

České vysoké učení technické v Praze
Fakulta jaderná a fyzikálně inženýrská

Katedra jaderných reaktorů

Obor: Jadrové inženýrstvo



Spektrometria neutrónového poľa urýchľovačom-riadeného
zdroja NG-2 s $p(20) + \text{Be}$ reakciou

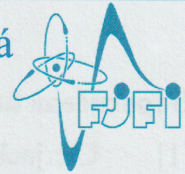
Neutron field spectrometry of the NG-2 accelerator-driven
source with the $p(20) + \text{Be}$ reaction

DIPLOMOVÁ PRÁCA

Výpracoval: Bc. Ján Kozic

Vedúci práce: Ing. Milan Štefánik, Ph.D.

Rok: 2021



ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Student: **Bc. Ján Kozic**

Studijní program: Aplikace přírodních věd

Obor: Jaderné inženýrství

Název práce česky: **Spektrometrie neutronového pole urychlovačem-řízeného zdroje NG-2 s $p(20)+Be$ reakcí**

Název práce anglicky: Neutron field spectrometry of the NG-2 accelerator-driven source with the $p(20) + Be$ reaction

Pokyny pro vypracování:

1. Navažte na svoji bakalářskou práci a výzkumný úkol a proveďte shrnutí a prohloubení dosud nabytých vědomostí v oblasti aktivačních měření s využitím prahových dozimetrických reakcí. Zaměřte se zejména na problematiku spektrometrie neutronových polí aktivační metodou na urychlovačem řízených zdrojích rychlých neutronů.
2. Popište záležitosti neutronových energetických spekter a spektrálních výtěžků urychlovačem řízených neutronových zdrojů. Zaměřte se hlavně na neutronová pole se spojitými spektry zejména zdrojové reakce $p + Be$ s energeticky širokou vrstvou beryllia. Charakterizujte jejich praktické využití.
3. Dokončete analýzu a zpracovávání dat z aktivačního experimentu realizovaného v době bakalářské práce s využitím urychlovačem řízeného zdroje rychlých neutronů NG-2 na ÚJF AV ČR s beryliovým terčem, který byl bombardovaný 20 MeV svazkem protonů. Stanovte reakční rychlosti zbylých aktivačních a prahových reakcí se zahrnutím odpovídajících spektrometrických korekcí.
4. Na základě souboru reakčních rychlostí získaných z ozařovacího experimentu zrekonstruuje nové spektrum generátoru rychlých neutronů NG-2 se zdrojovou reakcí $p(20)+Be$. Stanovené neutronové spektrum charakterizujte a Vaše výsledky konfrontujte s výsledky jiných autorů pro obdobná měření ve světě.

Doporučená literatura:

- [1] Cierjacks S.: *Neutron Sources for Basic Physics and Applications*, Pergamon Press Ltd., Oxford, 1983, ISBN 978-0080293516
- [2] Lone, M. A. et al.: *Thick target neutron yields and spectral distributions from $^7\text{Li}(d,n)$, $^7\text{Li}(p,n)$ and $^9\text{Be}(d,n)$, $^9\text{Be}(p,n)$ reactions*, Nuclear Instruments and Methods 143 (1977), p. 331-344
- [3] Ibarra, A. et al.: *The IFMIF-DONES project: preliminary engineering design*, Nuclear Fusion 58 (2018), 105002
- [4] Štefánik M. et al.: *Neutron field study of $p(35)+\text{Be}$ source reaction at the NPI Rez*, Radiation Physics and Chemistry 155 (2019), p. 294-298
- [5] Waterman, F.M. et al.: *Neutron spectra from 35 and 46 MeV protons, 16 and 28 MeV deuterons, and 44 MeV ^3He ions on thick beryllium*, Medical Physics 6 (1979), p. 432-435

Jméno a pracoviště vedoucího práce:

Ing. Milan Štefánik, Ph.D.
KJR FJFI ČVUT v Praze

Jméno a pracoviště konzultanta:

Ing. Jan Štursa
Ústav jaderné fyziky AV ČR v Řeži, v.v.i.

Datum zadání diplomové práce:

19.10.2020

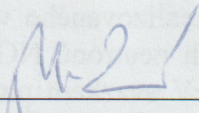
Datum odevzdání diplomové práce:

3.5.2021

Doba platnosti zadání je dva roky od data zadání.

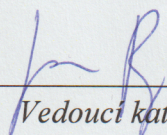
V Praze dne 19. 10. 2020

doc. Ing. Martin Kropík, CSc.



Garant oboru

Ing. Jan Rataj, Ph.D.



Vedoucí katedry



prof. Ing. Igor Jex, DrSc.



Děkan

Prehlásenie

Odovzdaním tejto diplomovej práce súhlasím, že v súlade s príslušnými ustanoveniami autorského zákona je ČVUT oprávnené použiť diplomovú prácu k výuke alebo k vlastnej vnútornej potrebe, samozrejme nie za účelom priameho alebo nepriameho hospodárskeho alebo obchodného prospechu. Na použitie, na ktoré sa nevzťahuje predchádzajúca veta, má ČVUT za obvyklých podmienok právo na uzavretie licenčnej zmluvy o použití diplomovej práce. Elektronická verzia diplomovej práce je zhodná s tlačenu verziou a obsahuje všetky náležitosti diplomovej práce. Ďalej prehlasujem, že som svoju diplomovú prácu vypracoval samostatne a použil iba podklady uvedené v priloženom zozname literatúry.

V Prahe dňa

.....

Bc. Ján Kozic

Pod'akovanie

Ďakujem vedúcemu práce Ing. Milanovi Štefánikovi, Ph.D. za vedenie mojej diplomej práce, konzultácie a rady pri tvorbe práce.

Aktivačný experiment bol vykonaný na zariadeniach CANAM [1] ÚJF AV ČR Řež s podporou projektu MŠMT číslo LM2015056.

Bc. Ján Kozic

Názov práce:

Spektrometria neutrónového poľa urýchľovačom-riadeného zdroja NG-2 s $p(20) + \text{Be}$ reakciou

Autor: Bc. Ján Kozic

Študijný program: Aplikácia prírodných vied

Obor: Jadrové inžinierstvo

Druh práce: Diplomová práca

Vedúci práce: Ing. Milan Štefánik, Ph.D.

Katedra jaderných reaktorů,
Fakulta jaderná a fyzikálně inženýrská,
České vysoké učení technické v Praze

Konzultant: Ing. Jan Štursa

Oddělení urychlovačů ÚJF AV ČR v.v.i.

Abstrakt: V diplomovej práci je analyzované energetické spektrum nového neutrónového poľa na báze reakcie $p(20) + \text{Be}$. Neutrónové pole vzniká bombardovaním urýchlených protónov izochrónnym cyklotrónom U-120M na energiu 20 MeV energeticky hrubého berýliového terča v terčovej stanici NG-2. Reakcia $p(20) + \text{Be}$ produkuje spojité energetické neutrónové spektrum s energiou do 18 MeV. V rámci analýzy nového neutrónového poľa bol vykonaný aktivačný experiment v ÚJF AV ČR v obci Husinec pri Prahe. Aktivačný experiment bol motivovaný snahou rozšíriť experimentálne možnosti terčovej stanice NG-2 v oblasti aktivačnej analýzy rýchlymi neutrónmi, integrálnych validácií a meraní nových jadrových dát. Na analýzu bola využitá metóda aktivačnej techniky a v novom neutrónovom poli bola ožiarená sada desiatich aktivačných detektorov (Au, In, Fe, Co, Ni, Nb, Al, Ti, Lu a Y). V predkladanej diplomovej práci sú analyzované posledné štyri aktivačné detektory z materiálov Lu, Nb, Ni a Y a sú im stanovené reakčné rýchlosti pre aktivačné a prahové reakcie. Na základe sady reakčných rýchlostí aktivačných a prahových reakcií neutrónov s aktivačnými detektormi bolo zrekonštruované spektrum neutrónového poľa $p(20) + \text{Be}$ pomocou rekonštrukčného kódu SAND II. Spektrum neutrónového poľa $p(20) + \text{Be}$ bude možné použiť hlavne pri experimentoch materiálového výskumu, validácie a merania nových jadrových dát.

Kľúčové slová: Aktivačná technika, aktivačné detektory, reakčná rýchlosť, jadrová gama-spektrometria, energetické neutrónové spektrum, rekonštrukcia neutrónového spektra, izochrónny cyklotrón U-120M, terčová stanica NG-2

Title:

Neutron field spectrometry of the NG-2 accelerator-driven source with the $p(20) + \text{Be}$ reaction

Author: Bc. Ján Kozic

Abstract: Neutron energy spectrum of new neutron field based on reaction $p(20) + \text{Be}$ is analysed in this diploma thesis. Neutron field is created by bombardment energetically thick beryllium target in target station NG-2 with protons accelerated to energy 20 MeV by isochronous cyclotron U-120M. Reaction $p(20) + \text{Be}$ produces broad neutron spectrum with energies up to 18 MeV. Activation experiment was performed at NPI CAS in Řež near Prague. Motivation for the experiment was an effort to increase experimental possibilities of target station NG-2 for activation analysis with fast neutrons, nuclear data integral validation and measurements. Activation technique was used and set of ten activation detectors (Au, In, Fe, Co, Ni, Nb, Al, Ti, Lu and Y) was irradiated in order to analyze new neutron field. In this diploma thesis are analysed last four activation detectors from materials Lu, Nb, Ni and Y. Reaction rates for activation and threshold reaction in chosen activation detectors were estimated. Spectrum of neutron field from source reaction $p(20) + \text{Be}$ was unfolded based on set of reaction rates of activation and threshold neutron reactions with activation detectors using unfolding code SAND II. Spectrum of neutron field from source reaction $p(20) + \text{Be}$ could be used for materials research, nuclear data validation and measurements.

Key words: Activation technique, activation detectors, reaction rate, nuclear gamma-spectrometry, neutron energy spectrum, neutron energy spectrum unfolding, isochronous cyclotron U-120M, target station NG-2

Obsah

Zoznam veličín	11
Zoznam skratiek	15
Zoznam obrázkov	18
Zoznam tabuliek	20
Úvod	21
1 Neutrónové spektrum a spektrálny neutrónový výťažok	23
1.1 Zdrojová reakcia $p + \text{Be}$	24
1.2 Aplikácie neutrónových zdrojov	25
1.3 Pracoviská využívajúce urýchľovačom riadený generátor neutrónov . .	27
1.3.1 Physikalisch-Technische Bundesanstalt	27
1.3.2 Kansai BNCT Medical Center	28
1.3.3 Helsinki University Hospital	28
2 Spektrometria neutrónového poľa	29
2.1 Aktivačná technika	29
2.2 Korekcie reakčnej rýchlosti	30
2.3 Jadrová spektrometria gama žiarenia	31
2.3.1 Reakcie gama žiarenia pri interakcii s látkou	31
2.4 Energetická a účinnostná kalibrácia polovodičového HPGe detektora .	33
2.5 Korekcie merania gama spektra	34
3 Aktivačný experiment s neutrónovým poľom $p(20) + \text{Be}$	37
3.1 Ústav jadrovej fyziky Akadémie vied Českej republiky	37
3.2 Príprava aktivačného experimentu	39
3.3 Priebeh aktivačného experimentu	41
3.4 Výsledky analýzy vybraných aktivačných detektorov	43

4	Rekonštrukcia energetického neutrónového spektra	47
4.1	Metódy rekonštrukcie neutrónového spektra	47
4.1.1	Iteračná metóda	48
4.1.2	Metóda najmenších štvorcov	48
4.1.3	Genetický algoritmus	48
4.1.4	Metóda Monte Carlo	49
4.2	Výpočtové kódy pre rekonštrukciu neutrónového spektra	49
4.2.1	SAND II	49
4.2.2	GRAVEL	50
4.2.3	STAY'SL	50
4.2.4	MCNP	50
4.3	Simulácia neutrónového spektra zo zdrojovej reakcie $p(20) + Be$. . .	50
4.4	Rekonštrukcia spektra zdrojovej reakcie $p(20) + Be$	51
	Záver	55
	Literatúra	57
	Prílohy	63
A	Stanovené kalibračné krivky HPGe detektora Canberra	63
B	Detegované aktivačné a prahové reakcie	65
C	Reakčné rýchlosti	67
D	Polčasy rozpadu	69

Zoznam veličín

A	(cm ²)	Plocha detektora
A_s	(Bq)	Surová aktivita
a_i	(-)	i -ta fitovacia konštanta polynómu absolútnej detekčnej účinnosti píkov plného pohltienia
d	(m)	Kolmá vzdialenosť diskového gama zdroja od detektora
d'	(m)	Vzdialenosť zdroja gama žiarenia od infinitezimálneho elementu plochy detektora
E_{\max}	(MeV)	Maximálna energia neutrónov
E_n	(MeV)	Energia neutrónu
\overline{E}_n	(MeV)	Stredná energia neutrónov
E_p	(MeV)	Energia urýchlených protónov
E_{thr}	(MeV)	Prahová energia pre danú reakciu
E_γ	(MeV)	Energia gama žiarenia
$f_{A_{\text{sat}}}$	(-)	Korekčný faktor saturovanej aktivity
f_{att}	(-)	Faktor pre opravu na samotienenie zdroja
f_{cool}	(-)	Korekčný faktor vymierania vzorky
f_{ddm}	(-)	Korekčný faktor rozpadu v priebehu merania gama spektra
f_g	(-)	Koeficient pre geometrickú opravu
f_p	(-)	Korekčný faktor pre opravu na fluktuáciu intenzity zväzku nabitých častíc
$I(E_\gamma)$	(-)	Intenzita gama linky
I_i	(-)	Počet protónov v i -tom ožarovacom intervale
I_{total}	(-)	Celkový počet protónov za celú dobu ožarovania
N_0	(-)	Počet neutrálnych jadier materiálu aktivačného detektora
P_1	(s ⁻¹)	Aktivita kalibračného etalóna v čase kalibrácie
P_2	(s ⁻¹)	Nameraná aktivita kalibračného etalóna
Q	(MeV)	Energia reakcie
R_D	(mm)	Polomer kryštálu detektora
R_{disk}	(mm)	Polomer diskového zdroja gama žiarenia

R_m	(mm)	Polomer valcového zdroja gama žiarenia
r_D	(mm)	Cylindrická súradnica polomeru infinitezimálneho elementu plochy detektora
r'	(mm)	Cylindrická súradnica polomeru bodového zdroja
R_R	(s ⁻¹)	Reakčná rýchlosť pre danú reakciu
$S(E_\gamma)$	(-)	Plocha píku úplného pohltienia v gama spektre
$T_{1/2}$	(h)	Polčas rozpadu
$T_{1/2, \text{tabulárny}}$	(h)	Tabulárna hodnota polčasu rozpadu
t_{cool}	(s)	Doba vymierania
t_i	(s)	Doba i -teho ožarovacieho intervalu
t_i^e	(s)	Doba od konca i -teho ožarovacieho intervalu
t_{irr}	(s)	Doba ožarovania
t_{live}	(s)	Doba merania gama spektra
t_{real}	(s)	Doba merania gama spektra so započítaním mŕtvej doby
X	(cm)	Hrúbka aktivačného detektora
z'	(mm)	Kolmá vzdialenosť bodového zdroja od detektora
β	(-)	Uhol medzi spojnicou elementu plochy detektora s bodovým zdrojom a priamkou vedenou bodovým zdrojom, ktorá je kolmá na plochu detektora
ε	(-)	Detekčná účinnosť
$\varepsilon_{\text{ar}}(E_\gamma)$	(-)	Absolútna detekčná účinnosť píkov plného pohltienia HPGe detektora pre referenčnú geometriu
θ	(-)	Uhol medzi r_D a r'
λ	(s ⁻¹)	Rozpadová konštanta daného rádioaktívneho jadra
μ	(cm ⁻¹)	Lineárny súčiniteľ zoslabenia gama žiarenia v danej látke
$\sigma(E_n)$	(b)	Mikroskopický účinný prierez pre danú reakciu
σ_A	(%)	Relatívna neurčitosť referenčnej aktivity etalónu
σ_{A_s}	(%)	Relatívna neurčitosť surovej aktivity
σ_{I_γ}	(%)	Relatívna neurčitosť intenzity gama žiarenia
σ_j	(%)	Relatívna neurčitosť j -tej veličiny
σ_{R_R}	(%)	Relatívna neurčitosť reakčnej rýchlosti
σ_S	(%)	Relatívna neurčitosť plochy pod píkom plnej absorpcie
$\sigma_{T_{1/2}}$	(%)	Relatívna neurčitosť polčasu rozpadu
$\sigma_{\varepsilon_{\text{ar}}}$	(%)	Relatívna neurčitosť absolútnej detekčnej účinnosti píkov plného pohltienia
$\phi(E_n)$	(cm ⁻² s ⁻¹ MeV ⁻¹)	Spektrálna hustota toku neutrónov
Ω	(-)	Priestorový uhol, pod ktorým emituje diskový zdroj gama žiarenie na detektor

- Ω_{cp} (-) Priestorový uhol, pod ktorým emituje gama žiarenie koaxiálne umiestnený bodový zdroj na detektor
- Ω_{ref} (-) Priestorový uhol, pod ktorým emituje gama žiarenie kalibračný etalón na detektor

Zoznam skratiek

AV ČR	Akadémia vied Českej republiky, The Czech Academy of Sciences
BNCT	Bórová neutrónová záchytná terapia, Boron neutron capture therapy
CANAM	Centrum urýchľovačov a jadrovo analytických metód, Center of Accelerators and Nuclear Analytical Methods
FEP	Pík plného pohltienia, Full energy peak
HPGe	Germánium s vysokou čistotou, High Purity Germanium
ITER	Medzinárodný experimentálny termojadrový reaktor, International
MCNP	N-časticový transportný kód Monte Carlo, Monte Carlo N-Particle Transport code
MCNPX	Rozšírený N-časticový transportný kód Monte Carlo, Monte Carlo N-Particle Transport extended code
NG	Neutrónový generátor, Neutron generator
PTB	Physikalisch-Technische Bundesanstalt
SAND II	Analýza spektra neutrónovými detektormi II, Spectrum Analysis by Neutron Detectors II
STAY'SL	Dozimetrický program pre rekonštrukciu spektra využívajúci metódu najmenších štvorcov, Least-squares dosimetry unfolding: the program
ÚJF	Ústav jadrovej fyziky, Nuclear Physics Institute
US	Spojené štáty, United States

Zoznam obrázkov

Obr. 1.1	Spektrálne výťažky neutrónov zo zdrojovej reakcie $p + \text{Be}$, ktoré namerlal dr. Lone.	25
Obr. 2.1	Mikroskopické účinné prierezy fotoelektrického javu, Comptonovho rozptylu a produkcie elektrón-pozitrónových párov na germániu.	32
Obr. 2.2	Schéma geometrie merania valcového zdroja gama žiarenia.	35
Obr. 3.1	Mikroskopický účinný prierez pre reakcie na ^{175}Lu	39
Obr. 3.2	Mikroskopický účinný prierez pre reakcie na ^{58}Ni	40
Obr. 3.3	Berýliová terčová stanica pripojená k cyklotrónu U-120M.	41
Obr. 3.4	Časová závislosť intenzity zväzku protónov na berýliovom terči v priebehu ožarovania.	42
Obr. 3.5	Sada aktivačných detektorov.	42
Obr. 3.6	Sady aktivačných detektorov umiestnených v držiaku na berýliovej terčovej stanici.	43
Obr. 3.7	Časová závislosť surovej aktivity vybraných produktov aktivačných a prahových reakcií.	46
Obr. 4.1	Simulované spektrum zdrojovej reakcie $p(20) + \text{Be}$ s geometriou odpovedajúcou aktivačnému experimentu.	51
Obr. 4.2	Výsledné zrekonštruované spektrum zdrojovej reakcie $p(20) + \text{Be}$ v porovnaní so simulovaným spektrom v kóde MCNPX.	52
Obr. 4.3	Neutrónové spektrum zo zdrojovej reakcie $p(18) + \text{Be}$ meral doktor Lone.	53

Obr. 4.4	Neutrónové spektrum zo zdrojovej reakcie $p(19,92) + \text{Be}$ meral pán Brede.	53
Obr. A.1	Absolútna píkova detekčná účinnosť HPGe detektora Canberra pre vzdialenosť zdroj-detektor 5 cm.	64
Obr. A.2	Absolútna píkova detekčná účinnosť HPGe detektora Canberra pre vzdialenosť zdroj-detektor 10 cm.	64

Zoznam tabuliek

Tab. 1.1	Reakcie produkujúce neutróny pri interakcii protónov s berýliom.	24
Tab. 1.2	Zoznam vybraných pracovísk s urýchľovačom riadeným generátorom neutrónov slúžiacim na BNCT.	26
Tab. 1.3	Parametre izochrónneho cyklotrónu prevádzkovaného v PTB.	27
Tab. 1.4	Parametre tandetronu prevádzkovaného v PTB.	28
Tab. 3.1	Parametre urýchlených a vyvedených zväzkov z izochrónneho cyklotrónu U-120M.	38
Tab. 3.2	Detegované aktivačné a prahové reakcie spolu s ich základnými charakteristikami.	44
Tab. 3.3	Výsledná sada reakčných rýchlostí spolu s ich relatívnymi neurčitostami.	44
Tab. 3.4	Porovnanie stanovených a tabelárnych polčasov rozpadu vybraných produktov aktivačných a prahových reakcií.	46
Tab. 4.1	Výstupné podiely C/E .	54
Tab. A.1	Parametre použitých kalibračných etalónov.	63
Tab. B.1	Detegované aktivačné a prahové reakcie v aktivačných detektoroch z Al, Au a Co spolu s ich prahovou energiou.	65
Tab. B.2	Detegované aktivačné a prahové reakcie v aktivačných detektoroch z Fe, In a Ti spolu s ich prahovou energiou.	65
Tab. C.1	Stanovené reakčné rýchlosti detegovaných aktivačných a prahových reakcií v aktivačných detektoroch z Al, Au a Co.	67

Tab. C.2 Stanovené reakčné rýchlosti detegovaných aktivačných a prahových reakcií v aktivačných detektoroch z Fe, In a Ti.	67
Tab. D.1 Porovnanie stanovených a tabelárnych polčasov rozpadu produktov jadrových reakcií v aktivačných detektoroch z Al, Au a Co. .	69
Tab. D.2 Porovnanie stanovených a tabelárnych polčasov rozpadu produktov jadrových reakcií v aktivačných detektoroch z Fe, In a Ti. . .	69

Úvod

Energetické neutrónové spektrum predstavuje jednu zo základných charakteristík neutrónového zdroja. Experimentálne aplikácie ako napríklad neutrónová rádiografia, materiálový výskum či validácia a meranie jadrových dát vyžaduje znalosť neutrónového spektra. Energetické spektrum neutrónového zdroja je možné charakterizovať viacerými metódami, napríklad metódou *time-of-flight*, metódou spektrometrie odrazených protónov a metódou aktivačnej techniky.

Cieľom diplomovej práce bolo stanovenie energetického neutrónového spektra izochrónnym cyklotrónom U-120M riadeného neutrónového generátoru NG-2 s energeticky hrubým berýliovým terčom využívajúcim zdrojovú reakciu $p(20) + \text{Be}$ s využitím metódy aktivačnej techniky. Pri zdrojovej reakcii $p(20) + \text{Be}$ je berýliový terč bombardovaný protónmi urýchlenými na energiu 20 MeV. Aktivačná technika predstavuje metódu analýzy neznámeho neutrónového poľa pomocou ožarovania spektroskopicky tenkých fólií nazývaných aktivačné detektory s následnou gamaspektrometrickou analýzou. Najväčšou výhodou aktivačnej techniky je fakt, že metóda netrpí mŕtvou dobou detekcie neutrónov, čo umožňuje jej použitie aj v blízkych geometriách zdroja neutrónov. Navyše efekt priestorovej integrácie neutrónového toku fóliami z dôvodu ich nebodovosti zabezpečuje, že stanovené energetické neutrónové spektrum poskytuje experimentátorom čo najpresnejšiu informáciu o neutrónovom poli, pretože aktivačné detektory, vzorky pre aktivačnú analýzu rýchlymi neutrónmi a testy radiačnej odolnosti majú porovnateľné rozmery. Za štandardnej prevádzky terčovej stanice NG-2 je využívaná zdrojová reakcia $p(35) + \text{Be}$ s ohľadom na experimenty v nadväznosti na termonukleárnu fúziu. Avšak z hľadiska experimentov aktivačnej analýzy rýchlymi neutrónmi vznikla požiadavka na popis neutrónového poľa využívajúceho zdrojovú reakciu $p(20) + \text{Be}$. Aktivačný experiment bol vykonaný už v rámci bakalárskej práce na Ústave jadrovej fyziky Akadémie vied Českej republiky (ÚJF AV ČR) dňa 7.12.2018 s využitím zdrojovej reakcie $p(20) + \text{Be}$. Spomínaná zdrojová reakcia produkuje spojité neutrónové spektrum s energiou do 18 MeV. Neutrónové pole zo zdrojovej reakcie $p(20) + \text{Be}$ svojím spektrom takmer úplne pokrýva neutrónové spektrum fúznej reakcie $d + T$, ktorá produkuje kvazi-

monoenergetické spektrum neutrónov s píkcom na energii 14 MeV a maximálnou energiou neutrónov 20 MeV, čo umožňuje využitie zdrojovej reakcie $p(20) + \text{Be}$ pre výskum materiálov pre budúce fúzne reaktory ako napríklad zariadenie International Thermonuclear Experimental Reactor (ITER) [2]. Nové neutrónové pole zo zdrojovej reakcie $p(20) + \text{Be}$ bude možné použiť na experimenty integrálnej validácie a merania jadrových dát a aktivačnú analýzu rýchlymi neutrónmi, čím sa rozšíria experimentálne možnosti terčovej stanice NG-2.

Diplomová práca priamo nadväzuje na bakalársku prácu [3] a výskumnú úlohu [4], v ktorých bola vykonaná rešerš na tému aktivačnej techniky a s ňou spojenou jadrovou gama-spektrometriou. V bakalárskej práci [3] a výskumnej úlohe [4] bola vykonaná analýza časti sady ožiarených aktivačných detektorov. Diplomová práca zhrňuje a rozširuje poznatky v oblasti aktivačnej techniky a rekonštrukcie energetického neutrónového spektra. V experimentálnej časti práce je dokončená analýza sady ožiarených aktivačných detektorov a vykonaná rekonštrukcia spektra neutrónového poľa zo zdrojovej reakcie $p(20) + \text{Be}$.

Prvá kapitola diplomovej práce je venovaná záležitostiam neutrónových spektier a spektrálnych výťažkov urýchľovačom riadených neutrónových generátorov. Ďalej je popísaná zdrojová reakcia $p + \text{Be}$, ktorá bola využitá v rámci aktivačného experimentu na ÚJF AV ČR. Kapitola obsahuje aj stručný popis aplikácií neutrónových zdrojov a pracovísk disponujúcich urýchľovačom riadeným generátorom neutrónov.

V druhej kapitole diplomovej práce sú zhrnuté a rozšírené znalosti v oblasti aktivačných meraní. V rámci popisu aktivačnej techniky sa zavádza veličina *reakčná rýchlosť* a jej prislúchajúce korekcie. Ďalej je popísaná jadrová gama-spektrometria, kde sú uvedené základné interakcie gama žiarenia s látkovým prostredím, kalibrácia polovodičového HPGe detektora a korekcie pri meraní gama žiarenia.

Tretia kapitola diplomovej práce popisuje aktivačný experiment vykonaný v rámci bakalárskej práce. Uvádza pracovisko ÚJF, podrobne popisuje izochrónny cyklotrón U-120M a terčovú stanicu NG-2. Ďalej je podrobne popísaná príprava a priebeh aktivačného experimentu. V tretej kapitole sú zhrnuté výsledky analýzy posledných štyroch aktivačných detektorov z materiálov Lu, Nb, Ni a Y.

Posledná kapitola je venovaná rekonštrukcii energetického neutrónového spektra. Kapitola stručne popisuje metódy a výpočtové kódy slúžiace na rekonštrukciu neutrónového spektra. Ďalej pokračuje popis simulácie neutrónového spektra zo zdrojovej reakcie $p(20) + \text{Be}$ s geometriou odpovedajúcou aktivačnému experimentu. Najdôležitejšou časťou poslednej kapitoly je rekonštrukcia neutrónového spektra zdrojovej reakcie $p(20) + \text{Be}$ s využitím rekonštrukčného kódu SAND II [5, 6].

V závere diplomovej práce sú diskutované výsledky a zhodnotenie plnenia bodov zadania práce.

Kapitola 1

Neutrónové spektrum a spektrálny neutrónový výťažok

Neutrónové zdroje nachádzajú aplikácie v rôznych oblastiach ľudskej činnosti, využívané sú napríklad na medicínske účely, neutrónovú rádiografiu, produkciu rádioizotopov či výskum efektov ožarovania na rôzne organické a anorganické materiály. Jedným zo základných parametrov neutrónového zdroja je energetické neutrónové spektrum. Neutrónové spektrum predstavuje energetickú distribúciu neutrónov emitovaných daným zdrojom. Neutrónové spektrum je možné charakterizovať veličinami ako spektrálna hustota toku neutrónov a v prípade urýchľovačom riadeného generátora neutrónov tiež aj spektrálnym neutrónovým výťažkom. Spektrálna hustota toku neutrónov vyjadruje počet neutrónov prechádzajúcich jednotkou plochy za jednotku času vzťahnutý na jednotku energie neutrónov pre zvolenú geometriu. Spektrálny neutrónový výťažok vyjadruje počet neutrónov emitovaných do jednotkového priestorového uhla vzťahnutý na jednotku energie neutrónov a jednotku elektrického náboja preneseného nabitými časticami, ktoré v reakcii s terčom produkujú neutróny pre zvolenú geometriu.

Významnými zdrojmi predovšetkým rýchlych neutrónov sú urýchľovačom riadené generátory, v ktorých sú neutróny produkované bombardovaním vhodného terča urýchlenými nabitými časticami. Maximálna energia produkovaných neutrónov je závislá na energii nabitých častíc a konkrétnej produkčnej reakcii resp. type terča. Spomínané generátory môžu produkovať buď kvazimonoenergetické spektrum alebo spojité neutrónové spektrum, nazývané aj biele spektrum. Typ produkovaného spektra je daný energetickou hrúbkou produkčného terču. Ak dochádza k úplnému zastaveniu nabitých častíc v produkčnom terči, tak emitované neutróny majú spojité spektrum. V opačnom prípade, kedy nabitá častica odovzdá v terči iba časť

svojej energie, dochádza k produkcii neutrónového poľa s kvazimonoenergetickým spektrom. Nasledujúca sekcia bude zameraná na zdrojovú reakciu $p + \text{Be}$, ktorá bola využitá aj pri aktivačnom experimente vykonanom už v rámci bakalárskej práce [3].

1.1 Zdrojová reakcia $p + \text{Be}$

Berýlium je jedným z vhodných materiálov, ktoré je možné použiť ako terč v urýchľovačom riadenom generátore neutrónov. Vhodné fyzikálne vlastnosti berýlia a síce teplota tavenia 1287 °C [7] a tepelná vodivosť $190\text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$ [7] umožňujú jeho použitie ako zdroj spojitého energetického neutrónového spektra aj napriek faktu, že sa jedná o toxický prvok. Je všeobecne známe, že inhalácia prachu z berýlia môže spôsobovať rakovinu pľúc. Reakcie protónov s berýliom sú zhrnuté v tab. 1.1 [8]. Reakcia ${}^9\text{Be}(p,n){}^9\text{B}$ produkuje vysokoenergetické neutróny a predstavuje najdôležitejšiu reakciu interakcie urýchlených protónov s berýliom. [9] Jej energia reakcie je $Q = -1,85\text{ MeV}$ [10] a prahová energia reakcie je $E_{\text{thr}} = 2,06\text{ MeV}$ [10]. Vznik neutrónov s energiou do jednotiek MeV zabezpečujú viacčasticové interakcie uvedené v tab. 1.1. Berýlium je možné použiť aj ako energeticky tenký terč, ktorý v reakcii s urýchlenými nabitými časticami produkuje semi-energetické neutrónové spektrum. Energeticky tenký berýliový terč je možné použiť pri experimentoch merania účinných prierezov. Na výpočet strednej energie neutrónov zo zdrojovej reakcie $p + \text{Be}$ stredovanej produkovaným neutrónovým spektrom v oblasti energie nad 2 MeV a pod uhlom 0° je možné použiť empirický vzťah [8]

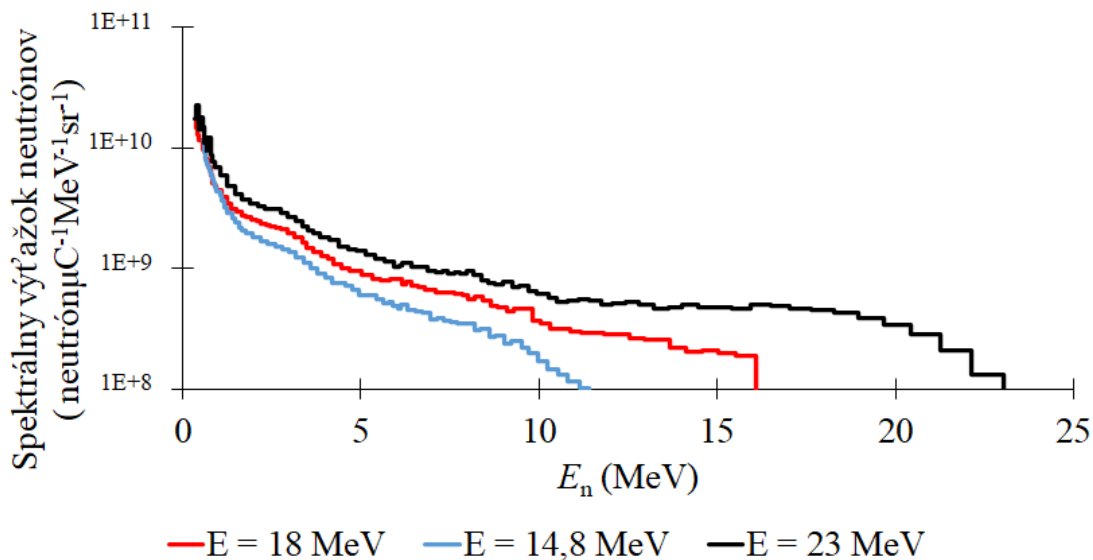
$$\bar{E}_n = 0,47E_p - 2,2, \quad (1.1)$$

kde \bar{E}_n je stredná energia neutrónov a E_p je energia protónov.

Tab. 1.1: Reakcie produkujúce neutróny pri interakcii protónov s berýliom. [8]

Reakcia	Q (MeV)	E_{thr} (MeV)
${}^9\text{Be}(p,n){}^9\text{B}$	-1,85	2,06
${}^9\text{Be}(p,pn){}^8\text{Be}$	-1,66	1,85
${}^9\text{Be}(p,n\alpha){}^5\text{Li}$	-3,54	3,93
${}^9\text{Be}(p,p\alpha){}^5\text{He}^* \rightarrow \alpha + n$	-2,31	2,57
${}^9\text{Be}(p,np\alpha){}^4\text{He}$	-1,57	1,75
${}^9\text{Be}(p,\alpha){}^6\text{Li}^* \rightarrow \alpha + p + n$	-2,19	2,31
${}^9\text{Be}(p,\alpha){}^6\text{Li}^* \rightarrow p + {}^5\text{He}^* \rightarrow \alpha + n$	-3,25	3,61
${}^9\text{Be}(p,\alpha){}^6\text{Li}^* \rightarrow {}^5\text{Li} + n$	-3,53	3,92
${}^9\text{Be}(p,p'){}^9\text{Be}^* \rightarrow \alpha + {}^5\text{He}^* \rightarrow \alpha + n$	-2,46	2,74

Na obr. 4.3 je zobrazené energetické spektrum neutrónového poľa zo zdrojovej reakcie $p + \text{Be}$ vznikajúceho bombardovaním berýliového terča protónmi urýchlými na energie 14,3 MeV, 18 MeV a 23 MeV tandemovým urýchľovačom, ktoré nameral dr. Lone na pracovisku Chalk River s využitím metódy *time-of-flight*. [11]



Obr. 1.1: Spektrálne výťažky neutrónov zo zdrojovej reakcie $p + \text{Be}$, ktoré nameral doktor Lone. [11, 12]

1.2 Aplikácie neutrónových zdrojov

Ako už bolo spomenuté v úvode kapitoly, neutrónové zdroje sú široko využívané pre medicínske účely, zobrazovacie techniky, materiálový výskum, meranie a validáciu jadrových dát. V tejto sekcii budú popísané najčastejšie aplikácie neutrónových zdrojov.

Jednou z mnohých aplikácií zdrojov neutrónov je neutrónová rádiografia. Je to zobrazovacia metóda obdobná röntgenovej rádiografii, avšak na rozdiel od röntgenového žiarenia, ktoré najviac spomaľujú ťažké izotopy, pri neutrónoch dochádza k najväčšiemu spomaleniu pri pružných a nepružných rozptyloch s ľahkými prvkami, ako napríklad vodík, lítium, bór či uhlík. Výhodou neutrónov je, že nenesú elektrický náboj a sú schopné odovzdať veľkú časť svojej energie rozptylom. Reakcie neutrónov s ľahkými prvkami umožňujú neutrónovej rádiografii vytvárať zobrazenie, ktoré pri röntgenovej rádiografii nie je možné sledovať. Neutrónová rádiografia sa s röntgenovou rádiografiou navzájom dopĺňujú. Spomínanú neutrónovú rádiografiu je možné použiť napríklad pre inšpekciu komponent výrobkov pre letectvo a automatizovaný priemysel, inšpekciu korózie, detekciu prasklín a pozorovanie pohybu absorbovaných kvapalín v rastlinách. [13]

Medicínskou aplikáciou neutrónových zdrojov je aj uvedená neutrónová rádiografia, kedy je možné zobrazovať srdcové chlopne, materiály aplikované do zubov v stomatológii alebo monitorovanie distribúcie bóru pri bórovej neutrónovej záchytnnej terapii (BNCT) [13]. Metóda BNCT je tiež ďalšou aplikáciou neutrónových zdrojov, jedná sa o ožarovanie nádorového tkaniva kolimovaným zväzkom neutrónov spomalených na epitermálnu energiu. V priebehu prípravy liečebnej procedúry je pacientovi podaný bór-fenyl-alanín, ktorý v sebe obsahuje izotop ^{10}B , spolu s izotopom ^{18}F predstavujúcim zdroj pozitronov pre pozitronovú emisnú tomografiu. Následne je oblasť s výskytom rakovinového tkaniva ožarovaná kolimovaným neutrónovým zväzkom. Najdôležitejšou reakciou neutrónov s bórovou disperziou absorbovanou nádorom je reakcia $^{10}\text{B}(n,\alpha)^7\text{Li}$. Produkované ťažké ióny odovzdávajú rakovinovým bunkám svoju energiu, čo má za následok ich usmrtenie. Zdroje epitermálnych neutrónov pre BNCT sú výskumné reaktory alebo urýchľovačom riadené generátory neutrónov s vhodným moderačným nástavcom, ktoré môžu byť inštalované aj priamo vo fakultných nemocniciach. V tab. 1.2 sú zhrnuté vybrané pracoviská disponujúce urýchľovačom riadeným neutrónovým generátorom slúžiacim na BNCT. [14]

Tab. 1.2: Zoznam vybraných pracovísk s urýchľovačom riadeným generátorom neutrónov slúžiacim na BNCT. [14]

Pracovisko	Štát	Typ urýchľovača
Kyoto University [15]	Japonsko	Cyklotrón
Kansai BNCT Medical Center [16]	Japonsko	Cyklotrón
National Cancer Center Hospital [17]	Japonsko	Lineárny
Nagoya University [18]	Japonsko	Elektrostatický
Helsinki University Hospital [19]	Fínska republika	Elektrostatický
Budker Institute of Nuclear Physics [20]	Ruská federácia	Elektrostatický
Natinal Institute for Nuclear Physics [21]	Talianska republika	Lineárny

Pred aplikáciou BNCT na ľudí je nutné metódu overiť. Pri klinických testoch boli žiareniu neutrónov vystavené myši. Najskôr bolo myšiam implantované rakovinové tkanivo ľudskej prostaty. Po dvoch týždňoch boli myši ožiarené neutrónovým zväzkom. Polovica myší bola obetovaná okamžite po ožiarení a zvyšná polovica 120 hodín po ukončení ožarovania. Bolo preukázané, že pri ožiarení rýchlymi neutrónmi je počet usmrtených nádorových buniek vyšší ako pri ožiarení fotónmi röntgenového žiarenia s rovnakou dávkou. [22]

Medzi aplikácie neutrónových zdrojov patrí ďalej aj materiálový výskum. Ožiaréním materiálu zväzkom neutrónov je možné študovať urýchlené starnutie. Proces starnutia je možné využiť pri testovaní radiačnej odolnosti rôznych materiálov a elektroniky v rámci využiteľnosti pre budúce fúzne reaktory.

Jedným z vhodných materiálov pre použitie vo fúzných reaktoroch je meď resp. jej zliatiny a to pre jej vysokú elektrickú a tepelnú vodivosť. Pri ožarovaní mede neutrónmi je možné sledovať zmeny mikroštruktúry, fyzikálnych a mechanických vlastností. Proces urýchleného starnutia ožarovaním neutrónmi umožňuje do istej miery simuláciu prevádzkových podmienok, a teda aj možnosť sledovať nepriaznivé zmeny v konštrukčných materiáloch. [23]

1.3 Pracoviská využívajúce urýchľovačom riadený generátor neutrónov

Pre rôzne experimentálne účely sú vo svete prevádzkované urýchľovačom riadené generátory neutrónov. Spomínaný generátor neutrónov má najčastejšie dve časti, konkrétne urýchľovač a terč resp. terčovú stanicu. Urýchľovačom riadený generátor neutrónov môže mať menšie rozmery než výskumný reaktor, čo umožňuje jeho inštaláciu priamo do nemocníc, kde sa realizuje BNCT a ďalšie neutrónové rádioterapie. V súčasnosti sú budované a prevádzkované kompaktné urýchľovače, čo umožňuje umiestnenie urýchľovača a terčovej stanice do jednej haly.

1.3.1 Physikalisch-Technische Bundesanstalt

Physikalisch-Technische Bundesanstalt (PTB) je metrologické pracovisko nachádzajúce sa v Braunschweigu v Nemecku. Na pracovisku sú prevádzkované dva urýchľovače nabitých častíc. Jeden z urýchľovačov je izochrónny cyklotrón, ktorý je možné otáčať až o 200° okolo jeho vertikálnej osi. Parametre zväzkov urýchlených častíc z izochrónneho cyklotrónu sú uvedené v tab. 1.3.

Tab. 1.3: Parametre izochrónneho cyklotrónu prevádzkovaného v PTB. [24]

Častica	Energia (MeV)	Intenzita (mA)
Protóny	3–24	100
Deuteróny	4–14	100
$^3\text{He}^{+2}$	6–36	70
$^4\text{He}^{+2}$	8–28	50

Druhým urýchľovačom je 2 MV tandetron s dvoma externými zdrojmi iónov. V lineárnom tandemovom urýchľovači sú záporné ióny urýchľované smerom do stredu zariadenia odkiaľ pokračujú v urýchľovaní ako pozitívne ióny. Parametre zväzkov urýchlených častíc tandetronom sú uvedené v tab. 1.4. Maximálna frekvencia pulzov zväzkov nabitých častíc dosahuje hodnotu 2,5 MHz.

Tab. 1.4: Parametre tandetronu prevádzkovaného v PTB. [24]

Častica	Energia (MeV)	Intenzita (μA)
Protóny	0,2–4	2–50
Deuteróny	0,2–4	2–50
Hélióny	6–36	2–50

K produkcii neutrónov sa používajú v PTB terče vyrobené z lítia, trícia a deutéria, produkujúce kvazimonoenergetické ale aj spojité spektrá. Spektrometria neutrónových polí sa na pracovisku PTB realizuje metódou *time-of-flight* s využitím scintilačných detektorov a hustota neutrónového toku je meraná detektorom odrazených protónov. Na pracovisku PTB disponujú viacerými referenčnými neutrónovými spektrami. [24]

1.3.2 Kansai BNCT Medical Center

Pracovisko Kansai BNCT medical center sa nachádza v meste Takatsuki v Japonsku. Na pracovisku sa prevádzkuje izochronny cyklotrón, ktorý v zapojení s berýliovým terčom produkuje neutróny slúžiace na BNCT. Za štandardnej prevádzky sú protóny urýchľované na energiu 30 MeV a dosahujú intenzitu na terči 1 mA. Na pracovisku aktuálne prebiehajú klinické testy liečby rôznych rakovinových tkanív. Samotná liečba sa realizuje ožarovaním nádorového tkaniva epitermálnymi neutrónmi po dobu 30 až 60 minút dostatočne dlho od podania látky nesúcej bór. [14, 16]

1.3.3 Helsinki University Hospital

Univerzitná nemocnica nachádzajúca sa v Helsinkách disponuje elektrostatickým urýchľovačom. Pre produkciu neutrónov sa využíva zdrojová reakcia $p + \text{Li}$ s rotujúcim lítiovým terčom. Za nominálnych podmienok sú protóny urýchľované na energiu 2,6 MeV a dosahujú intenzitu na terči 30 mA. Neutrónový generátor slúži na BNCT v rôznych rakovinových bunkách. Pracovisko je tiež vybavené polovodičovým HPGe detektorom pre účely analýzy aktivačných meraní. Na pracovisku aktuálne prebiehajú klinické testy BNCT s využitím urýchľovačom riadeného generátora neutrónov so zdrojovou reakciou $p(2,6) + \text{Li}$. [14, 19]

Kapitola 2

Spektrometria neutrónového poľa

Jedným z najvýznamnejších parametrov neutrónového zdroja je jeho energetické spektrum. Znalosť spektra zdroja neutrónov umožňuje jeho využitie na rôzne experimenty, napríklad experimenty pre materiálový výskum, medicínske účely liečenia rakoviny alebo integrálne validácie jadrových dát. Na spektrometriu neutrónového poľa je možné použiť viacero metód, napríklad aktivačnú techniku, *Time-of-flight* metódu alebo spektroskopiu odrazených protónov (*proton recoil telescope*).

2.1 Aktivačná technika

Aktivačná technika predstavuje metódu analýzy energetického spektra neutrónového zdroja pomocou ožarovania sady spektroskopicky tenkých fólií alebo drôtikov, ktoré sa nazývajú aktivačné detektory. Výhodou aktivačnej techniky voči ostatným metódam spektrometrie neutrónových polí je fakt, že spomínaná metóda netrpí mŕtvou dobou, a preto je ju možné využiť aj v geometrii blízkej pri neutrónovom generátore. Navyše aktivačné detektory integrujú indukovanú aktivitu z reakcií neutrónov dopadajúcich na aktivačné detektory pod priestorovým uhlom podobným ako v priebehu rôznych experimentov, čím sa získa čo najpresnejšie neutrónové spektrum pre experimentátorov. Aby bolo možné vykonať konečnú dekonvolúciu energetického neutrónového spektra je nutná znalosť jadrových a fyzikálnych vlastností aktivačných detektorov. Ďalej sa vyžaduje vysoká čistota materiálov použitých k výrobe aktivačných detektorov, aby nedochádzalo k aktivácií ich nečistôt. Aktivačné detektory sa v priebehu experimentu pri danej geometrii ožiaria a následne sa na nich vykonáva jadrová gama-spektrometria, pri ktorej sa stanovuje sada reakčných rýchlostí vzťahnutých na jedno terčové jadro, ďalej len *reakčné rýchlosti*, podľa vzťahu [8]

$$R_R = \frac{S(E_\gamma)}{t_{\text{live}} I(E_\gamma) \varepsilon(E_\gamma) N_0 (1 - e^{-\lambda t_{\text{irr}}}) e^{-\lambda t_{\text{cool}}} \frac{(1 - e^{-\lambda t_{\text{real}}})}{\lambda t_{\text{real}}}}, \quad (2.1)$$

kde $S(E_\gamma)$ je plocha pod píkum plnej absorpcie, λ je rozpadová konštanta produktu reakcie, t_{live} je čistá doba merania gama spektra, t_{real} je doba merania gama spektra s uvažovaním mŕtvej doby, $I(E_\gamma)$ je intenzita danej gama linky, $\varepsilon(E_\gamma)$ je detekčná účinnosť danej gama linky, N_0 je počet terčových jadier, t_{irr} je doba ožarovania a t_{cool} je doba vymierania. Relatívnu neurčitost' reakčnej rýchlosti σ_{R_R} je možné stanoviť na základe empirického vzťahu [25]

$$\sigma_{R_R} = \sqrt{\left(0,03 \left(\frac{t_{\text{real}}}{t_{\text{live}}} - 1\right)\right)^2 + t_{\text{cool}}^2 \lambda^2 \sigma_{T_{1/2}}^2 + \sigma_S^2 + \sigma_{I_\gamma}^2}, \quad (2.2)$$

kde σ_j je relatívna neurčitost' j -tej veličiny. [8]

Dekonvolúcia energetického neutrónového spektra po stanovení sady reakčných rýchlostí predstavuje riešenie sady Volterových integrálnych rovníc vychádzajúcich z definície reakčnej rýchlosti [8]

$$R_R = \int_0^{+\infty} \sigma(E_n) \phi(E_n) dE_n, \quad (2.3)$$

kde $\sigma(E_n)$ je mikroskopický účinný prierez danej reakcie, $\phi(E_n)$ je spektrálna hustota toku neutrónov a E_n je energia neutrónov. Dolná medza integrácie sa mení v závislosti na type reakcie. Aktivačné reakcie majú nulový prah a majú mikroskopický účinný prierez nenulový aj pri nulovej energii neutrónu. Prahové reakcie majú nenulovú prahovú energiu, a teda mikroskopický účinný prierez je nulový až do prahovej energie E_{thr} . Neutróny dosahujú konečné kinetické energie, preto je diferenciálny neutrónový tok nulový od maximálnej energie neutrónov v danom poli E_{max} , čím sa mení horná medza integrácie. [8]

2.2 Korekcie reakčnej rýchlosti

Vzťah (2.1) bol podrobne odvodený v bakalárskej práci [3]. V menovateli vzťahu (2.1) je možné vidieť tri korekčné faktory, nech

$$\begin{aligned} f_{A_{\text{sat}}} &:= 1 - e^{-\lambda t_{\text{irr}}}, \\ f_{\text{cool}} &:= e^{-\lambda t_{\text{cool}}}, \\ f_{\text{ddm}} &:= \frac{1 - e^{-\lambda t_{\text{real}}}}{\lambda t_{\text{real}}}. \end{aligned} \quad (2.4)$$

Korekčný faktor $f_{A_{\text{sat}}}$ koriguje nameranú aktivitu vzorky na saturovanú aktivitu vzorky, ktorá by bola dosiahnutá pri nekonečne dlhom ožarovaní. Faktor f_{cool} upravuje nameranú aktivitu vzorky vzhľadom k jej rozpadu v priebehu času od ukončenia ožarovania do doby začiatku merania. Nakoľko sa vzorka rozpadá aj v priebehu

samotného merania gama spektra, je nutné stanovenú aktivitu upraviť vhodným spôsobom pomocou korekčného faktora f_{ddm} . Korekčné faktory (2.4) vychádzajú z riešenia bilančnej rovnice pre počet rádioaktívnych jadier v ožarovanej vzorke. Podrobné riešenie je možné nájsť v bakalárskej práci [3].

Poslednou korekciou je korekcia na fluktuáciu intenzity zväzku nabitých častíc na terči. Spomenutá korekcia sa využíva pri využití urýchľovačom riadeného zdroja neutrónov, kde neutróny vznikajú bombardovaním terču zväzkom nabitých častíc s konštantnou časovou strednou hodnotou intenzity. Avšak reálny zväzok nabitých častíc nemá konštantnú hodnotu intenzity a intenzita mierne fluktuuje okolo danej hodnoty vyžadovanej experimentom. Z uvádzaného dôvodu sa zavádza korekčný faktor pre opravu na fluktuáciu intenzity zväzku nabitých častíc, ktorý je daný vzťahom [25]

$$f_p = \frac{1 - e^{-\lambda t_{\text{irr}}}}{t_{\text{irr}} \sum_{i=1}^m \frac{I_i}{I_{\text{total}}} \frac{e^{-\lambda t_i^e}}{t_i} (1 - e^{-\lambda t_i})}, \quad (2.5)$$

kde λ je rozpadová konštanta daného produktu, t_{irr} je doba ožarovania, m je počet časových ožarovacích intervalov, t_i doba i -teho ožarovacieho intervalu, t_i^e je doba od konca i -teho ožarovacieho intervalu, I_i je počet protónov v i -tom ožarovacom časovom intervale a I_{total} je celkový počet protónov za celú dobu ožarovania. Korekciu je možné vykonať násobením stanovenej reakčnej rýchlosti korekčným faktorom f_p .

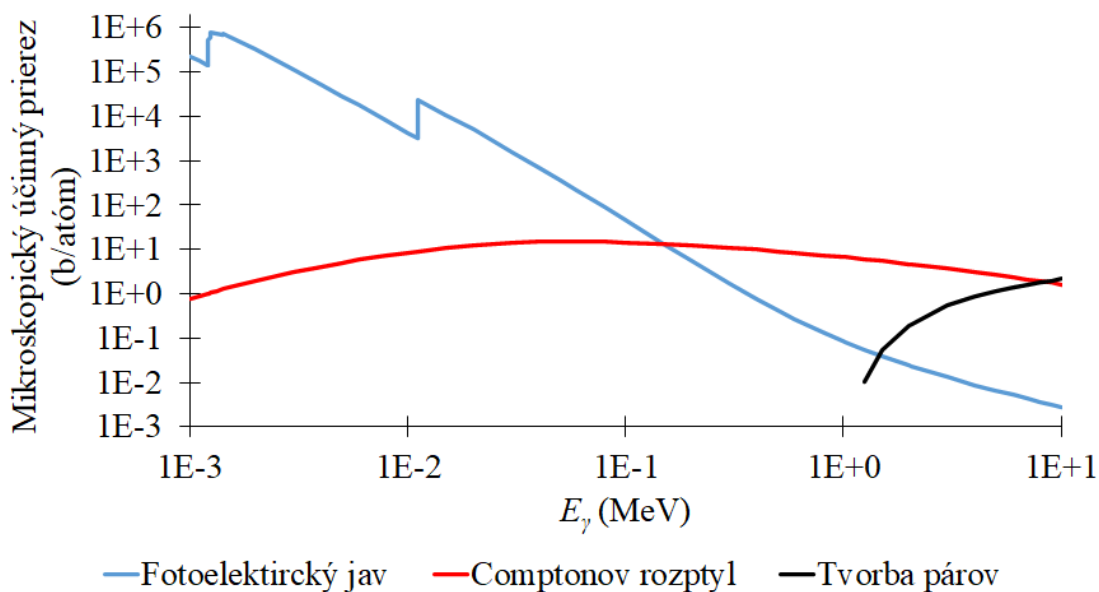
2.3 Jadrová spektrometria gama žiarenia

Spektrometria gama žiarenia je úzko spojená s metódou aktivačnej techniky tak, ako už bolo spomenuté v sekcii 2.1. Spektrometria gama žiarenia je technika umožňujúca meranie kvalitatívnych a kvantitatívnych vlastností gama žiarenia. Na meranie gama žiarenia je možné použiť polovodičový HPGe detektor, ktorý sa vyznačuje vysokým energetickým rozlíšením a relatívne nízkou detekčnou účinnosťou.

2.3.1 Reakcie gama žiarenia pri interakcii s látkou

Pri meraní vlastností gama žiarenia pomocou polovodičového HPGe detektora sú najdôležitejšími reakciami gama žiarenia s polovodičovým kryštálom *fotoelektrický jav*, *Comptonov rozptyl* a *produkcia elektrón-pozitrónových párov*. V oblasti energií gama žiarenia do 150 keV je zo spomenutých reakcií gama žiarenia s germániom dominantný fotoelektrický jav. Pri spomenutom jave fotón gama žiarenia odovzdá všetku svoju energiu elektrónu viazanému v elektrónovom obale atómu detektora, čím zaniká. Časť energie odovzdanej gama žiarením sa spotrebuje na únik elektrónu z atómového obalu a zvyšná časť energie gama žiarenia zostáva ako kinetická energia elektrónu. Unikajúci elektrón vytvára v objeme detektora pár elektrón-diera, čím

vzniká prúdový signál, ktorý je možno zaznamenať. Navyše vzniknutá diera je zaplnená najbližším elektrónom z nižšieho orbitálu atómového obalu, čo je sprevádzané vyžiarením fotónu žiarenia X. Zaznamenaný signál vytvára v meranom energetickom gama spektre pík plného pohltienia (FEP), ktorý má tvar Gaussovej krivky. V prípade fotoelektrického javu závisí jeho mikroskopický účinný prierez na piatej mocnine protónového čísla daného materiálu. Comptonov rozptyl predstavuje dominantnú reakciu gama žiarenia s germánium v energetickej oblasti 150 keV až 8,5 MeV. Pri Comptonovom rozptyle odovzdá gama žiarenie časť svojej energie voľnému alebo slabo viazanému elektrónu a odlieta pod rozptylovým uhlom vzhľadom k pôvodnému smeru pohybu. Comptonov rozptyl sa v meranom gama spektre prejavuje formovaním kontinua ukončeného ostrou hranou reprezentujúcou spätný rozptyl. Po viacerých rozptyloch môže dôjsť k fotoelektrickému javu, čím sa prispeje do FEP. Mikroskopický účinný prierez Comptonovho rozptylu je priamo úmerný protónovému číslu terčového materiálu. Produkcia elektrón-pozitronových párov je prahová reakcia s prahovou energiou rovnou 1,022 MeV. Pri tejto reakcii dochádza k zániku gama žiarenia v elektrostatickom poli jadra za vzniku páru elektrón-pozitron. Anihiláciu pozitronu s najbližším elektrónom sprevádza emisia dvoch rozbiehajúcich sa fotónov, ktoré majú každú energiu 511 keV. Ak sú oba vzniknuté fotóny zachytené



Obr. 2.1: Mikroskopické účinné prierezy fotoelektrického javu, Comptonovho rozptylu a produkcie elektrón-pozitronových párov na germánium. [26]

detektorom, tak prispejú v meranom gama spektre do FEP. Avšak ak unikne jeden resp. oba anihiláciou vzniknuté fotóny, tak vznikne pík jedného úniku resp. pík dvoch úniov, ktorý má energiu zníženú o 511 keV resp. 1,022 MeV od FEP. Produkcia

elektrón-pozitrónových párov je dominantnou reakciou gama žiarenia s germániom v prípade, že gama žiarenie má vysokú energiu $E_\gamma > 8,5$ MeV. Mikroskopický účinný prierez produkcie elektrón-pozitrónových párov je priamo úmerný druhej mocnine protónového čísla materiálu, v ktorom k reakcii dochádza. [27, 28, 29]

Na obrázku 2.1 je možné vidieť energetickú závislosť mikroskopických účinných prierezov fotoelektrického javu, Comptonovho rozptylu a produkcie elektrón-pozitrónových párov na germánium. Dáta boli čerpané z online databázy [26].

2.4 Energetická a účinnosť kalibrácia polovodičového HPGe detektora

Aby bolo možné pomocou polovodičového HPGe detektora analyzovať gama žiarenie, je nutné spektrometer kalibrovať. Detektor je nutné kalibrovať energeticky, čo umožňuje kvalitatívnu analýzu gama žiarenia a účinnosť, čo umožňuje kvantitatívnu analýzu gama žiarenia.

Energetická kalibrácia polovodičového detektora spočíva v priradení energie príslušného gama žiarenia jednotlivým kanálom analyzátoru. Pri vykonávaní energetickej kalibrácie detektora sa merajú kalibračné etalóny vyžarujúce fotóny gama žiarenia so známou energiou. Následne či už ručne alebo pomocou softvéru sú príslušným kanálom priradené hodnoty energie. Závislosť energie gama žiarenia na príslušnom kanále vykazuje pri HPGe detektore lineárnu závislosť s výnimkou nízkych energií, kde má polynomickejší charakter.

V rámci účinnostnej kalibrácie polovodičového HPGe detektora sa stanovuje absolútna píkova detekčná účinnosť pre referenčnú geometriu zvolených kalibračných etalónov, ktorá vyjadruje podiel fotónov gama žiarenia zachytených detektorom k počtu fotónov gama žiarenia vyžiarených zdrojom. Absolútnu píkovoú detekčnú účinnosť pre danú energiu gama žiarenia je možné stanoviť na základe vzťahu [30, 31]

$$\varepsilon_{\text{ar}}(E_\gamma) = \frac{P_2(E_\gamma)}{P_1}, \quad (2.6)$$

kde P_1 je aktivita kalibračného etalónu v čase začiatku merania jeho gama spektra a $P_2(E_\gamma)$ je nameraná aktivita kalibračného etalónu polovodičovým HPGe detektorom pre gama linku s energiou E_γ . Etalónom vyrobených z izotopov s dostatočne dlhým polčasom rozpadu je možné stanoviť aktivitu pre energiu E_γ z nameraného gama spektra pomocou vzťahu [30]

$$P_2(E_\gamma) = \frac{S(E_\gamma)}{t_{\text{live}} I(E_\gamma)}, \quad (2.7)$$

kde $S(E_\gamma)$ je plocha píku plnej absorpcie pri energii E_γ v meranom gama spektre, t_{live} je čistá doba merania gama spektra a $I(E_\gamma)$ je intenzita gama linky s energiou E_γ .

V prípade etalónov vyrobených z izotopov s krátkym polčasom rozpadu je nutné vo vzťahu (2.7) vykonať korekciu na rozpad v priebehu merania gama spektra a meraná aktivita získava tvar

$$P_2(E_\gamma) = \frac{S(E_\gamma)}{t_{\text{live}} I(E_\gamma) \frac{1 - e^{-\lambda t_{\text{real}}}}{\lambda t_{\text{real}}}}, \quad (2.8)$$

kde λ je rozpadová konštanta príslušného izotopu kalibračného etalóna a t_{real} je doba merania gama spektra s uvážením mŕtvej doby. Relatívnu neurčitosť sady bodov absolútnej detekčnej účinnosti píkovo plného pohltienia $\sigma_{\varepsilon_{\text{ar}}}$ je možné stanoviť na základe empirického vzťahu [25]

$$\sigma_{\varepsilon_{\text{ar}}} = \sqrt{\sigma_A^2 + \left(0,03 \left(\frac{t_{\text{real}}}{t_{\text{live}}} - 1\right)\right)^2 + t_{\text{cool}}^2 \lambda^2 \sigma_{T_{1/2}}^2 + \sigma_S^2 + \sigma_{I_\gamma}^2}, \quad (2.9)$$

kde σ_j je relatívna neurčitosť j -tej veličiny a t_{cool} je doba od merania referenčnej aktivity etalónu po začiatok merania gama spektra. Stanovená sada bodov absolútnej detekčnej účinnosti píkovo plného pohltienia sa následne fituje polynomicou funkciou stupňa m tvaru

$$\varepsilon_{\text{ar}}(E_\gamma) = \exp\left(\sum_{i=0}^m a_i \ln^i(E_\gamma)\right), \quad (2.10)$$

kde a_i sú fitovacie konštanty. [30, 31]

2.5 Korekcie merania gama spektra

Pri meraní gama spektier ožiarených aktivačných detektorov je treba uvážiť dve dôležité korekcie a to konkrétne korekciu na samoabsorpciu gama žiarenia v zdroji a geometrickú korekciu. Korekcie riešia rozdiely medzi kalibračnými etalónmi a aktivačnými detektormi a sú realizované násobením absolútnej píkovej detekčnej účinnosti príslušným korekčným faktorom.

Samoabsorpcia gama žiarenia v objeme zdroja je jav, pri ktorom vyžiarený foton neunikne z objemu zdroja, pretože bol v ňom absorbovaný. Tento jav zapríčiňuje pokles intenzity gama žiarenia dopadajúceho na detektor. Pre korekčný faktor pre opravu na samotienenie zdroja gama žiarenia platí vzťah [32]

$$f_{\text{att}} = \frac{1 - e^{-\mu X}}{\mu X}, \quad (2.11)$$

kde μ je lineárny súčiniteľ zoslabenia gama žiarenia pre daný materiál a X je hrúbka zdroja gama žiarenia. [32]

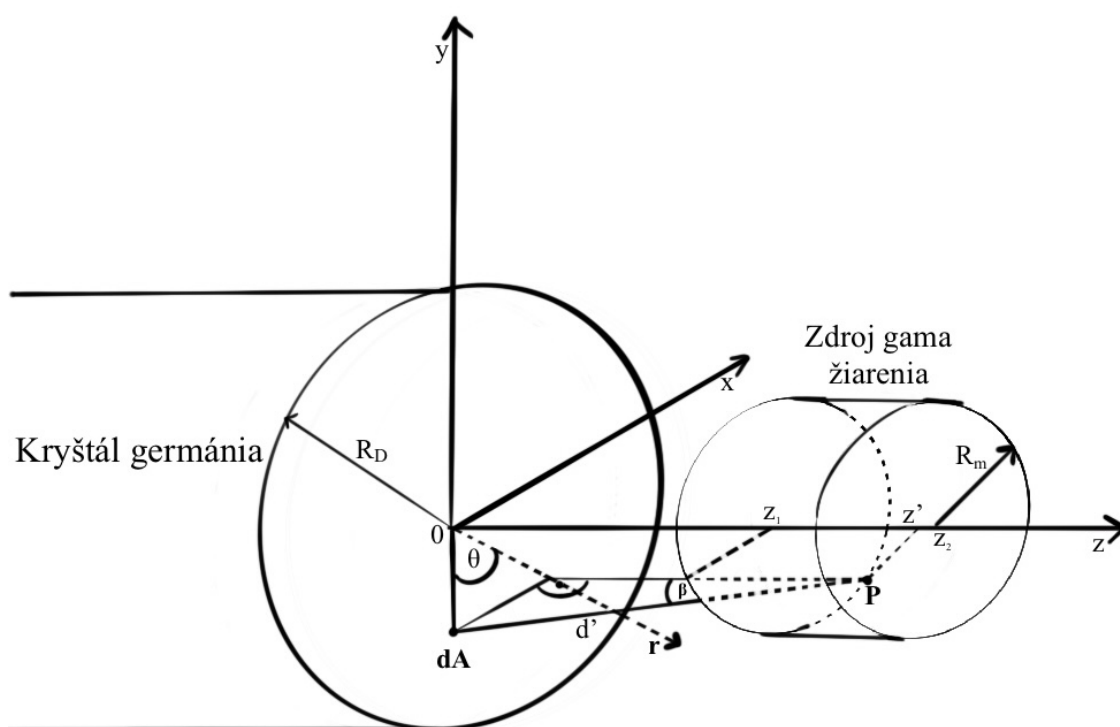
Pri meraní gama spektra aktivačného detektora je nutné uvážiť geometrický rozdiel medzi aktivačným detektorom a kalibračným etalónom. Korekcia sa realizuje korekčným faktorom

$$f_g = \frac{\Omega}{\Omega_{\text{ref}}}, \quad (2.12)$$

kde Ω resp. Ω_{ref} je priestorový uhol, pod ktorým aktivačný detektor resp. kalibračný etalón emituje fotóny na detektor. Schéma geometrie pri meraní valcového aktivačného detektora je zobrazená na obr. 2.2. Popis priestorového uhla Ω vyžaduje znalosť priestorového uhla Ω_{cp} , pod ktorým emituje gama žiarenie koaxiálne umiestnený bodový zdroj na detektor. Pre spomínaný priestorový uhol platí vzťah [33]

$$\Omega_{\text{cp}} = \int_A \frac{\cos(\beta)}{d'^2} dA, \quad (2.13)$$

kde d' je vzdialenosť zdroja gama žiarenia od infinitezimálneho elementu plochy detektora dA , A je plocha detektora a β je uhol medzi spojnicou infinitezimálneho elementu plochy detektora s bodovým zdrojom a priamkou vedenou bodovým zdrojom, ktorá je kolmá na čelnú plochu detektora.



Obr. 2.2: Schéma geometrie merania valcového zdroja gama žiarenia.

Vo vzťahu (2.13) platí [33]

$$\cos(\beta) = z'/d', \quad (2.14)$$

$$d' = \sqrt{r_D^2 - 2r_D r' \cos(\theta) + r'^2 + z'^2},$$

kde z' je kolmá vzdialenosť bodového zdroja od detektora, r_D je cylindrická súradnica polomeru infinitezimálneho elementu plochy detektora, r' je cylindrická súradnica

polomeru bodového zdroja a θ je uhol medzi r_D a r' . Po dosadení (2.14) do (2.13) sa získa

$$\Omega_{\text{cp}} = \int_0^{R_D} \int_0^{2\pi} \frac{z' r_D d\theta dr_D}{(r_D^2 - 2r_D r' \cos(\theta) + r'^2 + z'^2)^{\frac{3}{2}}}, \quad (2.15)$$

kde R_D je polomer detektora. Za predpokladu rovnomernej distribúcie rádioaktívnych jadier v objeme valcového zdroja gama žiarenia V' je možné integráciou vzťahu (2.15) cez objem zdroja a delením objemom zdroja získať priestorový uhol Ω , teda platí [33]

$$\Omega = \frac{\int_{V'} \int_0^{R_D} \int_0^{2\pi} \frac{z' r_D d\theta dr_D}{(r_D^2 - 2r_D r' \cos(\theta) + r'^2 + z'^2)^{\frac{3}{2}}} dV'}{V'}. \quad (2.16)$$

V prípade diskového zdroja gama žiarenia má integrál zo vzťahu (2.16) tvar [34]

$$\Omega = \frac{4\pi R_D}{R_{\text{disk}}} \int_0^{+\infty} \frac{\exp(-dk) J_1(R_D k) J_1(R_{\text{disk}} k)}{k} dk, \quad (2.17)$$

kde R_{disk} je polomer diskového zdroja, d je kolmá vzdialenosť diskového zdroja od detektora a J_1 je Besselova funkcia. Integrál vo vzťahu (2.17) nemá analytické riešenie, preto sa s dostatočnou presnosťou používa aproximácia [34]

$$\begin{aligned} \Omega &\approx 2\pi \left[1 - \frac{1}{(1+\beta)^{1/2}} - \frac{3}{8} \frac{\alpha\beta}{(1+\beta)^{5/2}} + \alpha^2[F_1] - \alpha^3[F_2] \right], \\ F_1 &= \frac{5}{16} \frac{\beta}{(1+\beta)^{7/2}} - \frac{35}{16} \frac{\beta^2}{(1+\beta)^{9/2}}, \\ F_2 &= \frac{35}{128} \frac{\beta}{(1+\beta)^{9/2}} - \frac{315}{256} \frac{\beta^2}{(1+\beta)^{11/2}} + \frac{1155}{1024} \frac{\beta^3}{(1+\beta)^{13/2}}, \end{aligned} \quad (2.18)$$

kde

$$\alpha = \left(\frac{R_{\text{disk}}}{d} \right)^2 \quad \beta = \left(\frac{R_D}{d} \right)^2.$$

Kapitola 3

Aktivačný experiment s neutrónovým poľom $p(20) + \text{Be}$

Diplomová práca priamo naväzuje na bakalársku prácu [3] a výskumnú úlohu [4]. Aktivačný experiment bol vykonaný už v rámci bakalárskej práce na Ústave jadrovej fyziky akadémie vied Českej republiky (ÚJF AV ČR) v Řeži pri Prahe dňa 7.12.2018. Na produkciu neutrónov bol použitý neutrónový generátor NG-2 s berýliovým terčom, ktorý bol bombardovaný protónmi s energiou 20 MeV z izochrónneho cyklotrónu U-120M. Bola ožarovaná sada aktivačných detektorov z materiálov Au, Fe, In, Co, Ti, Al, Lu, Y, Nb, Ni a bola nameraná veľká sada dát. V diplomovej práci sú analyzované posledné štyri fólie z materiálov $^{\text{nat}}\text{Lu}$, $^{\text{nat}}\text{Y}$, $^{\text{nat}}\text{Nb}$ a $^{\text{nat}}\text{Ni}$. V nasledujúcich sekciách bude popísané pracovisko ÚJF, príprava a priebeh ožarovacieho experimentu a výsledky analýzy vybraných fólií.

3.1 Ústav jadrovej fyziky Akadémie vied Českej republiky

V časti Řež obce Husinec pri Prahe sa nachádza pracovisko ÚJF. Z hľadiska aktivačného experimentu študovaného v predkladanej diplomovej práci sú na ÚJF dôležité dve oddelenia, konkrétne oddelenie urýchľovačov a oddelenie jadrových reakcií. Oddelenie urýchľovačov prevádzkuje tri urýchľovače a to izochrónny cyklotrón U-120M, cyklotrón TR-24 a mikrotron MT-25. [35]

Cyklotrón TR-24 bol inštalovaný na oddelení urýchľovačov v roku 2015 a bol dodaný kanadskou firmou Advanced Cyclotron Systems Inc. [36] Výhodou urýchľovača TR-24 je axiálny prísun iónov externým iónovým zdrojom, čím sa dosahujú relatívne vysoké prúdy urýchlených zväzkov. Cyklotrón TR-24 urýchľuje záporné ióny

H^- , ktoré sa po urýchlení zbavujú záporného náboja priechodom cez uhlíkovú prebíjajúcu fóliu. Energiu urýchleného nabitého zväzku je možné meniť pomocou zmeny radiálnej polohy prebíjajúcej uhlíkovej fólie. Cyklotrón disponuje dvoma vývodnými trasami, jedna trasa je vyvedená priamo do vákuovej komory cyklotrónu a druhá trasa je vyvedená do iónooptickej trasy umožňujúcej transport, fokuzáciu a diagnostiku urýchleného zväzku. Zväzky urýchlených protónov z cyklotrónu TR-24 môžu dosahovať energie 18–24 MeV s maximálnou intenzitou až $300 \mu A$. [35]

Izochrónny cyklotrón U-120M je schopný urýchliť kladné aj záporné ióny. Pôvodne však bol vyrobený v Spojenom ústave jadrového výskumu v Dubne výhradne pre urýchľovanie kladných iónov. Cyklotrón U-120M je úspešne prevádzkovaný od roku 1977 a odvtedy absolvoval viacero modernizácií, avšak najdôležitejšou bola modernizácia v rokoch 1996–1998, kedy bola vykonaná konverzia na urýchľovač záporných iónov. Zväzok urýchlených nabitých častíc je možné vyvieť do haly cyklotrónu alebo do externej experimentálnej haly. Parametre urýchlených zväzkov nabitých častíc cyklotrónom U-120M v mieste ich vyvedenia sú uvedené v tab. 3.1. [35]

Tab. 3.1: Parametre urýchlených a vyvedených zväzkov z izochrónneho cyklotrónu U-120M. [35]

Ióny	Energia (MeV)	Maximálny prúd (μA)
H^+	6 – 25	5
D^+	12 – 20	5
${}^3He^{+2}$	18 – 52	2
${}^4He^{+2}$	24 – 38	5
H^-	6 – 35	13
D^-	11 – 20	10

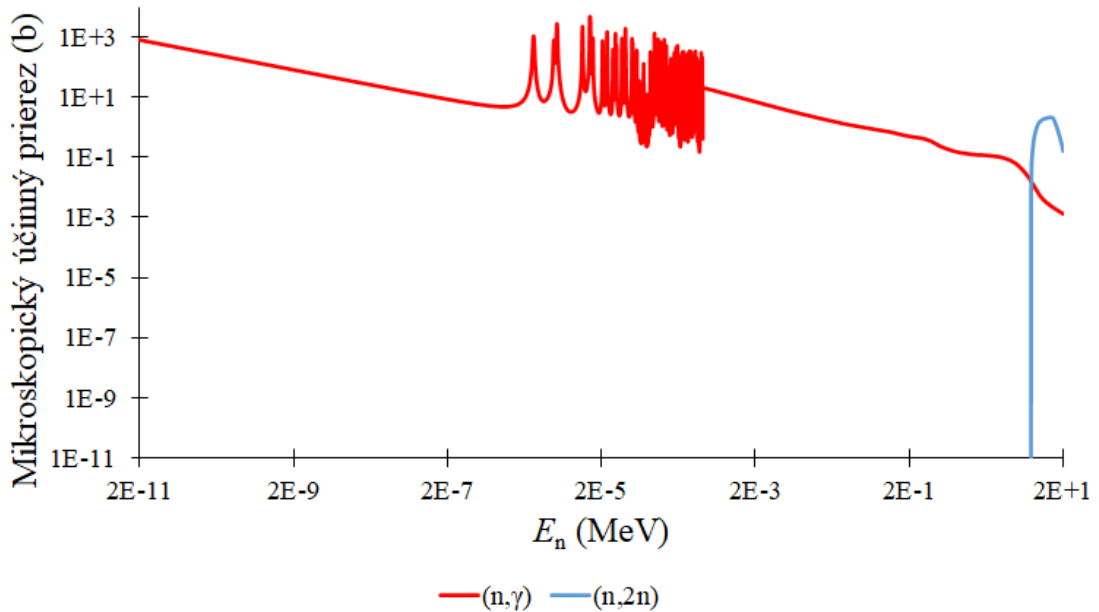
Mikrotron MT-25 je cyklický urýchľovač elektrónov, ktorý je umiestnený na detašovanom pracovisku v Karlínskom tuneli v Prahe. Relativistické urýchlené elektróny môžu dosahovať energie 6–25 MeV s maximálnou intenzitou $25 \mu A$ a môžu byť konvertované na sekundárny zväzok fotónov, či neutrónov. [35]

Na oddelení jadrových reakcií sú prevádzkované dva neutrónové generátory s označením NG-2, jeden obsahuje energeticky tenký lítiový terč a druhý obsahuje energeticky hrubý berýliový terč. Lítiový terč v reakcii s urýchlenými protónmi produkuje kvazimonoenergetické spektrum neutrónov s maximálnou hustotou neutrónového toku $10^9 \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ v monoenergetickom píku. Berýliový terč pri reakcii s urýchleným zväzkom nabitých častíc produkuje spojité neutrónové spektrum s maximálnou hustotou neutrónového toku $10^{11} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$. Výskumné programy oddelenia jadrových reakcií sú zamerané na termonukleárnu fúziu a experimentálna činnosť tvorí meranie účinných prierezov aktiváciou v definovanom neutrónovom poli s následnou

jadrovou gama-spektrometriou, merania oneskorených neutrónov zo štiepných materiálov, testovanie radiačnej odolnosti materiálov, spektrometria neutrónových polí zo zdrojových reakcií $p + \text{Li}$ a $p + \text{Be}$ aktivačnou technikou, metódou *time-of-flight* a metódou spektrometrie odrazených protónov. [35]

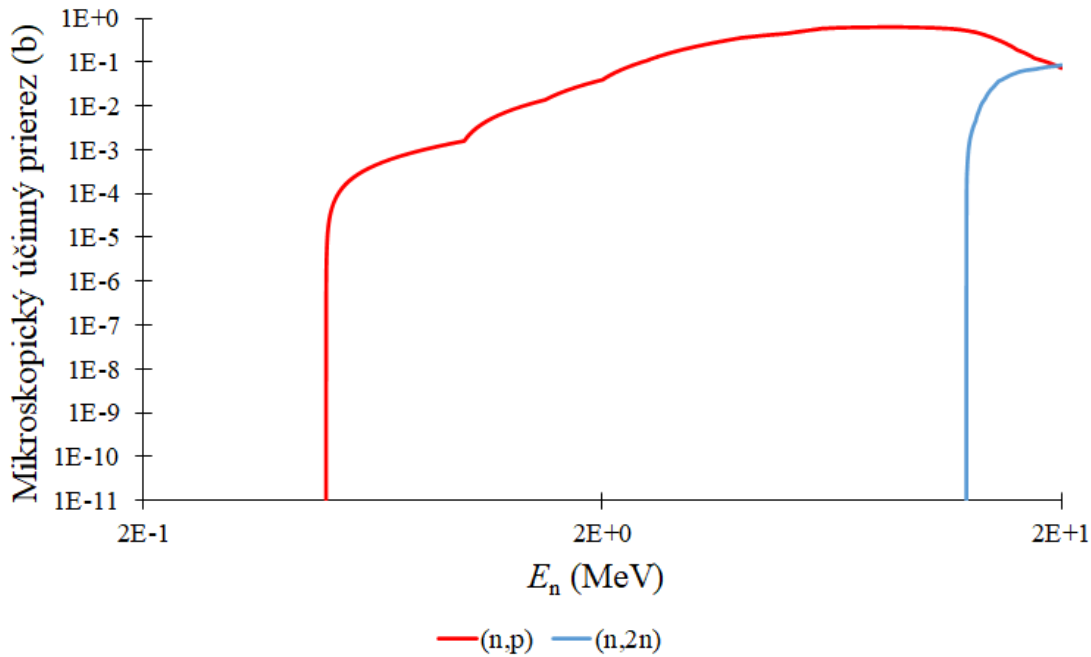
3.2 Príprava aktivačného experimentu

Pred zahájením aktivačného experimentu prebiehala jeho príprava v dvoch fázach. V prvej fáze prípravy experimentu boli v deň pred jeho realizáciou pripravené dve sady aktivačných detektorov z materiálov Au, In, Fe, Co, Ti, Lu, Y, Nb, Ni a Al, ktoré do ÚJF dodáva spoločnosť Goodfellow [37]. Materiály boli vyberané na základe mikroskopických účinných prierezov pre aktivačné a prahové reakcie, tak aby spomínanými reakciami pokrývali celé očakávané spektrum zdrojovej reakcie $p(20) + \text{Be}$. Zároveň boli sledované aj polčasy rozpadov produktov očakávaných aktivačných a prahových reakcií, ktoré hrajú významnú úlohu v optimalizácii doby ožarovania a merania gama spektra. Ďalej boli fólie aktivačných detektorov odvážené a z dát uvádzaných výrobcom boli odčítané ich hrúbky. Nakoniec boli obe sady aktivačných detektorov zabalené do plastovej fólie a pripevnené na držiak.



Obr. 3.1: Mikroskopický účinný prierez pre reakcie na ^{175}Lu [38].

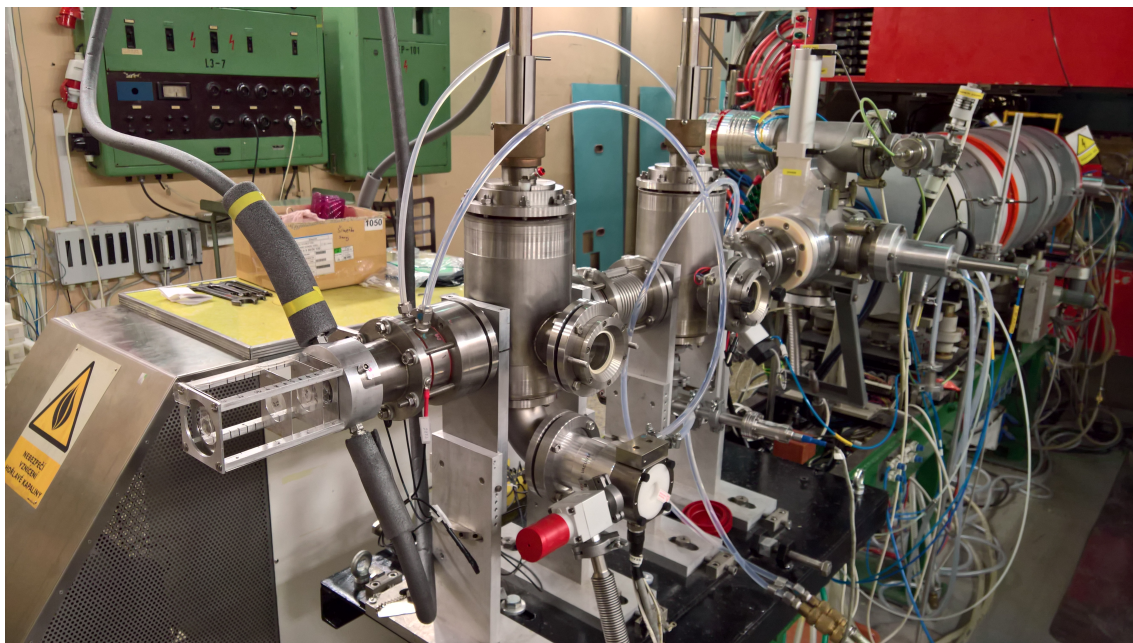
Na obr. 3.1 a 3.2 je možné na ukážku vidieť energetickú závislosť mikroskopických účinných prierezov reakcií $^{175}\text{Lu}(n,\gamma)^{176\text{m}}\text{Lu}$, $^{175}\text{Lu}(n,2n)^{174\text{m}}\text{Lu}$, $^{58}\text{Ni}(n,p)^{58}\text{Co}$ a $^{58}\text{Ni}(n,2n)^{57}\text{Ni}$, ktoré boli čerpané z jadrovej databázy ENDF/B-VII.1 [38].



Obr. 3.2: Mikroskopický účinný prierez pre reakcie na ^{58}Ni [38].

Druhá fáza prípravy aktivačného experimentu spočívala v príprave experimentálnej aparatury v deň jeho priebehu. Terčové stanice prevádzkované na oddelení jadrových reakcií ÚJF sú za bežných podmienok uskladnené v hale prípravy terčov. Navyše niekoľko dní pred experimentom prebiehala revízia používanej terčovej stanice a príslušných zariadení, pri ktorej boli kontrolované elektrické odpory, tesnosť či hladina chladiacej tekutiny. Pri experimente bola využitá záporná trasa urýchľovača U-120M. V priebehu prípravy experimentálnej aparatury bola najskôr nastavená energia zväzku nabitých častíc premiestnením uhlíkovej prebývajúcej fólie na správnu orbitu. Urýchlené záporné ióny vodíka sa priechodom prebývajúcou fóliou zbavujú záporného náboja, čím sa menia na protóny. Následne bola nastavená os zväzku nabitých častíc pomocou špeciálnej rúry, ktorá je pripojená k iónovodu. Na konci špeciálnej rúry je na prírubu umiestnená willemitová fólia, ktorá sa pri dopade protónov rozsvieti a po zvýšení intenzity protónov sa do nej vypáli diera, ktorá slúži ako prvý bod optickej osi zväzku nabitých častíc. Aby bol získaný druhý bod optickej osi zväzku, sa do oblasti priezoru iónovodu zasúvalo tienidlo a kamerou bol sledovaný zväzok nabitých častíc. Pokračovalo sa opätovným meraním energie zväzku sondou a napustením atmosféry do iónooptickej trasy. Pred pripojením terčovej stanice bol namierený laser do spomínaných dvoch bodov optickej osi zväzku protónov. Nasledujúcim krokom druhej fázy prípravy experimentu bolo odpojenie špeciálnej rúry a s využitím žeriavu sa pripojila terčová stanica pomocou skrutiek, vlnovca a rozpier tak, aby os terča odpovedala osi laseru. V poslednom kroku prípravy experimentu sa

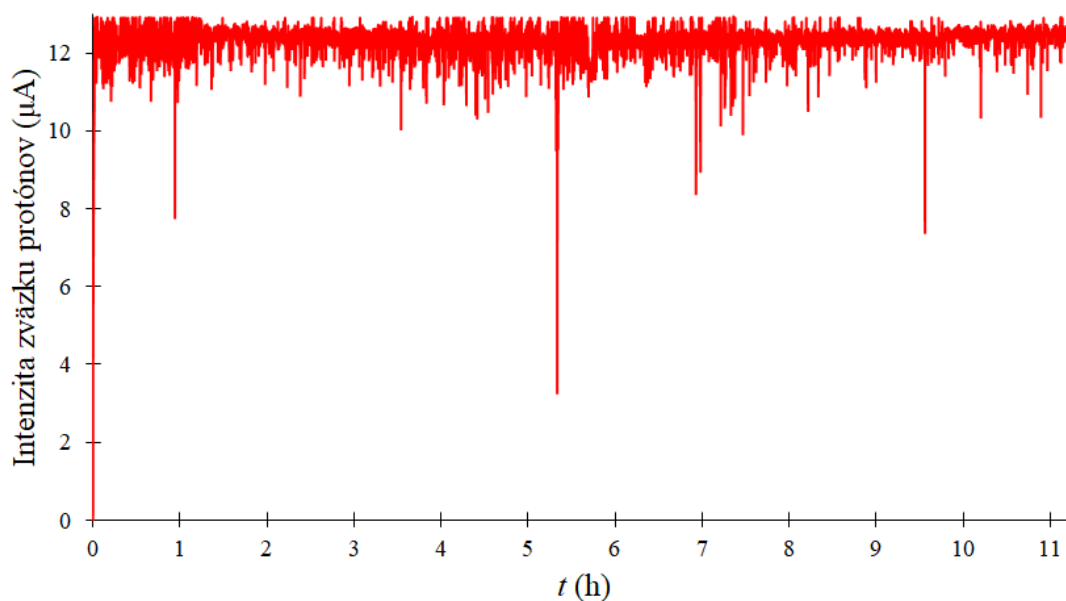
evakuoval iónovod a terčová stanica, pripojili sa chladiace okruhy terčovej stanice, vykonal sa test zväzku protónov, porovnali sa prúdy nabitých častíc na terči a clonách. Optická os zväzku bola správne nastavená v prípade veľkého pomeru prúdov na terči a clonách. Ak by optická os nebola nastavená správne, je možné upraviť nastavenie fokuzačných magnetov na základe predchádzajúcich experimentov alebo odpojiť terčovú stanicu a zopakovať celý proces nastavovania osi zväzku nabitých častíc. Na obr. 3.3 je možné vidieť berýliovú terčovú stanicu pripojenú k cyklotrónu U-120M.



Obr. 3.3: Berýliová terčová stanica pripojená k cyklotrónu U-120M.

3.3 Priebeh aktivačného experimentu

Aktivačný experiment bol vykonaný dňa 7.12.2018 s využitím berýlievej terčovej stanice NG-2, ktorá bola riadená izochrónnym cyklotrónom U-120M. Bola využitá zdrojová reakcia $p + \text{Be}$, kde protóny boli urýchlené na energiu 20,134 MeV a intenzita zväzku nabitých častíc na terči mierne fluktuovala okolo hodnoty $12 \mu\text{A}$. Ožarovanie trvalo približne 11 hodín. Časovú závislosť intenzity urýchleného zväzku protónov na terči v priebehu experimentu je možné vidieť na obr. 3.4. Boli ožarované dve sady aktivačných detektorov, ktoré boli pripravované v prvej fáze prípravy experimentu, na ožarovacích pozíciách P0 a P14. Pozícia P0 sa nachádza v tesnej blízkosti berýlievého terča a pozícia P14 predstavuje kolmú vzdialenosť medzi ožarovanou sadou aktivačných detektorov a hlavou berýlievej terčovej stanice približne 156 mm. Na obr. 3.5 je vyobrazená sada aktivačných detektorov a aktivačné detektory pripevnené v držiaku na berýlievej terčovej stanici je možné vidieť na obr. 3.6.

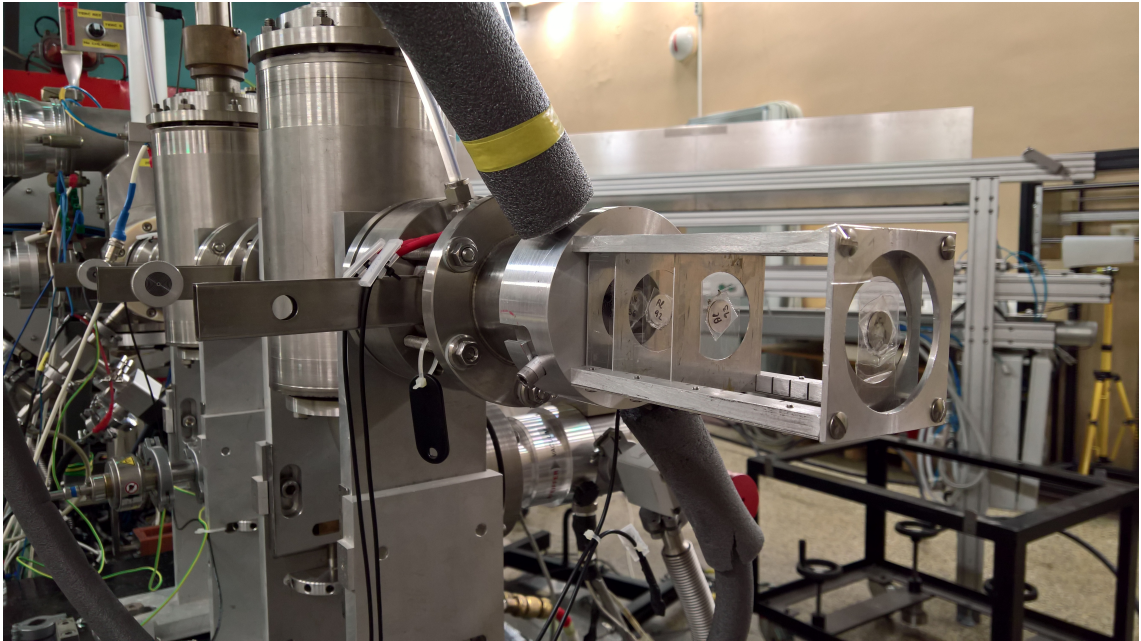


Obr. 3.4: Časová závislosť intenzity zväzku protónov na berýliovom terči v priebehu ožarovania.

Ukončenie aktivačného experimentu sa realizuje odstavením zväzku protónov a chladiacich okruhov. Ukončí sa meranie podstatných parametrov popri oddelení terčovej stanice od iónooptickej trasy ventilom. Do iónooptickej trasy sa napustí atmosférický vzduch. Od ukončenia experimentu sa čaká približne hodinu, kým príkon dávkového ekvivalentu v hale cyklotrónu klesne na prijateľnú hodnotu a po uplynutí doby čakania prebieha kontrolné meranie dozimetrickej situácie. Pri dostatočne nízkom príkone dávkového ekvivalentu v hale cyklotrónu boli aktivačné detektory prenesené do gama-spektrometrického laboratória, kde sa cyklicky merali gama spektrá ožiarených aktivačných detektorov s využitím polovodičového HPGe detektora Canberra [39] po dobu asi štyroch týždňov.



Obr. 3.5: Sada aktivačných detektorov.



Obr. 3.6: Sady aktivačných detektorov umiestnených v držiaku na berýliovej terčovej stanici.

3.4 Výsledky analýzy vybraných aktivačných detektorov

Na analýzu boli do diplomovej práce vybrané aktivačné fólie z materiálov ^{nat}Lu , ^{nat}Nb , ^{nat}Ni a ^{nat}Y , ktoré boli ožarované v sade na pozícii P14. Po ukončení ožarovania prebiehalo meranie energetických gama spektier ožiarených fólií s využitím polovodičového HPGe detektora Canberra [39] po dobu asi štyroch týždňov. Ožiarené fólie boli merané na pozícii P5 v držiaku polovodičového detektora, ktorá predstavuje vzdialenosť medzi aktivačnou fóliou a polovodičovým detektorom 5 cm. Aktivačné a prahové reakcie s neutrónov a aktivačných detektorov s prahovou energiou menšou než 18 MeV boli prevzaté z online databázy [10]. Následne pre produkty spomínaných aktivačných a prahových reakcií boli odčítané gama linky, ich intenzity a polčasy rozpadu z online databázy [40]. Z nameraných gama spektier boli odčítané veličiny nutné na stanovenie sady reakčných rýchlostí, konkrétne doba merania gama spektra, doba merania gama spektra s uvažovaním mŕtvej doby, plocha pod píkom plnej absorpcie a relatívna neurčitost' plochy pod píkom plnej absorpcie pre gama linky produktov aktivačných a prahových reakcií v spomínaných aktivačných detektoroch.

V tab. 3.2 sú uvedené detegované aktivačné a prahové reakcie, ich prahové energie a gama linky, intenzity gama liniek, polčasy rozpadu produktov reakcií. Dáta boli

Tab. 3.2: Detegované aktivačné a prahové reakcie spolu s ich základnými charakteristikami.

Reakcia	Prahová energia (MeV)	Gama linky (keV)	Intenzita (%)	Polčas rozpadu
$^{175}\text{Lu}(n,\gamma)^{176\text{m}}\text{Lu}$	0	88,34	8,9	3,64 h
$^{175}\text{Lu}(n,2n)^{174\text{m}}\text{Lu}$	7,71	44,70 67,06	12,4 7,25	142,00 d
$^{93}\text{Nb}(n,\alpha)^{90\text{m}}\text{Y}$	0	202,51 479,17	97,3 90,74	3,19 h
$^{93}\text{Nb}(n,2n)^{92\text{m}}\text{Nb}$	8,93	934,46 912,73	99 1,78	10,15 d
$^{58}\text{Ni}(n,p)^{58}\text{Co}$	0	810,78	99	70,86 d
$^{58}\text{Ni}(n,2n)^{57}\text{Ni}$	12,43	1377,63 127,16 1919,52	81,7 16,7 12,26	35,60 h
$^{58}\text{Ni}(n,d)^{57}\text{Co}$	6,05	122,06 136,47	85,6 10,68	271,79 d
$^{89}\text{Y}(n,\gamma)^{90\text{m}}\text{Y}$	0	202,51 479,17	97,3 90,74	3,19 h
$^{89}\text{Y}(n,2n)^{88}\text{Y}$	11,61	1836,06 898,04	99,2 93,7	106,65 d

Tab. 3.3: Výsledná sada reakčných rýchlostí spolu s ich relatívnymi neurčitostami.

Reakcia	R_R (s^{-1})	Relatívna neurčitosť (%)
$^{\text{nat}}\text{Lu}(n,x)^{176\text{m}}\text{Lu}$	$4,10 \times 10^{-16}$	0,52
$^{\text{nat}}\text{Lu}(n,x)^{174\text{m}}\text{Lu}$	$8,69 \times 10^{-17}$	1,84
$^{93}\text{Nb}(n,\alpha)^{90\text{m}}\text{Y}$	$7,13 \times 10^{-19}$	1,04
$^{93}\text{Nb}(n,2n)^{92\text{m}}\text{Nb}$	$5,46 \times 10^{-17}$	0,72
$^{\text{nat}}\text{Ni}(n,x)^{58}\text{Co}$	$1,29 \times 10^{-16}$	0,33
$^{\text{nat}}\text{Ni}(n,x)^{57}\text{Ni}$	$2,41 \times 10^{-18}$	0,78
$^{\text{nat}}\text{Ni}(n,x)^{57}\text{Co}$	$4,38 \times 10^{-17}$	0,97
$^{89}\text{Y}(n,\gamma)^{90\text{m}}\text{Y}$	$3,34 \times 10^{-19}$	2,85
$^{89}\text{Y}(n,2n)^{88}\text{Y}$	$8,09 \times 10^{-17}$	0,47

čerpané z online databáz [10, 40] Všetkým aktivačným a prahovým reakciám boli stanovené reakčné rýchlosti a ich relatívne neurčitosti podľa vzťahov (2.1) a (2.2) pre každú gama linku danej reakcie. Každéj reakčnej rýchlosti sa vykonala korekcia na samoabsorpciu gama žiarenia meranou vzorkou pomocou korekčného faktora stanoveného podľa vzťahu (2.11). Lineárny súčiniteľ zoslabenia sa získal ako súčin koeficientu zoslabenia gama žiarenia odčítaného z online databázy [26] a hustoty odčítanej z online databázy [7]. Výsledná sada reakčných rýchlostí bola stanovená ako vážený priemer reakčných rýchlostí pre jednotlivé gama linky produktov reakcií,

kde váhou bola prevrátená hodnota kvadrátu relatívnej neurčitosti jednotlivých reakčných rýchlostí. Relatívna neurčitosť výslednej reakčnej rýchlosti bola stanovená pomocou vzťahu pre výpočet relatívnej neurčitosti nepriameho merania. Nakoniec sa na výsledných reakčných rýchlostiach vykonala geometrická korekcia a korekcia na fluktuáciu intenzity zväzku nabitých častíc v priebehu ožarovania. Sada výsledných reakčných rýchlostí spolu s ich relatívnymi neurčitosťami je uvedená v tab. 3.3.

Cyklické meranie gama spektier ožiarených fólií umožnilo porovnanie stanovených polčasov rozpadu produktov aktivačných a prahových reakcií s ich tabulárnou hodnotou. Dobrá zhoda medzi stanoveným a tabelárnym polčasom rozpadu naznačuje, že sa pre danú gama linku skutočne jedná o meraný izotop a gama linka nie je sýtená iným izotopom. Surová aktivita produktov reakcií bola stanovená na základe vzťahu

$$A_s(E_\gamma) = \frac{S(E_\gamma)}{t_{\text{live}}\varepsilon(E_\gamma)I_\gamma}, \quad (3.1)$$

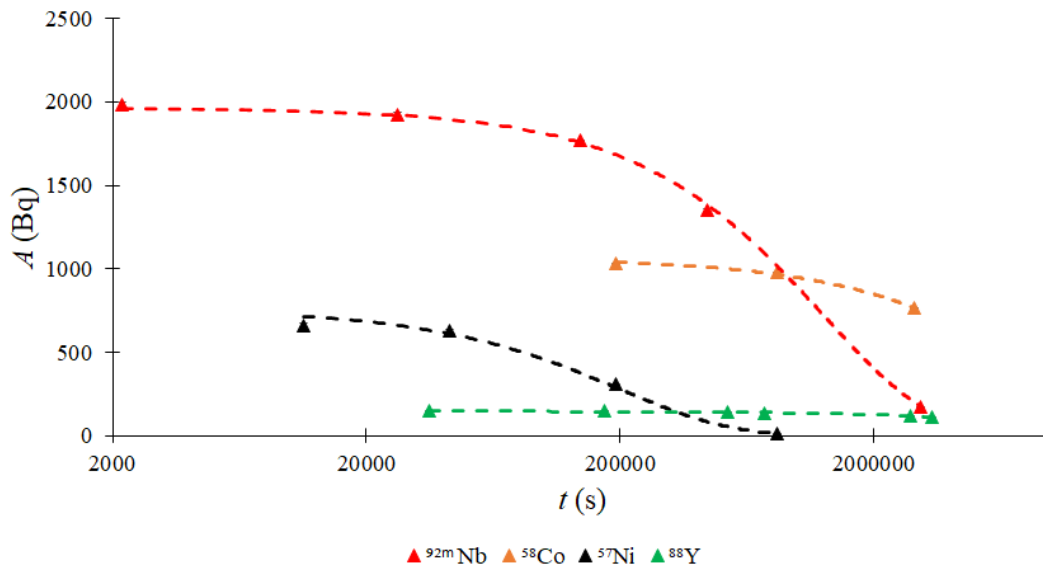
kde $S(E_\gamma)$ je plocha pod píkom plnej absorpcie pre danú gama linku, t_{live} je doba merania gama spektra, $\varepsilon(E_\gamma)$ je detekčná účinnosť pre danú gama linku a I_γ je intenzita danej gama linky. Relatívna neurčitosť surovej aktivity σ_{A_s} bola stanovená podľa vzťahu

$$\sigma_{A_s} = \sqrt{\sigma_S + \sigma_{I_\gamma}}, \quad (3.2)$$

kde σ_S je relatívna neurčitosť plochy pod píkom plnej absorpcie pre danú gama linku a σ_{I_γ} je relatívna neurčitosť intenzity danej gama linky. Aktivita bola stanovená pre každú gama linku zvlášť a následne obdobne ako pri reakčných rýchlostiach bola stanovená výsledná surová aktivita daného produktu ako vážený priemer surových aktivít pre jednotlivé gama linky, kde ako váha vystupovala prevrátená hodnota kvadrátu relatívnej neurčitosti. Relatívna neurčitosť výslednej surovej aktivity bola stanovená podľa vzťahu pre výpočet relatívnej neurčitosti nepriameho merania. Takto vznikla sada usporiadaných dvojíc $(A_s, t_{\text{cool}} + t_{\text{real}}/2)$, kde t_{cool} je doba vymierania a t_{real} je doba merania gama spektra s uvážením mŕtvej doby. Sada usporiadaných dvojíc bola fitovaná exponenciálnou funkciou a z parametrov fitov boli stanovené polčasy rozpadov. Časovú závislosť surovej aktivity vybraných produktov aktivačných a prahových reakcií je možné vidieť na obr. 3.7 a porovnanie stanovených a tabelárnych polčasov rozpadu je uvedené v tab. 3.4.

Tab. 3.4: Porovnanie stanovených a tabelárnych polčasov rozpadu vybraných produktov aktivačných a prahových reakcií.

Produkt	Stanovený polčas rozpadu	Tabelárny polčas rozpadu	Relatívna odchýlka (%)
$^{174\text{m}}\text{Lu}$	$(140 \pm 10) \text{ d}$	$(142 \pm 2) \text{ d}$	-3,26
$^{92\text{m}}\text{Nb}$	$(10,15 \pm 0,09) \text{ d}$	$(10,15 \pm 0,02) \text{ d}$	0,02
^{58}Co	$(71 \pm 4) \text{ d}$	$(70,86 \pm 0,07) \text{ d}$	0,88
^{57}Ni	$(38,1 \pm 0,4) \text{ h}$	$(35,60 \pm 0,06) \text{ h}$	6,45
^{88}Y	$(106 \pm 5) \text{ d}$	$(106,65 \pm 0,04) \text{ d}$	-0,89



Obr. 3.7: Časová závislosť surovej aktivity vybraných produktov aktivačných a prahových reakcií.

Kapitola 4

Rekonštrukcia energetického neutrónového spektra

Energetické neutronové spektrum je jedným zo základných parametrov neutrónového zdroja. Rôzne experimenty vyžadujú znalosť tohto parametra. Pri využití metódy aktivačnej techniky spočíva stanovenie neutrónového spektra v riešení sady Volterových integrálnych rovníc pre stanovené reakčné rýchlosti vychádzajúce z definície reakčnej rýchlosti v tvare [41]

$$R_{R,i} = \int_0^{+\infty} \sigma_i(E_n) \phi(E_n) dE_n, \quad (4.1)$$

kde $\sigma_i(E_n)$ je mikroskopický účinný prierez danej reakcie, $\phi(E_n)$ je spektrálna hustota toku neutrónov a E_n je energia neutrónov. Integrácia prebieha cez energetický interval pre danú reakciu. Aktivačné reakcie majú nulový prah, a preto dolná medza integrácie je rovná nule, ale v prípade prahovej reakcie má účinný prierez nulovú hodnotu až do prahovej energie E_{thr} a integrácia začína od spomínanej prahovej energie. Spektrálna hustota toku neutrónov je nulová od maximálnej energie neutrónov v neutrónovom poli, čím sa obmedzuje horná medza integrácie na maximálnu energiu neutrónov. V nasledujúcich dvoch podkapitolách budú popísané metódy a výpočtové kódy rekonštrukcie neutrónového spektra.

4.1 Metódy rekonštrukcie neutrónového spektra

Riešenie sady rovníc (4.1) je veľmi náročné, a preto bolo vyvinutých viacero metód slúžiacich na rekonštrukciu neutrónového spektra. Príkladom spomínaných metód môže byť iteračná metóda [42], metóda najmenších štvorcov [43], genetické algoritmy [44] a dekonvolučné techniky založené na metóde Monte Carlo [45]. Nakoľko sa väčšinou jedná o numerické výpočty, je vhodné previesť integrálne rovnice (4.1)

do diskrétného tvaru, kde energetická závislosť veličín je nahradená grupovou štruktúrou, v podobe [41]

$$R_{R,i} = \sum_l \sigma_{i,l} \phi_l. \quad (4.2)$$

4.1.1 Iteračná metóda

Iteračná metóda je jednou z najstarších metód rekonštrukcie neutrónového spektra. Vstupnými parametrami sú jadrové dáta, namerané reakčné rýchlosti a odhad neutrónového spektra. Z odhadu neutrónového spektra a jadrových dát mikroskopických účinných prierezov sú následne dopočítané teoretické reakčné rýchlosti, ktoré sú porovnávané s nameranými hodnotami reakčných rýchlostí. Na základe porovnania spočítaných a nameraných reakčných rýchlostí sa upraví neutrónové spektrum a proces sa opakuje až kým nieje dosiahnutý dostatočne malý rozdiel medzi počítanými a nameranými reakčnými rýchlosťami. Grupová štruktúra výsledného neutrónového spektra odpovedá grupovej štruktúre vstupných jadrových dát. [42]

4.1.2 Metóda najmenších štvorcov

V metóde najmenších štvorcov sa zavádza druhá mocnina pomocnej funkcie χ , ktorá závisí na nameraných reakčných rýchlostiach, vstupných jadrových dátach, počiatočnom odhade neutrónového spektra a výslednom neutrónovom spektre. Cieľom metódy je stanoviť výsledné neutrónové spektrum tak, aby bola minimalizovaná druhá mocnina pomocnej funkcie χ a zároveň, aby rozdiel medzi nameranými reakčnými rýchlosťami a teoretickými reakčnými rýchlosťami počítanými pomocou výsledného neutrónového spektra bol dostatočne malý. Často je vhodné pridať podmienky nezápornosti neutrónového spektra a počítaných reakčných rýchlostí, aby riešenie malo fyzikálny zmysel. Vo vybraných prípadoch je možné metódu linearizovať, a to tak, že sa druhá mocnina pomocnej funkcie χ nahradí jej Taylorovým rozvojom do prvého stupňa. [43]

4.1.3 Genetický algoritmus

Genetický algoritmus je stochastická metóda inšpirovaná Darwinovou teóriou evolúcie. Na začiatku výpočtu sa náhodne vygeneruje množina neutrónových spektier a každému spektru sa dopočíta hodnota označovaná ako vhodnosť pomocou porovnania nameraných a spočítaných reakčných rýchlostí. Ďalej sa z vygenerovaných neutrónových spektier vytvárajú páry a spektrá s vysokou hodnotou vhodnosti majú vyššiu pravdepodobnosť sformovania páru. Následne dochádza k množeniu, kedy sa skombinujú vlastnosti materských spektier a vznikajú dvaja potomkovia. Množenie je umožnené aj spektrám s nižšou vhodnosťou avšak s nižšou pravdepodobnosťou.

Obdoba genetických mutácii je v metóde genetického algoritmu reprezentovaná náhodnými zmenami štruktúry spektra. Celý tento proces postupne vedie na prirodzene najvhodnejšie neutrónové spektrum. [44]

4.1.4 Metóda Monte Carlo

Metóda Monte Carlo spočíva v hľadaní strednej hodnoty veľkého počtu náhodne generovaných primeraných neutrónových spektier. Pod pojmom primerané neutrónové spektrum sa najčastejšie rozumie také neutrónové spektrum, ktoré je nezáporné a zároveň rozdiel počítaných a nameraných reakčných rýchlostí je dostatočne malý. Zo spomínaného rozdielu sa odvodí pravdepodobnosť, ktorá slúži ako miera pri stredovaní spektier, čo zabezpečí, že najvhodnejšie neutrónové spektrá prispievajú k výsledku najviac. [45]

4.2 Výpočtové kódy pre rekonštrukciu neutrónového spektra

Ručný výpočet rovníc (4.2) je takmer nemožný, a preto sa v praxi na rekonštrukciu neutrónového spektra využívajú výpočtové kódy, ktoré implementujú metódy slúžiace k rekonštrukcii neutrónového spektra. Príkladmi spomínaných výpočtových kódov sú SAND II [5, 6], GRAVEL [46], STAYSL [47, 48] a MCNP [49, 50].

4.2.1 SAND II

Výpočtový kód *Spectrum Analysis by Neutron Dosimeters II* (SAND II) vyvinulo US Air Force Weapons Laboratory a je napísaný v programovacom jazyku Fortran [51]. Pôvodne bol kód SAND II vyvinutý pre reaktorové aplikácie a bolo možné zadať maximálnu energiu 20 MeV. Pre účely predkladanej diplomovej práce bola využitá modifikácia kódu SAND II, aby bolo možné zadávať energie vyššie než 20 MeV. Kód využíva iteračnú metódu rekonštrukcie neutrónového spektra. Vstupnými súbormi pre kód je vytvorená knižnica jadrových dát s definovanou grupovou štruktúrou, odhad neutrónového spektra s grupovou štruktúrou odpovedajúcou vytvorenej knižnici jadrových dát a namerané reakčné rýchlosti aj s neurčitostami. Z odhadnutého spektra sa počítajú teoretické reakčné rýchlosti, z porovnaní s nameranými hodnotami sa stanovujú korekčné faktory pre úpravu neutrónového spektra a proces sa opakuje až kým rozdiel medzi nameranými a počítanými reakčnými rýchlosťami je dostatočne malý. [5, 6]

Odhad neutrónového spektra je možné získať simuláciou v stochastických kódach alebo je možné použiť spektrum namerané iným autorom za rovnakých podmienok.

4.2.2 GRAVEL

Vo výpočtovom kóde GRAVEL je implementovaná modifikácia algoritmu výpočtového kódu SAND II. Modifikácia spočíva vo vytvorení pomocnej funkcie závisiacej na druhých mocninách rozdielov počítaných a meraných reakčných rýchlostí, ktorá slúži na určenie ukončujúcej iterácie v iteračnej metóde. Kód GRAVEL je napísaný v prostredí MATLAB [52]. Spomínaný kód dosahuje dobré výsledky rekonštrukcie spektra neutrónového zdroja typu AmBe a reakcie D-T. [46]

4.2.3 STAY'SL

Výpočtový kód *Least-squares dosimetry unfolding: the program* (STAY'SL) implementuje metódu najmenších štvorcov na rekonštrukciu neutrónového spektra. Vstupnými dátami pre kód STAY'SL je odhad neutrónového spektra, namerané reakčné rýchlosti a jadrové dáta mikroskopických účinných prierezov meraných reakcií. Výstupom je spočítané neutrónové spektrum a spektrálne toky s grupovou štruktúrou so širšími energetickými intervalmi a spočítané reakčné rýchlosti. Výpočtový kód STAYSL môže byť použitý aj pre reaktorovú dozimetriu, výpočty radiačného poškodenia alebo pre výpočty reakčných rýchlostí. [47, 48]

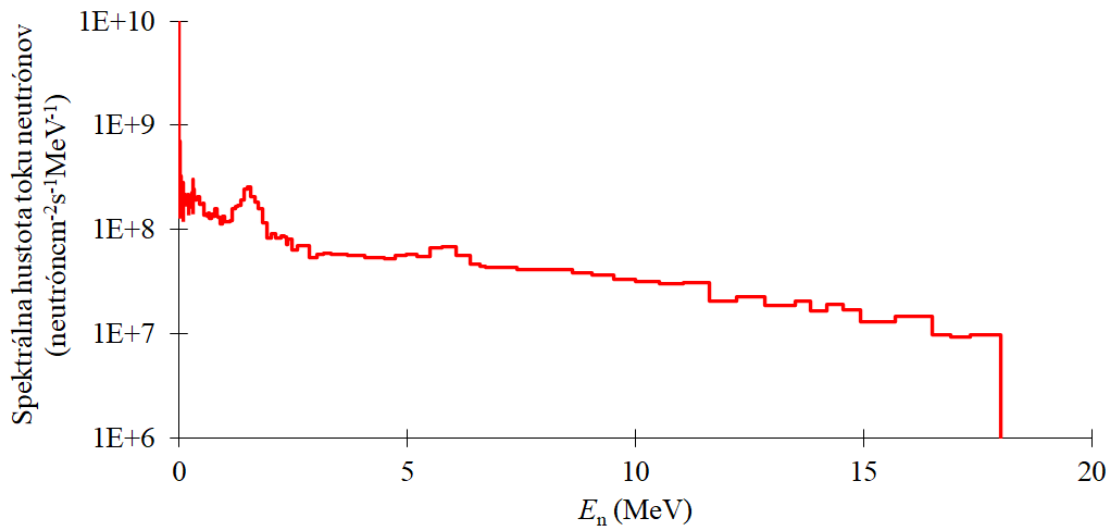
4.2.4 MCNP

Monte Carlo N-Particle transport code (MCNP) je viacúčelový stochastický výpočtový kód. Je ho možné použiť na väčšinu výpočtov pre jadrové reaktory. MCNP umožňuje aj simuláciu transportu neutrónov, nabitých častíc a fotónov. Vstupný súbor pre výpočtový kód MCNP obsahuje definíciu objemov, v ktorých sa simuluje transport častíc, definíciu plôch ohraničujúcich spomínané objemy, materiálové zloženie sledovaných objemov a typ knižnice jadrových dát použitých pre výpočet. Výstup z výpočtového kódu závisí na zadaných možnostiach označovaných ako *tally*, napríklad tally F4 zaznamenáva strednú hodnotu hustoty toku v sledovanom objeme. Výpočtový kód MCNP bol vyvinutý v Los Alamos National Laboratory. [49, 50]

4.3 Simulácia neutrónového spektra zo zdrojovej reakcie $p(20) + \text{Be}$

V rámci diplomovej práce bola simulovaná zdrojová reakcia $p(20) + \text{Be}$ vo výpočtovom kóde *Monte Carlo N-Particle transport extended code* (MCNPX) [53] s využitím výpočtových prostriedkov na ÚJF AV ČR. Simulácia bola vykonaná pod dohľadom

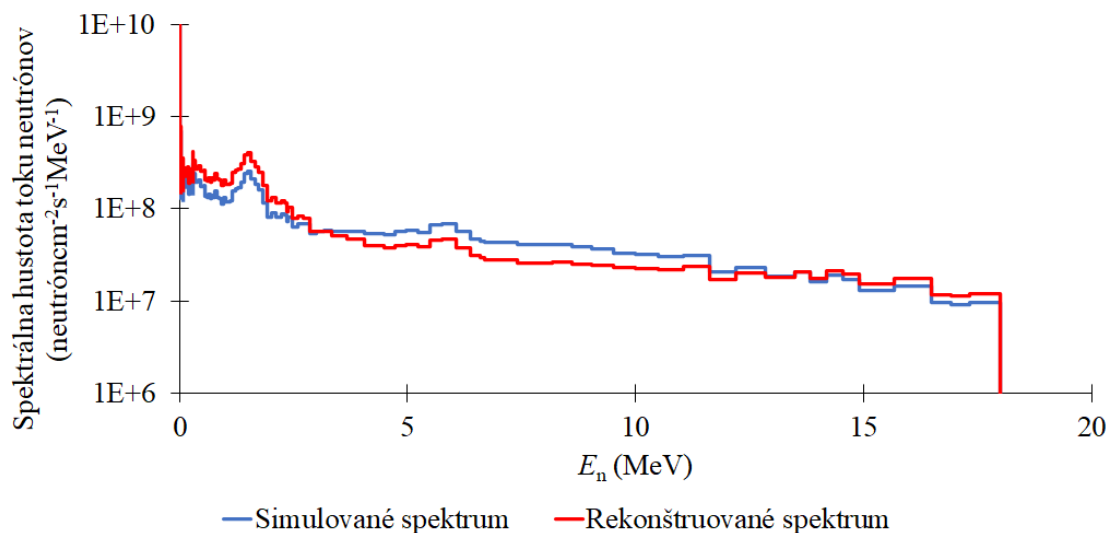
vedúceho práce. Geometria odpovedala urýchľovačom riadenému generátoru neutrónov NG-2. Konkrétne kolimovaný zväzok protónov s energiou 20 MeV a stopou s priemerom 4 mm dopadal na berýliový terčik v tvare disku s priemerom 50 mm a hrúbkou 8 mm. Berýliový terč bol chladený čistým liehom. Chladivo predstavuje obtok berýliového terča s vonkajším priemerom 58 mm a valcový objem za berýliovým terčom s hrúbkou 4 mm, ktorý je na konci oddelený od atmosféry haly cyklotrónu tantalovou vrstvou s hrúbkou 0,05 mm. Vo vzdialenosti 156 mm od tantalovej vrstvy boli umiestnené aktivačné detektory. Ďalej bol zvolený tally F4 s grupovou štruktúrou TRIPOLI+. Vstupný súbor popisujúci uvedenú geometriu bol spustený vo výpočtovom kóde MCNPX s počtom histórií $4,5 \cdot 10^8$. Výpočet trval asi päť dní a výstupné simulované neutrónové spektrum zo zdrojovej reakcie $p(20) + \text{Be}$ je možné vidieť na obr 4.1. Simuláciou sa získalo neutrónové spektrum zdrojovej reakcie $p(20) + \text{Be}$, ktoré slúžilo ako odhad neutrónového spektra pre rekonštrukčný kód SAND II [5, 6].



Obr. 4.1: Simulované spektrum zdrojovej reakcie $p(20) + \text{Be}$ s geometriou odpovedajúcou aktivačnému experimentu.

4.4 Rekonštrukcia spektra zdrojovej reakcie $p(20) + \text{Be}$

V predkladanej diplomovej práci bolo zrekonštruované spektrum urýchľovačom riadeného generátora NG-2 využívajúceho zdrojovú reakciu $p(20) + \text{Be}$ pomocou rekonštrukčného kódu SAND II [5, 6]. Ako počiatočný odhad neutrónového spektra bolo použité simulované spektrum z výpočtového kódu MCNPX [53], ktoré bolo popísané v predchádzajúcej podkapitole. Jadrové dáta nutné pre výpočet boli získané z knižnice jadrových dát EAF-2010 [54] s využitím grupovej štruktúry TRIPOLI+.

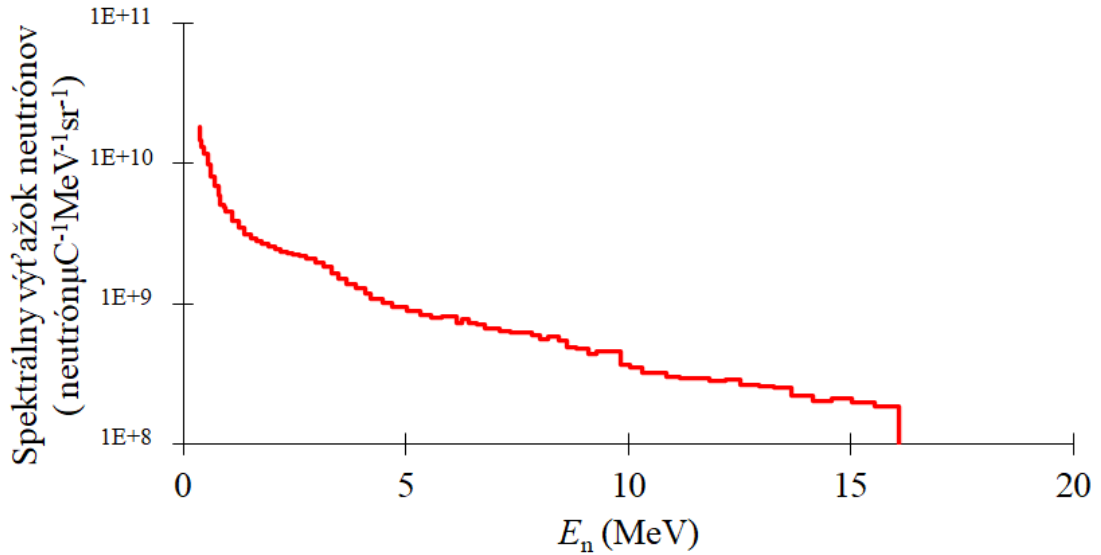


Obr. 4.2: Výsledné zrekonštruované spektrum zdrojovej reakcie $p(20) + \text{Be}$ v porovnaní so simulovaným spektrom v kóde MCNPX.

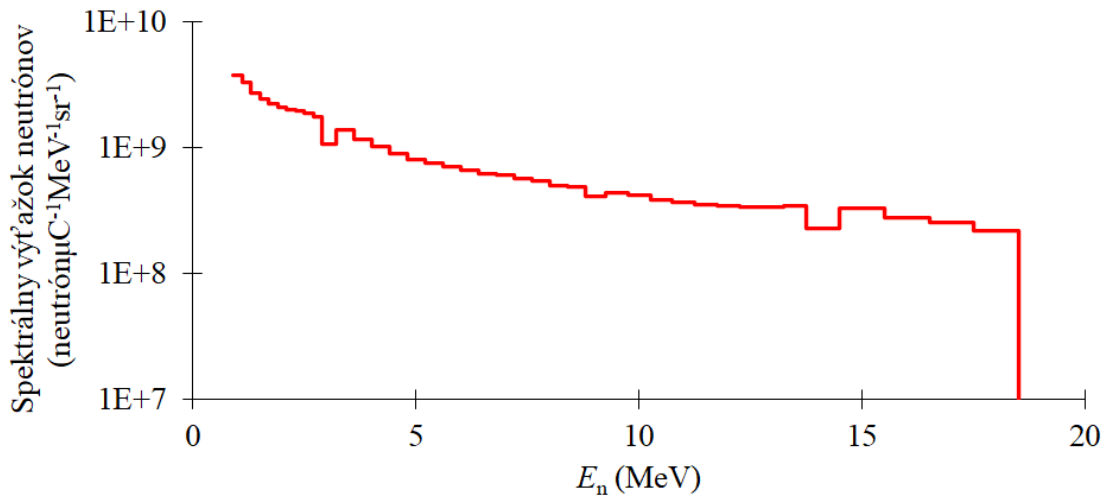
Bolo získané spojité energetické spektrum neutrónového poľa využívajúceho zdrojovú reakciu $p(20) + \text{Be}$ so strednou energiou neutrónov $\bar{E}_n = 7,3 \text{ MeV}$, ktorá bola stanovená v energetickej oblasti nad 2 MeV . Hustota toku rýchlych neutrónov pre ožarovacie podmienky s prúdom protónov $12,3 \mu\text{A}$ dosahuje hodnotu $10^9 \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$. Zrekonštruované neutrónové spektrum zdrojovej reakcie $p(20) + \text{Be}$ a simulované spektrum v kóde MCNPX je možné vidieť na obr. 4.2. Správnosť rekonštruovaného spektra bola overená porovnaním stanovenej strednej energie neutrónov s teoretickou hodnotou $\bar{E}_n = 7,2 \text{ MeV}$ počítanou podľa vzťahu (1.1). Z porovnania je vidieť, že dochádza k dobrej zhode a malý rozdiel je spôsobený dĺžkou energetických intervalov v energetickej oblasti nad 2 MeV . Ďalej bol rekonštruovanému spektru vizuálne skontrolovaný tvar a bolo porovnané so spektrami zahraničných autorov, ktoré sú zobrazené na obr. 4.3 a 4.4. Získané neutrónové spektrum je v energetickej oblasti nad 5 MeV tvarom v zhode so spektrami reportovanými v literatúre [11, 55]. Nízko energetickú oblasť spektier nie je možné porovnávať, pretože meranie spektier v literatúre [11, 55] bolo vykonané metódou *time-of-flight* s využitím scintilačného detektora a nízko energetická oblasť bola ovplyvnená gama žiarením aj napriek nastavenej diskriminácii.

Pri rekonštrukcii neutrónového spektra boli sledované podiely vypočítaných reakčných rýchlostí kódom SAND II a experimentálne stanovených reakčných rýchlostí pre každú reakciu. Spomínané podiely sú označované ako C/E . Celkom bolo nameraných 24 aktivačných a prahových reakcií neutrónov s aktivačnými detektormi. Pri rekonštrukcii boli postupne pridávané reakcie a boli sledované parametre C/E . Ďalej sa menil počet cyklov výpočtu, sledoval sa vplyv na parametre C/E a tvar

spektra. Nakoniec bolo na rekonštrukciu neutrónového spektra zo zdrojovej reakcie $p(20) + \text{Be}$ použitých 22 nameraných reakcií a bolo zvolených desať cyklov výpočtu. Boli vyradené len reakcie ${}^{\text{nat}}\text{In}(n,x){}^{116\text{m}}\text{In}$ a ${}^{\text{nat}}\text{In}(n,x){}^{114\text{m}}\text{In}$, pretože ich parametre C/E sa výrazne líšili od hodnoty 1 a výpočet nekonvergoval správne, čo môže byť spôsobené nepresnosťou knižnice jadrových dát. Parametre C/E použitých 22 reakcií sú uvedené v tab. 4.1.



Obr. 4.3: Neutrónové spektrum zo zdrojovej reakcie $p(18) + \text{Be}$ meral doktor Lone. [11, 12]



Obr. 4.4: Neutrónové spektrum zo zdrojovej reakcie $p(19,92) + \text{Be}$ meral pán Brede. [12, 55]

Tab. 4.1: Výstupné podiely C/E .

Reakcia	C/E
$^{197}\text{Au}(n,2n)^{196}\text{Au}$	0,98
$^{27}\text{Al}(n,\alpha)^{24}\text{Na}$	1,19
$^{115}\text{In}(n,n')^{115\text{m}}\text{In}$	0,96
$^{59}\text{Co}(n,p)^{59}\text{Fe}$	0,93
$^{89}\text{Y}(n,2n)^{88}\text{Y}$	1,03
$^{\text{nat}}\text{Fe}(n,x)^{56}\text{Mn}$	1,08
$^{\text{nat}}\text{Ti}(n,x)^{48}\text{Sc}$	0,98
$^{93}\text{Nb}(n,\alpha)^{90\text{m}}\text{Y}$	1,08
$^{93}\text{Nb}(n,2n)^{92\text{m}}\text{Nb}$	1,04
$^{\text{nat}}\text{Ti}(n,x)^{47}\text{Sc}$	1,07
$^{\text{nat}}\text{Ni}(n,x)^{58}\text{Co}$	1,01
$^{\text{nat}}\text{Ni}(n,x)^{57}\text{Ni}$	0,91
$^{\text{nat}}\text{Lu}(n,x)^{176\text{m}}\text{Lu}$	0,99
$^{\text{nat}}\text{Lu}(n,x)^{174\text{m}}\text{Lu}$	1,03
$^{59}\text{Co}(n,\alpha)^{56}\text{Mn}$	1,05
$^{\text{nat}}\text{Ti}(n,x)^{44}\text{Sc}$	0,92
$^{197}\text{Au}(n,2n)^{196\text{m}}\text{Au}$	1,12
$^{197}\text{Au}(n,\gamma)^{198}\text{Au}$	0,96
$^{89}\text{Y}(n,\gamma)^{90\text{m}}\text{Y}$	0,80
$^{59}\text{Co}(n,\gamma)^{60}\text{Co}$	1,04
$^{\text{nat}}\text{Ni}(n,x)^{57}\text{Co}$	0,96
$^{59}\text{Co}(n,2n)^{58}\text{Co}$	0,90

Záver

Diplomová práca priamo naväzuje na bakalársku prácu [3] a výskumnú úlohu [4]. Cieľom diplomovej práce je zhrnúť, rozšíriť znalosti v oblasti aktivačných meraní, dokončiť analýzu ožiarených fólií a zrekonštruovať energetické spektrum urýchľovačom riadeného generátora neutrónov NG-2 využívajúceho zdrojovú reakciu $p(20) + \text{Be}$.

V prvej kapitole diplomovej práce boli popísané záležitosti energetických neutrónových spektier, spektrálnych výťažkov urýchľovačom riadených generátorov neutrónov a zdrojová reakcia $p + \text{Be}$. Ďalej pokračoval popis aplikácií neutrónových zdrojov a pracovísk disponujúcich urýchľovačom riadeným generátorom neutrónov. V druhej kapitole bola podrobne popísaná metóda aktivačnej techniky a jadrová gama-spektrometria.

Následne tretia kapitola podrobne popisuje pracovisko ÚJF AV ČR [35] a aktivačný experiment vykonaný v rámci štúdie zdrojovej reakcie $p(20) + \text{Be}$. Kapitola obsahuje podrobný popis prípravy a priebehu aktivačného experimentu a boli v nej zhrnuté výsledky analýzy posledných štyroch aktivačných detektorov z materiálov Lu, Nb, Ni a Y. Celkom bolo stanovených deväť reakčných rýchlostí aktivačných a prahových reakcií.

V poslednej kapitole diplomovej práce boli popísané metódy a výpočtové kódy slúžiace na rekonštrukciu spektra. Ďalej je uvedená simulácia spektra neutrónového poľa zo zdrojovej reakcie $p(20) + \text{Be}$ s geometriou odpovedajúcou aktivačnému experimentu. Kapitola zhŕňa rekonštrukciu energetického spektra urýchľovačom riadeného generátora neutrónov NG-2 s využitím výpočtového kódu SAND II [5, 6].

V rámci analýzy spektra neutrónového poľa zo zdrojovej reakcie $p(20) + \text{Be}$ bolo celkom stanovených 24 reakčných rýchlostí aktivačných a prahových reakcií neutrónov s aktivačnými detektormi ožiarenými vo vzdialenosti 156 mm od terčovej stanice NG-2 v osi zväzku neutrónov, označovanej ako pozícia P14. Na základe sady reakčných rýchlostí a odhadu neutrónového spektra reakcie $p(20) + \text{Be}$ simulovaného vo výpočtovom kóde MCNPX [53] bolo zrekonštruované spektrum neutrónového poľa $p(20) + \text{Be}$ s využitím rekonštrukčného kódu SAND II [5, 6]. Na rekonštrukciu sa využilo 22 reakcií zo sady stanovených reakčných rýchlostí. Získalo sa spojité spektrum

s energiami do 18 MeV a strednou energiou neutrónov $\bar{E}_n = 7,3$ MeV stanovenou v energetickej oblasti nad 2 MeV. Hustota toku rýchlych neutrónov na pozícii P14 pri prúde protónov $12,3 \mu\text{A}$ dosahovala hodnotu $10^9 \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$. Pri rekonštrukcii spektra boli sledované parametre C/E , ktoré pre zvolené reakcie mali hodnoty blízke 1. Získané spektrum bolo overené porovnaním stanovenej strednej hodnoty energie neutrónov s vypočítanou hodnotou podľa vzťahu (1.1) a došlo k dobrej zhode. Navyše spektru bol vizuálne skontrolovaný tvar a bol porovnaný so spektrami reportovanými v literatúre [11, 55], s ktorými dosahuje dobrú zhodu v energetickej oblasti nad 5 MeV. Nové neutrónové pole rozširuje experimentálne možnosti terčovej stanice NG-2 v oblasti aktivačnej analýzy rýchlymi neutrónmi, materiálového výskumu, validácie a merania nových jadrových dát.

Literatúra

- [1] Dobeš J.: *Center of Accelerators and Nuclear Analytical Methods*. [Online]. 2021. dostupné na: <<http://canam.ujf.cas.cz/>>
- [2] *International Thermonuclear Experimental Reactor. ITER - The way to new energy*. [Online]. 2021. dostupné na: <<http://www.iter.org/>>
- [3] Kozic, J.: *Aktivačné a prahové reakcie v neutrónovom poli urýchľovačom riadeného generátora $p(20)+Be$* , Praha, 2019, Bakalárska práca, ČVUT, Vedúci práce Ing. Milan Štefánik, Ph.D.
- [4] Kozic, J.: *Štúdium produktov prahových reakcií rýchlych neutrónov indukovaných protónmi s energiou 20 MeV na hrubom berýliovom terči*, Praha, 2020, Výskumná úloha, ČVUT, Vedúci práce Ing. Milan Štefánik, Ph.D.
- [5] Griffin P. J., Kelly J. G.: *User's Manual for SNL-SAND-II Code*, Sandia National Laboratories, 1994
- [6] Berg S., McElroy W.N.: *A computer-automated iterative method for neutron flux spectra determination by foil activation. Volume I A Study of the Iterative Method*, atomics international, a division of North American Aviation Inc, Air Force Weapons Laboratory, 1967
- [7] M. Winter. (2015, February) WebElements. [Online]. dostupné na: <<http://www.webelements.com/>>
- [8] Štefánik M. et al.: *Neutron field study of $p(35)+Be$ source reaction at the NPI Rez*, Radiation Physics and Chemistry 155 (2019), p. 294-298
- [9] Cierjacks S.: *Neutron Sources for Basic Physics and Applications*, Pergamon Press Ltd., Oxford, 1983, ISBN 978-0080293516
- [10] *National Nuclear Data Center Q-value Calculator (Qcalc)*. [Online]. 2021. dostupné na: <<https://www.nndc.bnl.gov/qcalc/>>

- [11] Lone, M. A. et al.: *Thick target neutron yields and spectral distributions from ${}^7\text{Li}(d,n)$, ${}^7\text{Li}(p,n)$ and ${}^9\text{Be}(d,n)$, ${}^9\text{Be}(p,n)$ reactions*, Nuclear Instruments and Methods 143 (1977), p. 331-344
- [12] National Nuclear Data Center. *Experimental Nuclear Reaction Data - EXFOR*. [Online]. 2021. dostupné na: <<https://www-nds.iaea.org/exfor/>>
- [13] L'Annunziata M. F.: *Radioactivity*, Elsevier Science B.V., Amsterdam, 2007, ISBN 978-0-444-52715-8, p. 35-36
- [14] *Nuclear Technology Review*, IAEA, Austria, 2020, p. 46-49, dostupné na: <<https://www.iaea.org/sites/default/files/gc/gc64-inf2.pdf>>
- [15] *Kyoto University*. [Online]. 2021. dostupné na: <<https://www.kyoto-u.ac.jp/en>>
- [16] *Kansai BNCT Medical Center*. [Online]. 2021. dostupné na: <<https://www.omp.ac.jp/en/kbmc.html>>
- [17] *National Cancer Center Hospital*. [Online]. 2021. dostupné na: <<https://www.ncc.go.jp/en/ncch/index.html>>
- [18] *Nagoya University*. [Online]. 2021. dostupné na: <<https://en.nagoya-u.ac.jp/>>
- [19] *Helsinki University Hospital*. [Online]. 2021. dostupné na: <<https://www.hus.fi/en>>
- [20] *Ústav jadrovej fyziky G. I. Budker SB RAS*. [Online]. 2021. dostupné na: <<https://www.inp.nsk.su/budker-institute-of-nuclear-physics>>
- [21] *National Institute for Nuclear Physics*. [Online]. 2021. dostupné na: <<https://home.infn.it/en/>>
- [22] Kong M. et al.: *Different Expressions of HIF-1 α , Bcl-2 and Bax in DU145 Prostate Cancer Cells Transplanted in Nude Mouse between X-Ray and Neutron Irradiation*, The Journal of the Korean Society for Therapeutic Radiology and Oncology, 2009, p. 218-219, 224-225
- [23] Li M. and Zinkle S. J.: *Radiation Effects in Copper and Copper Alloys for Fusion Applications*, Elsevier, 2020, p. 93, 97, 110
- [24] *Physikalisch-Technische Bundesanstalt*. [Online]. 2021. dostupné na: <<https://www.ptb.de/cms/en.html>>

- [25] Adam J. et al.: *Program Package and Supplements to Activation Analysis for Calculation of Nuclear Reaction Cross-Sections. JINR P10-2000-28*, Dubna, 2000
- [26] *XCOM: Photon Cross Sections Database*. [Online]. 2021. dostupné na: <https://physics.nist.gov/PhysRefData/Xcom/html/xcom1.html>
- [27] L'Annunziata, M. F.: *Handbook of Radioactivity Analysis*, Academic Press, Great Britain, 2012, ISBN 978-0-12-384873-4
- [28] Khandaker, M. U.: *High purity germanium detector in gamma-ray spectrometry*, International Journal of Fundamental Physical Science, Malaysia, 2011
- [29] McAlister, D. R.: *Gamma Ray Attenuation Properties of Common Shielding Materials*, PG Research Foundation, USA, 2018
- [30] Ordóñez J. et al.: *Intercomparison of full energy peak efficiency curves for an HPGe detector using MCNP6 and GEANT4*, Radiation Physics and Chemistry, 2019, p. 248-251
- [31] Diango M. et al.: *Determination of the HPGe detector efficiency in measurements of radioactivity in extended environmental samples*, Applied Radiation and Isotopes, 2017, p. 34-42
- [32] Manduci L. et al.: *Determination of ^{210}Pb concentration in NORM waste – An application of the transmission method for self-attenuation corrections for gamma-ray spectrometry*, Radiation Physics and Chemistry (2018), p. 1-4
- [33] Ortiz-Ramírez P. C. et al.: *Development of an absolute method for efficiency calibration of a coaxial HPGe detector for large volume sources*, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A (2015), p 49-56
- [34] Knoll G. F.: *Radiation Detection and Measurement*, John Wiley & Sons, Inc., USA, 1999, ISBN 0-471-07338-5
- [35] *ÚSTAV JADERNÉ FYZIKY AV ČR*. [Online]. 2021. dostupné na: <http://www.ujf.cas.cz/cs/>
- [36] *ADVANCED CYCLOTRON SYSTEMS INC.*. [Online]. 2021. dostupné na: <https://www.advancedcyclotron.com/>
- [37] *Goodfellow Cambridge Ltd*. [Online]. 2021. dostupné na: <http://www.goodfellow.com>

- [38] ENDF/B-VII.1: *Nuclear Data for Science and Technology: Cross Sections, Covariances, Fission Product Yields and Decay Data*, Nucl. Data Sheets 112 2887, 2011
- [39] *MIRION TECHNOLOGIES*. [Online]. 2021. dostupné na: <https://www.mirion.com/products/germanium-detectors>
- [40] *The Lund/LBNL Nuclear Data Search*. [Online]. 2021. dostupné na: <http://nucleardata.nuclear.lu.se/toi/>
- [41] Liu B. et al.: *Study on iterative regularization method and application to neutron spectrum unfolding of multi-sphere spectrometer measurement*, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 2021, p. 1-3
- [42] UHLIG Ronald P. *An Iterative Unfolding Procedure*, Journal of Research of the National Bureau of Standards - A. Physics and Chemistry, 1964, (68A)
- [43] Reginatto M. et al.: *Overview of spectral unfolding techniques and uncertainty estimation*, Radiation Measurements 45, 2010, p. 1324-1326
- [44] Suman V. et al.: *Neutron spectrum unfolding using genetic algorithm in a Monte Carlo simulation*, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 2014, p. 76-78
- [45] Weise K. et al.: *A priori distributions from the principle of maximum entropy for the Monte Carlo unfolding of particle energy spectra*, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 1989, p. 103-112
- [46] YongHao Ch. et al.: *Unfolding the fast neutron spectra of a BC501A liquid scintillation detector using GRAVEL method*, Physics, Mechanics & Astronomy, 2014, p. 1885-1888
- [47] Perey, F.G: *Least-squares dosimetry unfolding: the program STAY'SL*, Oak Ridge National Laboratory, 1977
- [48] Greenwood L. R., Johnson C. D.: *Least-Squares Neutron Spectral Adjustment with STAYSL PNNL*, EPJ Web of Conferences, 2016, p. 6
- [49] Werner Ch. J.: *MCNP USER'S MANUAL*, Los Alamos National Laboratory, 2017

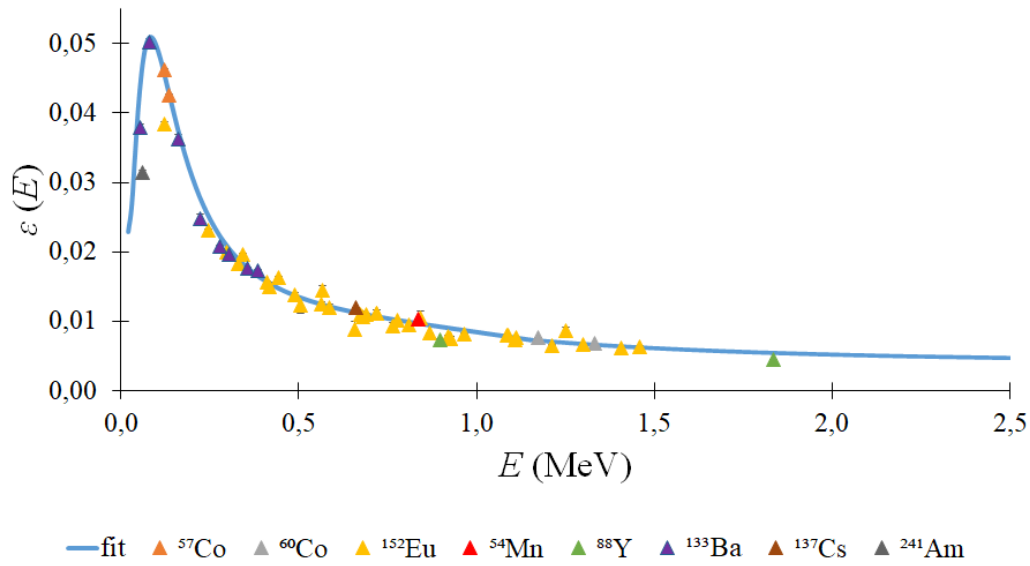
- [50] Shultis J. K., Faw R. E.: *AN MCNP PRIMER*, Dept. of Mechanical and Nuclear Engineering Kansas State University, 2011
- [51] Brainerd W.: *Fortran 77*, Association for Computing Machinery, 1978, p. 806–820
- [52] MATLAB:2018: *version 9.7.0.1190202 (R2019b)*, The MathWorks Inc., 2018
- [53] Pelowitz D.B., Ed.: *MCNPX Users Manual Version 2.7.0*, LA-CP-11-00438, 2011
- [54] Sublet J.-Ch., Packer L. W., Kopecky J., Forrest R. A., Koning A. J., Rochman D. A.: *The European Activation File: EAF-2010 neutron-induced cross section library*, EURATOM/CCFE Fusion Association, 2010
- [55] Brede H. J. et al.: *Neutron Yields from Thick Be Targets Bombarded with Deuterons or Protons*, Nuclear Instruments and Methods A, Vol. 274, 1989
- [56] Ibarra, A. et al.: *The IFMIF-DONES project: preliminary engineering design*, Nuclear Fusion 58 (2018), 105002
- [57] Waterman, F.M. et al.: *Neutron spectra from 35 and 46 MeV protons, 16 and 28 MeV deuterons, and 44 MeV ^3He ions on thick beryllium*, Medical Physics 6 (1979), p. 432-435

Príloha A

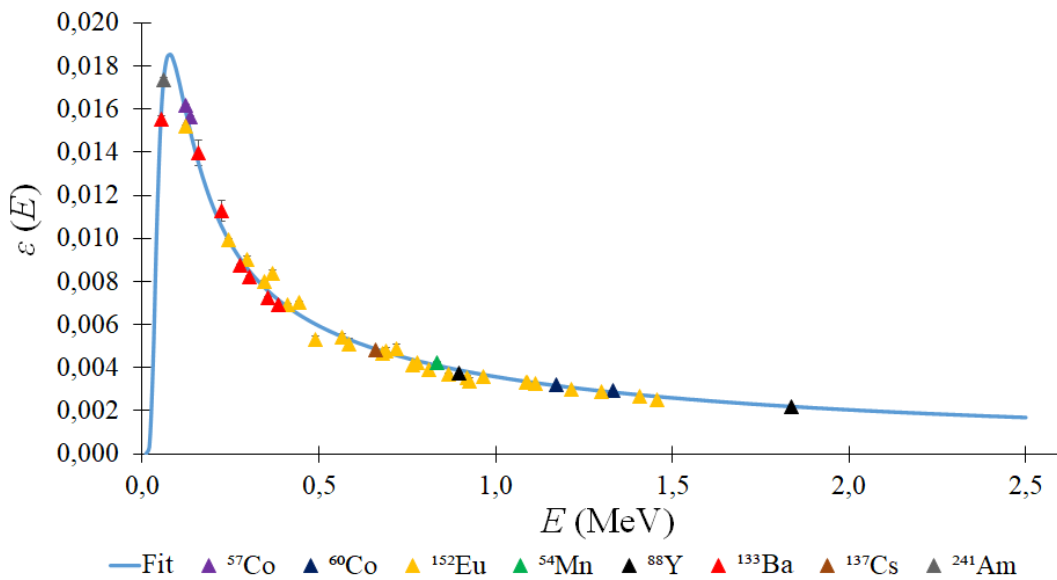
Stanovené kalibračné krivky HPGe detektora Canberra

Tab. A.1: Parametre použitých kalibračných etalónov.

Etalón	Výrobné číslo	Referenčná aktivita (kBq)	Dátum merania referenčnej aktivity	Polčas rozpadu
^{152}Eu	160719-1529047	185,3	22.08.2019	13,5 r
^{57}Co	160719-1749026	54,8	22.08.2019	271,8 d
^{54}Mn	160719-1630028	453,9	22.08.2019	312,3 d
^{88}Y	160719-1756013	667,3	22.08.2019	106,7 d
^{60}Co	250511-1311001	706,4	28.6.2001	5,3 r
^{133}Ba	250511-1295001	246,0	28.6.2011	10,5 r
^{137}Cs	15012002-591003	401,7	24.3.2003	30,1 r
^{241}Am	856-01	85,2	28.6.2011	432,2 r



Obr. A.1: Absolútna píkova detekčná účinnosť HPGe detektora Canberra pre vzdialenosť zdroj-detektor 5 cm.



Obr. A.2: Absolútna píkova detekčná účinnosť HPGe detektora Canberra pre vzdialenosť zdroj-detektor 10 cm.

Príloha B

Detegované aktivačné a prahové reakcie

Tab. B.1: Detegované aktivačné a prahové reakcie v aktivačných detektoroch z Al, Au a Co spolu s ich prahovou energiou [10]. [3]

Reakcia	E_{thr} (MeV)
$^{27}\text{Al}(\text{n},\alpha)^{24}\text{Na}$	1,896
$^{197}\text{Au}(\text{n},\gamma)^{198}\text{Au}$	0,000
$^{197}\text{Au}(\text{n},2\text{n})^{196}\text{Au}$	8,114
$^{197}\text{Au}(\text{n},2\text{n})^{196\text{m}}\text{Au}$	8,114
$^{59}\text{Co}(\text{n},\gamma)^{60}\text{Co}$	0,000
$^{59}\text{Co}(\text{n},\alpha)^{56}\text{Mn}$	0,000
$^{59}\text{Co}(\text{n},\text{p})^{59}\text{Fe}$	0,796
$^{59}\text{Co}(\text{n},2\text{n})^{58}\text{Co}$	10,633

Tab. B.2: Detegované aktivačné a prahové reakcie v aktivačných detektoroch z Fe, In a Ti spolu s ich prahovou energiou [10]. [4]

Reakcia	E_{thr} (MeV)
$^{56}\text{Fe}(\text{n},\text{p})^{56}\text{Mn}$	2,966
$^{115}\text{In}(\text{n},\gamma)^{116\text{m}}\text{In}$	0,000
$^{115}\text{In}(\text{n},\text{n}')^{115\text{m}}\text{In}$	0,339
$^{115}\text{In}(\text{n},2\text{n})^{114\text{m}}\text{In}$	9,117
$^{46}\text{Ti}(\text{n},\text{p})^{46}\text{Sc}$	1,619
$^{47}\text{Ti}(\text{n},\text{p})^{47}\text{Sc}$	0,000
$^{48}\text{Ti}(\text{n},\text{p})^{48}\text{Sc}$	3,274

Príloha C

Reakčné rýchlosti

Tab. C.1: Stanovené reakčné rýchlosti detegovaných aktivačných a prahových reakcií v aktivačných detektoroch z Al, Au a Co. [3]

Reakcia	R_R (s^{-1})	Relatívna odchýlka (%)
$^{27}\text{Al}(n,\alpha)^{24}\text{Na}$	1,60E-17	0,62
$^{197}\text{Au}(n,\gamma)^{198}\text{Au}$	3,97E-16	0,11
$^{197}\text{Au}(n,2n)^{196}\text{Au}$	2,89E-16	0,19
$^{197}\text{Au}(n,2n)^{196m}\text{Au}$	1,39E-17	0,72
$^{59}\text{Co}(n,\gamma)^{60}\text{Co}$	7,04E-17	1,23
$^{59}\text{Co}(n,\alpha)^{56}\text{Mn}$	4,18E-18	1,45
$^{59}\text{Co}(n,p)^{59}\text{Fe}$	1,02E-17	0,83
$^{59}\text{Co}(n,2n)^{58}\text{Co}$	7,40E-17	0,24

Tab. C.2: Stanovené reakčné rýchlosti detegovaných aktivačných a prahových reakcií v aktivačných detektoroch z Fe, In a Ti. [4]

Reakcia	R_R (s^{-1})	Relatívna odchýlka (%)
$^{\text{nat}}\text{Fe}(n,x)^{56}\text{Mn}$	1,51E-17	1,02
$^{\text{nat}}\text{In}(n,x)^{115m}\text{In}$	1,65E-16	0,41
$^{\text{nat}}\text{In}(n,x)^{116m}\text{In}$	1,23E-16	0,62
$^{\text{nat}}\text{In}(n,x)^{114m}\text{In}$	1,54E-16	0,74
$^{\text{nat}}\text{Ti}(n,x)^{46}\text{Sc}$	6,12E-18	1,12
$^{\text{nat}}\text{Ti}(n,x)^{47}\text{Sc}$	4,88E-18	0,33
$^{\text{nat}}\text{Ti}(n,x)^{48}\text{Sc}$	6,42E-18	0,36

Príloha D

Polčasy rozpadu

Tab. D.1: Porovnanie stanovených a tabelárnych polčasov rozpadu produktov jadrových reakcií v aktivačných detektoroch z Al, Au a Co. [3]

Izotop	$T_{1/2}$	$T_{1/2, \text{tabelárny}}$	Relatívna odchýlka (%)
^{24}Na	$(15,1 \pm 0,2) \text{ h}$	$(14,959 \pm 0,001) \text{ h}$	0,92
^{198}Au	$(65,13 \pm 0,07) \text{ h}$	$(64,684 \pm 0,005) \text{ h}$	0,68
^{196}Au	$(158 \pm 6) \text{ h}$	$(148,4 \pm 0,2) \text{ h}$	5,96
^{59}Fe	$(48 \pm 1) \text{ d}$	$(44,503 \pm 0,006) \text{ d}$	8,20
^{58}Co	$(73 \pm 2) \text{ d}$	$(70,86 \pm 0,07) \text{ d}$	2,83

Tab. D.2: Porovnanie stanovených a tabelárnych polčasov rozpadu produktov jadrových reakcií v aktivačných detektoroch z Fe, In a Ti. [4]

Izotop	$T_{1/2}$	$T_{1/2, \text{tabelárny}}$	Relatívna odchýlka (%)
$^{115\text{m}}\text{In}$	$(4,6 \pm 0,8) \text{ h}$	$(4,486 \pm 0,004) \text{ h}$	2,150
$^{114\text{m}}\text{In}$	$(50 \pm 10) \text{ d}$	$(49,51 \pm 0,01) \text{ d}$	0,980
^{47}Sc	$(3,40 \pm 0,05) \text{ d}$	$(3,3492 \pm 0,0006) \text{ d}$	1,405
^{48}Sc	$(1,816 \pm 0,009) \text{ d}$	$(1,820 \pm 0,004) \text{ d}$	-0,221