

Měření pravděpodobnosti reakcí neutronů s materiály důležitými pro aktivační detektory neutronů

maturitní práce

fyzika

jméno:

odborní vedoucí práce:

školní vedoucí práce: školní rok: třída: Tomáš Herman RNDr. Vladimír Wagner, CSc. Mgr. Petr Chudoba Mgr. Zdeněk Votava 2013/2014 Oktáva A

Prohlášení o původnosti

Prohlašuji, že jsem svou práci vypracoval samostatně, použil jsem pouze podklady a citace uvedené v přiloženém seznamu literatury a postup při zpracování a dalším nakládání s prací je v souladu se zákonem č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) v platném znění.

V Brně dne: podpis:....

Poděkování

Zde bych chtěl poděkovat panu RNDr. Vladimíru Wagnerovi, CSc za poskytnutí vhodného zázemí, odborných podkladů a rad při zpracování mé maturitní práce a Mgr. Petru Chudobovi za pomoc při zpracování praktické části mé práce. Rovněž bych chtěl poděkovat panu profesorovi Mgr. Zdeňku Votavovi za pomoc a rady ohledně formální stránky práce.

Anotace

V rámci práce byla provedena měření spekter gama u vzorků yttria, které byly ozářeny svazkem neutronů. Analýzou těchto spekter gama a analýzou dat z ozařování vzorků svazkem neutronů jsem určil účinné průřezy pro izotopy yttria 88, 87 a 87m a neutronů o energii 27,5 keV. Tyto výsledky jsem poté porovnal s modelem TALYS určeným pro modelování účinných průřezů jaderných reakcí.

Obsah

1	Úvo	od	3
2	Teo	retická část	4
	2.1	Aktivační detektory neutronů	4
	2.2	Využití aktivačních detektorů neutronů	4
	2.3	Účinný průřez	5
	2.4	Vzorky	5
	2.5	Ozařování vzorků	6
	2.6	Detektor	8
	2.7	Vyhodnocení gama spekter	8
	2.8	Výpočet výtěžku reakce a počtu vzniklých radioaktivních jader	9
	2.8.	1 Korekce na rozpad před měřením a během měření	9
	2.8.2	2 Korekce na rozpad během ozařovaní 1	0
	2.8.3	3 Korekce na mrtvou dobu 1	. 1
	2.	.8.3.1 Nekumulativní mrtvá doba 1	. 1
	2.	.8.3.2 Kumulativní mrtvá doba 1	. 1
	2.8.4	4 Hmotnostní normalizace 1	.2
	2.8.	5 Korekce na pravděpodobnost rozpadu v dané γ-lince 1	2
	2.8.0	6 Korekce na účinnost detektoru 1	3
	2.8.	7 Úplný vzorec pro určení výtěžku reakce 1	3
	2.9	Výpočet výtěžku reakce pro izotop ⁸⁷ Y1	.4
	2.9.	1 Korekce na rozpad před měřením a během měření 1	.4
	2.9.2	2 Korekce na rozpad během ozařování 1	5
	2.9.3	3 Konečný vzorec pro určení výtěžku reakce 1	5
	2.10	Vážený průměr 1	.6

	2.11	Ar	alýza ozařování	. 16		
	2.1	1.1	Určení počtu protonů	. 16		
	2.1	1.2	Určení počtu neutronů	.17		
	2.12	Oc	lečtení pozadí	. 19		
	2.13	Ur	čení účinného průřezu	. 20		
3	Exp	berir	nentální výsledky	. 22		
	3.1	Ur	čení výtěžku aktivační analýzy	. 22		
	3.1.	.1	Výsledky pro vzorek YN	. 22		
	3.1.	.2	Výsledky pro vzorek YO	. 23		
	3.2	Vl	iv FTD a FFD orientace na měření	. 25		
	3.2.	.1	Vliv FTD a FFD orientace pro vzorek YN	. 25		
	3.2.	.2	Vliv FTD a FFD orientace pro vzorek YO	. 27		
	3.3	En	ergetické spektrum svazku neutronů	. 28		
	3.3.	.1	Spektrum svazku při ozařování vzorku YN	. 28		
	3.3.	.2	Spektrum svazku při ozařování vzorku YO	. 28		
	3.4	Oc	lečtení pozadí	. 29		
	3.4.	.1	Odečtení pozadí pro vzorek YN	. 29		
	3.4.	.2	Odečtení pozadí pro vzorek YO	. 31		
	3.5	Ur	čení účinných průřezů	. 33		
	3.5.	.1	Určení účinných průřezů pro vzorek YN	. 33		
	3.5.	.2	Určení účinných průřezů pro vzorek YO	. 35		
4	Záv	věr		. 38		
5	Sez	nam	ı grafů	. 39		
6	Sez	nam	obrázků	. 41		
7	Sez	Seznam použité literatury				

1 Úvod

S rozvojem lidské společnosti nezadržitelně rostou i nároky na energetickou spotřebu. Jedním z nejdůležitějších zdrojů elektrické energie jsou v současnosti jaderné elektrárny. V současné době se v těchto elektrárnách převážně využívají reaktory II. generace. Stále více se však začínají uplatňovat i reaktory III. generace.

Avšak s technologickým pokrokem dochází k vývoji vyspělejších systémů. Kromě zvyšování účinnosti a bezpečnosti štěpných procesů dochází i k výzkumu technologií schopných využívat další těžká jádra jako zdroje energie, například thoria. Pomocí transmutorů řízených urychlovači budeme schopni přeměňovat jádra prvků, které nelze štěpit v jaderných elektrárnách na jádra prvků, u kterých štěpení provést lze. Toho můžeme využít i při nakládání s jaderným odpadem, který přeměníme na jiné prvky tak, abychom je byli buď schopni dále energeticky využít, nebo nebyly dlouhodobě nebezpečné.

Ale při všech těchto reakcích potřebujeme velmi přesně znát toky neutronů, které se v zařízeních vyskytují. Jednak kvůli únavě materiálu vystavenému intenzivním tokům neutronů, dále kvůli bezpečnosti zaměstnanců a u transmutorů především proto, že při přeměně jader hrají klíčovou roli právě neutrony a bez znalosti charakteristik daného neutronového toku by nebylo možné námi požadovanou transmutaci uskutečnit.

A právě k měření neutronových toků slouží aktivační detektory neutronů. Abychom byli schopni aktivační detektory využívat, musíme nejdříve znát pravděpodobnosti reakcí neutronů s materiály vhodnými pro jejich výrobu. Experimentální určování těchto pravděpodobností se stalo hlavním cílem mé práce.

2 Teoretická část

2.1 Aktivační detektory neutronů

Aktivační detektory neutronů jsou vzorky velmi čistého prvku, ideálně jednoho izotopu. Když ozáříme vzorek neutrony, dojde ke vzniku radioaktivních izotopů daného prvku. Tyto radioaktivní izotopy se rozpadají a při rozpadu vyzařují fotony záření gama o specifické energii. Díky tomu lze určit, o jaký izotop se jednalo a jak se rozpadl. Měření provádíme na spektrometru gama. Pokud známe pravděpodobnosti reakcí neutronů s materiálem vzorku, neboli účinné průřezy, jsme schopni vyhodnocením spekter gama určit tok neutronů vzorkem. Počet vzniklých radioaktivních jader totiž závisí na těchto pravděpodobnostech a hmotnosti vzorku.

Pokud naopak známe přesně tok neutronů v určitém místě a necháme v tomto místě ozářit neznámý vzorek, jsme schopni pomoci analýzy spekter gama určit přesné prvkové a i izotopové složení daného vzorku. To se využívá při řadě aplikací v archeologii, ekologii i kriminologii. Této velmi citlivé metodě se říká neutronová aktivační analýza.

2.2 Využití aktivačních detektorů neutronů

Detektory záření gama mají široké využití. Například v archeologii lze s jejich pomocí určit, při využití popsané aktivační analýzy, z extrémně malého vzorku přesné složení nálezu, aniž bychom museli předmět zásadně poškodit. Nebo kdekoliv, kde potřebujeme přesně určit složení libovolného neznámého kusu látky.

Další velmi důležitým využitím je měřením neutronových toků. V zařízeních, kde je vysoké množství neutronů, měříme, jaké oblasti jsou nejvíce namáhaný jejich tokem. Jedná se například o jaderné elektrárny, kde monitorujeme zatížení reaktoru

v jednotlivých místech. Nebo v nově vyvíjených systémech transmutorů řízených urychlovačem, kde potřebujeme velmi přesně znát tok neutronů uvnitř zařízení i v reaktorové hale a jejím okolí. Tyto systémy budou schopny transmutovat jádra určitého izotopu prvku (thoria 323 a uranu 238) na taková jádra, u kterých lze provést energeticky výhodnou štěpnou reakci pomocí nízkoenergetického neutronu. Tímto učiní palivo pro štěpné reaktory z nuklidů, které jsme dříve nebyli schopni takto využít. Dále s jejich pomocí budeme schopni transmutovat odpad z štěpných cyklů a případně jej dále štěpit (v případě transuranů).

2.3 Účinný průřez

Abychom mohli aktivační detektory neutronů využívat, musíme nejdříve znát pravděpodobnosti reakcí materiálů vhodných pro aktivační detektory s neutrony. Tyto pravděpodobnosti jsou popsány pomocí fyzikální veličiny nazývané účinný průřez a měříme ji tak, že vezmeme vzorek látky, u něhož známe přesné složení a ozáříme ho tokem neutronů, jehož vlastnosti (energii neutronů a intenzitu) velmi dobře známe. Když potom změříme spektra gama, tak zjistíme množství radioaktivních jader vzniklých v reakci a díky tomu jsme schopni spočítat účinný průřez reakce neutronu s danou látkou.

2.4 Vzorky

Měření jsme prováděli na dvou typech vzorků. První vzorek YN, což je yttriová folie o rozměrech 25 x 25 x 0,64 mm³ a hmotnosti přibližně 1,8 g. Druhý vzorek YO, což je

vylisovaná pilulka z práškového yttria o průměru 9 mm, výšce 1,5 mm a hmotnosti přibližně 0,6g.



Obrázek 1 Fotografie vzorků YN a YO

2.5 Ozařování vzorků

Vzorky byly ozařovány kvazi-monoenergetickým zdrojem neutronů na ÚJF AV ČR v Řeži, který využívá srážky protonů s ⁷Li. Protony jsou urychlovány na cyklotronu U120-M a výsledný svazek neutronů vzniklých reakcí protonů s lithiem může mít energii mezi 20 MeV až 37 MeV.



Obrázek 2 Cyklotronu U120-M v ÚJF AV ČR v Řeži



Obrázek 3 Neutronový zdroj v ÚJF AV ČR v Řeži

2.6 Detektor

Vzorky byly měřeny na spektrometru Canbera GC3018 v ÚJF AV ČR v Řeži. Který využívá polovodičový detektor z velmi čistého germania. Relativní účinnost tohoto detektoru je 35%.



Obrázek 4 Fotografie detektoru Canbera v ÚJF AV ČR v Řeži

2.7 Vyhodnocení gama spekter

Naměřená spektra jsem vyhodnocoval pomocí programu Deimos32, který byl vytvořen na ÚJF AV ČR v Řeži. Po zadání vstupních dat experimentu a manuálním výběru píků program pomocí proložení spektra Gaussovou funkcí spočítá plochu daných píku, která odpovídá počtu naměřených gama rozpadů v dané energetické lince.

2.8 Výpočet výtěžku reakce a počtu vzniklých radioaktivních jader

Abychom spočítali, kolik jader radioaktivních izotopů yttria ve skutečnosti po ozáření neutrony vzniklo, musíme provést několik výpočtů a korekcí.



Graf 1 Exponenciální rozpad jader

Na grafu vidíme závislost počtu radioaktivních jader na čase. Měřením na spektrometru gama zjistíme část této křivky, tudíž počáteční stav musíme dopočítat.

2.8.1 Korekce na rozpad před měřením a během měření

K rozpadu ve vzorcích dochází i před tím než je umístíme do spektrometru gama, proto musíme tyto rozpady do vyhodnocení započítat.

$$\frac{e^{\cdot t_0}}{1 - e^{-\cdot t_{real}}}$$

 t_0 - čas od konce ozařování po začátek měření

t _{real} - doba měření vzorku

- rozpadová konstanta

$$=\frac{\ln 2}{T}$$

(2)

(1)

T - poločas rozpadu

2.8.2 Korekce na rozpad během ozařovaní

K rozpadu dochází i během samotného ozařování, takže musíme započítat i tyto rozpady.

$$\frac{\cdot t_{irr}}{1 - e^{- \cdot t_{irr}}}$$

(3)

 $t_{\rm irr}$ - doba ozařování vzorku

2.8.3 Korekce na mrtvou dobu

Každému detektoru po zachycení fotonu gama chvíli trvá, než sebere vzniklý náboj, zpracuje příslušný signál a může přijmout další. Doba, po kterou detektor zpracovává signál, se označuje jako *mrtvá doba*. Mrtvá doba je určena jednak detektorem a pak elektronikou, která signál z detektoru zpracovává. Z našeho detektoru signál cestuje vodičem do zesilovače a poté do AD převodníku a do PC.

2.8.3.1 Nekumulativní mrtvá doba

U detektorů s nekumulativní mrtvou se po dopadu částice spustí mrtvá doba. Pokud během této doby na detektor dopadne další částice, tak ji nezachytí. První další částici zaregistruje až potom co uběhne mrtvá doba, takže i když poroste aktivita vzorku, jsme schopni pozorovat její zvýšení jen do určitého počtu rozpadů za sekundu, potom se počet měřených rozpadů ustálí na konstantní hodnotě pro danou detektorovou soustavu.

2.8.3.2 Kumulativní mrtvá doba

U detektorů s kumulativní mrtvou dobou se také po dopadu částice spustí mrtvá doba. Když během ní na detektor dopadne další částice tak jí také nezachytí, ale navíc přičte k času, který ještě zbývá do konce zpracování signálu další mrtvou dobu. Takže s rostoucí aktivitou vzorku nejdřív budeme pozorovat i když stále pomalejší růst počtu signálů na detektoru, ale jenom do určitého počtu rozpadu za sekundu, potom začne počet registrovaných částic klesat a může klesnout až na nulu. Proto je vždy potřeba dávat při měření pozor, abychom detektor nezahltili příliš aktivním vzorkem v blízké vzdálenosti. Kdyby totiž došlo k nasycení detektoru, tak místo abychom s rostoucí četnosti rozpadů pozorovali více signálů, detektor by jich měřil pořád stejně nebo dokonce méně. I v případě, že celková mrtvá doba není příliš velká, je třeba provést korekci na dobu, kdy detektor nepracuje.

 $\frac{t_{real}}{t_{live}}$

tlive - čas kdy detektor opravdu zachytával signály

2.8.4 Hmotnostní normalizace

m_{foil} – hmotnost vzorku

Výsledek je potřeba upravit kvůli rozdílné hmotnosti jednotlivých vzorků.

$$\frac{1}{m_{foil}}$$

(5)

2.8.5 Korekce na pravděpodobnost rozpadu v dané γ-lince

Konkrétní radioizotop se rozpadá s určitou pravděpodobností několika způsoby. Abychom zjistili skutečné množství původního izotopu, musíme výsledek upravit podle pravděpodobnosti, se kterou je při rozpadu vyzářen foton gama s danou energií.

(4)

$\frac{1}{I_{\gamma}}$

I_γ - pravděpodobnost vyzáření fotonu gama s danou energií při rozpadu
hodnoty pro jednotlivé rozpady lze nalézt v internetových databankách (např.: http://nucleardata.nuclear.lu.se/; http://www.nndc.bnl.gov/)

2.8.6 Korekce na účinnost detektoru

Další nezbytnou korekcí je úprava vzhledem k účinnosti detektoru. Detektor zachytí s jinou pravděpodobností γ-fotony o různých energiích ze vzorků z různých vzdáleností od detektoru.

$$\frac{1}{\varepsilon_P}$$

(7)

Účinnost detektoru ε_p byla určena již v předchozích sériích měření, pomocí vzorků s dobře známou aktivitou.

2.8.7 Úplný vzorec pro určení výtěžku reakce

Výsledný vzorec, pomocí kterého určíme počet vzniklých radioaktivních jader, potom vypadá takto:

$$N_{yield} = \frac{S_P}{\varepsilon_P \cdot I_{\gamma} \cdot m_{foil}} \frac{t_{real}}{t_{live}} \frac{\cdot t_{irr}}{1 - e^{-t_{irr}}} \frac{e^{-t_0}}{1 - e^{-t_{real}}}$$

S_P – plocha pod Gaussovou křivkou daného píku

2.9 Výpočet výtěžku reakce pro izotop ⁸⁷Y

U izotopu ⁸⁷Y dochází při vyhodnocování ke komplikaci. Během ozařování vzniká jak ⁸⁷Y tak ^{87m}Y, což je excitovaný izomer základního stavu ⁸⁷Y. Tento izomer ale vyzářením fotonu gama přechází na základní stav ⁸⁷Y. Poločas rozpadu ^{87m}Y je výrazně kratší, než poločas rozpadu ⁸⁷Y. To ve výsledku znamená, že při určování výtěžku aktivační analýzy se zdá, že počet jader ⁸⁷Y ze začátku roste a teprve když se všechny jádra ^{87m}Y rozpadnou, tak začneme dostávat konstantní výsledky. Ty ale neodpovídají reálně tomu, kolik jader ⁸⁷Y vzniklo při ozařování a proto musíme při vyhodnocování počtu jader ⁸⁷Y odečíst počet jader ^{87m}Y.

2.9.1 Korekce na rozpad před měřením a během měření

Vztah pro určení počtu jader po ozařování vypadá následovně.

$$N_{g0} = \frac{S_P}{\varepsilon_P \cdot I_\gamma \cdot m_{foil}} \frac{t_{real}}{t_{live}} \frac{e^{\cdot t_0}}{1 - e^{-\cdot t_{real}}} + \frac{\mathbf{m} \cdot \mathbf{N}_{m0}}{\mathbf{g} - \mathbf{m}} \cdot (1 - e^{(\mathbf{g} - \mathbf{m}) \cdot t_0})$$

 $N_{\rm g0}-$ počet jader základního stavu po skončení ozařování

(8)

(9)

- N_{m0} počet jader izomerního stavu po skončení ozařování (lze určit pomocí dříve uvedených vztahů)
- λ_m rozpadová konstanta pro izomerní stav
- λ_g rozpadová konstanta pro základní stav

2.9.2 Korekce na rozpad během ozařování

Vzorec započítávající úpravu na rozpad během ozařování vypadá následovně.

$$C_{irr,g} = \frac{g \cdot t_{irr}}{1 - e^{-g \cdot t_{irr}}} - \frac{N_{yield,m}}{N_{g0} * (1 - e^{-g * t_{irr}})} * \left(1 - \frac{m * e^{-g * t_{irr}} - g * e^{-m * t_{irr}}}{m * g}\right)$$
(10)

 $N_{yield,m}$ – určený výtěžek reakce pro izomerní stav

2.9.3 Konečný vzorec pro určení výtěžku reakce

Výsledný vzorec pro určení $N_{yield,g}$ má tvar.

$$N_{yield,g} = N_{g0} * C_{irr,g}$$

(11)

2.10 Vážený průměr

Po vyhodnocení každého jednotlivého měření, je potřeba spočítat vážené průměry z určených hodnot pro jednotlivé energetické linky.

$$X = \frac{\sum_{i=1}^{n} w_i * x_i}{\sum_{i=1}^{n} w_i}$$

(12)

 x_i – hodnota pro konkrétní energetickou linku

wi – váha konkrétní energetické linky

$$w_i = \frac{1}{\Delta X_i^2}$$

(13)

 ΔX_i – absolutní chyba konkrétní energetické linky

Absolutní chyba váženého průměru se potom spočítá takto.

$$\Delta X = \sqrt{\frac{1}{\sum_{i=1}^{n} w_i}}$$

(14)

2.11 Analýza ozařování

2.11.1 Určení počtu protonů

Když jsme skončili analýzu gama rozpadů, přesuneme se k analýze neutronového svazku.

Během ozařování je v závislosti na čase měřen proud, který vzniká průchodem protonů. Z proudu měřeného průběžně po celou dobu ozařování určíme celkový náboj. Když teď tento náboj vydělíme nábojem jednoho protonu (elementárním nábojem), dostaneme počet protonů, které dopadly na lithiový terč.

$$Q = \sum_{i=1}^{n} I_i * t_i$$
(15)

Q – náboj

 $I_i - zm \check{e}\check{r} en \acute{y} \ proud$

 $t_i - doba \; ozařování$

$$N = \frac{Q}{e}$$

(16)

N – počet protonů

e – elementární náboj

2.11.2 Určení počtu neutronů

Nyní známe celkový počet protonů. Tyto protony mají všechny stejnou energii, ale při srážce s Lithiem dochází k produkci neutronů o různých energiích. Na základě pravděpodobnosti reakci protonů s lithiem dochází k více jaderným reakcím. Ve většině případů dochází k reakci, která produkuje neutrony o námi požadované energii, ale malé procento ostatních reakcí produkuje neutrony o nižších energiích. Zdroj neutronu je tak kvazimonoenergetický. Konkrétní spektrum neutronů závisí na konstrukci celého neutronového zdroje, a proto je pro každý neutronový zdroj charakteristické. Pro

neutronový zdroj v Řeži je spektrum neutronů dobře známo, takže s jeho znalostí lze spočítat kolik neutronů a o jakých energiích náš vzorek ozářilo.

$$N_n = N_p * \varepsilon_{rel} * \varepsilon_p \tag{17}$$

 $N_n-\,$ počet neutronů s danou energií, které dopadly na vzorek

N_p- celkový počet protonů

 $\epsilon_{rel} - pravděpodobnost vzniku neutronu s danou energií$

 ϵ_p – korekce na plochu vzorku

Takto neurčujeme počty neutronů s různými energiemi po jednom elektronvoltu, ale rozdělíme si energetické spektrum svazku na rozumně velké části (biny). Tak v reálném čase určíme energetické spektrum neutronů svazku.



Graf 2 Příklad energetického spektra svazku neutronů

2.12 Odečtení pozadí

Teď víme přesně, jaké neutrony náš vzorek ozářily. Ale naším úkolem je určit pravděpodobnost reakci yttria s neutrony o určité konkrétní energii. Neutrony s jinými energiemi mají jinou pravděpodobnost reakce s yttriem, a proto musíme všechny reakce s neutrony o jiných energiích od závěrečného výsledku odečíst.

K tomu využijeme buď program pro simulaci účinných průřezů, nebo data z předcházejících měření pro daný izotop. Do grafu si můžeme vykreslit křivku, která znázorňuje pravděpodobnost dané reakce s neutronem o určité energii.



Graf 3 Příklad modelovaného účinného průřezu

Tato křivka představuje model nebo odhad založený na předchozích měřeních. Naším cílem je ověřit její správnost pro energie, u kterých dosud nebylo provedeno praktické měření a případně ji tak poupravit aby odovídala realitě.

Když proložíme grafy popisujíci svazek neutronů a účinného průřezu vidíme, kde probíhají reakce, které nás zajímají a s jakou pravděpodobností tyto reakce probíhají.



Graf 4 Příklad proložení grafů účinného průřezu a spektra svazku neutronů

Když vynásobíme v každém binu počet neutronů a pravděpodobnost reakce s neutronem v dané energii, dostaneme počet reakcí, které mají na svědomí neutrony z jednotlivých binů. Nyní dáme do poměru počet reakcí způsobených neutrony v píku (energie, pro kterou určujeme účinný průřez) a celkovým počtem reakcí způsobených všemi neutrony. Tím dostaneme koeficient, kterým když vynásobíme N_{yield}, tak zjistíme celkový počet izotopů, které vznikly reakcemi s neutrony o píkové energii.

2.13 Určení účinného průřezu

Účinný průřez nyní jednoduše dopočítáme dosazením do vzorce.

$$\sigma = \frac{N_{yield-pik} * S * M}{N_n * N_A}$$

(18)

 $N_{\text{yield-pik}}-$ počet izotopů vzniklých reakcí s neutrony o píkové energii

- S plocha vzorku
- M molární hmotnost materiálu vzorku
- $N_A Avogadrova \ konstanta$
- N_n počet neutronů v píku

3 Experimentální výsledky

3.1 Určení výtěžku aktivační analýzy

3.1.1 Výsledky pro vzorek YN

V grafu vidíme závislost počtu radioaktivních jader určených aktivační analýzou v závislosti na čase. Můžeme si všimnout, že energetická linka 380,79 keV končí už velmi brzy a zároveň vidíme, že ve stejné době dochází k nárůstu počtu jader na energetických linkách 388,531 keV a 484,805 keV. To je způsobeno tím, že linka 380,79 keV patří izotopu ^{87m}Y, který má velmi krátký poločas rozpadu (proto jsme schopni tuto linku měřit jen v době krátce po ozařování). Tento izotop vyzářením fotonu gama přechází na svůj základní stav ⁸⁷Y, tím se vysvětluje nárůst počtu jader pro linky 388,531 keV a 484,805 keV, které patří právě tomuto izotopu.



Graf 5 Výsledky aktivační analýzy pro vzorek YN

Na tomto grafu vidíme porovnání poměrů výsledků jednotlivých měření vůči jejich váženému průměru. Z toho grafu je hezky vidět, že určené hodnoty se pohybují v málem rozptylu maximálně do 10%.



Graf 6 Porovnání výsledků jednotlivých měření vůči váženému průměru pro vzorek YN

3.1.2 Výsledky pro vzorek YO

V grafu vidíme závislost počtu radioaktivních jader určených aktivační analýzou v závislosti na čase stejně jako u předchozího vzorku. Opět si můžeme všimnout nárůstu počtu jader ⁸⁷Y způsobeného rozpadem izomerního izotopu ^{87m}Y.



Graf 7 Výsledky aktivační analýzy pro vzorek YO

Na tomto grafu opět vidíme porovnání poměrů výsledků jednotlivých měření vůči jejich váženému průměru. Zase je vidět, že určené hodnoty se většinou pohybují v rozptylu do 10%, jen jedna hodnota vyčnívá s chybou nad 15%.



Graf 8 Porovnání výsledků jednotlivých měření vůči váženému průměru pro vzorek YO

3.2 Vliv FTD a FFD orientace na měření

Jelikož během ozařování dopadá svazek neutronů na vzorky jen z jedné strany, rozhodli jsme se provést měření, kterým zjistíme závislost orientace vzorku při měření.

FTD - Face to detector, orientace ozařovanou stranou k detektoru

FFD - Face from detector, orientace ozařovanou stranou od detektoru

U každého měření je poznačeno, zda byl vzorek umístěn v FTD nebo FFD orientaci. Měření ve stejné vzdálenosti od detektoru byly pro oba dva vzorky prováděny vždy v obou orientacích.

Po vyhodnocení měření jsem porovnal počet vyprodukovaných izotopů, tak jak vyšel u jednotlivých orientací.

3.2.1 Vliv FTD a FFD orientace pro vzorek YN

Na těchto grafech můžeme vidět porovnání výtěžků aktivační analýzy jednotlivých měření a jejich vážených průměru pro linky 897,92 keV a 1836,081 keV u vzorku YO. Měření jsou rozdělena do dvou skupin podle orientace. Vidíme, že rozdíly mezi orientacemi jsou zanedbatelné.



Graf 9 Porovnání měření v FTD a FFD orientacích pro energetickou linku 897,92 keV u vzorku YN



Graf 10 Porovnání měření v FTD a FFD orientacích pro energetickou linku 1836,081 keV u vzorku YN

3.2.2 Vliv FTD a FFD orientace pro vzorek YO

Na těchto grafech můžeme vidět porovnání výtěžků aktivační analýzy jednotlivých měření a jejich vážených průměru pro linky 897,92 keV a 1836,081 keV u vzorku YN. Měření jsou opět rozdělena do dvou skupin podle orientace. Rozdíl mezi jednotlivými orientacemi je zde o něco větší, což je patrně způsobeno větší tloušťkou tohoto vzorku, ale pořád je tento rozdíl vůči celkovému počtu jader zanedbatelný.



Graf 11 Porovnání měření v FTD a FFD orientacích pro energetickou linku 897,92 keV u vzorku YO



Graf 12 Porovnání měření v FTD a FFD orientacích pro energetickou linku 1836,081 keV u vzorku YO

3.3 Energetické spektrum svazku neutronů

3.3.1 Spektrum svazku při ozařování vzorku YN

Na tomto grafu vidíme energetické spektrum svazku neutronů při ozařování vzorku YN.



Graf 13 Energetické spektrum neutronů při ozařování vzorku YN

3.3.2 Spektrum svazku při ozařování vzorku YO

Na tomto grafu vidíme energetické spektrum svazku neutronů při ozařování vzorku YO. Když ho porovnáme se spektrem svazku při ozařování vzorku YN, vidíme, že hlavní rozdíl je v celkovém počtu neutronů ve svazku, ale jinak jsou obě spektra skoro stejná.



Graf 14 Energetické spektrum neutronů při ozařování vzorku YO

3.4 Odečtení pozadí

3.4.1 Odečtení pozadí pro vzorek YN

Na těchto grafech vidíme průnik grafů modelů účinných průřezů jednotlivých izotopů a jim příslušných spekter svazků neutronů. Modely jsou získány pomocí programu TALYS a jejich hodnoty jsou určeny v jednotkách milibarn. Hodnoty v grafech znázorňujících energetická spektra neutronů reprezentují počet částic vynásobený vhodnou konstantou tak, aby bylo z grafů dobře patrné, kde leží kvazimonoenegetický pík svazku vůči účinnému průřezu daného radioizotopu.



Graf 15 Průnik grafů účinného průřezu pro⁸⁸Y u vzorku YN a grafu příslušného svazku neutronů



Graf 16 Průnik grafů účinného průřezu pro⁸⁷Y u vzorku YN a grafu příslušného svazku neutronů



Graf 17 Průnik grafů účinného průřezu pro ^{87m}Y u vzorku YN a grafu příslušného svazku neutronů

Z grafů je patrné, že největší pozadí vzniká u ⁸⁸Y, kde se nízkoenergetické pozadí svazku pohybuje právě v energiích, kdy dochází k (n,2n) reakci. U ostatních izotopů je vliv pozadí velmi malý.

3.4.2 Odečtení pozadí pro vzorek YO

Jelikož svazek ozařující vzorek YO se lišil hlavně v celkovém počtu neutronů. Tak při odečítání pozadí v tomto případě dojdeme k téměř stejným výsledkům jako v předchozím případě u vzorku YN, ale pro ilustraci přikládám i průniky grafů pro vzorek YO.



Graf 18 Průnik grafů účinného průřezu pro⁸⁸Y u vzorku YO a grafu příslušného svazku neutronů



Graf 19 Průnik grafů účinného průřezu pro⁸⁷Y u vzorku YO a grafu příslušného svazku neutronů



Graf 20 Průnik grafů účinného průřezu pro ^{87m}Y u vzorku YO a grafu příslušného svazku neutronů

3.5 Určení účinných průřezů

3.5.1 Určení účinných průřezů pro vzorek YN

V těchto grafech už vidíme finální porovnání experimentálně určených účinných průřezů u vzorku YN s modely programu TALYS. Vidíme, že jsme došli k dobré shodě s modelem, což potvrzuje jeho přesnost.



Graf 21 Porovnání modelu účinného průřezu s experimentálně určenou hodnotou pro ⁸⁸Y u vzorku YN



Graf 22 Porovnání modelu účinného průřezu s experimentálně určenou hodnotou pro ⁸⁷Y u vzorku YN



Graf 23 Porovnání modelu účinného průřezu s experimentálně určenou hodnotou pro^{87m}Y u vzorku YN

3.5.2 Určení účinných průřezů pro vzorek YO

V těchto grafech můžeme vidět finální porovnání experimentálně určených účinných průřezů u vzorku YO s modely programu TALYS. Vidíme, že i u tohoto vzorku je shoda s modelem dobrá i když je o něco málo menší než u vzorku YN. To je způsobeno tím, že lisovaná tableta yttria má horší vlastnosti, lisování není tak dokonalé, takže tableta má nižší hustotu než fólie. Jedná se tak o méně čisté yttrium než u vzorku YN.



Graf 24 Porovnání modelu účinného průřezu s experimentálně určenou hodnotou pro ⁸⁸Y u vzorku YO



Graf 25 Porovnání modelu účinného průřezu s experimentálně určenou hodnotou pro ⁸⁷Y u vzorku YO



Graf 26 Porovnání modelu účinného průřezu s experimentálně určenou hodnotou pro ^{87m}Y u vzorku YO

4 Závěr

Během své práce jsem se seznámil se základy statistické fyziky a jaderné spektrometrie.

V teoretické části práce popisuji využití aktivačních detektorů a aktivační analýzy neutronů. Následně se věnuji popisu účinných průřezů a vysvětluji jak určit účinné průřezy pro vybrané vzorky yttria. Popisuji experimentální zázemí práce a postupně procházím jednotlivé korekce a vysvětluji jejich význam. Dále se věnuji analýze ozařování a dalším korekcím s tímto spojeným. V závěru teoretické části pak uvádím vzorce pro výpočet účinných průřezů.

V části práce zabývající se experimentálními výsledky prezentuji výtěžky aktivační analýzy u měřených vzorků, energetická spektra svazků neutronů, kterými byly vzorky ozařovány a grafy znázorňující potřebu odečíst nízkoenergetické pozadí svazku neutronů od celkových výsledků. V závěru potom uvádím porovnání experimentálně zjištěných účinných průřezů s modely programu TALYS.

Podařilo se mi splnit hlavní cíl mé práce a to určit účinné průřezy pro materiál vhodný k výrobě aktivačních detektorů, konkrétně yttria. Nyní probíhá zpracování další série vzorků, které přinese další data přispívající ke zpřesnění modelů účinných průřezů yttria. Na tomto zpracování se také podílím.

5 Seznam grafů

Graf 1 Exponenciální rozpad jader9
Graf 2 Příklad energetického spektra svazku neutronů18
Graf 3 Příklad modelovaného účinného průřezu19
Graf 4 Příklad proložení grafů účinného průřezu a spektra svazku neutronů 20
Graf 5 Výsledky aktivační analýzy pro vzorek YN22
Graf 6 Porovnání výsledků jednotlivých měření vůči váženému průměru pro vzorek YN
Graf / vysledky aktivacni analyzy pro vzorek YO
Graf 8 Porovnání výsledků jednotlivých měření vůči váženému průměru pro vzorek YO
Graf 9 Porovnání měření v FTD a FFD orientacích pro energetickou linku 897,92 keV u
vzorku YN
Graf 10 Porovnání měření v FTD a FFD orientacích pro energetickou linku 1836,081
keV u vzorku YN
Graf 11 Porovnání měření v FTD a FFD orientacích pro energetickou linku 897,92 keV
u vzorku YO27
Graf 12 Porovnání měření v FTD a FFD orientacích pro energetickou linku 1836,081
keV u vzorku YO27
Graf 13 Energetické spektrum neutronů při ozařování vzorku YN 28
Graf 14 Energetické spektrum neutronů při ozařování vzorku YO 29
Graf 15 Průnik grafů účinného průřezu pro ⁸⁸ Y u vzorku YN a grafu příslušného svazku
neutronů
Graf 16 Průnik grafů účinného průřezu pro ⁸⁷ Y u vzorku YN a grafu příslušného svazku
neutronů
Graf 17 Průnik grafů účinného průřezu pro ^{87m} Y u vzorku YN a grafu příslušného
svazku neutronů
Graf 18 Průnik grafů účinného průřezu pro ⁸⁸ Y u vzorku YO a grafu příslušného svazku
neutronů
Graf 19 Průnik grafů účinného průřezu pro ⁸⁷ V u vzorku VO a grafu příslušného svazku
11 0 41 0114

Graf 20 Průnik grafů účinného průřezu pro ^{87m} Y u vzorku YO a grafu příslušného
svazku neutronů
Graf 21 Porovnání modelu účinného průřezu s experimentálně určenou hodnotou pro
⁸⁸ Y u vzorku YN
Graf 22 Porovnání modelu účinného průřezu s experimentálně určenou hodnotou pro
⁸⁷ Y u vzorku YN
Graf 23 Porovnání modelu účinného průřezu s experimentálně určenou hodnotou pro
^{87m} Y u vzorku YN
Graf 24 Porovnání modelu účinného průřezu s experimentálně určenou hodnotou pro
⁸⁸ Y u vzorku YO
Graf 25 Porovnání modelu účinného průřezu s experimentálně určenou hodnotou pro
⁸⁷ Y u vzorku YO
Graf 26 Porovnání modelu účinného průřezu s experimentálně určenou hodnotou pro
^{87m} Y u vzorku YO

6 Seznam obrázků

Obrázek 1 Fotografie vzorků YN a YO	6
Obrázek 2 Cyklotronu U120-M v ÚJF AV ČR v Řeži	7
Obrázek 3 Neutronový zdroj v ÚJF AV ČR v Řeži	7
Obrázek 4 Fotografie detektoru Canbera v ÚJF AV ČR v Řeži	8

7 Seznam použité literatury

 [1] CHUDOBA, Petr. Využití aktivačních detektorů při měření neutronového pole v modelových sestavách ADTS. Praha: MFF UK 2013. Diplomová práce, Ústav jaderné a částicové fyziky, dostupné z:

http://hp.ujf.cas.cz/~wagner/transmutace/diplomky/diplomka_Chudoba.pdf

Seznam příloh

- 1. yttrium_FFD_FTD_N
- 2. yttrium_FFD_FTD_O
- 3. yttrium_may_FINAL

Přílohy

Přílohy jsou soubory formátu Excel, které obsahují experimentální data z celé práce a jejich zpracování, ale z důvodu jejich rozsahu je nebylo možno vytisknout. Jsou však přístupny na CD přiloženém k práci.