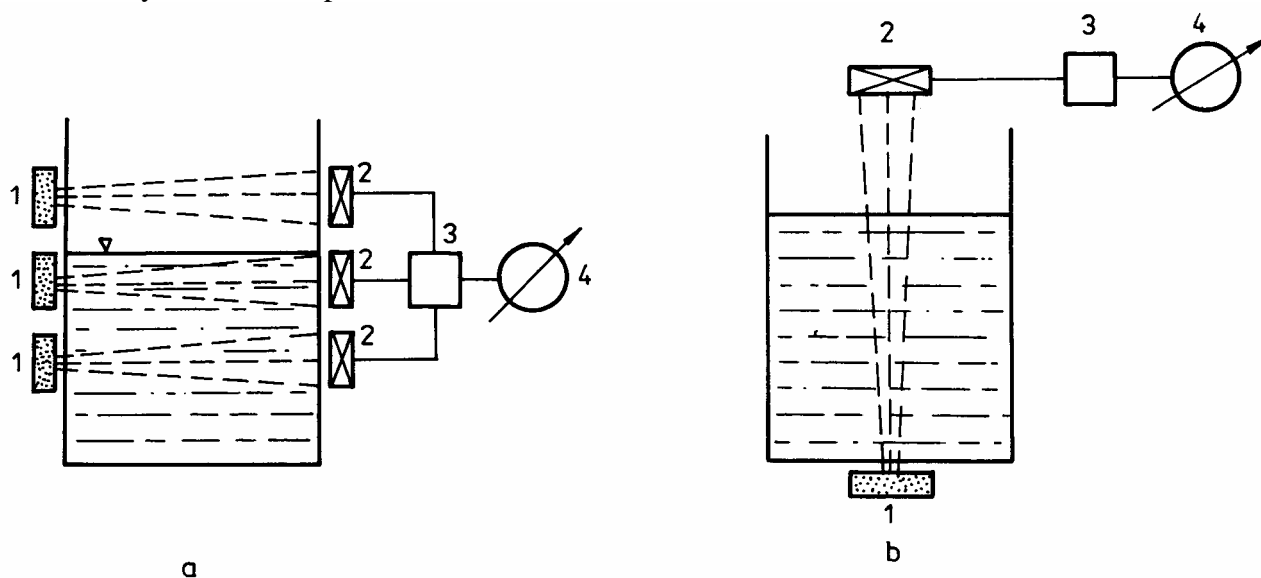
Hustoměry

Měření hustoty je založeno na principu zeslabení záření gama při jeho průchodu měřeným materiálem, kterým může být kapalina, práškovité nebo zrnité látky. Podmínkou je, aby tloušťka vrstvy materiálu byla konstantní. Hustoměry nacházejí uplatnění hlavně při dopravě materiálů potrubím v úpravkách uhlí, cukrovarech, chemickém a potravinářském průmyslu. Jako zářiče se většinou používá ^{137}Cs nebo ^{60}Co . Podobně jako u tloušťkoměrů lze použít i rozptylové metody, které se využívají hlavně u karotážních měření pro potřeby geologického průzkumu.

Hladinoměry

Zeslabení svazku gama záření lze využít i pro určování některých stavů sledovaného objektu. Nejčastější aplikací tohoto typu je indikace hladin. Používají se úrovnoměry (obr. 18a), kdy zdroj záření a detektor jsou umístěny po stranách nádrže proti sobě tak, aby svazek záření procházel místy, kde je zapotřebí přítomnost materiálu (úroveň hladiny) sledovat. Je-li zdroj a detektor nad a pod nádrží je možno sledovat polohu hladiny kontinuálně (obr. 18b).

Bezkontaktní metoda umožňuje měřit hladiny v přetlakových i podtlakových nádržích, dále hladiny snadno vznětlivých nebo agresivních kapalin, kalů, rmutů ap. Při měření úrovně sypkých hmot působí potíže tvar povrchu, který se tvoří při plnění a vyprazdňování zásobníků. Konstrukce hladinoměřů i vyhodnocování odezvy detektoru je podstatně složitější než u kapalinových hladinoměřů. Zařízení pro měření úrovně je většinou stacionární, může však být i přenosné, které se používá např. pro kontrolu zaplnění tlakových lahví, nádob a nádrží velkých rozměrů ap.



a) ke sledování úrovně

b) ke kontinuálnímu sledování hladiny

1 – zářič; 2 – detektor; 3 - vyhodnocovací blok; 4 – indikace

Obr. 18 : Princip hladinoměřů

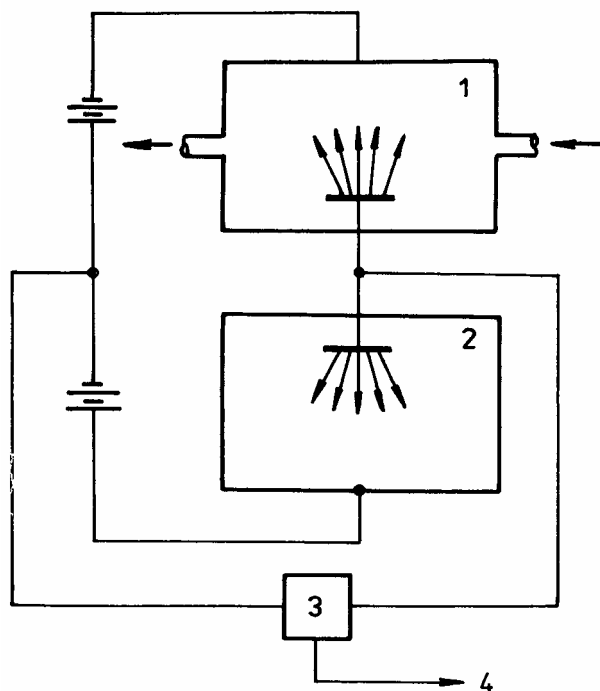
Na stejném principu pracují i zařízení k indikaci polohy strojů a jejich částí, počítání součástí na dopravnících, hlídání přesypů pásových dopravníků a vyprazdňování dopravních nádob, počítání vozíků ap.

Nedestruktivní analýza materiálů

Je založena na závislosti rozptylu beta záření ve zkoumaném materiálu na atomovém čísle materiálu. Využívá se ke stanovení popelnatosti uhlí a koksu, čistoty různých surovin a koncentrátů, kovatosti rud ap.

Jako zdrojů beta záření lze použít např. ^{35}S ($E_{\max} = 0,167 \text{ MeV}$), ^{204}Tl ($E_{\max} = 0,765 \text{ MeV}$), $^{90}\text{Sr} + ^{90}\text{Y}$ ($E_{\max} = 2,18 \text{ MeV}$), $^{106}\text{Ru} + ^{106}\text{Rh}$ ($E_{\max} = 3,53 \text{ MeV}$).

V analyzátoch binárních směsí plynů se využívá změny ionizace prostředí při průchodu alfa záření (obr. 19). Na stejném principu jsou založeny i požární hlásiče. Používá se většinou zářič ^{241}Am .



1 - průtoková ionizační komora; 2 - ionizační komora se standardním plynem;

3 - vyhodnocovací blok; 4 - registrace

Obr. 19: Ionizační analyzátor pro kontrolu složení plynů

7.3 Využití otevřených zářičů. Radioaktivní indikátory

Stopovací nebo indikátorové metody slouží ke sledování chování, pohybu a přeměny určitých předmětů nebo chemických látek (tj. jejich atomů nebo molekul) při různých mechanických, fyzikálních, chemických a biologických procesech na základě jejich označení radioaktivní látkou a sledování pohybu této látky.

K nejdůležitějším praktickým použitím radioindikátorů patří sledování homogenizace procesu, studium kinetiky reakcí, kontrola flotačních procesů, studium pochodů ve vysoké peci, lékařská diagnostika, studium příjmu a vylučování prvků biologickými organismy, měření rychlosti proudění různých materiálů, kapalin a plynů, vyhledávání netěsnosti potrubí, vyhledávání nevybuchlých náloží, kontrola opotřebení materiálů, autoradiografie.

7.4 Radiační technologie

Jako radiační technologie jsou označovány procesy výroby materiálů nebo jejich modifikace, založené na fyzikálních, chemických či biologických změnách vlastností látek nebo objektů v důsledku ozáření ionizujícím zářením. Jako příklad lze uvést radiační polymeraci a modifikaci polymerů, radiační syntézu látek, radiační terapii v medicíně, radiační ošetřování potravin, sterilizaci farmaceutických přípravků a medicínského nářadí, iontovou implantaci, elektronovou a iontovou litografii, radioaktivní zdroje světla a elektřiny.

8 POUŽITÁ LITERATURA

1. Kolektiv autorů: Ochrana při práci se zdroji ionizujícího záření. Sborník učebních textů. DT Ostrava spol. s.r.o., 2003
2. Drška, L., Klimeš, B., Slavík, J.: Základy atomové fyziky, ČSAV, Praha 1958
3. Beiser, A.: Úvod do moderní fyziky, Academia, Praha 1975
4. Vanovič, J.: Atómová fyzika, Alfa, Bratislava 1980
5. Dvořák, V., Hušák, V.: Základy hygieny záření, SPN, Praha, 1979
6. Kimel, L.P., Maškovič, V.P.: Zaščita ot ionizirujuščich izlučenij. Atomizdat, Moskva 1966
7. Šeda, J. a kol. : Dozimetrie ionizujícího záření. Praha, SNTL, 1983
8. Šeda, J., Trousil, J. : Integrální dozimetrické metody. Praha, ČVUT, 1976
9. Prajs, V. : Registracija jadernogo izlučenija. Moskva 1960
10. Petržílka, V. : Metody pro detekci a registraci jaderného záření. Praha, NČAV 1959
11. Šeda, J. : Základy dozimetrie, ČVUT, Praha 1991
12. Gerndt, J. : Detektory ionizujícího záření, ČVUT, Praha 1996
13. Musílek, L. a kol. : Dozimetrie ionizujícího záření (Integrující metody), ČVUT, Praha 1992
14. Šeda, J.: Použití ionizujícího záření v technice. Skripta ČVUT, Praha 1973
15. Musílek, L.: Využití ionizujícího záření ve výzkumu. Skripta ČVUT, Praha 1992
16. Šimon, J., Bosák, J.: Aplikace jaderných metod gama v hornictví. SNTL Praha 1980
17. Kolektiv autorů: Principy a praxe radiační ochrany, SÚJB, Praha 2000
18. Hála, J.: Radioaktivita, ionizující záření, jaderná energie. Konvoj, Brno 1998
19. Zákon č. 18/1997 Sb. ve znění pozdějších předpisů (Atomový zákon)
20. Vyhláška 307/2002 Sb.

Radioaktivita a ionizující záření

Doplňující učební text pro předměty Bakalářská fyzika, Aplikovaná fyzika,
Ochrana před zářením

Jiří Švec

Vydalo Sdružení požárního a bezpečnostního inženýrství v Ostravě, roku 2005

1. vydání

Publikace neprošla jazykovou úpravou

ISBN: 80-86634-62-0