

# Cvičení z jaderné chemie

## Návody k úlohám

Sestavili:

Prof. RNDr. Jiří Hála, CSc.

Mgr. Jiří Křivohlávek

Prof. RNDr. Jiří Příhoda, CSc.

Jiří Smola

Brno 2007

# Obsah

ÚVOD.....	3
ÚLOHA Č. 1 – STAT. CHAR. RADIOAKT. ROZPADU A CHYBY PŘI MĚŘENÍ RADIOAKT. VZ.....	25
ÚLOHA Č. 2 - MRTVÁ DOBA SCINTILAČNÍ SONDY .....	34
ÚLOHA Č. 3 - CHARAKTERISTIKA SCINTILAČNÍ SONDY .....	37
ÚLOHA Č. 4 - SPEKTROSKOPIE ZÁŘENÍ GAMA S KRYSTALEM NaI(Tl).....	41
ÚLOHA Č. 5 – ABSORPCE ZÁŘENÍ GAMA A BETA .....	47
ÚLOHA Č. 6 - SAMOABSORPCE ZÁŘENÍ BETA.....	52
ÚLOHA Č. 7 - URČENÍ POLOČASU PŘEMĚNY KRÁTKODOBÉHO RADIONUKLIDU .....	56
ÚLOHA Č. 8 - URČENÍ POLOČASU PŘEMĚNY DLOUHODOBÉHO RADIONUKLIDU.....	59
ÚLOHA Č. 9 - URČENÍ STUPNĚ OBOHACENÍ URANOVÝCH PREPARÁTŮ.....	62
ÚLOHA Č. 10 - RADIOAKTIVNÍ ROVNOVÁHA.....	64
ÚLOHA Č. 11 - STANOVENÍ OBJEMOVÉ AKTIVITY RADONU.....	67
ÚLOHA Č. 12 - SPEKTROSKOPIE ZÁŘENÍ ALFA .....	74
ÚLOHA Č. 13 - MĚŘENÍ NÍZKOENERGETICKÉHO ZÁŘENÍ BETA METODOU KAPALNÉ SCINT....	76
PŘÍLOHA 1 : PŘEMĚNOVÁ SCHÉMATA VYBRANÝCH RADIONUKLIDŮ.....	81

# ÚVOD

Účelem této kapitoly je seznámení posluchačů s bezpečnostními předpisy platnými v ČR pro práci s radioaktivními látkami. Protože příslušné dokumenty jsou značně obsáhlé, jsou v dalším textu uvedeny jen ty jejich části (někdy částečně upravené a zkrácené), které jsou obecně důležité anebo mají přímý vztah k použití radioaktivních látek v běžné chemické praxi.

Základními právními dokumenty používané při práci s radioaktivními látkami jsou:

**Zákon 18/1997 Sb.**, o mírovém využívání jaderné energie a ionizujícího záření (**atomový zákon**), ve znění pozdějších předpisů, upravuje způsob využívání jaderné energie a ionizujícího záření a podmínky vykonávání činností souvisejících s využíváním jaderné energie a činností vedoucích k ozáření, systém ochrany osob a životního prostředí před nežádoucími účinky ionizujícího záření, povinnosti při přípravě a provádění zásahů vedoucích ke snížení přírodního ozáření a ozáření v důsledku radiačních nehod, zvláštní požadavky pro zajištění občanskoprávní odpovědnosti za škody v případě jaderných škod, podmínky zajištění bezpečného nakládání s radioaktivními odpady, výkon státní správy a dozoru při využívání jaderné energie, při činnostech vedoucích k ozáření a nad jadernými položkami.

**Vyhláška 307/2002 Sb.**, ve znění pozdějších předpisů, Státního úřadu pro jadernou bezpečnost o radiační ochraně, která je jedním z prováděcích předpisů atomového zákona. Prováděcí předpis je právní předpis určený k upřesnění obsahu právní normy obsažené v zákoně.

Aktuální znění obou dokumentů najdete na stránkách Státního úřadu pro jadernou bezpečnost <http://www.sujb.cz>.

V následujícím textu zmíníme některé důležité skutečnosti uvedené ve vyhlášce 307/2002 Sb., ve znění pozdějších předpisů.

## § 1 Předmět úpravy

- (1) Tato vyhláška v souladu s právem Evropských společenství upravuje
  - a) podrobnosti ke způsobu a rozsahu zajištění radiační ochrany při práci na pracovištích, kde se vykonávají radiační činnosti, včetně podrobností pro vymezování, označování a oznamování nebo schvalování sledovaných nebo kontrolovaných pásem na těchto pracovištích,
  - d) zprošťovací úrovně, uvolňovací úrovně, limity ozáření, optimalizační meze, mezní hodnoty obsahu přírodních radionuklidů ve stavebních materiálech a vodách a nejvyšší přípustné úrovně radioaktivní kontaminace potravin,

- e) podrobnosti ke klasifikaci zdrojů ionizujícího záření a kategorizaci radiačních pracovníků a pracovišť, kde se vykonávají radiační činnosti,
- g) rozsah a způsob nakládání se zdroji ionizujícího záření, nakládání s radioaktivními odpady a uvádění radionuklidů do životního prostředí, k nimž je třeba povolení, a upravuje podrobnosti pro zajištění radiační ochrany při těchto radiačních činnostech,
- j) vymezuje veličiny, parametry a skutečnosti důležité z hlediska radiační ochrany, stanoví rozsah jejich sledování, měření, hodnocení, ověřování, zaznamenávání, evidence a způsob předávání údajů Státnímu úřadu pro jadernou bezpečnost (dále jen "Úřad").

## § 2 Základní pojmy

Pro účely této vyhlášky se rozumí

- c) **běžným provozem** – provoz zdroje ionizujícího záření za podmínek stanovených v povolení k jeho provozu nebo k nakládání s ním a ve schválené dokumentaci,
- d) **generátorem záření** – zařízení nebo přístroj vysílající ionizující záření, jehož součástí pracují při rozdílu potenciálu vyšším než 5 kV, zejména rentgenová zařízení a urychlovače částic,
- h) **kosmickým zářením** – ionizující záření kosmického původu,
- i) **lékařským dohledem** – sledování zdravotní způsobilosti a vývoje zdravotního stavu u pracovníků kategorie A z hledisek případných vlivů ionizujícího záření na jejich zdraví
- j) **monitorováním** – cílené měření veličin charakterizujících ozáření, pole záření nebo radionuklidy a hodnocení výsledků těchto měření pro účely usměrňování ozáření,
- m) **osobními dávkami** – souhrnné označení pro veličiny charakterizující míru zevního i vnitřního ozáření jednotlivé osoby, zejména efektivní dávku, úvazek efektivní dávky a ekvivalentní dávky v jednotlivých orgánech nebo tkáních; osobní dávky se měří osobními dozimetry,
- n) **otevřeným radionuklidovým zářičem** – radionuklidový zářič, který není uzavřeným radionuklidovým zářičem,
- o) **pracovištěm s otevřenými zářiči** – pracoviště, kde je nakládáno s otevřenými radionuklidovými zářiči,
- p) **pracovním místem** – část pracoviště jednoznačně charakterizovaná svými ochrannými (izolačními, ventilačními a stínicími) vlastnostmi, vymezená prostorově nebo technologicky (pracovní stůl, aplikační nebo vyšetřovací box, digestoř, hermetizovaná podtlaková skříň ap.), kde mohou být prováděny samostatné práce se zdroji ionizujícího záření; v jedné místnosti může být více pracovních míst, pokud každé tvoří z hlediska organizace práce samostatný celek,
- s) **přírodním zdrojem ionizujícího záření** – zdroj ionizujícího záření pozemského nebo kosmického původu,

t) **radioaktivní kontaminací** – znečištění jakéhokoli materiálu či jeho povrchu, prostředí nebo osoby radioaktivní látkou; pokud jde o lidské tělo, zahrnuje jak zevní kontaminaci kůže, tak vnitřní kontaminaci bez ohledu na cestu příjmu,

x) **radionuklidem** – druh atomů, které mají stejný počet protonů, stejný počet neutronů, stejný energetický stav a které podléhají samovolné změně ve složení nebo stavu atomových jader,

y) **radionuklidovým zářičem** – zdroj ionizujícího záření obsahující radioaktivní látky, kde součet podílů aktivit radionuklidů a zprošřovací úrovní aktivit (zprošřovací úrovně jsou uvedeny v příloze vyhlášky a pro některé radionuklidy i na konci této kapitoly) pro tyto radionuklidy je větší než 1 a současně součet podílů hmotnostních aktivit radionuklidů a zprošřovací úrovní hmotnostních aktivit pro tyto radionuklidy je větší než 1,

cc) **umělým zdrojem ionizujícího záření** – zdroj ionizujícího záření jiný než přírodní zdroj ionizujícího záření,

dd) **uzavřeným radionuklidovým zářičem** – radionuklidový zářič, jehož úprava, například zapouzdrněním nebo ochranným překryvem, zabezpečuje zkouškami ověřenou těsnost a vylučuje tak, za předvídatelných podmínek použití a opotřebování, únik radionuklidů ze zářiče,

ee) **vnitřním ozářením** – ozáření osoby ionizujícím zářením z radionuklidů vyskytujících se v těle této osoby, zpravidla jako důsledek příjmu radionuklidů požitím nebo vdechnutím,

gg) **výpustí** – kapalná nebo plynná látka vypouštěná do životního prostředí, která obsahuje radionuklidy v množství nepřevyšujícím uvolňovací úroveň nebo vypouštěná do životního prostředí za podmínek uvedených v povolení k uvádění radionuklidů do životního prostředí,

hh) **zevním ozářením** – ozáření osoby ionizujícím zářením ze zdrojů ionizujícího záření, které se nacházejí mimo ni,

ii) **zneškodňováním radioaktivních odpadů** – umístění radioaktivních odpadů na úložiště nebo na určité místo bez úmyslu je znovu použít; zneškodňování zahrnuje rovněž oprávněné uvolnění radioaktivního odpadu přímo do životního prostředí a jeho následný rozptyl,

ll) **nevyužívaným zdrojem** – zdroj ionizujícího záření, který se již k činnosti, pro niž bylo Úřadem vydáno povolení podle § 9 odst. 1 písm. i) zákona, nevyužívá a jehož další využití k této činnosti se nepředpokládá.

### § 3 Veličiny radiační ochrany

Pro účely této vyhlášky se veličinami radiační ochrany rozumí

a) **ekvivalentní dávka  $H_T$** , což je součin radiačního váhového faktoru  $w_R$  uvedeného v tabulce č. 1 přílohy č. 5 a střední absorbované dávky  $D_{TR}$  v orgánu nebo tkáni T pro ionizující záření R, nebo součet takových součinů, jestliže pole ionizujícího záření je složeno z více druhů nebo energií,

b) **efektivní dávka E**, což je součet součinů tkáňových váhových faktorů  $w_T$  uvedených v tabulce č. 2 přílohy č. 5 a ekvivalentní dávky  $H_T$  v ozářených tkáních nebo orgánech T,

**Tabulka č. 1 a č. 2 přílohy č. 5 vyhlášky 307/2002 Sb.**

**Tabulka č. 1**  
**Radiační váhové faktory**

Typ záření a příp. energie	Radiační váhový faktor $w_R$
fotony	1
elektrony, miony	1
neutrony, méně než 10 keV	5
neutrony, 10keV až 100 keV	10
neutrony, 100 keV až 2 MeV	20
neutrony, 2 MeV až 20 MeV	10
neutrony, více než 20 MeV	5
protony, více než 2 MeV, (mimo odražené )	5
částice alfa, těžká jádra, štěpné fragmenty	20

**Tabulka č. 2.**  
**Tkáňové váhové faktory**

Tkáň, orgán	Tkáňový váhový faktor $w_T$
Gonády	0,20
Červená kostní dřeň	0,12
Tlusté střevo	0,12
Plíce	0,12
Žaludek	0,12
Močový měchýř	0,05
Mléčná žláza	0,05
Játra	0,05
Jícen	0,05
Štítná žláza	0,05
Kůže	0,01
Povrchy kostí	0,01
Ostatní orgány a tkáňe	0,05

c) **kolektivní efektivní**, popř. **ekvivalentní dávka S**, což je součet efektivních, popř. ekvivalentních dávek všech jednotlivců v určité skupině,

d) **úvazek efektivní dávky  $E(\tau)$** , popř. **ekvivalentní dávky  $H_T(\tau)$** , což je časový integrál příkonu efektivní dávky, popř. ekvivalentní dávky po dobu  $\tau$  od příjmu radionuklidu; není-li uvedeno jinak, činí tato doba 50 roků pro příjem radionuklidů u dospělých a období do 70 let věku pro příjem radionuklidů u dětí; obdobně je definován také úvazek kolektivní efektivní, popř. ekvivalentní dávky,

e) **dávkový ekvivalent H**, což je součin absorbované dávky v uvažovaném bodě tkáňe a jakostního činitele Q uvedeného v tabulce č. 3 přílohy č. 5 vyjadřujícího rozdílnou biologickou účinnost různých druhů záření,

Lineární přenos energie L [keV/ $\mu$ m]	Jakostní činitel Q(L)
méně než 10	1
10 až 100	$0,32 \cdot L^{-2,2}$
více než 100	$300 \cdot L^{-0,5}$

f) **osobní dávkový ekvivalent  $H_p(d)$** , což je dávkový ekvivalent v daném bodě pod povrchem těla v hloubce tkáně  $d$ ,

i) **příjem**, což je aktivita radionuklidu přijatá do lidského organismu z prostředí, obvykle požitím nebo vdechnutím,

#### § 4 Kritéria pro klasifikaci zdrojů

(1) Zdroje ionizujícího záření se podle vzestupného ohrožení zdraví a životního prostředí ionizujícím zářením klasifikují jako **nevýznamné, drobné, jednoduché, významné a velmi významné**, a to na základě

- a) příkonu dávkového ekvivalentu,
- b) technické úpravy a způsobu provedení,
- c) aktivity a hmotnostní aktivity radionuklidových zářičů, zpravidla ve vztahu ke zprošťovacím úrovním,
- d) možnosti úniku radionuklidů z radionuklidových zářičů,
- e) možnosti vzniku radioaktivních odpadů a náročnosti jejich zneškodnění,
- f) typického způsobu nakládání a související míry možného ozáření,
- g) potenciálního ohrožení plynoucího z předvídatelných poruch a odchylek od běžného provozu, neoprávněného použití, nebo nesprávného použití,
- h) rizika vzniku radiační nehody nebo havárie, závažnosti následků takové události a možnosti zásahů.

#### Tabulka č. 1 přílohy č. 1

##### Zprošťovací úrovně aktivity a hmotnostní aktivity některých radionuklidů

Pro vybrané radionuklidy, označené značkou + v prvním sloupci této tabulky, se hodnoty zprošťovacích úrovní aktivity a hmotnostní aktivity vztahují nejen na tyto radionuklidy samotné, ale reprezentují také tyto radionuklidy v rovnováze s produkty radioaktivní přeměny.

Nuklid	Aktivita [Bq]	Hmotnostní aktivita [kBq/kg]
$^3\text{H}$	$10^9$	$10^6$
$^{14}\text{C}$	$10^7$	$10^4$
$^{22}\text{Na}$	$10^6$	10
$^{32}\text{P}$	$10^5$	$10^3$
$^{33}\text{P}$	$10^8$	$10^5$
$^{35}\text{S}$	$10^8$	$10^5$

Nuklid	Aktivita [Bq]	Hmotnostní aktivita [kBq/kg]
$^{40}\text{K}$	$10^6$	$10^2$
$^{60}\text{Co}$	$10^5$	10
$^{90}\text{Sr}+$	$10^4$	$10^2$
$^{137}\text{Cs}+$	$10^4$	10
$^{238}\text{U}+$	$10^4$	10
$^{239}\text{Pu}$	$10^4$	1

## § 6 Nevýznamné zdroje

Nevýznamným zdrojem ionizujícího záření je

- a) elektrické zařízení emitující ionizující záření, avšak neobsahující komponenty pracující s rozdílem napětí převyšujícím 5 kV,
- b) katodová trubice určená k zobrazování nebo jakékoli jiné elektrické zařízení pracující při rozdílu potenciálů nepřevyšujícím 30 kV, u něhož příkon dávkového ekvivalentu na kterémkoli přístupném místě ve vzdálenosti 0,1 m od povrchu zařízení je menší než 1  $\mu\text{Sv/h}$ ,
- c) radioaktivní látka, u níž součet podílů aktivit radionuklidů a příslušných zprošřtovacích úrovní aktivity není větší než 1 nebo součet podílů hmotnostních aktivit radionuklidů a příslušných zprošřtovacích úrovní hmotnostní aktivity není větší než 1,
- d) uzavřený radionuklidový zářič, u něhož součet podílů aktivit radionuklidů a příslušných zprošřtovacích úrovní aktivity nebo součet podílů hmotnostních aktivit radionuklidů a příslušných zprošřtovacích úrovní hmotnostní aktivity není větší než 10,

## § 7 Drobné zdroje

Drobným zdrojem ionizujícího záření je

- a) generátor záření, který není nevýznamným zdrojem, konstruovaný tak, že příkon dávkového ekvivalentu na kterémkoli přístupném místě ve vzdálenosti 0,1 m od povrchu zařízení je menší než 1  $\mu\text{Sv/h}$  s výjimkou míst určených za běžných pracovních podmínek k manipulaci a obsluze zařízení výhradně rukama, kde může příkon dávkového ekvivalentu dosahovat až 250  $\mu\text{Sv/h}$ ,
- b) uzavřený radionuklidový zářič, který není nevýznamným zdrojem, u něhož součet podílů aktivit radionuklidů a příslušných zprošřtovacích úrovní aktivity nebo součet podílů hmotnostních aktivit radionuklidů a příslušných zprošřtovacích úrovní hmotnostní aktivity je menší než 100 v případě dlouhodobých alfa zářičů, včetně alfa-neutronových zdrojů, a menší než 1000 v ostatních případech,
- d) otevřený radionuklidový zářič, který není nevýznamným zdrojem, u něhož součet podílů aktivit nebo hmotnostních aktivit jednotlivých radionuklidů a hodnot aktivit nebo hmotnostních aktivit těchto radionuklidů uvedených v tabulce č. 1 přílohy č. 1 je menší než 10,
- e) ionizační hlásiče požáru, u nichž je součet aktivit zářičů větší než desetinásobek příslušné zprošřtovací úrovně aktivity, nacházející se současně v jedné budově a v držbě jedné osoby.

## § 8 Jednoduché zdroje

Jednoduchými zdroji ionizujícího záření jsou všechny zdroje ionizujícího záření, které nejsou nevýznamnými, drobnými, významnými ani velmi významnými zdroji ionizujícího záření.



## § 9 Významné zdroje

Významným zdrojem ionizujícího záření je

- a) generátor záření určený k radioterapii nebo radiodiagnostice v humánní medicíně, kromě kostních densitometrů, kabinových rentgenových zařízení a zubních rentgenových zařízení,
- c) zdroj ionizujícího záření určený k radioterapii protony, neutrony a jinými těžkými částicemi,
- e) radionuklidový ozařovač pro ozařování potravin a surovin nebo jiný stacionární průmyslový ozařovač, u kterých s ohledem na obsah radionuklidů, na dávkový příkon a s ohledem na typický způsob nakládání s nimi, související míru možného ozáření a potenciální riziko plynoucí z předvídatelných poruch a odchylek od běžného provozu bylo toto zařazení potvrzeno v rámci typového schvalování podle § 23 zákona nebo v rámci vydání povolení k nakládání se zdroji ionizujícího záření podle § 9 odst. 1 písm. i) zákona,
- f) mobilní defektoskop s uzavřenými radionuklidovými zářiči.

## § 10 Velmi významné zdroje

Velmi významným zdrojem ionizujícího záření je jaderný reaktor.

## § 11 Kritéria pro kategorizaci pracovišť

(1) Pracoviště, kde se vykonávají radiační činnosti, se kromě pracovišť, kde se používají výhradně nevýznamné nebo typově schválené drobné zdroje ionizujícího záření, kategorizují vzestupně podle ohrožení zdraví a životního prostředí ionizujícím zářením na pracoviště I., II., III. a IV. kategorie na základě

- a) klasifikace zdrojů ionizujícího záření, o nichž se předpokládá, že se s nimi bude na pracovišti nakládat,
- b) očekávaného běžného provozu pracoviště a související míry možného ozáření pracovníků a obyvatelstva,
- c) zaměření radiační činnosti a náročnosti na zajištění radiační ochrany a jakosti při této činnosti,
- d) vybavení a zajištění pracoviště pro bezpečnou práci se zdroji ionizujícího záření, zejména ochrannými pomůckami, izolačními a stínicími zařízeními, provedením ventilace a kanalizace,
- e) možnosti radioaktivní kontaminace pracoviště nebo jeho okolí radionuklidy,
- f) možnosti vzniku radioaktivních odpadů a náročnosti jejich zneškodnění,
- g) potenciálního ohrožení plynoucího z předvídatelných poruch a odchylek od běžného provozu,

h) rizika vzniku radiační nehody nebo havárie, závažnosti následků takové události a možnosti zásahů.

## § 12 Pracoviště I. kategorie

Pracovištěm I. kategorie je

- a) pracoviště s drobnými typově neschválenými zdroji ionizujícího záření,
- c) pracoviště s veterinárním, zubním nebo kabinovým rentgenovým zařízením,
- e) pracoviště s technickým rentgenovým zařízením, na němž charakter radiační činnosti nevyžaduje vymezení kontrolovaného pásma,
- f) pracoviště s otevřenými radionuklidovými zářiči, pokud vybavení izolačními a ventilačními zařízeními a úroveň provedení kanalizace splňuje příslušné minimální požadavky podle tabulky č. 1 přílohy č. 4 a zařazení do této kategorie potvrdil Úřad v rámci vydání povolení k nakládání se zdroji ionizujícího záření podle § 9 odst. 1 písm. i) zákona.

**Tabulka č. 1 přílohy č. 4**

Kategorie pracoviště s otevřenými zářiči	Základní požadavky na vybavení pracoviště ventilačními a izolačními zařízeními a na úroveň provedení kanalizace
I.	Jako běžná chemická laboratoř, tj. stěny a strop s omyvatelným a neporézním povrchem, podlaha pokryta odolnou dobře čistitelnou podlahovinou (např. PVC), pracovní povrchy z lehce čistitelného materiálu (např. laminát nebo nerez), celistvé a bezešvé, odpadní jímka z lehce čistitelného materiálu, může být přímo napojena na kanalizaci.
II.	Jako dobře vybavená chemická laboratoř, tj. kromě požadavků na pracoviště kategorie I navíc utěsněné spoje mezi podlahou, stěnami, stropem a pracovními povrchy, digestoř, kanalizace zpravidla napojena na samostatnou záchytnou nádrž.
III.	Jako velmi dobře vybavená chemická laboratoř, tj. kromě požadavků na pracoviště kategorie II navíc vybavení podtlakovými skříněmi a kanalizací napojenou na samostatnou záchytnou nádrž.

## § 13 Pracoviště II. kategorie

Pracovištěm II. kategorie je

- a) pracoviště s jednoduchým zdrojem ionizujícího záření, které není pracovištěm I. kategorie,
- g) pracoviště s otevřenými radionuklidovými zářiči, pokud vybavení izolačními a ventilačními zařízeními a úroveň provedení kanalizace splňuje příslušné minimální požadavky podle tabulky č. 1 přílohy č. 4 a zařazení do této kategorie potvrdil Úřad v rámci vydání povolení k nakládání se zdroji ionizujícího záření podle § 9 odst. 1 písm. i) zákona,

#### **§ 14 Pracoviště III. kategorie**

Pracovištěm III. kategorie je

- b) pracoviště se zařízením obsahujícím uzavřený radionuklidový zářič určené k radioterapii, včetně brachyterapie, klasifikovaným jako významný zdroj,
- c) uznaný sklad,
- d) pracoviště s otevřenými radionuklidovými zářiči, pokud vybavení izolačními a ventilačními zařízeními a úroveň provedení kanalizace splňuje příslušné minimální požadavky podle tabulky č. 1 přílohy č. 4 a zařazení do této kategorie potvrdil Úřad v rámci vydání povolení k nakládání se zdroji ionizujícího záření podle § 9 odst. 1 písm. i) zákona,
- e) pracoviště se stacionárním průmyslovým ozařovačem určeným k ozařování potravin a surovin, předmětů běžného užívání nebo jiných materiálů,
- f) pracoviště pro těžbu a zpracování uranové rudy zahrnující těžbu, úpravu, nakládání s koncentrátem, provoz dekontaminačních stanic, shromažďování produktů hornické činnosti na odvalech a v kalových polích.

#### **§ 15 Pracoviště IV. kategorie**

Pracovištěm IV. kategorie je

- a) jaderné zařízení ve smyslu § 2 písm. h) bod 1 zákona,
- b) úložiště radioaktivních odpadů ve smyslu § 2 písm. u) zákona,
- c) pracoviště s otevřenými radionuklidovými zářiči, které s ohledem na vysoké aktivity zpracovávané současně na jednom pracovním místě, na typický způsob provozu pracoviště a související míru možného ozáření a potenciální riziko plynoucí z předvídatelných odchylek od běžného provozu, z nehod nebo havárií nelze zařadit do nižší kategorie,
- d) sklad vyhořelého nebo ozářeného jaderného paliva.

#### **§ 16 Kategorizace radiačních pracovníků**

(1) Pro účely monitorování a lékařského dohledu se radiační pracovníci podle ohrožení zdraví ionizujícím zářením zařazují do kategorie A nebo B na základě očekávaného ozáření za běžného provozu a při předvídatelných poruchách a odchylkách od běžného provozu, s výjimkou ozáření v důsledku radiační nehody nebo havárie.

(2) Pracovníky kategorie A jsou radiační pracovníci, kteří by mohli obdržet efektivní dávku vyšší než 6 mSv ročně nebo ekvivalentní dávku vyšší než tři desetiny limitu ozáření pro oční čočku, kůži a končetiny stanoveného v § 20 odst. 1 písm. c) až e); ostatní radiační pracovníci jsou pracovníky kategorie B.

## § 19 Obecné limity

(1) Obecné limity jsou

- a) pro součet efektivních dávek ze zevního ozáření a úvazků efektivních dávek z vnitřního ozáření hodnota **1 mSv za kalendářní rok** nebo za podmínek stanovených v povolení k provozu pracoviště III. nebo IV. kategorie výjimečně hodnota 5 mSv za dobu 5 za sebou jdoucích kalendářních roků,
- b) pro ekvivalentní dávku **v oční čočce** hodnota **15 mSv za kalendářní rok**,
- c) pro průměrnou ekvivalentní dávku **v 1 cm<sup>2</sup> kůže** hodnota **50 mSv za kalendářní rok**.

## § 20 Limity pro radiační pracovníky

(1) Limity pro radiační pracovníky jsou

- a) pro součet efektivních dávek ze zevního ozáření a úvazků efektivních dávek z vnitřního ozáření hodnota **100 mSv za 5 za sebou jdoucích kalendářních roků**,
- b) pro součet efektivních dávek ze zevního ozáření a úvazků efektivních dávek z vnitřního ozáření hodnota **50 mSv za kalendářní rok**,
- c) pro ekvivalentní dávku **v oční čočce** hodnota **150 mSv za kalendářní rok**,
- d) pro průměrnou ekvivalentní dávku **v 1 cm<sup>2</sup> kůže** hodnota **500 mSv za kalendářní rok**,
- e) pro ekvivalentní dávku na ruce od prstů až po předloktí a na nohy od chodidel až po kotníky hodnota 500 mSv za kalendářní rok.

## § 23 Omezování ozáření ve zvláštních případech

(2) Ozáření plodu u těhotných žen pracujících na pracovištích I. až IV. kategorie se neprodleně poté, co žena těhotenství oznámí zaměstnavateli, omezí úpravou podmínek práce tak, aby bylo nepravděpodobné, že součet efektivních dávek ze zevního ozáření a úvazků efektivních dávek z vnitřního ozáření plodu alespoň po zbývající dobu těhotenství překročí 1 mSv.

## § 26 Informování a příprava pracovníků

(1) Osoba, která provozuje pracoviště, kde je vymezeno sledované pásmo, (dále jen "provozovatel sledovaného pásma") a držitel povolení, který provozuje pracoviště, kde je vymezeno kontrolované pásmo, (dále jen "provozovatel kontrolovaného pásma") musí prokazatelně předem informovat radiační pracovníky, kteří mají pracovat v těchto pásmech, a osoby používající v těchto pásmech zdroje ionizujícího záření po dobu jejich specializované přípravy na výkon povolání

- a) o charakteru a rozsahu možného ohrožení zdraví, o rizicích spojených s jejich prací a o případné zdravotní újme s tím spojené,
- b) o obecných postupech radiační ochrany a opatřeních, která musí být přijata, zejména o těch, která odpovídají provozním a pracovním podmínkám vztahujícím se jak k dané činnosti obecně, tak i k jednotlivým pracovištím a pracím, na které mohou být přiděleni,
- c) o důležitosti plnit požadavky ochrany zdraví i technické a administrativní požadavky k zajištění radiační ochrany,
- d) a v případě žen také o významu včasného oznámení těhotenství z důvodu rizik ozáření pro nenarozené dítě a radioaktivní kontaminace kojence v případě vnitřní kontaminace radionuklidy.

### **§ 27 Soustavný dohled nad radiační ochranou**

(1) Soustavný dohled nad radiační ochranou podle § 18 odst. 1 písm. i) zákona musí být zajištěn v rozsahu odpovídajícím zdrojům ionizujícího záření, s nimiž se na pracovišti nakládá, způsobu nakládání s nimi, související míře možného ozáření, včetně ozáření plynoucího z předvídatelných poruch a odchylek od běžného provozu a s uvážením rizika vzniku radiační nehody nebo havárie. Soustavný dohled nad radiační ochranou se zajišťuje **osobami s přímou odpovědností za zajištění radiační ochrany a dohlížejícími osobami.**

### **§ 29 Sledované pásmo**

- (1) Sledované pásmo se vymezuje všude tam, kde se očekává, že efektivní dávka by mohla být vyšší než 1 mSv ročně nebo ekvivalentní dávka by mohla být vyšší než jedna desetina limitu ozáření pro oční čočku, kůži a končetiny stanoveného v § 20 odst. 1 písm. c) až e).
- (2) Sledované pásmo se zpravidla vymezuje na všech pracovištích I. až IV. kategorie. Sledované pásmo se nevymezuje, pokud by jeho rozsah nepřesáhl vymezení kontrolovaného pásma.
- (3) Sledované pásmo se vymezuje jako ucelená a jednoznačně určená část pracoviště, zpravidla stavebně oddělená. Na vchodech nebo ohraničení se sledované pásmo označuje upozorněním "Sledované pásmo se zdroji ionizujícího záření" (viz konec této kapitoly), případně i znakem radiačního nebezpečí a údaji o charakteru zdrojů a rizik s nimi spojených.



## SLEDOVANÉ PÁSMO SE ZDROJI IZ

### § 30 Kontrolované pásmo

(1) Kontrolované pásmo se vymezuje všude tam, kde by efektivní dávka mohla být vyšší než 6 mSv ročně nebo kde by ekvivalentní dávka mohla být vyšší než tři desetiny limitu ozáření pro oční čočku, kůži a končetiny stanoveného v § 20 odst. 1 písm. c) až e).

(2) Kontrolované pásmo se vymezuje jako ucelená a jednoznačně určená část pracoviště, zpravidla stavebně oddělená, a s takovým zajištěním, aby do ní nemohly vstoupit nepovolané osoby. Na vchodech nebo ohraničení se kontrolované pásmo označuje znakem radiačního nebezpečí a upozorněním "Kontrolované pásmo se zdroji ionizujícího záření, vstup nepovolaným osobám zakázán", případně i údaji o charakteru zdrojů a rizik s nimi spojených.

## Výpočet maximální možné zpracovávané aktivity na pracovišti dané kategorie

### Koeficienty vybavenosti pracovního místa

Vybavení pracovního místa izolujícími a ventilačními zařízeními	Kategorie pracoviště s otevřenými zářiči		
	I.	II.	III.
Podtlaková hermetizovaná skříň s rukavicemi nebo manipulátory	10	10	1
Částečně hermetizovaná podtlaková skříň	10	1	0,1
Uzavřený eluční, či podobný systém	1	1	0,1
Radiochemická digestoř, skříň s laminárním prouděním	1	1	0,1
Volná plocha anebo pracovní stůl v místnosti se sestupným laminárním prouděním	0,1	0,1	0,01
Běžná chemická digestoř	0,1	0,01	0,001
Skříň bez ventilace (ochranný štít, stan ap.)	0,1	0,01	0,001
Volná plocha, pracovní stůl	0,01	0,001	0,0001

### Maximální aktivity na pracovním místě

Kategorie pracoviště s otevřenými zářiči	Maximální aktivita na jednom standardně vybaveném pracovním místě v závislosti na charakteristice materiálů a práci s nimi			
	normální	za mokra	těkavé kapaliny	potenciálně prašné
I.	60 Sv / h <sub>inh.</sub>	3000 Sv / h <sub>inh.</sub>	1 Sv / h <sub>inh.</sub>	3 Sv / h <sub>inh.</sub>
II.	600 Sv / h <sub>inh.</sub>	30000 Sv / h <sub>inh.</sub>	150 Sv / h <sub>inh.</sub>	600 Sv / h <sub>inh.</sub>
III.	8000 Sv / h <sub>inh.</sub>	30000 Sv / h <sub>inh.</sub>	1600 Sv / h <sub>inh.</sub>	8000 Sv / h <sub>inh.</sub>

**Konverzní faktory h<sub>inh.</sub> pro příjem radioaktivních aerosolů (upraveno, dle tabulky č. 4 přílohy č. 3 vyhlášky 307/2002 Sb.)**

Nuklid	h <sub>inh.</sub> [Sv / Bq]	Nuklid	h <sub>inh.</sub> [Sv / Bq]
<sup>22</sup> Na	1,5 x 10 <sup>-9</sup>	<sup>90</sup> Sr	2,7 x 10 <sup>-8</sup>
<sup>32</sup> P	3,2 x 10 <sup>-9</sup>	<sup>137</sup> Cs	5,5 x 10 <sup>-9</sup>
<sup>33</sup> P	1,4 x 10 <sup>-9</sup>	<sup>232</sup> Th	3,5 x 10 <sup>-5</sup>
<sup>35</sup> S	1,3 x 10 <sup>-9</sup>	<sup>238</sup> U	5,5 x 10 <sup>-7</sup>
<sup>60</sup> Co	2,0 x 10 <sup>-8</sup>	<sup>239</sup> Pu	4,0 x 10 <sup>-5</sup>

Například pro nejvyšší aktivitu roztoku obsahující  $^{137}\text{Cs}$  na jednom pracovním místě, který zpracováváme na běžném pracovním stole v laboratoři I. kategorie (koeficient vybavenosti 0,01) platí  $0,01 \times 3000 / (5,5 \times 10^{-9}) = 5,5 \times 10^9 \text{ Bq}$  tedy 5,5 GBq.

Příklady maximální aktivity roztoků dalších, na pracovištích Masarykovy univerzity běžných nuklidů, které lze současně zpracovávat na jednotlivých pracovních místech v laboratoři I. kategorie jsou:

Radionuklid	Pracovní místo	Maximální aktivita	Radionuklid	Pracovní místo	Maximální aktivita
$^3\text{H}$	laboratorní stůl	244 MBq	$^{32}\text{P}$	laboratorní stůl	9,38 GBq
58B	digestoř	2,44 GBq		digestoř	93,8 GBq
$^{14}\text{C}$	laboratorní stůl	17,2 MBq	$^{33}\text{P}$	laboratorní stůl	21,4 GBq
68B	digestoř	172 MBq		digestoř	214 GBq
$^{35}\text{S}$	laboratorní stůl	23,1 GBq	$^{137}\text{Cs}$	laboratorní stůl	5,5 GBq
78B	digestoř	231 GBq		digestoř	55 GBq

### Rozdělení radionuklidů do tříd podle radiotoxicity a potenciálního ohrožení zevním ozářením

Radionuklidy jsou podle toxicity zařazeny do čtyř tříd, v závislosti na nejvyšším přípustném ročním příjmu inhalací. Rozdělení vybraných radionuklidů do tříd ukazuje tabulka (viz níže).

Pro vybrané radionuklidy, označené značkou + se hodnoty uvolňovacích úrovní vztahují nejen na tyto radionuklidy samotné, ale reprezentují také tyto radionuklidy v rovnováze s jejich produkty radioaktivní přeměny.

Třída	Radiotoxicita	Radionuklidy
1	vysoká	Na-22, Co-60, Cs-137+, U-235+, Pu-239, Am-241
2	vyšší střední	C-11, Sr-90, Th-232, U-238+
3	nižší střední	C-14, P-32, Cl-36, Tc-99m
4	nízká	H-3, P-33, S-35



## Pravidla práce s otevřenými radionuklidovými zářiči

Při práci s otevřenými radionuklidovými zářiči je nutno dodržovat tyto zásady:

- všechny radioaktivní látky musí být skladovány v původním balení a jen na místech k tomu určených
- všechny radioaktivní látky se musí uchovávat ve stínících krytech
- příjem a spotřeba radioaktivních látek musí být evidovány
- práce s radioaktivními látkami musí být prováděny pouze ve vyhrazených prostorách
- pipetování radioaktivních roztoků nesmí být prováděno ústy
- v prostorách určených k práci s radioaktivními látkami je zakázáno jíst, pít, kouřit, používat rtěnky
- je nutno zabránit kontaminaci pokožky radioaktivními látkami a používat ochranných oděvů a gumových rukavic
- veškerou manipulaci s otevřenými radionuklidovými zářiči včetně přenášení vzorků je nutné provádět na podložních miskách dostatečné velikosti, resp. foto miskách vyložených filtračním papírem
- s nezhojenou ránou je možné pracovat s otevřenými radionuklidovými zářiči pouze tehdy, nehrozí-li její zamoření
- po skončení práce si vždy řádně umýt ruce
- obalový materiál, který není kontaminován, lze po odstranění varovných nápisů a značek odkládat do běžného odpadu
- kontaminovaný materiál se ukládá výhradně do nádob na radioaktivní odpad
- povrchy pracovních ploch, které by mohly být kontaminovány, je potřeba pravidelně kontrolovat
- veškeré laboratorní sklo, které bylo použito pro práci s radioaktivními látkami, musí být před dalším použitím řádně dekontaminováno a proměřeno
- s otevřenými radionuklidovými zářiči se pracuje po převléknutí do pracovního oděvu
- oděv z aktivního pracoviště nepoužívat v neaktivních prostorách
- používat gumové rukavice, plexisklové štíty a brýle
- při manipulaci používat pinzety, peány, kleště
- otevřené radioaktivní zářiče nebrat do rukou
- využívat ochranných zdí a krytů

## **Ukončení práce s otevřenými radioaktivními zářiči**

- Po ukončení práce s otevřenými radioaktivními zářiči se zbytky zářičů vrátí do skladu radioaktivních zářičů a radioaktivních odpadů. Ostatní nepotřebné zbytky se po práci odstraní do radioaktivního odpadu.
- Na pracovních místech se po ukončení práce nesmí volně nacházet nezpracovaný radioaktivní materiál.
- Proveďte se dekontaminace použitých pomůcek, skla, nástrojů, pracovních prostředků a v případě potřeby i ochranných prostředků, oděvu a obuvi.

## **Nakládání s radioaktivním odpadem**

Shromažďování a likvidace vyprodukovaného radioaktivního odpadu se řídí následujícími pravidly.

### **Pevný odpad**

Přímo v laboratoři jsou aktivní části ukládány do PE sáčků a po skončení pracovní činnosti jsou okamžitě odnášeny do skladu radioaktivních odpadů k vymírání. Sáček je označen datem uložení do skladu radioaktivních zářičů a radioaktivních odpadů a stanoveným datem likvidace.

Obsah jednotlivých sáčků obsahující materiál kontaminovaný krátkodobými nuklidy je uváděn do životního prostředí nejdříve po uplynutí 10 poločasů od data uzavření sáčku s příslušným nuklidem.

Každý sáček je před likvidací proměřen. Kritériem pro uvolnění je hmotnostní a plošná aktivita nižší než hodnoty uvolňovacích úrovní příslušných radionuklidů a dávkový příkon ve vzdálenosti 1 m menší než 0,1  $\mu\text{Sv/h}$ .

Likvidace odpadu kontaminovaného dlouhodobými nuklidy se provádí do komunálního odpadu pouze v případě, že bude měřením potvrzeno splnění podmínek pro likvidaci, tj. hmotnostní a plošná aktivita nižší než hodnoty uvolňovacích úrovní příslušných radionuklidů (uvolňovací úrovně viz tabulka níže) a dávkový příkon ve vzdálenosti 1 m menší než 0,1  $\mu\text{Sv/h}$ . Zpravidla je odpad kontaminovaný dlouhodobými nuklidy předáván k uložení na úložiště radioaktivního odpadu organizaci, která má k této činnosti povolení SÚJB.

Likvidaci řídí dohlížející osoba a vede o ní záznamy.

Posuzované místo znečištění	Třída radionuklidu			
	1	2	3	4
	Uvolňovací úrovně hmotnostní aktivity [kBq/kg]			
Materiály, pevné látky a předměty vynášené z pracovišť se zdroji ionizujícího záření nebo jinak uváděné do životního prostředí	0,3	3	30	300
	Uvolňovací úrovně plošné aktivity [kBq/m <sup>2</sup> ]			
Povrchy materiálů a předmětů vynášené z pracovišť se zdroji ionizujícího záření nebo jinak uváděné do životního prostředí	3	30	300	3000

### **Tekutý odpad**

Po nahromadění kapalného radioaktivního odpadu ve sběrné nádobě je odpad solidifikován (způsob provedení solidifikace závisí na druhu radioaktivního odpadu) a je dočasně uložen ve skladu radioaktivních zářičů a radioaktivních odpadů. Poté je předán držiteli povolení k nakládání s radioaktivními odpady k dalšímu zpracování a uložení v úložišti radioaktivních odpadů.

Kapalný odpad vznikající při mytí laboratorního skla je po vylití do výlevky nutno spláchnout několikanásobným množstvím vody.

### **Monitorování pracoviště**

Monitorování pracoviště se uskutečňuje sledováním, měřením, hodnocením a zaznamenáváním veličin a parametrů charakterizujících pole záření a výskyt radioaktivních látek na pracovišti.

### **Monitorování povrchového znečištění radionuklidů**

Monitorování povrchové kontaminace se provádí pravidelně po ukončení práce s otevřenými radionuklidovými zářiči. Spočívá v měření přenosným monitorem plošné kontaminace nad kontrolovanou plochou.

Monitorování se provádí v těchto prostorách:

- laboratoř - pracovní stůl, podlaha, výlevky
- sklad radioaktivních zářičů a radioaktivních odpadů - podlaha, police.

Monitorování povrchové kontaminace povrchů ve skladu radioaktivních odpadů a radioaktivních zářičů se provádí bezprostředně po odstranění odpadu k likvidaci.

### Referenční úrovně

**Záznamové** úrovně představují minimální měřitelnou hodnotu plošné aktivity pro používaný monitor plošné kontaminace. **Vyšetřovací** úrovně odpovídají očekávaným hodnotám plošné kontaminace na pracovních površích za běžných provozních podmínek. Konečně **zásahové** úrovně jsou zvoleny jako směrné hodnoty pro povrchové znečištění radionuklidů:

Třída radionuklidu	Referenční úroveň		
	záznamová	vyšetřovací	zásahová
	[Bq/cm <sup>2</sup> ]	[Bq/cm <sup>2</sup> ]	[Bq/cm <sup>2</sup> ]
<b>1</b>	0,1	0,3	0,3
<b>2</b>	0,1	1	3
<b>3</b>	0,1	10	30
<b>4</b>	0,1	10	300

#### Opatření při překročení referenční úrovně

Zajistit dekontaminaci dotčených ploch na hodnoty pod vyšetřovací úrovní a následné měření pro ověření úspěšnosti dekontaminace.

#### **Povrchová kontaminace**

Při kontrole kontaminace rukou a pracovních oděvů je jakákoliv odchylka od pozadí považována za pozitivní kontaminaci.

Při kontaminaci rukou následuje dekontaminace podle vnitřního havarijního plánu a následné měření. V případě kontaminace oděvu se oděv uloží v PE pytli do skladu radioaktivních zářičů a radioaktivních odpadů s označením datem a nuklidem a po vyměření radionuklidu, které musí být potvrzeno měřením, se přemístí do prádelny k vyprání, resp. se předá oprávněné organizaci jako radioaktivní odpad.

#### **Vnitřní kontaminace**

Při podezření na vnitřní kontaminaci bude zajištěno celotělové měření na speciálně vybaveném pracovišti s celotělovým detektorem, například v SÚRO Praha nebo ODK JE Dukovany. Následný postup bude vázán na zjištěné hodnoty úvazku efektivní dávky vzhledem k limitům ozáření.

#### **Zajištění havarijní připravenosti**

Za ztrátu kontroly nad zdrojem ionizujícího záření se považuje:

- a) rozlití, rozstříknutí nebo rozprášení radioaktivní látky při manipulaci
- b) porušení těsnosti nádob s radioaktivním odpadem
- c) ztráta nebo odcizení radioaktivního záříče.

V těchto případech se postupuje podle dále uvedených zásahových instrukcí pro jednotlivé případy. Kdokoliv zjistí vznik ztráty kontroly nad zdrojem ionizujícího záření, je povinen neprodleně informovat dohlízející osobu (vedoucího praktika), která je určena k řízení vykonání těchto pokynů pro opětovné uvedení pracoviště do normálního stavu. Dohlízející osoba oznamuje ztrátu kontroly nad zdrojem ionizujícího záření na SÚJB regionálnímu centru Brno.

### **Příprava zaměstnanců**

Dohlízející osoba organizuje pravidelně jednou za rok poučování ze zásad radiační ochrany a bezpečné práce se zdroji ionizujícího záření, kde jsou s obsahem pokynů pro případ odchylky od běžného provozu prokazatelně seznamováni všichni radiační pracovníci RCHL ÚCH PŘF MU a současně jsou připravováni k řízení a provádění zásahu.

Noví pracovníci jsou s obsahem pokynů prokazatelně seznamováni před zahájením činností se zdroji IZ, studenti pak před zahájením radiačních činností v praktiku.

### **Zásahová instrukce pro případ ztráty kontroly nad zdrojem ionizujícího záření**

- viditelným způsobem označit rozsah kontaminované plochy
- pro zabránění dalšímu šíření radioaktivních látek všechny osoby opustí prostor nehody, místnost se uzavře
- soustředit postižené osoby na bezpečném stanovišti v blízkosti místa nehody
- dozimetricky zkontrolovat, zda nedošlo ke kontaminaci osob
- zaznamenat všechny údaje o zjištění, projevech a průběhu mimořádné události včetně údajů o zdroji záření (aktivita, dávkový příkon, lokalizace)
- zaznamenat údaje o postižených nebo ohrožených osobách (seznam, stanovit rozsah a lokalizaci možných zasažených orgánů nebo částí těla, typy použitých ochranných pomůcek)
- zaznamenat údaje, ze kterých by bylo možné odhadnout velikost havarijních dávek, kterými byly postižené osoby ozářeny (vzdálenost od zdroje resp. dávkový příkon, doba ozáření apod.)
- před dekontaminací provést kontrolní měření dávkového příkonu nebo povrchové kontaminace k určení rozsahu události

- provést dekontaminaci
- vyhodnotit výsledky operativního monitorování a posoudit závažnost nehody
- provést organizační opatření a zajistit lékařskou péči v závislosti na odhadované expozici pracovníků:
  - v případě překročení 50 mSv vyřadit postižené osoby z práce se zdroji IZ a další expozice plánovat tak, aby nedošlo k překročení 100 mSv v pěti po sobě následujících letech
  - v případě překročení 100 mSv kontaktovat odpovídající zdravotnické pracoviště k posouzení možných deterministických účinků

### Dekontaminační postupy

#### **dekontaminace pracoviště:**

- dekontaminaci provádět v gumových rukavicích
- buničitou vatou odsát maximální množství radioaktivní látky
- za použití úklidových prostředků pro aktivní úklid vhodným dekontaminačním prostředkem (např. roztok kyseliny citrónové) omýt zasaženou plochu
- dozimetricky zkontrolovat úspěšnost dekontaminace
- mytí a proměňování opakovat až do poklesu kontaminace na hodnotu, která se již dalším mytím nemění, nebo na hodnotu pozadí použitého monitorovacího přístroje
- nelze-li prostor dokonale zbavit radioaktivní kontaminace, nutno plochu zřetelně označit a vhodným způsobem pokrýt
- odpad vznikající při dekontaminaci (vata, rukavice) odložit do PE sáčku a po skončení práce sáček řádně označený (datum, nuklid) uložit do skladu radioaktivních zářičů a radioaktivních odpadů
- předměty kontaminované při nehodě dekontaminovat, proměřit a v případě nutnosti v PE sáčku označeném datem a nuklidem uložit do skladu radioaktivních zářičů a radioaktivních odpadů

#### **v případě kontaminace rukou, očí a oděvu:**

- na místě nehody ze zasažených míst odstranit radioaktivní látku - prášek smést do PE sáčku, navlhčenou buničitou vatou otřít zasažené místo - znečištěnou vatu pak uložit do PE sáčku
- nedotýkat se žádných předmětů, aby nedošlo k rozšíření kontaminace
- v umývárně svléci gumové rukavice, odložit kontaminovaný oděv - uzavřít do PE pytle a přenést do skladu radioaktivních zářičů a radioaktivních odpadů

- dozimetricky zkontrolovat kontaminaci na kůži
- provést dekontaminaci pokožky:
  - z kontaminovaného místa pokožky buničitou vatou opatrně odsát radioaktivní látku
  - pokožku omývat vlažnou vodou za použití mýdla
  - nedaří-li se pokožku dostatečně dekontaminovat tímto způsobem, použít komplexotvorné látky, např. 1% roztok kyseliny citronové
  - očistu provádět opatrně, aby nedošlo k porušení pokožky
  - průběžně provádět dozimetrickou kontrolu
  - celý proces opakovat až do poklesu měřené hodnoty na hodnotu pozadí použitého monitorovacího přístroje
- jsou-li zasaženy oči, provádět jejich výplachy co nejčistší vodou (borová voda, oftal)
- dojde-li ke kontaminaci kazety osobního dozimetru, odpovědný pracovník zajistí změření kontaminace kazety a její výměnu

**v případě poranění zabránit možnosti kontaminace rány:**

- okolí rány opatrně omývat
- ránu oplachovat vodou
- krev nechat volně odtékat
- je-li poranění na ruce, může se pokračovat v práci jen tehdy, když nehrozí další kontaminace

**při podezření na vnitřní kontaminaci:**

- provádět výplachy úst vodou, kloktání nebo výtěry nosu
- dle situace vyvolat zvracení nebo zajistit výplach žaludku
- pro pozdější hodnocení ozáření pracovníka uchovat veškerý biologický materiál
- zajistit měření vnitřní kontaminace na pracovišti vybaveném celotělovým detektorem (ODK JE Dukovany, SÚRO Praha)

**Zásahová instrukce pro případ ztráty nebo odcizení zdroje záření**

- ztrátu resp. podezření na odcizení radioaktivního zářiče oznámit Policii ČR

- policii předat popis radioaktivního zářiče a informaci o vlastnostech radioaktivní látky a emitovaného záření a popis jejich nebezpečných vlastností



# ÚLOHA Č. 1 - STATISTICKÝ CHARAKTER RADIOAKTIVNÍHO ROZPADU A CHYBY PŘI MĚŘENÍ RADIOAKTIVNÍCH VZORKŮ

## Teoretická část

Měříme-li určitou fyzikální veličinu, jejíž skutečná hodnota je  $\mu$ , dostáváme výsledek měření ve tvaru  $x = \mu \pm v$ , kde  $v$  je jistá náhodná odchylka. Čemu se tato odchylka rovná v každém jednotlivém případě nelze určit. Pomocí zákona rozdělení náhodných veličin lze však určit pravděpodobnost toho, že náhodná veličina, tj. výsledek zatížený náhodnou chybou, bude ležet v jistém intervalu. Pro nekonečně malý interval  $(x, x+dx)$  se obvykle tato pravděpodobnost řídí Gaussovým distribučním zákonem.

$$f(x) = \frac{1}{\delta\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\delta^2}}, x \in \mathbb{R} \quad (1)$$

Veličiny  $\mu$  a  $\delta^2$  charakterizují distribuční křivku. Parametr  $\delta^2$  je mírou rozptylu náhodné veličiny (tzv. disperse neboli rozptyl) a kladná hodnota jeho druhé odmocniny ( $\delta$ ) je tzv. **střední kvadratická odchylka**. Pravděpodobnost toho, že výsledek určitého měření bude větší než určitá hodnota  $a_1$  a menší než  $a_2$  je potom:

$$P(x) = \int_{a_1}^{a_2} f(x) dx = \frac{1}{\delta\sqrt{2\pi}} \int_{a_1}^{a_2} e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\delta^2}} dx, x \in (a_1, a_2);$$
$$a_1, a_2 \in \mathbb{R} \quad (2)$$

Například pravděpodobnost toho, že měřená veličina bude ležet v  $\mu \pm \delta$  je 0,683. To znamená, že při dostatečně velkém počtu měření budou přibližně dvě třetiny výsledků ležet v intervalu  $\mu \pm \delta$ . Podobně pro intervaly  $\mu \pm 2\delta$  a  $\mu \pm 3\delta$  jsou příslušné pravděpodobnosti 0,950 a 0,997.

**Radioaktivní rozpad je děj, který má pravděpodobnostní charakter.** Zákony radioaktivního rozpadu a hromadění jsou statistické zákony, které **platí jen pro dostatečně velký počet radioaktivních jader**. Proto se při měření radioaktivity setkáváme s rozptylem výsledků (statistickými fluktuacemi)<sup>1</sup>. Pravděpodobnostní popis radioaktivního rozpadu lze uskutečnit za několika předpokladů:

---

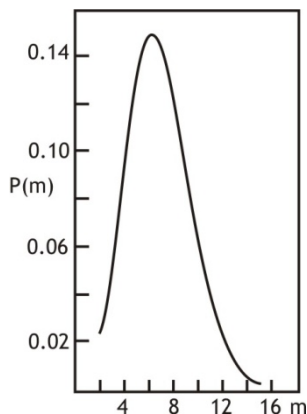
<sup>1</sup> K rozptylu výsledků, který pozorujeme při měření radioaktivity, přispívají obecně i náhodné chyby způsobené např. kolísáním napětí na detektoru, kolísáním pozadí nebo chybami v přípravě vzorků. Tyto vlivy lze teoreticky zcela eliminovat, takže potom zůstávají pouze fluktuace způsobené statistickým charakterem radioaktivního rozpadu. V dalším je uvažován právě tento případ.

1. pravděpodobnost  $p$  rozpadu určitého jádra během časového intervalu  $\Delta t$  nezávisí na podmínkách, v nichž se jádro nachází; závisí jen na velikosti intervalu  $\Delta t$ , při čemž pro dostatečně krátký interval  $\Delta t$ , je pravděpodobnost  $p$  úměrná délce tohoto intervalu ( $p = \lambda \Delta t$ );
2. pravděpodobnost  $p$  rozpadu jednoho z  $N$  jader během nekonečně malého intervalu  $\Delta t$  je úměrná délce tohoto intervalu a existujícímu počtu jader ( $p = \lambda N \Delta t$ );
3. pravděpodobnost rozpadu  $m$  jader za časový úsek  $t$ , který je menší než poločas rozpadu, nezávisí na počtu jader, která se rozpadla v předcházejících stejně dlouhých intervalech.

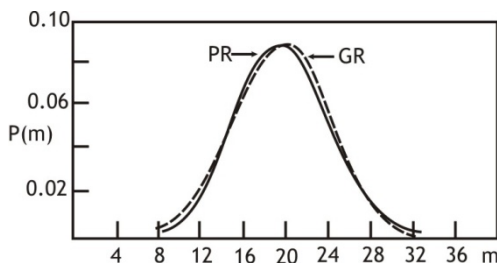
Z těchto předpokladů lze odvodit, že **pravděpodobnost rozpadu**  $m$  radioaktivních jader v časovém intervalu  $t$  **se řídí Poissonovým rozdělením**

$$P(m) = \frac{\mu^m e^{-\mu}}{m!} \quad (3)$$

Veličina  $\mu$  zde značí střední počet rozpadů za časový interval  $t$ . Při dostatečně velkém počtu měření lze nahradit skutečnou měřenou hodnotu aritmetickým průměrem experimentálních výsledků tj.  $\mu \approx \bar{x}$ . Poissonovo rozdělení má na rozdíl od Gaussova jen jeden parametr ( $\mu$ ); při malých hodnotách  $\mu$  je nesymetrické (obr. 1), s rostoucím  $\mu$  se však stává symetrickým, až nakonec je lze dostatečně přesně aproximovat Gaussovým rozdělením s disperzí  $\delta^2 = \mu$  (obr. 2).



Obr. 1: Nesymetrický charakter Poissonova rozdělení pro malé  $m$



Obr. 2: Srovnání Poissonova a Gaussova rozdělení pro větší  $m$

Počet impulsů zaregistrovaným počítačem je přímo úměrný počtu rozpadů. Proto pravděpodobnost  $P(N)$ , že za určitý interval bude zaregistrováno  $N$  impulsů je

$$P(N) = \frac{\bar{N}^N e^{-\bar{N}}}{N!} \quad (4)$$

kde  $N$  je střední počet impulsů zaregistrovaný v uvažovaném časovém intervalu. Tomu odpovídající disperze  $\delta^2 = \bar{N}$ . Je-li v jednom měření zaregistrován dostatečně velký počet impulsů  $N_i$ , platí přibližně  $\bar{N} \cong N_i$  a

$$\delta = \sqrt{\bar{N}} \cong \sqrt{N_i} \quad (5)$$

**Střední kvadratickou odchylku** způsobenou statistickými fluktuacemi radioaktivního rozpadu lze tedy určit z jediného měření.

Výsledky měření radioaktivních preparátů se nejčastěji vyjadřují jako **četnost**, což je počet impulsů za jednu minutu:

$$R = \frac{N}{t} \quad (6)$$

kde  $t$  je doba měření v minutách a  $N$  je celkový počet impulsů zaregistrovaných za  $t$  minut. Střední kvadratická odchylka četnosti je

$$\delta(R) = \frac{\delta(N)}{t} = \frac{\sqrt{\bar{N}}}{t} = \sqrt{\frac{\bar{R}}{t}} \cong \sqrt{\frac{R_i}{t}} \quad (7)$$

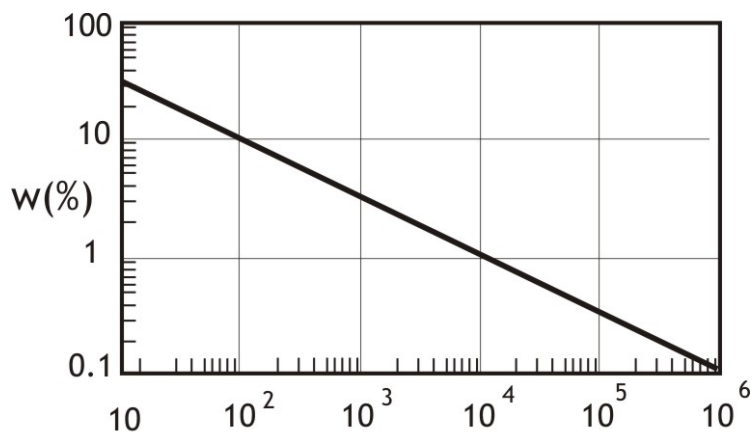
a **relativní kvadratická odchylka** (poměr absolutní odchylky  $\delta(R)$  k průměru měřené veličiny)

$$w(R) = \frac{\delta(R)}{\bar{R}} = \frac{1}{\sqrt{\bar{R} t}} = \frac{1}{\sqrt{R_i t}} \quad (8)$$

Vyjadřuje-li se v procentech,

$$w(R) = \frac{100}{\sqrt{R_i t}} = \frac{100}{\sqrt{N_i}} \quad (9)$$

Střední kvadratická i relativní střední kvadratická odchylka se tedy snižují s rostoucí dobou měření, tedy s celkovým zaregistrovaným počtem impulsů. Pro  $w(R)$  to znázorňuje obr.3



Obr. 3: Závislost relativní střední kvadratické odchylky  $w$  na celkovém počtu zaregistrovaných impulsů  $N$

V obecném případě se mohou kromě statistických fluktuací uplatňovat též další náhodné chyby. Chyba měření se pak vyjadřuje jako celková odchylka měření

$$s(R) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (R_i - \bar{R})^2}{n-1}} \geq \delta(R) \quad (10)$$

Odchylka způsobená statistickými fluktuacemi představuje její minimální možnou hodnotu při dané četnosti a době měření. Relativní celková odchylka je

$$w(R) = \frac{s(R)}{R} \quad (11)$$

Při měření radioaktivity se vždy uplatňuje tzv. **pozadí**. Jsou to impulsy registrované detektorem v nepřítomnosti radioaktivního vzorku a jsou dvojího původu. U ionizačních detektorů je hlavní příčinou pozadí pronikavá složka kosmického záření (její hlavní složkou jsou miony, v menším množství jsou zde zastoupeny protony, alfa částice a  $\pi$  mezony, všechny s vysokou energií). U scintilačních detektorů je pozadí způsobeno temným proudem fotonásobiče a kosmické záření v něm představuje jen malou část. U obou typů detektorů přispívají k pozadí v malé míře též stopy radioaktivních látek v materiálech, z nichž je detektor zhotoven, a ionizující záření z okolí.

Při každém měření radioaktivního vzorku registruje detektor současně i pozadí. Přímou lze tedy z měření získat četnost vzorku z pozadím  $R_{v+p}$  a četnost pozadí  $R_p$  (měří se tímtež detektorem za stejných podmínek bez vzorku). Jen na tyto **přímo měřitelné veličiny** se vztahují výše uvedené vztahy. Správnou četnost vzorku získáme ze vztahu

$$R_v = R_{v+p} - R_p \quad (12)$$

Jde tedy o veličinu stanovenou nepřímou. K její chybě přispívají chyby měření obou přímo měřitelných veličin.

Představuje-li hledaná veličina rozdíl (nebo též součet) bezprostředně měřených veličin jako je tomu právě u  $R_v$  v rovnici (12), platí pro střední kvadratickou odchylku nepřímou stanovené veličiny

$$\delta(R_v) = \sqrt{\delta^2(R_{v+p}) + \delta^2(R_p)} \quad (13)$$

S použitím rovnice (7) dostáváme

$$\delta(R_v) = \sqrt{\frac{R_{v+p}}{t_{v+p}} + \frac{R_p}{t_p}} \quad (14)$$

a podobně

$$w(R_v) = \frac{\delta(R_v)}{R_v} = \frac{\sqrt{\frac{R_{v+p}}{t_{v+p}} + \frac{R_p}{t_p}}}{R_{v+p} - R_p} \quad (15)$$

Ve vztazích (14) a (15) je  $t_{v+p}$  a  $t_p$  doba měření vzorku a pozadí. Je zřejmé, že **pozadí snižuje přesnost měření**, protože v pozadí se též projevují statistické fluktuační.

Je-li hledaná veličina  $R$  dána součinem nebo podílem naměřených hodnot, např. četností  $R_1$  a  $R_2$ , platí

$$\delta = \sqrt{\left(\frac{R_1}{R_2}\right)^2 \left(\frac{\delta_1^2}{R_1^2} + \frac{\delta_2^2}{R_2^2}\right)} \quad (16)$$

a

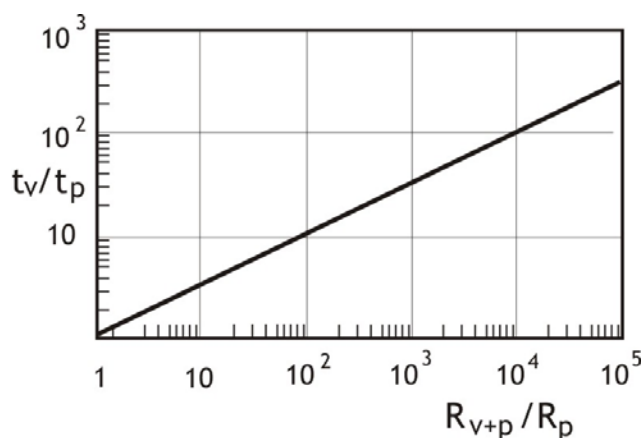
$$w = \sqrt{\frac{\delta_1^2}{R_1^2} + \frac{\delta_2^2}{R_2^2}} \quad (17)$$

Ze vztahů (13) - (15) lze odhadnout vliv na pozadí a chyby v jeho určení na chybu četnosti vzorku  $\delta(R_v)$ . Rozlišují se tři případy. Je-li četnost pozadí nižší o více než dva řády než četnost vzorku, je možno pozadí zcela zanedbat, protože jeho hodnota nepřesahuje střední kvadratickou odchylku četnosti vzorku ( $R_p < \delta(R_v)$ ). Je-li četnost pozadí nižší o 1 – 2 řády než četnost vzorku, pozadí se odečítá (vztah (12)), ale při výpočtu střední kvadratické odchylky četnosti vzorku se zanedbává chyba v určení pozadí (vztah (13)) pro případ  $\delta(R_{v+p}) \gg \delta(R_p)$ . Jsou-li konečně obě četnosti řádově stejné, používá se vztahů (13) – (15).

Ze vztahů (13) – (15) je též vidět, že pro dané hodnoty  $R_{v+p}$  a  $R_p$  lze velikost odchylek  $\delta(R_v)$  a  $w(R_v)$  ovlivňovat volbou doby měření vzorku a pozadí. Někdy se vyskytuje případ, že je vhodné rozdělit určitý celkový čas  $t = t_{v+p} + t_v$  mezi měření vzorku a pozadí tak, aby kvadratická odchylka byla minimální. Takové optimální rozdělení měřicích časů lze získat derivací rovnice (14) a nalezení podmínky pro minimum funkce jako

$$\frac{t_{v+p}}{t_p} = \sqrt{\frac{R_{v+p}}{R_p}} \quad (18)$$

Optimální hodnoty  $t_p$  a  $t_{v+p}$  se získávají kombinací rovnice (16) se vztahem  $t = t_v + t_{v+p}$  a s použitím přibližných hodnot  $R_p$  a  $R_{v+p}$ .<sup>2</sup> Optimální poměr časů pro různé hodnoty poměru  $R_{v+p}/R_p$  ukazuje obr. 4.



Obr. 4: Optimální poměr časů pro různé hodnoty poměru  $R_{v+p}/R_p$

Vztah (18) lze též použít k určení celkového počtu impulsů vzorku  $N_{v+p}$  a pozadí  $N_p$  potřebných pro požadovanou relativní kvadratickou odchylku četnosti vzorku  $w(R_v)$ . Při výpočtu se vztah (18) kombinuje se vztahy (13) a (15) a potřebné hodnoty  $N_{v+p}$  a  $N_p$  se uvádějí pro měnící se poměr  $R_{v+p}/R_p$ :

$R_{v+p} / R_p$	w = 1 %		w = 3 %		w = 5 %		w = 10 %	
	$N_p$	$N_{v+p}$	$N_p$	$N_{v+p}$	$N_p$	$N_{v+p}$	$N_p$	$N_{v+p}$
1,3	240000	350000	27000	40000	9500	14000	2400	3500
1,5	89000	163000	10000	18000	3600	6500	900	1600
1,7	47000	105000	5000	12000	2000	4000	470	1000
2,0	24000	68000	2700	7600	1000	2700	240	710
3,0	11500	46000	1300	5100	450	1800	115	450
5,0	2000	23000	200	2600	80	900	20	230
10,0	500	16000	60	1800	20	650	5	160
20,0	150	13000	20	1500	6	540	-	130
50,0	34	11900	4	1300	-	480	-	120
100,0	11	11200	-	1200	-	450	-	110
( $R_p = 0$ )	-	10000	-	1100	-	400	-	100

Z výše uvedené tabulky se lze snadno přesvědčit o tom, že měření nízkoaktivních vzorků je časově velmi náročné<sup>3</sup> a to zvláště tehdy, je-li vysoké pozadí. Pro rutinní práci s radioaktivními indikátory je proto třeba plánovat pokusy tak, aby počáteční aktivita vložená do pokusu poskytla

<sup>2</sup> Chceme-li např. na měření pozadí ( $R_p = 20$  imp / min) a vzorku ( $R_{v+p} = 60$  imp / min) věnovat celkovou dobu měření 30 minut, vychází ze vztahu (16)  $t_{v+p} = 19$  minut a  $t_p = 11$  minut. Za těchto podmínek  $w(R) = 0,03$ . Jakékoli jiné rozdělení doby měření by vedlo k větší chybě  $R_v$ .

<sup>3</sup> Uvažme opět  $R_{v+p} = 60$  imp/min a  $R_p = 20$  imp / min, tj.  $R_{v+p} / R_p = 3,0$  a předpokládejme, že se požaduje změřit četnost vzorku  $R_v$  s 3 % relativní odchylkou. Z tabulky nalezneme, že by v tomto případě bylo třeba měřit vzorek  $5100 / 60 = 85$  minut a pozadí  $1300 / 20 = 65$  minut.

vzorky, jejichž četnost převyšuje četnost pozadí alespoň dvakrát. Z téhož důvodu je pochopitelná snaha snížit pozadí zejména při použití scintilačních detektorů elektronickou diskriminací nebo jiným způsobem. Velmi dlouhé měřicí časy, které pro nízké aktivity vyplívají z tabulky, jsou pro běžnou práci neúnosné a v praxi se s nimi setkáváme jen v ojedinělých případech. Příliš nízká četnost vzorku může nakonec zcela znehodnotit celý pokus. Z tohoto důvodu doporučila mezinárodní unie pro čistou a užitou chemii (IUPAC) tzv. **minimální statisticky významnou četnost vzorku** jako

$$R_{v,\min} = 3 \sqrt{R_p} \quad (19)$$

Uvážíme-li jako příklad znovu hodnotu  $R_p = 20$  imp/min, pak  $R_{v,\min} \cong 13$  imp/min, takže vzorky s  $R_{v+p} < 33$  imp/min je třeba vyloučit jako statisticky nevýznamné.

### Vyloučení podezřelých hodnot.

Při měření řady stejných vzorků (př. standardů) se někdy určitá hodnota četnosti jeví jako značně odlišná od ostatních. Zda ji lze vyloučit určuje Chauvenetovo kritérium, které používá poměru individuální a střední kvadratické odchylky  $|R - \bar{R}| / \delta$ . Pro různý počet měření  $n$  udává tento poměr tabulka:

<b>n</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>	<b>7</b>	<b>8</b>	<b>10</b>	<b>12</b>	<b>15</b>
$ R - \bar{R}  / \delta(R)$	1,15	1,38	1,54	1,65	1,73	1,80	1,86	1,91	2,04	2,13
<b>n</b>	<b>20</b>	<b>25</b>	<b>30</b>	<b>35</b>	<b>40</b>	<b>50</b>	<b>75</b>	<b>100</b>	<b>200</b>	
$ R - \bar{R}  / \delta(R)$	2,24	2,35	2,40	2,45	2,50	2,58	2,71	2,81	3,02	

Vychází-li v souboru  $n$  měření pro určitou hodnotu četnosti Chauvenetovo kritérium větší, než je příslušná hodnota v tabulce, lze tuto hodnotu vyloučit.

### Praktická část úlohy

#### **A) Vliv doby měření a pozadí na přesnost měření radioaktivních vzorků**

##### Postup a vyhodnocení

1. Jako detektor ionizujícího záření použijeme scintilační krystal NaI(Tl) s fotonásobičem spolu s detektorem impulsů. Podle návodu k obsluze připravíme tuto sestavu k měření a nastavíme pracovní napětí fotonásobiče. Jeho hodnota je uvedena na detektoru.
2. Pod detektor umístíme kapsli označenou písmenem „P“ (kapsle bez radioaktivní látky). Změříme pozadí  $N_p$  pro  $t_p = 600$  s. Určíme  $R_p$  v imp/min a  $\delta(R_p)$ .

3. Pod detektor umístíme kapsli označenou číslicí „1“. Změříme počet impulsů za 60, 100, 400 a 600 s. Pro každé měření uvedeme v tabulce  $t_{v+p}$  v minutách,  $N_{v+p}$ ,  $R_{v+p}$  a  $R_v$  v imp / min a dále pak  $\delta(R_{v+p})$  (vztah (7)) a  $\delta(R_v)$  (vztah (13)). Četnosti zaokrouhlujeme na celé impulsy, odchylky  $\delta$  na jedno desetinné místo.
4. Pod detektor umístíme kapsli označenou číslicí „2“. Změříme počet impulsů za 60, 100, 400 a 600 s. V tabulce uvedeme  $t_{v+p}$  v minutách,  $N_{v+p}$ ,  $R_{v+p}$  a  $R_v$  v imp / min a dále pak  $\delta(R_{v+p})$  (vztah (7)). Pouze u jednominutového měření použijeme též vztahu (13) k výpočtu  $\delta(R_v)$ . Oba výsledky porovnáme a určíme, jaký vliv na přesnost výsledku má zanedbání  $\delta(R_p)$ .
5. Pod detektor umístíme kapsli označenou číslicí „3“. Změříme počet impulsů za 60, 100 a 400 s. V tabulce uvedeme  $t_{v+p}$  v minutách,  $N_{v+p}$ ,  $R_{v+p}$  a  $R_v$  v imp / min a dále pak  $\delta(R_{v+p})$  (vztah (7)). Hodnoty  $\delta(R_{v+p})$  porovnáme s četností pozadí  $R_p$  a určíme, zda je nutné opravit hodnoty  $R_{v+p}$  na pozadí.
6. Se stejnou kapslí jako v bodě 5. změříme pětkrát počet impulsů při  $t_{v+p} = 60$  s ( $N_{v+p} = R_{v+p}$ ). Na tento soubor měření použijeme Chauvenetovo kritérium a určíme, zda se má některá hodnota vyloučit. V tabulce uvedeme pro všechny vzorky  $R_{v+p}$  a  $R_v$ ,  $|R_v - \overline{R_v}|$ ,  $\delta(R_v)$  a  $|R_v - \overline{R_v}| / \delta(R_v)$ .
7. Pro zadaný celkový počet zaregistrovaných impulsů  $N = 10^n$  ( $n = 2, 3, 4, 5, 6$ ) vypočtete  $\delta(N)$  a  $w(N)$  ze vztahů (5) a (9).

## B) Vliv doby měření a pozadí na přesnost měření radioaktivních vzorků

### Poissonovo rozdělení

Nesymetrický charakter Poissonova rozdělení se projevuje nejvýrazněji při malých četnostech. K jeho demonstraci použijeme měření pozadí scintilačního detektoru, které podléhá podobným statistickým fluktuacím jako radioaktivní rozpad.

#### Postup

Podle návodu k obsluze připravíme detekční sestavu k měření. Nastavíme pracovní napětí a předvolbu času na 6 s. Za těchto podmínek změříme asi 300 x hodnotu pozadí  $N_p$  s použitím automatického opakování měření. Naměřená data zaznamenáváme do paměti přístroje. Po skončení měření je přeneseme do počítače a vyhodnotíme.

#### Vyhodnocení

Vypočteme střední hodnotu  $\bar{N}$ . V tabulce uvedeme vzestupně seřazené hodnoty  $N_p$ , frekvenci jejich výskytu  $v$  (tj. kolikrát se která hodnota vyskytla v měřeném souboru) a teoretickou pravděpodobnost  $P(N)$  vypočtenou podle rovnice (4).

Do jednoho grafu vyneseme závislosti  $v$  a  $P(N)$  na  $N_p$ . Obě křivky porovnáme a v případě, že se nekryjí, se pokusíme o vysvětlení neshody.



## Náhodné chyby a Chauvenetovo kritérium

Na sérii vzorků připravených stejným způsobem (pipetováním roztoku radionuklidu a vysušením) si ověříme, zda se kromě statistických fluktuací uplatnily i náhodné chyby – v tomto případě chyby při přípravě vzorku.

### Postup

1. Do šesti hliníkových mistichek dáme kolečko filtračního papíru. Na každou misku nanese dávkovací mikropipetou 100  $\mu$ l roztoku radionuklidu.
2. Vzorky dáme na Petriho misku a společně je vysušíme pod infralampou. Sušíme jen mírně, aby se filtrační papír na miskách nekroutil.
3. Změříme pozadí,  $t_p = 400$  s.
4. Všechny vzorky změříme s chybou  $w(R_{v+p}) \leq 2\%$  (vztah (9)). Misticška se vzorkem musí být vždy ve stejné poloze vzhledem k detektoru, aby byla zaručena stejná geometrie měření.
5. Po změření odstraníme filtrační papírky s odparky radionuklidu pinzetou do nádoby na pevný odpad a použité hliníkové misky nejprve stříčkou opláchneme do nádoby s kapalným odpadem a poté je důkladně umyjeme pod tekoucí vodou.

### Vyhodnocení

Uvedeme výsledky měření pozadí:  $t_p$ ,  $N_p$ ,  $R_p$ . V tabulce uvedeme pro všechny vzorky  $N_{v+p}$ ,  $t_{v+p}$ ,  $R_{v+p}$ ,  $R_v$ ,  $|R_v - \overline{R}_v|$ ,  $\delta(R_v)$  vypočtenou ze vztahu (7) a  $(|R_v - \overline{R}_v|)^2$ . Dále vypočteme celkovou odchylku měření podle rovnice (10), porovnáme ji s hodnotami  $\delta(R_v)$  a určíme, zda se při přípravě vzorků projevily náhodné chyby.

Pro všechny vzorky vypočteme poměr  $|R_v - \overline{R}_v| / \delta(R_v)$  a s použitím Chauvenetova kritéria určíme, zda je nutné některé měření vyloučit. Vykazují-li naměřené hodnoty velký rozptyl a naznačuje-li Chauvenetovo kritérium, že je třeba vyloučit více výsledků, vyloučíme četnost, která se nejvíce liší od průměrné hodnoty  $\overline{R}_v$  a soubor zbývajících pěti měření znovu vyhodnotíme (vypočteme znovu  $R_v$ ,  $|R_v - \overline{R}_v| / \delta(R_v)$  a porovnáme s Chauvenetovým kritériem). Jestliže by i nyní bylo třeba vyloučit více než jednu hodnotu, je zřejmé, že celá příprava vzorků byla chybná.

## ÚLOHA Č. 2 - MRTVÁ DOBA SCINTILAČNÍ SONDY

### Teoretická část

Scintilační sonda, patří pro svou relativní jednoduchost a kompaktnost a také pro své vhodné vlastnosti při detekci ionizujícího záření, k velmi často používaným detektorům ionizujícího záření. Scintilační sonda se skládá ze scintilačního krystalu a fotonásobiče, který zesiluje scintilační záblesky vzniklé při absorpci ionizujícího záření ve scintilačním krystalu a převádí je na elektrické impulsy, snadno detekovatelné elektronickým zařízením (čítačem impulsů). Obě dvě tyto části (krystal a fotonásobič) musí tedy být opticky spojené a také musí být uzavřeny ve světlotěsném obalu – scintilační sondě. Detailní popis funkce scintilačního krystalu a fotonásobiče najdete v úloze č. 3.

Scintilační krystal a tedy i scintilační sonda jsou citlivé především na  $\gamma$  záření, měření  $\beta$  zářičů probíhá s podstatně nižší účinností. Pokud tedy měříme např. směs radionuklidů, kde jeden radionuklid emituje  $\gamma$  záření a druhý pouze  $\beta$  záření (o podobné aktivitě), dochází při použití scintilačního krystalu v podstatě pouze k detekci radionuklidu emitujícího záření  $\gamma$  viz úloha č. 7 a 10.

Radionuklidy emitující nízkoenergetické  $\beta$  záření nelze měřit vůbec ( $^3\text{H}$ ,  $E_{max} = 0,018 \text{ MeV}$ ;  $^{14}\text{C}$ ,  $E_{max} = 0,158 \text{ MeV}$ ;  $^{35}\text{S}$ ,  $E_{max} = 0,167 \text{ MeV}$ ). K jejich měření se dnes používá výhradně metoda kapalné scintilace, viz úloha č. 13.

Jako doplněk při měření ionizujícího záření pomocí scintilačních krystalů lze použít Geiger-Müllerovy počítače. GM počítač sestává ze dvou válcových elektrod, mezi nimiž je vhodná plynová náplň. Katoda má velký průměr (běžně 10 – 30 mm), anodu tvoří tenké, obvykle wolframové vlákno o průměru přibližně 0,1 mm, které prochází osou katody. Katoda je z materiálu, který má velkou výstupní práci (měď, mosaz, hliník) a má dokonale hladký vnitřní povrch. Je-li obal počítače skleněný, vytváří se katoda napařením tenké vrstvy wolframu, platiny nebo mědi, popř. nanesením tenké vodivé grafitové vrstvy na vnitřní stranu skleněného obalu. Obě elektrody jsou opatřeny přívody vysokého napětí. Plynovou náplň tvoří směs lehce ionizovatelného plynu (vzácné plyny, resp. jejich směsi a tzv. zhášecí přísady (organické sloučeniny nebo halogeny).

Plynová náplň GM počítače se prakticky neionizuje zářením  $\gamma$ . Přesto však lze  $\gamma$  záření GM počítačem měřit, protože elektrony vznikající ve stěnách počítače fotoefektem a Comptonovým efektem ionizují plynovou náplň. Stěna počítače nesmí být ani příliš tenká (vzniklo by málo sekundárních elektronů), ani příliš silná (elektrony by neprošly do plynové náplně). Optimální tloušťka stěny se přibližně rovná maximálnímu doběhu sekundárních elektronů v materiálu počítače. Účinnost GM počítačů pro  $\gamma$  záření je přibližně 1 – 2 %. Závisí mj. na materiálu katody, protože absorpční koeficient pro  $\gamma$  záření závisí na atomovém čísle absorbujícího materiálu.

GM počítače se proto nejčastěji používají pro měření záření  $\beta$ . Jsou proto zvláště vhodné, protože ionizační účinky  $\beta$  záření jsou takové, že prakticky všechny částice, které vniknou do počítače, v něm způsobí výboj a dojde tedy k detekci tohoto záření. Při měření nízkoenergetického záření  $\beta$  ale nastává opět problém a měření probíhá s poměrně malou účinností ( $^{14}\text{C}$ ,  $E_{max} = 0,158 \text{ MeV}$ ;  $^{35}\text{S}$ ,  $E_{max} = 0,167 \text{ MeV}$ ) anebo není možné vůbec ( $^3\text{H}$ ,  $E_{max} = 0,018 \text{ MeV}$ ).

Doba, po kterou scintilační sonda (anebo GM počítač) neregistruje další částice, se nazývá mrtvá doba detektoru. Příčinou neregistrování dalších impulsů je to, že scintilační záblesk krystalu trvá určitou dobu a pokud v tento okamžik dojde ke vzniku dalšího záblesku, detektor (scintilační krystal) jej nedokáže odlišit od záblesku předchozího. Také pokud ve fotonásobiči právě probíhá zesilování proudu elektronů vzniklých vyražením scintilačním zábleskem krystalu z fotokatody, nedokáže fotonásobič odlišit jednotlivé záblesky ze scintilačního krystalu, pokud přijdou s příliš malým zpožděním po sobě. Celková mrtvá doba scintilační sondy je tedy dána především mrtvou dobou fotonásobiče, která je o jeden až dva řády větší než mrtvá doba scintilačního krystalu NaI(Tl).

Mrtvá doba scintilační sondy (či GM počítače) se stanovuje nejčastěji metodou dvou zářičů. K odvození potřebných vztahů je nutno určit poměr celkového času k času, během něhož je scintilační sonda neúčinná. Jestliže během jedné časové jednotky nastává ve scintilační sondě  $N$  scintilačních dějů, nebude sonda účinná po celou časovou jednotku, ale jen po dobu  $1 - N\tau$ , kde  $\tau$  je mrtvá doba. Poměr počtu skutečně dopadajících částic na počítač ( $N_0$ ) k pozorovanému počtu impulsů  $N$  je potom dán vztahem (20)

$$\frac{N_0}{N} = \frac{1}{1 - N\tau} \quad (20)$$

$$\text{odkud } N_0 = \frac{N}{1 - N\tau} \quad (21)$$

Stanovení mrtvé doby metodou dvou zářičů spočívá v tom, že při četnostech, kdy oprava na mrtvou dobu není zanedbatelná, nesouhlasí součet četností dvou zářičů měřených zvlášť ( $R_1$ ,  $R_2$ ) a celkovou četností obou zářičů měřených současně ( $R_{12}$ ). Označíme-li příslušné počty částic skutečně dopadajících na počítač jako  $R_{01}$ ,  $R_{02}$  a  $R_{012}$ , platí pro ně ze vztahu (21)

$$R_{01} = R_1 / (1 - R_1\tau); R_{02} = R_2 / (1 - R_2\tau); R_{012} = R_{12} / (1 - R_{12}\tau)$$

$$\text{Dosazením těchto vztahů do současně platné podmínky: } R_{01} + R_{02} = R_{012}$$

lze pro mrtvou dobu odvodit vztah (22)

$$\tau = \frac{1}{R_{12}} \left( 1 - \sqrt{\frac{(R_{12} - R_1)(R_{12} - R_2)}{R_1 R_2}} \right) \quad (22)$$

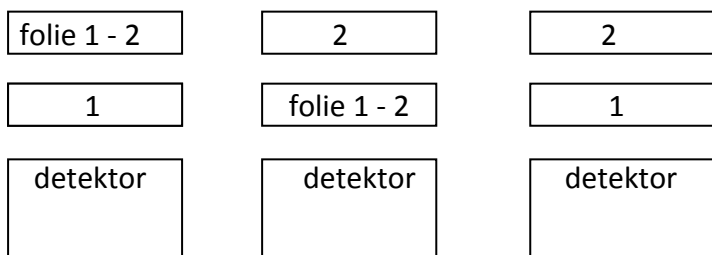
mrtvá doba scintilační sondy způsobuje, že při vyšších četnostech jsou naměřené výsledky chybně nižší, protože sonda nestačí registrovat všechny dopadající částice. Proto je zapotřebí při měření vyšších četností provést korekci naměřené četnosti na mrtvou dobu. Používá se k tomu vztah (21), který vyžaduje znalost mrtvé doby počítače. Novější nukleární čítače provádějí tuto korekci na zadanou mrtvou dobu automaticky.

### Praktická část úlohy

V úloze stanovíme mrtvou dobu scintilační sondy metodou dvou zářičů. Jako zářičů je použito odparků  $^{137}\text{CsCl}$  uzavřených mezi fólie z plastické hmoty. Rozpadové schéma  $^{137}\text{Cs}$  je v **Příloze 1**. Pro stanovení mrtvé doby s 5 % přesností je třeba zaregistrovat v každém měření aspoň  $10^5$  impulsů.

### Postup

1. Jako detektor ionizujícího záření použijeme scintilační krystal NaI(Tl) s fotonásobičem spolu s detektorem impulsů. Podle návodu k obsluze připravíme tuto sestavu k měření. Nastavíme pracovní napětí fotonásobiče zjištěné v úloze č. 3.
2. Pod detektor postupně vkládáme zářiče podle schématu uvedeného níže. Pro zachování geometrie měření pokládáme jednotlivé fólie šipkami na sebe a dodržujeme i stanovený směr šipek. Se zářiči manipulujeme pinzetou. Prázdné fólie slouží ke korekci absorpce zářiče 1 v zářiči 2 a naopak.
3. Před měřením musí být detektor ustálen, proto měření zahájíme nejdříve 2 minuty po vložení pracovního napětí na fotonásobič a 10 sekund po umístění zářiče pod detektor. Desetivteřinový interval dodržujeme u všech měření.
4. Pro každé měření zaznamenáváme čas potřebný pro zaregistrování  $10^5$  impulsů.
5. Totéž měření provádíme i se zářiči 3 a 4. Ve schématu zářič 1 zaměníme zářičem 3 a zářič 2 zaměníme zářičem 4.
6. Po ukončení měření vypneme přístroj předepsaným způsobem a vrátíme zářiče zpět do stínění.



### Vyhodnocení:

Pro obě sady zářičů uvedeme v tabulce hodnoty  $N$ ,  $t_{v+p}$ , četnosti  $R_1$ ,  $R_2$  a  $R_{12}$  v impulsech za minutu a sekundu, mrtvou dobu vypočteme ze vztahu (22).

Pro použitý počítač sestrojíme křivky pro korekci na mrtvou dobu. Pro řadu desíti vhodně zvolených hodnot četnosti  $R$  do  $10R$  vypočteme ze vztahu (21) příslušné opravené četnosti  $R_0$  s použitím stanovené mrtvé doby (v minutách). Graficky vyneseme korekční křivku jako závislost rozdílu  $(R_0 - R)$  na  $R$ . Z grafu či výpočtem zjistíte, při jaké měřené četnosti bude odchylka od skutečné hodnoty 1 a 5 %.

## ÚLOHA Č. 3 - CHARAKTERISTIKA SCINTILAČNÍ SONDY

### Teoretická část

Scintilační detektor je zařízení, které umožňuje registrovat ionizující záření na základě světelných záblesků, tzv. scintilací, vznikajících při dopadu záření na scintilátor. Světelné impulsy jsou registrovány fotonásobičem, který je mění na impulsy elektrické.

Pro scintilátory jsou charakteristické některé základní veličiny. Je to především **luminiscenční účinnost**  $\eta_k$  udávající poměr velikosti energie vyzářené ve formě světla k celkové energii ionizujícího záření absorbovaného scintilátorem. Bývá menší než 30 %. Další důležitou charakteristikou je **spektrum** vyzářovaného světla. Je žádoucí, aby co největší množství emitovaného světla mělo vlnové délky ve spektrální oblasti maximální citlivosti fotonásobiče, která je většinou na rozhraní UV a VIS oblasti. Dále je to ještě **doba trvání scintilačního záblesku**, protože ta určuje rozlišovací dobu scintilačního detektoru. Intenzita vyzářeného světla na počátku světelného impulsu zpočátku prudce roste a po dosažení maximální hodnoty klesá podle vztahu

$$I = I_0 e^{-t/\tau} \quad (23)$$

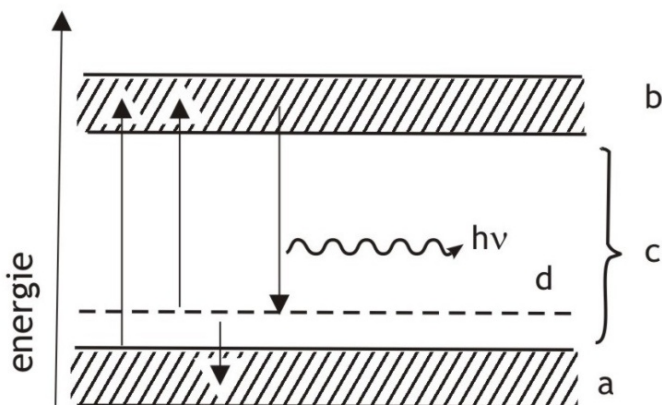
kde  $I_0$  je maximální intenzita vyzářovaného světla,  $t$  je čas, který uplynul od vzniku světelného impulsu a  $\tau$  je tzv. dosvit, což je doba, za kterou intenzita světelného záblesku klesne e-krát. Dosvit používaných scintilátorů se pohybuje v rozmezí  $10^{-9}$  -  $10^{-5}$  s. Přehled nejčastěji používaných scintilátorů, jejich vlastností a použití je shrnut v tabulce:

scintilátor	$\lambda_{\max}$ vyzařovaného světla (nm)	$\eta_k$ (%)	$\tau$ (s)	nejčastější použití
ZnS(Ag) <sup>a</sup>	450	28	$10^{-5}$	těžké nabitě částice ( $\alpha$ )
NaI(Tl)	410	8	$2 \cdot 10^{-7}$	záření $\gamma$ , energetické záření $\beta$
LiI(Eu)	470		$1,3 \cdot 10^{-6}$	záření $\gamma$
athracen	440	4	$3 \cdot 10^{-8}$	záření $\beta$
stilben	420	2,4	$8,2 \cdot 10^{-9}$	záření $\beta$
kapalný scintilátor <sup>b</sup>	430		$1,5 \cdot 10^{-9}$	nízkoenergetické záření $\beta$ ( $^3\text{H}$ , $^{14}\text{C}$ )

<sup>a</sup> s příměsí  $\text{H}_3\text{BO}_3$  k detekci neutronů

<sup>b</sup> roztok scintilátoru (2,5-difenyloxazol) a tzv. posunovače spektra 1,4-bis(5-fenyloxazol-2-yl)benzenu v organickém rozpouštědle (toluen)

Luminiscenci anorganických krystalů s příměsí aktivátoru vysvětluje pásová teorie krystalů. Podle ní se v krystalu jednotlivé energetické hladiny elektronů rozštěpí působením sousedních atomů a vzniká tak energetický pás blízkých hladin, prakticky zcela zaplněný elektrony. Tento pás se nazývá valenční (obr. 5, a).



Obr. 5: Schéma hladin v anorganickém krystalovém scintilátoru

Stejným způsobem se rozštěpí možné vyšší neobsazené hladiny, které vytvoří vodivostní pás (obr. 5, b). Oblast energií mezi těmito pásy je tzv. zakázaný pás (obr. 5, c), v němž elektron v krystalu nemůže nabýt odpovídající energii. Scintilační vlastnosti krystalu se podstatně ovlivňují záměrným zavedením cizích atomů, tzv. **aktivátorů**, do krystalové mřížky, čímž vznikají v zakázaném pásu příměsové hladiny (obr. 5, d).

Vodivostní pás je od nejvyšší hladiny valenčního pásu vzdálen jen několik eV. Získá-li elektron valenčního pásu potřebnou energii, např. interakcí s ionizujícím zářením, může do vodivostního pásu přejít (přechod  $a \rightarrow b$ ). Podobně se může uskutečnit přechod  $d \rightarrow b$ . Vakance ve valenčním pásu vzniklá přechodem  $a \rightarrow b$  se může zaplnit přechodem  $d \rightarrow a$ . Vakance na příměsové hladině vzniklé v důsledku přechodů  $d \rightarrow b$  a  $d \rightarrow a$  jsou **centry vzniku světla** (tzv. luminiscenční centra). Dojde-li k přeskočení elektronu z vodivostního pásu do těchto center ( $b \rightarrow d$ ), vyzařuje se nadbytek energie elektronu ve formě světelného záblesku.

Organické scintilátory se vyznačují velmi krátkým dosvitem. Emise světla u nich není spojena s efekty v krystalové mřížce, nýbrž je důsledkem přeskočení elektronů z excitovaných molekulových orbitalů.

Z anorganických krystalových scintilátorů je nejběžnější krystal jodidu sodného aktivovaného thaliem. Monokrystaly NaI(Tl) pro detekční účely se vyrábí v různých velikostech. Jsou uzavřeny do hliníkového pouzdra pro vyloučení styku krystalu se vzdušnou vlhkostí, pouze ze strany styku s fotonásobičem je krystal uzavřen skleněnou destičkou a dokonalý optický styk s fotonásobičem je zajištěn vrstvou viskózního silikonového oleje. Z vnitřní strany je hliníkový obal opatřen vrstvou oxidu hořečnatého, který odráží světlo zpět do krystalu a zvyšuje tak účinnost měření. Běžné scintilační krystaly NaI(Tl) mají tvar buď plného válce, nebo tvar s dutinou pro měření kapalných vzorků (tzv. studnové krystaly).

**Fotonásobič** je druhou podstatnou součástí scintilačního detektoru. Je to zařízení sdružující fotonu a mnohastupňový zesilovač. Skládá se z fotokatody, z níž se po dopadu světla (scintilací) uvolňují primární elektrony. Ty dopadají na soustavu sekundárních katod (dynod), na kterých se postupně zvyšuje napětí, čímž se počet emitovaných elektronů na cestě od dynody k dynodě

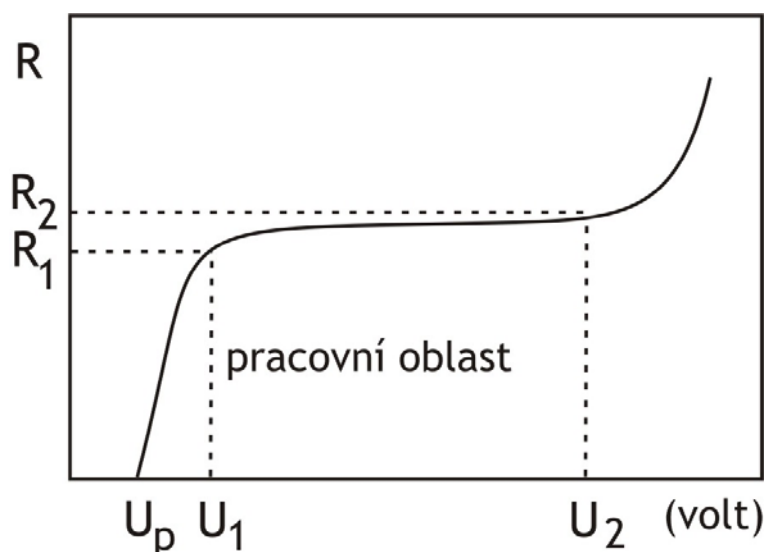
zvětšuje. Celkovým efektem tohoto procesu je celkové zesílení primárního proudu. Běžné fotonásobičem poskytují až  $10^8$ -násobné zesílení. Fotokatoda je vytvořena z poloprůhledného materiálu na vnitřní straně skleněného válce, ve které je také umístěn systém dynod. Materiálem fotokatody je slitina Sb/Cs. Její základní součástí je intermetalická sloučenina  $SbCs_3$  s příměsí volných atomů cesia a antimonu. Citlivost Sb/Cs katody je maximální v rozsahu vlnových délek 300 - 500 nm a činí až jeden elektron na tři světelná kvanta.

Primární fotoelektrony musí dopadnout ve správném směru na první dynodu zesilovacího systému. Jen tak mohou vyvolat sekundární emisi a tím potřebné zesílení. Dynody mají polokruhový tvar a jsou vytvořeny z podkladového materiálu, obvykle z niklu, na němž je nanášena vrstvička látky s velkou sekundární emisí, nejčastěji opět slitina Sb/Cs nebo materiál na bázi Mg/O/Cs. První dynoda má oproti katodě kladný potenciál, což zaručuje, že většina fotoelektronů dopadne na první dynodu a po dráze k ní se potřebně urychlí pro vyvolání sekundární emise. Sekundární elektrony z první dynody se stejným způsobem fokusují dále na druhou a další dynody, z nichž vždy následující má oproti předcházející vyšší kladný potenciál.

Fotonásobič je charakterizován vlastnostmi katody, typem a počtem dynod, rozměrem, maximálním a pracovním napětím, zesílením, celkovou citlivostí a **temným proudem**. Ten je hlavní příčinou vysokého pozadí scintilačních detektorů ve srovnání např. s GM počítačem. Je to proud, který naměříme tehdy, když na fotokatodu nedopadá světlo. Je způsoben převážně termoemisí fotokatody a prvních dynod. Lze jej potlačit elektronicky (viz dále) nebo chlazením fotonásobičem na  $-70\text{ }^\circ\text{C}$ .

### Praktická část úlohy

Pracovní charakteristika scintilačního detektoru je závislost měřené četnosti na napětí vkládaném na systém dynod fotonásobiče. Proměříme ji pro temný proud. Teoretický průběh této závislosti ukazuje obrázek č. 6.



Obr. 6: Pracovní charakteristika fotonásobiče.

Pod prahovým napětím  $U_p$  počítač impulsy neregistruje. V oblasti  $U_1 - U_2$  se fotonásobič dostává do své pracovní oblasti, vytváří se zde jakési sedlo. Pracovní napětí je vhodné zvolit zhruba v 1. třetině tohoto sedla. Nad napětím  $U_2$  se fotonásobič dostává do oblasti trvalého výboje a jeho životnost se rychle zkracuje.

### Postup a vyhodnocení

1. Jako detektor ionizujícího záření použijeme scintilační krystal NaI(Tl) s fotonásobičem spolu s detektorem impulsů. Podle návodu k obsluze připravíme tuto sestavu k měření. Vysoké napětí přiváděné na fotonásobič nastavíme na 400 V. Čas měření nastavíme na 40 s.
2. Pod detektor umístíme zářič označený číslicí „1“ (ze sady zářičů pro úlohy 2 a 3). V intervalu 400 V do 1000 V – 1100 V zvyšujeme napětí po 50 V a vždy změříme četnost za 40 s. **Výsledky vynášíme do grafu během měření.** Pokud by v oblasti kolem 1000 V četnost náhle prudce vzrostla, ihned napětí snížíme, abychom fotonásobič nepoškodili.
3. Po skončení měření stanovíme pracovní napětí fotonásobiče a nastavíme je na přístroji. Další měření (dalších úloh) provádíme s takto stanoveným pracovním napětím.

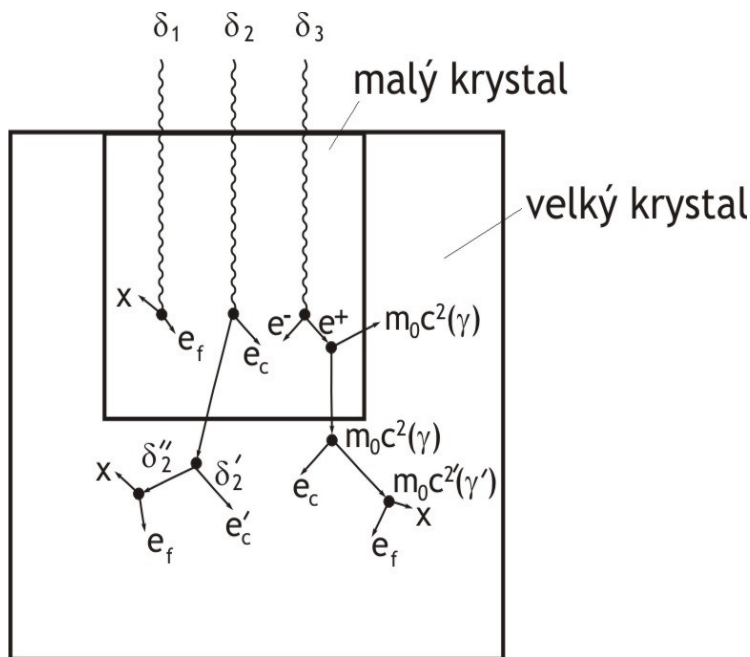


## ÚLOHA Č. 4 - SPEKTROSKOPIE ZÁŘENÍ GAMA S KRYSTALEM NaI(Tl)

### Teoretická část

Skutečné spektrum  $\gamma$  zářiče je pro daný zářič charakteristické (tzv. diferenciální nebo amplitudové spektrum). Spektrum je v podstatě čarové, to znamená, že radionuklid vyzařuje fotony o energiích s velmi nepatrným rozptylem.

Obr. 7 znázorňuje děje, které nastávají při absorpci  $\gamma$  záření.



Obr. 7: Schéma dějů probíhajících při absorpci  $\gamma$  záření

Při energiích  $\gamma$  fotonů  $< 100$  keV dochází k absorpci v krystalu NaI(Tl) pouze fotoefektem a tudíž veškerá energie fotonu je předána krystalu a reálné spektrum by mělo být čarové. Ovšem v důsledku různých efektů (nehomogenita krystalu, nepravidelnosti v odrazu světla, nehomogenita fotokatody, fluktuační vysokého napětí na dynodách, statistické nepravidelnosti při vzniku malého počtu fotoelektronů na fotokatodě) se ve skutečnosti spektrální linie projevují jako plochy.

Při vyšší energii  $\gamma$  fotonů ( $> 100$  keV) interaguje záření v krystalu především Comptonovým rozptylem. Comptonův elektron  $e_c$  je zastaven v krystalu a dává vznik světelnému impulsu, jehož amplituda je úměrná jeho kinetické energii. Je-li krystal malý, Comptonův foton  $\gamma_2'$  z krystalu uniká a jeho energie tedy není krystalem registrována. V tomto případě vzniká pouze impuls odpovídající kinetické energii Comptonova elektronu, která je dána rozdílem energií původního fotonu  $\gamma$  a rozptýleného fotonu. V našem případě

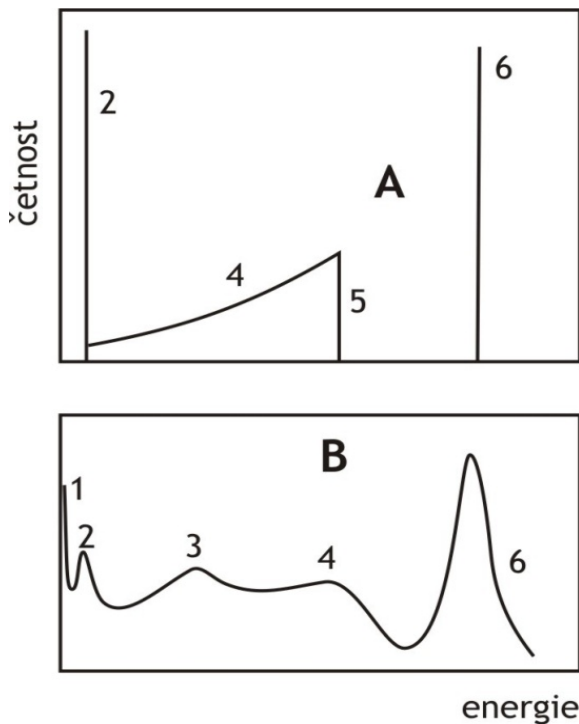
$$E_C = E_{\gamma_2} - E_{\gamma_2'} \quad (24)$$

Energie Comptonova elektronu se však může měnit spojitě (podle úhlu rozptylu) od nuly do maximální hodnoty dané vztahem

$$E_{C,max} = 4 E_{\gamma}^2 / (4 E_{\gamma} + 1) \quad (25)$$

kde  $E_{\gamma}$  je energie původního  $\gamma$  - fotonu v MeV, takže před fotopíkem se ve spektru objevuje široký pás tzv. Comptonova kontinua.

Jako příklad je na obr. 8 spektrum  $^{137}\text{Cs}$ , jehož rozpadové schéma je lze nalézt v **Příloze 1**.



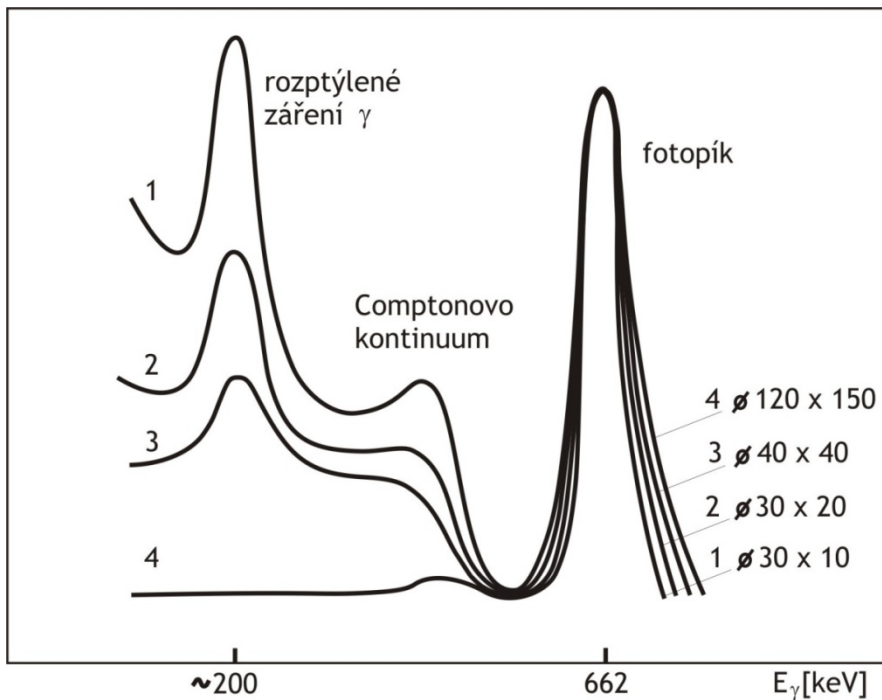
Obr. 8: Amplitudové spektrum  $^{137}\text{Cs}$

A – teoretické spektrum, B – skutečné spektrum

1 - šum fotonásobiče, 2 – K-linie  $^{137}\text{Ba}$ , 3 – píků zpětného odrazu, 4 – Comptonovo kontinuum, 5 – hrana Comptonova kontinua, 6 - fotopík

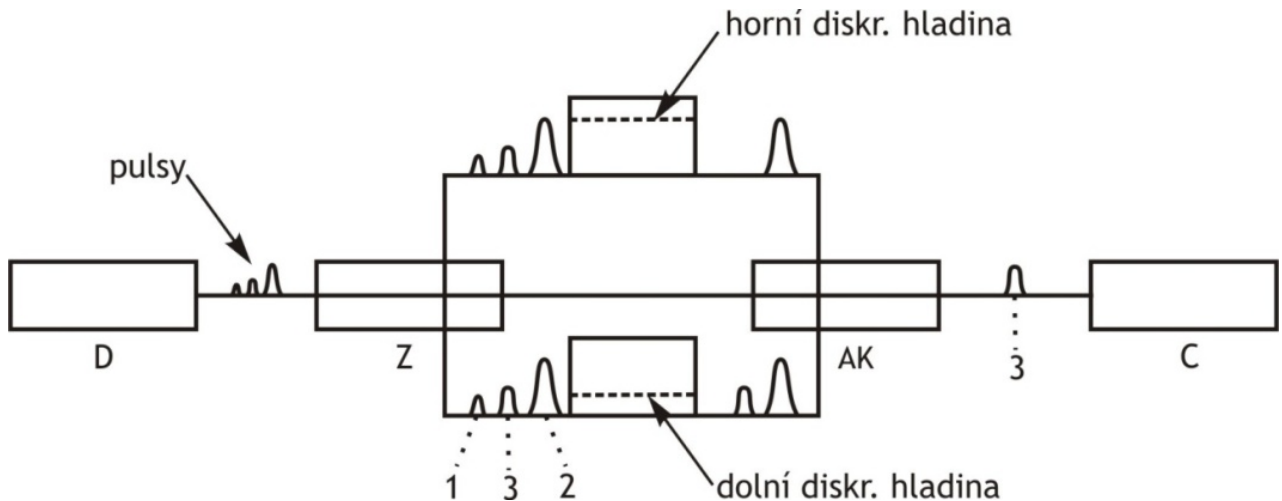
V reálném spektru vidíme kromě linie fotopíku  $^{137}\text{Cs}$ , K-linie  $^{137}\text{Ba}$  (po vnitřní konverzi) a Comptonova kontinua též tzv. píků zpětného odrazu kolem 200 keV. Vzniká tak, že Comptonovy elektrony rozptýlené pod velkým úhlem a uniklé z krystalu se odrážejí od stěn krytu a odražené záření se znovu absorbuje v krystalu. Kromě toho se v oblasti nízkých energií projevuje šum fotonásobičem způsobený sprškami nízkoenergetických elektronů spontánně emitovaných z fotokatody. To znemožňuje měření  $\gamma$  zářičů s energií menší než asi 10 keV.

Ve větším krystalu může foton  $\gamma_2'$  opět reagovat Comptonovým rozptylem (vzniká  $e_c'$ ) a tento děj se může několikrát opakovat, až energie rozptýleného záření poklesne natolik, že nakonec dojde k interakci fotoefektem. **Tyto stupňovité procesy jsou ve srovnání s rychlostí elektroniky registračního zařízení nesmírně rychlé**, takže při absorpci všech postupně vzniklých částic v krystalu vzniká na výstupu fotonásobičem jeden impuls odpovídající původní energii  $\gamma$ - záření  $E_{\gamma}$ . Na obr. 9 je spektrum zářiče  $^{137}\text{Cs}$  měřené různě velikými krystaly NaI(Tl). Lze vidět, že s rostoucí velikostí krystalu se plocha fotopíku zvětšuje na úkor Comptonova kontinua. Krystal poskytující spektrum 4 je tzv. krystal úplně absorbující.



Obr. 9: Spektra  $^{137}\text{Cs}$  měřená různě velikými krystaly.

Získání amplitudového spektra  $\gamma$  zářiče umožňuje tzv. gama-spektrometr. Jeho základní součástí je **amplitudový analyzátor impulsů**, který z širokého amplitudového spektra přicházejícího z fotonásobiče pouze vybírá impulsy s určitou amplitudou. Děje se tak pomocí dvou diskriminátorů, které jsou nastaveny na různé diskriminační hladiny a zapojené na čítač impulsů přes tzv. antikoincidenční jednotku (obr. 10). Ta propouští na čítač signál jen tehdy, jestliže signály z obou diskriminátorů nepřišly do registračního zařízení současně (přijdou-li současně, antikoincidenční jednotka je eliminuje).



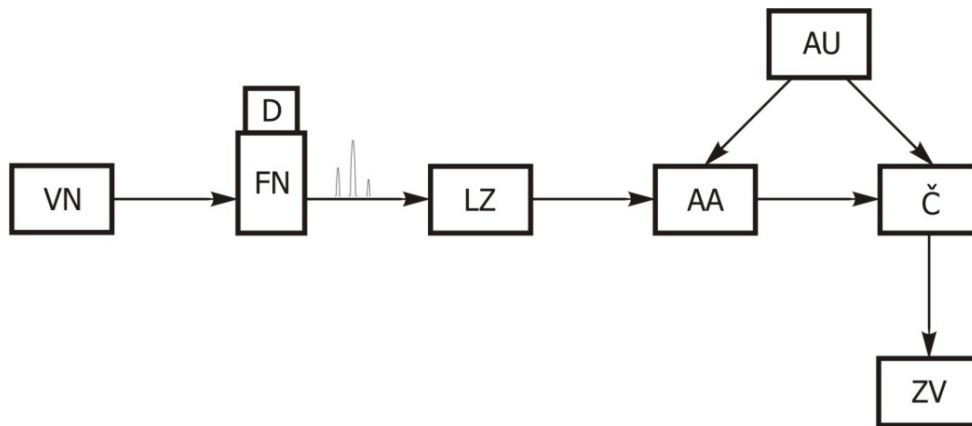
Obr. 10: Schéma funkce amplitudového analyzátoru impulsů

(D - detektor, Z - zesilovač, AK - antikoincidenční jednotka, C – čítač)

Uvažme nyní tři možné případy:

- impuls 1 s amplitudou menší, než je nižší diskriminační hladina  $\Rightarrow$  impuls je eliminován dolním diskriminátorem
- impuls 2 s amplitudou vyšší než je vyšší diskriminační hladina  $\Rightarrow$  impuls vyvolá signál v obou diskriminátorech a je eliminován antikoincidenční jednotkou
- impuls 3, jehož amplituda spadá mezi obě diskriminační hladiny. Jedině tento impuls přichází na čítač, protože přivádí signál jen na jeden vstup antikoincidenční jednotky.

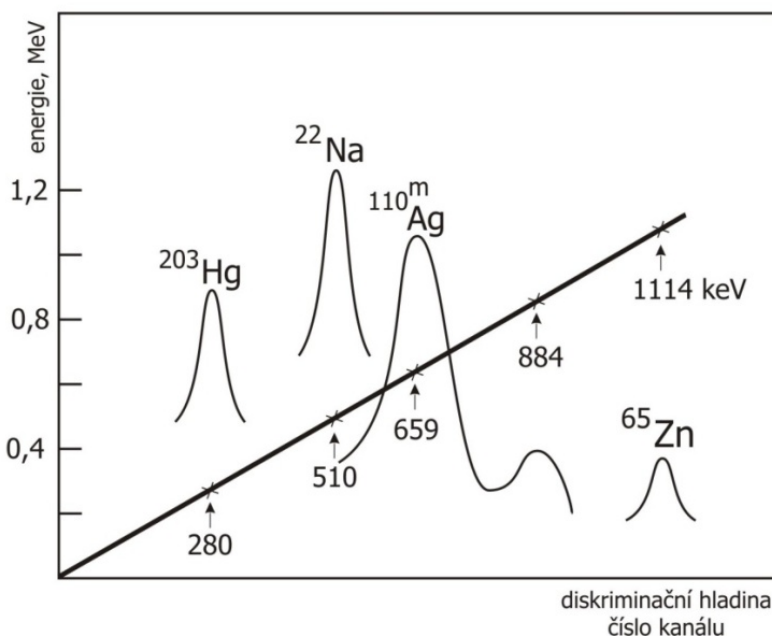
Interval amplitud mezi oběma diskriminačními hladinami je tzv. **kanál**. U některých výrobců je jeho šířka fixně nastavena výrobcem, většinou však bývá jeho šířka volitelná. Je-li např. rozsah amplitud impulsů přicházejících po zesílení na vstup analyzátoru 0,1 – 10 V, lze toto spektrum proměřit kanálem o šířce např. 0,1 V a registrovat postupně impulsy, jejichž amplitudy je v intervalu 0,1 - 0,2; 0,2 - 0,3 V atd. Takto se získá amplitudové spektrum  $\gamma$  zářiče. Takto pracuje jednocanálový spektrometr, jeho blokové schéma je na obr. 11.



Obr. 11: Blokové schéma gama spektrometru

(VN – zdroj vysokého napětí, D – detektor, FN – fotonásobič, LZ – lineární zesilovač, AA- amplitudový analyzátor, AU – automatika ovládající analyzátor a čítač, Č – čítač, ZV – zpracování výsledků)

Důležitým parametrem určujícím kvalitu analyzátoru impulsů je lineární závislost výšky amplitudy na energii  $\gamma$  záření. Zjišťuje se pomocí několika  $\gamma$  zářičů (obr. 12). Na osu x se vynáší výška amplitudy odpovídající poloze fotopík daného zářiče – tato hodnota se odečte z naměřeného spektra. Při správné funkci analyzátoru, jako je tomu na obr. 12, je závislost přímková a prochází počátkem souřadnicového systému. V takovém případě ji lze použít pro zjišťování energie neznámých  $\gamma$  zářičů. Platí vždy pro určité pracovní napětí fotonásobičem a zesílení.



Obr. 12: Ověření linearity amplitudového analyzátoru (kalibrační graf gama spektrometru)

Vícekanálové spektrometry umožňují současné měření spektra v několika kanálech současně. Počet kanálů může být až 10 000.

Pro kvalitní určování radionuklidů je důležitá **rozlišovací schopnost detektoru**. Na ní záleží, do jaké míry je spektrometr schopen rozlišit dva zářiče s blízkými energiemi  $\gamma$  záření. Rozlišovací schopnost se definuje (obvykle pro určitý zářič, často pro  $^{137}\text{Cs}$ ) jako šířka fotopíku ( $a$ ) v jeho poloviční výšce a udává se relativně v % vzhledem k energii fotopíku, tedy jako  $100 a/E_\gamma$ , kde šířka fotopík  $i$   $E_\gamma$  jsou vyjádřeny v keV. Rozlišovací schopnost krystalů NaI(Tl) bývá 5 – 15 %.

### Praktická část

V úloze proměříme  $\gamma$  spektra radionuklidů  $^{60}\text{Co}$ ,  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{22}\text{Na}$  a  $^{152+154}\text{Eu}$  pomocí scintilačního krystalu NaI(Tl). Rozpadová schémata těchto radionuklidů najdete v programu DECAY nainstalovaném na počítači v laboratoři, resp. v **Příloze 1**.

#### Postup

1. Jako detektor ionizujícího záření použijeme scintilační krystal NaI(Tl) s fotonásobičem spolu s vícekanálovým analyzátozem. Podle návodu k obsluze připravíme tuto sestavu k měření.
2. Nejprve provedeme kalibraci jednotlivých kanálů. Vložte kalibrační zářiče do stínění.  $^{60}\text{Co}$  vlevo,  $^{137}\text{Cs}$  vpravo co nejbližší k detektoru. Proveďte dle návodu k obsluze analyzátoru postupně kalibraci na  $^{60}\text{Co}$  v levé trase a  $^{137}\text{Cs}$  v pravé trase. Po kalibraci zkontrolujte mezní hodnoty energií – pro  $^{60}\text{Co}$ : 48 – 1524 keV, pro  $^{137}\text{Cs}$ : 32 – 1016 keV.
3. Změřte vzorky  $^{60}\text{Co}$  a  $^{137}\text{Cs}$  za dobu 600 s (kalibrační zářiče umístěte zpět do stíněného kontejneru).
4. V menu ANALÝZA proveďte vyhodnocení spektra: V submenu SPEKTRUM najetím kurzoru odečtete odpovídající energie pro dolní a horní mez fotopíku a také pro střed fotopíku.

V submenu OKNO zaznamenejte počet impulsů v celém rozsahu spektra (pro levou trasu nastavte rozmezí 48 – 1524 keV, pro pravou trasu 32 – 1016 keV) a pro oblast fotopíků (nastavte vždy v příslušném okně dříve odečtené dolní a horní meze fotopíků).

5. Změřte pozadí za 600 s a poté zaznamenejte počty impulsů v celé oblasti spektra a pro oblasti jednotlivých fotopíků (obdobně jako v bodu 4).
6. Změřte vzorky  $^{22}\text{Na}$  v pravé trase a  $^{152+154}\text{Eu}$  v levé trase obojí za 600 s. Před spuštěním měření je třeba nastavit „přeplnění ignorováno“. Jelikož je spektrum Eu u nižších energií příliš intenzivní (především díky větší účinnosti měření pro tyto energie) došlo by k zaplnění kanálu registrujícímu nejvyšší intenzitu a zastavení měření. Poté proveďte analýzu spektra. Zaznamenejte pouze dolní a horní meze jednotlivých fotopíků a také středy fotopíků. Počty impulsů v jednotlivých fotopících ani v celkovém spektru neodečítejte.
7. Změřte vzorek Eu za 40 s a analyzujte spektrum v oblasti, u které předtím došlo k přeplnění (většinou v oblasti 48 – 500 keV).
8. Vyhledejte veškeré měřené energie fotopíků v programu DECAY nainstalovaném na počítači v laboratoři a zjistěte původ emitovaných fotonů (radionuklid či proces).

### Vyhodnocení

U měření  $^{60}\text{Co}$  a  $^{137}\text{Cs}$  uveďte v tabulce pro oba radionuklidy počet impulsů pozadí v celém rozsahu spektra ( $N_p$ ) a v oblastech fotopíků ( $N_p^f$ ), celkové počty impulsů zaregistrované v celém rozsahu spektra ( $N_{v+p}$ ), hodnoty korigované na pozadí ( $N_v$ ), počty impulsů v oblastech fotopíků ( $N_{v+p}^f$ ) a hodnoty korigované na pozadí ( $N_v^f$ ). Ze známých hodnot aktivit radionuklidů stanovíme účinnosti měření při použití celého spektra ( $\eta = R_v / A$ ) a při měření v oblasti fotopíků ( $\eta = R_v^f / A$ ), kde veličiny  $R_v$  a  $R_v^f$  jsou četnosti vyjádřené v imp/s.

U měření  $^{22}\text{Na}$  a  $^{152+154}\text{Eu}$  uveďte naměřené energie středů fotopíků a porovnejte je s teoretickou hodnotou odečtenou z programu DECAY, nainstalovaném na počítači v laboratoři.

## ÚLOHA Č. 5 – ABSORPCE ZÁŘENÍ GAMA A BETA

### A) ABSORPCE ZÁŘENÍ GAMA

#### Teoretická část

Záření  $\gamma$  je při průchodu látkou absorbováno trojím mechanismem (viz úloha č. 4, obr. 7):

1. Fotoelektrický jev – elektromagnetické záření o malé energii předá veškerou svoji energii elektronu, který je tím uvolněn z elektronového obalu atomu a získává kinetickou energii. Většinou se jedná o elektron z K- nebo L hladiny. Jeho místo zaujmají elektrony z vyšších hladin za současné emise rentgenova záření.
2. Comptonův jev – záření předává jen část své energie vnějšímu orbitálnímu elektronu. Tím sníží svou energii a změní směr.
3. Tvorba elektronových párů – při energii záření větší než 1,02 MeV může nastat v silovém poli jádra proměna fotonu na elektron a pozitron.

Celkové zeslabení intenzity  $\gamma$  - záření je dáno vztahem:

$$I = I_0 e^{-\mu d} = I_0 e^{-\mu_m m_s} \quad (26)$$

kde  $I$  je měřená hustota toku částic po absorpci,  $I_0$  je původní hustota toku částic,  $\mu$  je lineární součinitel zeslabení v  $m^{-1}$ ,  $\mu_m$  je hmotnostní součinitel zeslabení v  $m^2kg^{-1}$ ,  $d$  je tloušťka vrstvy v metrech,  $m_s$  je plošná hmotnost v  $kgm^{-2}$ . Vztah mezi lineárním a hmotnostním součinitelem zeslabení odpovídá vztahu mezi tloušťkou a plošnou hmotností:

$$\mu = \rho \mu_m \quad (27)$$

$$m_s = \rho d \quad (28)$$

Hmotnostní koeficient zeslabení nezávisí na fázovém stavu látky, ale pouze na elektronové hustotě látky a na energii  $\gamma$  záření.

Praktická veličina pro vyjadřování absorpce  $\gamma$  záření je tzv. tloušťka polovičního zeslabení (polotloušťka,  $d_{0,5}$ ). Ze vztahu (26) lze pro ni odvodit

$$d_{0,5} = \frac{\ln 2}{\mu} \quad (29)$$

pro případ zeslabení původní hustoty toku částic  $I_0$  na polovinu (tj.  $I = I_0/2$ ).

## Praktická část úlohy

V praktické části této úlohy si vyzkoušíme změřit a spočítat absorpční koeficienty a polotloušťky pro různé materiály a různé energie  $\gamma$  záření.

### Postup

1. Vložte příslušné zářiče do stínění –  $^{60}\text{Co}$  vlevo a  $^{137}\text{Cs}$  vpravo, do druhého zářezu od shora (zářiče v červeném kontejneru).
2. Provedte postupně kalibraci spektrometru na  $^{60}\text{Co}$  v levé trase a  $^{137}\text{Cs}$  v pravé trase. Mezní hodnoty energií po kalibraci by se měli pohybovat pro  $^{60}\text{Co}$ : 48 – 1524 keV a pro  $^{137}\text{Cs}$ : 32 – 1016 keV. Pokud ne, proveďte kalibraci znovu.
3. Změřte kalibrační zářiče  $^{60}\text{Co}$  a  $^{137}\text{Cs}$  po dobu 60 s a analyzujte spektra (zaznamenejte energii dolní a horní meze fotopíku).
4. Nastavte v přístroji odečtené dolní a horní meze fotopíků (pro  $^{60}\text{Co}$  – pík 1332 keV). Další měření se tudíž bude realizovat jen pro nastavenou oblast fotopíků.
5. Změřte pozadí za 400s. Zářiče jsou umístěny v kontejneru za olověným stíněním!
6. Změřte kalibrační zářič  $^{60}\text{Co}$  (levá trasa) s předvolbou 10 000 impulsů. Vzorek je uložen na dně stínění!  $^{137}\text{Cs}$  zůstává v kontejneru. Naměřený čas si zaznamenejte.
7. Postupně vkládejte všechny stínící materiály. Pokaždé změřte čas, za který dojde k registraci 10 000 impulsů.
8. Obdobně změřte zářič  $^{137}\text{Cs}$  a taktéž všechny stínící materiály (viz body 6 – 7), tentokrát zůstává v kontejneru  $^{60}\text{Co}$ .

### Vyhodnocení

1. Pro oba zářiče vytvořte tabulku obsahující tloušťky ( $x$ ) a typ filtru, doby měření, četnosti za minutu a hodnoty  $\ln(R_0/R)$ .
2. Do jednoho grafu vynesete závislosti  $\ln(R_0/R) = f(x)$  pro oba zářiče a všechny tři absorbující materiály.
3. Pro jednotlivé zářiče sestavte tabulky obsahující: typ materiálu, jeho lineární absorpční koeficient pro použitou energii  $\gamma$  záření ( $^{137}\text{Cs}$  – 0,66 MeV;  $^{60}\text{Co}$  – 1,33 MeV), jejich odpovídající polovrstvy v cm a plošné hmotnosti ( $\text{v g cm}^{-2}$ ) a literární hodnoty ( $\text{v g cm}^{-2}$ ) pro srovnání:

energie $\gamma$ záření	olovo	hliník	plexisklo
0,66 MeV	6,5	9,5	
1,25 MeV	12,5	13,0	
hustota <sup>a)</sup> ( $\text{v g cm}^{-3}$ )	11,3	2,7	1,2

a) pro přepočet absorpčního koeficientu



## B) ABSORPCE ZÁŘENÍ BETA

### Teoretická část

Beta částice procházející látkou se odchylojí od svého původního směru (pružný rozptyl) a ztrácejí energii (nepružný rozptyl). Při pružném rozptylu elektrony prakticky neztrácejí energii. Úhlové rozdělení rozptýlených částic je popsáno Rutherfordovou teorií rozptylu, podle níž počet částic dopadajících na jednotkovou plochu v určité vzdálenosti od místa rozptylu je závislý na úhlu rozptylu, energii částice a náboji jádra, na němž k rozptylu dochází.

Je-li energie  $\beta$  částice menší než 1 MeV, je hlavním mechanismem ztráty energie  $\beta$  částic **nepružný rozptyl** částic na orbitálních elektronech. Dochází při něm k excitaci a ionizaci atomů absorbujícího prostředí. Přesný popis tohoto děje poskytuje teorie elektromagnetického pole. Z ní vyplývá, že ztráta energie  $\beta$  částice ionizací je úměrná protonovému číslu absorbujícího prostředí a nepřímo úměrná kinetické energii částice. Ionizace při průchodu  $\beta$  částic prostředím je provázána vznikem charakteristického rentgenového záření, které vzniká při zaplňování vakancí v elektronových orbitalech.

Při vyšších energiích přispívá ke ztrátě energie  $\beta$  částice též emise elektromagnetického, tzv. **brzdného záření**, které je důsledkem urychlení pohybu  $\beta$  částice v poli jádra. Ztráty energie  $\beta$  částice tímto procesem jsou přímo úměrné druhé mocnině protonového čísla absorbujícího prostředí a energii záření. Proto vzniká brzdné záření jen při absorpci  $\beta$  záření vysoké energie v těžkých absorpčních materiálech (např. v olovu již při energii  $E_{max} = 1$  MeV).

Přes složitost dějů probíhajících při absorpci záření  $\beta$  lze změnu intenzity svazku  $\beta$  částic s tloušťkou vrstvy absorbujícího materiálu vyjádřit jednoduchým exponenciálním vztahem (26) a absorpci vyjadřovat lineárním nebo exponenciálním součinitelem zeslabení.

Záření  $\beta$  emitované radioaktivními nuklidy má spojitě energetické spektrum, které zahrnuje elektrony s kinetickou energií od velmi malých hodnot až po tzv. maximální energii. Ta je pro daný nuklid charakteristickou veličinou. Lze ji měřit různými metodami, z nichž některé (magnetická spektrometrie, scintilační spektrometrie) jsou aparaturně náročné a používají se hlavně pro fyzikální účely. Jednoduše lze hodnotu  $E_{max}$  stanovit na základě měření absorpce  $\beta$  záření v hliníku.

Nejjednodušší absorpční metoda používá stanovení tzv. maximálního dosahu (vzdálenost, do níž proniknou částice s maximální energií), resp. maximální plošné hmotnosti hliníku  $m_{s,max}$ . Stanovení této veličiny přímo ze vztahu (26) je obtížné. V oblasti  $m_{s,max}$  se totiž měřená četnost v důsledku malého počtu částic  $\beta$  s maximální energií blíží k nule a její měření je proto zatíženo značnou chybou. To se při určování  $m_{s,max}$  z absorpční křivky obchází tím, že se proti plošné hmotnosti vynáší četnost včetně pozadí ( $R_{v+p}$ ) a měří se tak dlouho, až se získá několik bodů s konstantní četností pozadí;  $m_{s,max}$  se pak určí jako průsečík dvou větví křivky a  $E_{max}$  se získá z empirických vztahů:

$$E_{max} = 1,92 (m_{s,max})^{0,725} \quad \text{pro } m_{s,max} < 0,3 \text{ g cm}^{-2} \quad (30)$$

$$E_{max} = 1,85 m_{s,max} + 0,245 \quad \text{pro } m_{s,max} > 0,3 \text{ g cm}^{-2} \quad (31)$$

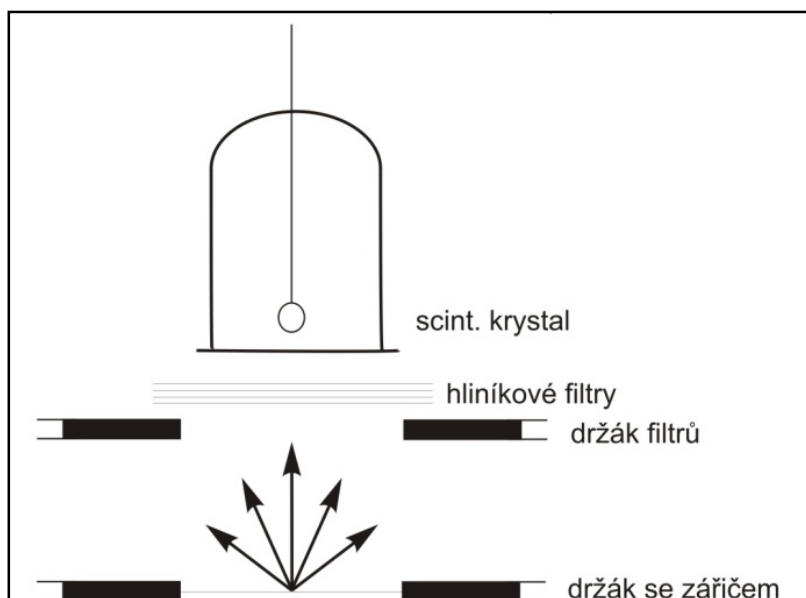
Častěji se však  $m_{s,max}$  resp.  $E_{max}$  určuje z experimentální absorpční křivky jinými (přesnějšími) grafickými metodami. V této úloze bude použita metoda Bleulera a Züntiho, která je všeobecně pokládána za nejpřesnější.

### Praktická část úlohy

V úloze proměříme křivky absorpce  $\beta$  záření nuklidů  $^{32}\text{P}$  a  $^{204}\text{Tl}$  v hliníku. Rozpadová schémata obou nuklidů najdete v programu DECAY nainstalovaném v počítači v laboratoři, resp. v **Příloze 1**.

K měření použijeme sondu se scintilačním krystalem NaI(Tl) a fotonásobičem spolu s detektorem impulsů. Jako zářičů je použito odparku obsahující  $^{32}\text{P}$  a  $^{204}\text{Tl}$ .

Uspořádání měření je patrné z obr. 13. Metoda dává uspokojivé výsledky, jsou-li hliníkové filtry umístěny co nejbližší k detektoru.



Obr. 13: Uspořádání měřicího experimentu

### Postup

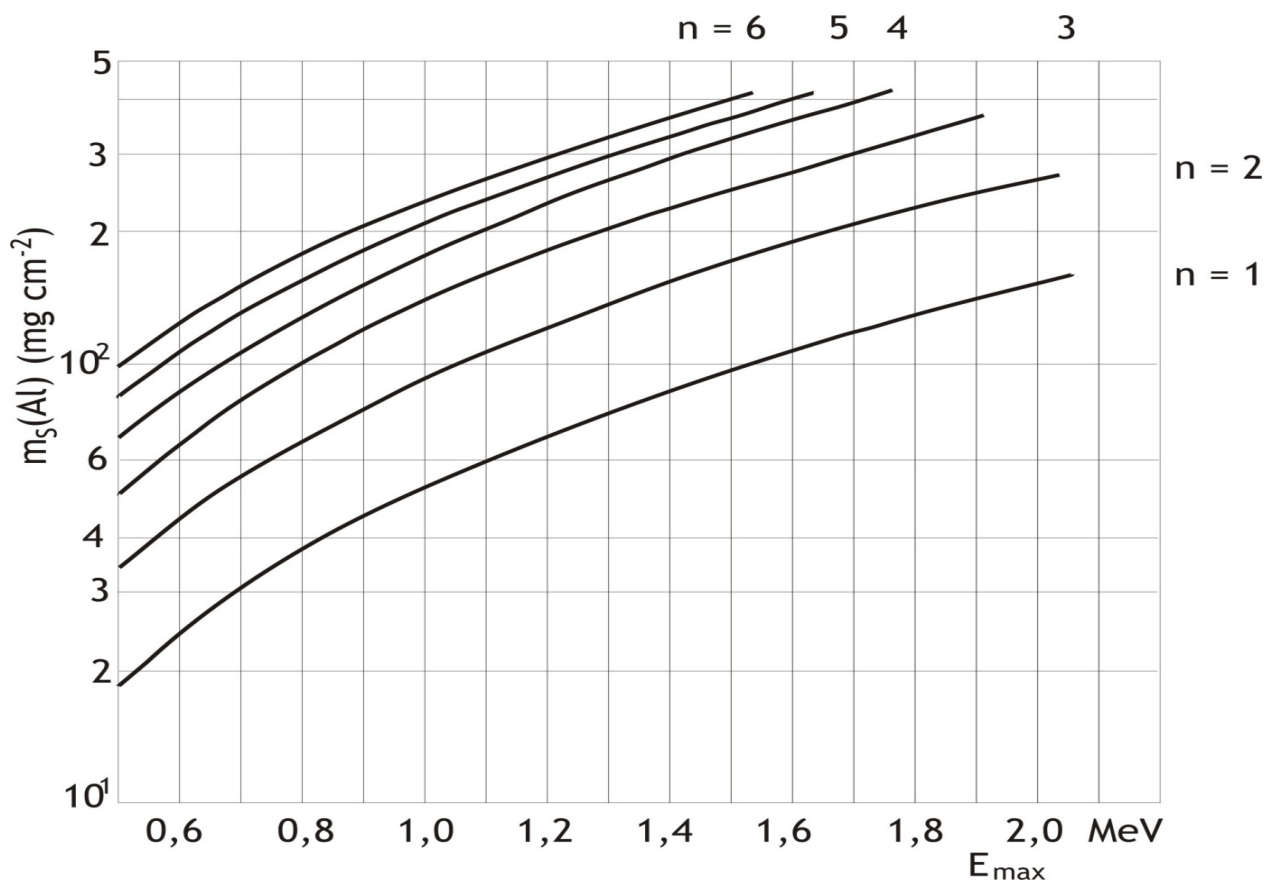
1. Podle návodu k obsluze připravíme detekční sestavu k měření.
2. Změříme pozadí za 400 s.
3. Do držáku vzorků v olověném stínění upevníme desku se zářičem  $^{32}\text{P}$  (odparek si připravíte předem dle instrukcí vedoucího cvičení) a umístíme držák do takové vzdálenosti od detektoru, aby čas potřebný ke změření 10 000 impulsů byl delší než 10 s. Dále už s držákem vzorků nemanipulujeme a provádíme všechna měření s tímto nastavením.
4. Změříme četnost s relativní odchylkou 1 % (předvolba počtu impulsů nastavená na  $10^4$  imp).
5. Na držák mezi zářičem a detektorem postupně vkládáme 1 – 12 fólií z hliníku a vždy změříme četnost s chybou 1 %. Fólie vždy zatížíme olověným rámečkem, aby se hliníkový plech neohýbal a dobře seděl na měřeném zářiči. Olověný rámeček ale nesmí stínit zářič!
6. Podle bodů 3 – 5 provedeme analogické měření pro zářič  $^{204}\text{Tl}$  a 1 – 5 hliníkových fólií.
7. Plošnou hmotnost hliníkových fólií zjistíme zvážením a změřením rozměrů jedné z nich.

## Vyhodnocení

Do protokolu uveďte výsledky měření pozadí:  $N_p$ ,  $t_p$ ,  $R_p$ . Pro oba zářiče sestavte tabulky hodnot:  $n$  (počet fólií),  $m_s$  ( $\text{mg cm}^{-2}$ ),  $t_{v+p}$ ,  $R_{v+p}$ ,  $R_v$  a  $\ln(R_v)$ . Pro oba zářiče vynesete do grafu závislosti  $R_v$  a  $\ln(R_v)$  na  $m_s$  (plošná hmotnost hliníku). Ze směrnice semilogaritmické závislosti určíme hmotnostní absorpční koeficienty pro absorpci  $\beta$  záření  $^{32}\text{P}$  a  $^{204}\text{Tl}$  v hliníku. Hodnoty udávané v literatuře jsou  $8,89 \text{ cm}^2 \text{ g}^{-1}$  pro  $^{32}\text{P}$  a  $26,5 \text{ cm}^2 \text{ g}^{-1}$  pro  $^{204}\text{Tl}$ .

## Určení $E_{\max}$ metodou Bleulera a Züntiho

Metoda obchází nutnost určení maximálního dosahu tím, že se z grafu  $\ln(R_v) = f(m_s)$  odečtou hodnoty plošných hmotností hliníku  $m_{s,n}$  odpovídající  $2^n$  – násobnému zeslabení počáteční četnosti ( $n=1,2,3,\dots$ ), tj. zeslabení na  $1/2$ ,  $1/4$ ,  $1/8$  atd. Naměřené závislosti  $\ln(R_v) = f(m_s)$  využijeme k získání co nejvíce hodnot  $m_{s,n}$ . Z kalibračních křivek závislosti plošné hmotnosti hliníku na  $E_{\max}$  pro různá  $n$  (obr. 14) se potom odečítají pro zjištěné hodnoty  $m_{s,n}$  příslušné hodnoty  $E_{\max,n}$ . Hledaná hodnota maximální energie se nalezne jako limita  $E_{\max,n}$  pro  $n \rightarrow \infty$ . S výjimkou první hodnoty, tj.  $E_{\max,1}$  pro  $n = 1$ , která bývá obvykle nižší, závisí  $E_{\max,n}$  na  $n$  tak málo, že místo limity lze použít aritmetického průměru hodnot  $E_{\max,n}$  pro  $n \geq 2$ . Nakonec v tabulce uvedeme hodnoty  $n$ ,  $m_{s,n}$  a  $E_{\max,n}$ . Hodnotu maximální energie  $E_{\max}$  pak určíme z grafu závislosti  $E_{\max,n} = f(n)$ . Zjištěné hodnoty srovnáme s údaji v rozpadových schématech.

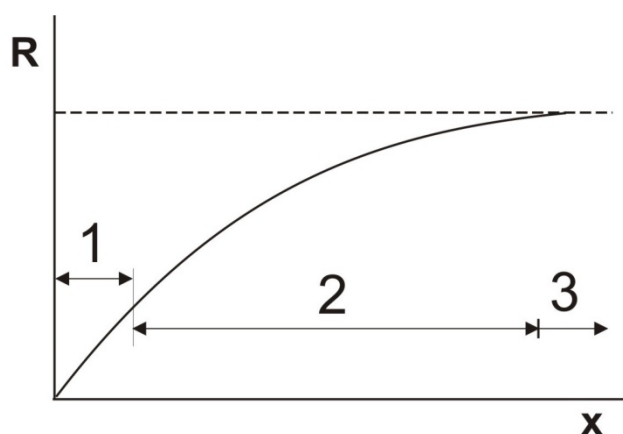


Obr. 14: Kalibrační křivky pro určení  $E_{\max}$  metodou Bleulera a Züntiho

## ÚLOHA Č. 6 - SAMOABSORPCE ZÁŘENÍ BETA

### Teoretická část

Při určování aktivity  $\beta$  zářiče nebo při srovnávání aktivity dvou zářičů je nutno brát v úvahu skutečnost, že část emitovaného záření se absorbuje přímo v měřeném vzorku. Tento jev se nazývá **samoabsorpce**. Lze jej názorně demonstrovat pomocí závislosti četnosti na tloušťce vzorku pro preparát s konstantní měrnou aktivitou (obr. 14). Kdyby samoabsorpce nenastávala, byl by počet zaregistrovaných částic přímo úměrný počtu radioaktivních atomů ve vzorku, tedy při určité měrné aktivitě i jeho tloušťce. Samoabsorpce však způsobuje, že lineární závislost platí jen pro tenké vrstvy vzorku (obr. 14. úsek 1). Pro větší tloušťky vzorku dostává závislost charakter exponenciální funkce (úsek 2), až nakonec měřená četnost na tloušťce vzorku nezávisí (úsek 3) i když aktivita vzorku dále roste.



Obr. 14: Samoabsorpční křivka pro případ konstantní měrné aktivity

Předpokládejme vzorek o ploše povrchu  $P$  a měrné aktivitě  $A_s$ , který měříme scintilační sondou přiloženou přímo k horní ploše vzorku. Detektor registruje všechny částice prošlé povrchem vzorku. Uvažujme nyní ve vzorku tenkou vrstvičku tloušťky  $dx$ , která emituje částice do všech směrů, která se nachází ve vzdálenosti  $x$  od povrchu vzorku. Z částic směřujících vzhůru se do počítače dostanou jen některé, protože část je jich absorbována ve vrstvě nad uvažovanou vrstvičkou  $dx$ . K celkovému počtu částic  $N$  zaregistrovaných detektorem přispívá vrstvička  $dx$  hodnotou

$$dN = \frac{1}{2} P A_s e^{-\mu x} dx \quad (32)$$

kde  $\mu$  je absorpční koeficient materiálu vzorku. Koeficient  $1/2$  je vyjádřením skutečnosti, že částice emitované směrem dolů (polovina všech částic) nejsou zaregistrovány. Celkový počet částic  $N$  registrovaných počítačem dostaneme integrováním přes celou tloušťku vzorku:

$$N = \int_0^X dN = \frac{1}{2} P A_s \int_0^X e^{-\mu x} dx = \frac{P A_s}{2 \mu} (1 - e^{-\mu x}) \quad (33)$$

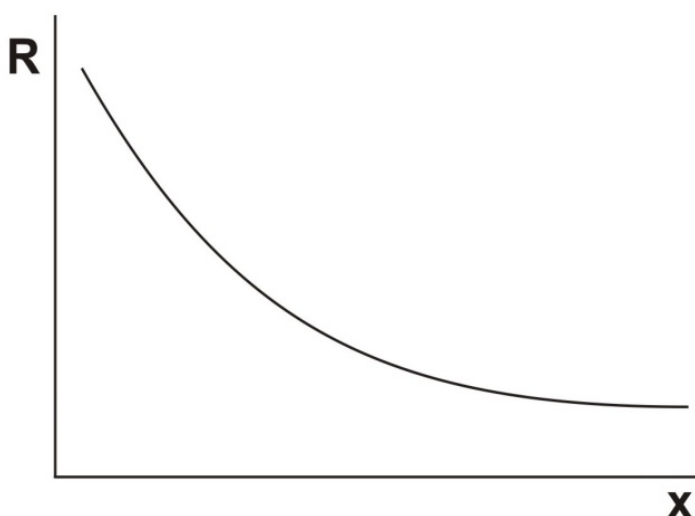
(Tvar této funkce je též závislý na energii  $\beta$  záření, protože na energii závisí absorpční koeficient  $\mu$ ).

Pro velmi tenké vrstvy vzorku lze použít přiblížení  $e^{-\mu x} \cong 1 - \mu x$ . Potom  $N = P A_s x / 2$  a počet zaregistrovaných částic je lineárně závislý na tloušťce vzorku (úsek 1). Naopak pro nekonečně silnou vrstvu vzorku výraz  $e^{-\mu x}$  limituje k nule a odpovídající počet zaregistrovaných částic je na tloušťce vzorku nezávislý (úsek 3)

$$N_{\infty} = \frac{P A_s}{2 \mu} \quad (34)$$

Z praktického hlediska pro porovnání aktivit, resp. četností, různých vzorků téhož radionuklidu je vhodné se vyhnout oblasti, kde má absorpční křivka tvar obecné funkce, protože za těchto podmínek nejsou výsledky srovnatelné. Proto se vzorky měří buď v podmínkách první oblasti (tzv. nekonečně tenké vzorky – odparky radioaktivních roztoků) nebo naopak v podmínkách třetí oblasti křivky (vzorky nekonečně silné), kde již tloušťka vzorku nemá na registrovanou četnost vliv.

Na rozdíl od případu popsáno na obr. 14 se pro účely praktické korekce na samoabsorpci sestavuje křivka pro řadu vzorků s konstantní celkovou, avšak postupně klesající měrnou aktivitou (obr. 15). V případě měření vodných roztoků  $\beta$  zářičů se postupuje tak, že k malému objemu roztoku zářiče se postupně přidává voda, čímž se snižuje měrná aktivita. Celková aktivita zůstává konstantní, ale měřená četnost v důsledku samoabsorpce klesá. Z této křivky lze pak pro libovolnou plošnou hmotnost (tloušťku) vzorku určit korekci na samoabsorpci.



Obr. 15: Samoabsorpční křivka pro případ konstantní celkové aktivity

### Praktická část úlohy

V úloze proměříme závislosti četnosti na tloušťce zářiče  $^{32}\text{P}$  s použitím roztoku obsahující radionuklid  $^{32}\text{P}$  při konstantní měrné a celkové aktivitě. Rozpadové schéma nuklidu  $^{32}\text{P}$  je k dispozici v programu DECAJ nainstalovaném na počítači v laboratoři, resp. v **Příloze 1**.

K měření použijeme scintilační krystal NaI(Tl) s čítačem impulsů.

## A) Samoabsorpční křivka

### Postup

1. Podle návodu k obsluze připravíme detekční sestavu k měření.
2. Skleněnou misku položíme do držáku umístěného v definované poloze vzhledem k detektoru a změříme pozadí ( $t_p = 400$  s).
3. Změříme průměr misky a vzdálenost od okénka počítače ke dnu misky. Tyto údaje potřebujeme pro výpočet korekce na změnu geometrických podmínek měření (viz odstavec „vyhodnocení“).
4. Měření provedeme s relativní odchylkou 1,6 %. Použijeme tedy předvolbu počtu impulsů ( $N = 4000$ ).
5. Misku přeneseme na podložní mísu, mikropipetou do ní napipetujeme 0,5 ml roztoku  $^{32}\text{P}$  (roztok má označení 6A). Lahvičku s roztokem  $^{32}\text{P}$  necháváme uloženou za stíněním, mikropipetu odkládáme vždy špičkou na kousek buničiny.
6. Misku vrátíme pod detektor a změříme četnost s chybou  $w \leq 1,6$  %.
7. V dalších měřeních přidáváme do misky nejprve po 0,5 ml roztoku  $^{32}\text{P}$  do celkového objemu 2,0 ml, dále pak po 1,0 ml tak dlouho až dosáhneme konstantní četnosti ověřené alespoň čtyřmi body. Pro  $^{32}\text{P}$  je to vrstva silná asi 1 cm. Vždy měříme četnost s chybou  $w \leq 1,6$  % (měřená četnost nebude přesně konstantní vzhledem ke statistickým fluktuacím a k postupnému přibližování hladiny aktivního roztoku k detektoru).
8. Po skončení měření **přelijeme aktivní roztok zpět do zásobní lahvičky**. Misku vymyjeme důkladně destilovanou vodou (vymývací kapalinu vyléváme do lahve na kapalný odpad) a nakonec vysušíme papírovou vatou. Krátkým orientačním měřením se přesvědčíme, zda odmořená miska nevykazuje zvýšené pozadí. V případě potřeby odmoření opakujeme.

### Vyhodnocení

1. Uvedeme výsledky měření pozadí  $N_p$ ,  $t_p$ ,  $R_p$ .
2. Protože se přidáváním roztoku zmenšuje vzdálenost hladiny roztoku od okénka počítače, je nutno v dalším opravit naměřené četnosti na změnu geometrických podmínek vynásobením četnosti faktorem  $(d_{max} - d)/d_{max}$ , kde  $d_{max}$  je vzdálenost okénka počítače ode dna misky a  $d$  je výška hladiny v misce.
3. V tabulce uvedeme objem roztoku  $^{32}\text{P}$ , tloušťku vrstvy roztoku  $d$  (mm),  $N_{v+p}$ ,  $t_{v+p}$ ,  $R_{v+p}$ ,  $\delta\{R_{v+p}\}$ ,  $R_v$ , hodnotu  $d_{max}$ , korekční faktor  $(d_{max} - d)/d_{max}$  a konečně četnost korigovanou též na přibližování hladiny  $R_v^d$  (korigujeme hodnotu). Korekce na pozadí a geometrii provádíme s ohledem na odchylku  $\delta_{v+p}$ .
4. Sestrojíme graf závislosti  $R_v^d$  na tloušťce vrstvy roztoku  $^{32}\text{P}$ .

## B) Korekční křivka pro samoabsorpci

### Postup

1. Skleněnou misku položíme do držáku umístěného v definované poloze vzhledem k detektoru a změříme pozadí ( $t_p = 400$  s).
2. Pro další měření použijeme předvolbu počtu impulsů ( $N = 10^4$ ) a měření tak uskutečníme s relativní odchylkou 1 %.

3. Misku přeneseme na podložní mísu, napipetujeme do ní 1 ml roztoku  $^{32}\text{P}$  (roztok má označení 6B) a krouživým pohybem opatrně rozprostřeme kapalinu na dně misky a změříme četnost s chybou  $w \leq 1\%$ .
4. Postupně pak mikropipetou přidáváme vodu po 1 ml. Po každém přidavku promícháme krouživým pohybem (nad podložní mísou) a změříme četnost.
5. Po skončení měření vylijeme měřený aktivní roztok do láhve na kapalný odpad a odmoříme misku stejně jako v úloze 6A. Po kontrole odmoření přístroj vypneme.

### Vyhodnocení

1. Uvedeme výsledky měření pozadí  $N_p$ ,  $t_p$ ,  $R_p$ .
2. V tabulce uvedeme objem přidané vody (ml), tomu odpovídající plošnou hmotnost vody ( $\text{mg}/\text{cm}^2$ ),  $N_{v+p}$ ,  $t_{v+p}$ ,  $R_{v+p}$ ,  $\delta\{R_{v+p}\}$ ,  $R_v$  a  $R_v^d$ .
3. Sestrojíme graf závislosti  $R_v^d$  na plošné hmotnosti vody.
4. Z grafu odečteme četnost extrapolovanou na nulovou plošnou hmotnost vody. S poměru četnosti pro určitou plošnou hmotnost vody a četnosti při nulové plošné hmotnosti vody můžeme vypočítat korekční faktor na samoabsorpci.

## ÚLOHA Č. 7 - URČENÍ POLOČASU PŘEMĚNY KRÁTKODOBÉHO RADIONUKLIDU

### Teoretická část

Kromě druhu a energie záření je poločas přeměny základní konstantou charakterizující každý radionuklid. Ve všech radiochemických operacích, jejichž účelem je oddělení nějakého radionuklidu ze směsi, jen nutno nakonec zkontrolovat jeho identitu a radiochemickou čistotu. U krátkodobých radionuklidů lze obojí provádět měřením rozpadové křivky a určením poločasu.

Poločas se určuje graficky na základě zákona rychlosti radioaktivní přeměny

$$A_t = A_0 e^{-\lambda t} \quad (35)$$

kde  $A_0$  je počáteční aktivita,  $A_t$  je aktivita v čase  $t$  a  $\lambda$  je přeměnová konstanta ( $s^{-1}$ ). Pokud jsou v průběhu měření zachovány stejné podmínky, lze ze vztahu (35) místo aktivity psát počet impulsů ( $N$ ) nebo četnost ( $R$ ), protože tyto veličiny jsou aktivitě přímo úměrné. Přeměnovou konstantu určujeme ze závislosti  $\ln N$  na čase, resp.  $\ln R$ , na čase. Je-li přítomen jen jeden radionuklid v radiochemicky čistém stavu, je tato závislost přímková se směrnici, která je rovna  $-\lambda$ .

Z přeměnové konstanty pak určíme poločas přeměny ze vztahu (36)

$$T = \frac{\ln 2}{\lambda} \quad (36)$$

Srovnáním nalezeného poločasu s tabelovaným údajem ověříme identitu radionuklidu a z přímkového průběhu časové závislosti  $\ln N$  ( $\ln R$ ) čistotu preparátu. Případně přítomné radiochemické nečistoty, tj. jiné radionuklidy, se projeví zakřivením této závislosti nebo zvýšeným pozadím. V případě stejných nebo velmi blízkých poločasů dělených radionuklidu je tato metoda nepoužitelná, taková shoda však není častá.

### Praktická část

V úloze použijeme jak krátkodobého nuklidu jaderného izomeru  $^{137m}\text{Ba}$  s poločasem přeměny 2,6 min., který je běžně v trvalé radioaktivní rovnováze se svým mateřským nuklidem  $^{137}\text{Cs}$  (rozpadové schéma této dvojice radionuklidů najdete v programu DECAY nainstalovaném na počítači v laboratoři, příp. v **Příloze 1**).

V tomto stavu je aktivita obou nuklidů stejná a v čase se nemění. Pro měření rozpadové křivky  $^{137m}\text{Ba}$  je proto nutné nejprve tento nuklid od  $^{137}\text{Cs}$  oddělit. V přítomnosti neaktivní barnaté soli jako izotopického nosiče jej vysrážíme jako  $\text{BaCrO}_4$ . Současně přidáváme neaktivní sůl cesnou, která má funkci zadržujícího nosiče a brání tak adsorpci  $^{137}\text{Cs}$  na sraženinu  $\text{BaCrO}_4$ . Pro zlepšení separace od  $^{137}\text{Cs}$  se izolovaný  $\text{BaCrO}_4$  rozpustí a znovu vysráží, opět v přítomnosti neaktivní cesné soli.



## Měření rozpadové křivky

Pro měření závislosti četnosti na čase se vzorek opakovaně měří po stejně dlouhý časový interval.

### Použité roztoky

CsCl (10 mg/ml), BaCl<sub>2</sub> (10 mg/ml), 5 % HCl, 0,1 M K<sub>2</sub>Cr<sub>2</sub>O<sub>7</sub>, acetátový pufr, roztok <sup>137</sup>Cs + <sup>137m</sup>Ba v beznosičové koncentraci.

### Postup

Připravíme k měření detekční sestavu složenou ze scintilačního krystalu NaI(Tl) pro měření gama aktivity <sup>137m</sup>Ba. Pracovní napětí nastavíme na hodnotu uvedenou na detektoru. Pracujeme v gumových rukavicích, jejich čistotu zkontrolujeme předem pomocí radiometru.

#### A) Separace s jedním srážením

1. Do kádinky odměříme válcem 10 ml vody a 5 ml octanového tlumiče, napipetujeme 1 ml nosiče CsCl a 5 ml nosiče BaCl<sub>2</sub> (dělenou skleněnou pipetou s pomocí gumového balónku). Nakonec přidáme 0,5 ml směsi <sup>137</sup>Cs + <sup>137m</sup>Ba. K tomu použijeme vyhrazenou mikropipetu. Mikropipetu odkládáme tak, aby zbytky aktivního roztoku ulpělé na špičce a ve špičce mikropipety nemohly kontaminovat okolí.
2. Připravíme si odsávačku s Büchnerovou nálevkou k filtraci, vhodný filtr na Büchnerově nálevce předem navlhčíme vodou.
3. Roztok v kádince zahřejeme téměř k varu a vysrážíme chroman barnatý 10 ml roztoku K<sub>2</sub>Cr<sub>2</sub>O<sub>7</sub> (napište chemickou rovnici probíhajícího děje!). V okamžiku srážení spustíme stopky – měříme dobu od vysrážení do počátku měření. Po dokonalém vyloučení sraženiny (asi po 5 - 10 s) chroman barnatý odsajeme. Abychom zamezili ztrátám při filtraci, naléváme suspenzi tenkým proudem do středu filtračního papíru tak, aby odsátá sraženina zůstával ve střední části filtru.
4. Filtrační papír dáme do Petriho misky č. 1. Misku vložíme do měřicího prostoru a začneme měřit. Přístroj nastavíme tak, aby opakovaně měřil rozpadovou křivku v intervalech 20 s. Po zaregistrování 30 hodnot měření zastavíme a uložená data zkopírujeme do počítače. Zkumavku s filtrem uschováme pro měření zbytkové aktivity.
5. Kádinku vyčistíme od zbytků sraženiny pomocí pinzety a tamponu navlhčeného roztokem kyseliny chlorovodíkové.

#### B) Separace s dvojitým srážením

1. Do jedné kádinky odměříme válcem 10 ml 5 % HCl a napipetujeme 1 ml nosiče CsCl a 5 ml BaCl<sub>2</sub>. V druhé kádince si připravíme roztok podle bodu 1 postupu A a oba roztoky zahřejeme téměř k varu.
2. V roztoku obsahující směs radionuklidů opět vysrážíme 10 ml roztoku K<sub>2</sub>Cr<sub>2</sub>O<sub>7</sub> (opět měříme dobu od vysrážení k měření) a zfiltrujeme BaCrO<sub>4</sub> jako v bodě 3 postupu A. Filtr se sraženinou přeneseme do zahřátého roztoku HCl a sraženinu tak rozpustíme (popište chemickou rovnici)

probíhající děj!), filtrační papír uchopíme pinzetou, opláchneme vodou do stejné kádinky, ve které jsme rozpustili sraženinu  $\text{BaCrO}_4$  a takto opláchnutý filtrační papír odložíme do nádoby na pevný odpad. K roztoku přidáme 5 ml roztoku  $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$ , potom přidáme za míchání krouživým pohybem krystalický octan sodný do vyloučení sraženiny (vysvětlete jaký vliv má octan sodný na vznik sraženiny  $\text{BaCrO}_4$ ). Sraženinu odsajeme, filtr se sraženinou dáme do Petriho misky č. 2 a změříme rozpadovou křivku podle bodu 4 postupu A.

## Další měření

V režimu automatického opakování s předvolbou času 20 s změříme vždy 5x:

1. pozadí detektoru; průměrnou hodnotu označíme  $N_{p0}$
2. standard v Petriho misce obsahující 0,5 ml směsi  $^{137}\text{Cs} + ^{137m}\text{Ba}$ ; průměrnou hodnotu opravenou na  $N_{p0}$  označíme  $N_{v0}$
3. nejdříve 20 minut po skončení měření první rozpadové křivky Petriho misku č. 1 s filtrem; průměrnou hodnotu opravenou na  $N_{p0}$  označíme  $N_{p1}$  (aktivita  $^{137}\text{Cs}$ , kterou se při jednom srážení nepodařilo opravit)
4. analogicky získáme hodnotu  $N_{p2}$  pro separaci s dvojnásobným srážením
5. po skončení měření vypneme dle návodu měřící sestavu. Obě kádinky opět vyčistíme tamponem navlhčeným roztokem kyseliny chlorovodíkové. Na kontrolním radiometru zkontrolujeme čistotu používaných rukavic.

## Vyhodnocení

### a) poločas přeměny $^{137m}\text{Ba}$

Pro obě rozpadové křivky sestavte tabulku obsahující čas od vysrážení,  $N_{v+p}$ ,  $\delta_{v+p}$ ,  $N_v$  (pro korekci na pozadí použijeme hodnoty  $N_{p1} + N_{p0}$ , resp.  $N_{p2} + N_{p0}$ , (korekci provádíme s ohledem na  $\delta_{v+p}$ ) a  $\ln N_v$ . Pro rozpadovou křivku získanou postupem A vyneseme do jednoho grafu závislosti  $N_v$  a  $\ln N_v$  na čas. Ze směrnice semilogaritmické závislosti určíme přeměnovou konstantu ( $s^{-1}$ ) a z ní pak poločas  $^{137m}\text{Ba}$  ze vztahu (36). Poločas porovnáme s literární hodnotou.

### b) výtěžek a čistota separace

První hodnoty četnosti korigované na  $N_{p1}$  a  $N_{p0}$ , resp.  $N_{p2}$  a  $N_{p0}$ , v rozpadových křivkách označíme jako  $N_{v1}$ , resp.  $N_{v2}$ . Výtěžky obou separací vyjádříme v % jako  $(N_{v1}/N_{v0}) \cdot 100$ , resp.  $(N_{v2}/N_{v0}) \cdot 100$  a s přihlédnutím k době potřebné pro provedení separace a k poločasu  $^{137m}\text{Ba}$  vysvětlíme odchylku od 100 %.

Čistotu separace vyjádříme tzv. separačním faktorem jako poměr četností  $^{137}\text{Cs} + ^{137m}\text{Ba}$  v separovaném vzorku  $\text{BaCrO}_4$ , tj. jako poměr  $N_{v1}/N_{p1}$ , resp.  $N_{v2}/N_{p2}$ . Zhodnotíme eventuelní zvýšení radiochemické čistoty  $^{137m}\text{Ba}$  z hlediska výtěžku separace.

Podle pokynů pro kategorizaci pracovišť s otevřenými zářiči (viz úvodní kapitola) vypočteme aktivitu  $^{137}\text{Cs}$  povolenou pro práci v jednom pokuse a srovnáme ji s aktivitou skutečně použitou.

## ÚLOHA Č. 8 - URČENÍ POLOČASU PŘEMĚNY DLOUHODOBÉHO RADIONUKLIDU

### Teoretická část

Velmi dlouhé poločasy přeměny nelze stanovit z úbytku aktivity v čase. Určují se z měrné aktivity, tj. měřením aktivity vzorku radionuklidu o známé hmotnosti. Podle definice je aktivita dána vztahem

$$A = \lambda N \quad (37)$$

Počet radioaktivních atomů v měřené látce o hmotnosti  $m$  lze vyjádřit vztahem

$$N = \frac{m}{M} N_A P \quad (38)$$

kde  $M$  je molární hmotnost měřené látky,  $N_A$  je Avogadrova konstanta a  $P$  je zastoupení radioaktivního izotopu v přírodním prvku. Kombinací vztahů (37) a (38) dostáváme pro přeměnovou konstantu vztah

$$\lambda = \frac{A M}{m N_A P} \quad (39)$$

a pro poločas přeměny ( $T = \ln 2 / \lambda$ )

$$T = \frac{m N_A P}{A M} \ln 2 \quad (40)$$

Aktivitu  $\beta$  zářičů (v Bq) lze určit tak, že se za stejných podmínek změří četnosti (imp/s) vzorku a standardu se známou aktivitou. V tomto případě je účinnost obou měření  $\eta$  stejná. Potom platí:

$$R_{vz} = \eta A_{vz} \quad (41)$$

$$R_{st} = \eta A_{st} \quad (42)$$

$$\text{odkud plyne } A_{vz} = (R_{vz} / R_{st}) A_{st} \quad (43)$$

Celková účinnost měření  $\eta$  závisí na účinnosti detektoru pro dané záření, velikosti prostorového úhlu, který zaujímá detektor vůči vzorku, absorpci záření ve vzduchové vrstvě mezi vzorkem a detektorem a těle detektoru, zpětném úhlu rozptylu záření, samoabsorpci záření a na počtu částic emitovaných při rozpadu.

### Praktická část úlohy

V úloze určíme poločas přeměny přirozeného radionuklidu  $^{87}\text{Rb}$ , které tvoří 27,85 % přirozeného rubidia ( $P = 0,2785$ ). Jako standardu použijeme radionuklidu  $^{99}\text{Tc}$ . Rozpadová schémata obou nuklidů najdeme v **Příloze 1**. Tyto radionuklidy emitují částice  $\beta$  o téměř stejné energii, a proto jsou měřeny se stejnou účinností. Stejně podmínky měření se zajistí tak, že použijeme olověný kryt s pevně uchyceným detektorem a vzorky budeme vkládat vždy do stejné poličky v nosiči vzorků. Pro zajištění stejné samoabsorpce odpaříme do sucha stejné množství roztoku  $\text{RbCl}$  jako tvoří vlastní vzorek s přidaným standardem beznosičového  $\text{NH}_4^{99}\text{TcO}_4$ . Gama záření  $^{87}\text{Rb}$  nemá na měřenou četnost velký vliv, protože účinnost scintilačního detektoru pro gama záření je ve srovnání s účinností měření beta záření velmi malá. Vliv mrtvé doby počítače lze též zanedbat, protože aktivity (četnosti) měřené v této úloze jsou malé.

### Použité roztoky

1.  $\text{RbCl}$ , 400 mg  $\text{RbCl}$  mg / ml
2. roztok beznosičového  $\text{NH}_4^{99}\text{TcO}_4$  o udané aktivitě ve vodě

### Postup

1. Podle návodu k obsluze připravíme detekční sestavu k měření
2. Změříme pozadí  $t_p$  za 1000 s. Dobu měření volíme delší, abychom zmenšili chybu měření nízkoaktivních vzorků.
3. Připravíme tři vzorky chloridu rubidného. Hliníkové misky si označíme na okraji, nebo ze spodu, zvážíme je na analytických vahách a na každou napipetujeme 0,2 ml ethanolu, 0,1 ml vody a 0,2 ml roztoku  $\text{RbCl}$ . Vzorky odpaříme dosucha pod infralampou. Dbáme přitom na to, aby byl roztok stále rovnoměrně rozprostřen po celé misce – odparek má být rovnoměrný.
4. Misky se vzorky vkládáme do olověného krytu do držáku vzorků s kruhovým otvorem pro misku, a to vždy do stejné vzdálenosti od detektoru. Každý odparek zvážíme a měříme 600 s.
5. Podobně jako v bodě 3 připravíme tři vzorky chloridu rubidného se standardním přídatkem  $^{99}\text{Tc}$  tak, že místo 0,1 ml vody na misku napipetujeme 0,1 ml roztoku  $\text{NH}_4^{99}\text{TcO}_4$ . Po odpaření měříme každý vzorek 400 s.
6. Po odpipetování vzorku propláchneme polyethylenové špičky pipety vodou a alkoholem a uložíme je do příslušných kádinek.
7. Použité misky s odparkem  $\text{RbCl}$  důkladně umyjeme ve výlevce, misky s techneciem opláchneme do láhve na kapalný odpad  $\text{Tc}$  a poté misky důkladně umyjeme ve výlevce. Čisté misky odložíme do příslušné nádoby.

### Vyhodnocení

Uvedeme výsledky měření pozadí:  $t_p$ ,  $N_p$ ,  $R_p$ ,  $\delta_p$

Pro vzorky  $^{87}\text{Rb}$  a  $^{99}\text{Tc}$  uvedeme v tabulce hodnoty  $N_{v+p}$ ,  $R_{v+p}$ ,  $R_v$ ,  $\delta_v$  a průměrné hodnoty  $\overline{R_v}$  a  $\overline{\delta_v}$  (vztah (13) v úloze č. 1). Četnost standardu je třeba opravit na vlastní pozadí a na četnost příslušející  $^{87}\text{Rb}$ . U vzorků  $^{87}\text{Rb}$  uvedeme hmotnosti.

Z průměrných četností vzorků  $\text{RbCl}$  a standardu  $^{99}\text{Tc}$  vypočteme ze vztahu (43) aktivitu vzorků  $\text{RbCl}$ , pak ze vztahu (40) poločas rozpadu  $^{87}\text{Rb}$  (v sekundách) a porovnáme s literární hodnotou.

S použitím vztahu (17) v úloze č. 1 vypočteme, jakou relativní chybou zatěžuje zjištěnou hodnotu poločasu měření četnosti standardu, a uvedeme další možno zdroje chyb.

Podle pokynů pro kategorizaci pracovišť s otevřenými zářiči (viz úvodní kapitola) vypočteme aktivitu  $^{99}\text{Tc}$  povolenou pro práci v jednom pokuse a srovnáme ji s aktivitou skutečně použitou.

## ÚLOHA Č. 9 - URČENÍ STUPNĚ OBOHACENÍ URANOVÝCH PREPARÁTŮ

### Teoretická část

Některé radionuklidy je možné použít k vytvoření řetězové štěpné reakce a hypoteticky je tak použít k výrobě jaderných zbraní. Dle zákona 18/1997 Sb. se konkrétně jedná o thorium, uran a plutonium, označované souhrnně jako **jaderné materiály**. Dále se budeme věnovat pouze izotopům uranu. U tohoto prvku přicházejí v úvahu pouze dva izotopy, z nichž pouze jeden snadno podléhá samovolnému štěpení. Je jím isotop  $^{235}\text{U}$ . Veškeré chemikálie obsahující uran se dělí do těchto tří skupin:

- chemikálie obsahující ochuzený uran (obsah  $^{235}\text{U} < 0,7 \%$ )
- chemikálie obsahující přírodní uran (obsah  $^{235}\text{U} = 0,7 \%$ )
- chemikálie obsahující obohacený uran (obsah  $^{235}\text{U} > 0,7 \%$ )

Stupeň obohacení uranových preparátů a tím i zařazení do příslušné kategorie, lze snadno zjistit spektroskopickým proměřením.  $^{235}\text{U}$  totiž při svém rozpadu emituje stejně jako řada dalších radionuklidů charakteristické  $\gamma$  záření. Velmi významný je pík o energii 185,7 keV, jehož změřením určíme množství  $^{235}\text{U}$  ve vzorku a ze známého množství  $^{238}\text{U}$ , tedy i stupeň obohacení tohoto preparátu.

### Praktická část

Při stanovení stupně obohacení uranových preparátů je nutné znát nejenom množství  $^{235}\text{U}$  ale i  $^{238}\text{U}$ . Toto množství určíme ze znalosti hmotnosti měřeného preparátu a jeho chemického složení.

Množství  $^{235}\text{U}$  pak přímou úměrou závisí na ploše charakteristického píku o energii 185,7 keV. Jelikož plocha tohoto píku závisí mimo jiné především na geometrii měření (jak je vzorek daleko od detektoru, v jakém je obalu apod.) a na účinnosti měření tohoto fotopíku, je nutné nejprve změřit standardní vzorek, u kterého známe jak hmotnost a jeho chemické složení, tak stupeň obohacení  $^{235}\text{U}$ . Zkoumané vzorky pak musíme měřit za stejných podmínek.

V této úloze změříme spektrum standardu, obsahující známé množství  $^{235}\text{U}$ , a poté tři vzorky z ochuzeného, přírodního a obohaceného uranu a určíme stupeň jejich obohacení.

## Postup

1. Připravíme detekční jednotku k měření. Přístroj pustíme tlačítkem **ON** a poté zapneme generátor vysokého napětí – tlačítko **HV**. Nastavování veškerých parametrů se provádí tlačítkem **SETUP**, měření pak probíhá v modu **MCA**.
2. Za 400 s změříme najednou kalibrační zářiče  $^{60}\text{Co}$  a  $^{137}\text{Cs}$  a z polohy (středu) peaku  $^{137}\text{Cs}$  (662 keV) a druhého peaku  $^{60}\text{Co}$  (1333 keV) vypočítáme lineární kalibrační rovnici. Zapišeme si tedy čísla kanálů, ve kterých se nachází střed fotopeaku  $^{137}\text{Cs}$  (ve skutečnosti se jedná o fotopeak  $^{137\text{m}}\text{Ba}$  viz úloha č. 7) a střed druhého fotopeaku  $^{60}\text{Co}$ . K přesnému určení středu použijeme funkci Zoom. S čísel kanálů a příslušných energií vytvoříme dvě uspořádané dvojice [x, y], tedy [číslo kanálu, příslušná energie] a dosadíme je do rovnice přímky  $y = ax + b$  a obě takto získané rovnice vyřešíme (vypočítáme koeficienty a a b). Pomocí této rovnice pak vypočteme, v jakém kanále se bude nacházet fotopeak  $^{235}\text{U}$  (186 keV).
3. Za 400 s změříme spektrum standardu a analyzujeme jeho spektrum. Pro naše účely stačí změřit dolní a horní mez fotopeaku o energii 186 keV a určit plochu tohoto fotopeaku (pomocí funkce **Analyze – ROI – Set L/H** se nastaví dolní a horní mez fotopeaku a přístroj sám spočítá plochu v impulsech za s), která je v ideálním případě přímo úměrná aktivitě a tedy i množství  $^{235}\text{U}$  v daném standardu. Zapišeme si také složení a hmotnost měřeného standardu.
4. Za 400 s změříme postupně spektrum tří vzorků z ochuzeného, přírodního a obohaceného uranu. Přístroj si pamatuje nastavenou dolní a horní mez fotopeaku o energii 186 keV, takže po skončení měření stačí odečíst vždy jen jeho plochu a zapsat si chemické složení a hmotnost měřených vzorků.
5. Změříme pozadí za 600 s a odečteme jeho hodnotu (četnost v impulsech za sekundu) v oblasti fotopeaku o energii 186 keV.
6. Po skončení předchozího měření uložíme veškeré vzorky, včetně standardu zpět do nádoby na vzorky a vypneme detekční sestavu.

## Vyhodnocení

Uvedeme a vypočítáme pro charakteristický fotopeak  $t_p$ ,  $R_p$  a  $\delta_p$ .

Dále uvedeme do tabulky pro standard a charakteristický fotopeak  $t_{s+p}$ ,  $R_{s+p}$ ,  $R_s$  a  $\delta_s$ . Z chemického složení, stupně obohacení a pravděpodobnosti emise charakteristického  $\gamma$  záření, vypočítáme účinnost měření fotopeaku  $^{235}\text{U}$ ,  $\eta$ . Poločas rozpadu  $^{235}\text{U}$  je 703,8 miliónu let, pravděpodobnost P emise fotonu o energii 186 keV je 54%. Účinnost měření je tedy rovna  $\eta = R_s / (A P) \cdot R_p$  a  $R_s$  uvádíme v Imp / s.

Do další tabulky uvedeme pro jednotlivé vzorky  $t_{v+p}$ ,  $R_{v+p}$ ,  $R_v$  a  $\delta_v$ . Ze známého množství  $^{235}\text{U}$  ve standardu ( $m(^{235}\text{U}) = m \% \text{U} \% ^{235}\text{U} / 10000$ ) a předpokladu, že hmotnost  $^{235}\text{U}$  ve vzorku je přímo úměrná ploše příslušného fotopeaku spočítáme obsah  $^{235}\text{U}$  ve vzorcích. Dále ze známého obsahu U (zjistíme s chemického složení) vypočítáme obohacení U uranem  $^{235}\text{U}$ .

Provedeme zařazení změřených vzorků do příslušné kategorie uranových preparátů, uvedených výše.

## ÚLOHA Č. 10 - RADIOAKTIVNÍ ROVNOVÁHA

### Teoretická část

Vzniká-li rozpadem radionuklidu s rozpadovou konstantou  $\lambda_1$  rovněž radioaktivní nuklid s rozpadovou konstantou  $\lambda_2$ , je počet atomů tohoto dceřiného nuklidu v čase  $t$  dán vztahem

$$N_{2,t} = N_{1,0} \frac{\lambda_1}{\lambda_2 - \lambda_1} (e^{-\lambda_1 t} - e^{-\lambda_2 t}) \quad (44)$$

kde  $N_{1,0}$  je počet atomů mateřského radionuklidu na počátku pokusu, kdy pro jednoduchost předpokládáme, že  $N_{2,0} = 0$ . Je-li  $\lambda_1 \ll \lambda_2$  (tj.  $T_1 \gg T_2$ ), zjednodušuje se vztah (44) na

$$N_{2,t} = N_{1,0} \frac{\lambda_1}{\lambda_2} (1 - e^{-\lambda_2 t}) = N_{1,0} \frac{\lambda_1}{\lambda_2} (1 - e^{-0,693 t / T_2}) \quad (45)$$

Je-li tedy na počátku přítomen pouze mateřský nuklid, narůstá množství dceřiného nuklidu asymptoticky podle vztahu (45). Po dostatečně dlouhé době, prakticky asi deseti poločasech dceřiného nuklidu, je exponenciální člen ve vztahu (45) zanedbatelný a s použitím definice aktivity  $A = \lambda N$  dostáváme:

$$A_{2,0} = A_{1,0} \quad (46)$$

Je to stav tzv. trvalé radioaktivní rovnováhy, kdy aktivita dceřiného nuklidu po periodě narůstání dosáhla konstantní hodnoty rovné aktivitě mateřského nuklidu. Aktivita dceřiného nuklidu se s časem dále nemění, protože poločas mateřského nuklidu je tak velký, že pokles jeho aktivity v čase je zanedbatelný.

### Praktická část úlohy

Stav trvalé radioaktivní rovnováhy budeme studovat na dvojici radionuklidů  $^{137}\text{Cs}/^{137\text{m}}\text{Ba}$ . Rozpadové schéma je uvedeno v **Příloze 1**.

Abychom mohli sledovat růstovou křivku  $^{137\text{m}}\text{Ba}$ , musíme nejprve mateřský nuklid  $^{137}\text{Cs}$  získat v radiochemicky čistém stavu. K dělení cesia od barya využijeme selektivní adsorpci iontu  $\text{Cs}^+$  na sraženině fosfomolybdenanu amonném v kyselém roztoku. Na fosfomolybdenanu se cesium zadrží, protože fosfomolybdenan cesný je nerozpustný. Po promytí sraženiny 6 M  $\text{HNO}_3$ , baryum přechází do filtrátu ve formě  $^{137\text{m}}\text{Ba}(\text{NO}_3)_2$ . Adsorpci  $^{137\text{m}}\text{Ba}$  na sraženinu potlačíme zadržujícím nosičem - dusičnanem barnatým. Nárůst aktivity  $^{137\text{m}}\text{Ba}$  změříme scintilačním krystalem  $\text{NaI}(\text{TI})$  (účinnost měření  $\beta$  záření  $^{137}\text{Cs}$  tímto detektorem je mnohem menší než účinnost měření  $\gamma$  záření emitovaném izomerem  $^{137\text{m}}\text{Ba}$ ).



Pro určení poločasu rozpadu  $^{137m}\text{Ba}$  z růstové křivky je třeba znát rovnovážnou hodnotu aktivity  $^{137m}\text{Ba}$  ( $N_\infty$ ). Je jí dosaženo po uplynutí minimálně deseti poločasů  $^{137m}\text{Ba}$ , tj. přibližně půl hodiny po oddělení.

Soustavu  $^{137}\text{Cs} / ^{137m}\text{Ba}$  lze využít i pro demonstraci funkce tzv. **generátoru krátkodobého radionuklidu**. Principem je systém tvořený dvěma radionuklidy, z nichž žádaný (generovaný) je dceřiný a má kratší poločas než mateřský. Mateřský nuklid je obvykle zakotven na sloupci adsorbentu nebo ionexu a po ustálení rovnováhy se dceřiný nuklid vymyje z kolonky vhodným elučním činidlem. Proces narůstání aktivity dceřiného nuklidu a jeho eluci lze vícekrát opakovat. Některé z takto získaných krátkodobých radionuklidů našly využití v lékařské diagnostice.

### Použité chemikálie

Molybdenan amonný, roztoky:  $\text{Na}_3\text{PO}_4$ , 0,01M  $\text{Ba}(\text{NO}_3)_2$ , 6 M  $\text{HNO}_3$ ,  $^{137}\text{Cs}/^{137m}\text{Ba}$ .

### Postup

1. Připravíme sraženinu fosfomolybdenanu amonného: 3 g molybdenanu amonného rozpustíme za tepla v 30 ml vody a roztok vlijeme do 30 ml 6 M  $\text{HNO}_3$ . Okyselený roztok molybdenanu amonného smícháme s 20 ml roztoku  $\text{Na}_3\text{PO}_4$  v Erlenmeyerově baňce. Vznikne žlutá sraženina fosfomolybdenanu amonného.
2. Podle návodu k obsluze připravíme k detekční sestavu k měření. Všechna měření (tj. měření pozadí, vzorků i rovnovážné aktivity) provádíme v režimu automatického opakování měření s časovou předvolbou 20 s.
3. Prázdný filtr vložíme skleněné misky a poté do olověného krytu detektoru a změříme 5 x pozadí. Pro výpočet použijeme průměrnou hodnotu.
4. Roztok se sraženinou v Erlenmeyerově baňce rozmícháme a asi 20 ml této suspenze odebereme do kádinky (s označením SEPARACE). K tomuto podílu přidáme dělenou pipetou 2,5 ml 0,01M dusičnanu barnatého (Ba nosič) a automatickou pipetou 0,5 ml roztoku  $^{137}\text{Cs}/^{137m}\text{Ba}$ .
5. Obsah kádinky zfiltrujeme pomocí Büchnerovy nálevky. Sraženinu promyjeme dvakrát 5 ml 6 M  $\text{HNO}_3$ . V okamžiku nalití prvního podílu kyseliny do filtračního kelímku spustíme stopky - okamžik separace, na sraženině je čistý mateřský nuklid. Po odpojení vakua pomocí pinzety vyjmeme filtrační papír spolu s filtrátem, vložíme jej do měřicí misky a misku přeneseme do olověného krytu.
6. Začneme měřit růstovou křivku  $^{137m}\text{Ba}$ . V tomto okamžiku vypneme stopky (zaznamenáme čas - dobu od oddělení nuklidů do začátku měření). Zaznamenáme 25 hodnot po 20 s. Dále provedeme ještě pět měření ( $t = 20$  s): tři po uplynutí dvou minut a dvě po uplynutí dalších pěti minut od těchto tří měření.
7. Po skončení měření růstové křivky kádinku (s označením SEPARACE) vypláchneme lihem do láhve na kapalný odpad a vytřeme papírovou vatou. Zbývající suspenzi ponecháme v Erlenmeyerově baňce pro další skupinu studentů.
8. Po uplynutí patnácti minut od ukončení měření růstové křivky, změříme pětkrát po 20 s rovnovážnou aktivitu ( $N_\infty$ )  $^{137m}\text{Ba}$ . Pro výpočty pak použijeme průměrnou hodnotu opravenou na pozadí.
9. Filtrační papír se sraženinou s preparátem  $^{137}\text{Cs}/^{137m}\text{Ba}$ , kterou jsme vyjmuli z měřicího prostoru, opět promyjeme 2 x 5 ml  $\text{HNO}_3$ . Dále postupujeme podle bodů 6 a 7.

10. Sraženinu na filtračním papíru odstraníme pinzetou do pevného odpadu, misku pak vypláchneme lihem do láhve s kapalným odpadem a vytřeme papírovou vatou.

### Vyhodnocení

Uvedeme výsledky měření pozadí:  $t_p$ ,  $N_p$  a průměrnou hodnotu  $\bar{N}_p$ . Dále uvedeme tabulku pro obě růstové křivky obsahující čas od oddělení  $\text{Ba}^{2+}$  (od sraženiny),  $N_{v+p}$ ,  $\delta_{v+p}$ ,  $N_v$ , rozdíl  $(N_\infty - N_v)$  a  $\ln(N_\infty - N_v)$ . Opravu hodnot  $N_v$  a  $\bar{N}_\infty$  na pozadí provádíme s ohledem na  $\delta_{v+p}$ .

Do jednoho grafu vyneseme obě růstové křivky  $^{137\text{m}}\text{Ba}$  - závislost  $N_v$  na čase. Poločas rozpadu  $^{137\text{m}}\text{Ba}$  vypočítáme z rozpadové konstanty, kterou určíme z grafu závislosti  $\ln(N_\infty - N_v)$  na čase. Nakonec srovnáme vypočítanou hodnotu poločasu rozpadu  $^{137\text{m}}\text{Ba}$  s hodnotou uvedenou v literatuře (či program DECAY nainstalovaném na počítači v laboratoři).

# ÚLOHA Č. 11 - STANOVENÍ OBJEMOVÉ AKTIVITY RADONU

## Teoretická část

Podle údajů UNSCEAR (United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation) dosahuje podíl radonu na celkovém ozáření lidského organismu během jeho života až 55 %. Na celkovém ozáření se podílejí i další zdroje (terestrické záření, kosmické záření, lékařské aplikace), a proto je zřejmé, že se jeho hodnoty pro regiony i jednotlivce budou lišit. Ve všech případech však jako hlavní zdroj ozáření osob zůstává radon z geologického podloží.

V životním prostředí se radon vyskytuje ve formě tří izotopů, které vznikají radioaktivní přeměnou z příslušných izotopů radia v radioaktivních řadách uran-radiové ( $^{222}\text{Rn}$ ), thoriové ( $^{220}\text{Rn}$ ) a uran-aktiniové ( $^{219}\text{Rn}$ ). Kompletní rozpadové řady jsou k dispozici v programu DECAY, nainstalovaném na počítači v laboratoři.

Radioaktivní řady představují soubor radioaktivních nuklidů, v nichž z výchozího (mateřského) nuklidu s velmi malou přeměnovou konstantou dochází postupnými přeměnami  $\alpha$  a  $\beta^-$  ke snižování Z a A až do vzniku stabilního nuklidu, kterým je vždy izotop olova.

Radon (za normálních podmínek plyn), vzniká v horninách geologického podloží postupnou přeměnou z  $^{238}\text{U}$ ,  $^{235}\text{U}$  a  $^{232}\text{Th}$ . Nejvýznamnější z hlediska ozáření obyvatelstva je izotop  $^{222}\text{Rn}$  s poločasem přeměny 3,82 dne, který vzniká z  $^{238}\text{U}$ . Izotop  $^{220}\text{Rn}$ , který vzniká přeměnou  $^{232}\text{Th}$ , je méně významný, protože vzhledem k jeho krátkému poločasu přeměny (55,6 s) se ho většina rozpadne během transportu na povrch a jeho obsah v ovzduší je asi stokrát menší než  $^{222}\text{Rn}$ . Zcela nevýznamný je izotop  $^{219}\text{Rn}$ , jehož poločas přeměny je pouze 3,96 s. Z těchto důvodů je v dalším textu uvažován pouze izotop  $^{222}\text{Rn}$ .

Vlivem tektonického porušení hornin dochází k pronikání radonu z podloží k zemskému povrchu. Na migraci radonu má významný vliv propustnost hornin a rovněž jejich nasycenost podzemní vodou, ve které se radon zčásti rozpouští. Pohyb radonu v půdě se děje převážně difúzí a radon je tedy ve větší míře obsažen v půdním vzduchu. Z povrchu půdy je potom radon volně rozptylován do atmosféry, kde se mnohonásobně zředí. Objemová aktivita radonu v půdním vzduchu je řádově v desítkách tisíc  $\text{Bq}/\text{m}^3$ , v atmosféře se pohybuje v rozmezí 0,7 až  $20 \text{Bq}/\text{m}^3$ .

### **Radon v objektech**

Z půdy proniká radon do interiérů budov, u kterých jsou porušené kontaktní konstrukce (rozpuhané neizolované podlahy, trhliny ve zdivu a na kontaktech zdiva s podlahou, prostupy kolem inženýrských sítí). Mechanismus přísunu radonu je popsán komínovým efektem. Vlivem přirozené ventilace teplejší vzduch uniká především vrchními částmi budovy a v důsledku tlakového gradientu dochází v přízemí či sklepe, na rozhraní objektu a podloží, k nasávání půdního plynu s radonem popsanými prostupy do objektu. Tento efekt je nejvýraznější v zimním topném období, kdy je největší rozdíl mezi vnitřní a venkovní teplotou a objekty jsou málo větrané.

Měření radonu v objektech je komplikováno tím, že okamžitě zjišťované hodnoty objemové aktivity radonu jsou proměnné v čase, a to jak v průběhu dne, tak i během roku. Je to způsobeno tím,

že se fyzikální podmínky během měření neustále mění (např. pokles venkovní teploty v nočních hodinách nebo větrání objektu v zimním období). Z těchto důvodů se upřednostňují průměrné hodnoty objemové aktivity radonu z měření v delším časovém období. Ozáření osob je hodnoceno podle časového integrálu objemové aktivity radonu, při které je osoba exponována v průběhu kalendářního roku za ventilačních podmínek obvyklých při užívání objektu. Pro tento účel se používají tzv. stopové detektory, které se na rok umístí v obytném prostoru objektu a po uplynutí této doby se provede vyhodnocení a stanoví se průměrná objemová aktivita za jeden rok. V případech, kdy je potřeba hodnotit objekt, je z ekonomického hlediska přípustné měření průměrné objemové aktivity radonu za dobu kratší než jeden rok, minimálně však za celý jeden týden (7 dní).

Dle §95 vyhlášky 307/2002 Sb., ve znění pozdějších předpisů, je **směrná hodnota** pro rozhodování o tom, zda má být ve zkolaudovaných stavbách s obytnými nebo pobytovými místnostmi proveden zásah ke snížení stávajícího ozáření z přírodních radionuklidů  $400 \text{ Bq/m}^3$  pro objemovou aktivitu radonu ve vnitřním ovzduší obytné nebo pobytové místnosti; tato hodnota se vztahuje na průměrnou hodnotu při výměně vzduchu obvyklé při užívání.

**Mezní hodnota** pro ozáření z přírodních radionuklidů ve zkolaudovaných stavbách s obytnými nebo pobytovými místnostmi činí  $4000 \text{ Bq/m}^3$  pro objemovou aktivitu radonu ve vnitřním ovzduší obytné nebo pobytové místnosti; tato hodnota se vztahuje na průměrnou hodnotu při výměně vzduchu obvyklé při užívání.

**Směrná hodnota** pro rozhodování o tom, zda mají být v projektovaných a stavěných budovách s obytnými nebo pobytovými místnostmi **připravována a prováděna opatření proti pronikání radonu** z podloží, stavebních materiálů a dodávané vody a proti zevnímu ozáření gama zářeními ze stavebních materiálů činí  $200 \text{ Bq/m}^3$  pro objemovou aktivitu radonu ve vnitřním ovzduší obytné nebo pobytové místnosti; tato hodnota se vztahuje na průměrnou hodnotu při výměně vzduchu obvyklé při užívání.

### Principy měření aktivity radonu a jeho přeměnových produktů

Přístroje používané pro tato měření detekují alfa částice z přeměnových produktů  $^{222}\text{Rn}$  ( $^{218}\text{Po}$  a  $^{214}\text{Po}$ ) pomocí polovodičového detektoru, který je umístěn v detekční komoře. Pokud se měří radon ve vzduchu, který je čerpán pomocí membránového čerpadla do měřicí komory, jsou produkty přeměny radonu, které mají většinou kladný náboj, přitahovány na povrch polovodičového detektoru elektrickým polem o vysoké intenzitě. Toho se dosáhne tím, že k měřicí komoře je připojen kladný pól zdroje vysokého napětí (max. 2 kV) a povrch detektoru je spojen se záporným pólem. Některé přístroje namísto aktivního čerpání vzduchu pomocí čerpadla používají pouze difusní plnění měřicí komory vzduchem. Protože jsou produkty přeměny radonu ve vzduchu v nerovnováze s radonem (část jich v podobě aerosolu ulpívá na povrchu stěn, nábytku, závěsích apod.), je potřeba tyto částice odfiltrovat před vstupem vzduchu do měřicí komory. Měří se tedy alfa částice, emitované z atomů  $^{218}\text{Po}$  a  $^{214}\text{Po}$ , které se vytvoří postupnou přeměnou z radonu v měřicí komoře a jsou zde s radonem v rovnovážném stavu.

**Ve vzduchu** by měl být radon se svými přeměnovými produkty v rovnováze. Ve skutečnosti se však přeměnové produkty nejprve elektrostaticky poutají na aerosol, z něho se jistá část sorbuje na površích. To pak vede k nerovnováze mezi radonem a produkty jeho přeměny. Poměr aktivit

samotného radonu a produktů jeho přeměny vyjadřuje tzv. faktor nerovnováhy (F). Ve vzduchu budov bývá F v rozmezí 0,25 až 0,65, standardně užívaná hodnota je 0,4 (statistický průměr).

V další části úlohy bude provedeno stanovení objemové aktivity **radonu ve vodě** metodou kapalně scintilace (princip metody viz úloha 13).

## **A) STANOVENÍ OBJEMOVÉ AKTIVITY PŘEMĚNOVÝCH PRODUKTŮ RADONU VE VZDUCHU**

### Praktická část

$^{222}\text{Rn}$  se tvoří v uran-radiové radioaktivní řadě. Vzniká přeměnou  $^{226}\text{Ra}$ , který se dále přeměňuje na krátkodobé přeměnové produkty  $^{218}\text{Po}$  ( $T_{1/2} = 3,05$  min),  $^{214}\text{Pb}$  ( $T_{1/2} = 26,8$  min),  $^{214}\text{Bi}$  ( $T_{1/2} = 19,7$  min) a  $^{214}\text{Po}$  ( $T_{1/2} = 1,64 \cdot 10^{-4}$  s). Přeměnovým produktem  $^{214}\text{Po}$  je dlouhodobý  $^{210}\text{Pb}$  ( $T_{1/2} = 22$  let).

Stanovení objemových aktivit přeměnových produktů radonu v ovzduší se provádí jejich zachycených na filtru po předchozím prosávání vzduchu. Podstata metody spočívá v prosátí určitého množství vzduchu přes filtr a v následném měření alfa aktivity krátkodobých přeměnových produktů radonu,  $^{218}\text{Po}$  a  $^{214}\text{Po}$ , deponovaných na filtru. K určení objemových aktivit jednotlivých přeměnových produktů je potřebné měřit jejich aktivitu na filtru minimálně ve třech časových intervalech, což je počet dostatečný pro přesné určení aktivity jednotlivých přeměnových produktů. Tento postup je v souladu s metodikami doporučenými pro toto měření <sup>4</sup>.

Z hodnot počtu impulsů  $N_1$ ,  $N_2$ ,  $N_3$  naměřených v těchto třech intervalech se určí objemové aktivity přeměnových produktů radonu a také objemová aktivita radonu ve vzduchu. Měří se ve třech intervalech 5,5 – 10 min, 10 – 30 min a 30 – 55,5 min od zahájení čerpání.

### Přístrojové a materiální vybavení

Měřicí přístroj PSDA (Přenosná souprava pro detekci alfa částic), výrobce ELEKO Praha. Jedná se o měřicí přístroj vybavený polovodičovým křemíkovým bariérovým detektorem, membránové čerpadlo RCHL 1, napájené síťovým zdrojem, prosávací zařízení se sadou držáků filtrů, mikrovláknité filtry AFPC, kalibrační standard  $^{241}\text{Am}$  ke zjištění účinnosti měření (detekce částic alfa)  $\varepsilon$  a stopky.

### Postup a vyhodnocení

1. Filtr upevněný v držáku uchytíme pomocí převlečné matice do prosávacího zařízení.
2. Předvolba měřicího času na měřicím přístroji PSDA se nastaví na 3000 s.

---

<sup>4</sup> Z. Janout, S. Pospíšil, Acta Polytechnica, Práce ČVUT v Praze, 16(IV, 3), 1991, str. 5-19

3. Spustíme se čerpadlo na dobu 5 minut. Čas měříme pomocí stopek.
4. Po ukončení čerpání přesuneme držák s filtrem do měřicí komory přístroje PSDA. Na tuto činnost máme 30 vteřin.
5. Měření zahájíme stisknutím tlačítka start po uplynutí 5,5 minuty od zahájení čerpání.
6. Po uplynutí 10 minut od zahájení čerpání provedeme první odečet naměřených impulsů z displeje přístroje ( $n_1$ ).
7. Druhý odečet naměřených impulsů ( $n_2$ ) provedeme po uplynutí 30 minut od zahájení čerpání.
8. Po automatickém zastavení měření (předvolba 3000 s) provedeme třetí odečet naměřené četnosti ( $n_3$ ).
9. Počet impulsů  $N_1$ ,  $N_2$  a  $N_3$ , v jednotlivých měřicích intervalech je potom následující:

$$N_1 = n_1$$

$$N_2 = n_2 - n_1$$

$$N_3 = n_3 - n_2$$

10. Účinnost detekce částic alfa zjistíme měřením etalonu  $^{241}\text{Am}$  o známé aktivitě  $a_{Am}$ . Etalon  $^{241}\text{Am}$  vložíme do měřicí komory přístroje PSDA. Nastavíme časovou předvolbu  $t = 300$  s a spustíme měření. Po ukončení měření provedeme odečet naměřené četnosti etalonu  $N_{et}$ .

11. Účinnost měření  $\varepsilon$  vypočteme pomocí vztahu:

$$\varepsilon = N_{et} / a_{Am} t \quad (47)$$

12. Objemové aktivity přeměnových produktů radonu se stanoví výpočtem pomocí vztahů <sup>5</sup>:

$$a_v(^{218}\text{Po}) = 1/Q \eta \varepsilon (2,9698 N_1 - 1,4487 N_2 + 0,7591 N_3) [\text{Bq}\cdot\text{m}^{-3}]$$

$$a_v(^{214}\text{Pb}) = 1/Q \eta \varepsilon (-0,1584 N_1 - 0,2224 N_2 + 0,4764 N_3) [\text{Bq}\cdot\text{m}^{-3}]$$

$$a_v(^{214}\text{Bi}) = 1/Q \eta \varepsilon (-0,2980 N_1 + 0,6346 N_2 - 0,3992 N_3) [\text{Bq}\cdot\text{m}^{-3}]$$

kde  $Q$  - je čerpací rychlost v l/min – 7,5 l/min

$\eta$  - účinnost záchytu přeměnových produktů na filtru – 0,95

---

<sup>5</sup> Jednotlivé koeficienty vyplývají ze vztahů, které jsou uvedeny v citované práci

## B) STANOVENÍ OBJEMOVÉ AKTIVITY RADONU VE VODĚ

Směrné hodnoty obsahu radonu v balené vodě a ve vodě určené k veřejnému zásobování pitnou vodou jsou stanoveny v tabulce uvedené níže. Při jejich překročení se balená voda může uvádět do oběhu a pitná voda dodávat k veřejnému zásobování jen ve zdůvodněných případech, kdy náklady spojené se zásahem ke snížení obsahu radionuklidů, zejména výběrem jiného zdroje vody nebo odradonováním vody nebo jiným vhodným zásahem, by byly prokazatelně vyšší než rizika zdravotní újmy.

### Směrné hodnoty objemových aktivit radonu v dodávané vodě

Ukazatel obsahu radionuklidů	Směrná hodnota objemové aktivity		
	balená kojenecká voda	pitná voda pro veřejné zásobování, balená pramenitá voda a balená pitná voda	balená přírodní minerální voda
objemová aktivita $^{222}\text{Rn}$	20 Bq/l	50 Bq/l	100 Bq/l

### Výpočet objemové aktivity radonu

Objemovou aktivitu radonu  $a_{\text{Rn}}$  [Bq/l] vypočítejte podle vztahu:

$$a_{\text{Rn}} = \frac{\bar{N} 2^x q}{k} \quad (48)$$

kde je:

$\bar{N}$  ..... průměrná četnost vzorku opravená na pozadí [ $\text{s}^{-1}$ ], stanovená z většího počtu měření

$q$  ..... korekční faktor, eliminující ztrátu způsobenou únikem radonu při odběru - 1,034

$x$  ..... korekce na poločas přeměny  $^{222}\text{Rn}$  :

$$x = \frac{t_0 - t_v}{T_{\frac{1}{2}} \text{Rn}}$$

$t_0$  ..... čas odběru vzorku [h],

$t_v$  ..... čas zahájení měření vzorku [h]

$k$  ..... kalibrační konstanta

Kalibrační konstantu lze určit jako směrnicí přímky závislosti naměřené četnosti kalibračních standardů na aktivitě standardů.

$$k = \frac{\sum_{i=1}^n a_i R_{s,i} 2^y}{\sum_{i=1}^n a_i^2} \quad (49)$$

kde je:

$a_i$  ..... aktivita  $i$ -tého standardu (kalibračního preparátu) [Bq],  
 $R_{s,i}$  ..... čistá četnost  $i$ -tého standardu [ $s^{-1}$ ],  
 $y$  ..... korekce na poločas přeměny  $^{222}\text{Rn}$  :

$$y = \frac{t_z - t_k}{\frac{T_{1/2} \text{Rn}}{2}}$$

$\frac{T_{1/2} \text{Rn}}{2}$  ..... poločas přeměny  $^{222}\text{Rn}$  (=91,764 h),  
 $t_z$  ..... čas zahájení měření standardu [h],  
 $t_k$  ..... čas ukončení extrakce standardu [h].

### Praktická část

Množství radonu ve vodě je velice nízké a přímé měření vzorků pomocí kapalné scintilace by bylo v důsledku měření nízké aktivity a relativně vysokého pozadí (viz úloha 1) časově velice náročné. Proto musíme radon obsažený ve vodě extrahovat do toluenu, ve kterém je rozpustnější a tím ho zkoncentrovat. Po ustavení radioaktivní rovnováhy radonu s produkty jeho přeměny se měří aktivita pomocí roztoku kapalného scintilátoru v toluenu, do něhož byl radon vyextrahován z odebraného vzorku vody.

### Postup

#### **Odběr vzorku**

1. Do odběrových nádob (250 ml odměrná Erlenmeyerova baňka) odměřte přesně 10 ml roztoku scintilátoru v toluenu (PPO) a nádobu dokonale uzavřete PE zátkou.
2. Těsně před odběrem vzorku vody nádobu otevřete a naplňte vzorkem vodovodní vody po rysku (odběrná nádoba č. 1). Plnění proveďte tak, že nejprve odpusťte vodu, která byla v potrubí objektu (odhadem) a pak teprve nechte opatrně natékat vodu z vodovodní sítě



dovnitř po stěně nádoby. Při plnění nesmí dojít k rozstříkovaní vody o hrdlo nádoby. Roztok scintilátoru při tom vytváří vrstvu organické fáze nad hladinou vody a zabraňuje tak úniku radonu při odběru a následném transportu. Zaznamenejte čas ukončení plnění odběrné nádoby ( $t_o$ ). Potom naplňte 2. a 3. baňku předem připravenými vzorky vody s radonem. Tyto vzorky, označené 2 a 3 jsou nachystané u úlohy. Zaznamenejte čas ukončení plnění odběrných nádob ( $t_o$ ).

### Měření vzorků a pozadí

1. Proveďte extrakci radonu do roztoku scintilátoru ručním protřepáváním vzorku se scintilátorem. Extrakce se provádí v dobře uzavřených odběrových nádobách po dobu 1,5 minuty.
2. Po rozdělení fází nádobu otevřete a rychle odpipetujte 5 ml organické fáze do měřicí lahvičky, kterou ihned uzavřete dobře těsnícím šroubovým uzávěrem. Lahvičku ponecháme stát do ustavení rovnováhy mezi radonem a produkty jeho přeměny. Mezi tím se vypracuje úloha 11A.
3. Přístroj zapneme tlačítkem **On/Off** na ovládacím panelu přístroje. Dále zapneme vysoké napětí stiskem tlačítka **HV** a přístroj necháme 10 min. stabilizovat.
4. Potom pomocí kursoru přejdeme do režimu **counter** (stiskem tlačítka **Ent**) a dále obdobně do režimu **measure**. Výstup z každého režimu se provede tlačítkem **Esc**.
5. Předvolba doby měření se provede v režimu **control** a je nastavena na 200 s.
6. Odklopíme horní viko detekčního zařízení, měřený vzorek vložíme do krytu, víko zaklopíme a pákovým spínačem na boku detekčního zařízení spustíme vzorek do měřicí komory. Stiskem tlačítka **Ent** se zahájí měření. Poznačíme si čas zahájení měření –  $t_x$ . Vzorek měříme minimálně 3 krát, při dostatku času na vypracování úlohy je optimální měřit 5 krát.
7. Do měřicího prostoru detekčního zařízení vložte lahvičku s preparátem vzorku. Změřte počet impulsů za 200 s ( $N_v$ ). Měření opakujte 5 krát. Po provedeném měření vyjměte preparát.
8. Obdobně změříme další dva vzorky a dále měřicí lahvičku se samotným toluenovým scintilátorem pro zjištění pozadí.
9. Pro případnou kontrolu správné funkce přístroje slouží kalibrační vzorek  $^{239}\text{Pu}$  se scintilátorem v zatavené ampulce. Četnost tohoto standardu je  $35\,600 \pm 400 \text{ imp}/200 \text{ s}$ .

### Vyhodnocení

Do tabulky uveďte naměřené četnosti vzorku (včetně pozadí)  $R_{v+p}$ , četnosti opravené na pozadí  $R_v$ , průměrné hodnoty četnosti  $\bar{N}$  a směrodatné odchyly měření  $\delta$ .

Vypočtete podle vztahu (48) objemovou aktivitu radonu ve vzorku vody. Ke kalibraci použijeme hodnoty odečtené z dodaného kalibračního grafu.

## ÚLOHA Č. 12 - SPEKTROSKOPIE ZÁŘENÍ ALFA

### Teoretická část

Na rozdíl od  $\beta$  záření, má záření  $\gamma$  a záření  $\alpha$  emitované při radioaktivním rozpadu charakteristické energetické spektrum (dochází k emisi částic o určitých energiích). Zatímco při rozpadu  $\beta$  se o rozpadovou energii dělí elektron či pozitron spolu s nově vznikajícím jádrem a elektronovým antineutrinem či neutrinem, kde rozdělení energie mezi částicemi opouštějícími jádro (elektron a elektronové antineutrino příp. jejich antičástice) je zcela náhodné a spektrum  $\beta$  tedy nemá charakteristické linie, lze zde definovat pouze maximum energie částic  $\beta$  (kdy si tato částice odnáší všechnu energii rozpadu) a střední energii  $\beta$  částic (energie, kterou má největší množství  $\beta$  částic), tak spektrum  $\gamma$  i  $\alpha$  je čarové, což znamená že  $\alpha$  i  $\gamma$  částice mají přesně definované energie. Tyto energie jsou pak charakteristické pro daný radionuklid. Spektroskopii  $\gamma$  se věnuje úloha č. 4.

Už sama detekce záření  $\alpha$  je poměrně náročná, jelikož dosah  $\alpha$  částic ve vzduchu je velice malý (maximálně milimetry). Částice  $\alpha$  je těžká a dvojnásobně kladně nabitá, a proto intenzivně interaguje s hmotou. Pro běžnou detekci záření  $\alpha$  je tedy nutné použít např. kapalných scintilátorů (viz úloha č. 13) anebo detektorů v evakuovatelných komůrkách, aby se zabránilo zachytu záření  $\alpha$  ve vzduchu.

K vlastní detekci  $\alpha$  záření se používá tzv. PIPS (Passivated, Implanted, Planar Silicon) detektorů. Tento detektor se skládá z tenoučkého vstupního okýnka z oxidu křemičitého o tloušťce asi 50 nm a vlastního detektoru z křemíku, který tvoří klasický P – N přechod (diody). Pokud dojde k vniknutí ionizujícího záření do prostoru tohoto přechodu a k ionizaci diody (což je u  $\alpha$  záření vysoce pravděpodobné), vytvoří se pár elektron – kladná díra. Jestliže se na diodu přiloží určité napětí, dojde k tomu, že elektron bude putovat ke kladné elektrodě a kladná díra k záporné elektrodě a počítač impulsů připojený k tomuto detektoru zaznamená impuls. Velikost impulsu je úměrná energii zachyceného záření (čím větší je energie  $\alpha$  záření, tím větší je množství vzniklých iontů v detektoru – diodě).

### Praktická část úlohy

V této úloze změříme a vyhodnotíme spektrum několika  $\alpha$  zářičů a naměřené hodnoty srovnáme s tabelovanými hodnotami uvedenými v programu DECAY nainstalovaném na počítači v laboratoři.

Abychom mohli určit konkrétní energie měřených  $\alpha$  zářičů, je třeba nejprve provést kalibraci spektrometru, kdy se k jednotlivým kanálům, přiřadí konkrétní energie. Základní princip měření  $\alpha$  spektra je stejný jako při měření spektra  $\gamma$ , viz úloha č. 4.

### Postup

1. Připravíme detekční sestavu k měření.

2. Poté dle návodu k  $\alpha$  spektrometru změříme spektra všech vzorků. Zaregistrujeme středy všech píků a plochu všech píků.
3. Provedte analýzu spektra. Zaznamenejte dolní a horní meze jednotlivých píků a také středy píků. Odečtěte počty impulsů v jednotlivých pících.
4. Změříme pozadí za 600 s a odečtěte pozadí v oblasti všech píků a také v oblasti celého spektra.
4. Po skončení měření vypněte detekční sestavu.

### Vyhodnocení

U měření všech vzorků uveďte v tabulce počet impulsů pozadí v celém rozsahu spektra ( $N_p$ ) a v oblastech píků ( $N_p^f$ ), celkové počty impulsů zaregistrované v celém rozsahu spektra ( $N_{v+p}$ ), hodnoty korigované na pozadí ( $N_v$ ), počty impulsů v oblastech píků ( $N_{v+p}^f$ ) a hodnoty korigované na pozadí ( $N_v^f$ ). Ze známých hodnot aktivit radionuklidů stanovíme účinnosti měření při použití celého spektra ( $\eta = R_v/A$ ) a při měření v oblasti píků ( $\eta = R_v^f/A$ ), kde veličiny  $R_v$  a  $R_v^f$  jsou četnosti vyjádřené v imp/s.

Veškeré naměřené hodnoty (energie píků) srovnáme s tabelovanými hodnotami odečtenými z programu DECAF, nainstalovaném na počítači v laboratoři.

## ÚLOHA Č. 13 - MĚŘENÍ NÍZKOENERGETICKÉHO ZÁŘENÍ BETA METODOU KAPALNÉ SCINTILACE

### Teoretická část

Funkce scintilačního detektoru je popsána v úloze č. 3. V kapalném scintilačním detektoru není scintilátor v pevném skupenství, nýbrž v roztoku, k němuž se přímo přidává měřený vzorek. Skleněná nebo polyethylenová lahvička s touto směsí se umístí do blízkosti fotonásobiče, který registruje světelné záblesky vyvolané absorpcí  $\beta$  záření ve scintilačním roztoku. Skutečnost, že měřená látka je se scintilátorem v přímém styku, umožňuje se značnou účinností - v optimálním případě asi 90 % pro  $^{14}\text{C}$  a 60 %  $^3\text{H}$  - měřit aktivitu radionuklidů emitujících nízkoenergetické  $\beta$  záření. V tom spočívá hlavní význam kapalné scintilace, která co do měření těchto radionuklidů nemá konkurenci. Moderní měřicí přístroje na kapalnou scintilaci jsou automatizované a umožňují vysokou efektivnost a produktivitu práce. Právě kapalná scintilace způsobila, že se těchto nuklidů začalo v biochemii, biologii a jiných oborech používat v tak širokém měřítku. Stejným způsobem lze kapalnou scintilací měřit i radionuklidy emitující  $\alpha$  záření.

Nejjednodušší sestava pro kapalnou scintilaci je roztok 2,5-difenyloxazolu (PPO) v toluenu. Vzhledem ke značnému nadbytku rozpouštědla oproti scintilátoru není pravděpodobné, že by  $\beta$  částice excitovala přímo molekulu scintilátoru. Nejdříve dochází k excitaci molekul toluenu, který při následných srážkách excitují molekuly PPO přenosem energie. Spektrum světla emitovaného při deexcitaci PPO má maximum při vlnové délce 360 nm, spektrální citlivost běžných fotonásobičů s fotokatodou Sb – Cs je však největší při vlnové délce 400 – 430 nm. Proto by registrace světla emitovaného molekulami PPO nebyla příliš účinná. Z tohoto důvodu obsahuje ještě scintilační roztok též sekundární scintilátor (tzv. posunovač spektra), jímž je nejčastěji 1,4-bis-(5-fenyloxazolyl)benzen (POPOP). V tomto roztoku světlo emitované primárním scintilátorem PPO excituje molekuly POPOP, které při deexcitaci emitují světlo, jehož spektrum má maximum mezi 400 – 420 nm, což se dobře shoduje s oblastí maximální světelné citlivosti fotonásobiče.

Základní problém metody spočívá v rozpustnosti kapalných vzorků v toluenovém scintilačním roztoku a v tzv. zhášení. Dobré scintilátory jsou rozpustné jen v nízkoopolárních rozpouštědlech, v nichž je však většina biologicky zajímavých látek (aminokyseliny, bílkoviny, cukry aj.) nerozpustná. Voda jako rozpouštědlo je nevhodná, protože v ní nejsou rozpustné scintilátory. Problém rozpustnosti se řeší použitím jiných rozpouštědel než toluen nebo směsí rozpouštědel. Vhodný je dioxan, který je dokonale mísitelný s vodnými roztoky vzorků a současně dobře rozpouští nepolární scintilátory. Množství vody, které lze rozpustit v dioxanovém roztoku PPO a POPOP je sice značné, při měření je však omezeno špatným přenosem energie z molekul vody na PPO (molekuly vody ztrácejí energii nezářivými procesy). To vede k tzv. zhášení scintilací, které snižuje účinnost měření. Vliv vody lze částečně kompenzovat přidávkem naftalenu.

### Praktická část úlohy

## 1. Spuštění přístroje a zadání data a času

Přístroj je propojen s počítačem s možností obousměrného přenosu dat. Před začátkem měření spustíme na počítači hyperterminál označený **Rackbeta 1214** (ikona na hlavní ploše). Pak zapneme přístroj (hlavní vypínač na zadní straně přístroje vpravo). Na obrazovce hyperterminálu se po chvíli objeví úvodní hlášení, na jehož konci je uvedeno **READY**, což znamená, že přístroj je připraven k měření.

Nejprve nastavíme aktuální datum a čas. Při zadávání používáme vždy velká písmena. Zadáme **C** a **Enter**, pak napíšeme datum ve tvaru **den\_měsíc** (JAN, FEB, MAR, APR, MAY, JUN, JUL, AUG, SEP, OCT, NOV, DEC)\_rok (čtyřmístné číslo). Potvrdíme **Enterem**. Pak zadáme čas **hod:min.** a **Enter**. Spuštění času potvrdíme **Y + Enter**.

## 2. Měření pozadí pro zhášené standardy a pro scintilační roztok SLD 31 (kazeta 4)

Zadáme **P** a **Enter** pro nastavení parametrů měření. Jako číslo skupiny parametrů zvolíme **4**. Potom zadáváme jednotlivé hodnoty, jak je níže uvedeno a každou z nich potvrdíme **Enterem**. Pokud je již správná hodnota nastavena (vypíše se před šípkou), jen ji potvrdíme **Enterem**.

PARAMETER GROUP ->4	číslo skupiny parametrů
ID: POZADI ->	identifikace vzorků
LINE ->	
01A PROGRAM MODE 1 ->	volba použitého programu
01B COUNT MODE SELECTION	volba měřicího módu
SQP(I) SINGLE LABEL (1)	
SQP(E) SINGLE LABEL (2)	
SQP(E) DUAL LABEL (3) 1 ->	
H-3 (1), I-125 (2)	
C-14 (3), S-35 (4)	
Ca-45 (5), P-32 (6) 3 ->	volba měřeného izotopu
COUNT MODE: FIXED WINDOW: 157- 650	
SQP(I) SINGLE LABEL	
C-14	
02 LISTING Y ->	výpis nastavených parametrů před vlastním měřením
03 TIME 600 ->	doba měření
04 COUNTS 1 100000 ->	max. počet měřených impulzů
07 NUMBER OF WINDOWS 2 ->	počet měřicích oken
08 WINDOW 1 5- 650 ->	nastavení 1. okna (pomocné okno)
09 WINDOW 2 157- 650 ->	nastavení 2. okna (hlavní okno)
14 PRINT 1,2,11,12,21,40 ->	výběr hodnot pro tisk
EXTENDED PARAMETER LIST N ->	výpis dalších parametrů
SAVING PARAMETER GROUP 4	

Po zadání nebo potvrzení všech uvedených hodnot vložíme do přístroje kazetu se vzorky pozadí označenou číslem **4** (číslo na levé straně kazety) a za ni kazetu s označením **Stop**. Měření spustíme zadáním **A4** a **Enter**. Jeden vzorek je scintilátor připravovaný v laboratoři, druhý vzorek je komerčně dodávaný scintilátor (je připraven ze sloučenin bez obsahu  $^3\text{H}$ ,  $^{14}\text{C}$  apod.).

Výsledky měření dostaneme v tabulce nadepsané následujícími zkratkami:

POS	číslo vzorku
CTIME	doba měření v s
CPM1	četnost v imp/min registrovaná v hlavním okně
CPM1%	relativní odchylka měření v hlavním okně
CPM2	četnost v imp/min registrovaná v pomocném okně
CPM2/CPM1	poměr četností v pomocném (užším) a hlavním okně

### 3. Měření nezhášených vzorků (kazeta 6)

Vzorky připravíme pipetováním 15 ml scintilačního roztoku SLD 31 do 5 připravených lahvíček a přidávkem 0,1 ml zásobního roztoku  $^{14}\text{C}$ -močoviny (podle tabulky na straně 7 rozhodněte, zda je zapotřebí se zásobním roztokem pracovat jako s radioaktivním). Dobře uzavřené lahvičky vložíme do kazety označené **6**.

Zadáme **P** a **Enter** pro nastavení parametrů měření, číslo skupiny parametrů **6** a **Enter**. Potom zadáváme jednotlivé hodnoty stejně jako v bodě 2 (kromě řádku 03 TIME – 300s) až po hlášení **EXTENDED PARAMETER LIST N** -> na které odpovíme **Y** a **Enter**. Další hodnoty pouze potvrdíme Enterem, kromě řádků 19A a 19B, kam zadáme naměřené hodnoty pozadí **CPM1** a **CPM2** pro scintilátor SLD 31.

15 OPEN TERMINAL 2 OUTPUT	N ->	
16 CURVE EDIT	N ->	
17 CURVE FIT	SS ->	
17A REPLOT WITH AUTO RUN	N ->	
REPLOT WITH CURVE EDIT	N ->	
18 BACKGROUND SAMPLE	0-0 ->	
19A BACKGROUND SUB. 1	X ->	<b>hodnota CPM1</b>
19B BACKGROUND SUB. 2	X	<b>hodnota CPM2</b>
21 REPEAT	1 ->	počet opakování
22 REPLICATE	1 ->	
23 SAMPLE PREP. ERROR %	.0 ->	chyba v přípravě vzorků

24 LOW COUNT REJECT 1 0 ->  
26 FACTOR 1 1.00000E+0 ->  
28 HALF LIFE 1 .0 -> poločas rozpadu (u krátkodobých RN)  
30 NUMBER OF CYCLES 1 -> počet cyklů  
31 REFERENCE 1 0-0 ->  
SAVING PARAMETER GROUP 5

Kazetu se vzorky označenou **6** vložíme do přístroje a měření spustíme **A6** a **Enter**.

#### 4. Měření zhášených standardů (kazeta 5)

Parametry pro měření nastavíme stejným způsobem jako v bodě 3, pouze číslo skupiny parametrů bude **5** a jako pozadí zadáme hodnoty CPM1, CPM2 získané pro standardy. Měření spustíme pomocí **A5** a **Enter**.

#### 5. Měření zhášených vzorků (kazeta 6)

Do jednotlivých nezhášených vzorků přidáme příslušné zhášecí přísady. Není zapotřebí zadávat znovu parametry měření, ale pouze **A6** a **Enter**.

#### 6. Měření standardu č. 388 (kazeta 7)

Jako kontrolní vzorek změříme komerční standard  $^{14}\text{C}$  (č. 388), jehož aktivita je uvedena na víčku. Parametry pro měření nastavíme stejným způsobem jako v bodě 3, pouze číslo skupiny parametrů bude **7** a jako pozadí zadáme hodnoty CPM1, CPM2 získané pro komerční scintilátor. Měření spustíme pomocí **A7** a **Enter**.

#### 7. Měření spektra $\beta$ záření standardu č. 388 (kazeta 8)

U komerčního standardu změříme rovněž spektrum  $\beta$  záření. Číslo skupiny parametrů bude 8. Není zapotřebí nic zadávat nebo měnit, pouze vložit vzorek do kazety č. 8, do přístroje a spustit měření pomocí **A8**.

### Vyhodnocení

Naměřené hodnoty překopírujeme do textového editoru (označením pomocí myši a kombinací kláves CTRL+C (kopírování) a CTRL+V (vložení)) a vytiskneme nebo uložíme na záznamové zařízení a zpracujeme doma.

### Měření standardů:

Sestavíme tabulku obsahující četnosti standardů v uhlíkovém (CPM1, count per minute = imp min<sup>-1</sup>) a pomocném (CPM2) kanále, jejich poměr CPM2 / CPM1, deklarovanou aktivitu (DPM, imp min<sup>-1</sup>) a účinnost měření  $\eta$  v procentech.

$$\eta = \frac{\text{CPM1}}{\text{DPM}} 100 \quad (50)$$

Graf závislosti účinnosti měření na poměru četnosti kanálů CPM2/CPM1.

### Měření vzorků:

Pro nezhášené i zhášené vzorky tabulka obsahující četnosti v uhlíkovém (CPM1) a pomocném (CPM2) kanále, chybu měření v hlavním kanále CPM 1%, poměr CPM2/CPM1, účinnost měření odečtenou z kalibračního grafu a aktivitu (DPM) vypočtenou z četnosti CPM1 a zjištěné účinnosti.

### Zhodnocení přesnosti měření:

Pro nezhášené vzorky spočteme směrodatnou odchylku průměru.

### Měření standardu č. 388:

Uvedte hodnoty CPM1, CPM2, poměr CPM2/CPM1, odečtenou účinnost měření, vypočtenou aktivitu a relativní odchylku zjištěné aktivity od aktivity deklarované (zhodnocení správnosti měření).



## PŘÍLOHA 1 : PŘEMĚNOVÁ SCHÉMATA VYBRANÝCH RADIONUKLIDŮ

<p><math>^{32}\text{P}(14,3\text{d})</math> 1,71 <math>^{32}\text{S}</math> stab.</p>	<p><math>^{22}\text{Na}</math> (2,6r) 5% 0,542 (95%) 1,28 <math>^{22}\text{Ne}</math> stab.</p>
<p><math>^{60}\text{Co}(5,27\text{ r})</math> 0,306 1,17 1,33 <math>^{60}\text{Ni}</math> stab.</p>	<p><math>^{87}\text{Rb}(6,15 \cdot 10^{10}\text{ r})</math> 0,275 0,394 <math>^{87}\text{Sr}</math> stab.</p>
<p><math>^{99}\text{Tc}(2,12 \cdot 10^5\text{ r})</math> 0,292 <math>^{99}\text{Ru}</math> stab.</p>	<p><math>^{109}\text{Cd}</math> (470d) KZ 0,088 <math>^{109}\text{Ag}</math> stab.</p>
<p><math>^{137}\text{Cs}</math> (33 r) 0,523 (92%) 1,18 (8%) 2,60 min. 0,66 <math>^{137}\text{Ba}</math> stab.</p>	<p><math>^{204}\text{Tl}(3,5\text{r})</math> 2% 0,760 (98%) <math>^{204}\text{Hg}</math> stab. <math>^{204}\text{Pb}</math> stab.</p>