



**MATEMATICKO-FYZIKÁLNÍ
FAKULTA**
Univerzita Karlova

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

František Zach

**Experimentální stanovení intenzit záření gama v
rozpadové řadě $^{83}\text{Rb}/^{83\text{m}}\text{Kr}/^{83}\text{Kr}$**

Ústav částicové a jaderné fyziky

Vedoucí bakalářské práce: RNDr. Michal Šefčík, PhD.

Studijní program: Fyzika

Studijní obor: Obecná fyzika

Chtěl bych poděkovat RNDr. Michalovi Šefčíkovi, PhD., vedoucímu mojí bakalářské práce, za ochotu a trpělivost při konzultacích a revizích mojí bakalářské práce stejně jako za technickou pomoc při měření potřebných dat.

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval samostatně a výhradně s použitím citovaných pramenů, literatury a dalších odborných zdrojů.

Beru na vědomí, že se na moji práci vztahují práva a povinnosti vyplývající ze zákona č. 121/2000 Sb., autorského zákona v platném znění, zejména skutečnost, že Univerzita Karlova má právo na uzavření licenční smlouvy o užití této práce jako školního díla podle § 60 odst. 1 autorského zákona.

V České Rybné dne 26. 5. 2021

podpis: František Zach

Název práce: Experimentální stanovení intenzit záření gama v rozpadové řadě $^{83}\text{Rb}/^{83\text{m}}\text{Kr}/^{83}\text{Kr}$

Autor: František Zach

Ústav: Ústav částicové a jaderné fyziky

Vedoucí bakalářské práce: RNDr. Michal Šefčík, Ph.D., Ústav jaderné fyziky AV ČR v. v. i.

Abstrakt: Cílem této práce je změřit intenzity gama rozpadů ^{83}Rb , které se rozpadá na stabilní ^{83}Kr přes metastabilní $^{83\text{m}}\text{Kr}$ s monoenergetickým elektronovým spektrem a je tak velmi vhodný na kalibraci experimentů, např. KATRIN nebo XENON. Součástí práce je i kalibrace detektoru použitého k měření (polovodičový HPGe tj. High Purity Germanium) pomocí izotopů ^{241}Am , ^{152}Eu a ^{133}Ba se známými intenzitami. V práci se podařilo změřit hodnoty intenzit gama přechodů v jádře při rozpadu ^{83}Rb na ^{83}Kr , spolu s kalibrací detektoru a zjištěním závislosti efektivity detekce na energii.

Klíčová slova: Gama, Rozpad, Rubidium 83, Intenzita, ^{83}Rb

Title: Experimental determination of the gamma ray intensities in $^{83}\text{Rb}/^{83\text{m}}\text{Kr}/^{83}\text{Kr}$ decay chain

Author: František Zach

Department: Institute of Particle and Nuclear Physics

Supervisor: RNDr. Michal Šefčík Ph. D., Nuclear Physics Institute of the ASCR

Abstract: The aim of this work is to measure the intensities of gamma decays of ^{83}Rb , which decays into stable ^{83}Kr through a metastable $^{83\text{m}}\text{Kr}$ with monoenergetic electron spectrum and is thus very suitable for calibration of experiments, such as KATRIN or XENON. Part of the work is also the calibration of the detector used for measurement (semiconductor HPGe, ie High Purity Germanium) using isotopes ^{241}Am , ^{152}Eu and ^{133}Ba with known intensities. The work managed to measure the values of the intensities of gamma transitions in the nucleus during the decay of ^{83}Rb to ^{83}Kr , together with the detector calibration and finding the dependence of the detection efficiency on energy.

Keywords: Gamma, Decay, Rubidium 83, Intensity, ^{83}Rb

Obsah

Úvod.....	1
1 Vlastnosti rubidia a záření gama.....	2
1.1 Rubidium.....	2
1.2 Záření gama.....	3
2 Detekce.....	4
3 Kalibrace.....	7
4 Zpracování dat.....	8
5 Výsledky.....	9
5.1 Kalibrace.....	9
5.2 Rubidium 83.....	11
6 Diskuze.....	16
7 Závěr.....	17
Seznam použité literatury.....	18
Seznam tabulek.....	19
Seznam použitých obrázků.....	20

Úvod

Rubidium 83 se rozpadá elektronovým záchytem na krypton 83 přechodem přes metastabilní ^{83m}Kr , který má monoenergetické spektrum, čímž je výjimečně vhodný pro kalibraci experimentů. Krypton 83m má ovšem poločas rozpadu 1,83 h, a tak je při kalibraci získáván rozpadem ^{83}Rb , jehož spektrum je tak potřeba znát podobně přesně. Ačkoli je spektrum ^{83}Rb známo poměrně přesně jsou měření více jak 40 let stará a lze tak očekávat, že měření modernějšími a nejspíš i přesnějšími přístroji dokáže spektrum upřesnit, a proto tato práce měří intenzity ^{83}Rb , včetně předcházející kalibrace detektoru použitého k měření ^{83}Rb .

V první kapitole je obsažen výpis doposud známých informací o ^{83}Rb a o záření gama. V druhé kapitole jsou popsány způsoby měření záření gama s důrazem na v práci použitou metodu měření. Záření gama se nejlépe detekuje s využitím fotoefektu, který v tomto případě probíhá uvnitř kryogenně chlazeného detektoru z velmi čistého germania (HPGe – High Purity Germanium). Ve třetí kapitole je vysvětlen způsob kalibrace detektoru, pomocí ^{241}Am , ^{152}Eu a ^{133}Ba se známými aktivitami i intenzitami. Ve čtvrté kapitole je pak popsán způsob zpracování dat, například odečtení pozadí nebo výpočet intenzit. V páté kapitole jsou obsaženy výsledky, které jsou diskutované v šesté kapitole. V závěru je obsaženo shrnutí těchto výsledků.

1 Vlastnosti rubidia a záření gama

1.1 Rubidium

Rubidium je měkký, stříbrobílý alkalický kov s 37 protony v jádře. Díky podobnosti elektronových obalů sdílí mnohé vlastnosti s ostatními alkalickými kovy, hlavně s draslíkem a cesiem. S kyslíkem a vodou samovolně reaguje. Hustota rubidia je $1,532 \text{ g/cm}^3$, teplota tání je $39,30 \text{ }^\circ\text{C}$ a teplota varu je $688 \text{ }^\circ\text{C}$. Rubidium se přirozeně vyskytuje ve dvou izotopech - ze 75 % stabilní ^{85}Rb a z 25 % ^{87}Rb s poločasem rozpadu 49 miliard let.

Rubidium bylo objeveno německými chemiky Robertem Bunsenem a Gustavem Kirchhoffem v roce 1861 metodou žihání, kdy barva plamene záleží na alkalickém kovu, jehož sůl je do plamene vložena. Žihání lze popsat jako atomovou emisní spektroskopii ve viditelném světle s dostatečnou jasností, aby byla viditelná pouhým okem.

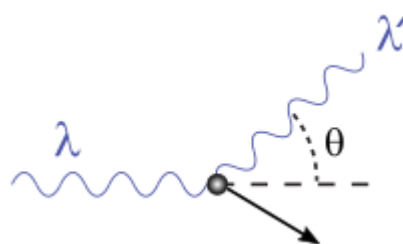
Rubidium se často používá pro manipulaci s atomy pomocí laserů a vytváření Bose-Einsteinových kondenzátů. Používá se k barvení ohňostrojů fialovou barvou a je jedním z prvků, které lze využít v termoelektrických generátorech. Rubidium může být také použito pro konstrukci levnějších a tím i dostupnějších atomových hodin. Izotop ^{82}Rb se také používá v pozitronové emisní tomografii.

^{83}Rb má ze všech syntetických izotopů rubidia nejdelší poločas rozpadu T a to 86,2 dne a rozpadá se pomocí záchytu elektronu na $^{83\text{m}}\text{Kr}$, který se dále rozpadá na ^{83}Kr a je díky svému monoenergetickému elektronovému spektru velmi vhodný pro kalibraci experimentů.

1.2 Záření gama

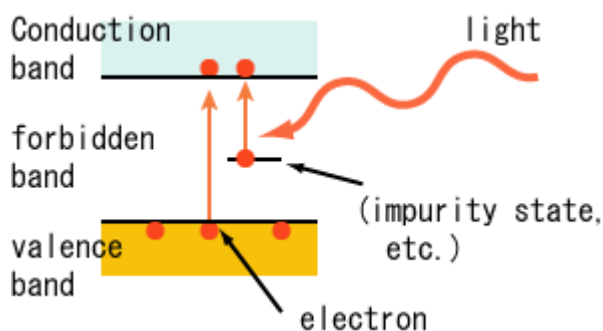
Záření gama – značeno též γ – je nejenergičtější složkou elektromagnetického spektra. Bylo objeveno Ernestem Rutherfordem roku 1900 při studiu radia. Vzniká při přechodech v jádrech radioaktivních atomů, často spolu s alfa (α) nebo beta (β) rozpadem. Některé gama fotony, hlavně v astrofyzice, nemají původ v jaderných procesech, ale do gama oblasti spektra byly zařazeny kvůli tomu, že mají dostatečnou energii, bez ohledu na jejich původ. Vzhledem k jeho vysoké energii se projevují hlavně částicové vlastnosti fotonů, které také poměrně málo interagují s hmotou a tudíž mají vysokou pronikavost. Interakci s hmotou můžeme z většiny rozdělit do tří kategorií:

1) Comptonův rozptyl (viz obr. 1), při kterém dochází k pružné interakci s elektronem, kterému je předána část energie fotonu.



Obr. 1: Schéma Comptonova rozptylu^[1]

2) Fotoefekt (viz obr. 2), kdy dochází k excitaci či uvolnění elektronu obsaženého v pevné látce po dopadnutí fotonu. V této práci převažuje vnitřní fotoefekt, který nastává u polovodičů, kdy je elektron přesunut z valenčního do vodivostního pásu.



Obr. 2: Schéma vnitřního fotoefektu^[2]

3) Produkce párů částice-antičástice (viz obr. 3). V tomto případě je část energie fotonu využita pro vytvoření klidové energie částic a zbytek energie je vznikнувšímu páru předána v kinetické podobě



Obr. 3: Schéma produkce páru částice-antičástice. Zde elektron e^- a pozitron e^+ .^[3]

2 Detekce

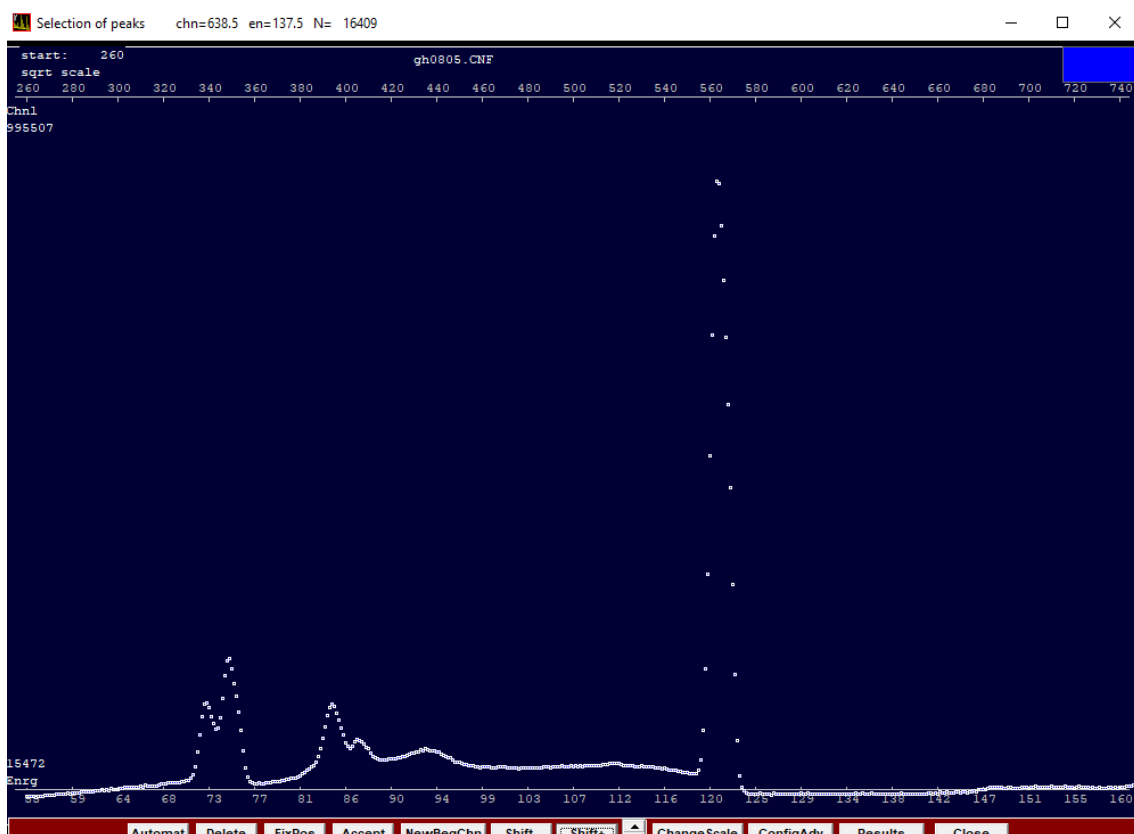
K detekci gama záření se používá vhodný a k tomu určený materiál, který zajišťuje správnou interakci. Ze tří hlavních způsobů interakce je nejvhodnější fotoefekt, jelikož při něm, z povahy interakce, dochází vždy k detekci celkové energie gama fotonu. Při Comptonově rozptylu může sice dojít k několika rozptylům a nebo k následnému fotoefektu a energie těchto interakcí se při čtení z vhodně konstruovaného detektoru sečtou, ale stejně tak může dojít k tomu, že odkloněný foton opustí s částí energie detektor a část energie předaná elektronu pouze zvýší pozadí v experimentu. Při produkci částic sice všechna energie přejde už při první interakci na vzniknuvší částice, ale ty mohou rovněž opustit detektor před jejich detekcí.

Většina detektorů gama záření jsou buď scintilační nebo polovodičové. Scintilační pracují na principu emise světla při zachycení gama fotonu. Intenzita světla je v obvyklých detektorech úměrná zachycené energii a toto světlo je následně pomocí fotokatody a fotonásobiče převedeno na elektrický signál. Materiálem takovýchto detektorů bývá standartně thaliem dopovaný jodid sodný NaI(Tl).

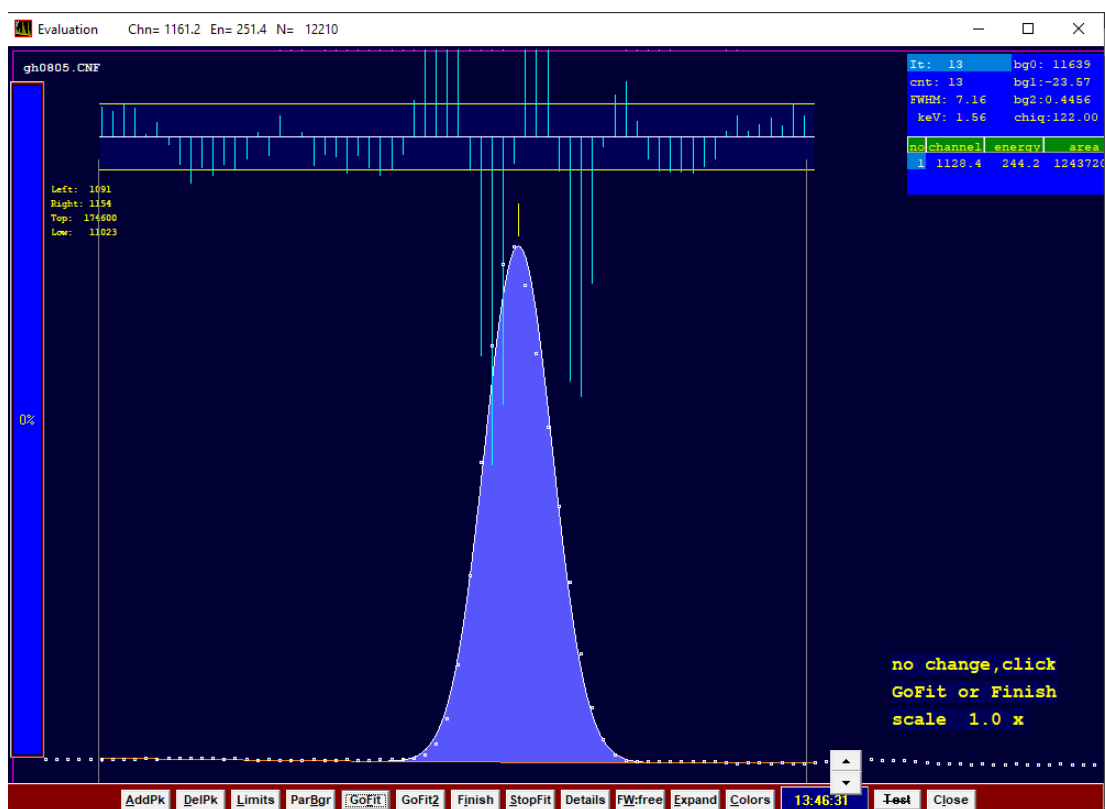
V polovodičových detektorech dochází při interakci gama záření k excitaci valenčního elektronu na vodivostní elektron. Ten se spolu s vzniklou dírou rozpohybuje směrem, který jim určuje elektrické pole, ve kterém je detektor vložen. Nejpokročilejší detektory tohoto typu používají jako detekční materiál velice čisté germanium (HPGe – High Purity Germanium) a mají výrazně lepší energetické rozlišení, ovšem zároveň je potřeba zajistit jejich chlazení na nízké teploty, na což bývá používán tekutý dusík. Tento detektor byl použit i pro měření dat použitých v této práci.

Detektor má také po každé detekci takzvanou mrtvou dobu, kdy se materiál detektoru vrací do základního stavu a během níž nedochází k zaznamenání částice, která prochází detektorem. Při měření doby měření se mrtvá doba nezapočítávala.

Výstupem z detektoru je spektrum, které se skládá z pozadí a několika takzvaných píků v podobě gaussovských funkcí, které mohou být také nazývány čáry. Pozadí pochází ze zdrojů, které nejsou spojeny s testovaným vzorkem a může být z výsledků poměrně jednoduše odstraněno odečtením měření pozadí od měření vzorku. Takto vzniklé spektrum je možno pomocí vhodného programu zanalyzovat. V této práci byl použit program DEIMOS^[4], který umožňuje vstupní data (viz obr. 4) fitovat funkcí složenou z lineárního pozadí a gaussovského píku (viz obr. 5). Z údajů na výstupu jsou v této práci potřeba energie píku E , plocha píku N_m a chyba plochy píku δ_N .



Obr. 4: Příklad zobrazení naměřeného spektra programem DEIMOS.



Obr. 5: Příklad fitování píku programem DEIMOS.

Jelikož detektor neobklopuje vzorek zcela a má konečnou velikost, přichází na scénu další dva faktory. Jeden je geometrická akceptance, kdy většinová část vzniklého záření ze vzorku letí mimo detektor a tento faktor působí na všech vlnových délkách stejně. U takzvané efektivity detekce záření letící do detektoru nemusí s objemem detektoru interagovat a tento faktor již může být na energii závislý. Jelikož není jednoduché od sebe oba tyto faktory oddělit, Jsou shrnuty do efektivity ε , která vyjadřuje poměr vyzářených a detekovaných fotonů. Z těchto důvodů je potřeba detektor zkalibrovat.

3 Kalibrace

Detektor použitý v této práci byl zkalibrován pomocí tří izotopů: ^{241}Am , ^{152}Eu a ^{133}Ba (viz tab.1), které vyzařují gama kvanta, jejichž energie pokrývají široký rozsah hodnot, a zároveň jsou již dobře proměřeny. U vybraných izotopů byla vedle poločasů rozpadu^[5] známa také aktivita A_0 vzorků, v nichž byly obsaženy, v jednom pevně daném čase t_0 a tak bylo možné pomocí vzorečku

$$A_1 = A_0 \cdot 2^{-\frac{(t_1 - t_0)}{T}} \quad (1)$$

spočítat skutečnou aktivitu A_1 v den měření t_1 a pomocí známých absolutních intenzit I_A pak určit, kolika kvantům vyslaným ze vzorku N_{0t} odpovídá počet detekovaných N_m .

$$N_{0t} = \frac{N_m}{\varepsilon \cdot I_A} \quad (2)$$

Koeficient ε určuje podíl vyslaných kvant, která byla detekována, a tak spočítání N_{0t} podle vztahu

$$N_{0t} = A_1 \cdot \tau \quad (3)$$

kde $\tau = 10 \text{ h}$ je doba měření, spolu s naměřenou plochou píku N_m a známými absolutními intenzitami umožňuje určit průběh efektivity ε v závislosti na energii. Je vhodné zavést si veličinu reálného počtu vyslaných kvant o dané energii N_t , která je svázána s N_m a N_{0t} vztahy (4) a (5)

$$N_t = \frac{N_m}{\varepsilon} \quad (4)$$

$$N_t = N_{0t} \cdot I_A \quad (5)$$

Zdroj záření byl od detektoru vzdálený 25,9 cm.

	A_0 [kBq]	T [d]	t_0	t_1	A_1 [kBq]	N_{0t} [10^6]
^{133}Ba	99,96	3 854	30.12.2014	03.12.2020	67,72	2 437,95
^{152}Eu	518	4 937	05.05.2015	02.12.2020	389,10	14 007,70
^{241}Am	469,8	158 004	30.12.2014	11.12.2020	465,34	16 752,34

Tab. 1: Tabulka izotopů využitých při kalibraci. A_0 je aktivita vzorku v čase t_0 , A_1 je aktivita v čase t_1 . T je poločas rozpadu příslušných izotopů a N_{0t} je počet rozpadů během doby měření

4 Zpracování dat

Měření samotného rubidia ^{83}Rb probíhalo stejně jako měření kalibrační s tím, že bylo měřeno i samotné pozadí, které pochází ze zdrojů mimo samotný testovací vzorek (např. přirozená radioaktivita nebo ostatní vzorky v laboratoři) a může být z výsledků poměrně jednoduše odstraněno odečtením měření pozadí od měření vzorku. Kvůli náhodné povaze měření i ne zcela přesnému fitování píků se obvykle dva píky na stejné pozici (jeden ve spektru a druhý z pozadí) neshodovaly naprosto přesně v energii a tak jako energii výsledného píku byl určen jejich průměr. Některé píky však neměly v pozadí svůj protějšek a u nich bylo považováno pozadí za nulové a nebyla tak jejich energie ani plocha měněna.

Poté, co byl ke každému píku přiřazen poměr P plochy pozadí vůči ploše naměřené u rubidia, se píky rozpadly na dvě skupiny. Jedna měla tento poměr menší než 5 % a ta byla vzata jako mající původ ve vzorku, ta druhá s poměrem nad 90 % byla považována za pozadí. Pomocí současných tabulek známých hodnot byly určeny píky patřící ^{83}Rb . Zbylé píky nepatřily ^{83}Rb a nebyly tak dále uvažovány. Následně byla určena intenzita I poměrem mezi N_i u daného píku a z N_i u píku o nejvyšším N_i .

5 Výsledky

5.1 Kalibrace

Ke kalibraci byly použity vzorky ^{241}Am , ^{152}Eu a ^{133}Ba , jejichž vlastnosti jsou uvedeny v tabulce 1. V tabulkách 2a, 2b a 2c jsou naměřené a teoretické hodnoty ^{133}Ba , ^{152}Eu a ^{241}Am v tomto pořadí. Intenzity, v tomto případě absolutní I_A byly převzaty z tabulek^[6]. Relativní chyba δ_N pochází z měření N_m a platí i pro ε . Pomocí vztahu (2) byla zjištěna efektivita ε detektoru pro danou energii. Všechny takto zjištěné efektivitivy byly proloženy polynomní funkcí třetího stupně a vznikla tak závislost

$$\varepsilon(E) = -1,9851 \cdot 10^{-10} E^3 + 5,9923 \cdot 10^{-7} E^2 - 6,0170 \cdot 10^{-4} E + 0,23328$$

zobrazena v grafu na obrázku 6.

E [keV]	I_A [%]	N_m [10^3]	δ_N [%]	N_{ot} [10^6]	ε [%]
53,16	2,14	103,4	0,9	2 437,95	0,20
79,61	2,65	-	-		-
81,00	32,90	1 567,9	0,1		0,20
276,40	7,16	185,0	0,4		0,11
302,85	18,34	424,6	0,2		0,09
356,01	62,05	1 225,0	0,1		0,08
383,85	8,94	164,3	0,4		0,08

Tab. 2a: Změřené a spočítané hodnoty ^{133}Ba

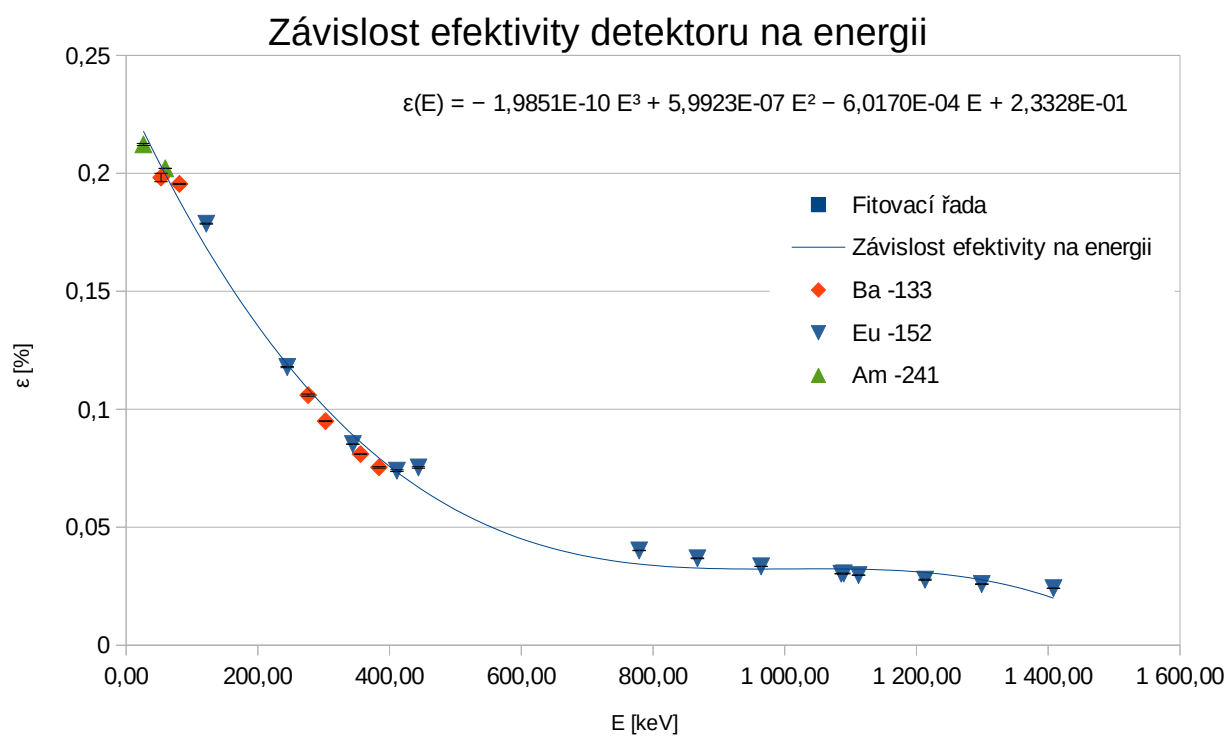
E [keV]	I_A [%]	N_m [10^3]	δ_N [%]	N_{ot} [10^6]	ε [%]
121,78	28,41	7 108,8	0,1	14 007,70	0,18
244,70	7,55	1 246,6	0,2		0,12
344,28	26,59	3 172,4	0,1		0,09
411,12	2,24	231,8	0,5		0,07
443,97	2,80	295,4	0,4		0,08
778,90	12,97	728,9	0,2		0,04
867,38	4,24	218,7	0,4		0,04
964,08	14,50	678,4	0,2		0,03
1 085,84	10,13	429,5	0,2		0,03
1 089,74	1,73	73,7	0,5		0,03
1 112,08	13,41	557,5	0,2		0,03
1 212,95	1,42	55,0	0,8		0,03
1 299,14	1,63	59,2	0,7		0,03
1 408,01	20,85	705,0	0,2		0,02

Tab. 2b: Změřené a spočítané hodnoty ^{152}Eu

E [keV]	I_A [%]	N_m [10^3]	δ_N [%]	N_{ot} [10^6]	ε [%]
26,34	2,31	821,3	0,2	16 752,34	0,21
59,54	35,92	12 161,7	0		0,20

Tab. 2c: Změřené a spočítané hodnoty ^{241}Am

Jak lze vidět v tabulce 2a nebylo možné u ^{133}Ba nafitovat pík o střední energii 79,61 keV, jelikož splýval se sousedním píkem o energii 81 keV, který měl výrazně větší intenzitu a tak byla nafitovaná plocha přiřčena jemu.



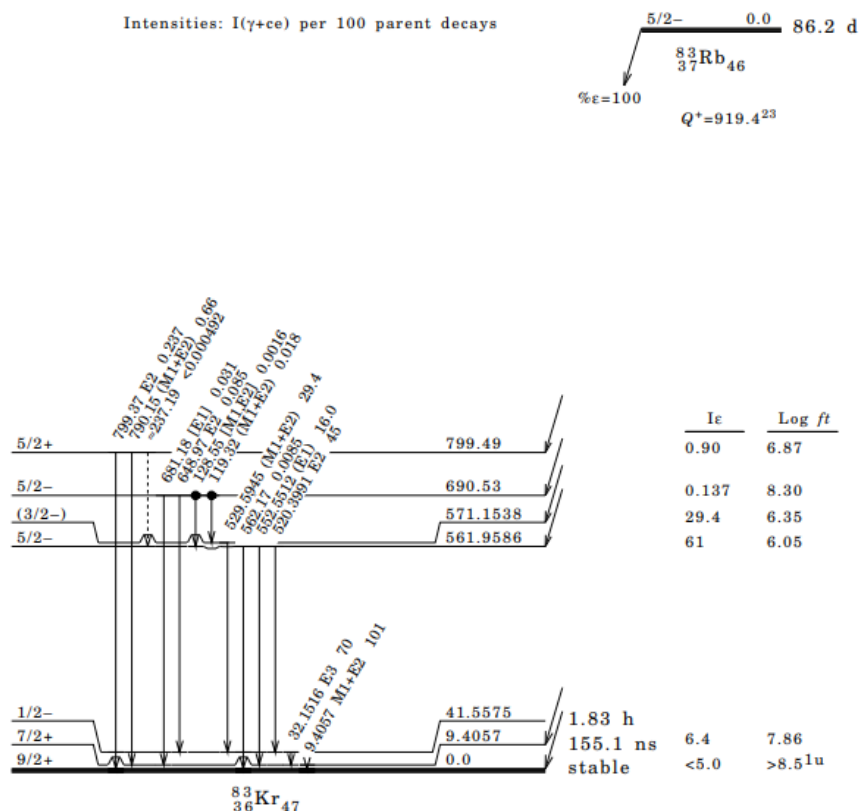
Obr. 6: Graf závislosti efektivity detektoru na energii detekovaného fotonu.

5.2 Rubidium 83

Výroba vzorku^[7] probíhala na cyklotronu TR-24, pomocí svazku protonů, který ozařoval terčík z plynné přírodní směsi kryptonu. Protony měly energii 24 MeV a proud svazku byl cca 45 μA. Krypton v terčíku měl tlak 10 atm. Hlavní reakce, která vedla ke vzniku ⁸³Rb byla ⁸⁴Kr(p,2n)⁸³Rb. Po ukončení ozařování se nechal terčík týden odstát aby se rozpadly krátce žijící izotopy. Poté byl vypláchnut vodou, ve které se rozpustilo rubidium a tato voda se pak nanasla na mylarovou folii, kde se po vypaření vody vytvořil vzorek. Energie E gama spektra, spolu s doposud měřenými příslušnými intenzitami I jsou uvedeny v tabulce 3 a graficky znázorněny na obr. 7, kde jsou uvedeny absolutní intenzity a ne relativní, které jsou v této práci myšleny pod pojmem „intenzita“, není-li specificky napsané „absolutní intenzita“. Relativní intenzitu daného píku určíme podělením jeho absolutní intenzity absolutní intenzitou píku s největší absolutní intenzitou pro daný izotop.

E [keV]	σ_E [keV]	I [%]	σ_I [%]
9,4057	0,0006	13,1	3,0
32,1516	0,0005	0,08	0,01
119,32	0,09	0,032	0,005
128,55	0,12	0,0030	0,0005
≈237,19	-	<0,0011	-
520,3991	0,0005	100	5
529,5945	0,0006	65,6	3,0
552,5512	0,0007	35,7	1,5
562,17	0,07	0,019	0,002
648,97	0,05	0,19	0,01
681,18	0,07	0,07	0,01
790,15	0,04	1,47	0,04
799,37	0,05	0,53	0,02

Tab. 3: Tabulka známých energií rozpadu ⁸³Rb a jím příslušejících intenzit.^[8]



Obr. 7: Schéma jaderných hladin ^{83}Kr vzniklého z rozpadu ^{83}Rb a přechodů mezi nimi i s příslušnými absolutními intenzitami.^[8]

V tabulce 4 jsou naměřené hodnoty vzorku ^{83}Rb a pozadí. V tabulce 5 je rozdíl hodnot pozadí a vzorku. Jejich zpracování pak v tabulce 6. Pík o energii 511keV patří fotonům z anihilace elektronu s pozitronem a pík o energii 881,91keV patří ^{84}Rb který vznikl při ozařování kryptonu spolu s ^{83}Rb . Ze zbylých hodnot byla spočítána intenzita podle vztahu (6). Pík o největším N_t byl ten o energii $E_0=520,31\text{keV}$. Relativní změna $\Delta_p I$ nové intenzity I oproti předešlým hodnotám I_s je vyjádřena v posledním sloupci tabulky 6.

$$I(E) = \frac{N_t(E)}{N_t(E_0)} \quad (6)$$

Měření rubidia 83			Měření pozadí		
E [keV]	N_m	δ_N [%]	E [keV]	N_m	δ_N [%]
72,452	240 937,7	0,5	72,48	9 016,1	2,8
74,657	461 218,9	0,3	74,682	18 005,6	1,9
84,49	223 227,1	1,1	84,522	5 576,3	5,7
87,09	73 322,3	2,5	87,017	1 168,2	34,8
118,539	6 590,6	16,8			
238,538	6 857,0	16,5	238,437	6 198,9	4
511,04	380 728,2	0,5	510,947	5 868,5	4,9
520,478	7 196 290,4	0,1	520,743	444,7	47,1
529,683	4 598 830,2	0,1	529,87	297,2	86,4
542,07	6 620,2	6,7			
552,66	2 418 495,9	0,1			
565,013	2 051,5	12,2			
583,293	4 886,4	4,8	583,311	5 113,0	3,1
609,45	8 760,1	2,8	609,476	8 822,1	2,1
648,769	11 831,2	2,2			
680,893	3 814,7	5,6			
727,573	1 313,4	11,9	727,613	1 469,0	21,6
768,531	740,1	16,8	768,586	723,8	13,1
789,466	74 819,0	0,6	786,068	198,4	37,5
798,885	28 094,7	1,5	795,434	805,1	13,6
860,847	690,5	15,3	860,886	866,2	17
881,907	173 692,1	0,4			
911,483	4 716,9	3,5	911,491	4 727,0	3
964,995	788,0	8,4	965,021	822,5	11,3
969,309	2 682,0	4,4	969,321	2 862,3	5,2
1120,804	2 651,5	8,8	1120,862	2 855,9	7,7
1461,659	34 384,5	0,8	1461,666	35 153,1	0,8
1765,343	2 696,0	3,5	1765,343	2 746,3	3,2

Tab. 4: Změřené hodnoty při měření vzorku rubidia 83 a pozadí. Tabulka obsahuje všechny změřené čáry, nejen ty patřící ^{83}Rb . N_m je plocha píku změřená s relativní chybou δ_N .

Rozdíl naměřených hodnot					
E [keV]	σ_E [keV]	N_m	σ_N	P [%]	
72,466	0,01	231921,6	1230,9	3,74	
74,6695	0,01	443213,3	1425,3	3,90	
84,506	0,02	217650,8	2476,0	2,50	
87,0535	0,04	72154,1	1877,6	1,59	
118,539	0,00	6590,6	1107,2	0,00	
238,4875	0,05	658,1	1158,3	90,40	
510,9935	0,05	374859,7	1925,2	1,54	
520,6105	0,13	7195845,7	7199,3	0,01	
529,7765	0,09	4598533	4606,0	0,01	
542,07	0,00	6620,2	443,6	0,00	
552,66	0,00	2418495,9	2418,5	0,00	
565,013	0,00	2051,5	250,3	0,00	
583,302	0,01	-226,6	283,1	104,64	
609,463	0,01	-62	307,4	100,71	
648,769	0,00	11831,2	260,3	0,00	
680,893	0,00	3814,7	213,6	0,00	
727,593	0,02	-155,6	353,7	111,85	
768,5585	0,03	16,3	156,4	97,80	
787,767	1,70	74620,6	455,0	0,27	
797,1595	1,73	27289,6	435,4	2,87	
860,8665	0,02	-175,7	181,2	125,45	
881,907	0,00	173692,1	694,8	0,00	
911,487	0,00	-10,1	217,6	100,21	
965,008	0,01	-34,5	114,1	104,38	
969,315	0,01	-180,3	189,9	106,72	
1120,833	0,03	-204,4	320,6	107,71	
1461,6625	0,00	-768,6	393,4	102,24	
1765,343	0,00	-50,3	128,9	101,87	

Tab. 5: Rozdíl hodnot naměřených u vzorku rubidia 83 a pozadí. N_m je rozdíl ploch píku se standardní odchylkou σ_N . P je poměr určující, jestli šlo o pozadí, vypočítaný jako poměr N_m naměřeného u pozadí a N_m naměřeného u vzorku ^{83}Rb .

E [keV]	$N_m [10^3]$	δ_N [%]	$N_t [10^3]$	I	δ_I [%]	I_s	$\Delta_p I$ [%]
118,539	6,6	16,8	38,76	0,0293	16,80	0,032	-8,4
520,6105	7 195,8	0,1	132 202,16	100,0000	0,14	100	0,0
529,7765	4 598,5	0,1	86 472,64	65,4094	0,14	65,6	-0,3
552,66	2 418,5	0,1	48 119,19	36,3982	0,14	35,7	2,0
565,013	2,1	12,2	42,04	0,0318	12,20	0,019	67,4
648,769	11,8	2,2	289,09	0,2187	2,20	0,19	15,1
680,893	3,8	5,6	98,48	0,0745	5,60	0,07	6,4
787,767	74,6	0,6	2 188,08	1,6551	0,62	1,47	12,6
797,1595	27,3	1,6	805,97	0,6096	1,60	0,53	15,0

Tab. 6: Tabulka píkù pøířazených ^{83}Rb , jejich ploch N_m , z nich spočítaných intenzit I a jejich relativních změn $\Delta_p I$. δ_I je relativní chyba intenzity I .

6 Diskuze

Díky typu použitého detektoru byly energie dopadnuvších kvant měřeny s vysokou přesností a tak data získaná z detektoru měla malou chybu, jak vypovídají zpracovaná data ve výstupu programu DEIMOS. Izotopy použité pro kalibraci vhodně pokrývaly interval energií, na kterém byl vzorek měřen vyjma oblasti mezi 500 keV a 700 keV (viz tab. 2a, tab. 2b, tab. 2c a graf na obr. 5). Z tohoto důvodu je možné, že se skutečné hodnoty v této oblasti nezanedbatelně odlišují od těch naměřených, avšak mimo tuto oblast by tato nejistota vliv mít neměla. Dobrým znakem přesnosti detektoru, ale i programu DEIMOS je i fakt, že na sebe, v grafu efektivity detektoru na obr. 6, datové řady všech izotopů navazují a že není žádná nijak posunutá. Vliv na výslednou efektivitu mohl mít i plexisklový (polymetylmetakrylát) obal, ve kterém byly kalibrační izotopy uloženy. Jeho vliv není v této práci uvažován, avšak pro další zpřesňování by bylo vhodné její vliv změřit a odečíst. Podle databáze^[9] by použitých 1 až 1,3 mm mělo mít stínění cca 1 % pro 100 keV a 2% pro 500 keV. Přesnost určení energie byla také velice dobrá jak lze vidět v tabulce 5, kde jsou zapsány průměry energií odpovídajících si píků z pozadí a ze vzorku, které se od sebe liší maximálně o 4 keV, ale většinou o dva řády méně. Při porovnání vypočítaných a původních intenzit ^{83}Rb , zapsaných v tab. 6, lze zjistit, že se intenzita přibližně změnila tím více, čím nižší má hodnotu, což je očekávatelný výsledek, jelikož nižší intenzita se hůře měří a je tak nepřesnější. Zároveň, ale se žádná intenzita nezměnila řádově. Nepodařilo se však identifikovat intenzity o energiích 9,41 keV, 32,15 keV, 128,55 keV a 237,19 keV. Pro jejich detekci by bylo potřeba zlepšit, buď expoziční čas nebo stínění od pozadí/přirozené radioaktivity.

7 Závěr

Pomocí izotopů ^{133}Ba , ^{152}Eu a ^{241}Am byla proměřena efektivita ε použitého germaniového detektoru. Ke zpracování dat byl použit program DEIMOS. Efektivita měla závislost na energii E zapsatelnou

$$\varepsilon(E) = -1,9851 \cdot 10^{-10} E^3 + 5,9923 \cdot 10^{-7} E^2 - 6,0170 \cdot 10^{-4} E + 0,23328$$

Pomocí stejného detektoru i programu byl poté proměřen vzorek ^{83}Rb a z tohoto měření odvozeny intenzity, které jsou zapsány v tabulce 7. Zároveň se podařilo na energii 510,99 keV identifikovat pík vzniklý anihilací elektronu s pozitronem a na energii 881,91 keV příměs ^{84}Rb , který vznikl při výrobě vzorku společně s ^{83}Rb . Nepodařilo se však identifikovat intenzity ^{83}Rb o energiích 9,41 keV, 32,15 keV, 128,55 keV a 237,19 keV.

E [keV]	I [%]	δ_i [%]
119,32	0,0293	16,80
520,3991	100,00	0,14
529,5945	65,409	0,14
552,5512	36,398	0,14
562,17	0,0318	12,20
648,97	0,2187	2,20
681,18	0,0745	5,60
790,15	1,6551	0,62
799,37	0,6096	1,60

Tab. 7: Zjištěné intenzity ^{83}Rb pro energie z tabulky [8].

Seznam použité literatury

- [1] *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2021-5-23]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/Compton_scattering
- [2] *Wikiversity* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2007 [cit. 2021-5-23]. Dostupné z: <https://en.wikiversity.org/wiki/File:Photoelectric-E.PNG>
- [3] *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2021-5-23]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/Pair_production
- [4] FRÁNA, J. Program DEIMOS32 for gamma-ray spectra evaluation. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*. 2003, **257**(3), 583 - 587.
- [5] *Live Chart of Nuclides* [online]. Vienna, 2009- [cit. 2021-5-23]. Dostupné z: <https://www-nds.iaea.org/relnsd/vcharthtml/VChartHTML.html>
- [6] BÉ, Marie-Martine a Valery P. CHECHEV. Recommended standards for gamma ray intensities. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A*. 2013, (728), 152 - 172.
- [7] VĚNOS, D., A. ŠPALEK, O. LEBEDA a M. FIŠER. ^{83m}Kr radioactive source based on ^{83}Rb trapped in cation-exchange paper or in zeolite. *Applied Radiation and Isotopes*. 2005, (63), 323 - 327.
- [8] MCCUTCHAN, E.A. Nuclear Data Sheets for $A = 83$. *Nuclear Data Sheets*. 2015, (125), 201 - 394.
- [9] *X-Ray Mass Attenuation Coefficients: NIST Standard Reference Database 126* [online]. Gaithersburg, 2004 [cit. 2021-5-23]. Dostupné z: <https://www.nist.gov/pml/x-ray-mass-attenuation-coefficients>

Seznam tabulek

<i>1 - Tabulka izotopů využitých při kalibraci. A_0 je aktivita vzorku v čase t_0, A_1 je aktivita v čase t_1. T je poločas rozpadu příslušných izotopů a N_{0t} je počet rozpadů během doby měření.</i>	<i>7</i>
<i>2a - Změřené a spočítané hodnoty ^{133}Ba.</i>	<i>9</i>
<i>2b - Změřené a spočítané hodnoty ^{152}Eu.</i>	<i>9</i>
<i>2c - Změřené a spočítané hodnoty ^{241}Am.</i>	<i>9</i>
<i>3 - Tabulka známých energií rozpadu ^{83}Rb a jím příslušejících intenzit.</i>	<i>11</i>
<i>4 - Změřené hodnoty při měření vzorku rubidia 83 a pozadí. Tabulka obsahuje všechny změřené čáry, nejen ty patřící ^{83}Rb. N_m je plocha píku změřená s relativní chybou δ_N.</i>	<i>13</i>
<i>5 - Rozdíl hodnot naměřených u vzorku rubidia 83 a pozadí. N_m je rozdíl ploch píku se standartní odchylkou σ_N. P je poměr určující, jestli šlo o pozadí vypočítaný jako poměr N_m naměřeného u pozadí a N_m naměřeného u vzorku ^{83}Rb.</i>	<i>14</i>
<i>6 - Tabulka píků přiřazených ^{83}Rb, jejich ploch N_m, z nich spočítaných intenzit I a jejich relativních změn $\Delta_P I$. δ_I je relativní chyba intenzity I.</i>	<i>15</i>
<i>7 - Zjištěné intenzity ^{83}Rb pro energie z tabulky [8].</i>	<i>17</i>

Seznam použitých obrázků

1 - Schéma Comptonova rozptylu.	3
2 - Schéma vnitřního fotoefektu.	3
3 - Schéma produkce páru částice-antičástice. Zde elektron e^- a pozitron e^+	3
4 - Příklad zobrazení naměřeného spektra programem DEIMOS.	5
5 - Příklad fitování píku programem DEIMOS.	5
6 - Graf závislosti efektivity detektoru na energii detekovaného fotonu.	10
7 - Schéma jaderných hladin ^{83}Kr vzniklého z rozpadu ^{83}Rb a přechodů mezi nimi i s příslušnými absolutními intenzitami.	12