

STŘEDOŠKOLSKÁ ODBORNÁ ČINNOST

NEUTRONOVÁ AKTIVAČNÍ ANALÝZA

Jana Menšíková

Frýdlant nad Ostravicí 2015

STŘEDOŠKOLSKÁ ODBORNÁ ČINNOST

NEUTRONOVÁ AKTIVAČNÍ ANALÝZA

Autor: **Jana Menšíková**
Škola: Gymnázium Frýdlant nad Ostravicí
náměstí T. G. Masaryka 1260
739 11 Frýdlant nad Ostravicí

Lektor: **doc. Dr. RNDr. Petr Alexa**
VŠB – Technická univerzita Ostrava
17. listopadu 15/2172
708 33 Ostrava-Poruba

Frýdlant nad Ostravicí 2015

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem svou práci vypracovala samostatně pod vedením doc. Dr. RNDr. Petra Alexy. Použila jsem pouze podklady uvedené v přiloženém seznamu 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.

Ve Frýdlantě nad Ostravicí dne 3. března 2016

Poděkování

Ráda bych poděkovala panu **doc. Dr. RNDr. Petru Alexovi** za jeho odborné vedení, trpělivost a množství kvalitních studijních materiálů, které mi poskytl, a panu **Mgr. Radimu Uhlářovi, PhD.** za pomoc při ozařování vzorků.

Dále děkuji svému profesoru fyziky, panu **Mgr. Lukáši Bjolkovi**, za to, že mě k této práci přivedl. Účast na tomto projektu pro mě byla velmi hodnotnou zkušeností.

Velký dík patří také **mé rodině** za pomoc, podporu a zajištění dopravy na univerzitu.

Anotace

Tato práce se zabývá neutronovou aktivační analýzou, metodou, která umožňuje zjistit prvkové složení vzorku a také množství zastoupení jednotlivých složek.

Zkoumaný vzorek ostřelujeme proudem rychlých neutronů, čímž dojde k aktivaci jader ve vzorku, tedy k jejich přeměně ze stabilních na nestabilní. Ta se dále rozpadají, což bývá doprovázeno emisí γ -záření s charakteristickými energiemi pro jednotlivé prvky.

Unikající fotony γ -záření detekujeme polovodičovým germaniovým spektrometrem a pomocí počítače můžeme zpracovat získané gama spektrum a určit prvkové složení vzorku.

V naší práci jsme nejdříve vytvořili soubor etalonů – aktivovali jsme známé vzorky a zjistili emitované energie γ -záření. Následně jsme ostřelovali vzorky neznámé a porovnáním jejich gama spektra se spektry etalonů jsme zjistili jejich složení.

Metodou neutronové aktivační analýzy lze určit velké množství prvků a podstatnou výhodou je také to, že není nutné zkoumaný vzorek zpracovávat chemicky, což snižuje možnost kontaminace vzorku jinými chemikáliemi.

Klíčová slova: atomové jádro, neutron, neutronový tok, γ -záření, radioaktivní rozpad, účinný průřez, poločas rozpadu

Obsah

Úvod	7
Základní pojmy	8
Atom, atomové jádro	8
Zdroje neutronů	8
Reakce s neutrony	9
Typy rozpadu	10
Gama záření	11
Důležité veličiny	11
Základní početní vztahy	12
Experiment	15
Výběr prvků vhodných k detekci	15
Neutronový generátor	15
Detektor gama záření	17
Výsledky experimentu – etalony	19
Neznámé vzorky	23
Závěr	25
Použitá literatura a zdroje	26

1. Úvod

Tato práce se zabývá neutronovou aktivační analýzou pomocí rychlých neutronů.

První část obsahuje základní teoretické informace; seznamujeme se zde s atomovým jádrem, neutrony, jadernými reakcemi a typy radioaktivních rozpadů. Také se zde nachází charakteristika gama záření a přehled důležitých fyzikálních veličin a početních vztahů.

Druhá část práce už je zaměřena na samotný experiment. Začínáme představením neutronového generátoru a detektoru gama záření, výsledky získané v měřeních jsou následně prezentovány v jednotlivých tabulkách. Vše je doplněno fotografiemi pořízenými přímo „v akci“.

Cílem této práce je proměřit několik různých vzorků a vytvořit soubor etalonů. Následně můžeme aktivovat neznámý vzorek a porovnáním jeho gama spektra se spektry etalonů určit jeho prvkové složení.

2. Základní pojmy

Před samotným popisem experimentu a jeho výsledků bude užitečné seznámit se alespoň stručně se základními pojmy, se kterými se budeme v práci setkávat.

Atom, atomové jádro

Atom je elektroneutrální objekt sestávající ze dvou částí: jádra a elektronového obalu. Jádro atomu je tvořeno **protony** (kladně nabitě částice) a **neutrony** (neutrální částice); protony a neutrony se souhrnně označují jako **nukleony**, zatímco v elektronovém obalu kolem jádra obíhají na určitých energetických hladinách **elektrony** (záporně nabitě částice).

Atomové jádro je charakterizováno dvojicí čísel: **protonové číslo** (Z) udává počet protonů v jádře atomu a **nukleonové** (také hmotnostní) **číslo** (A) určuje celkový počet nukleonů v jádru. Prakticky tuto skutečnost zapisujeme takto: A_ZX , kde za X můžeme dosadit značku příslušného prvku. Takto zapsanému atomovému jádru říkáme **nuklid**.

Aby byl atom elektroneutrální, musí být počet kladných protonů a záporných elektronů v atomu stejný. Atomy jednoho prvku se však mohou lišit počtem neutronů, tyto atomy se pak nazývají **izotopy**, např. ${}^{235}\text{U}$ a ${}^{238}\text{U}$.

Jádra některých izotopů jsou stabilní, zatímco jiná se samovolně rozpadají (nazýváme je **radioizotopy**). Pokud chceme, aby se začalo rozpadat jádro stabilní, musíme je aktivovat, což v našem případě znamená změnit jej ostřelováním rychlými neutrony na jádro radioaktivní.

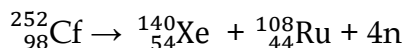
částice	náboj	umístění
proton	$+1,602 \times 10^{-19} \text{ C}$	jádro atomu
neutron	neutrální	jádro atomu
elektron	$-1,602 \times 10^{-19} \text{ C}$	elektronový obal

Zdroje neutronů

Existují tři základní zdroje, ze kterých můžeme neutrony získat:

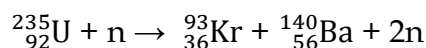
1. Izotopické zdroje

Zdroji neutronů mohou být např. některé těžké izotopy, které jsou nestabilní a samovolně se rozpadají. Při tomto rozpadu se uvolňují neutrony, které pak lze použít k aktivaci stabilních nuklidů. V praxi se nejčastěji používá kalifornium (${}^{252}\text{Cf}$).



2. Jaderné reaktory

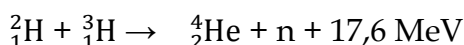
Dalším zdrojem neutronů jsou jaderné reaktory, ve kterých probíhá jaderné štěpení. Při štěpných reakcích zachytí jádro (např. ${}^{235}\text{U}$) neutron, rozpadá se na jiné prvky a při tom se uvolní další 2-3 neutrony, které pak dále inicializují štěpení.



V jaderných reaktorech v elektrárnách jsou tyto neutrony zpomalovány moderátorem a jejich počet je korigován pomocí regulačních tyčí obsahujících nuklidy, které mohou přebytečné neutrony pohlcovat. Tím lze usměrňovat rychlost probíhajícího štěpení. V jaderných zbraních probíhá štěpení nekontrolovaně.

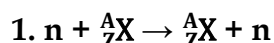
3. Urychlovače

Třetím zdrojem neutronů jsou urychlovače. V těchto přístrojích dochází k urychlení nabitých částic pomocí elektrického pole a jejich následnému nasměrování ke srážce, při které vznikají jiné částice (např. neutrony, které potřebujeme k aktivací analýze). Mezi urychlovače počítáme i „malé“ neutronové generátory, které využíváme v naší práci. Zde urychlujeme ionty deuteria, kterými bombardujeme terčik obsahující tritium. Dojde ke srážce a reakci, při které vznikají mimo jiné právě neutrony.

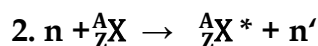


Reakce s neutrony

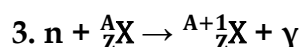
Při reakci atomového jádra s rychlým neutronem může nastat několik situací:



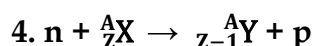
Neutron se pružně rozptýlí na atomovém jádře, nevzniká nový izotop ani atomové jádro není excitováno. Nedojde tedy k aktivaci. Pro naše účely je tento případ nezajímavý.



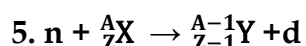
Neutron se nepružně rozptýlí na atomovém jádře, nevzniká nový izotop, ale atomové jádro je excitováno a rozpadá se do základního stavu, obvykle γ rozpadem. Poločas γ rozpadu je obvykle velmi krátký, proto se pro naše účely tento případ nehodí.



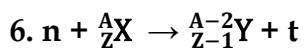
Atomové jádro zachytí neutron a emituje γ záření. Dojde ke vzniku nového izotopu stejného prvku (nukleonové číslo se o 1 zvětší).



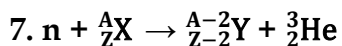
Atomové jádro zachytí neutron a uvolní proton. Nukleonové číslo zůstane stejné, ale protonové číslo o 1 klesne; vznikne tedy nový prvek.



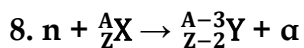
Atomové jádro zachytí neutron a uvolní deuteron (vodíkové jádro s jedním protonem a jedním neutronem). Nově vzniklý prvek bude mít o 1 nižší protonové i nukleonové číslo.



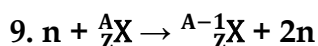
Atomové jádro zachytí neutron a uvolní triton (vodíkové jádro s jedním protonem a dvěma neutrony). Výsledný produkt reakce má o 1 menší protonové číslo a o 2 menší nukleonové číslo.



Atomové jádro zachytí neutron a vyzáří jádro hélia skládající se ze dvou protonů a jednoho neutronu. Protonové i nukleonové číslo výsledného produktu poklesne o 2.



Atomové jádro zachytí neutron a uvolní částici α (héliové jádro se 2 protony a 2 neutrony). Protonové číslo tedy bude o 2 menší, číslo nukleonové se zmenší o 3.



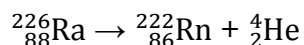
Atomové jádro zachytí neutron a uvolní dva neutrony, čímž dojde ke vzniku nového izotopu, jehož nukleonové číslo bude o 1 menší než A původního nuklidu.

Typy rozpadu

Když stabilní jádro aktivujeme, stane se nestabilním a začne se nějakým způsobem rozpadat, dokud nedosáhne stabilního izotopu. Na následujících řádcích se alespoň stručně seznámíme s tím, jaké možnosti mohou nastat.

Alfa rozpad

Tímto způsobem se většinou rozpadají jádra těžká s protonovým číslem vyšším než 83. Při tomto rozpadu dochází k vyzáření tzv. α -částice (${}^4_2\text{He}$), v důsledku čehož dojde k poklesu protonového čísla nově vzniklého prvku o 2 a nukleonového čísla o 4. Kvůli vysoké energetické náročnosti však není alfa rozpad příliš častý.

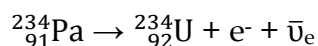
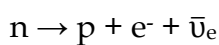


Beta rozpad

Daleko častější než alfa rozpad je beta rozpad. Při něm dochází k vyzáření buď **elektronu** (záporně nabitá částice obíhající kolem jádra) nebo **pozitronu** (antičástice k elektronu s kladným nábojem).

β^- rozpad

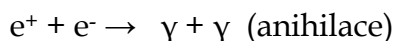
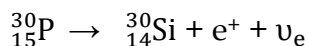
S tímto rozpadem se setkáváme u nuklidů s přebytkem neutronů. V jádru atomu dochází k přeměně neutronu na proton, protonové číslo prvku tedy o 1 stoupne. Produkty reakce jsou dále vyzářený elektron (β^- částice) a elektronové antineutrino.



β^+ rozpad

Beta plus rozpad se objevuje u nuklidů s nedostatkem neutronů. Dochází vlastně k přeměně protonu na neutron, přičemž protonové číslo prvku o 1 poklesne a jsou vyzářeny pozitron a elektronové neutrino.

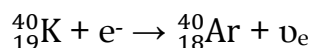
Uvolněný pozitron se v hmotném prostředí rychle zabrzdí a dojde k anihilaci: pozitron i elektron zaniknou a místo nich vzniknou dva fotony, každý o energii 511 keV, celkem tedy 1022 keV.



Záchyt elektronu

Kromě β^+ rozpadu se mohou nuklidy s nedostatkem neutronů rozpadat také elektronovým záchytem. Atomové jádro zachytí elektron ze svého elektronového obalu, jeden proton v jádře se přemění na neutron a z jádra se uvolní elektronové neutrino. Uprázdňené místo po zachyceném elektronu je okamžitě zaplněno elektronem z vyšší slupky, čímž se uvolní další místo, takže může dojít ke kaskádovému sestupu elektronů na nižší slupky. Při záchytu elektronu se atom nachází v excitovaném stavu, současně se sestupem elektronu je rozdíl energií vyzářen v podobě elektromagnetického (např. rentgenového) záření. V některých případech může vyrovnávání energií zapříčinit úplné uvolnění elektronu z atomu; tomuto jevu se říká **Augerův efekt**.

Výsledek reakce je ale stejný jako u β^+ rozpadu: protonové číslo nově vzniklého prvku je o 1 nižší než protonové číslo prvku původního.



Gama záření

Gama záření je druhem elektromagnetického záření charakterizované vysokou energií a krátkou vlnovou délkou (obvykle $E > 100 \text{ keV}$, $\lambda < 10^{-11} \text{ m}$). Často vzniká jako vedlejší produkt α a β rozpadu, protože při těchto rozpadech nemusí být výsledné izotopy v základním stavu, ale mohou být excitované. Při rozpadu do základního stavu je přebytečná energie vyzářena v podobě γ záření. Konkrétní rozpadové reakce mají své charakteristické energie. Když tedy nějaký vzorek aktivujeme a následně měříme energii γ záření, které bylo při rozpadu vyzářeno, můžeme usuzovat na prvkové složení vzorku.

Důležité veličiny

Při výpočtech v rámci této práce budeme potřebovat i některé specifické veličiny, které si na následujících řádcích přiblížíme:

Účinný průřez (σ)

Tato veličina, zjednodušeně řečeno, udává, jak velkou efektivní plochu nabízí atomová jádra daného prvku k reakci s neutrony. Čím je efektivní plocha pro danou

reakci větší, tím víc neutronů může při ostřelování do atomového jádra narazit a aktivovat ho. Čím je tedy větší účinný průřez, tím vyšší je i pravděpodobnost dané reakce.

Účinný průřez se udává v **barnech**, přičemž $1b = 10^{-28}m^2$.

Emisní četnost zdroje (γ)

Tato veličina udává, kolik neutronů (popřípadě jiných částic) emituje zdroj za 1 sekundu.

Neutronový tok (j)

Tato veličina udává, kolik neutronů dopadne na danou plochu za 1 sekundu. Jednotkou neutronového toku tedy je **počet neutronů/m²/s**. V případě bodového zdroje neutronů je neutronový tok ve vzdálenosti r od zdroje $j = \gamma/4\pi r^2$.

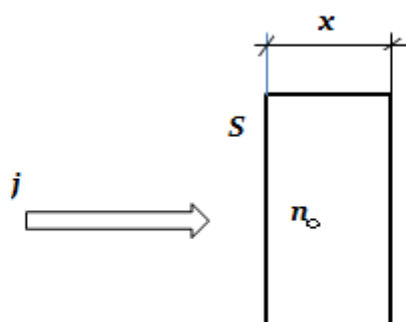
Poločas rozpadu ($t_{1/2}$)

Poločas rozpadu udává, za jak dlouho klesne aktivita vzorku na polovinu své počáteční hodnoty, nebo také za jak dlouho se polovina jader ve vzorku rozpadne.

Účinnost detekce gama záření (η)

Účinnost detekce závisí na energii emitovaného gama záření i na prostorovém uspořádání celé detekční soustavy a vzdálenosti vzorku od detektoru. Vždy platí, že $\eta < 1$.

Základní početní vztahy



Ostřelujeme-li vzorek s určitou plochou S a tloušťkou x po určitou dobu t rychlými neutrony, platí vztah:

$$\frac{N_n}{t} = jS ,$$

kde N_n/t je počet neutronů, které na vzorek dopadly za 1 s a j je neutronový tok.

Dále můžeme vyjádřit počet jader určitého izotopu N_j ve vzorku o objemu V jako:

$$N_j = n_0 V = n_0 S x,$$

kde n_0 je počet jader příslušného izotopu v jednotce objemu vzorku.

Zajímá nás také pravděpodobnost interakce rychlých neutronů s jádry, tu můžeme vyjádřit jako:

$$P = \frac{\sigma N_j}{S} = \frac{\frac{N}{t}}{\frac{N_n}{t}}, \quad P = \frac{\sigma S x n_0}{S} = \frac{\frac{N}{t}}{jS}$$

Odtud si můžeme vyjádřit:

$$\frac{N}{t} = j n_0 S x \sigma = j V n_0 \sigma = j N_j \sigma,$$

kde N je počet nově vzniklých jader a σ je účinný průřez.

Po aktivaci stabilních jader rychlými neutrony dochází k postupnému rozpadu jader ve vzorku.

Vznik nových jader můžeme zapsat vztahem:

$$\frac{dN}{dt} = j N_j \sigma \quad (1)$$

Rozpad naopak popisuje rovnice:

$$\frac{dN}{dt} = -\lambda N, \quad (2)$$

kde λ je rozpadová konstanta, $\lambda = \frac{\ln 2}{t_{1/2}}$.

Spojíme-li rovnice (1) a (2), dostáváme jedinou rovnici popisující vznik i rozpad jader:

$$\frac{dN}{dt} + \lambda N = j N_j \sigma \quad (3)$$

Po vyřešení dostáváme:

$$N(t) = N_0 e^{-\lambda t} + \frac{j\sigma N_j}{\lambda} \quad (4)$$

Položíme-li $N(t=0) = 0$, dostaneme $N_0 = -\frac{jN_j\sigma}{\lambda}$.

Po dosazení do (4) dostáváme:

$$N(t) = \frac{jN_j\sigma}{\lambda} (1 - e^{-\lambda t})$$

Počet rozpadlých jader v časovém intervalu $\langle t_1, t_2 \rangle$ lze vyjádřit jako rozdíl počtu nerozpadlých jader v časech t_1 a t_2 .

$$\begin{aligned} N_R &= N(t_1) - N(t_2) = \frac{jN_j\sigma}{\lambda} (1 - e^{-\lambda t_a}) [e^{-\lambda(t_1 - t_a)} - e^{-\lambda(t_2 - t_a)}] = \\ &= \frac{jN_j\sigma}{\lambda} (1 - e^{-\lambda t_a}) e^{-\lambda t_n} (1 - e^{-\lambda t_m}), \end{aligned} \quad (5)$$

kde t_a je zde doba aktivace, t_1 je čas začátku měření, t_2 je čas konce měření, t_n je doba, která uplynula od aktivace po začátek měření, t_m je doba, po kterou se měřilo, a předpokládáme, že aktivace začala v čase $t = 0$.

Během měření nedetekujeme samozřejmě všechna rozpadlá jádra, ale jen jejich určitou část N_γ . To závisí na účinnosti η detektoru gama záření a pravděpodobnosti P_γ emise gama záření při rozpadu. Vztah můžeme vyjádřit následující rovnicí:

$$N_\gamma = \eta P_\gamma N_R = \eta P_\gamma \frac{jN_j\sigma}{\lambda} (1 - e^{-\lambda t_a}) e^{-\lambda t_n} (1 - e^{-\lambda t_m}) \quad (6)$$

Připravíme-li etalon o známé hodnotě počtu jader N_{j0} daného izotopu příslušného prvku, můžeme z aktivace a následného měření gama záření z etalonu i neznámého vzorku určit počet izotopů N_j příslušného prvku v neznámém vzorku:

$$\frac{N_\gamma}{N_{\gamma 0}} = \frac{N_j}{N_{j0}} \frac{(1 - e^{-\lambda t_a}) e^{-\lambda t_n} (1 - e^{-\lambda t_m})}{(1 - e^{-\lambda t_{a0}}) e^{-\lambda t_{n0}} (1 - e^{-\lambda t_{m0}})}, \quad (7)$$

kde veličiny s indexem 0 odkazují k etalonu a veličiny bez indexu 0 se vztahují k neznámému vzorku.

Aby mohl spektrometr zaznamenat emitované energie a zjistit přítomnost určitého prvku ve vzorku, je nutné, aby měl příslušný prvek ve vzorku určitou minimální hmotnost. Tu označujeme jako citlivost a lze ji spočítat takto:

$$m = \frac{3m_x \sqrt{B}}{S},$$

kde m je citlivost, m_x je hmotnost příslušného prvku v etalonu, B je plocha pozadí a S je plocha píku příslušné energie v měřeném etalonu.

3. Experiment

VÝBĚR PRVKŮ VHODNÝCH K DETEKCI

Při ostřelování vzorku neutrony může mezi nimi a jádry izotopů docházet k různým reakcím (viz výše), přičemž účinné průřezy pro jednotlivé reakce se liší. Odlišné jsou také vznikající izotopy, a tudíž i jejich poločasy rozpadu. Proto je nejdříve potřeba vybrat pro soubor etalonů vhodné prvky s co největším účinným průřezem a dostatečně dlouhým poločasem rozpadu. Hodnoty σ pro 14 MeV neutrony a $t_{1/2}$ jsou dostupné v různých databázích, pro naše účely byla použita databáze Národní laboratoře Brookhaven, USA (ENDF/B-VII.1 (USA 2011)). Pomocí zde získaných dat byla zpracována tabulka pro všechny v přírodě se vyskytující izotopy prvků od vodíku po uran (celkem 284 izotopů, 1988 účinných průřezů a poločasů rozpadu). Na základě získaných hodnot jsme spočítali přibližný počet rozpadů pro jednotlivé izotopy při $t_a = 10$ minut, $t_n = 5$ min a $t_m = 10$ min. Vzdálenost ozařovaného vzorku od terčíkové roviny neutronového generátoru jsme zvolili $r = 20$ cm, emisní četnost neutronového generátoru 10^8 neutronů/s a hmotnost zkoumaného prvku ve vzorku 1 g. V analýze byly vynechány komplikované případy, ve kterých se při rozpadu aktivovaných izotopů vyskytují izomerní stavy (s výjimkou barya a zirkonu). Následně jsme vybrali nejvhodnější prvky a reakce pro neutronovou aktivační analýzu 14 MeV neutrony. Kritériem výběru byl co největší počet rozpadů aktivovaného izotopu za dobu měření doprovázený emisí gama záření a dostupnost vybraných prvků. Výsledky analýzy jsou uvedeny v tabulce č. 2.

Naším úkolem pak bylo připravit etalonové vzorky různých prvků, případně jejich chemických sloučenin, aktivovat příslušné izotopy proudem rychlých neutronů a proměřit spektrum emitovaných energií γ záření. Následně jsme aktivovali vzorek neznámý, porovnali jeho gama spektrum se spektry již dříve proměřených etalonových vzorků a zjistili tak prvkové složení neznámého vzorku.

Vzorky měly podobu kruhových plíšků o průměru 2,5 cm a různé tloušťky nebo prášku umístěného do vzorkovnic s vnitřním průměrem 1,3 cm a výškou 2,85 cm.

Tabulka č. 2 (prvních 10 aktivovaných izotopů bez izomerních stavů)

Izotop	Reakce	Účinný průřez [b]	Izotop vzniklý aktivací	Poločas rozpadu [s]	Počet rozpadů
$^{63}_{29}\text{Cu}$	(n, 2n)	0,477	$^{62}_{29}\text{Cu}$	580,38	9536
$^{79}_{35}\text{Br}$	(n, 2n)	0,883	$^{78}_{35}\text{Br}$	387	9502
$^{141}_{59}\text{Pr}$	(n, 2n)	1,392	$^{140}_{59}\text{Pr}$	203,4	9475
$^{71}_{31}\text{Ga}$	(n, 2n)	0,908	$^{70}_{31}\text{Ga}$	1268,4	7560
$^{69}_{31}\text{Ga}$	(n, 2n)	0,791	$^{68}_{31}\text{Ga}$	4062,6	4308
$^{31}_{15}\text{P}$	(n, α)	0,120	$^{28}_{13}\text{Al}$	134,484	1749
$^{64}_{30}\text{Zn}$	(n, 2n)	0,107	$^{63}_{30}\text{Zn}$	2308,2	791
$^{40}_{18}\text{Ar}$	(n, α)	0,0111	$^{37}_{16}\text{S}$	303	406

$^{150}_{60}\text{Nd}$	(n, 2n)	1,851	$^{149}_{60}\text{Nd}$	6220,8	313
$^{65}_{29}\text{Cu}$	(n, 2n)	0,895	$^{64}_{29}\text{Cu}$	45723,6	280

NEUTRONOVÝ GENERÁTOR

Neutronový generátor, který používáme při našem experimentu, funguje na principu srážky iontů deuteria s tritiem v terčíku. Při této reakci vzniká ^4_2He o energii $E_{\text{He}} = 3,5 \text{ MeV}$ a neutrony o energii $E_n = 14,1 \text{ MeV}$. Tyto neutrony aktivují jádra v ozařovaném vzorku, dochází tedy k jejich přeměně a následnému rozpadu.

Některé další technické parametry jsou shrnuty v následující tabulce:

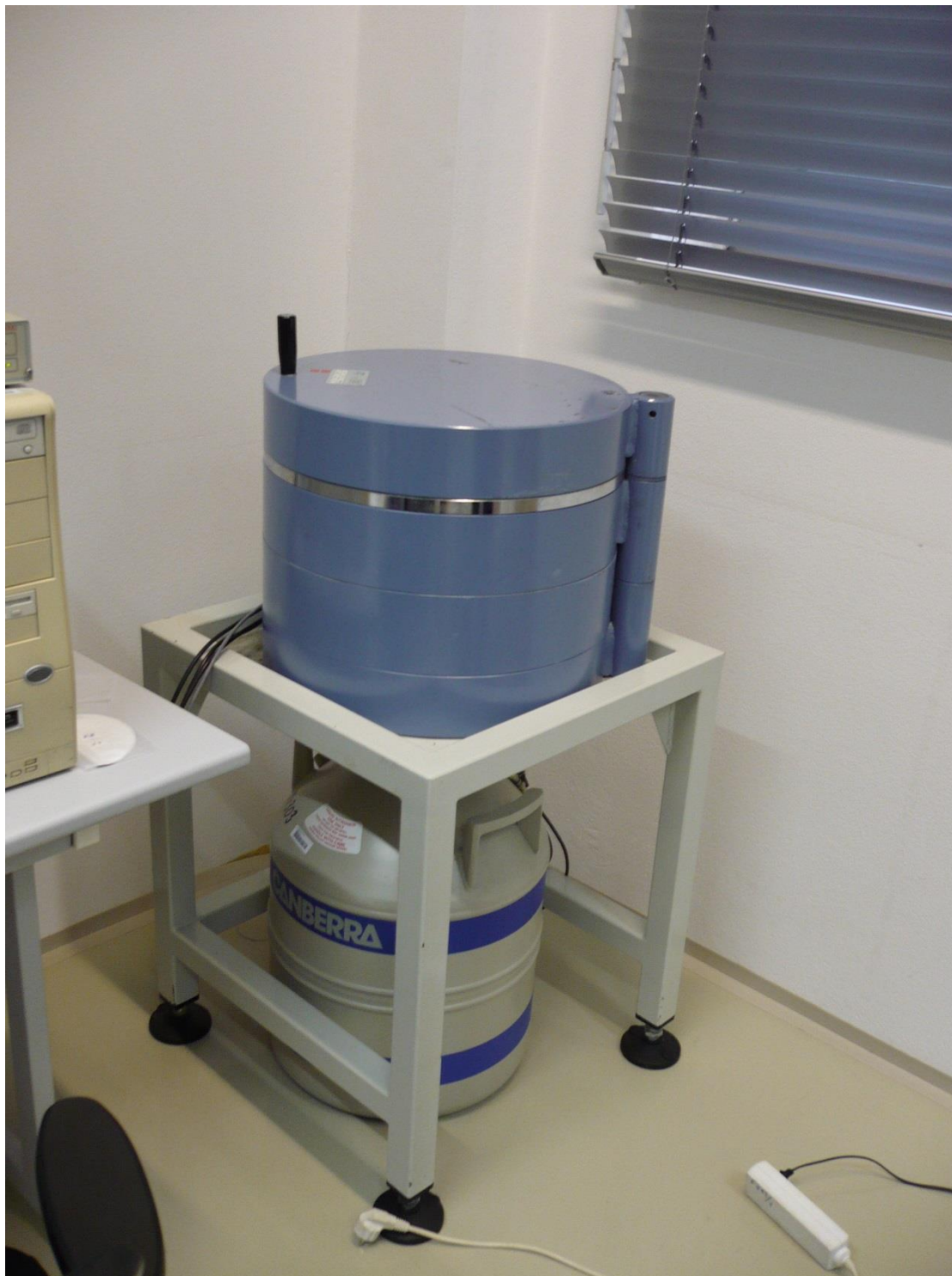
Název generátoru	MP320 (DT) Thermo Scientific
Energie neutronů	14,1 MeV
Emisní četnost zdroje	10^8 neutronů/s
Neutronový tok (6 cm od terčíkové roviny)	$2,2 \times 10^5$ neutronů/cm ² /s
Aktivita tritia v terčíku	73 GBq
Životnost	2000 h





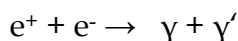
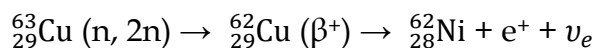
DETEKTOR GAMA ZÁŘENÍ

V naší práci používáme polovodičový germaniový detektor, ve kterém je PN přechod zapojen v závěrném směru. Když do citlivého objemu detektoru dopadne foton emitovaný z aktivovaného vzorku, je energie γ záření zaznamenána a pomocí počítače pak můžeme zpracovat celé gama spektrum. Protože vodivost polovodičů silně závisí na teplotě, je detektor chlazen kapalným dusíkem. Detektor je odstíněn masivní vrstvou olova.



VÝSLEDKY EXPERIMENTU - ETALONY

MĚĎ



K anihilaci pozitronů a emisi gama záření o energii 511 keV dochází ve válečcích z plexiskla o průměru 2,5 cm a výšce 1 cm, které z obou stran obklopují měděnou destičku při měření pomocí polovodičového germaniového spektrometru. Protože gama záření o energii 511 keV se vyskytuje v pozadí, je třeba pozadí odečíst od naměřeného počtu pulzů za 1 s.

Datum měření: 4. 6. 2015

Proud deutronů: 60 μA

Urychlující napětí: 80 kV

Tvar vzorku: plíšek o průměru 2,5 cm a tloušťce 0,21 mm

Hmotnost mědi ve vzorku: 0,94 g

Hustota vzorku: 9,1 g/cm³

Vzdálenost od zdroje neutronů: 15 cm

Doba ozařování: 30 min

Doba přenosu: 4 min

Doba měření aktivace: 1885 s

Doba měření pozadí: 1900 s

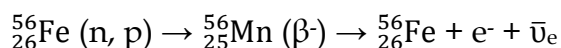
Účinný průřez (pro reakci (n,2n)): 477 mb

Poločas rozpadu (pro ${}^{62}_{29}\text{Cu}$): 9,67 min

Naměřená hodnota E [keV]	Tabulková hodnota E [keV]	Počet pulsů za 1 s	Relativní citlivost [%]	Absolutní citlivost [g]
511,48	511	1,18	1,99	0,019

Pro stanovení hmotnosti mědi ve vzorku je nejvhodnější použít tyto energie gama záření: 511 keV

ŽELEZO (ve formě plíšku)



Datum měření: 4. 6. 2015

Proud deutronů: 60 μA

Urychlující napětí: 80 kV

Tvar vzorku: plíšek o průměru 2,5 cm a tloušťce 1 mm

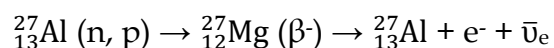
Hmotnost železa ve vzorku: 3,85 g

Hustota vzorku: 7,84 g/cm³
 Vzdálenost od zdroje neutronů: 15 cm
 Doba ozařování: 30 min
 Doba přenosu: 7 min
 Doba měření: 1082 s
 Účinný průřez (pro reakci (n, p)): 98 mb
 Poločas rozpadu (pro ⁵⁶Mn): 2,58 h

Naměřená hodnota E [keV]	Tabulková hodnota E [keV]	Počet pulsů za 1 s	Relativní citlivost [%]	Absolutní citlivost [g]
848,10	846,7638	0,453	2,1	0,08
1812,40	1810,726	0,122	6,3	0,25

Pro stanovení hmotnosti železa ve vzorku je nejvhodnější použít tyto energie gama záření: 846,7632 keV

HLINÍK (ve formě plíšku)

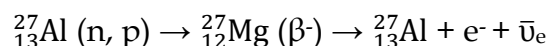


Datum měření: 4. 6. 2015
 Proud deutronů: 60 μA
 Urychlující napětí: 80 kV
 Tvar vzorku: plíšek o průměru 2,5 cm a tloušťce 1 mm
 Hmotnost hliníku ve vzorku: 1,31 g
 Hustota vzorku: 2,67 g/cm³
 Vzdálenost od zdroje neutronů: 15 cm
 Doba ozařování: 20 min
 Doba přenosu: 3 min
 Doba měření: 1226 s
 Účinný průřez (pro reakci (n, p)): 69 mb
 Poločas rozpadu (pro ²⁷Mg): 9,46 min

Naměřená hodnota E [keV]	Tabulková hodnota E [keV]	Počet pulsů za 1 s	Relativní citlivost [%]	Absolutní citlivost [g]
845,15	843,76	0,466	2,1	0,028
1015,99	1014,52	0,154	2,7	0,035

Pro stanovení hmotnosti hliníku ve vzorku je nejvhodnější použít tyto energie gama záření: 843,76 keV; 1014,52 keV

HLINÍK (ve formě Al_2O_3)



Datum měření: 22. 2. 2016

Proud deutronů: 60 μA

Urychlující napětí: 80 kV

Tvar vzorku: prášek ve vzorkovnici s vnitřním průměrem 1,3 cm a výškou 2,85 cm

Hmotnost celého vzorku: 3,51 g

Hmotnost hliníku ve vzorku: 1,86 g

Hustota vzorku: 0,93 g/cm³

Vzdálenost od zdroje neutronů: 15 cm

Doba ozařování: 30 min

Doba přenosu: 3min 50 s

Doba měření: 3686,94 s

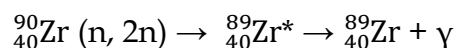
Účinný průřez (pro reakci (n, p)): 69 mb

Poločas rozpadu (pro $^{27}_{12}\text{Mg}$): 9,46 min

Naměřená hodnota E [keV]	Tabulková hodnota E [keV]	Počet pulsů za 1 s	Relativní citlivost [%]	Absolutní citlivost [g]
843,74	843,76	0,234	1,8	0,034
1014,41	1014,52	0,084	2,8	0,051

Pro stanovení hmotnosti hliníku ve vzorku je nejvhodnější použít tyto energie gama záření: 843,76 keV

ZIRKON (ve formě ZrO_2)



Datum měření: 4. 6. 2015

Proud deutronů: 60 μA

Urychlující napětí: 80 kV

Tvar vzorku: prášek ve vzorkovnici s vnitřním průměrem 1,3 cm a výškou 2,85 cm

Hmotnost celého vzorku: 6 g

Hmotnost zirkonu ve vzorku: 4,44 g

Hustota vzorku: 1,59 g/cm³

Vzdálenost od zdroje neutronů: 15 cm

Doba ozařování: 10 min

Doba přenosu: 3 min

Doba měření: 746 s

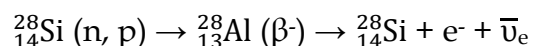
Účinný průřez (pro reakci (n, 2n)): 588 mb

Poločas rozpadu (pro $^{89}_{40}\text{Zr}^*$): 4,16 min

Naměřená hodnota E [keV]	Tabulková hodnota E [keV]	Počet pulsů za 1 s	Relativní citlivost [%]	Absolutní citlivost [g]
588,92	587,81	0,196	5,03	0,22

Pro stanovení hmotnosti zirkonu ve vzorku je nejvhodnější použít tyto energie gama záření: 587,81 keV

KŘEMÍK (ve formě prášku)



Datum měření: 22. 2. 2016

Proud deutronů: 60 μA

Urychlující napětí: 80 kV

Tvar vzorku: prášek ve vzorkovnici s vnitřním průměrem 1,3 cm a výškou 2,85 cm

Hmotnost křemíku ve vzorku: 3,17 g

Hustota vzorku: 0,84 g/cm³

Vzdálenost od zdroje neutronů: 15 cm

Doba ozařování: 16,5 min

Doba přenosu: 3 min 25 s

Doba měření: 503,13 s

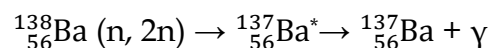
Účinný průřez (pro reakci (n, p)): 269 mb

Poločas rozpadu (pro $^{27}_{13}\text{Al}$): 2,24 min

Naměřená hodnota E [keV]	Tabulková hodnota E [keV]	Počet pulsů za 1 s	Relativní citlivost [%]	Absolutní citlivost [g]
1778,75	1778,987	0,77	1,35	0,043

Pro stanovení hmotnosti křemíku ve vzorku je nejvhodnější použít tyto energie gama záření: 1778,987 keV

BARIUM (ve formě BaCl₂*2H₂O)



Datum měření: 12. 2. 2016

Proud deutronů: 60 μA

Urychlující napětí: 80 kV

Tvar vzorku: prášek ve vzorkovnici s vnitřním průměrem 1,3 cm a výškou 2,85 cm

Hmotnost celého vzorku: 5,44 g

Hmotnost barya ve vzorku: 3,1 g

Hustota vzorku: 1,44 g/cm³

Vzdálenost od zdroje neutronů: 15 cm

Doba ozařování: 20 min

Doba přenosu: 2,25 min

Doba měření: 587 s

Účinný průřez (pro reakci (n, 2n)): 1,62 b

Poločas rozpadu (pro $^{137}_{55}\text{Ba}^*$): 2,55 min

Naměřená hodnota E [keV]	Tabulková hodnota E [keV]	Počet pulsů za 1 s	Relativní citlivost [%]	Absolutní citlivost [g]
661,62	661,657	0,46	1,1	0,035

Pro stanovení hmotnosti barya ve vzorku je nejvhodnější použít tyto energie gama záření: 661,657 keV

NEZNÁMÉ VZORKY

PÍSEK

Datum měření: 12. 2. 2016

Proud deutronů: 60 μA

Urychlující napětí: 80 kV

Tvar vzorku: vzorkovnice s vnitřním průměrem 1,3 cm a výškou 2,85 cm

Hmotnost vzorku: 4,68 g

Hustota vzorku: 1,24 g/cm³

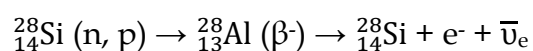
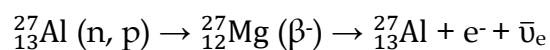
Vzdálenost od zdroje neutronů: 15 cm

Doba ozařování: 25 min

Doba přenosu: 3,25 min

Doba měření: 1057 s

Naměřená hodnota E [keV]	Tabulková hodnota E [keV]	Počet pulsů za 1 s	Prvek	Hmotnost prvku [g]	Nejistota [g]	Nejistota [%]
843,70	843,76	0,044	hliník	0,120	0,023	18,584
1778,61	1778,987	0,216	křemík	1,84	0,16	8,46



HLÍNA

Datum měření: 12. 2. 2016

Proud deutronů: 60 μA

Urychlující napětí: 80 kV

Tvar vzorku: vzorkovnice s vnitřním průměrem 1,3 cm a výškou 2,85 cm

Hmotnost vzorku: 4,97 g

Hustota vzorku: 1,31 g/cm³
 Vzdálenost od zdroje neutronů: 15 cm
 Doba ozařování: 16 min 50 s
 Doba přenosu: 2 min 31 s
 Doba měření: 1051 s

Naměřená hodnota E [keV]	Tabulková hodnota E [keV]	Počet pulsů za 1 s	Prvek	Hmotnost prvku [g]	Nejistota [g]	Nejistota [%]
843,50	843,76	0,063	hliník	0,239	0,033	13,821
1778,58	1778,987	0,191	křemík	1,64	0,15	9,09

BAHNO

Datum měření: 12. 2. 2016
 Proud deutronů: 60 μA
 Urychlující napětí: 80 kV
 Tvar vzorku: vzorkovnice s vnitřním průměrem 1,3 cm a výškou 2,85 cm
 Hmotnost vzorku: 4,64 g
 Hustota vzorku: 1,23 g/cm³
 Vzdálenost od zdroje neutronů: 15 cm
 Doba ozařování: 15 min 25 s
 Doba přenosu: 2 min 17 s
 Doba měření: 1266 s

Naměřená hodnota E [keV]	Tabulková hodnota E [keV]	Počet pulsů za 1 s	Prvek	Hmotnost prvku [g]	Nejistota [g]	Nejistota [%]
843,80	843,76	0,034	hliník	0,154	0,029	18,486
1778,61	1778,987	0,163	křemík	1,70	0,16	8,94

4. Závěr

Na základě hodnot účinných průřezů a poločasů rozpadu pro jednotlivé reakce s neutrony jsme spočítali počty rozpadů jader jednotlivých izotopů a vybrali nejvhodnější prvky pro analýzu. Následně jsme zhotovili soubor etalonů a zpracovali jejich gama spektrum.

V druhé části experimentu jsme aktivovali vzorky neznámé (písek, hlínu a bahno) sebrané v oblasti obce Pstruží a porovnáním jejich gama spektra se spektry etalonových vzorků se nám podařilo zjistit hmotnost hliníku a křemíku v těchto vzorcích.

Tato práce pro mne byla cennou zkušeností a jedinečnou příležitostí podílet se na seriózním vědeckém výzkumu během středoškolských studií. Naučila jsem se základy diferenciálního počtu, mohla jsem si na vlastní kůži vyzkoušet přípravu vzorků a jejich následné ozařování a seznámila jsem se se zajímavými lidmi. Zpracování tohoto spisu jsem věnovala spoustu času a energie, ale jsem přesvědčena, že se taková investice vyplatí. Věřím, že získané poznatky dále upotřebím i při studiu matematiky a fyziky na vysoké škole, a jsem ráda, že jsem se mohla tohoto projektu zúčastnit.

Použitá literatura a zdroje

- [1] Gordon R. Gilmore, Practical Gamma-ray Spectrometry – 2nd Edition
© 2008 John Wiley & Sons, Ltd. ISBN: 978-0-470-86196-7
- [2] A. Aksay, T. Z. Khiari and M. N. Al Haddad
The Arabian Journal for Science and Engineering, Volume 28, Number 1A, str. 61-72
- [3] National Nuclear Data Center – National Laboratory BROOKHAVEN
<http://www.nndc.bnl.gov/>
- [4] ŠTOLL, Ivan. *Fyzika pro gymnázia: fyzika mikrosvěta*. 4. vyd. Praha: Prometheus, 2010. ISBN 978-80-7196-386-8
- [5] HRUBÝ, Dag a Josef KUBÁT. *Matematika pro gymnázia*. 3. vyd. Praha: Prometheus, 2008. Učebnice pro střední školy (Prometheus). ISBN 978-80-7196-363-9