

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta jaderná a fyzikálně inženýrská

DIZERTAČNÁ PRÁCA

Spresňovanie jadrových dát v rámci európskych výskumných projektov EMRP a EMPIR a Českého metrologického institutu

Praha 2021

Mgr. Monika Mazánová

Bibliografický záznam

Autorka	Mgr. Monika Mazánová, České vysoké učení technické v Praze, Fakulta jaderná a fyzikálně inženýrská, Katedra dozimetrie a aplikace ionizujícího záření
Názov práce	Spresňovanie jadrových dát v rámci európskych výskumných projektov EMRP a EMPIR a Českého metrologického institutu
Študijný program	Aplikace přírodních věd
Študijný obor	Jaderné inženýrství – distančná forma
Školiteľ	prof. Ing. Tomáš Čechák CSc., České vysoké učení technické v Praze, Fakulta jaderná a fyzikálně inženýrská, Katedra dozimetrie a aplikace ionizujícího záření
Školiteľ špecialista	RNDr. Pavel Dryák CSc., Český Metrologický Institut
Akademický rok	2021
Počet strán	98
Klíčové slová	Jadrové dáta, zdroje dát, emisia fotónov, doba polpremeny, energia fotónov

Bibliographic Entry

Author	Mgr. Monika Mazánová, Czech Technical University in Prague, Faculty of Nuclear Sciences and Physical Engineering, Department of Dosimetry and Application of Ionizing Radiation
Title of Dissertation	Spresňovanie jadrových dát v rámci európskych výskumných projektov EMRP a EMPIR a Českého metrologického institutu
Degree Programme	Applications of Natural Sciences
Field of Study	Nuclear Engineering
Supervisor	prof. Ing. Tomáš Čechák CSc., Czech Technical University in Prague, Faculty of Nuclear Sciences and Physical engineering, Department of Dosimetry and Application of Ionizing Radiation
Supervisor specialist	RNDr. Pavel Dryák CSc., Czech Metrology Institute
Academic year	2021
Number of Pages	98
Keywords	Nuclear data, sources of nuclear data, photon emission intensity, half-life, photon energy

Prehlasujem, že som predloženú prácu vypracovala samostatne a že som uviedla všetku použitú literatúru.

.....

Mgr. Monika Mazánová

Rada by som poďakovala môjmu školiteľovi profesorovi Tomášovi Čechákovi a môjmu školiteľovi špecialistovi doktorovi Pavlovi Dryákovi za ich trpezlivosť a ústretový prístup, bez ktorých by nebolo možné túto prácu vytvoriť. Poďakovanie patrí i oddeleniu primárnej metrologie veličín ionizujúceho žiarenia na Českom metrologickom institute, ktoré mi poskytlo čas, priestor a vybavenie pre uskutočnenie všetkých potrebných meraní a analýz k tejto práci.

Abstrakt

Cieľom tejto práce bolo rozšíriť a spresniť aktuálne publikované hodnoty jadrových dát. Práca sa zameriava hlavne na spresňovanie hodnôt pravdepodobnosti emisie žiarenia X a γ , doby polpremeny a energie žiarenia. Ako kľúčové rádionuklidy boli vybrané rádionuklidy, ktoré sa spresňovali v rámci európskych výskumných projektov MetroNORM a MRTDosimetry.. Práca sa konkrétne orientuje na meranie a spresňovanie dát u ^{226}Ra , ^{210}Pb , ^{235}U , ^{90}Y , ^{166}Ho , a ^{86}Rb . Získané výsledky boli porovnané v rámci medzinárodných porovnaní a s hodnotami z prístupných databáz a týmto spôsobom sa prispelo k ich spresneniu.

Abstract

The aim of this work was to improve and spread the currently published values. The work focuses mainly on the improvement of probability values of radiation emission X and γ , half-life and energy of radiation. As key radionuclides were selected those which were evaluated within the European research projects MetroNORM and MRTDosimetry. The work is mainly focused on measurement and improvement of ^{226}Ra , ^{210}Pb , ^{235}U , ^{90}Y , ^{166}Ho and ^{86}Rb . The obtained results were compared within international comparisons and also with the values from databases and in this way they contributed to their improvement.

Obsah

1	Úvod.....	15
2	Ciele dizertačnej práce	16
3	Zdroje doporučených jadrových dát.....	18
3.1	DDEP (Decay Data Evaluation Project)	18
3.2	IAEA dáta (International Atomic Energy Agency Data)	18
3.3	ENSDF (Evaluated Nuclear Structure Data File) a NUDAT (Nuclear Database).....	19
3.4	JEFF (Joint Evaluated Fission & Fusion project)	19
3.5	Knižnice UKPADD a UKHEDD	20
4	Ďalšie zdroje dát.....	21
4.1	Užitočné referencie	21
4.2	Zastarané zdroje dát	23
5	Európsky výskumný projekt MetroNORM.....	24
5.1	^{226}Ra	26
5.1.1	Použitá aparatura.....	27
5.1.2	Meranie pravdepodobnosti emisie fotónov gama s energiou 186 keV	27
5.1.3	Stanovenie pravdepodobností emisie fotónov $\text{XK}\alpha(\text{Rn})$ a $\text{XK}\beta(\text{Rn})$ v rádioaktívnej premene ^{226}Ra	30
5.1.4	Medzinárodné porovnanie.....	34
5.2	^{210}Pb	37
5.2.1	Použitá aparatura.....	39
5.2.2	Rádionuklidové zdroje	41
5.2.3	Stanovenie pravdepodobnosti emisie fotónov gama s energiou 46,54 keV	42
5.2.4	Stanovenie pravdepodobnosti emisie fotónov $\text{XL}(\text{Bi})$	44
5.2.5	Medzinárodné porovnanie.....	46
5.3	^{235}U	48
5.3.1	Použitá aparatura.....	49
5.3.2	Rádionuklidové zdroje	50
5.3.3	Stanovenie pravdepodobností emisie vybraných fotónov gama	50
5.3.4	Medzinárodné porovnanie.....	53
6	Európsky výskumný projekt MRTDosimetry	57
6.1	^{90}Y	57
6.1.1	Použitá aparatura a rádionuklidové zdroje	59

6.1.2	Produkcia fotónov o energii 511 keV brzdým žiarením vzniknutým brzdením beta spektra ^{90}Y	62
6.1.3	Vplyv pravých sumácií	63
6.1.4	Stanovenie počtu $Q/2$ fotónov.....	64
6.2	^{166}Ho	65
6.2.1	Použitá aparátúra.....	66
6.2.2	Primárna štandardizácia ^{166}Ho a príprava vzoriek.....	67
6.2.3	Stanovenie pravdepodobnosti emisie fotónov gama s energiou 80 keV.....	67
6.2.4	Stanovenie pravdepodobnosti emisie fotónov XK a gama o energii 1379 keV, 1581 keV a 1662 keV.....	72
6.2.5	Meranie doby polpremeny ^{166}Ho	75
7	Stanovenie jadrových dát v rámci ČMI.....	77
7.1	^{86}Rb	77
7.1.1	Primárna štandardizácia ^{86}Rb a príprava vzoriek	78
7.1.2	Meranie doby polpremeny ^{86}Rb	80
7.1.3	Stanovenie pravdepodobnosti emisie fotónov gama s energiou 1077 keV.....	81
7.1.4	Meranie energie žiarenia gama	82
7.1.5	Výsledky merania - doba polpremeny	82
7.1.6	Výsledky merania – pravdepodobnosť emisie fotónov gama	84
7.1.7	Výsledky merania - energia žiarenia gama	85
7.1.8	Porovnanie výsledkov práce s výsledkami z dostupných zdrojov	86
8	Zhrnutie a záver	89
9	Zoznam literatúry a publikácií	94

1 Úvod

Každý z nás vníma definíciu jadrových dát inak. Komunita v oblasti jadrových reaktorov pozerá na jadrové údaje najmä z hľadiska účinných prierezov. Rádiochemici a spektrometristi sa najčastejšie stretávajú s alfa, beta a gama žiarením a jeho príslušnými energiami a pravdepodobnosťami emisie žiarenia. Rádioterapia potrebuje dozimetrické údaje. Iní používatelia jadrových dát chcú napríklad len jednu veličinu ako doba polpremeny alebo atómová hmotnosť. Obsah tejto práce je zameraný na spresňovanie jadrových dát v niekoľkých oblastiach: pravdepodobnosti emisie žiarenia X a gama, doby polpremeny, energie fotónov a pravdepodobnosti emisie pozitronov.

Zatiaľ čo je väčšina jadrových dát dobre charakterizovaná, stále zostávajú niektoré oblasti, kde namerané dáta nestačia na priradenie spoľahlivej hodnoty (napríklad ^{86}Rb alebo ^{90}Y). Tieto rádionuklidy si vyžadujú nové merania a hodnotenia. Časť tejto práce bola zameraná práve na ich spresnenie. Avšak to neznamená, že u jadrových dát, pre ktoré je k dispozícii viacero meraní, nie je potrebné ich ďalšie spresňovanie (napríklad ^{226}Ra). Presne ohodnotené jadrové dáta sú potrebné v aplikovanom výskume a pre kalibráciu detektorov.

Jadrové dáta sú zostavované a vyhodnocované už viac ako 80 rokov. Prvá publikácia s jadrovými dátami bola zverejnená v Taliansku (FEA, 1935). Neskoršia kompilácia bola publikovaná autormi Livingston a Bethe (LIVINGTON & BETHE, 1937) a v roku 1940 bola vydaná publikácia Table of Induced Radioactivities (SEABORG, 1940). Záujem o informácie v oblasti jadrových dátach rýchlo rástol a v nasledujúcich rokoch bolo vytvorených mnoho organizácií pre analýzu a šírenie týchto informácií. V dnešnej dobe sú informácie o jadrových dátach ľahko prístupné z mnohých on-line zdrojov.

Jadrové dáta boli mnoho rokov spracovávané a šírené organizáciou International Network of Nuclear Structure and Decay Data (NSDD) pod záštitou International Nuclear Data Committee (INDC) patriacej k International Atomic Energy Agency (IAEA).

2 Ciele dizertačnej práce

Hlavným cieľom dizertačnej práce je rozšíriť aktuálne dostupné jadrové dáta rádionuklidov a tým sa podieľať na ich spresňovaní. Pre tento účel boli vybrané niektoré rádionuklidy, ktorých dáta sa spresňovali v rámci európskych výskumných projektov MetroNORM a MRTDosimetry. Do tejto práce boli zahrnuté taktiež i ďalšie rádionuklidy, ktoré vybral Český metrologický inštitút na základe ich významnosti pre vedu a výskum a množstva dostupných experimentálnych dát.

Jednotlivé úlohy dizertačnej práce vedúce k hlavnému cieľu sú nasledovné:

- Zhrnúť a porovnať zastarané a nové zdroje jadrových dát
- Zmerať pravdepodobnosť emisie žiarenia gama s energiou 186 keV v rádioaktívnej premene ^{226}Ra
- Stanoviť pravdepodobnosti emisie fotónov $\text{XK}\alpha(\text{Rn})$ a $\text{XK}\beta(\text{Rn})$ v rádioaktívnej premene ^{226}Ra
- Stanoviť pravdepodobnosť emisie fotónov gama s energiou 46,54 keV v rádioaktívnej premene ^{210}Pb
- Stanoviť pravdepodobnosti emisie fotónov $\text{XL}(\text{Bi})$ v rádioaktívnej premene ^{210}Pb
- Stanoviť pravdepodobnosti emisie vybraných fotónov gama v rádioaktívnej premene ^{235}U
- Stanoviť pravdepodobnosť emisie pozitronov v rádioaktívnej premene ^{90}Y
- Stanoviť pravdepodobnosti emisie fotónov XK a gama o energii 1379 keV, 1581 keV a 1662 keV v premene ^{166}Ho
- Zmerať dobu polpremeny ^{166}Ho
- Zmerať dobu polpremeny ^{86}Rb
- Stanoviť pravdepodobnosť emisie žiarenia gama s energiou 1077 keV v rádioaktívnej premene ^{86}Rb
- Zmerať energiu žiarenia gama v rádioaktívnej premene ^{86}Rb
- Porovnať dosiahnuté výsledky s dátami z dostupných zdrojov a s výsledkami získanými v rámci medzinárodných porovnaní

- Vypočítať účinnosti za pomoci MCNP v prípadoch, kde účinnosť kalibrácia pre daný typ detektora, geometriu merania a vzorku nebola v minulosti spočítaná

3 Zdroje doporučených jadrových dát

Nižšie sú uvedené zdroje údajov o jadrových dátach vo forme publikácii alebo internetových zdrojov. Tieto zdroje dát boli vybrané na základe technickej kvality, sledovateľnosti, citácií v odbornej literatúre a podľa miery ich medzinárodného uznania.

3.1 DDEP (Decay Data Evaluation Project)

V roku 1995 (www.nucleide.org, 1995) bola zahájená medzinárodná spolupráca, na základe ktorej vznikol projekt „**Decay Data Evaluation Project**“. V projekte sú zahrnutí partneri z Francúzska (Laboratoire Nationale Henri Becquerel, BNM-CEA/LNHB), Nemecka (Physikalisch-Technische Bundesanstalt, PTB), USA (Idaho National Laboratory, INEEL; Lawrence Berkeley National Laboratory, LBNL), Ruska (Khlopin Radium Institute, KRI), Španielska (Centro de Investigaciones Energéticas Medioambientales y Tecnológicas, CIEMAT) a Anglicka (National Physical Laboratory, NPL) s cieľom poskytnúť dôkladne ohodnotené a odporúčané dáta. Aktualizácie odporúčaných dát sa realizujú prostredníctvom LNHB.

Laboratória postupne pracujú na jednotlivých rádionuklidoch podľa potrieb užívateľov. Doposiaľ bolo vyhodnotených najmenej 221 rádionuklidov. Dáta z DDEP všeobecne predstavujú najlepšie dostupné údaje o rádionuklidoch.

Prehľad dát je dostupný na internetovej stránke *nucleide.org* alebo je po určitom čase publikovaný organizáciou Bureau International de Poids et Mesures ako **BIPM Monographie 5** [(Bé, a iní, 2013)]. Zámerom publikácie je podporovať širšie využitie dát a poskytovať formát, na ktorý sa možno ľahko odkázať. Tieto dáta sú pravidelne aktualizované publikáciou dodatočných vydaní.

3.2 IAEA dáta (International Atomic Energy Agency Data)

IAEA TECDOC-619 (IAEA, 1991) je výsledkom výskumného programu IAEA s cieľom poskytnúť medzinárodne uznávaný súbor jadrových dát pre použitie v oblasti spektrometrie žiarenia gama. Tento program prebiehal od roku 1986 do roku 1990.

IAEA TECHREP-261 (IAEA, 1986) bol výsledok ďalšieho výskumu IAEA. Jedná sa o program s cieľom zlepšiť kvalitu a presnosť jadrových dát ťažkých prvkov a aktinoidov. Tento program prebiehal od roku 1978 do roku 1985.

V oboch prípadoch bolo mnoho údajov prevzatých z práce na DDEP. Ďalší výskum s názvom **Coordinated Research Programme (CRP)**, ktorý mal nahradiť TECDOC-619 a TECHREP-261, je neustále vo vývoji. Hodnotiace postupy sú prevzaté z DDEP a dáta sú uverejnené ako v DDEP tak i v CRP. Používatelia, ktorí majú záujem o aktinoidové dáta majú preto odporúčenie prevziať ich priamo z DDEP.

3.3 ENSDF (Evaluated Nuclear Structure Data File) a NUDAT (Nuclear Database)

Databázu **ENSDF** udržiava a spravuje National Nuclear Data Center v Brookhaven National Laboratory. Táto databáza obsahuje vyhodnotenú štruktúru jadier a jadrové dáta v štandardnom formáte. K databáze prispieva Medzinárodná sieť hodnotiteľov, avšak značná časť práce sa vykonáva v USA. Väčšina z nedávno dokončených hodnotení je zverejnená v **Nuclear Data Sheets**.

Dátové súbory ENSDF možno stiahnuť z amerického National Nuclear Data Centre at Brookhaven (www.nndc.bnl.gov, 2017). Údaje obsiahnuté v ENSDF sú presné a majú veľkú sledovateľnosť. V prípadoch kde neboli rádionuklidy ohodnotené prostredníctvom ďalších odporúčaných dátových zdrojov sa odporúča použitie práve jadrových dát z ENSDF.

Tvorcovia ENSDF upozorňujú, že dátové súbory sú zamerané na údaje o jadrovej štruktúre. To má za následok veľký zdroj dát, z ktorých len malá časť je vhodná pre typickú rádiochemickú analýzu alebo spektrometriu. Pre aplikovaných užívateľov je užitočná databáza **NUDAT** (www.nndc.bnl.gov, 2017), ktorá je výťažkom z ENSDF. NUDAT obsahuje vybrané rádionuklidy a prezentuje dáta v omnoho prístupnejšej podobe než ENSDF.

3.4 JEFF (Joint Evaluated Fission & Fusion project)

JEFF projekt je výsledkom spolupráce medzi krajinami, ktoré sú partnermi v NEA (Nuclear Energy Agency) Data Bank. Knižnica JEFF zahrňuje mnoho jadrových dát, a to predovšetkým pre aplikáciu v oblasti štiepenia a fúzie. Obsahuje rôzne dáta

o neutrónovej a protónovej interakcii, dáta rádioaktívnej premeny, dáta interakcie fotónov s atómami a mnohé iné.

Databáza **JEFF-3.2** (www.oecd-nea.org, 2014) je posledným dátovým súborom publikovaným projektom JEFF. Databáza JEFF obsahuje údaje o minimálne 472 nuklidoch. Významná časť jadrových dát v tomto projekte pochádza z DDEP. Databáza JEFF neobsahuje unikátne vyhodnotenie jadrových dát. Jadrové dáta tvoria len malú časť knižnice JEFF a sú aktualizované len zriedka, s rozpätím niekoľkých rokov medzi zverejnením. Preto je vhodnejšie pre aplikovaný výskum a kalibráciu detektorov používať databázu DDEP. Avšak databáza JEFF má taktiež svoje veľké využitie a to napríklad pri modelovaní reaktorov.

3.5 Knižnice UKPADD a UKHEDD

Anglická knižnica **Activation Product Decay Data library (UKPADD)** obsahuje jadrové dáta pre viac ako 595 aktivačných produktov (vrátane niektorých produktov fúzie).

Anglická knižnica **Heavy Element Decay Data library (UKHEDD)** obsahuje odporúčané jadrové dáta pre minimálne 125 aktinoidov, ktoré predstavujú reaktorové palivo a sú tvorené pomocou širokého spektra neutrónových reakcií vrátane ich prirodzenej rádioaktívnej premeny.

4 Ďalšie zdroje dát

4.1 Užitočné referencie

Nižšie sú uvedené užitočné referencie na publikácie týkajúce sa údajov o rádioaktívnej premene. Publikácii zaoberajúcimi sa jadrovými dátami je veľké množstvo, a preto ich nebolo možné všetky zahrnúť do tejto práce. Tieto referencie sa neodporúčajú ako zdroje dát pre presné merania. Pre presnejšie merania sa odporúčajú knižnice v sekcii 3.

Mini table de radionucléides (LNHB, 2015) je praktická tabuľka, ktorá je určená ako každodenný nástroj pre všetkých pracovníkov s rádionuklidmi. Vzťahuje sa na všetky vedecké a technické odbory, ako je napríklad zdravotníctvo, výskum a priemysel. Mini table de radionucléides bola navrhnutá ako nástroj umožňujúci rýchlu identifikáciu a overovanie hlavných vlastností najbežnejšie používaných rádionuklidov (okolo 300), s ktorými sa títo ľudia stretávajú v lekárskom prostredí, priemysle, jadrovej energetike, nakladaní s odpadmi, atď. V podobe vreckového sprievodcu sú uvedené základné charakteristiky pre každý rádionuklid: doba polpremeny; hlavný spôsob premeny, pravdepodobnosť emisie žiarenia a energie žiarenia.

Dokument **NUBASE** (AUDI, a iní, 2012) obsahuje experimentálne získané jadrové dáta pre 3379 nuklidov: doby polpremeny, spiny, parity, typy premeny, pravdepodobnosti emisie žiarenia a iné.

Table de Radionucléides (LEGRAND at al., 1982; LAGOUTINE at al., 1987; BÉ at al., 1999; BÉ at al., 2011) je viacdielna kniha, ktorú vydalo LNHB (bývalé LMRI) medzi rokmi 1982 a 2011. Táto práca bola predchodcom DDEP.

Karlsruhe Chart of Nuclides (MAGIL at al., 2006) je zdroj dát, ktorý publikoval Institute for Transuranium Elements (ITU) v Karlsruhe, Nemecko, s podporou Európskej komisie. Je dôležité poznamenať, že obsahuje niektoré významné nezrovnalosti medzi údajmi v tejto publikácii a odporúčanými zdrojmi dát v sekcii 3.

Table of Isotopes je rada publikácií zahŕňajúca jadrové dáta prevzatá z časopisov Nuclear Physics and Nuclear Data Sheets. Najnovšie ôsme vydanie bolo uverejnené na trh v roku 1999 (FIRESTONE at al., 1999). Táto 3000 stranová kniha obsahuje

komplexnú jadrovú štruktúru a informácie o rádioaktívnej premene pre takmer všetky známe izotopy, ktoré z nej robia obzvlášť užitočnú knihu. Kniha je dodávaná s CD diskom, ktorý obsahuje Acrobat PDF verziu pre jednoduchšie vyhľadávanie. K dispozícii je mnoho chemických, fyzikálnych a atómových vlastností ako aj informácie o štandardných zdrojoch žiarenia a interakcii žiarenia s látkou.

Kniha **Table of Radioactive Isotopes** (BROWNE at al., 1986) bola navrhnutá pre aplikovaných užívateľov jadrových dát. Obsahuje súhrnné informácie o špecifických aktivitách, produkčných módoch, žiarení X a premenách alfa, beta a gama. Veľkou výhodou tejto knihy je, že v jednom diele je k dispozícii mnoho energií žiarenia a pravdepodobností emisie žiarenia rôznych rádionuklidov.

16. vydanie **Tables of Physical and Chemical Constants** (KAYE & LABY, 1995) je k dispozícii v tlačenej podobe ako aj v elektronickej podobe na webových stránkach NPL (www.npl.co.uk, 2018). On-line verzia obsahuje tabuľky s dátami, vzorce a grafy. Tento zdroj informácií pokrýva oblasť od základných konštánt až po dáta potrebné v spektroskopii a v mnohých ďalších oblastiach.

Brookhaven National Laboratories vydali **Nuclear Wallet Cards** (TULI, 2005) a **Nuclear Wallet Cards for Radioactive Nuclides** (TULI, 2004). Sú to užitočný vreckový sprievodcovia jadrovými dátami. Údaje v nich obsiahnuté sú získavané z databázy ENSDF. Na účely citácie sa odporúča odkázať sa na materské databázy NUDAT alebo ENSDF.

Radiochemical Manual (LONGWORTH at al., 1998), vydaný v roku 1998, nahradil publikáciu s rovnakým menom z roku 1966. Materiál ponúka informácie o priebehu meraní, analýzy, výroby a informácie o bezpečnom použití rádionuklidov. Toto vydanie obsahuje kapitolu i o jadrových dátach. Má sa za to, že tieto údaje v kapitole 8 boli vo väčšine prípadov nahradené dátami z DDEP. Preto sa odporúča, aby sa užívatelia jadrových dát z publikácie odkázali na DDEP.

Na stránkach Idaho National Laboratory v sekcii Gamma-ray Spectrometry Center sa nachádzajú dokumenty vo formáte PDF, **Gamma Ray Spectrum Catalogues** (www.4vip.inl.gov, 2018), s názvom **Gamma Ray Spectrum Catalogue, Ge and Si Detector Spectra** vydané v roku 1999 a **Gamma Ray Spectrum Catalogue, NaI Detector Spectra** vydané v roku 1997. Toto centrum poskytuje špecifické údaje pre

gama spektrometriu využiteľné pre meranie ionizujúceho žiarenia v mnohých oboroch. Vydania zahŕňajú údaje o žiarení gama, schémy premeny a iné.

4.2 Zastarané zdroje dát

V tejto časti sú uvedené niektoré dátové zdroje, ktoré boli nahradené novším vydaním.

JEFF-3.0 (NEA, 2005) a **JEF-2.2** (NEA, 1994) sú historické verzie databázy JEFF. Jadrové dáta sú rovnaké pre obe verzie a boli abstrahované z iných zdrojov dát, predovšetkým pri tvorbe JEF-2.2. Používatelia, ktorí si želajú naďalej používať databázu JEFF by sa mali odkazovať na verziu 3.2 z roku 2014.

Lund/LBNL Nuclear Data Search server (CHU at al., 1999) získal obľúbenosť kvôli užívateľsky prívetivému rozhraniu a zariadeniu na vyhľadávanie. Avšak v roku 1999 sa server prestal udržiavať a okrem toho niektoré z údajov môžu byť zavádzajúce, pretože sa k nim neuvádzajú neistoty.

ICRP Publication 38 (SYNDER at al., 1983) obsahuje jadrové údaje o premene rádionuklidov s dobami polpremeny dlhšími ako desať minút. Tabuľky boli navrhnuté tak, aby uľahčili používanie knihy pre výpočty dozimetrických veličín a pre identifikáciu a stanovenie rádionuklidov v experimentálnych štúdiách a pri monitorovaní. Jedná sa o starú publikáciu a jej užívateľom sa odporúča použitie napríklad databázy DDEP.

Protokol NPL **CAIRO 8** (WOODS at al., 2004) bol publikovaný v roku 2004 ako súčasť projektu IAEA a mal nahradiť TECDOC-619. Vzhľadom k tomu, že údaje z IAEA sú aktuálne k dispozícii, tak by sa užívatelia mali odkazovať priamo na dáta z IAEA.

IAEA TECDOC-619 and **IAEA Technical Report Series 261** boli rozšírené a nahradené ďalšími publikáciami IAEA v rámci výskumu Coordinated Research Programme (CRP).

5 Európsky výskumný projekt MetroNORM

„European Association of National Metrology Institutes“ (EURAMET) a Európska komisia každoročne vyhlasovali a podporovali „European Metrology Research Programme“ (EMRP). EMRP bol dlhodobý program s vysokou kvalitou výskumu a vývoja v rámci metrologickej komunity v Európe.

Jedným z podporovaných projektov je projekt Metrology for Processing Materials with High Natural Radioactivity (MetroNORM) (www.metronorm-emrp.eu, 2013). Projekt je zameraný na vývoj a aplikáciu nových meracích technológií v NORM (Naturally Occurring Radioactive Materials) priemysle a na spresnenie meraní prírodných rádionuklidov. Do tohto projektu sa zapojil i náš Český metrologický inštitút.

Prirodzene sa vyskytujúce rádionuklidy sú prítomné v mnohých prírodných zdrojoch. Priemyselné činnosti, ktoré využívajú tieto zdroje, môžu prispievať k vyššej expozícii. Priemyselné odvetvia pracujúce s prirodzene vyskytujúcimi sa materiálmi produkujú veľké množstvo odpadu. Tieto odpady predstavujú obrovskú ekonomickú a ekologickú záťaž v prípade, ak nie sú správne zlikvidované alebo recyklované.

Recyklačný priemysel sa v súčasnosti zameriava na meranie ionizujúceho žiarenia pochádzajúceho z umelých rádionuklidov. Prirodzené rádionuklidy sú často brané ako súčasť prirodzeného pozadia bez ohľadu na ich koncentráciu. Spoľahlivé meranie prítomnosti prírodných rádionuklidov má zabezpečiť, aby suroviny vstupujúce do výrobného procesu nevytvárali zvýšenú úroveň aktivity v konečných produktoch a odpadoch.

Je nevyhnutné stanoviť prítomné rádionuklidy v odpadoch a ich koncentrácie tak presne, ako je to možné pomocou štandardizovaných metód. Za týmto účelom je potrebné vytvoriť dokonalejšie laboratória a meracie systémy pre on-site detekciu. Tieto zariadenia musia byť kalibrované a overené. Aby sa zabezpečilo správne a presné meranie je nevyhnutné vytvoriť kalibračné štandardy a referenčné materiály, ktoré sú prispôbené skutočnému zloženiu a geometrii meraných materiálov a taktiež je dôležité spresniť jadrové dáta pre vybrané prírodné rádionuklidy. Od výsledkov projektu sa očakáva významné zlepšenie v oblasti spracovania NORM zdrojov a odpadov v rôznych priemyselných odvetviach. Toto boli dôvody, prečo Český Metrologický inštitút (ČMI) spolupracoval v európskom medzinárodnom výskumnom

projekte MetroNORM. V rámci projektu som bola vedúcou pracovnej skupiny (WP: Reference Materials and Sources), na ktorej práci sa podieľali odborníci z inštitúcií BEV/PTP (Physikalisch-Technischer Pruefdienst des Bundesamt fuer Eich- und Vermessungswesen, Rakúsko), CEA (Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives, Francúzsko), CIEMAT (Centro de Investigaciones Energéticas, Medioambientales y Tecnológicas, Španielsko), CMI (Český Metrologický Institut, Česká republika), ENEA (Agenzia nazionale per le nuove tecnologie, l'energia e lo sviluppo economico sostenibile, Taliansko), IJS (Institute Jožef Stefan, Slovínsko), IST (Instituto Superior Técnico, Portugalsko), JRC (JRC - Joint Research Centre - European Commission, Európska komisia), MKEH (Magyar Kereskedelm i Engedélyezési Hivatal, Maďarkos), NPL (National Physical Laboratory, Anglicko), NRPA (Norwegian Radiation Protection Authority, Norvey), STUK (Säteilyturvakeskus, Finland), BOKU (Universität für Bodenkultur, Rakúsko) a SURO (Státní ústav radiační ochrany, Česká republika).

Pre dôkladnú analýzu NORM materiálov je dôležité zistiť nie len prítomnosť jednotlivých rádionuklidov ale aj ich presné zastúpenie, ktoré sa nezaobíde bez znalosti jadrových dát. Jednou z úloh projektu MetroNORM bolo zlepšiť kvalitu dostupných dát pre dôležité γ - a X- pravdepodobnosti emisie žiarenia rádionuklidov v radoch premeny ^{238}U , ^{232}Th a ^{235}U ako napríklad ^{226}Ra , ^{210}Pb , ^{235}U a ^{228}Ac . V projekte spolupracovalo 14 národných inštitútov. Skupina dosiahla výsledky, ktoré boli publikované v odborných recenzovaných časopisoch a týchto diel som spoluautorkou (MARINGER at al., 2017; MAROULI at al., 2018; MARINGER at al., 2017).

V rámci projektu sa vybrali hlavné rádionuklidy, ktoré sú dôležité pre laboratória alebo on-site zariadenia analyzujúce NORM materiály. Pre tento účel bol v spolupráci s JRC vytvorený dotazník, ktorý bol následne zaslaný do zariadení a laboratórií, ktoré merajú NORM materiál v rámci celej Európy. Z výsledkov dotazníku je zrejmé (tabuľka 1), že štyri vyššie spomenuté rádionuklidy boli vhodne zvolené.

Tabuľka 1 Zoznam dôležitých prírodných rádionuklidov pre laboratórne a on-site merania NORM materiálov

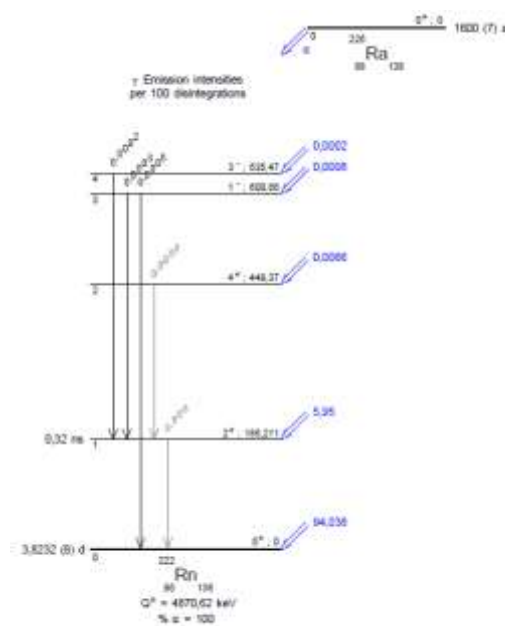
Rádionuklid	Počet zariadení merajúcich NORM
U- rada (^{235}U , ^{226}Ra)	10

^{210}Pb	3
^{222}Rn	3
Th- rada (^{228}Ac , ^{228}Th)	8
^{40}K	3

Výsledky pravdepodobností emisie X- a γ - žiarenia ^{226}Ra a ^{210}Pb získané na ČMI v rámci tejto práce a projektu MetroNORM som prezentovala na konferencii ICRM 2017, ktorá sa uskutočnila v National Atomic Energy Commission (CNEA) v Argentíne, Buenos Aires od 15. do 18. mája 2017, vrátane publikácie “ Emission probability measurement of γ - and X- rays in Ra-226 and Pb-210 Decay” v impaktovanom časopise Applied Radiation and Isotopes (MAZÁNOVÁ, 2017). Výsledky projektu MetroNORM som taktiež prezentovala na ďalších medzinárodných konferenciách (DRO 2014, EU-NORM 2014, ICHLNRRRA 2014, 2nd International Scientific Conference "Reference Materials in Measurement and Technology" 2015, BERM 14 2015, DRO 2015), MetroNORM mítingoch a workshopoch vo Viedni, Lisabone, Madride, Budapešti, Prahe, Bruseli a Ľubľane.

5.1 ^{226}Ra

^{226}Ra sa premieňa do excitovaných stavov alebo do základného stavu ^{222}Rn . Najčastejšie sa premieňa emisiou žiarenia alfa do stavu o energii 186,211 keV a následne do základného stavu ^{222}Rn (obrázok 1) (www.nucleide.org, 1995).



Obrázok 1 Schéma premeny ^{226}Ra

5.1.1 Použitá aparatura

Pre merania boli použité dva spektrometrické systémy Canberra, ktoré sa bežne používajú na ČMI. Prvý systém pozostával z HPGe detektora s označením GCX (Canberra, rozlíšenie 1,8 keV pre 1332 keV, relatívna účinnosť 41%), predzosilňovača 2002CSL a jednotky MCA LYNX. Popis jednotky a jej vlastnosti sú uvedené už v skôr publikovanom článku (MAZÁNOVÁ at al., 2014). Druhý systém pozostával z HPGe detektora označeného GC4018 (Canberra, rozlíšenie 1,8 keV pre 1332 keV, relatívna účinnosť 40%), predzosilňovača 2002CSL a jednotky MCA LYNX. Korekcia mŕtvej doby a pile-up efektu bola uskutočnená elektronicky a vo všetkých meraniach bola menšia ako 0,5%.

Účinnosť detekcie fotónov pre oba systémy bola počítaná už v minulosti metódou MCNP a experimentálne validovaná pre bodové zdroje typu EFS. Štandardy EFS sú bodové zdroje s minimálnou samoabsorpciou emitujúce homogénne do uhla takmer 4π sr. Aktivita je umiestnená medzi dvoma zlepenými polyetylénovými fóliami o hrúbke menej ako 0,2 mm. Fólie sú upevnené v kovovom okrúhlom rámečku s vonkajším priemerom 35 mm. Metóda je validovaná porovnaním výpočtu a experimentu pre vzdialenosť 26 cm (GCX) a 25 cm (GC4018) (DRYÁK & KOVÁŘ, 2006). K tomu bol použitý set etalónov EFS zahrňujúci ^{241}Am , ^{109}Cd , ^{57}Co , ^{177}Lu , ^{203}Hg a ďalšie rádionuklidy.

Pre zdroj v ampulke bola v rámci práce vypočítaná nová účinnosťná krivka za pomoci MCNP. Plocha píku bola vyhodnotená programom GENIE, ktorý stanovuje plochu izolovaných píkov sumačnou metódou. Multiplety boli prekladané gausovskou krivkou a lineárnym pozadím.

5.1.2 Meranie pravdepodobnosti emisie fotónov gama s energiou 186 keV

Jedno stanovenie pravdepodobnosti emisie žiarenia bolo uskutočnené so zdrojom, ktorý bol pripravený z roztoku dodaného laboratóriom NPL v ampulke s objemom 5 ml a o hmotnostnej aktivite $115,6(4,4) \text{ kBq}\cdot\text{g}^{-1}$ k 1.8. 2015. Roztok bol dodaný do ČMI v rámci projektu MetroNORM pre účely WP4 „Improvement of NORM related decay data“. Konštrukcia zdroja je identická so zdrojmi typu EFS vyrábanými v oddelení

výroby štandardných radionuklidových zdrojov na ČMI. Na polyetylénovú podložku o hrúbke 0,19 mm sa nakvapkalo 0,0679(1) g roztoku. Aktivita odparku bola 7,85(31) kBq. Odparok bol prekrytý identickou fóliou a tepelne zvarovaný. Fólia bola následne zafixovaná do duralového kruhového rámčeka o priemere 35 mm.

Meranie vytvorenej **EFS vzorky** bolo uskutočnené v axiálnej geometrii štandardne používanej v ČMI na HPGe detektore s označením GCX. Vzďialenosť vzorky od veka detektora bola 26 cm. Spektrum bolo naberané po dobu 13,7 dní. V priebehu merania bolo zaznamenaných niekoľko kontrolných spektier u ktorých nebola pozorovaná žiadna anomália. Príspevok píku 186,211 keV od pozadia činil 2,7%.

Výsledná hodnota pravdepodobnosti emisie fotónov o energii 186,211 keV získaná pri použití roztoku z **NPL** je **0,0356(14)** fotónu na premenu ^{226}Ra . Rozbor príslušných neistôt je uvedený v tabuľke 2. Kombinovaná štandardná neistota u_c (vzťah 1) zohľadňuje príspevky od všetkých dôležitých zdrojov neistoty kombináciou príslušných zložiek neistoty, takzvaných parciálnych neistôt u_i .

$$u_i = \sqrt{u_1^2 + u_2^2 + \dots + u_i^2} \quad \text{Vzťah 1}$$

Tabuľka 2 Rozbor neistôt stanovenia pravdepodobnosti emisie fotónov v premene ^{226}Ra pomocou EFS

Parciálna neistota	%
Aktivita	3,8
Plocha píku	0,28
Pozadie	0,3
Čas merania	0,001
$\tau_{1/2}$	0,0001
Účinnosť detekcie	0,8
Váženie	0,01
Kombinovaná štandardná neistota	3,85

Ďalšie stanovenie pravdepodobnosti emisie žiarenia bolo uskutočnené s ampulkou s vodným roztokom. Použitá ampulka S/N EB 6 221-23 obsahuje 1 ml roztoku ^{226}Ra a bola pripravená v ČMI v roku 1990. Informácie o roztoku sú v tabuľke 3.

Tabuľka 3 Parametre použitého roztoku

Referenčný dátum	1. 6. 1990
Chemické zloženie roztoku	10g HCl + 1g BaCl ₂ ·l ⁻¹
Koncentrácia ²²⁶ Ra	0,9237 μg·g ⁻¹
Hmotnosť roztoku	1,3331 g
Merná hmotnosť roztoku	1,004 g·ml ⁻¹
Hmotnosť ²²⁶ Ra	1,2314 μg

Ampulka bola meraná na oboch HPGe detektoroch s označeniami **GCX a GC4018** v geometrii štandardne používanej na ČMI (GCX 26 cm, GC4018 25 cm od okna detektora). Rozmery ampulky a zloženie skla ampulky boli stanovené pre účely výpočtu účinností s dostatočnou presnosťou. Pre výpočet pravdepodobnosti emisie žiarenia bolo nutné vypočítať účinnosť detekcie pre ampulku s využitím metódy MCNP. Dĺžka merania na GCX detektore bola 19 hodín a na GC4018 63 hodín. Príspevky píku s energiou 186,211 keV z pozadia činili 0,7% pri meraní na GCX a 0,3% pri meraní na GC4018. Výsledná hodnota pravdepodobnosti emisie fotónov gama s energiou 186,211 keV na premenu ²²⁶Ra s použitím roztoku z ČMI je **0,03545(34)** pri meraní na detektore **GCX** a **0,03566(33)** pri meraní na **GC4018**. Príslušné parciálne neistoty sú uvedené v tabuľke 4. Výsledná hodnota pravdepodobnosti emisie žiarenia bola určená ako vážený priemer (vzťahy 2 a 3) z posledných dvoch meraní roztoku ČMI a má hodnotu **0,03555(23)**.

$$\bar{Y} = \left(\sum_{i=1}^N w_i \cdot y_i \right) / \left(\sum_{i=1}^N w_i \right) \quad w_i = \frac{1}{s_i} \quad \text{Vzťah 2}$$

$$s(\bar{Y}) = \left(\sum_{i=1}^N w_i \cdot (y_i - \bar{Y})^2 \right) / \left((n - 1) \sum_{i=1}^N w_i \right) \quad \text{Vzťah 3}$$

Tabuľka 4 Rozbor neistôt stanovenia pravdepodobnosti emisie fotónov gama s energiou 186,211 keV v rádioaktívnej premene ²²⁶Ra za pomoci ampulky

Parciálna neistota	GCX %	GC4018 %
Plocha píku	0,24	0,15
Pozadie	0,1	0,1
Čas merania	0,001	0,001

$\tau_{1/2}$	0,05	0,05
Účinnosť detekcie	0,8	0,8
Hmotnosť Ra / aktivita	0,5	0,5
Kombinovaná štandardná neistota	0,96	0,93

Výsledky všetkých **troch metód** stanovenia pravdepodobnosti emisie žiarenia sú uvedené v tabuľke 5.

Tabuľka 5 Výsledky stanovenia pravdepodobnosti emisie fotónov gama s energiou 186.211 keV v rádioaktívnej premene ^{226}Ra

Metóda:	GCX/EFS	GCX/ampula	GC4018/ampula	Vážený priemer
Pravdepodobnosť emisie žiarenia	0,03555	0,03545	0,03566	0,03555
Kombinovaná štandardná neistota, %	3,85	0,96	0,93	0,65

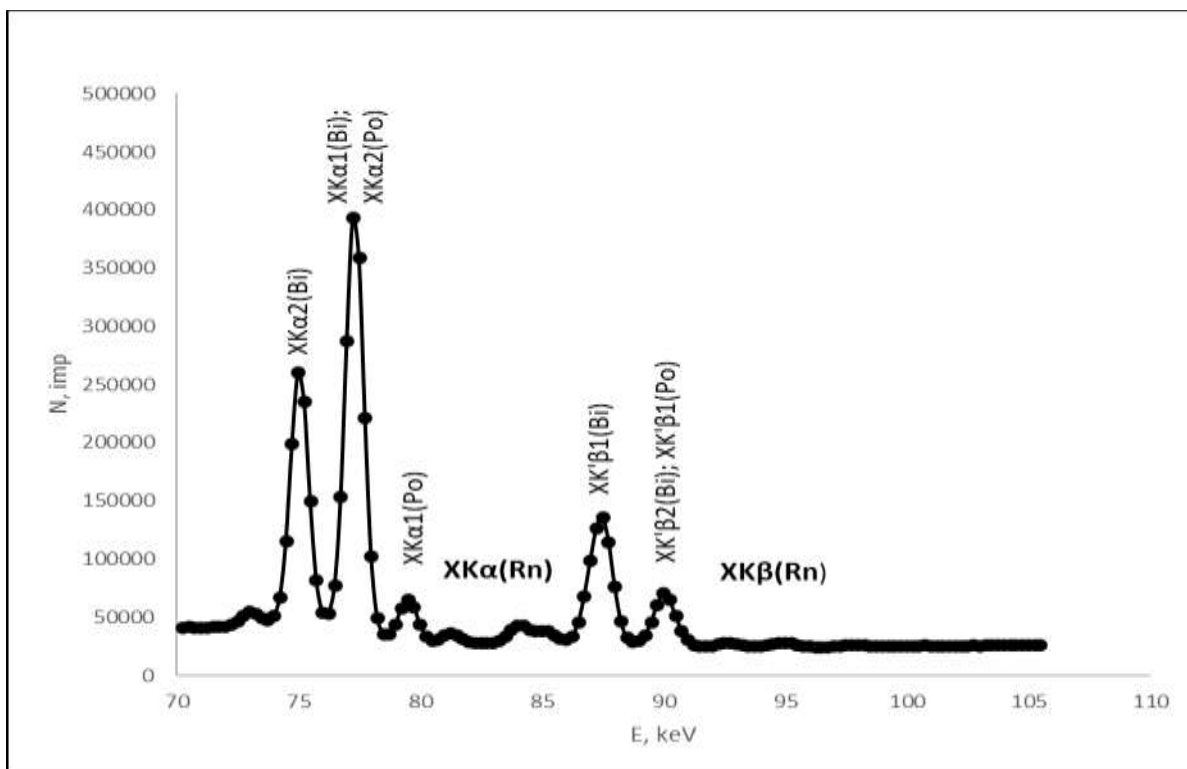
5.1.3 Stanovenie pravdepodobností emisie fotónov $\text{XK}\alpha(\text{Rn})$ a $\text{XK}\beta(\text{Rn})$ v rádioaktívnej premene ^{226}Ra

V nasledujúcej tabuľke 6 sú uvedené jadrové dáta o rádioaktívnej premene ^{226}Ra pochádzajúce z databázy DDEP (www.nucleide.org, 1995).

Tabuľka 6 Pravdepodobnosti emisie fotónov X a gama z rádioaktívnej premeny ^{226}Ra

Typ žiarenia	E, keV	Pravdepodobnosti emisie žiarenia, DDEP
Gama	186,211	0,03555(19)
$\text{XK}\alpha_2(\text{Rn})$	81,07	0,00192(4)
$\text{XK}\alpha_1(\text{Rn})$	83,78	0,00317(6)
$\text{XK}\beta_3(\text{Rn})$	94,25	
$\text{XK}\beta_1(\text{Rn})$	94,87	0,001098(25)
$\text{XK}\beta_5(\text{Rn})$	95,45	
$\text{XK}\beta_2(\text{Rn})$	97,48	
$\text{XK}\beta_4(\text{Rn})$	97,85	0,000351(10)
$\text{XK}\text{O}_{2,3}(\text{Rn})$	98,36	

^{226}Ra je v rovnováhe s dcérskymi produktmi ^{214}Pb a ^{214}Bi . Spektrá zdrojov ^{226}Ra v rovnováhe s dcérskymi produktmi nie je možné použiť pre stanovanie XK(Rn), pretože v energetickej oblasti spektra 70 až 100 keV (ako príklad je uvedené spektrum namerané pre ampulku EB6 221-23 na obrázku 2) sú dominantné píky XK(Bi) a XK(Po) o energiách 74,82 keV, 77,10 keV, 79,29 keV, 87,35 keV a 90,08 keV.



Obrázok 2 Spektrum ^{226}Ra v rovnováhe s dcérskymi produktmi

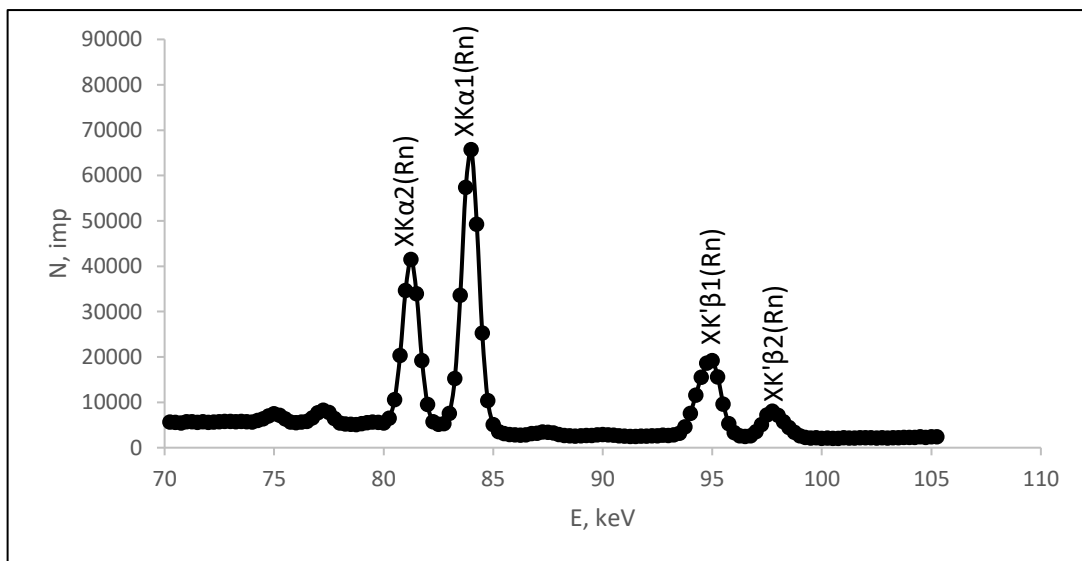
Dominantné píky v spektre sú uvedené v tabuľke 7.

Tabuľka 7 Dominantné píky v spektre ^{226}Ra v rovnováhe s produktmi premeny

E, keV	Pôvod	Pravdepodobnosť emisie žiarenia, DDEP %
74,82	XK α_2 (Bi)	6,26
77,10	XK α_1 (Bi)	10,47
76,86	XK α_2 (Po)*	0,43
79,29	XK α_1 (Po)	0,71
87,35	XK' β_1 (Bi)	3,59
90,08	XK' β_2 (Bi)	1,10
89,81	XK' β_1 (Po)*	0,24

* malý príspevok

Píky príslušné $XK(Rn)$ sú v získanom spektre minoritné a stanovenie plochy by bolo zaťažené veľkou chybou. Preto boli pravdepodobnosti emisie žiarenia stanovené zo spektra zdroja ^{226}Ra , ktorý neobsahuje dcérske produkty. Jedná sa o zdroj vyrábaný pre emanátory radónu s obchodným označením **RF**. Zdroj sa štandardne vyrába na ČMI. Rádium sa inkorporuje do tenkej vrstvy Si gélu na kovovej podložke. Vrstva má štandardne priemer 28 mm, hmotnosť 63 mg a obsahuje 0,4 mg Ra. Spektrum jedného z týchto zdrojov sa nabralo na detektoroch **GC4018** a **GCX** v dvoch rôznych nominálnych vzdialenostiach štandardne používaných na ČMI (3 cm a 10 cm). Priestor okolo detektora a zdroja bol intenzívne vetraný. Emanáčny koeficient zdroja sa určil podľa nameraných aktivít ^{226}Ra (132 kBq) a $^{214}Pb/^{214}Bi$ (167 Bq) a je lepší než 0,9986. Potrebná účinnosť detekcie fotónov o energiách $XK\alpha(Rn)$, $XK\beta(Rn)$ a gama 186,211 keV s použitím zdroja RF bola počítaná metódou **MCNP** vždy zvlášť pre použitú geometriu merania. Spektrum zdroja RF namerané detektorom GCX v 3 cm je uvedené na obrázku 3. Ďalšie spektrá majú rovnaký charakter. V spektre sú **dominantné píky $XK\alpha(Rn)$ a $XK\beta(Rn)$** .



Obrázok 3 Spektrum ^{226}Ra namerané so zdrojom RF na detektore GCX

Všetky štyri namerané spektrá sa spracovali rovnakým spôsobom. Oblať od 79 keV do 86 keV (oblať $XK\alpha(Rn)$) bola preložená dvomi ($XK\alpha_2$ a $XK\alpha_1$) píkmí a lineárnym pozadím. Oblať od 92 keV do 101 keV (oblať $XK\beta(Rn)$) bola preložená šiestimi píkmí a lineárnym pozadím (tabuľka 6). Plocha píku $XK'\beta_1$ bola stanovená ako súčet plôch prvých troch píkov, plocha $XK'\beta_2$ ako súčet posledných troch píkov. Získané nové výsledné hodnoty relatívnych pravdepodobností emisie žiarenia vzhľadom

ku fotónom gama 186,211 keV sú uvedené v tabuľke 8. V tabuľke sú uvedené taktiež hodnoty absolútnych pravdepodobností emisií žiarenia za predpokladu, že emisie fotónov je 0,03555(23). Neistoty pravdepodobností emisie XK(Rn) z premeny ^{226}Ra sú uvedené v tabuľke 9.

Tabuľka 8 Relatívne a absolútne pravdepodobnosti emisie fotónov XK α (Rn) a XK β (Rn) z rádioaktívnej premeny ^{226}Ra

Linka	GC4018	GC4018	GCX	GCX	Priemer	Smerodajná odchýlka, %
	10 cm	3 cm	10 cm	3 cm		
	Relatívna pravdepodobnosť emisie	Relatívna pravdepodobnosť emisie	Relatívna pravdepodobnosť emisie	Relatívna pravdepodobnosť emisie		
186 keV	1,00000	1,00000	1,00000	1,00000	1,00000	
XK α 2 (Rn)	0,05048	0,05014	0,05067	0,05077	0,05052(28)	0,55
XK α 1 (Rn)	0,08472	0,08360	0,08424	0,08428	0,08421(46)	0,55
XK β 1 (Rn)	0,02982	0,02954	0,02908	0,02956	0,02950(31)	1,05
XK β 2 (Rn)	0,00953	0,00943	0,00917	0,00933	0,00937(15)	1,61
	Absolútna pravdepodobnosť emisie	Absolútna pravdepodobnosť emisie	Absolútna pravdepodobnosť emisie	Absolútna pravdepodobnosť emisie	Priemer	Smerodajná odchýlka, %
186 keV	0,03555	0,03555	0,03555	0,03555	0,03555(27)	0,65
XK α 2 (Rn)	0,00180	0,00178	0,00180	0,00181	0,00180(2)	0,94
XK α 1 (Rn)	0,00301	0,00297	0,00300	0,00210	0,00299(3)	0,94
XK β 1 (Rn)	0,00106	0,00105	0,00103	0,00105	0,00105(1)	1,30
XK β 2 (Rn)	0,00034	0,00034	0,00033	0,00033	0,00033(1)	1,78

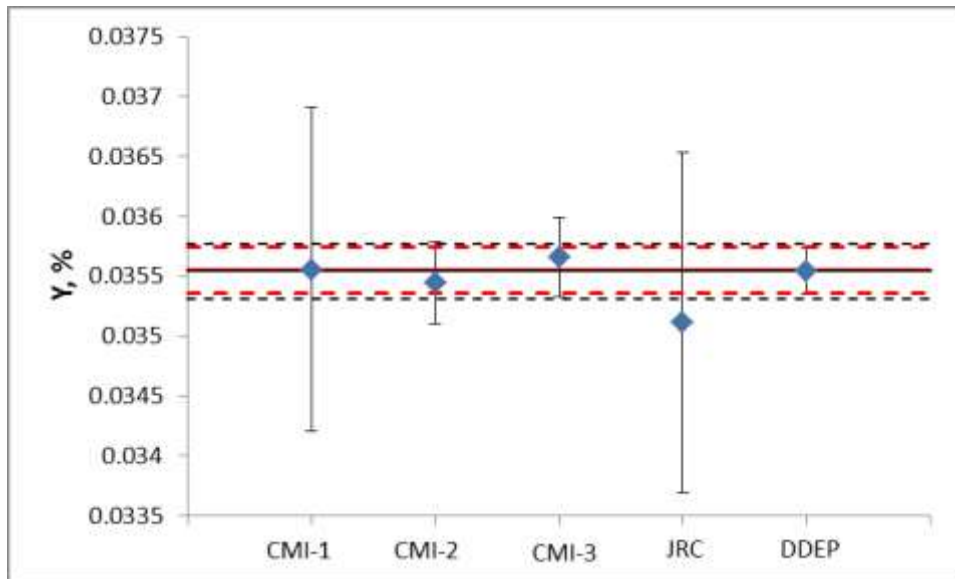
Tabuľka 9 Rozbor neistôt pravdepodobností emisie fotónov XK(Rn) v rádioaktívnej premene ^{226}Ra

Parciálna neistota, typ A – %	štandardná odchýlka	Pravdepodobnosť emisie žiarenia (186 keV)	Kombinovaná štandardná neistota, %
XK α 2(Rn)	0,55	0,65	0,85
XK α 1(Rn)	0,55	0,65	0,85
XK β 1(Rn)	1,05	0,65	1,24
XK β 2(Rn)	1,61	0,65	1,74

5.1.4 Medzinárodné porovnanie

Pravdepodobnosti emisie žiarenia γ a X pochádzajúce z ^{226}Ra boli okrem ČMI zmerané taktiež ďalším partnerom projektu a to JRC. Tieto výsledky boli porovnané s hodnotami získanými z DDEP.

Na obrázku 4 sú znázornené výsledky hodnôt pravdepodobností emisií žiarenia fotónov gama s energiou 186,211keV z oboch zúčastnených laboratórií. Z obrázku je vidieť veľmi dobrú zhodu medzi váženým priemerom nameraných pravdepodobností emisií pre energiu 186,211 keV v rámci projektu MetroNORM 3,554(23)% a doporučenou hodnotou v DDEP 3,555(19)% (www.nucleide.org, 1995). Veľké neistoty v meraniach označených ako CMI-1 a JRC sú spôsobené nie príliš presným určením aktivity roztoku vytvoreného a štandardizovaného v NPL pre účely tohto experimentu. Všetky 3 hodnoty namerané ČMI sa nachádzajú v rozpätí jednej váženej štandardnej neistoty od váženého priemeru a hodnota JRC sa nachádza v rozpätí dvoch vážených štandardných neistôt od váženého priemeru. V prípade, keď sa vypočítal vážený priemer len z hodnôt CMI-2 a CMI-3, ktoré boli získané meraním roztoku dodaného z ČMI, tak sa hodnota neistoty kvôli štatistike výrazne nemení ale hodnota pravdepodobnosti emisie žiarenia 3,555(23)% je zhodná s hodnotou uvedenou v DDEP.



Obrázok 4 Porovnanie laboratórnych meraní (modré body) s hodnotami vážených priemerov MetroNORM (čierne čiary) a s DDEP hodnotami (červené čiary) – 186 keV

Ďalej sa stanovil stupeň ekvivalencie D_i , ktorý je definovaný ako odchýlka nameranej hodnoty od referenčnej. Následne sa vypočítala rozšírená neistota U_i stupňa ekvivalencie ($k=2$):

$$U_i = 2\sqrt{u_i^2 + u_R^2} \quad \text{Vzt'ah 4}$$

kde: u_i je štandardná neistota merania,

u_R je štandardná neistota referenčnej hodnoty DDEP alebo váženého priemeru výsledkov projektu.

Kritériom úspešného porovnania je splnenie podmienky :

$$E_n = \left| \frac{D_i}{U_i} \right| \leq 1. \quad \text{Vzt'ah 5}$$

Kritérium úspešného porovnania bolo vypočítané (tabuľka 10) v prvom prípade vzhľadom k hodnote pravdepodobnosti emisie fotónov 186,211 keV získanej z DDEP databázy (www.nucleide.org, 1995). V tomto prípade kritérium **splnili** len hodnoty zmerané na **ČMI**. Ďalej sa porovnali výsledky porovnania s váženým priemerom výsledkov z projektu MetroNORM. I v tomto prípade kritérium **splnili** iba hodnoty namerané na **ČMI**. Výsledok z **JRC** **nesplnil** ani v jednom prípade podmienku úspešného porovnania.

Tabuľka 10 Prehľad výsledkov medzinárodného porovnania. Kritérium úspešného porovnania pre

186 keV

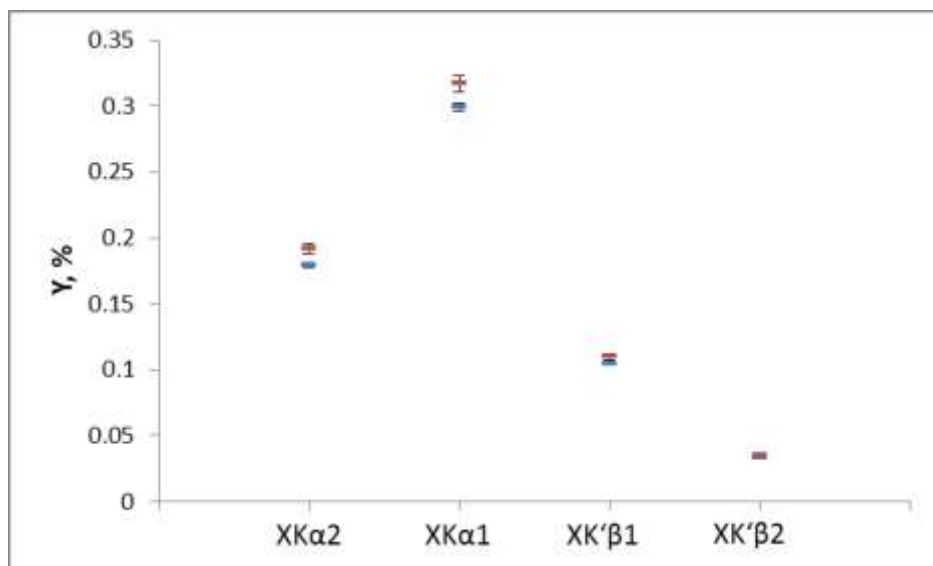
DDEP

	Y	u_i	D_i	U_i	E_n
CMI-1	0,03555	0,00019	0,00000	0,00276	0,00000
CMI-2	0,03555	0,00019	-0,00010	0,00078	0,12828
CMI-3	0,03555	0,00019	0,00011	0,00076	0,14390
JRC	0,03555	0,00019	0,01560	0,00286	5,45576

Vážený priemer MetroNORM

	Y	y_i	D_i	U_i	E_n
CMI-1	0,03554	0,00023	0,00001	0,00278	0,00360
CMI-2	0,03554	0,00023	-0,00009	0,00082	0,10955
CMI-3	0,03554	0,00023	0,00012	0,00081	0,14867
JRC	0,03554	0,00023	0,01561	0,00287	5,43696

Obrázok 5 znázorňuje hodnoty pravdepodobností emisií žiarenia **XK(Rn)** zmerané na ČMI a porovnané s hodnotami DDEP (www.nucleide.org, 1995). Hodnoty absolútnych pravdepodobností emisií **XK α** namerané na ČMI sa nachádzajú v rozpätí troch štandardných neistôt hodnoty DDEP a hodnoty **XK' β** taktiež zmerané na ČMI sa nachádzajú v rozpätí dvoch štandardných neistôt hodnoty DDEP. Bohužiaľ ČMI bolo jediným partnerom v projekte MetroNORM, ktoré hodnoty pravdepodobností emisií **XK(Rn)** zmeralo a preto nebolo možné v rámci tejto práce vykonať medzinárodné porovnanie.



Obrázok 5 Hodnoty absolútnych pravdepodobností emisií XK(Rn) zmerané na ČMI (modré body) a hodnoty pravdepodobností emisií XK(Rn) z DDEP (červené body)

5.2 ^{210}Pb

^{210}Pb je rádionuklid vyskytujúci sa v premennom rade ^{238}U a je veľmi často pozorovaný v životnom prostredí. Často sa jeho prítomnosť monitoruje v potravinách, tabaku alebo pitnej vode. Môže sa vyskytovať i v NORM materiáloch vstupujúcich do rôznych priemyselných procedúr ako napríklad produkcia kyseliny fosforečnej a fosfátových hnojív, ťažba ropy a zemného plynu a ťažba vzácnych zemín. Pre akúkoľvek z týchto aplikácií a procesov je dôležité poznať pravdepodobnosti emisie žiarenia pre jeho presné stanovenie. Momentálne je dostupných len málo takýchto hodnôt, ktoré boli získané experimentálne. Meranie ^{210}Pb pomocou γ -spektrometrie je komplikované kvôli nízkej energii emitovaného žiarenia gama, ktoré je silne ovplyvnené samoabsorpciou v meranej vzorke. Beta premena ^{210}Pb vedie k prechodu s energiou žiarenia gama 46,539(1) keV, ktorá silno konverguje na vrstve L a vytvára tak intenzívnu emisiu žiarenia XL z dcérskeho rádionuklidu ^{210}Bi s energiami medzi 9,4 keV a 16,4 keV. Ak by boli tieto pravdepodobnosti emisie žiarenia X známe s dostatočnou presnosťou, tak by sa mohli efektívne použiť na kalibráciu spektrometrov žiarenia gama v oblasti nízkych energií, pretože pre tento účel existuje len málo vhodných rádionuklidov.

^{210}Pb má pomerne jednoduchú schému premeny (obrázok 6) (www.nucleide.org, 1995). Premieňa sa hlavne β^- premenou do excitovaného stavu (80,2%) alebo do základného stavu (19,8%) ^{210}Bi s polčasom premeny 22,23(12) rokov. Bol zaznamenaný i slabý alfa

prechod na základnú hladinu ^{206}Hg . Excitovaná hladina v premene ^{210}Bi sa premieňa do základného stavu s vyžiareníím fotónov gama s energiou 46,539(1) keV. V DDEP hodnotení boli pre určenie pravdepodobnosti emisie žiarenia gama zohľadnené len štyri experimentálne hodnoty pravdepodobností emisií (tabuľka 11) (www.nucleide.org, 1995). Prvé dva výsledky majú relatívnu neistotu okolo 10% a preto iba posledné dva experimenty, v ktorých bola pravdepodobnosť emisie žiarenia zmeraná α -spektrometriou, majú rozhodujúcu váhu v procese ohodnotenia. Výsledná hodnota pravdepodobnosti emisie žiarenia gama bola stanovená na 4,252(40)%.

Tabuľka 11 Pravdepodobnosti emisie žiarenia gama s energiou 46,539(1) keV

Fink (1957)	4,5(4)
Ya Gromov (1970)	4,8(6)
Hino (1990)	4,26(7)
Schötzig (1990)	4,24(5)
Hodnota DDEP	4,252(40)

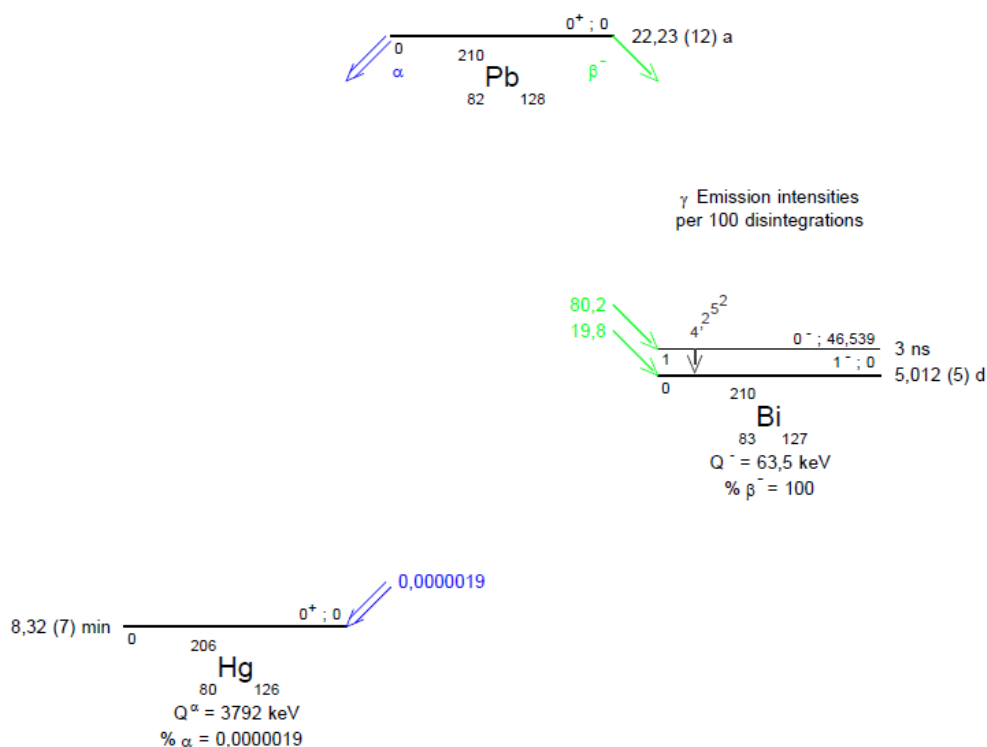
V tomto istom DDEP hodnotení boli vzaté do úvahy taktiež štyri výsledky pre celkovú emisiu žiarenia XL(Bi) (tabuľka 12) (www.nucleide.org, 1995). Iba dva z experimentov poskytujú detailný popis merania žiarenia XL(Bi). Avšak ani výsledky týchto dvoch experimentov nie sú v zhode a to hlavne pri určení pravdepodobností emisií žiarenia $L\alpha$ a $L\gamma$ (tabuľka 13) (METHA, a iní, 1987; SCHOTZIG, 1990; www.nucleide.org, 1995).

Tabuľka 12 Celkové pravdepodobnosti emisie žiarenia XL(Bi)

Fink (1957)	23,8(20)
Gehrke (1971)	22,8(15)
Mehta (1987)	25,2(3)
Schötzig (1990)	23,4(4)
Hodnota DDEP	22,0(5)

Tabuľka 13 Podrobný prehľad pravdepodobností emisií žiarenia ^{210}Pb

Linka	Energia, keV	DDEP (2008)	Mehta (1987)	Schötzig (1990)
L_I	9,42	0,552(17)	0,584(18)	0,55(3)
L_S	9,72	-	-	-
L_T	10,24	-	-	-
L_α	10,83	10,3(3)	10,27(32)	9,48(17)
L_η	11,71	0,075(2)	0,074(4)	0,075(4)
L_β	13,01	9,05(13)	11,6(4)	10,9(4)
L_γ	15,32	1,97(3)	2,64(8)	2,36(5)
Celkom		22,0(5)	25,2(3)	23,4(4)

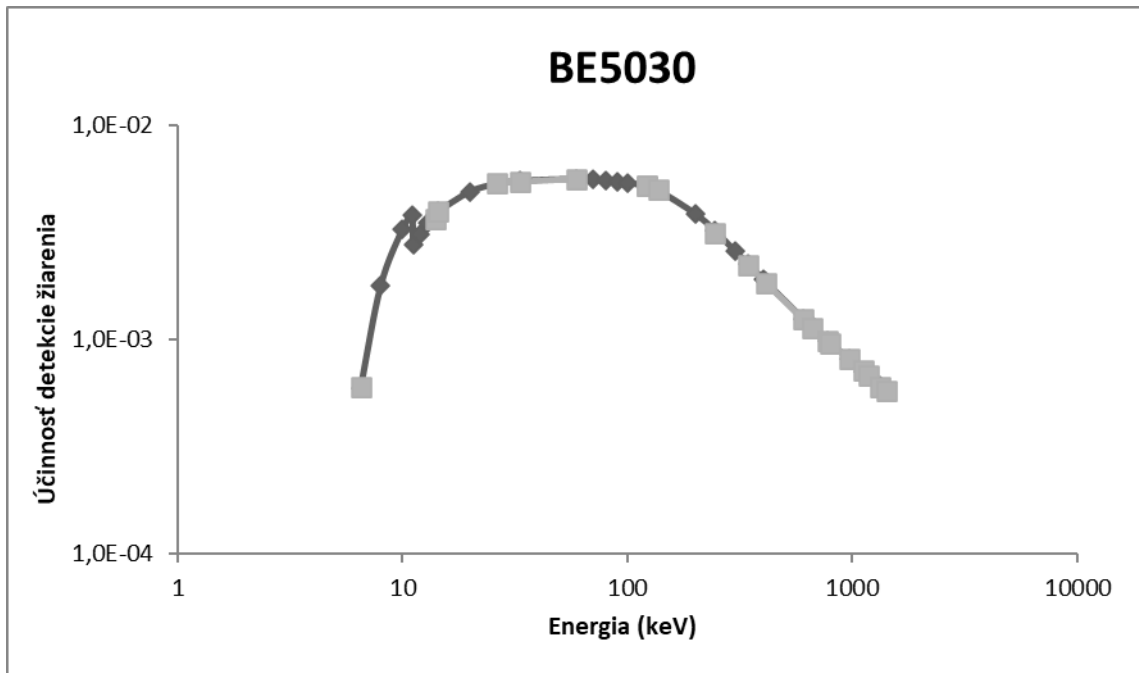


Obrázok 6 Schéma rádioaktívnej premeny ^{210}Pb

5.2.1 Použitá aparatúra

Meranie sa uskutočnilo na detektore typu BEGe s označením BE5030 (výrobca Canberra, FWHM 1,9 keV pre 1332 keV, relatívna účinnosť 48%, vstupné okienko Carbon Expory, predzosilovač 2002CSL). Detektor bol pripojený k elektrickému

modulu LYNX. Detektor BEGe vykazuje v oblasti 20keV až 130 keV malú závislosť na energii fotónov, ako je zrejme z obrázku 7.



Obrázok 7: Experimentálne (○) a vypočítané (●) hodnoty účinnosti v píku

Kalibrácia detektora BEGe, ktorá bola uskutočnená už v minulosti, bola v rámci tejto práce **overená EFS etalónmi** s rádionuklidmi ^{109}Cd , ^{241}Am , ^{57}Co , ^{133}Ba a ^{51}Cr . V tabuľke 14 sú uvedené odchýlky (vzťah 6) hodnôt aktivít deklarovaných výrobcami štandardov (ČMI) (A) od aktivít nameraných detektorom BEGe (B) pri použití účinností detekcie vypočítaných metódou MCNP.

$$\text{Odchýlka} = \left(\frac{B-A}{A} \right) * 100 \quad \text{Vzťah 6}$$

Tabuľka 14 Odchýlky nameraných aktivít od deklarovaných aktivít

E, keV	Rádionuklid	Pravdepodobnosť emisie žiarenia, DDEP	Odchýlka, %
6,47	Co-57 XK	0,5710	8,14
14,41	Co-57	0,0915	2,52
22,01	Cd-109 XK α	0,8431	1,25
25,02	Cd-109 XK β	0,1790	-2,08
26,34	Am-241	0,0240	1,72
33,19	Am-241	0,0012	5,03
35,26	Ba-133 XK β	0,2280	-2,28

53,16	Ba-133	0,0214	2,95
59,54	Am-241	0,3578	-0,52
88,03	Cd-109	0,0366	0,32
121,06	Co-57	0,8551	0,22
136,47	Co-57	0,1071	0,12
276,4	Ba-133	0,0716	-0,42
302,85	Ba-133	0,1834	-0,86
320,08	Cr-51	0,0989	-0,46
356,01	Ba-133	0,6205	-0,28
834,8	Mn-54	0,9998	-0,96

Účinnosti počítané metódou MCNP boli akceptované. Konzervatívny odhad neistoty v rozsahu 30 keV až 300 keV je 0,8% pre $k = 1$. Konzervatívny odhad neistoty pod 30 keV je 5%.

Ďalej bol použitý detektor podobného typu, označený GXS (výrobca Canberra, FWHM 1,9 keV pre 1332 keV, relatívna účinnosť 50%, vstupné okienko Carbon Epoxy, predzosilňovač 2002CSL). Detektor bol v rámci tejto práce **kalibrovaný** experimentálne validovanou metódou **MCNP** pre vzdialenosť vzorky od detektora 16,9 cm. Závislosť účinnosti na energii je kvalitatívne rovnaká ako u detektora BE5030.

Ďalšími použitými detektormi boli koaxiálny p-typ GC4018 a GCX rovnakého typu, ktoré sa na ČMI štandardne používajú. Oba detektory pracujú s predzosilňovačom 2002CSL a modulom MCA LYNX. Detektory boli v minulosti kalibrované taktiež experimentálne validovanou metódou MCNP.

Pre meranie pravdepodobností emisie XL(Bi) bol použitý Si(Li) detektor ORTEC, model SLP-06165P-OPT-0.5 s Be oknom o hrúbke 0.0127 mm (rozlíšenie 165 eV pre 5.9 keV, aktívna hĺbka 5 mm). **Účinnosťná kalibrácia** bola uskutočnená **experimentálne** pomocou etalónov ČMI typu EFS vo fixnej vzdialenosti 7 cm. Konzervatívny odhad neistoty kalibrácie v oblasti 8 keV až 16 keV je 5%.

5.2.2 Rádionuklidové zdroje

Vzorka pre meranie bola pripravená na oddelení výroby štandardných radionuklidových zdrojov z roztoku dodaného laboratóriom NPL v ampulke s roztokom o hmotnostnej

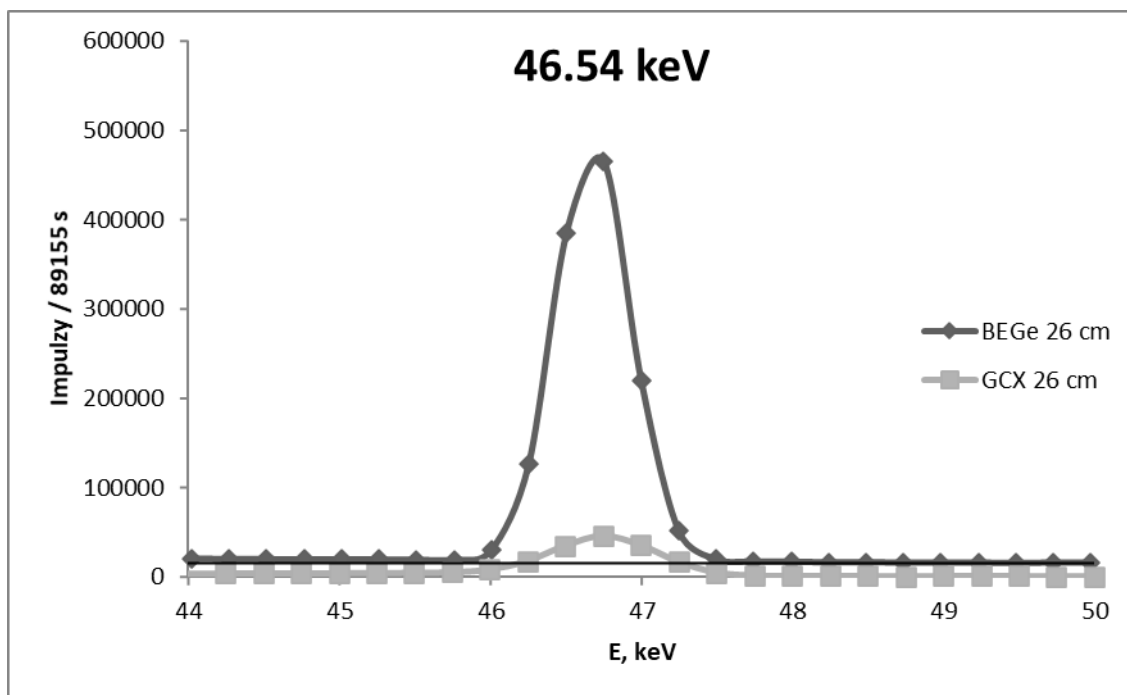
aktivite 28,9(1,5) kBq k 1.8.2015. Z roztoku NPL sa odvážilo 0,03765(7) g na polyetylénovú podložku o hrúbke 0,19 mm. Aktivita odparku bola 1,99(10) kBq. Odparok bol prekrytý identickou fóliou a tepelne zvarovaný. Fólia bola zafixovaná do duralového kruhového rámiku o priemere 35 mm. Zdroj bol označený **EFS Pb210 A15060302**.

Ako druhá vzorka bol použitý už existujúci etalón EFS Pb210 1146002 (ČMI) s identickou konštrukciou ako mal EFS Pb210 A15060302. Aktivita etalónu bola 58,05(35) kBq k 1. 12. 2014.

Aktivita vzorky z NPL bola príliš nízka pre priame meranie. Bola porovnaná iba so vzorkou ČMI v dlhodobom meraní na detektoroch GCX a GC4018 v dvoch vzdialenostiach. Pomer odoziev vzoriek ČMI/NPL bol 1,011(10).

5.2.3 Stanovenie pravdepodobnosti emisie fotónov gama s energiou 46,54 keV

Použitú boli detektory GXS, BE5030, GCX a GC4018. Vzdialenosti vzoriek od okna detektoru boli 25 cm (BE5030), 16,9 cm (GXS), 26 cm (GCX) a 25 cm (GC4018). Doby meraní boli od 80000 s do 200000 s. Detektory BEGe a GXS poskytujú symetrické píky, u ktorých je stanovenie plochy presnejšie ako u detektorov GCX a GC4018. U detektorov p-typu je pík deformovaný signálom z mŕtvej vrstvy (obrázok 8). Signál z mŕtvej vrstvy vzniká predovšetkým absorpciou fotónov 46,54 keV v mŕtvej vrstve a jeho príspevok k ploche píku je komplikované stanoviť. V prípade detektora p-typu bola neistota plochy píku 5% zatiaľ čo v prípade BEGe detektora bola neistota plochy píku len 0,5%. Výsledné hodnoty pravdepodobností emisie a zoznam neistôt fotónov 46,54 keV sú uvedené v **tabuľke 15**. **Výslednou hodnotou pravdepodobnosti emisie žiarenia** je vážený priemer hodnôt získaných z meraní na detektoroch typu **BEGe 0,04243(34)**. Hodnota v tabuľkách DDEP je 0.04252(40) (Bé, a iní, 2013).



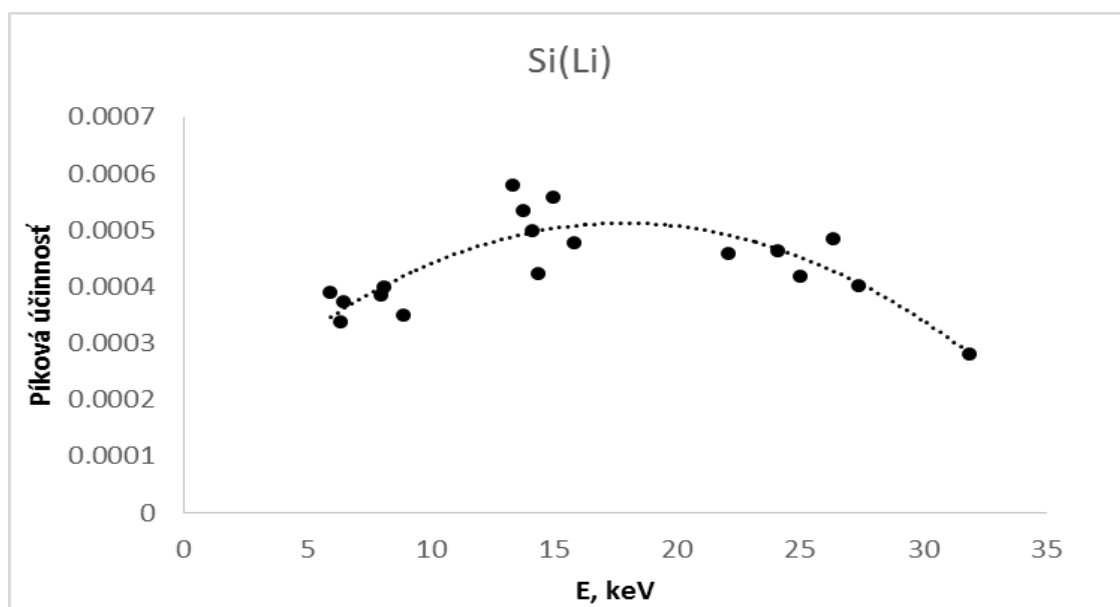
Obrázok 8 Porovnanie spektier z detektora BEGe a GCX

Tabuľka 15 Neistoty pre všetky použité detektory a namerané pravdepodobnosti emisie pre fotóny 46,54 keV

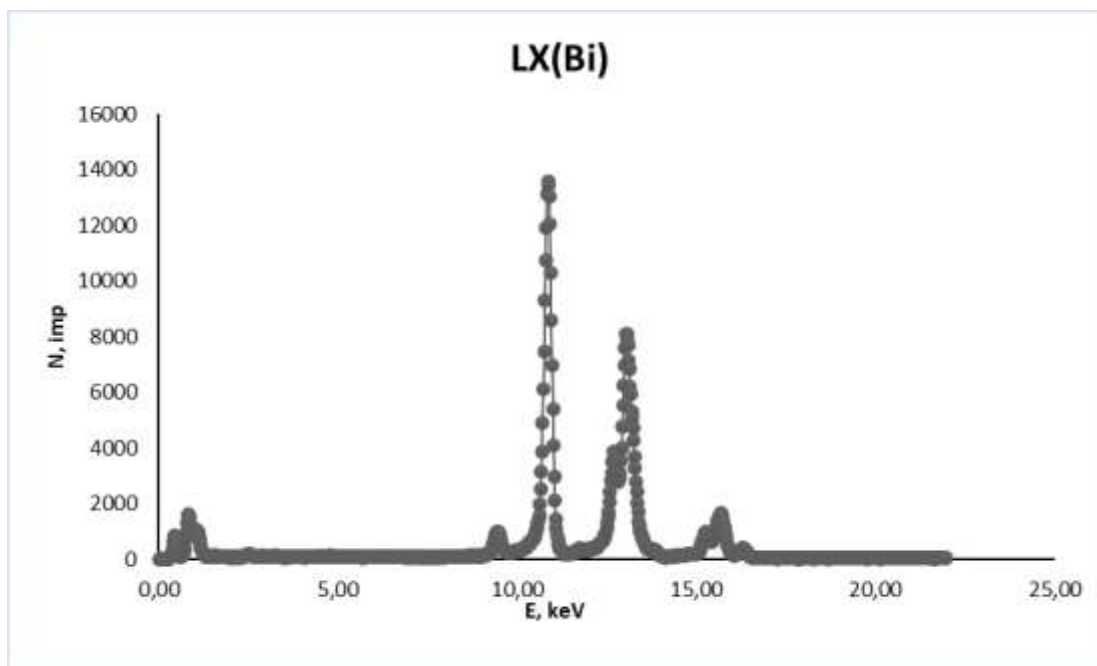
Detektor	GXS	BE5030	GCX	GC4018
Parciálna neistota	%	%	%	%
Aktivita	0,6	0,6	0,6	0,6
Účinnosť	0,8	0,8	0,8	0,8
Plocha píku	0,5	0,5	5	5
Pile-up	0,1	0,1	0,1	0,1
Pozadie	0,1	0,1	0,1	0,1
Geometria	0,1	0,1	0,1	0,1
$\tau_{1/2}$	0,1	0,1	0,1	0,1
Kombinovaná	1,14	1,14	5,10	5,10
štandardná neistota, %				
Pravdepodobnosť emisie žiarenia	0,04263	0,04223	0,04381	0,04145

5.2.4 Stanovenie pravdepodobnosti emisie fotónov XL(Bi)

Údaje o XL(Bi) v DDEP sú uvedené v tabuľke 13. Meranie pravdepodobnosti emisie žiarenia bolo pre účely tohto výskumu uskutočnené pomocou štandardne používaného detektora Si(Li) a štandardov typu EFS (ČMI). Pre **účinnostnú kalibráciu** detektora boli použité rádionuklidy vo forme EFS: ^{57}Co , ^{65}Zn , ^{241}Am , ^{88}Y , ^{85}Sr a ^{55}Fe . Energetickou oblasťou 6 keV až 20 keV bol preložený kvadratický polynóm a následne bola stanovená účinnosť pre fotóny XL(Bi) (obrázok 9). Kalibrácia nie je príliš kvalitná. Neistota účinnosti bola odhadnutá na 5% pre celý rozsah. Neistota pravdepodobnosti emisie žiarenia bola stanovená ako kombinácia neistoty účinnosti a neistoty stanovenia plochy. Ostatné zložky neistôt sú nevýznamné. Namerané spektrum v energetickej oblasti 0 keV až 20 keV je uvedené na obrázku 10.



Obrázok 9 Účinnostná krivka Si(Li) detektora



Obrázok 10 Spektrum XL(Bi) z Si(Li)detektora

Multiplet vo vyobrazenej energetickej oblasti je tvorený iba fotónmi XL(Bi), eventuálne fotónmi XL(Tl), ktoré majú nepatrné pravdepodobnosti emisie rádu $10^{-4}\%$ z premeny ^{210}Bi . V spektre pozadia v energetickej oblasti 5 až 20 keV neboli viditeľné žiadne iné píky. Plochy zreteľných píkov a multipletov boli stanovené nelineárnou metódou najmenších štvorcov a to vždy zvlášť pre oblasť $L\alpha$, $L\beta$ a $L\gamma$. **Namerané pravdepodobnosti emisie fotónov XL(Bi)** sú spolu s ich neistotami uvedené v **tabuľke 16**.

Tabuľka 16 Parametre píkov, pravdepodobnosti emisie žiarenia, neistoty ($k=1$)

E, keV	Pôvod	Plocha	Neistota plochy, %	FWHM	Účinnosť	Pravdepodobnosť emisie	Kombinovaná štandardná neistota, %
9,460	L 1	9114	1,7	0,246	0,0004462	0,0059(31)	5,32
10,860	$L\alpha$	173843	0,25	0,254	0,0004788	0,1045(53)	5,04
11,710	$L\eta$	814	17		0,0004918	0,0005(1)	17,73
12,697	$L\beta$	48785	0,59	0,285	0,0005005	0,0281(14)	5,07
13,072	$L\beta$	112853	0,61	0,287	0,0005020	0,0647(3)	5,07
13,307	$L\beta$	23954	2,66	0,288	0,0005025	0,0137(8)	5,70
13,727	$L\beta$	3920	2,53	0,291	0,0005023	0,00229(1)	5,64
					Celkom β	0,1087(70)	6,41

15,283	L γ	11574	1,18	0,279	0,0004908	0,0068(4)	5,17
15,681	L γ	22938	0,76	0,281	0,0004852	0,0136(7)	5,09
16,292	L γ	4435	1,88	0,284	0,0004743	0,0027(1)	5,38
					Celkom γ	0,0231(13)	5,65
					Celkom	0,2427(15)	6,39
					XL(Bi)		

5.2.5 Medzinárodné porovnanie

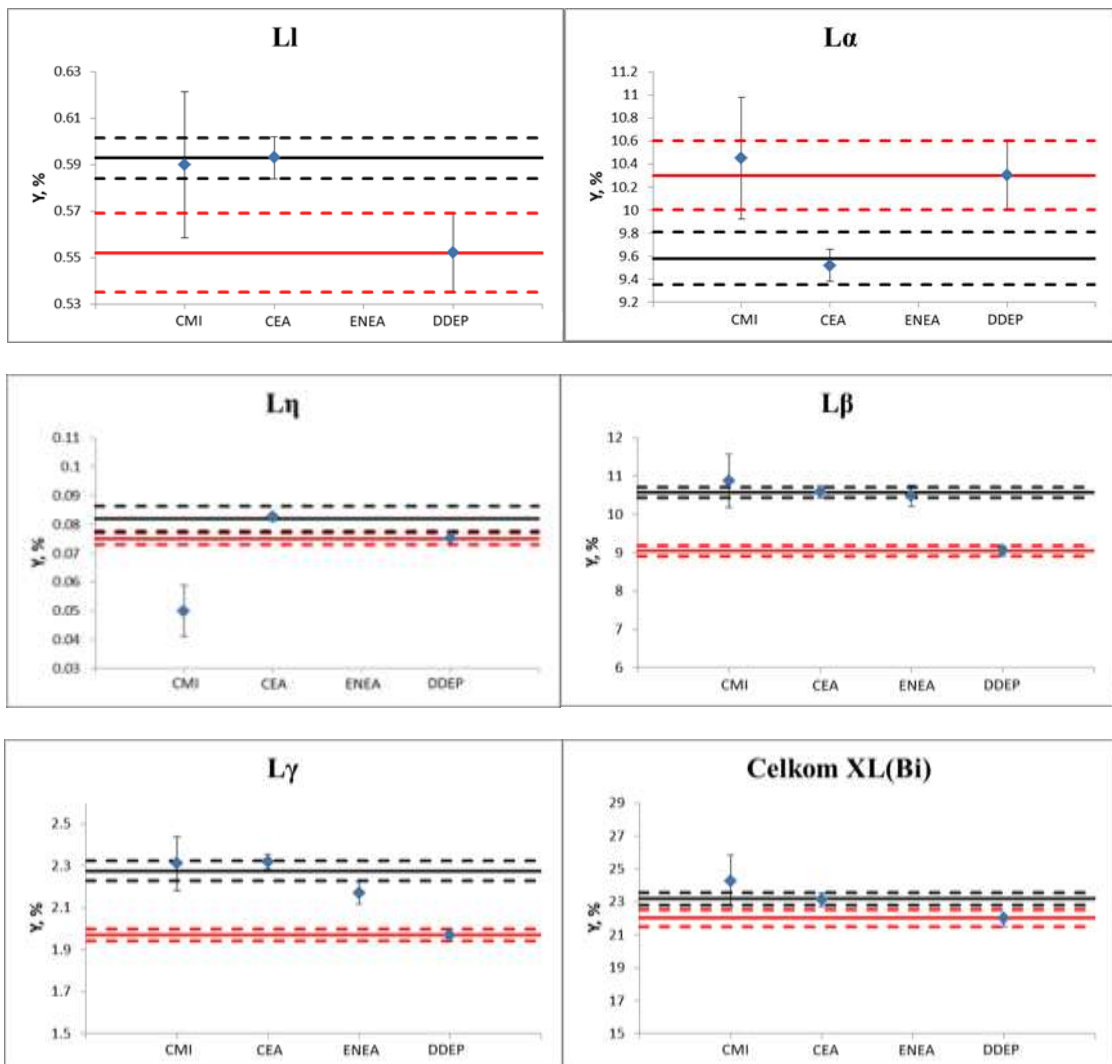
Pravdepodobnosti emisie žiarenia gama a X pochádzajúce z premeny ^{210}Pb boli merané okrem ČMI taktiež ďalšími partnermi projektu MetroNORM a to CEA a ENEA. Tieto experimentálne hodnoty boli porovnané s hodnotami získanými z databázy DDEP (obrázok 11). Všetky experimentálne hodnoty pravdepodobnosti emisie žiarenia γ s energiou 46,539(1) keV získané od partnerov projektu MetroNORM ležia v rozpätí jednej štandardnej neistoty hodnoty DDEP (4,252(40%)) (www.nucleide.org, 1995). Najpresnejšie meranie bolo dosiahnuté na ČMI. Vážený priemer experimentálnych hodnôt pravdepodobností emisií žiarenia gama je **4,243(34)%**.

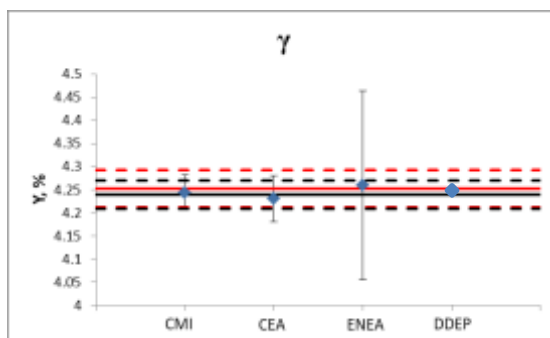
Ďalšia experimentálne získaná hodnota na ČMI, ktorá je taktiež vo veľmi dobrej zhode s hodnotou DDEP je hodnota pre pravdepodobnosť emisie žiarenia $L\alpha$. Ďalším partnerom, ktorý sa pokúsil túto hodnotu zmerať je CEA. Ich hodnota leží v rámci troch štandardných neistôt DDEP hodnoty. Vážený priemer pravdepodobnosti emisií žiarenia $L\alpha$ bol na základe získaných výsledkov v rámci projektu MetroNORM stanovený na **9,58(23)%**.

Veľmi dobré výsledky boli získané i v prípade merania pravdepodobností emisie žiarenia XL(Bi). V prípade experimentálnych hodnôt pravdepodobností emisií pre celkové žiarenie XL(Bi) bola hodnota váženého priemeru **23,18(39)%** len o 5,4% vyššie ako je udávaná odporúčaná hodnota v databáze DDEP.

Ostatné merania vykazujú väčšiu nezhodu medzi experimentálnymi hodnotami a vypočítanou hodnotou DDEP. Napríklad v prípade pravdepodobností emisií pre $L\eta$ sa experimentálne hodnoty nezhodujú ani len v rámci neistôt a ich vážený priemer je **0,0819(43)%**. Vážený priemer experimentálnych hodnôt L1 má hodnotu **0,593(9)%**

a od hodnoty DDEP sa líši o 7,4%. Pre hodnotu pravdepodobnosti emisie $L\beta$ má experimentálny vážený priemer hodnotu **10,57(14)%** a od hodnoty DDEP sa líši až o 16,8%. Zaujímavý je fakt, že sa síce vážený priemer značne líši od hodnoty DDEP ale jednotlivé experimentálne výsledky zúčastnených laboratórií sú medzi sebou vo veľmi dobrej zhode. Toto by mohlo byť vysvetlené použitím toho istého roztoku z NPL vo všetkých laboratóriách ale v prípade ČMI sa použil pre určenie pravdepodobnosti emisie žiarenia zdroj vyrobený z roztoku ČMI. A aj v prípade merania EFS z ČMI leží hodnota vyššie než je DDEP hodnota. Toto naznačuje, že by DDEP hodnota nemusela byť určená správne a bolo by dobré porovnanie **zopakovať**. Vážený priemer nameraných hodnôt pravdepodobností emisií pre $L\gamma$ **2,276(48)%** leží o 15,5% vyššie.





Obrázok 11 Porovnanie laboratórnych meraní (modré body) a ich priemerov (čierna čiara) s DDEP hodnotami (červené čiary), Y – pravdepodobnosť emisie žiarenia

Kritérium úspešného porovnania bolo vypočítané (tabuľka 17) podľa vzťahu 5 vzhľadom k hodnote pravdepodobnosti emisie fotónov získanej z DDEP databázy (www.nucleide.org, 1995) a k hodnotám vážených priemerov výsledkov z projektu MetroNORM. Z výsledkov je možné vidieť, že merania pravdepodobnosti emisie žiarenia $L\beta$ a $L\gamma$ sú v rámci laboratórií vo veľmi dobrej zhode ale ich priemer je niekoľkonásobne **odlišný od hodnoty DDEP**. Preto by bolo vhodné takéto porovnanie v budúcnosti zopakovať a zapojiť do neho viacej laboratórií.

Tabuľka 17 Prehľad výsledkov medzinárodného porovnania. Kritérium úspešného porovnania

	DDEP	Priemer	DDEP	Priemer	DDEP	Priemer
	Lα		Lβ		Lη	
CMI	0,53	0,04	0,12	0,75	1,38	1,57
CEA	1,07	0,01	1,18	0,16	1,61	0,05
ENEA	-	-	-	-	-	-
	Lβ		Lγ		XL(Bi)	
CMI	1,28	0,21	1,27	0,12	0,70	0,34
CEA	3,71	0,03	3,80	0,37	0,87	0,06
ENEA	2,38	0,13	1,65	0,74	-	-
	γ					
CMI	0,07	0,04				
CEA	0,17	0,09				
ENEA	0,02	0,05				

5.3 ^{235}U

V rámci európskeho metrologického výskumného programu (EMRP), MetroNORM, sa vykonal výskum charakteristík premennej rady ^{235}U , ktorý sa hojne vyskytuje v prírode a so zvýšenou koncentráciou v NORM materiáloch a odpadoch. Preto existuje potreba znalosti referenčných jadrových dát pre zlepšenie a podporu rádioanalytických postupov

používaných pre identifikáciu a kvantifikáciu rádionuklidu prítomného v NORM materiáloch. V tejto súvislosti, boli v rámci tejto práce merané pravdepodobnosti emisie gama žiarenia z premeny ^{235}U .

Prirodzene sa vyskytujúce rádioaktívne materiály (NORM) obsahujú primordiálne rádionuklidy, ako je ^{235}U , prítomné v prírodných zdrojoch. Ak sú tieto materiály priemyselne spracované, tak môžu viesť k zvýšeniu úrovne žiarenia a expozície ľudí. Lepšie znalosti pravdepodobností emisií gama žiarenia z premeny ^{235}U by umožnili presnejšie vyčíslenie jeho prítomnosti prostredníctvom γ -spektrometrických meraní. JRC v rámci projektu MetroNORM vytvorilo a štandardizovalo zdroje s ^{235}U , ktoré boli neskôr zaslané partnerom projektu pre následné meranie emisií žiarenia gama. ^{235}U sa premieňa s dobou polpremeny $704(1)\cdot 10^6$ rokov (www.nucleide.org, 1995) pomocou kaskád s emisiou žiarenia γ , β^- a α až na stabilné ^{207}Pb . Najvýznamnejšie pravdepodobnosti emisie žiarenia gama z premeny ^{235}U pre NORM priemysel sú uvedené v tabuľke 18 (www.nucleide.org, 1995).

Tabuľka 18 Významné energie žiarenia gama z premeny ^{235}U

Gama	Energia, keV	Doporučená pravdepodobnosť emisie žiarenia DDEP
$\gamma_{5,2}(\text{Th})$	109,190(7)	1,66(13)
$\gamma_{4,1}(\text{Th})$	143,767(3)	10,94(6)
$\gamma_{5,1}(\text{Th})$	163,356(3)	5,08(3)
$\gamma_{4,0}(\text{Th})$	185,720(4)	57,0(3)
$\gamma_{18,4}(\text{Th})$	202,120(1)	1,08(2)
$\gamma_{5,0}(\text{Th})$	205,316(4)	5,02(3)
$\gamma_{6,0}(\text{Th})$	221,386(14)	0,118(5)

5.3.1 Použitá aparatúra

Pre meranie bola použitá spektrometrická aparatúra Canberra štandardne používaná na ČMI. Systém pozostával z HPGe detektora s označením GC4018, predzosilňovača 20002CSL a jednotky MCA LYNX. Účinnosť detekcie fotónov pre spektrometrický systém bola počítaná metódou MCNP pre vzdialenosť 3 cm (GC4018). Plocha píku bola vyhodnotená programom GENIE, ktorý stanovuje plochu izolovaných píkov sumačnou metódou.

5.3.2 Rádionuklidové zdroje

Partnerom projektu boli poskytnuté zdroje s ^{235}U vyrobené z roztoku s objemom 0,5 ml, ktorý obsahoval 20 mg U v 1 ml 1,5M HNO_3 . Zdroje boli pripravené nakvapkaním približne 60 μg roztoku na sklenenú podložku (vonkajší priemer 34 mm, vnútorný priemer 20 mm). Štandardizácia aktivity bola vykonaná spektrometriou alfa na JRC (tabuľka 19). Do ČMI bol zaslaný zdroj s označením U235G0910.

Tabuľka 19 Štandardizované aktivity zdrojov s ^{235}U

Zdroj	Aktivita ^{235}U , Bq 24.7.2009	Absolútna neistota pre $k = 1$, Bq	Relatívna neistota, %
U235G0901	96.8	0,5	0,5
U235G0903	120.8	0,5	0,4
U235G0904	100.8	0,2	0,2
U235G0910	71.0	0,1	0,2
U235G0912	74.9	0,1	0,2
U235G0913	48.4	0,1	0,2
U235G0916	63.49	0,1	0,2
U235G0919	38.5	0,1	0,2

5.3.3 Stanovenie pravdepodobností emisie vybraných fotónov gama

Pre stanovenie pravdepodobnosti emisie fotónov gama z premeny ^{235}U bol použitý HPGe detektor GC4018. Vzďialenosť vzorky od okna detektoru bola 3 cm. Meranie prebiehalo po dobu 336 751 s. Neistoty plochy píkov nadobúdali hodnotu maximálne okolo 0,5%. Pomocou kódu **Monte Carlo** boli vypočítané **celkové a píkové účinnosti**. Presný popis vzorky pre tento výpočet poskytlo JRC. Výpočet bol potrebný na určenie korekčných faktorov pre sumačné koincidencie. Pre geometriu merania 3 cm a detektor GC4018 boli vypočítané korekčné sumačné faktory pre ^{235}U . Výpočet bol uskutočnený pre najintenzívnejšie energie fotónov gama, ktoré boli významne ovplyvnené náhodnými sumáciami. Z výsledkov je zrejmé, že na získanie spoľahlivých hodnôt pravdepodobností emisií žiarenia nemožno sumačné korekčné faktory pre malé vzdialenosti medzi zdrojom a detektorom zanedbať (tabuľka 20). Na získanie

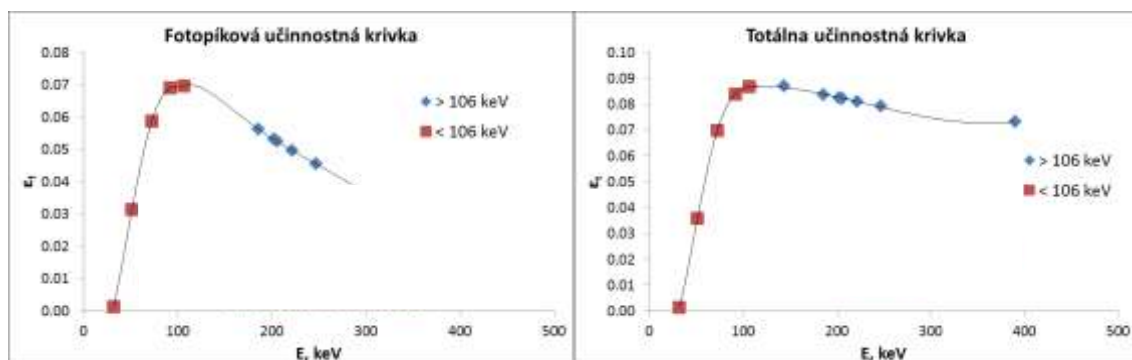
kalibračných kriviek účinnosti pre geometriu 3 cm sa použili vypočítané účinnosti pokrývajúce energetický rozsah 31 - 390 keV (tabuľka 21). Získané krivky účinnosti sa použili na výpočet koincidenčných sumačných opráv a na samotný výpočet príslušných pravdepodobností emisií fotónov gama z premeny ^{235}U (obrázok 12).

Tabuľka 20 Vypočítané koincidenčné sumačné korekčné faktory (C_s) pre vzorku vo vzdialenosti 3cm

E, keV	C_s
109,19	1,004905
143,77	1,005615
163,36	1,002251
185,72	1,005559
202,12	1,089456
205,32	1,002189
221,39	1

Tabuľka 21 13 energií použitých pre MCNP výpočet účinnosti

E, keV				
31,59	51,18	72,25	91,7	106
109,19	143,77	185,72	202,12	205,32
221,39	246,87	390,27		



Obrázok 12 Krivky fotopikovej a totálnej účinnosti počítané za pomoci MCNP kódu

Pravdepodobnosti emisie žiarenia pre vybrané energie E v premeny rádionuklidu ^{235}U boli počítané na základe vzťahu 7 (DRYAK & KOVAR, 2009).

$$Y = \frac{N}{\varepsilon \cdot t \cdot A} \cdot C_s$$

Vzťah 7

$$C_s = 1/(K_c \cdot K_s)$$

$$K_s(E_0) = 1 + \frac{P_s(1) \cdot P(E_{1_1}) \cdot P(E_{2_1})}{P(E_0)} + \frac{P_s(2) \cdot P(E_{1_2}) \cdot P(E_{2_2})}{P(E_0)} + \dots$$

$$K_c(E_0) = 1 - P_c(LX) \cdot T(LX) - P_c(KX_\alpha) \cdot T(KX_\alpha) - P_c(KX_\beta) \cdot T(KX_\beta) - P_c(E_{1_1}) \cdot T(E_{1_1}) - P_c(E_{1_2}) \cdot T(E_{1_2}) \dots$$

kde A je aktivita vzorky, N je počet zaznamenaných udalostí v píku s energiou E opravený na pozadie, ε je píková účinnosť pre energiu E, t je živá doba merania, Y je počet gama kvánt na jednu premenu rádionuklidu pre prechod s energiou E, $C_s = K_c \cdot K_s$ sú sumačné koincidenčné korekčné faktory pre K_s („summing in“) a K_c („summing out“) efekty, $P_s(i)$ označujú sumačné koeficienty, $P(E_{1_1}), P(E_{2_1}), P(E_{1_2}), P(E_{2_2})$ a $P(E_0)$ označujú píkové účinnosti pre fotóny s energiami $E_{1_1}, E_{2_1}, E_{1_2}, E_{2_2}$ a $E_0, E_0 = E_{1_1} + E_{2_1} = E_{1_2} + E_{2_2} = \dots$, P_c označuje sumačné koeficienty energie E_0 s $XL, XK_\alpha, XK_\beta, E_{1_1}, E_{1_2}$.

Výsledné **hodnoty pravdepodobností emisií** a ich zoznam neistôt sú pre jednotlivé energie fotónov uvedené v **tabuľke 22**.

Tabuľka 22 Pravdepodobnosti emisie žiarenia a ich neistoty

Energia, keV	109,19	143,77	163,36	185,72	202,12	205,32	221,39
Parciálna neistota	%	%	%	%	%	%	%
Typ A	1,29	0,31	0,58	0,12	2	0,51	10
Aktivita	0,28	0,28	0,28	0,28	0,28	0,28	0,28
Účinnosť	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15
Pile-up	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
Geometria	1,1	1,1	1,1	1,1	1,1	1,1	1,1
Sumácie	0,1	0,1	0,1	0,3	0,1	0	0,1
Kombinovaná	1,73	1,19	1,29	1,16	2,32	1,26	10,07
štandardná neistota,							
%							
Pravdepodobnosť	1,8	10,92	5,11	56,6	1,05	5	0,101
emisie žiarenia, %							

5.3.4 Medzinárodné porovnanie

Táto časť uvádza výsledky pravdepodobnosti emisie fotónov získané v laboratóriách, ktoré v rámci projektu MetroNORM taktiež merali pravdepodobnosti emisie fotónov gama z premeny ^{235}U . Zdroje zaslané partnerom boli merané od doby jedného týždňa až po 1,5 mesiaca. Informácie o jednotlivých podmienkach merania možno nájsť v nižšie uvedenej tabuľke 23.

Tabuľka 23 Informácie o podmienkach merania pre zdroj s ^{235}U

Partner	JRC	CIEMAT	ENEA	CEA	CMI
Detektor	HPGe Planárny BEGe Tenká mŕtva vrstva Relatívna účinnosť 50%	HPGe (p-ty) Tenká mŕtva vrstva Relatívna účinnosť 40%	HPGe (p-ty), Relatívna účinnosť 40% FWHM 0.9 keV pre 122 keV, 1.9 keV pre 1332.5 keV		HPGe 4018 Canberra FWHM 1.8 keV pre 1332 keV, Pb tienenie
Podmienky merania	Podzemné laboratórium (Hades) Implantácia dusíka do komory proti akumulácii radónu	-	-	Implantácia dusíka do komory proti akumulácii radónu	Laboratórne
Doba merania, dni	41	21	5	4	4
Vzdialenosť zdroj- detektor, mm	120	150	-	-	30
Fotopíková účinnosť	Bodové zdroje z PTB EGSnrc	Bodové a objemové zdroje, MCNP	GESPECOR 4.2	-	MCNP

Výsledky týchto piatich laboratórií spolu s neistotami sú zhrnuté v tabuľke 24.

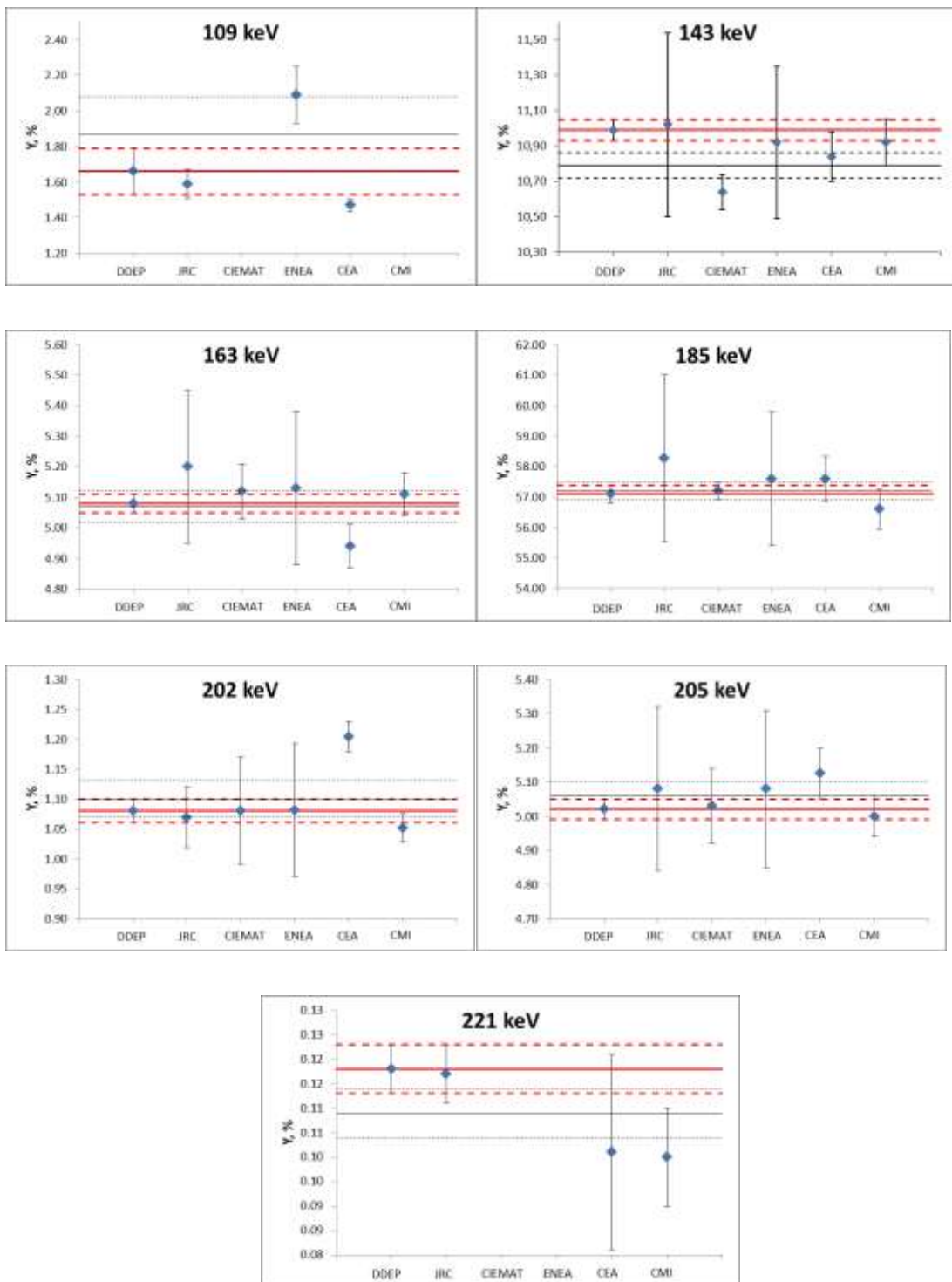
Tabuľka 24 Namerané pravdepodobnosti emisie fotónov gama v premene ^{235}U a ich neistoty

E, keV	DDEP	JRC	CIEMAT	ENEA	CEA	CMI
109	1,66(13)	1,59(8)	-	2,09(16)	1,47(3)	-
143	10,99(6)	11,02(52)	10,64(10)	10,92(43)	10,84(14)	10,92(13)
163	5,08(3)	5,20(25)	5,12(9)	5,13(25)	4,94(7)	5,11(7)
185	57,1(3)	58,3(2,7)	57,2(3)	57,6(2,2)	57,6(7)	56,6(7)
202	1,08(12)	1,07(5)	1,08(9)	1,08(11)	1,20(3)	1,05(24)
205	5,02(3)	5,08(24)	5,03(11)	5,08(23)	5,13(7)	5,01(6)
221	0,118(5)	0,117(6)	-	-	0,101(20)	0,10(1)

Pre odhad hodnoty pravdepodobností emisií bol pre každú gama čiaru použitý vážený priemer (POMMÉ & KEIGHTELY, 2015). Výsledky váženého priemeru sú vo všetkých prípadoch v rozsahu jednej alebo dvoch štandardných neistôt hodnôt pravdepodobností emisií udávaných v DDEP. V **tabuľke 25** sú porovnané odporúčané DDEP hodnoty pravdepodobností emisií žiarenia s vypočítanými **váženými priermi hodnôt pravdepodobností emisií žiarenia** získaných v rámci projektu MetroNORM a na obrázku 13 sú hodnoty zmerané jednotlivými laboratóriami znázornené graficky a porovnané s vypočítaným váženým priemerom a hodnotou DDEP.

Tabuľka 25 Hodnoty DDEP porovnané s hodnotami MetroNORM, Y – pravdepodobnosť emisie žiarenia

	DDEP	MetroNORM	Porovnanie
Energia, keV	Y	Y	Odchýlka, %
109	1,66(13)	1,87(21)	13
143	10,94(6)	10,79(7)	-1
163	5,08(3)	5,07(5)	-0,2
185	57,1(3)	57,2(3)	0,2
202	1,08(2)	1,10(3)	2
205	5,02(3)	5,06(4)	1
221	0,118(5)	0,109(5)	-8



Obrázok 13 Porovnanie laboratórnych meraní (modré body) s hodnotami vážených priemerov MetroNORM (čierne čiary) a s DDEP hodnotami (červené čiary)

V tabuľke 26 je uvedený prehľad odchýlok hodnôt pravdepodobností emisií žiarenia získaných na ČMI od hodnôt doporučených DDEP vyjadrených v percentách.

Tabuľka 26 Odchýlky hodnôt ČMI od hodnôt DDEP

Energia, keV	Odchýlka, %
109	0,2
143	-0,7
163	0,7
185	2,8
202	0,4
205	16,5
221	-8

Kritérium úspešného porovnania (vzťah 5) bolo vypočítané vzhľadom k hodnote pravdepodobnosti emisie fotónov získanej z DDEP databázy (www.nucleide.org, 1995) a k hodnotám vážených priemerov výsledkov projektu MetroNORM (tabuľka 27).

Tabuľka 27 Prehľad výsledkov medzinárodného porovnania. Kritérium úspešného porovnania

	DDEP	Priemer	DDEP	Priemer	DDEP	Priemer
	109 keV		143 keV		163 keV	
JRC	0,23	0,62	0,08	0,22	0,24	0,25
CIEMAT	-	-	1,29	0,61	0,21	0,24
ENEA	3,23	2,12	0,02	0,15	0,10	0,12
CEA	0,71	0,94	0,33	0,16	0,92	0,76
CMI	-	-	0,07	0,44	0,20	0,23
	185 keV		202 keV		205 keV	
JRC	0,21	0,20	0,09	0,26	0,12	0,04
CIEMAT	0,17	0,00	0,00	0,11	0,04	0,13
ENEA	0,11	0,09	0,00	0,09	0,13	0,04
CEA	0,33	0,26	1,66	1,18	0,72	0,43
CMI	0,38	0,46	0,53	0,69	0,15	0,42
	221 keV					
JRC	0,00	0,49				
CIEMAT	-	-				
ENEA	-	-				
CEA	0,45	0,22				
CMI	0,71	0,40				

6 Európsky výskumný projekt MRTDosimetry

Metrológia pre klinickú implementáciu dozimetrie v molekulárnej rádioterapii v skratke MRTDosimetry (www.mrtdosimetry-empir.eu, 2016) je jedným z medzinárodných výskumných projektov v rámci Európskeho metrologického programu pre inovácie a výskum (EMPIR) (www.euramet.org, 2017). Spája skúsenosti v oblasti výskumu metrológie a nukleárnej medicíny s cieľom riešiť problémy stanovenia radiačnej dávky jednotlivých pacientov, ktorí podstupujú molekulárnu rádioterapiu (MRT), známu tiež ako "cielená radionuklidová terapia" alebo "terapia nukleárnou medicínou". Projekt sa začal 1. júna 2016 a bude trvať tri roky. Hlavným cieľom projektu je klinická implementácia metrológie výpočtu absorbovanej dávky v oblasti využitia MRT. Projekt spolupracuje s mnohými európskymi klinikami zaoberajúcimi sa MRT, ako aj s rádiofarmaceutickými spoločnosťami a zameriava sa na aplikáciu výsledkov priamo na klinikách. Špecifickým cieľom projektu je stanovenie pravdepodobností emisie žiarenia pre ^{90}Y a ^{166}Ho s cieľom umožniť spresnenie kvantitatívnej zobrazovacej metódy a odhadu dávky pri použití týchto rádionuklidov. Jedným z riešiteľov projektu bol i náš Český metrologický inštitút, ktorý sa v rámci projektu zúčastnil spresňovania vybraných rádionuklidových dát v premene ^{90}Y a ^{166}Ho a vývoja metódy 3D tlače pre generovanie kvázi-realistických antropomorfných fantómov obsahujúcich časti naplniteľné zdrojmi so známou aktivitou. Keďže sa projekt venoval i spresňovaniu rádionuklidových dát, tak táto časť projektu bola riešená v rámci tejto práce.

6.1 ^{90}Y

^{90}Y sa používa ako terapeutický rádioizotop pre cieleňú radiačnú terapiu. V súčasnosti môže kalibrácia detektora s použitím ^{90}Y dosahovať neistoty presahujúce $\pm 10\%$ (VALLEY at al., 2003). ^{90}Y je pokladané za čistý beta žiarič. Schéma premeny je uvedená na obrázku 14 (www.nucleide.org, 1995).

Presné ohodnotenie ^{90}Y je prospešné pre porovnanie výsledkov liečby na celom svete a na porovnanie teoreticky vypočítaných údajov o dávke s experimentálnymi meraniami dávky. Stanovenie aktivity ^{90}Y sa určuje buď použitím nedeštruktívnych alebo deštruktívnych metód. Široko využívané nedeštruktívne metódy pre ohodnotenie ^{90}Y využívajú napr. ionizačné komory, ktoré detegujú brzdné žiarenie. Tvorba brzdného žiarenia silno závisí od materiálu zdroja, nádoby a steny komory. Ionizačný prúd závisí

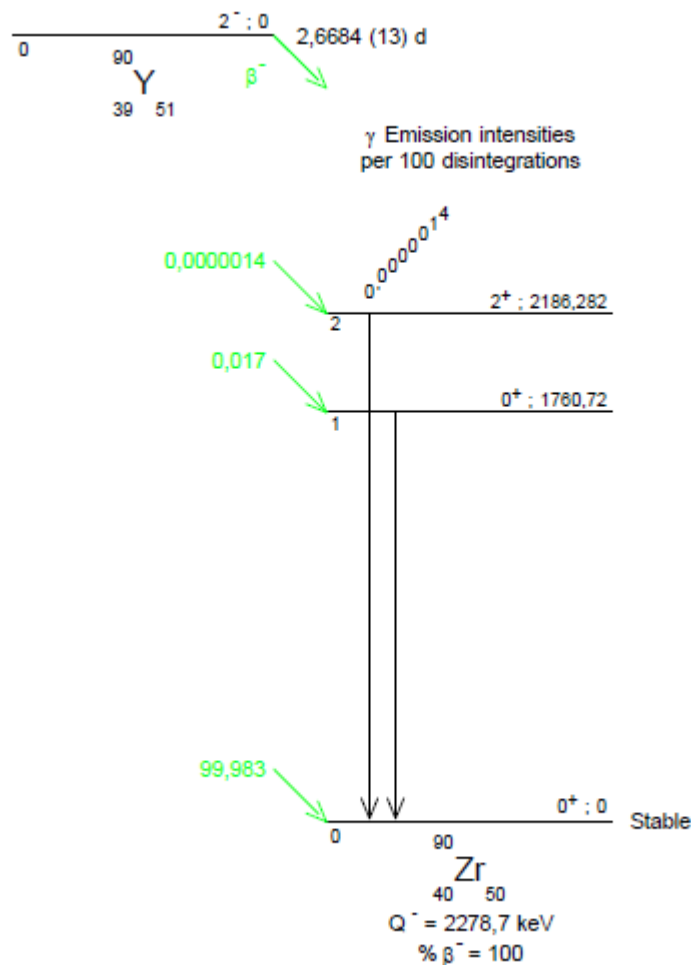
aj od pravdepodobnosti detekcia elektrónov v komore, ktorá sa líši v závislosti od energie elektrónov a konštrukcie zariadenia. Ak sa použije kalibračný faktor dodávaný výrobcom (SIEGEL at al., 2000) tak mierne odchýlky v hrúbke steny nádoby, v objeme roztoku alebo umiestnení v komore môžu viesť k zvýšeniu celkovej neistoty merania.

Kalibračné faktory sú vo všeobecnosti založené na aktivitách určených deštruktívnymi metódami, ako je kvapalná scintilačná metóda. Deštruktívne metódy sú typicky používané národnými metrologickými laboratóriami a môžu poskytnúť výsledky s neistotou až 0,40% (COURSEY at al., 1993). Avšak táto metóda predpokladá, že všetky vzorky majú identickú konštrukciu, čo v niektorých prípadoch nemusí platiť. Variácie v konštrukcii zdroja môžu viesť taktiež k chybnjej aplikácii kalibračného faktora (MO at al., 2005).

V roku 1955 Ford (FORD, 1955) predpovedal 0^+ stav ^{90}Zr a dôkaz o tom bol poskytnutý Johnsonom (JOHNSON at al., 1955), ktorý objavil prechod na úrovni 1,75 MeV spolu s pozitronmi s maximálnou energiou 800 keV. Očakávaná pravdepodobnosť emisie žiarenia prechodu z ^{90}Y na excitovaný stav ^{90}Zr bola odhadnutá na 0,11%.

Greenberg a Deutsch (GREENBERG, 1956) uskutočnili svoj prvý experimentálny pokus, v ktorom merali pravdepodobnosti konverzií elektrón-pozitron ^{90}Y detekciou anihilačných fotónov v koincidencii. Pozitrony boli navedené magneticky na berýliový terč a anihilačné fotóny vytvorené v terčíku boli detegované dvoma NaI(Tl) detektormi zapojenými v koincidencii. Pravdepodobnosť konverzií elektrón-pozitron bola stanovená na $36(9) \cdot 10^{-6}$. Tento výsledok je blízky teoretickému výpočtu (THOMAS, 1940). V snahe presne vyčíslit' predpovedané dva gama fotóny v 0^+-0^+ prechode ^{90}Zr boli uskutočnené ďalšie merania s výsledkom $34(4) \cdot 10^{-6}$ (RYDE at al. 1961), ktorý je v zhode s predchádzajúcimi meraniami. Zdroj ^{90}Y bol umiestnený medzi dva NaI(Tl) detektory a počet pozitronov bol určený z koincidenčného píku 1,022 MeV. S využitím nedeštruktívnej metódy za pomoci spektrometrie je možné túto hodnotu a neistotu vnútornej tvorby elektrón-pozitronových párov znížiť (SELWYN at al., 2007).

Popis použitej aparatury, rádionuklidových zdrojov, experimentálneho stanovenia pravdepodobnosti konverzií elektrón-pozitron v prechode 1760,7 keV ^{90}Y a výsledkov meraní bude ďalšou súčasťou dizertačnej práce.

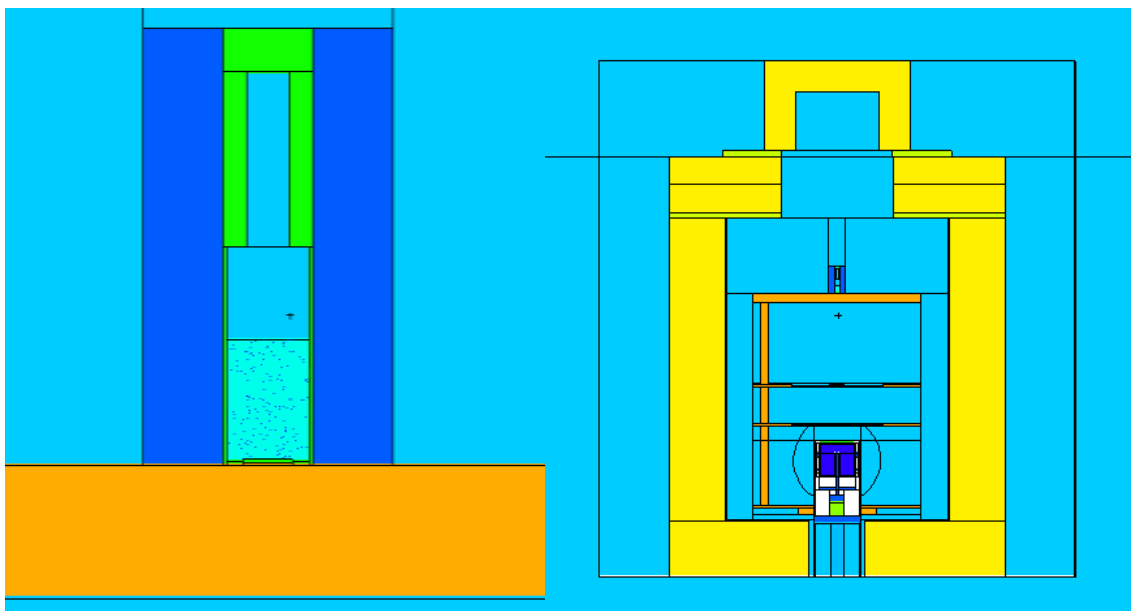


Obrázok 14 Schéma premeny ^{90}Y

6.1.1 Použitá aparatúra a rádionuklidové zdroje

Cieľom úlohy tohto projektu bolo stanoviť počet pozitron-elektrónových konverzií v prechode E0 medzi energetickou hladinou 1760,7 keV a základným stavom jadra ^{90}Zr pri premene ^{90}Y . Počet konverzií bol určený z počtu emitovaných fotónov o energii 511 keV pochádzajúcich z anihilácie pozitronov. Počet konverzií bol daný počtom emitovaných fotónov opravených na efekt anihilácie pozitronov za letu. Veľkosť tohto efektu je závislá na materiále absorbátora pozitronov. Emisia fotónov o energii 511 keV bola stanovená meraním na dvoch kalibrovaných HPGe detektoroch s použitím dvoch rôznych zdrojov. Prvým meraným zdrojom bola **ampulka s označením ERX 1604001** o objeme 1 ml naplnená roztokom ^{90}Sr v rovnováhe s ^{90}Y a o hmotnostnej aktivite $386,413 \text{ MBq}\cdot\text{g}^{-1}$ k 14.10. 2016. Hmotnosť roztoku bola 1,0447 g a celková aktivita bola $38,041 \text{ MBq}$ k 14.10. 2016. Táto ampulka bola vkladaná do valcového duralového

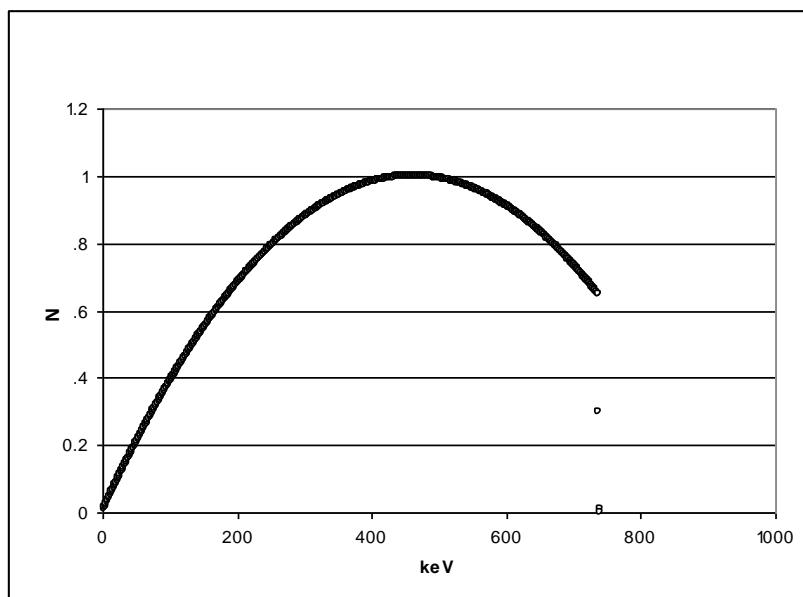
absorbátora, ktorý tesne obklopoval ampulku okrem smeru od dna. Ampulka s absorbátorom bola položená na plexi podložku o hrúbke 12,2 mm vo vzdialenosti 25 cm od okna **GC4018** detektoru a na plexi dosku o hrúbke 3 mm vo vzdialenosti 26 cm od okna detektoru **GCX**. Oba použité detektory sú koaxiálne detektory s uzavretým koncom typu p a s relatívnou účinnosťou približne 40%. Rozlíšenie pre 1332 keV je 1,9 keV pre detektor GC4018 a pre GCX detektor 1,8 keV. Elektronický reťazec pre oba detektory tvorí predzosilňovač Canberra 20002GSL a modul MCA LYNX. Druhým zdrojom bol **odparok** na polyetylénovej fólii iného roztoku ^{90}Sr v nerovnováhe s ^{90}Y označený ER3 Sr-90 1643 a vložený do plastovej misky. Dno misky bolo 7 mm hrubé a steny misky boli hrubé 10,5 mm. Odparok bol prekrytý víkom o hrúbke 15 mm. Miska bola umiestnená vo vzdialenosti 15 cm respektíve 26 cm od oboch detektorov. Zároveň bol z roztoku ER3 pripravený gravimetrickou metódou roztok pre absolútne meranie. Pre stanovenie aktivity bola použitá metóda 4π merania v prietokovom proporcionálnom počítači. Aktivita odparku v miske bola stanovená na 40,81 MBq k 1.12. 2017. V oboch experimentálnych prípadoch nastala anihilácia pozitronov v obklopujúcom materiáli zdroja. **Účinnosť detekcie fotónov s energiou 511 keV** bola stanovená výpočtom metódou **MCNP**. Ako príklad modelácie je na obrázku 15 uvedený experiment s ampulkou.



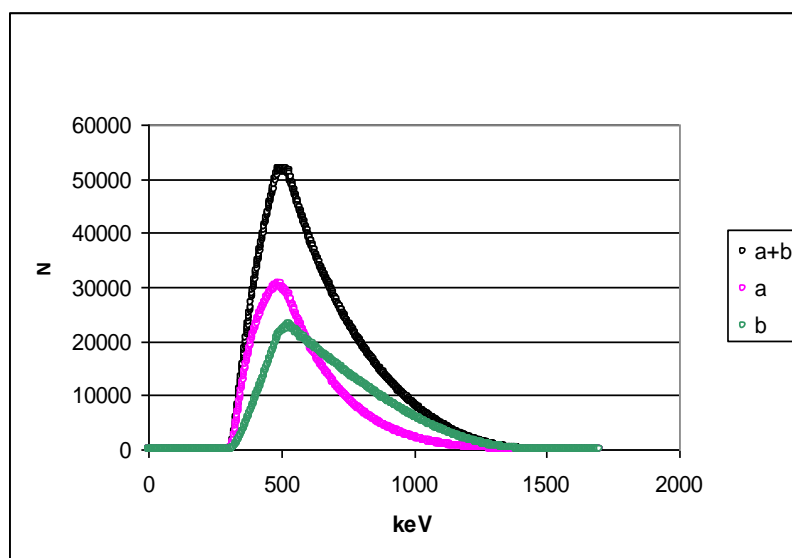
Obrázok 15 Zdroj $^{90}\text{Y}/^{90}\text{Sr}$ v ampulke a v duralovom kontajneri (MCNP metóda)

Zdrojom fotónov bolo teoretické spojité spektrum pozitronov vznikajúcich pri pozitron elektrónovej konverzii prechodu E0 z hladiny 1760,7 keV na základný stav s maximálnou energiou 738 keV ($1760 \text{ keV} - 1022 \text{ keV} = 738 \text{ keV}$) znázornené na

obrázku 16. Pozitróny boli generované homogénne v objeme aktívneho roztoku alebo odparku. Tvar spektra pozitronov je dobre aproximovaný parabolou. Tvar spektra mierne ovplyvňuje oprava na anihiláciu za letu a preto bola počítaná veľkosť opravy pre dva extrémne odlišné tvary spektra pozitronov (konštantné a lineárne rastúce). Veľkosť spektra sa menila od opravy odpovedajúcej spojitému spektru najviac o 0,3%. Podľa príslušných vzťahov (HEITLER, 1954) sa vypočítalo spektrum emitovaných fotónov za letu. Najpravdepodobnejším procesom je vznik dvoch fotónov *a* a *b* so spektrom uvedeným na obrázku 17. Celková pravdepodobnosť anihilácie pozitronu za letu a vzniku dvoch fotónov je 1,6(3)%. Pravdepodobnosť vzniku jedného či troch fotónov je zanedbateľná. Časť súčtového spektra v intervale 506 keV až 515 keV (anihilačný pík) tvorila 2,8% celkovej plochy súčtového spektra a prispieva k píku totálnej absorpcie 511 keV a je treba ju odčítať od celkovej pravdepodobnosti anihilácie za letu čo je zanedbateľné. Validácia účinnosti stanovená metódou MCNP bola uskutočnená porovnaním experimentálnych bodov a bodov získaných metódou MCNP. Experimentálna a vypočítaná účinnosť pre etalóny typu **EFS** (odparok o priemere 6 mm na polyetylénovej fólii) vo vzdialenosti 25 cm a 26 cm od okna detektora sa v rozsahu 60 keV – 1800 keV zhodovali do 0,5%. Experimenty boli uskutočnené v období od apríla do novembra 2017. Korekcia mŕtvej doby a pile-up efektu bola uskutočnená elektronicky a kontrolovaná experimentálne. Pri kontrole sa stanovila početnosť impulzov v píku 661 keV (^{137}Cs) pri meraní ampulky ERX 1604001 so zdrojom ^{137}Cs pri mŕtvej dobe 6% a potom len so zdrojom ^{137}Cs pri mŕtvej dobe 0,17%. Rozdiel v početnosti píku oboch detektorov bol menší ako 0,2%. Mŕtva doba bola pri experimentálnych meraniach na oboch detektoroch približne 6%. Stanovenie plochy píku o energii 511 keV bolo uskutočnené s použitím programu Genie 2000 a metódy Total Peak Area. FWHM píku bolo 2,6 keV.



Obrázok 16 Spojité spektrum pozitónov pri pozitón-elektrónovej konverzii

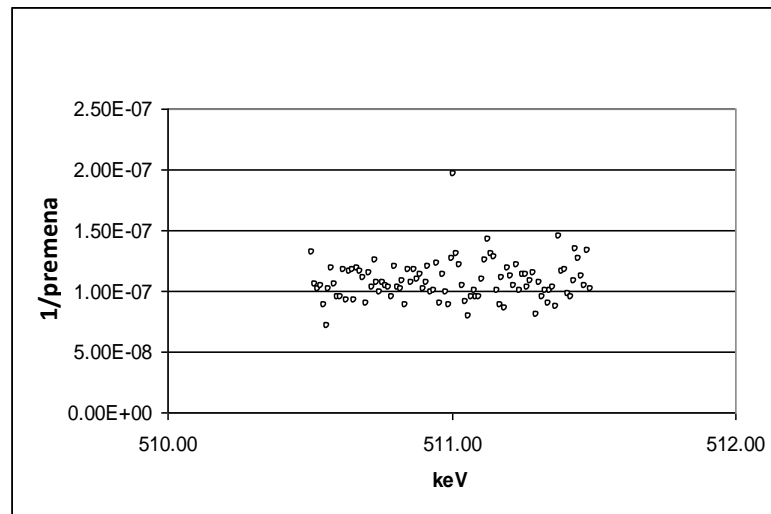


Obrázok 17 Spektrá fotónov a, b vzniknutých pri anihilácii pozitónov

6.1.2 Produkcia fotónov o energii 511 keV brzdým žiarením vzniknutým brzdením beta spektra ^{90}Y

Odhad množstva fotónov o energii 511 keV produkovaných brzdým žiarením od beta prechodu 2270 keV u ^{90}Y bol uskutočnený výpočtom metódou MCNP stanovením počtu fotónov 511 keV vonkajšou plochou duralového absorbátora a plastového absorbátora. Zdrojom bolo spektrum beta ^{90}Y . Boli počítané záznamy v úzkych intervaloch o šírke 0,1 keV. Fotóny 511 keV boli superponované na doprovodnom

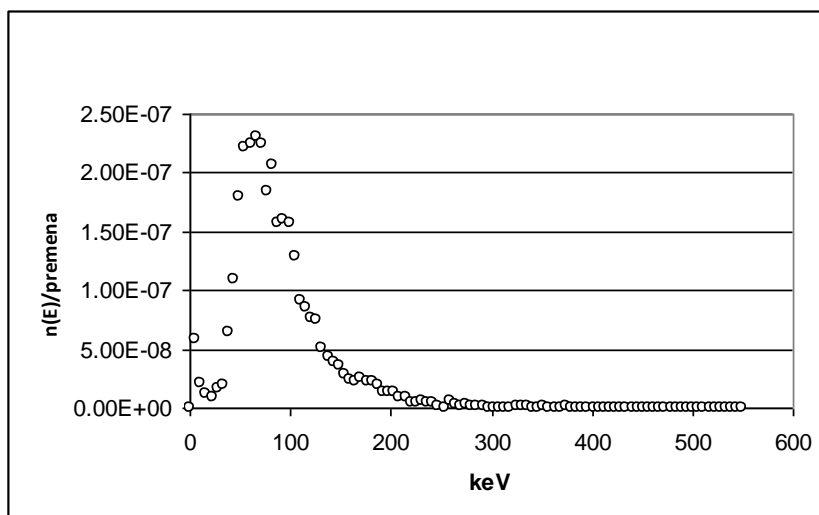
spojitom spektre brzdného žiarenia s priemernou hodnotou pre bod 511 keV rovnou $1,078 \cdot 10^{-7}$, ktorá bola odčítaná od hodnoty $1,9610^{-7}$ (záznam intervalu 511,00 keV až 511,01 keV) a výsledok je $8,9 (1,3) \cdot 10^{-8}$. Vypočítané **spektrum prejdených fotónov** je na obrázku 18. Počet fotónov 511 keV, ktoré môžu byť detekované pri meraní je polovičný a teda oprava fotónov 511 keV o fotóny budené brzdným žiarením ^{90}Y je **$4,5 \cdot 10^{-8}$ pre duralový absorbátor**. Rovnaký výpočet bol uskutočnený pre **plastový absorbátor** s odparkom. Výsledok bol $2 \cdot 10^{-8}$ na premenu a teda oprava bola **$1 \cdot 10^{-8}$ pre plastový absorbátor**. Oprava je **zanedbateľná**.



Obrázok 18 Vypočítané spektrum fotónov okolo energie 511 keV prejdených povrchom absorbátora

6.1.3 Vplyv pravých sumácií

Sum-out efekt môže nastať medzi konverznými fotónmi a brzdným žiarením produkovaným beta prechodom s maximálnou energiou 518 keV vedúcim na hladinu 1760 keV jadra ^{90}Zr . Pre zistenie veľkosti tohto efektu bol uskutočnený **MCNP** výpočet **totálnej účinnosti** detekcie brzdného žiarenia použitými detektormi. Zdrojom v modeli bolo spojité spektrum beta prechodu s maximálnou energiou 518 keV. Vypočítané spektrum brzdného žiarenia je na **obrázku 19**. Totálna účinnosť detekcie je $3,2 \cdot 10^{-6}$ a teda **oprava sum-out efektu je zanedbateľná**.



Obrázok 19 Spektrum brzdného žiarenia od beta prechodu 518 keV

6.1.4 Stanovenie počtu Q/2 fotónov

Výsledky stanovovania počtu **Q/2 fotónov s energiou 506 – 515 keV** pochádzajúcich z anihilácie pozitronov pôvodom z tvorby párov pri premene ^{90}Y a používaných pri metóde PET sú uvedené v **tabuľke 28**. Neistoty sú uvedené v tabuľke 29. Hodnota Q/2 udáva pravdepodobnosť (1/premena) procesov tvorby párov vedúcich k produkcii fotónov s energiou z intervalu 506 keV – 515 keV. Celková pravdepodobnosť tvorby párov je $1,016 \cdot Q/2$.

Tabuľka 28 Q/2 pre rôzne kombinácie detektora a zdroja

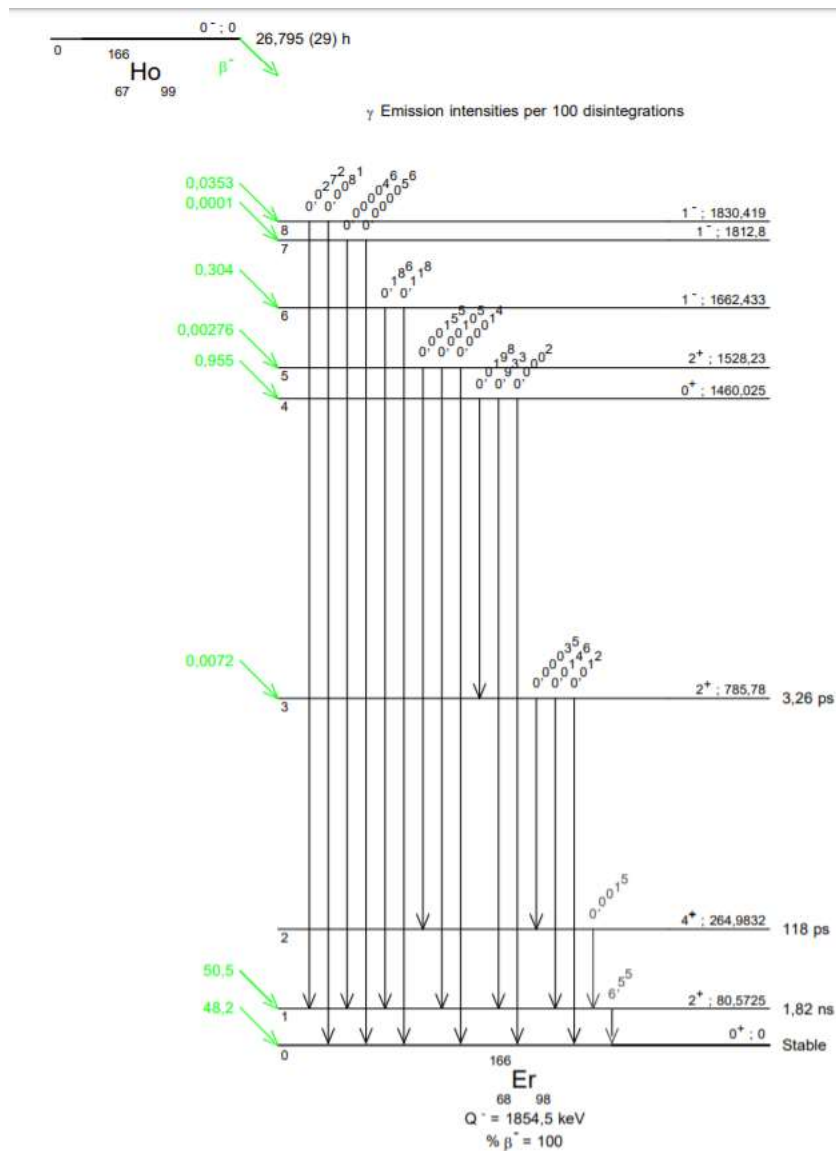
Usporiadanie	Q/2
GC4018 a ampulka	3,196E-5
GC4018 a plastová miska	3,222E-5
GCX a ampulka	3,206E-5
GCX a plastová miska	3,235E-5
Priemer	3,215E-5
Štandardná odchýlka, %	0,54

Tabuľka 29 Zdroje neistôt

Parciálna neistota	%
Type A	0,6
Aktivita	0,5
Účinnosť detekcie	0,8
Sumácie	0,0
Pile-up	0,2
Kombinovaná štandardná neistota	1,2

6.2 ^{166}Ho

^{166}Ho sa premieňa cez β -prechod s maximálnou energiou 1,8 MeV a s dobou polpremeny 26,8 hodiny. Jeho schéma premeny je znázornená na obrázku 27 (www.nucleide.org, 1995). Tieto jeho vlastnosti ho robia vhodným pre aplikáciu v medicínskej rádioterapii. V roku 2015 bolo v Európe schválené nové rádiofarmakum (QuiremSpheres[®], Quirem Medical BV) pre liečbu rakoviny pečene, založené na využití miliónov mikrosfér obsahujúcich rádioaktívny izotop ^{166}Ho . V oblasti selektívnej vnútornej radiačnej terapie (selective internal radiation therapy – SIRT) bolo nové rádiofarmakum s ^{166}Ho vyvinuté ako možná alternatíva k používaniu ^{90}Y s mikrosféricami, ktoré má rovnaký terapeutický princíp. Existujú dva druhy mikrosfér s ^{90}Y , ktoré sa v súčasnej dobe používajú na klinikách: živcové mikrosféry (SIR-Spheres, Sirtex) a sklenené mikrosféry (TheraSphere, BTG). Pretože ^{90}Y je čistý β -žiarič s maximálnou energiou 2,3 MeV a dobou polpremeny 2,67 dní, je možné použiť terapeutické zobrazovanie pomocou brzdného žiarenia SPECT alebo PET založené na produkcii e^+/e^- párov. Výhodou ^{166}Ho je následná emisia γ -žiarenia (81 keV, 52%), ktoré je pri jeho premene emitované a je ho tak možné využiť pre zobrazenie SPECT. Presnosť zobrazenia tak môže byť vylepšená pri porovnaní so zobrazením z ^{90}Y . Jednou z úloh projektu MRTDosimetry bolo vytvoriť primárne štandardy ^{166}Ho a uskutočniť nové stanovenie jadrových dát. V rámci tohto spresňovania jadrových dát sa stanovili pravdepodobnosti emisie X-fotónov a γ -fotónov. Pretože aktuálne stanovenie doby polpremeny 26,795(29) hodín (www.nucleide.org, 1995) vychádza iba z niekoľkých hodnôt, tak sa uskutočnilo i meranie doby polpremeny tohto rádionuklidu.



Obrázok 27 Schéma premeny ^{166}Ho

6.2.1 Použitá aparátúra

Merania boli uskutočnené s tromi spektrometrickými systémami (1.: HPGe detektor **GCX**, rozlíšenie 1,8 keV pre 1332 keV, relatívna účinnosť 41%, predzosilňovač 2002CSL pripojený k modulu MCA LYNX; 2.: HPGe detektor **GC4018**, rozlíšenie 1,8 keV pre 1332 keV, relatívna účinnosť 40%, predzosilňovač 2002CSL pripojený k modulu MCA LYNX; 3.: HPGe detektor **BEGe**, rozlíšenie 1,9 keV pre 1332 keV, relatívna účinnosť 48%, uhlíkové vstupné okienko, predzosilňovač 2002CSL pripojený k modulu MCA LYNX). Korekcie mŕtvej doby a pile-up efektu boli uskutočnené elektronicky a pri všetkých meraniach boli menšie ako 0,5%. Účinnosť detekcie fotónov

bola počítaná Monte Carlo metódou s použitím **MCNP** kódu. Metóda bola validovaná porovnaním s výsledkami merania zdrojov vo vzdialenosti 26 cm (GCX) a 25 cm (GC4018 a BEGe).

6.2.2 Primárna štandardizácia ^{166}Ho a príprava vzoriek

Pre stanovenie aktivity bola použitá $4\pi(\text{PC})\beta\text{-}\gamma$ koincidenčná metóda s extrapoláciou účinnosti. Koincidenčný merací systém pozostával z valcového proporcionálneho počítača (2x (18 mm x 64 mm)) v prietokovom režime s využitím metánu pri atmosférickom tlaku a z dvoch NaI(Tl) detektorov. Gama okno bolo nastavené okolo píku s energiou 88keV. Postupne sa zmeralo 15 vzoriek. Aktívny roztok ($15,9 \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ $\text{Ho}(\text{NO}_3)$ v jednomolárnom roztoku HNO_3) bol nakvapkaný na pozlátenu VYNS fóliu ošetrenú Ludoxom a inzulínom. Zlaté fólie boli použité i na prekrytie týchto zdrojov a tak sa získala rôzna účinnosť detekcie potrebná pre extrapoláčnú metódu kde sa do grafu vniesla závislosť $N\beta N\gamma/N_c$ na $(1-N_c/N_\gamma)/N_c/N_\gamma$. Extrapoláčná krivka mala sklon 0,473(18). Zdroje neistôt sú uvedené v tabuľke 30.

Tabuľka 30 Zdroje neistôt

Zdroj neistoty	u (%)
Štatistika	0,06
Extrapoláčná metóda	0,08
Váženie	0,1
Mŕtva doba	0,01
Pozadie	0,02
Korekcia na premenu	0,08
Kombinovaná štandardná neistota	0,16

Následne boli vytvorené dva bodové zdroje typu **EFS**. Aktivita bola nanosená medzi dve polyetylénové fólie o hrúbke 0,2 mm. Nominálna aktivita k referenčnému dátumu bola 3 MBq.

6.2.3 Stanovenie pravdepodobnosti emisie fotónov gama s energiou 80 keV

Každý **EFS** zdroj bol meraný na každom z detektorov pri rovnakej vzdialenosti od detektora aká bola použitá pre jeho kalibráciu. Pre každú kombináciu zdroja a detektora

bolo zaznamenaných niekoľko spektier. Živá doba každého merania bola 1000 s. Pre stanovenie plochy píku bola použitá Total Peak Area (TPA) metóda ktorá je súčasťou softwaru GENIE 2000. Mŕtva doba GC4018 detektora a GCX detektora sa pohybovala od 0,8% do 1,9%. V prípade BEGe detektora dosahovala kvôli detekcii beta žiarenia hodnoty od 5,8% po 12,1%. Pile-up korekcia mala preto v tomto prípade väčšiu neistotu. Merania na BEGe detektore boli taktiež opravené na **summing-out** efekt (0,206%) kvôli koincidencii beta žiarenia o maximálnej energii $E_{\max} = 1774$ keV. Taktiež bola vypočítaná rovnaká korekcia pre detektory GC4018 a GCX (0,001%). Kvôli krátkej dobe polremeny bola uskutočnená i **korekcia na premenu počas merania K_a , prepočet k referenčnému času K_b , a korekcia na premenu počas mŕtvej doby K_c .**

$$K_a = \left(\frac{\tau_{1/2}}{\ln(2) * \tau_r} \right) * \left(1 - \exp \left(- \frac{\ln(2)}{\frac{\tau_r}{\tau_{1/2}}} \right) \right) \quad \text{Vzťah 8}$$

$$K_b = \exp \left(- \ln(2) * \frac{\tau_0 - \tau_{ref}}{\tau_{1/2}} \right) \quad \text{Vzťah 9}$$

$$K_c = \exp \left(- \ln(2) * \frac{\tau_r - \tau_l}{\tau_{1/2}} \right) \quad \text{Vzťah 10}$$

kde: $\tau_{1/2}$ je doba polpremeny ^{166}Ho ,

τ_r je reálna doba merania,

τ_l je živá doba merania,

τ_0 je začiatok doby merania,

τ_{ref} je referenčný čas.

Pravdepodobnosť emisie žiarenia fotónov o energii 80 keV bola následne vypočítaná podľa vzťahu 11.

$$Y(80 \text{ keV}) = K_c P(80) / (A_0 K_b K_a K_l \varepsilon(80 \text{ keV})) \quad \text{Vzťah 11}$$

kde: $P(80)$ je plocha píku o energii 80 keV opravená na koincidenčné sumácie,

A_0 je aktivita zdroje v referenčnom čase,

$\varepsilon(80 \text{ keV})$ je detekčná účinnosť píku totálnej absorpcie pre fotóny o energii 80 keV.

Výsledky meraní pravdepodobnosti emisie fotónov o energii 80 keV na všetkých troch detektoroch sú uvedené v tabuľkách 31 a 32.

Tabuľka 31 Pravdepodobnosť emisie fotónov o energii 80 keV pre každé meranie

Detektor/zdroj	Y(80)	K_a	K_b	K_c
GC4018/1	0,065974	0,99636	1,02938	0,99987
GC4018/1	0,066082	0,99636	1,02084	0,99988
GC4018/1	0,066010	0,99636	1,101183	0,99988
GC4018/1	0,066025	0,99636	0,093008	0,99989
GC4018/1	0,066248	0,99636	0,92281	0,99989
GC4018/1	0,066110	0,99636	0,91521	0,99989
GC4018/1	0,066062	0,99639	0,53656	0,99993
GC4018/1	0,066000	0,99639	0,52781	0,99993
GC4018/1	0,066202	0,99639	0,52125	0,99994
GC4018/2	0,066111	0,99635	0,96173	0,99986
GC4018/2	0,066189	0,99635	0,95031	0,99986
GC4018/2	0,066130	0,99635	0,93909	0,99986
GC4018/2	0,066521	0,99638	0,56182	0,99992

GC4018/2	0,066261	0,99638	0,55663	0,99992
GC4018/2	0,066220	0,99638	0,54307	0,99992
GCX/1	0,066150	0,99637	0,99355	0,99990
GCX/1	0,066340	0,99637	0,98175	0,99990
GCX/1	0,066718	0,99637	0,97313	0,99990
GCX/1	0,066563	0,99639	0,57833	0,99994
GCX/1	0,065876	0,99639	0,57222	0,99994
GCX/1	0,066351	0,99639	0,56773	0,99994
GCX/2	0,066005	0,99636	1,02626	0,99987
GCX/2	0,066311	0,99636	1,01268	0,99988
GCX/2	0,66490	0,99636	1,00475	0,99988
GCX/2	0,066059	0,99636	0,93012	0,99989
GCX/2	0,066369	0,99636	0,92263	0,99989
GCX/2	0,066445	0,99636	0,91504	0,99989
GCX/2	0,066196	0,99639	0,53644	0,99993
GCX/2	0,066199	0,99639	0,52771	0,99993
GCX/2	0,066329	0,99639	0,52143	0,99994
BEGe/1	0,066481	0,99604	0,96139	0,99924
BEGe/1	0,066452	0,99605	0,95052	0,99925
BEGe/1	0,066445	0,99605	0,93930	0,99926
BEGe/1	0,066497	0,99619	0,56200	0,99954

BEGe/1	0,066758	0,99619	0,55675	0,99955
BEGe/1	0,066370	0,99620	0,54315	0,99956
BEGe/2	0,066869	0,99593	0,99338	0,99901
BEGe/2	0,066869	0,99593	0,98153	0,99902
BEGe/2	0,066697	0,99594	0,97288	0,99903
BEGe/2	0,066617	0,99613	0,57831	0,99943
BEGe/2	0,066759	0,99614	0,57226	0,99943
BEGe/2	0,066793	0,99614	0,56752	0,99944

Tabuľka 32 Priemerné pravdepodobnosti emisie fotónov o energii 80 keV pre každý detektor

Detektor	Y(80)	Štandardná odchýlka, %
GC4018	0,066143	0,30
GCX	0,066293	0,33
BEGe	0,066560	0,27

Priemerná pravdepodobnosť emisie fotónov o energii **80 keV** získaná z výsledkov meraní na všetkých troch detektoroch je **0,0663(3)**. Zdroje neistôt sú uvedené v tabuľke 33.

Tabuľka 33 Zdroje neistôt stanovenia pravdepodobnosti emisie fotónov o energii 80 keV

Parciálna neistota										Kombinovaná štandardná neistota
	Typ A	Aktivita	Účinnosť detekcie	Plocha píku	Pile-up	Summing-out	Čas	Doba polpremeny	Váženie	
%	0,41	0,16	0,5	0,2	0,1	0,01	0,01	0,1	0,2	0,74

6.2.4 Stanovenie pravdepodobnosti emisie fotónov XK a gama o energii 1379 keV, 1581 keV a 1662 keV

Plocha píkov o energii 1379 keV, 1581 keV a 1662 keV bola určená funkciou Total Peak Area (TPA) v programe GENIE 2000. Pravdepodobnosť emisie fotónov bola vypočítaná na základe vzťahov 8-11. Plochy píkov XK fotónov boli určené taktiež v programe GENIE 2000 avšak dablet píkov $K\alpha$ a $K\beta$ boli fitované dvojitou Gausovskou krivkou s lineárnym pozadím. Výsledky pravdepodobnosti emisie fotónov o energiách **1379 keV, 1581 keV a 1662 keV** a ich príslušné neistoty sú uvedené v **tabuľkách 34 a 35**.

Tabuľka 34 Pravdepodobnosti emisie fotónov o energiách 1379 keV, 1581 keV a 1662 keV

Detektor	Y(1379)	Y(1581)	Y(1662)
GC4018	0,009153(203)	0,001814(71)	0,001162(54)
GCX	0,009058(198)	0,001813(59)	0,001165(41)
BEGe	0,008854(252)	0,001773(69)	0,001164(55)

Tabuľka 35 Zdroje neistôt stanovenia pravdepodobnosti emisie fotónov o energiách 1379 keV, 1581 keV a 1662 keV

Neistota	GC4018	GCX	BEGe	GC4018	GCX	BEGe	GC4018	GCX	BEGe
	1379	1379	1379	1581	1581	1581	1662	1662	1662
%									
Typ A	1,78	1,73	2,52	3,68	2,97	3,68	4,47	3,22	4,5
Aktivita	0,16	0,16	0,16	0,16	0,16	0,16	0,16	0,16	0,16
Účinnosť	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7
Plocha	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2
Pile-up	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
Summing-out	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01

Čas	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
Doba polpremeny	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
Váženie	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2
Kombinovaná štandardná neistota	2,22	2,18	2,85	3,91	3,26	3,91	4,66	3,48	4,69

Rovnakým spôsobom boli určené pravdepodobnosti emisie fotónov $K_{\alpha 2}$ (48,22 keV), $K_{\alpha 1}$ (49,13 keV), $K_{\beta 1}$ (55,74 keV) a $K_{\beta 2}$ (57,31 keV). Výsledky spolu s neistotami sú uvedené v tabuľkách 36 a 37.

Tabuľka 36 Pravdepodobnosti emisie fotónov $K_{\alpha 2}$ (48,22 keV), $K_{\alpha 1}$ (49,13 keV), $K_{\beta 1}$ (55,74 keV) a $K_{\beta 2}$ (57,31 keV)

Detektor	Y($K_{\alpha 2}$)	Y($K_{\alpha 1}$)	Y($K_{\beta 1}$)	Y($K_{\beta 2}$)
GC4018	0,02960(59)	0,05082(106)	0,01635(31)	0,00418(10)
GCX	0,02975(58)	0,05091(122)	0,01656(37)	0,00412(16)
BEGe	0,02929(35)	0,05310(64)	0,01676(20)	0,00446(6)

Tabuľka 37 Zdroje neistôt stanovenia pravdepodobnosti emisie fotónov $K_{\alpha 2}$ (48,22 keV), $K_{\alpha 1}$ (49,13 keV), $K_{\beta 1}$ (55,74 keV) a $K_{\beta 2}$ (57,31 keV)

	GC4018	GCX	BEGe	GC4018	GCX	BEGe
Neistota, %	$K_{\alpha 2}$ (48,22 keV)	$K_{\alpha 2}$ (48,22 keV)	$K_{\alpha 2}$ (48,22 keV)	$K_{\alpha 1}$ (49,13 keV)	$K_{\alpha 1}$ (49,13 keV)	$K_{\alpha 1}$ (49,13 keV)
Typ A	1,05	1,02	0,36	1,16	1,73	0,41
Aktivita	0,16	0,16	0,16	0,16	0,16	0,16
Účinnosť	1,3	1,3	0,5	1,3	1,3	0,5
Plocha píku	1	1	1	1	1	1

Pile-up	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
Summing-out	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
Čas	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
Doba polpremeny	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
Váženie	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2
Kombinovaná štandardná neistota	1,97	1,95	1,21	2,03	2,40	1,23
	GC4018	GCX	BEGe	GC4018	GCX	BEGe
Neistota, %	$K_{\beta 1}$	$K_{\beta 1}$	$K_{\beta 1}$	$K_{\beta 2}$	$K_{\beta 2}$	$K_{\beta 2}$
	(55,74 keV)	(55,74 keV)	(55,74 keV)	(57,31 keV)	(57,31 keV)	(57,31 keV)
Typ A	0,98	1,50	0,33	1,66	3,44	0,57
Aktivita	0,16	0,16	0,16	0,16	0,16	0,16
Účinnosť	1,3	1,3	0,5	1,3	1,3	0,5
Plocha píku	1	1	1	1	1	1
Pile-up	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
Summing-out	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
Čas	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
Doba polpremeny	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
Váženie	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2
Kombinovaná štandardná neistota	1,93	2,24	1,20	2,35	3,82	1,29

6.2.5 Meranie doby polpremeny ^{166}Ho

Meranie doby polpremeny ^{166}Ho sa uskutočnilo za pomoci zdrojov použitých i na určenie jeho pravdepodobnosti emisie fotónov. Na experiment boli použité detektory **GCX** a **GC4018**. Geometria merania bola zvolená tak, aby mŕtva doba neprekročila hodnotu 3,5%. Počas experimentu boli zaznamenávané hodnoty pre reálnu dobu merania T_r , živú dobu merania T_l , čas začiatku merania T_0 a nameraná plocha píku P_{exp} . Pre každý čas T_0 bola vypočítaná opravená plocha píku P_{cor} podľa vzťahu 12.

$$P_{cor} = P_{exp} * K_C / (T_1 * K_a) \quad \text{Vzťah 12}$$

kde: K_a je korekcia na premenu počas merania (vzťah 8),

K_C je korekcia na premenu počas mŕtvej doby merania (vzťah 10).

Vzťah medzi P_{cor} a T_0 bol fitovaný exponenciálnou funkciou, z ktorej sa získala doba polpremeny $T_{1/2}$ pre ^{166}Ho . Hodnoty K_a a K_C , ktoré závisia na dobe polpremeny, boli určené pre $T_{1/2} = 26,824$ hod. Je dokázané, že odchýlka tejto hodnoty o 0,5% vedie k odchýlke meranej hodnoty $T_{1/2}$ o 10^{-5} . Preto nie je nutné hodnotu $T_{1/2}$ modifikovať. Namerané hodnoty doby polpremeny ^{166}Ho s použitím dvoch detektorov sú uvedené v tabuľke 38 a príslušné neistoty v tabuľke 39.

Tabuľka 38 Výsledky merania doby polpremeny ^{166}Ho

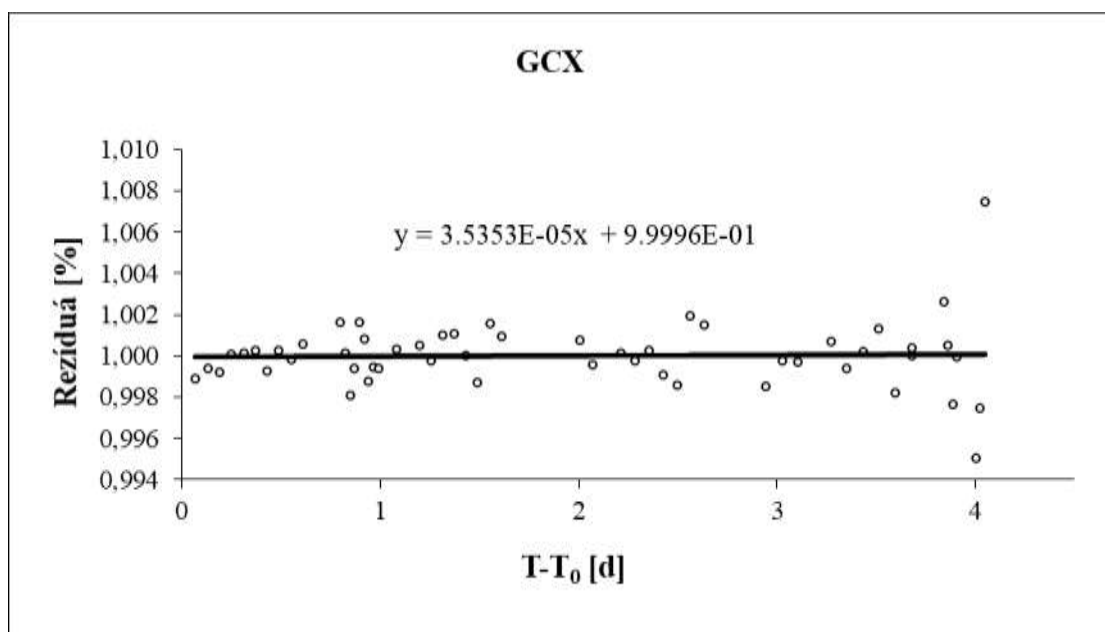
Detektor	$T_{1/2}$ (hod.)
GCX	26,8281(282)
GC4018	26,8638(296)

Tabuľka 39 Zdroje neistôt stanovenia doby polpremeny ^{166}Ho

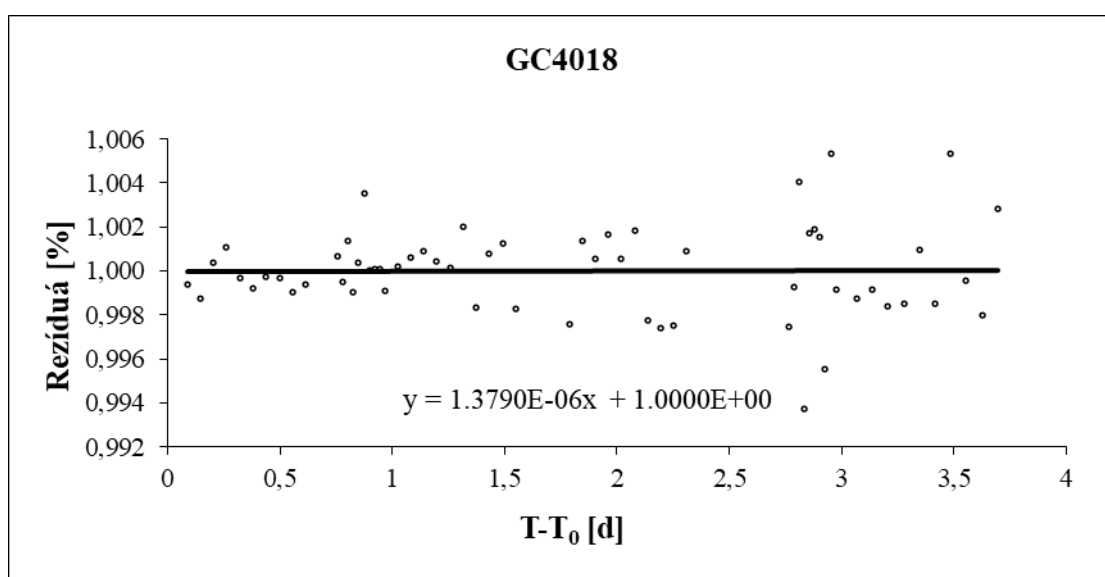
Neistota, %	GCX	GC4018
Typ A	0,0316	0,0391
Pile-up	0,1	0,1

K_a a K_c	0,001	0,001
Čas	0,001	0,001
Kombinovaná štandardná neistota	0,105	0,110

Obrázky 21 a 22 znázorňujú relatívne rezíduá meraných dát a exponenciálnej funkcie prelozenej týmito dátami v prípade merania na detektore GCX a GC4018.



Obrázok 21 Relatívne rezíduá experimentálneho fitu nameraných dát získaných na detektore GCX



Obrázok 22 Relatívne rezíduá experimentálneho fitu nameraných dát získaných na detektore GC4018

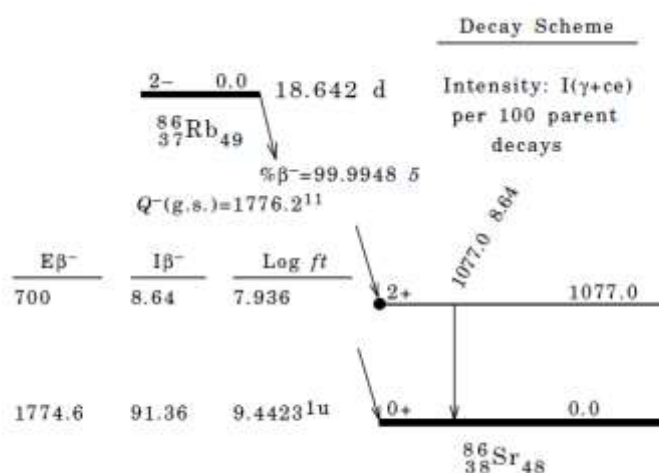
7 Stanovenie jadrových dát v rámci ČMI

7.1 ^{86}Rb

Rádionuklid ^{86}Rb je krátko žijúci rádionuklid s dobu polpremeny 18,6 dní, energiou fotónov gama 1077 keV a pravdepodobnosťou emisie žiarenia gama okolo 9%. Dostupných je iba niekoľko hodnôt jadrových dát tohto rádionuklidu (tabuľka 40) (KOCHER, 1981; BÉ at al., 1995; NEGRET & SINGH, 2015; Mini Table of Radionuclides, 2015) a niektoré údaje pre tento rádionuklid v tabuľkách DDEP chýbajú. To je dôvod, prečo bol tento rádionuklid vybraný pre ohodnotenie jadrových dát v rámci tejto práce. Výsledky meraní boli publikované v impaktovanom časopise a na tvorbe článku som sa podieľala ako hlavný autor (MAZÁNOVÁ, 2016). ^{86}Rb sa premieňa beta premenou na ^{86}Sr podľa obrázka 23 (NEGRET & SINGH, 2015).

Tabuľka 40 Prehľad publikovaných jadrových dát

Jadrové dáta	Rok	Hodnota	Zdroj
Doba polpremeny [dni]	1981	18.66 (3)	Kocher D. C.
	2014	18.64 (2)	Bé M M et al
	2015	18.642 (18)	Negret A., Singh B.
Energia [keV]	1981	1076.63 (10)	Kocher, D. C.
	2015	1076.78 (5)	Bé M M et al
Pravdepodobnosť emisie žiarenia [%]	1981	8.78 (6)	Kocher, D. C.
	2015	8.71 (5)	Bé et al



Obrázok 23 Schéma premeny ^{86}Rb

^{86}Rb sa využíva napríklad v ekológii. Rýchlosť metabolizmu zvierat'a je meradlom energetického výdaja daného zvierat'a a odráža jeho životné potreby. Metabolická rýchlosť môže byť zmeraná veľmi ľahko v laboratóriu s použitím kalorimetra, ktorý zmeria teplo vyprodukované zvierat'om. Problémom je určiť metabolizmus voľne pohybujúcich sa zvierat v ich prirodzenom prostredí. ^{86}Rb sa používa ako alternatíva k monitorovaniu rýchlosti metabolizmu v laboratóriu (TOMLINSON at al., 2014). Existuje predpoklad, že telo spracováva rubídium podobným spôsobom ako spracováva draslík, pretože rubídium je alkalický kov s jedným elektrónom vo svojej vonkajšej vrstve (skupina I) a nachádza sa v periodickej tabuľke pod draslíkom. Rýchlosť metabolizmu sa za pomoci ^{86}Rb meria v priebehu niekoľkých dní. Tieto merania si vyžadujú presnú znalosť jadrových dát ^{86}Rb , avšak momentálne je nedostatok výsledkov meraní jadrových dát práve pre tento rádionuklid.

7.1.1 Primárna štandardizácia ^{86}Rb a príprava vzoriek

Rádionuklidové centrum POLATOM (Poľsko) dodalo ČMI rádiochemicky čistý rubídium chlorid s nominálnou hodnotou 37 MBq. Vzorka s objemom 0,125 ml bola umiestnená v ampulke. Pred použitím bol roztok rubídium chloridu (20 mg l^{-1}) nariadený v chemickom laboratóriu ČMI na $1,65 \text{ MBq g}^{-1}$ s pridaním $3 \text{ g l}^{-1} \text{ HCL}$. Časť roztoku s hmotnosťou 1 g bola odobraná do ampulky s objemom 1 ml, ktorá bola použitá na meranie doby polpremeny. Z roztoku boli taktiež pripravené ďalšie tri bodové zdroje pre meranie pravdepodobnosti emisie žiarenia gama a merania energie. Posledným zdrojom vytvoreným z tohto roztoku bol odparok kvapky roztoku použitý pre gama spektrometrické meranie a zistenie prítomnosti nečistôt s použitím HPGe detektora.

Roztok bol následne znovu rovnakým spôsobom zriedený a použitý pre absolútne stanovenie aktivity. Pre tento účel bolo zhotovených 15 bodových zdrojov. Neistota váženia bola 0,01% pre všetky prípady. Aktivita roztoku ^{86}Rb bola meraná extrapoláčnou metódou účinnosti v **$4\pi\beta\text{-}\gamma$ koincidenčnom systéme** s proporcionálnym počítačom v β -kanále a dvoma NaI(Tl) detektormi v γ -kanále. Vzťah 13 predstavuje všeobecný vzťah pre určenie aktivity s využitím účinnostnej extrapoláčnej metódy (SOCHOROVÁ at al., 2008).

$$\frac{N_{\beta}N_{\gamma}}{N_C} = N_0(1 + sk_{\varepsilon})$$

Vzťah 13

kde:

$$s = \frac{1 - \varepsilon_{\beta}}{\varepsilon_{\beta}},$$

$N_{\beta}, N_{\gamma}, N_C$ sú početnosti v β, γ a koincidenčnom kanále opravené na pozadie, mŕtvu dobu a náhodné koincidencie,

N_0 je aktivita zdroja,

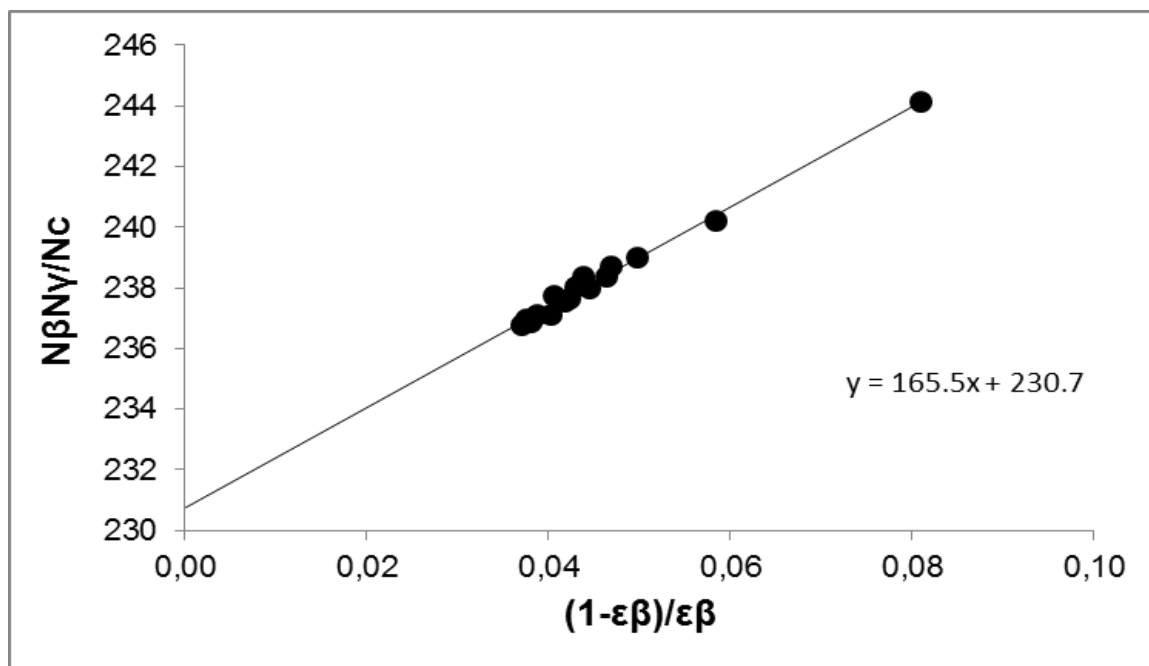
k_{ε} je sklon lineárnej extrapolácie,

$\varepsilon_{\beta} = N_C / N_{\gamma}$ je detekčná účinnosť β častíc v proporcionálnom počítači.

Sklon extrapoláčnej krivky závisí na účinnosti detekcie žiarenia γ v proporcionálnom počítači a na detekčnej účinnosti β -prechodu do základného stavu.

4 π (PC)- γ koincidenčný systém pozostáva z nerezového 4 π cylindrického (18 mm x \emptyset 64 mm) prietokového proporcionálneho počítača (PC) plneného metánom pri atmosférickom tlaku a z detekčnej jednotky pre žiarenie γ pozostávajúcej z dvoch protiľahlých NaI(Tl) detektorov namontovaných tesne pri PC. Energetické okno v γ -kanále sa nastavilo na pík 1077 keV.

Zdroje boli pripravené nakvapkaním 20-50 mg aktívneho roztoku na vodivú fóliu (zlatom prekryté VYNS fólie $\sim 40 \mu\text{g cm}^{-2}$) ošetrovanú Ludoxom a inzulínom. Hodnota pomeru N_C/N_{γ} pre súbor zdrojov s rôznymi hmotnosťami roztoku bola v rozmedzí od 0,92 až 0,97. Tieto hodnoty boli postačujúce pre **účinnosťnú extrapoláciu**. Typická extrapoláčna krivka získaná z jednotlivých meraní je na obrázku 24. Linearita bola skontrolovaná výpočtom pre rôzne účinnosťné rozsahy. Zistené odchýlky neprekročili 0,1%. Výsledná hodnota aktivity bola určená s kombinovanou štandardnou neistotou **0,35%** (tabuľka 41).



Obrázok 24 Účinnosť extrapolácia pre ^{86}Rb

Tabuľka 41 Zdroje neistôt vo výpočte aktivity

Parciálna neistota	%
Neistota typu A	0,12
Neistota typu B	
Váženie	0,01
Pozadie	0,02
Mŕtva doba	0,01
Rozlišovacia doba	0,01
Gandyho efekt	0,01
Pile-up	0,01
Extrapolácia	0,24
Doba polpremeny	0,05
Nečistoty	0,02
Kombinovaná štandardná neistota	0,35

7.1.2 Meranie doby polpremeny ^{86}Rb

Prvé meranie sa spustilo na konci Januára 2015 a všetky merania boli dokončené 6. Marca 2015 – doba experimentu bola dlhá približne dve doby polpremeny ^{86}Rb . Dátum 27. Január bol určený ako referenčný čas T_0 . Doba naberania spektra bola vždy

nastavená na živú dobu 150 000 s. Počiatočná početnosť bola 600 imp. s^{-1} a pozadie bolo 20 imp. s^{-1} . Premena 1 g roztoku s ^{86}Rb v ampulke bol meraný s HPGe detektorom umiestneného vo vnútri tienenia z olova, kadmia a medi. Detektor má hliníkové okienko, priemer kryštálu 63 mm, aktívny objem 184 cm^3 a relatívnu detekčnú účinnosť 40%. Vzorka bola udržiavaná vo fixnej vzdialenosti od vika detektora. Energetický spektrometrický systém pozostával z HPGe detektora **GCX** s modelom kryostatu 7500SL a predzosilňovača 2002CSL. Dáta boli zaznamenávané s digitálnym signálovým analyzátorom Lynx od výrobcu CANBERRA. Korekcia mŕtvej doby bola uskutočnená programom Genie 2000 (doba nábehu $5,6 \mu\text{s}$ a plochým vrcholom $0,8 \mu\text{s}$) pomocou predĺženia živej doby merania.

7.1.3 Stanovenie pravdepodobnosti emisie fotónov gama s energiou 1077 keV

Meranie sa uskutočnilo s gama spektrometrickým systémom pozostávajúcim z HPGe detektora **GC4018** a digitálneho analyzátora signálov Lynx vyrobeného firmou CANBERRA (dĺžka kryštálu 63 mm, priemer 60,5 mm, relatívna účinnosť detektora 40%, rozlíšenie 1,8 keV (FWHM) pre 1,33 MeV žiarenie gama a 0,75 keV (FWHM) pre 122 žiarenie gama z ^{60}Co). Tienenie pozostáva z olovených kociek s hrúbkou 10 cm, 0,1 cm hrubej vrstvy Cd a z 0,1 cm hrubej mosadznej vrstvy. Toto tienenie slúži na zníženie pozadia od γ -žiarenia pochádzajúceho z okolitého prostredia. Detektor sa energeticky kalibroval so zdrojom ^{152}Eu . S využitím **MCNP** kódu sa vypočítala piková účinnosť 0,0643(1)% pre energiu žiarenia gama 1077 keV. Model tohto detektoru so zdrojom **EFS** sa na ČMI štandardne využíva pre výpočet účinností. Pre vytvorenie modelu detektora v MCNP bol využitý röntgenový snímok detektora vyhotovený na ČMI. Následne sa pripravil **set troch bodových zdrojov**. Tieto vzorky sa merali na HPGe detektore GC4018 vo vzdialenosti 25 cm od okienka detektora so živou dobou merania od 3 000 do 7 000 s. Druhá vzorka bola meraná ešte päťkrát so živou dobou merania 50 000 s. Neistota početnosti zaznamenaných udalostí vo fotopíku 1077 keV bola menšia ako 0,7%. Spolu bolo získaných 23 spektier: šesť pre prvú vzorku s počiatočnou aktivitou 126,9 keV, jedenásť pre druhú vzorku s aktivitou 122,1 keV a šesť pre tretiu vzorku s aktivitou 119,6 keV. Spektrometrický systém bol riadený s programom CANBERRA GENIE 2000. Počas experimentu nebol zaznamenaný žiaden významný príspevok od interferujúcich píkov, pretože vzorka bola bez nečistôt.

7.1.4 Meranie energie žiarenia gama

Tieto jadrové dáta boli určené experimentálne z meraní bodových zdrojov (tie isté zdroje ako v kapitole 7.1.3) na HPGe detektore **GC4018**. Vykonalo sa päť sérií meraní za rovnakých experimentálnych podmienok a každé meranie bolo so živou dobou merania 5 000 s a so vzdialenosťou zdroj-detektor 25 cm. V každej sérii meraní sa odmerali bodové zdroje so známymi energiami žiarenia gama (^{60}Co , ^{65}Zn , ^{88}Y (iba 898 keV), ^{137}Cs a ^{54}Mn) (www.nucleide.org, 1995), ktoré sa následne použili na určenie energie žiarenia gama od ^{86}Rb . Pozície píkov boli analyzované so softvérom CANBERRA GENIE 2000.

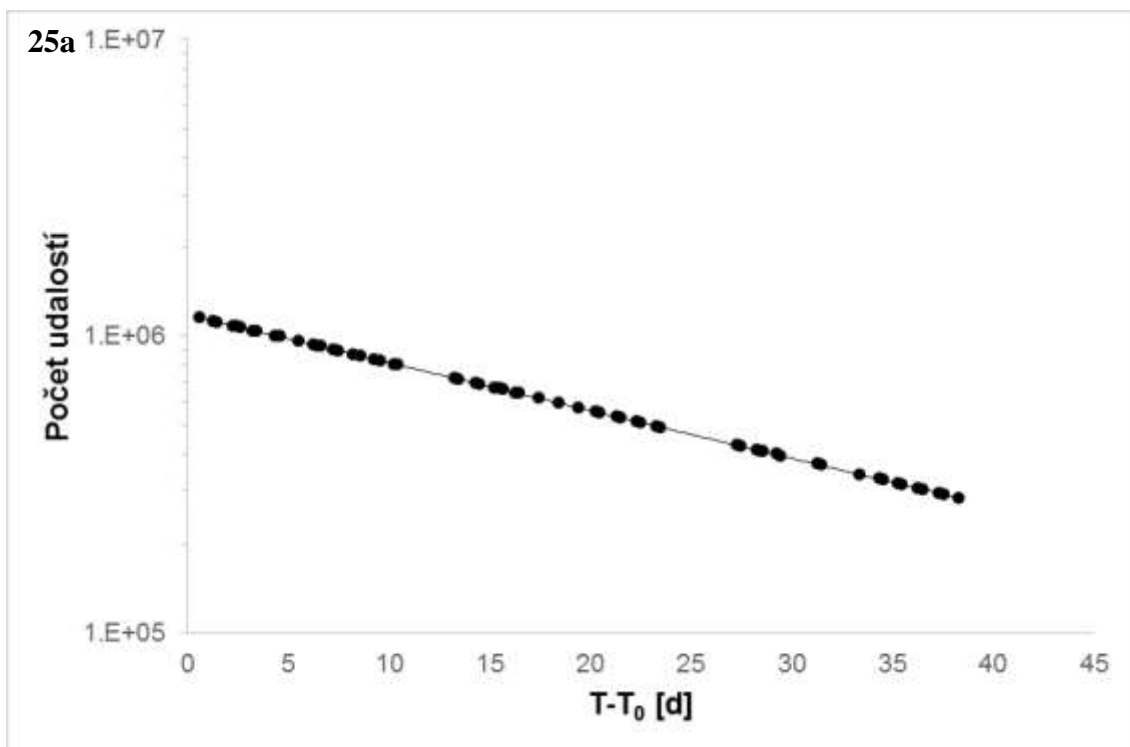
7.1.5 Výsledky merania - doba polpremeny

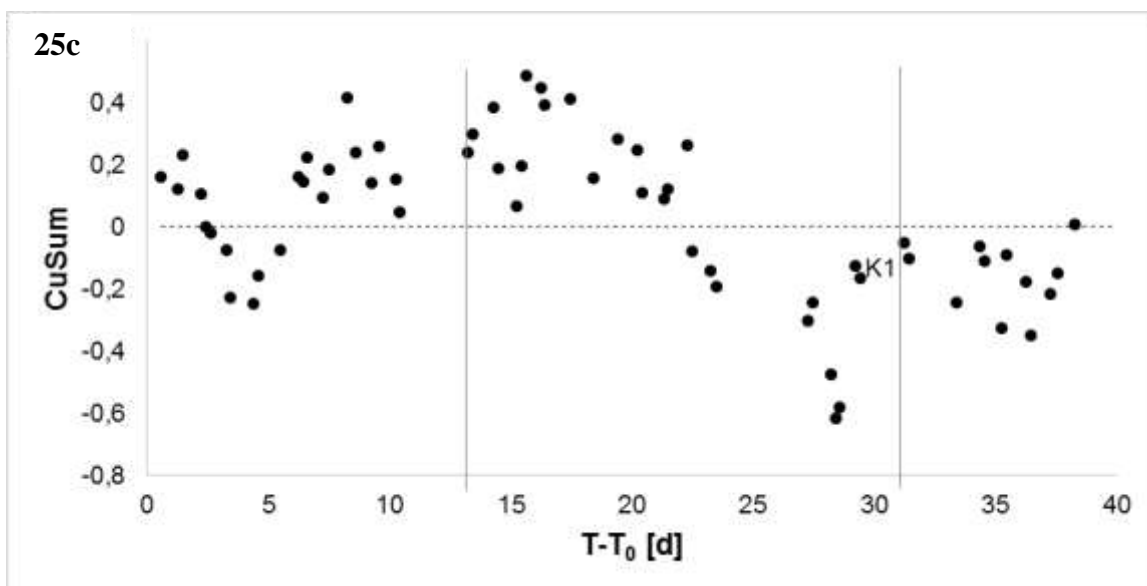
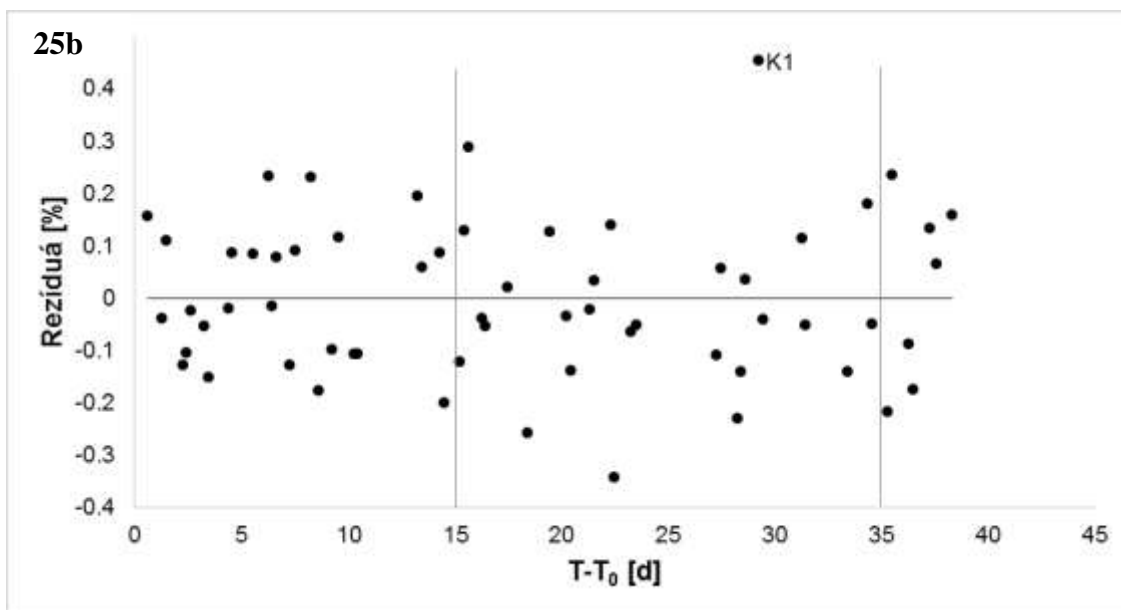
Zdroj bol meraný 61-krát počas 38 dní. Na obrázku 25a sú znázornené logaritmické hodnoty nameraných početností na jednotku hmotnosti ako funkcia času a krivka premeny ^{86}Rb . Doba polpremeny ^{86}Rb , **18,684(9) dní**, bola vyhodnotená z lineárnej regresie cez logaritmus počtu udalostí. Sklon získanej krivky je hľadaná konštanta premeny ($\lambda = \ln(2) / \tau_{1/2}$). Všetky dáta sú s rovnakou váhou. V roztoku nebola zistená prítomnosť rádionuklidových nečistôt a pozadie v skúmanom energetickom rozsahu bolo zanedbateľné. Najväčší príspevok k sumačnému efektu od žiarenia beta bol menší ako 0,03%. Vzhľadom na pomerne vysoké počiatkové početnosti, boli použité opravy na mŕtva dobu a pile-up. Straty početností boli kompenzované softvérom CANBERRA GENIE 2000. Tabuľka 42 zhrňa všetky zohľadnené a vypočítané neistoty.

Tabuľka 42 Zdroje neistôt pre meranie doby polpremeny uskutočnené s HPGe detektorom

Parciálna neistota	%
Neistota typu A	0,045
Neistota typu B	
Čas	0,003
Mŕtva doba a pile-up	0,010
Geometria	0,008
Kombinovaná štandardná neistota	0,047

Obrázok 25b znázorňuje krátkodobý trend rezíduí, ktorý je zreteľný od 15. do 35. dňa. Taktiež CuSum (obrázok 25c) rezíduí poukazuje po pätnástom dni na zmenu strednej hodnoty rezíduí. CuSum je omnoho citlivejšia na takéto malé zmeny strednej hodnoty a je vypočítaná pridaním rezídua k ich predchádzajúcej sume. Tieto zmeny môžu byť spôsobené stredne častými odchýlkami (napríklad zmeny v účinnosti detektora zapríčinené nestabilitou teploty, tlaku, vlhkosti, elektronickým šumom a zmenami polohy zdroj – detektor) (POMMÉ at al., 2008). Ďalšie zdroje stredne častých odchýlok boli zanedbané, pretože roztok bol bez nečistôt a pozadie v oblasti píku bolo nízke. Dôvod pre dislokáciu bodu označeného ako K1 nebol nájdený a táto neistota bola zahrnutá do konečnej neistoty.





Obrázok 25 Meraná (body) a fitovaná (čiara) krivka premeny ^{86}Rb (25a), rezíduá fitu (25b) a CuSum (25c)

7.1.6 Výsledky merania – pravdepodobnosť emisie fotónov gama

Pravdepodobnosť emisie žiarenia gama bola odvodená z primárne štandardizovanej aktivity a meraní emisie žiarenia gama zo zdroja ^{86}Rb s využitím HPGe spektrometra. **Fotopíková účinnosť** ϵ_f pre zdroj s aktivitou 1706.772 kBq bola vypočítaná s **MCNP** a **MCNPX** kódmi. Pre výpočet pravdepodobnosti emisie gama žiarenia sa použil priemer týchto dvoch vypočítaných hodnôt. Absolútna pravdepodobnosť emisie žiarenia

gama o energii 1077 keV bola určená na **8.74(6)%** so zdrojmi neistôt uvedenými v tabuľke 43.

Tabuľka 43 Zdroje neistôt pre meranie pravdepodobnosti emisie žiarenia gama o energii 1077 keV

Parciálna neistota	%
Neistota typu A:	
Štatistika početnosti	0,03
Neistota typu B:	
Geometria	0,3
Mŕtva doba and pile-up	0,01
Čas	0,002
Doba polpremeny	0,047
Aktivita	0,35
Účinnosť	0,5
Kombinovaná štandardná neistota	0,68

7.1.7 Výsledky merania - energia žiarenia gama

Závislosť polohy píku na energii rôznych žiarení gama, ktoré sa v rámci experimentu použili (^{60}Co , ^{65}Zn , ^{88}Y (iba 898 keV), ^{137}Cs and ^{54}Mn), bola fitovaná priamkou. Následne sa vypočítala energia žiarenia gama pre ^{86}Rb z polohy píku a vypočítanej definície krivky. Tabuľka 44 uvádza vypočítané hodnoty energie spolu s finálnou strednou hodnotou energie **1076,772 keV**. Tieto výsledky sú v dobrej zhode už so skôr publikovanými výsledkami pre tento rádionuklid. Neistoty určenej energie žiarenia gama sú v tabuľke 45.

Tabuľka 44 Výsledky merania energie žiarenia gama spolu s finálnou hodnotou uvedenou ako priemer

Meranie	1	2	3	4	5	Priemer
Energia, keV	1076,769	1076,771	1076,770	1076,776	1076,777	1076,772

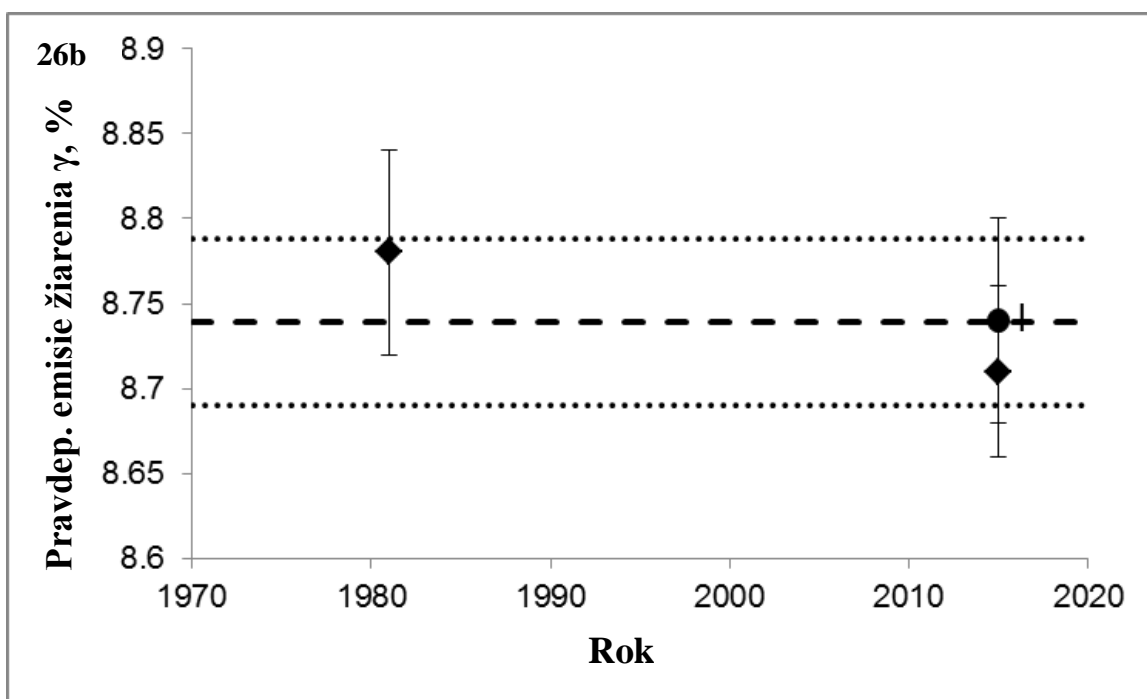
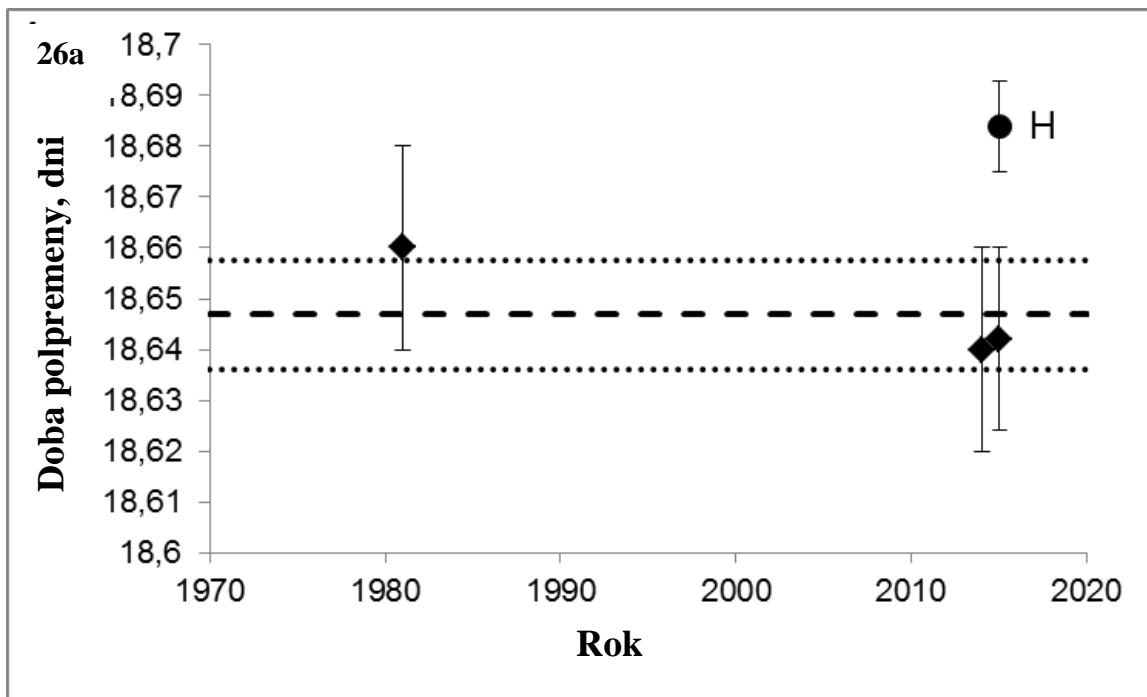
Tabuľka 45 Zdroje neistôt pre energiu žiarenia gama

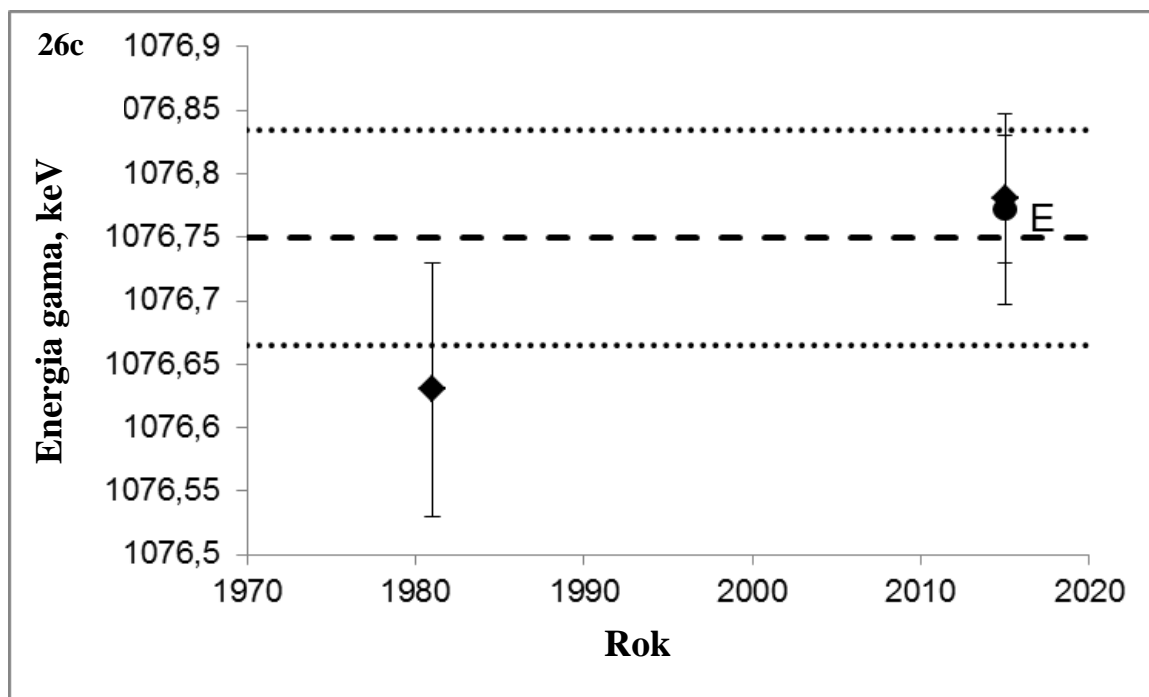
Parciálna neistota	%
Neistota typu A:	0,004
Neistota typu B:	
Stabilita	0,001
Poloha píku	0,001
Použité energetické hodnoty	0,005
Kombinovaná štandardná neistota	0,007

7.1.8 Porovnanie výsledkov práce s výsledkami z dostupných zdrojov

Výsledná hodnota ČMI pre dobu polpremeny je **18,684 (9) dní**. Tento novo získaný údaj je v dobrej zhode s výsledkami získanými z nedávnych experimentov (obrázok 26a). Táto nová hodnota (bod H) leží v oblasti troch vážených štandardných neistôt od váženého priemeru publikovaných dát **18,647(12) dní**. Trochu vyššie položená nová hodnota môže byť dôsledkom nestabilných laboratórnych podmienok, ktoré môžu ovplyvniť nestabilitu meracieho systému v dlhotrvajúcich experimentoch (napríklad vonkajšia teplota sa pohybovala od -7 °C v noci až po 11 °C počas dňa). Z obrázka 26b je zrejme, že nový výsledok pravdepodobnosti emisie žiarenia gama získaný na ČMI **8,74(6)%** je v omnoho lepšej zhode s dostupnými publikovanými dátami než výsledky doby polpremeny. Táto hodnota (bod I) má **rovnakú hodnotu ako ich vážený priemer**, čiže v tomto prípade sa nachádza v rozpätí jednej vázenej štandardnej neistoty váženého priemeru. Taktiež v prípade merania energie gama bola dosiahnutá výborná zhoda (bod E) (obrázok 26c). Nová hodnota ČMI **1076,77(7) keV** leží takmer na hodnote váženého priemeru publikovaných dát **1076,75(4) keV**.

Nie je ľahké rozhodnúť, ktorú z dostupných hodnôt je najvhodnejšie použiť v praxi, pretože existuje iba niekoľko publikácií s uvedenými hodnotami jadrových dát ⁸⁶Rb. Nové jadrové dáta pre ⁸⁶Rb vyplývajúce z tejto práce boli určené ako vážené priemery nezávislých publikovaných dát a hodnôt nameraných v rámci tejto práce spolu s neistotami týchto vážených priemerov. **Vyhodnotené finálne vážené priemery sú uvedené v tabuľke 46.**





Obrázok 26 Prehľad meraných hodnôt ^{86}Rb podľa rokov publikácie (kosoštvorce) uvedených spolu s ich váženými priemermi (plná čiara) a váženými štandardnými neistotami (bodkovaná čiara): doba polpremeny (26a), pravdepodobnosť emisie žiarenia gama (26b) a energia gama žiarenia (26c). Body H, I a E (krúžky) sú hodnoty tohto výskumu (nezahrnuté do vyobrazeného priemeru)

Tabuľka 46 Finálne vážené priemery s neistotami

Doba polpremeny $\tau_{1/2}$, dni	Pravdepodobnosť emisie gama (^{86}Rb), %	Energia gama E(^{86}Rb), keV
18,669(8)	8,74(3)	1076,756(40)

Kritérium úspešného porovnania (vzťah 5) bolo vypočítané vzhľadom k váženému priemeru hodnôt pravdepodobnosti emisie fotónov získaných z dostupných zdrojov (tabuľka 47).

Tabuľka 47 Kritérium úspešného porovnania

	Doba polpremeny	Pravdepodobnosť emisie žiarenia	Energia
1981	0,22	0,26	1,18
2014	0,22	-	-
2015	0,19	0,21	0,21
2015	1,26	0,00	0,11

8 Zhrnutie a záver

V rámci tejto práce boli rozšírené aktuálne dostupné jadrové dáta u rádionuklidov ^{226}Ra , ^{210}Pb , ^{235}U , ^{90}Y , ^{166}Ho a ^{86}Rb čo prispelo k ich spresneniu. Rádionuklidy boli vybrané na základe potrieb európskych výskumných projektov a na základe ich významnosti pre vedu a výskum a množstva dostupných experimentálnych dát.

Úvod práce zahŕňa **prehľad najpoužívanejších knižníc jadrových dát** ako aj zastarané zdroje dát. Na základe vyhodnotenia uvedených zdrojov dát sa ako doporučený zdroj dát v celej tejto práci používal internetový zdroj s tabuľkami **DDEP**. Následne sa práca zaoberala spresňovaním jadrových dát u vybraných rádionuklidov. Rádionuklidy boli vybrané v rámci európskeho výskumného projektov EMRP „MetroNORM“ (^{226}Ra , ^{210}Pb a ^{235}U) ako aj na základe uváženia ČMI (^{86}Rb). V prípadoch kde bola použitá nová procedúra, ktorá sa štandardne nepoužíva na ČMI, bolo nutné určiť účinnosť detekcie pre samotný výpočet jadrových dát. Táto hodnota bola dopočítaná za pomoci metódy **MCNP**.

V rámci práce sa určila **pravdepodobnosť emisie žiarenia gama 186,211 keV ^{226}Ra** . Na prípravu vzoriek pre spektrometrické meranie boli použité dva rádioaktívne materiály, jeden z NPL a druhý z ČMI. Merania sa uskutočnili na dvoch spektrometrických systémoch s rôznymi HPGe detektormi. Z rádioaktívneho roztoku NPL, sa vytvorila bodová vzorka EFS. Rádioaktívny roztok ČMI sa nachádzal v ampulke, ktorá bola vyrobená už dávno. Hodnota emisie fotónov gama zo zdroja EFS (NPL roztok, detektor GCX) bola určená na 0,0356(14). Výsledky získané z merania ČMI roztoku v ampulke sú 0,03566(33) (detektor GCX) a 0,03545(34) (detektor GC4018). Zloženie ampulky a jej rozmery boli určené v rámci tejto práce. V prípade ČMI ampuly boli následne vypočítané pikové účinnosti pre zvolené vzdialenosti merania na detektoroch GCX a GC4018 tak, aby bolo možné pravdepodobnosť emisie žiarenia získanú na základe merania ampuly vypočítať. Výsledná hodnota emisie žiarenia gama 186,211 keV bola v rámci tejto práce určená ako vážený priemer z meraní roztoku ČMI **0,03555(23)**. Výsledky merania EFS zdroja vytvoreného z roztoku dodaného NPL neboli použité, pretože sa jednalo o odlišný roztok s veľkou hodnotou neistoty aktivity. Výsledky merania ČMI roztoku ale aj NPL roztoku boli porovnané s výsledkami z **JRC** a s hodnotou z DDEP. Vážený priemer výsledkov

laboratórií je **3,554(23)%**. V prípade, ak sa vážený priemer vypočítal iba z meraní roztoku vyrobeného na ČMI s presnejšie určenou neistotou aktivity, tak výsledná hodnota pravdepodobnosti emisie žiarenia bola **3,555(23)%**. Hodnota v DDEP je 3,555(19)%. Pre meranie **pravdepodobností emisie XK(Rn) v premene ^{226}Ra** bol použitý **emanačný zdroj** s emanačným koeficientom pre ^{222}Rn blížiacim sa k 1. Tento zdroj bol intenzívne vetraný a preto v spektre tohto zdroja nie sú príspevky od fotóny dcérskych produktov premeny. Tento vhodne zvolený zdroj ^{226}Ra umožnil veľmi dobre zmerať emisie žiarenia $\text{XK}\alpha(\text{Rn})$ a $\text{XK}\beta(\text{Rn})$ v energetickej oblasti 80 keV až 101 keV. Meranie bolo uskutočnené s rovnakými sektrometrickými systémami ako meranie emisie žiarenia gama z premeny ^{226}Ra a procedúra si vyžadovala výpočet pikových účinností detektora za pomoci MCNP pre vzdialenosti 3 cm a 10 cm. Pre tento účel sa použilo zloženie zdroja poskytnuté chemickým laboratóriom na ČMI, OI Praha. Výsledky sú uvedené v **kapitole 5.1.3**. Výsledky meraní vybraných rádionuklidových dát u ^{226}Ra merané na ČMI boli publikované v recenzovanom časopise a v publikácii som uvedená ako hlavný autor (MAZÁNOVÁ, 2017).

Pravdepodobnosť emisie žiarenia gama 46,54 keV v premene ^{210}Pb bola meraná na štyroch detektoroch. Dva detektory boli p-typu a dva detektory boli typu BEGe. V rámci tejto práce bolo nutné vykonať účinnostnú kalibráciu GXC detektora pre vzdialenosť vzorky 16,9 cm za pomoci MCNP a experimentálne ju overiť. Výsledná hodnota bola vypočítaná ako vážený priemer z hodnôt získaných z meraní na detektoroch BEGe, pretože neistota plochy píku bola o niekoľko percent nižšia než u detektorov p-typu. Signál z mŕtvej vrstvy vzniká predovšetkým absorpciou fotónov 46,54 keV v mŕtvej vrstve detektora p-typu a jeho príspevok k ploche píku je komplikované stanoviť. Vážený priemer **0,04243(34)** je v dobrej zhode s DDEP hodnotou 0,04252(40). V rámci práce sa výsledok ČMI porovnal s výsledkami nameranými v **CEA** a **ENEA**. Všetky tri hodnoty pravdepodobnosti emisie žiarenia 46,54 keV v premene ^{210}Pb ležia v rámci jednej štandardnej neistoty hodnoty DDEP. Hodnota ČMI leží najbližšie k hodnote DDEP. **Pravdepodobnosť emisie fotónov XL(Bi)** bola určená z meraní na Si(Li) detektore. Medzinárodného porovnania v rámci projektu MetroNORM sa zúčastnili i laboratória **CEA** a **ENEA**. Najlepšie výsledky v porovnaní s DDEP hodnotami sa dosiahli pri meraní pravdepodobností emisií fotónov $L\alpha$. Hodnota pravdepodobnosti emisie žiarenia $L\alpha$ získaná v CEA leží v rámci troch štandardných neistôt hodnoty DDEP a výsledok ČMI leží v rámci jednej štandardnej

neistoty DDEP hodnoty. Pre celkové žiarenie XL(Bi) bola hodnota váženého priemeru všetkých zúčastnených laboratórií **23,18(39)%**, čo je len o 5,4% vyššia hodnota než hodnota udávaná v DDEP. Výsledky meraní rádionuklidu ^{210}Pb získané na ČMI boli publikované v impaktovanom časopise a v článku som uvedená ako hlavný autor (MAZÁNOVÁ, 2017).

V tejto práci sa taktiež spresňovali i **pravdepodobnosti emisie žiarenia gama z premeny ^{235}U** . Pre účely stanovenia pravdepodobností emisií bolo najprv nutné vypočítať totálne a píkové účinnosti pre použitú geometriu 3 cm a detektor GC4018. Vzorka s ^{235}U bola vyrobená na JRC a preto boli pre MCNP výpočet použité údaje o vzorke dodané práve z JRC. Totálne účinnosti bolo potrebné získať pre výpočet korekčných sumačných faktorov, ktoré sú nevyhnutné v prípadoch ak je vzorka s mnohými energetickými čiarami umiestnená blízko detektora. Z výsledkov týchto faktorov je jasne vidieť ich dôležitosť pri korekcii výpočtu pravdepodobností emisií žiarenia. Výsledky ČMI sú uvedené v **tabuľke 22**. Medzinárodné porovnanie bolo v rámci tejto práce vykonané na základe výsledkov z piatich európskych laboratórií (**JRC, CIEMAT, ENEA, CEA a ČMI**). Hodnoty poskytnuté jednotlivými laboratóriami sa vo väčšine prípadov zhodovali s odporúčanými hodnotami DDEP. Iba v niektorých prípadoch nastala nezhoda medzi výsledkami laboratórií. Pravdepodobnosti emisie žiarenia boli určené pre sedem hlavných energií žiarenia gama a sú uvedené v **tabuľke 25**. Odchýlky vážených priemerov výsledkov pravdepodobností emisií žiarenia zúčastnených laboratórií od hodnôt DDEP neboli vo väčšine prípadov väčšie ako 2%. Výsledky ČMI spolu s výsledkami z ostatných laboratórií boli publikované v odbornom časopise a v rámci tejto publikácie som uvedená ako spoluautorka (MAROULI at al., 2018).

V rámci projektu MRTDosimetry sa spresňovali jadrové dáta u rádionuklidu ^{90}Y . Bol stanovený **počet pozitron-elektrónových konverzií** v prechode E0 medzi energetickou hladinou 1760,7 keV a základným stavom jadra ^{90}Zr pri premene ^{90}Y . Emisia fotónov o energii 511 keV sa stanovila meraním na dvoch kalibrovaných HPGe detektoroch s použitím dvoch rôznych zdrojov. Prvým meraným zdrojom bola ampulka s označením ERX 1604001 o objeme 1 ml naplnená roztokom ^{90}Sr v rovnováhe s ^{90}Y . Druhým zdrojom bol odparok na polyetylénovej fólii iného roztoku ^{90}Sr v nerovnováhe s ^{90}Y označený ER3 Sr-90 1643 a vložený do plastovej misky. Výsledky stanovovania počtu **Q/2 fotónov s energiou 506 – 515 keV** pochádzajúcich z anihilácie pozitronov

pôvodom z tvorby párov pri premene ^{90}Y sú uvedené v **tabuľke 28** a príslušné neistoty sú uvedené v **tabuľke 29**.

Ďalším rádionuklidom používaným pre medicínske účely je ^{166}Ho . V rámci tohto spresňovania sa stanovili pravdepodobnosti emisie X-fotónov a γ -fotónov a stanovila sa doba polpremeny. ^{166}Ho . Doba polpremeny bola určená za pomoci merania na dvoch detektoroch a výsledky sú uvedené v **tabuľke 38**. Kvôli krátkej dobe polpremeny bola pri stanovení **pravdepodobnosti emisie žiarenia** uskutočnená i korekcia na premenu počas merania K_a , prepočet k referenčnému času K_b , a korekcia na premenu počas mŕtvej doby K_c . Priemerná pravdepodobnosť emisie fotónov o energii **80 keV** získaná z výsledkov meraní na všetkých troch detektoroch je **0,066337(272)** a zdroje neistôt sú uvedené v **tabuľke 33**. Výsledky pravdepodobností emisie fotónov o energiách **1379 keV, 1581 keV a 1662 keV** a ich príslušné neistoty sú uvedené v **tabuľkách 34 a 35**. Výsledky stanovenia pravdepodobnosti emisie fotónov **K_{a2} (48,22 keV), K_{a1} (49,13 keV), $K_{\beta1}$ (55,74 keV) a $K_{\beta2}$ (57,31 keV)** sú uvedené v **tabuľkách 36 a 37**.

U ^{86}Rb sa jadrové dáta merali na základe uváženia ČMI. Pre tento účel ČMI objednalo z rádionuklidového centra POLATOM rádioaktívny roztok s ^{86}Rb . Z tohto roztoku vyrobilo chemické laboratórium ČMI ampulku s roztokom ^{86}Rb pre **meranie doby polpremeny**, tri bodové zdroje typu EFS pre **meranie pravdepodobnosti emisie a energie žiarenia gama**, odparok pre zistenie prítomnosti nečistôt a po ďalšom zriedení roztoku 15 bodových zdrojov pre absolútne meranie aktivity. Aktivita bola zmeraná $4\pi\beta\text{-}\gamma$ koincidenčným systémom a neistota aktivity bola určená na 0,35%. Precízne meranie **doby polpremeny** sa uskutočnilo na HPGe detektore GCX. Vzorka bola zmeraná 61-krát. Zo závislosti zmeraných početností v závislosti na čase bola vypočítaná doba polpremeny **18,684(9) dní**. Pravdepodobnosť emisie žiarenia bola zmeraná na detektore GC4018. Pre tento účel sa za pomoci MCNP a MCNPX kódu vypočítala píkova účinnosť pre energiu 1077 keV. Nabratých bolo dohromady 23 spektier z ktorých sa určila výsledná **pravdepodobnosť emisie žiarenia 8,74(6)%**. Zo závislosti plochy píkov na energii žiarenia gama pochádzajúceho od rôznych rádionuklidov bola určený vzťah popisujúca túto závislosť. Následne sa do tohto vzťahu doplnila plocha píku energie žiarenia gama z premeny ^{86}Rb a vypočítala sa energia tohto žiarenia. Meranie vzorky sa uskutočnilo päťkrát a výsledná hodnota **energie** bola určená na **1076,772 keV**. Hodnota pravdepodobnosti emisie žiarenia gama 8,74(7)% je rovnaká ako vážený priemer publikovaných hodnôt. Výborná zhoda s publikovanými

dátami bola dosiahnutá i v prípade merania energie žiarenia gama. Získaná hodnota v rámci tejto práce leží takmer na hodnote váženého priemeru publikovaných dát. Nové jadrové dáta boli určené ako vážený priemer publikovaných hodnôt a hodnôt získaných v tejto práci: doba polpremeny $\tau_{1/2}({}^{86}\text{Rb}) = 18.669$ dní, pravdepodobnosť žiarenia gama $Y({}^{86}\text{Rb}) = 8.74\%$ a energia žiarenia gama $E({}^{86}\text{Rb}) = 1076.756$ keV. Všetky tieto merania, výsledky a porovnania boli publikované v odbornom časopise a v článku som uvedená ako hlavný autor (MAZÁNOVÁ, 2016).

Hlavným prínosom práce je rozšírenie doposiaľ publikovaných hodnôt jadrových dát a tým ich spresnenie. **Veľký prínos** predstavuje hlavne spresnenie dát premeny u rádionuklidu ${}^{86}\text{Rb}$, pre ktorý doposiaľ neexistujú odporúčané dáta v databáze DDEP. Veľmi užitočnými výsledkami sú i stanovenia pravdepodobností emisií žiarenia X v premene ${}^{226}\text{Ra}$ a ${}^{210}\text{Pb}$. V budúcnosti by bolo vhodné zopakovať medzinárodne porovnanie pravdepodobnosti emisie žiarenia XL(Bi) (**L β** a **L γ**). Dáta získané v rámci medzinárodného porovnania neboli v súlade s hodnotami DDEP a to ani v prípade použitia vzoriek vytvorených z rozdielnych rádioaktívnych roztokov. Pre meranie pravdepodobností emisií žiarenia X v premene ${}^{226}\text{Ra}$ bol veľmi vhodne zvolený rádionuklidový zdroj, ktorý umožnil odvetrať dcérske produkty ${}^{226}\text{Ra}$ a tak dopomohol k stanoveniu pravdepodobností emisie žiarenia X s menšími neistotami. Nezanedbateľný prínos majú i výsledky spresňovania jadrových dát u rádionuklidov ${}^{90}\text{Y}$ a ${}^{166}\text{Ho}$, ktoré sa používajú na medicínske účely.

9 Zoznam literatúry a publikácii

- AUDI, G., KONDEV, F., WANG, M., PFEIFFER, B., SUN, X., BLACHOT, J., a iní. (2012). The NUBASE2012 evaluation of nuclear properties. *Chinese Physics C*, Vol. 36, No. 12, 1157–1286.
- BÉ, M., DULIEU, C., MOUGEOT, X., & KELLETT, M. (1995). *www.nucleide.org*. Cit. 22. Jún 2015. Dostupné na Internete: Half-lives – Table of Recommended Values: http://www.nucleide.org/DDEP_WG/Periodes_2014.pdf
- BÉ, M.-M., COURSOL, N., DUCHEMIN, B., LAGOUTINE, F., LEGRAND, J., DEBERTIN, K., a iní. (2011). *Table de radionucléides*. Commissariat à l'énergie atomique.
- BÉ, M.-M., DUCHEMIN, B., DEBERTIN, K., & SCHÖNFELD, E. (1999). *Table de Radionucléides*. Commissariat à l'Énergie Atomique.
- BÉ, M.-M., CHRISTÉ, V., DULIEU, C., MOUGEOT, X., BROWNE, E., BAGLIN, C., a iní. (2013). Table of Radionuclides. *Monographie BUPM-5*.
- BROWNE, E., FIRESTONE, R., & SHIRLEY, V. (1986). *Table of Radioactive Isotopes*. New York: John Wiley and Sons.
- COURSEY, B., CALHOUN, J., & CESSNA, J. (1993). Radioassay of yttrium-90 used in nuclear medicine. *Nucl. Med. Biol.* 20 (5), 693-699.
- DRYAK, P., & KOVAR, P. (2009). Table for true summation effect in gamma-ray spectrometry. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry* 279 , 385-394.
- DRYÁK, P., & KOVÁŘ, P. (2006). Experimental and MC Determination of HPGe Detector Efficiency with Energy Range from 40 keV up to 2754 keV for Measuring Geometry of Point Source in the Distance of 25 cm from the Detector. *Applied Radiation and Isotopes* 64, 1346-1349.
- FEA, G. (1935). Tabelle Riassuntive e Bibliografia Delle Trasmutazioni Artificiali. *Il Nuovo Cimento, Volume 12, Issue 6*, 368–406.
- FIRESTONE, R., BAGLIN, C., & FRANK CHU, S. (1999). *Table of Isotopes, Update, 8th Edition*. Wiley.
- FORD, K. (1955). Predisted 0+ level of Zr90. *Phys.Rev.* 98, 1516.
- GREENBERG, J. S., DEUTSCH M. (1956). Positrons from the Decay of ^{32}P and ^{90}Y . *Phys. Rev.* 102, 415.
- HEITLER, W.(1954). *Quantum Theory of Radiation*.
- CHU, S., EKSTROM, L., & FIRESTONE, R. (1999). *Decay data search*. Dostupné na Internete: <http://nucldata.nuclear.lu.se/toi/>

- IAEA. (1986). Decay Data for the Actinides. *IAEA Technical Report Series 261*. Vienna.
- IAEA. (1991). X-ray and gamma-ray standards for detector calibration. *IAEA TECDOC-619 ISSN 1011-4289*. Vienna.
- JOHNSON, O., JOHNSON, R., & LANGER, L. (1955). Evidence of a 0+ first excited state in Zr90. *Phys. Rev.* 98, 1517-1518.
- KAYE, G., & LABY, T. (1995). *Tables of Physical and Chemical Constants, 16th Edition Addison-Wesley*. London.
- KOCHER, D. (1981). Radioactive Decay Data Tables. Springfield, Virginia: U.S. Department of Energy.
- LAGOUTINE, F., COURSOL, N., & LEGRAND, J. (1987). *Table de radionucléides*. Commissariat à l'Énergie Atomique.
- LEGRAND, J., LAGOUTINE, F., & COURSOL, N. (1982). *Table de radionucléides*. Commissariat à l'énergie atomique, Bureau national de métrologie, Laboratoire de métrologie des rayonnements ionisants.
- LIVINGTON, M., & BETHE, H. (1937). Nuclear Physics C. Nuclear Dynamics, Experimental. *Reviews of Modern Physics, Volume 9, Issue 3*, 245.
- LNHB. (2015). *Mini table de radionucléides*. EDP Sciences .
- LONGWORTH, G., CARPENTER, B., BULL, R., TOOLE, J., & NICHOLS, A. (1998). *The Radiochemical Manual*. Harwell: AEA Technology.
- MAGIL, J., PFENNIG, G., & GALY, J. (2006). *The Karlsruhe Chart of the Nuclides, 7th Edition*. Karlsruhe: Institute for Transuranium Elements.
- MARINGER, F. J., BAUMGARTNER, A., CARDELLINI, F., CASSETTE, P., CRESPO, T., DEAN, J., WIEDNER, H., HULKA, J., HULT, M., JEROME, S., KABRT, F., KOVÁŘ, P., LARIJANI, C., LUTTER, G., MAROULI, M., MAURING, A., MAZÁNOVÁ M., MICHALIK, B., VODENIK, B. (2017). Advancements in NORM metrology – Results and impact of the European joint research project MetroNORM. *Applied Radiation and Isotopes*, vol. 126, 273-278.
- MARINGER, F. J., at al. (2017). *MetroNORM technical report: Public Final Publishable JRP Report IND57 MetroNORM Metrology for processing materials with high natural radioactivity*.
- MAROULI, M., LUTTER, G., POMMÉ, S., VAN AMMEL, R., HULT, M., RICHTER, S., EYKENS, R., PEYRÉS, V., GARCIA-TORANO, E., DRYÁK, P., MAZÁNOVÁ, M., CARCONI, P. (2018). Measurement of absolute γ -ray emission probabilities in the decay of ^{235}U . *Applied Radiation and Isotopes*, vol. 132, 72-78.

- MAZÁNOVÁ, M., DRYÁK, P., KOVÁŘ, P., & AUERBACH, P. (2014). Comparison of properties of digital spectrometer systems. *Applied Radiation and Isotopes*, 394-396.
- MAZÁNOVÁ, M., DRYÁK, P., SOCHOROVÁ, J., AUERBACH, P. (2016). Measurement of the ^{86}Rb decay data. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, vol. 306, issue 2, 535-539.
- MAZÁNOVÁ, M., DRYÁK, P., HAVELKA, M. (2017). Emission probability measurement of γ - and X- rays in Ra-226 and Pb-210 decay. *Applied Radiation and Isotopes*, vol. 134, 429-432.
- METHA, B., CHANG, S., SINGH, S., GARG, M., SINGH, N., CHEEMA, T., a iní. (1987). A260(1987)157[LX-rays]. *Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res.*
- Mini Table of Radionuclides*. (2015). EDP Sciences, Paris, Les Ulis.: Laboratoire national Henri Becquerel.
- MO, L., AVCI, B., JAMES, D., SIMPSON, B., CESSNA, W., & BALDOCK, C. (2005). Development of activity standard for ^{90}Y microspheres. *Appl. Radiat. Isot.* 63, 193-199.
- NEA. (1994). *The JEF-2.2 Radioactive Decay Data: JEF Report 13*. Paris: NEA-OECD.
- NEA. (2005). *The JEFF-3.0 Nuclear Data Library: JEFF Report 19*. Paris: NEA-OECD.
- NEGRET, A., & SINGH, B. (2015). Nuclear Data Sheets for $A = 86^*$. *Nuclear Data Sheets. Volume 124*, 156: 64.
- POMMÉ, S., & KEIGHTELY, J. (2015). Determination of a reference value and its uncertainty. *Metrologia* 52, 200-212.
- POMMÉ, S., CAMPS, J., Van AMMEL, R., & PAEPAN, J. (2008). Protocol of uncertainty assesement of half-lives. *J Radioanal Nucl Chem*, 866: 335-229.
- RYDE, H., THIEBERGER, P., & ALVAGER, T. (1961). Two-photon de excitation of the 0^+ level in Zr^{90} . *Phys. Rev. Lett.* 6 (9), 475-476.
- SEABORG, G. (1940). A Table of Induced Radioactivities. *Reviews of Modern Physics*, Volume 12, Issue 1, 30.
- SELWYN, R., NICKLES, R., THOMADSEN, B., DeWERD, L., & MICKA, J. (2007). A new intenal pair production branching ratio of ^{90}Y : The development of a non-destructive assay for ^{90}Y and ^{90}Sr . *Applied Radiation and Isotopes*, 318-327.
- SCHOTZIG, U. (1990). A286(1990)523[LX-rays]. *Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res.*

- SIEGEL, J., ZIMMERMAN, B., KODIMER, K., DELL, M., & SIMON, W. (2000). Accurate dose calibrator activity measurement of ^{90}Y -ibritumomab. *Report Ra-16/5*. Braunschweig, Germany: PTB.
- SOCHOROVÁ, J., AUERBACH, P., & HAVELKA, M. (2008). Application of “wet” extrapolation method for activity standardization of electron capture radionuclides. *Appl. Radiat. Isotopes.*, 919 - 924.
- SYNDER, W., FORD, M., BERNARD, S., DILLMAN, L., POSTO, J., & WATSON, S. (1983). *Annals of the ICRP: Radionuclide Transformations (Energy and Intensity of Emissions)*. Oxford: Pergamon.
- THOMAS, R. (1940). Internal pair production in radium C'. *phys. rev.* 58, 714-715.
- TOMLINSON, S., MATHIALAGAN, P., & MALONEY, S. (2014). Special K: testing the potassium link between radioactive rubidium (^{86}Rb) turnover and metabolic rate. *Journal of Experimental Biology*, 1040-1045.
- TULI, J. (2004). *Nuclear Wallet Cards for Radioactive Nuclides*. New York: National Nuclear Data Center.
- TULI, J. (2005). *Nuclear Wallet Cards*. New York: National Nuclear Data Center.
- VALLEY, J., BILLING, S., LERESCHE, M., & WASTIEL, C. (2003). Determination of the efficiency of commercially available dose calibrators for beta emitters. *J. Nucl. Med. Technol.*, 31.
- WOODS, M., COLLINS, S., & WOODS, S. (2004). *Evaluation of half life data, NPL Report CAIR 8*. Teddington: NPL.
- www.4vip.inl.gov. [cit. 16. marec 2018] Dostupné na Internet: Idaho National laboratory, Gamma-ray Spectrometry Center, Online Catalogs: <http://www4vip.inl.gov/gammaray/catalogs/catalogs.shtml>
- www.euramet.org. [cit. 3. marec 2017]. Dostupné na Internet: <https://www.euramet.org/research-innovation/research-empir/>
- www.metronorm-emrp.eu. (2013). [cit. 3. február 2017]. Dostupné na Internet: MetroNORM: <http://metronorm-emrp.eu/>
- www.mrtdosimetry-empir.eu. (2016). [cit. 3. máj 2017]. Dostupné na Internet: MRTDosimetry: <http://mrtdosimetry-empir.eu/>
- www.nndc.bnl.gov. [cit. 18. marec 2017] Dostupné na Internet: Evaluated and Compiled Nuclear Structure Data: Dataset Search and Retrieval: www.nndc.bnl.gov/ensdf
- www.nndc.bnl.gov. [cit. 2. február 2017] Dostupné na Internet: Nudat 2: www.nndc.bnl.gov/nudat2

- www.npl.co.uk*. [cit. 26. máj 2018] Dostupné na Internete: Welcome to Kayle and Laby Online: <http://www.kayelaby.npl.co.uk/>
- www.nucleide.org*. (1995). [cit. 13. marec 2016]. Dostupné na Internete: Laboratoire national Henri Becquerel, Recommended Data, Selected nuclides and tables (DDEP): http://www.nucleide.org/DDEP_WG/DDEPdata.htm
- www.nucleide.org*. (1995). [cit. 3. máj 2019]. Dostupné na Internete: http://www.nucleide.org/DDEP_WG/Nuclides/Y-90_tables.pdf
- www.nucleide.org*. (1995). [cit. 21. január 2017]. Dostupné na Internete: Recommended data - 226Ra: http://www.nucleide.org/DDEP_WG/Nuclides/Ra-226_tables.pdf
- www.nucleide.org*. (1995). [cit. 23. marec 2017]. Dostupné na Internete: http://www.nucleide.org/DDEP_WG/Nuclides/Pb-210_tables.pdf
- www.nucleide.org*. (1995). [cit. 23. marec 2017]. Dostupné na Internete: http://www.nucleide.org/DDEP_WG/Nuclides/U-235_tables.pdf
- www.nucleide.org*. (1995). [cit. 23. august 2019]. Dostupné na Internete: http://www.nucleide.org/DDEP_WG/Nuclides/Ho-166_tables.pdf
- www.oecd-nea.org*. (2014). [cit. 4. marec 2017] Dostupné na Internete: JEFF-3.2 evaluated data library - Neutron data, Nuclear Energy Agency - JEFF and EFF Projects: https://www.oecd-nea.org/dbforms/data/eva/evatapes/jeff_32/