

Gymnázium Přírodní škola, z.ú
profilová práce — třída Ksí
vyšší stupeň studia
2023/2024

Jáchym Galuška

Urychlovačová hmotnostní spektrometrie

Vedoucí práce: Mgr. František Tichý

Datum odevzdání: 7. ledna 2024

Poděkování

Rád bych poděkoval Ústavu jaderné fyziky AV ČR a jeho pracovníkům za to, že jsem mohl svoji práci provádět na zařízení MILEA v Řeži. Především bych rád poděkoval Janu Kameníkovi za ochotu a čas, který mi věnoval při spolupráci.

Obsah

Poděkování.....	2
Contents	3
Úvod.....	1
Cíl Práce.....	2
AMS.....	3
Zařízení MILEA.....	3
Měření pomocí metody AMS	4
Beryllium a AMS.....	6
Vznik ^{10}Be	6
Příprava vzorku ^{10}Be	6
Oxid berylnatý	6
Měření ^{10}Be	7
Metodika	8
Teoretická příprava	8
Příprava vzorků.....	8
Příprava měření.....	10
Měření vzorků.....	10
Zpracování dat	11
Použité chemikálie	12
Výsledky a diskuse	13
Naměřená data	13
Analýza dat	13
Výsledky proudů.....	14
Srovnání s dalšími vzorky.....	15
Závěr	17
Zdroje.....	18

Přílohy..... 1

Úvod

Urychlovačová hmotnostní spektrometrie (dále jen – AMS, Accelerator Mass Spectrometry) je metoda pro měření stopových množství radioaktivních nuklidů s dlouhým poločasem přeměny. Využívá se velmi často pro potřeby radiouhlíkového datování, například v archeologii.

Během prázdnin před zahájením mé profilové práce jsem se dozvěděl, že Ústav jaderné fyziky AV ČR (ÚJF) v Řeži disponuje zařízením pro měření metodou AMS. Jedná se o první a zároveň jedinou laboratoř urychlovačové hmotnostní spektrometrie v České republice. Po konzultaci s Janem Kameníkem, odborným konzultantem mé profilové práce, jsme vybrali dvě potenciální témata. První možností bylo zaměřit se na stanovení stáří objektů pomocí radiouhlíkového datování ze vzorku dřeva. Druhou možností bylo zaměřit se na testovací měření pro optimalizaci stanovení poměru ^{10}Be a ^9Be . Jelikož se zajímám více o fyziku, vybral jsem si druhou možnost, která je více zaměřena na samotnou metodu AMS. Měření beryllia pomocí AMS je v České republice méně probádané a má práce by mohla přispět k lepšímu porozumění této problematice pro další výzkum.

Cíl Práce

Optimalizace iontového zdroje pro měření ^{10}Be urychlovačovou hmotnostní spektrometrií

Cílem této práce bylo zjistit, jaký mají vliv různé kovy přidané k oxidu berylnatému na výtěžek záporně nabitých iontů v iontovém zdroji. Tento výtěžek ovlivňuje citlivost měření poměru $^{10}\text{Be}/^9\text{Be}$ pro stanovení ^{10}Be metodou AMS. Pro zlepšení přesnosti měření se musíme pokusit co nejvíce zvýšit počet iontů v iontovém svazku. Proto se v této práci zaměřuji hlavně na naměřený proud částic ^9Be v nízkoenergetické části zařízení AMS.

AMS¹

AMS je pokročilá analytická metoda, která umožňuje přesné měření izotopů v extrémně nízkých koncentracích. V rámci této metody jsou ionty získané ze vzorku urychleny na vysoké energie a následně jsou analyzovány na základě poměru jejich hmotnosti a náboje. Díky tomu tato metoda dokáže rozlišit i nepatrná množství atomů vzácného izotopu od jiných atomů ve velkém množství, například radioaktivní izotop ^{14}C ve vzorku uhlíku (směs izotopů ^{12}C , ^{13}C a ^{14}C). Pro zajištění odpovídající citlivosti metoda dokáže efektivně odlišit molekulové a atomové izobary, tedy ionty o velmi podobné hmotnosti (například stabilní ^{14}N od radioaktivního ^{14}C). Zařízení AMS umožňují měření přirozeně se vyskytujících radioaktivních izotopů s dlouhým poločasem přeměny, které se vyskytují v poměru přibližně 10^{-10} až 10^{-14} vzhledem k nejzastoupenějšímu stabilnímu izotopu daného prvku.

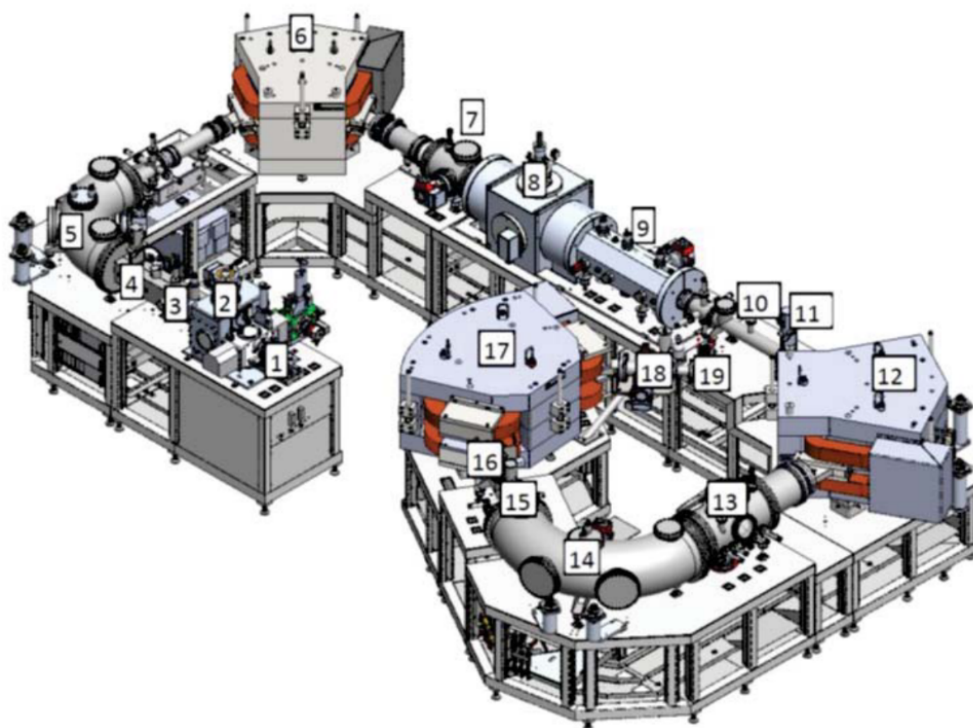
AMS dosahuje u některých radioaktivních izotopů lepší citlivosti než tradiční radiometrické techniky, které měří záření doprovázející jejich radioaktivní přeměnu. Mezi další výhody AMS patří krátká doba měření a schopnost detekovat atomy ve velmi malých vzorcích.

Zařízení MILEA²

Laboratoř ÚJF je vybavena pro měření metodou AMS přístrojem, který se jmenuje MILEA (zkratka pro Multi-Isotope-Low-Energy AMS System). Jeho výrobcem je Švýcarská firma Ionplus AG. Přístroj MILEA je výsledkem nejnovějšího vývoje v oblasti AMS. První zařízení tohoto typu bylo sestaveno v roce 2017 v laboratořích ETH Zürich². Srdcem je vakuem izolovaný urychlovač s nejvyšším urychlovacím napětím 300 kV, který používá polovodičový zdroj vysokého napětí. Zařízení umožňuje měření nuklidů o velmi rozdílných hmotnostech, jako jsou ^{10}Be , ^{14}C , ^{26}Al , ^{41}Ca , ^{129}I , ^{236}U .

¹ Text kapitoly vychází z mých konzultací na pracovišti a Wikipedia contributors. "Accelerator mass spectrometry." Wikipedia, The Free Encyclopedia. Wikipedia, The Free Encyclopedia, 6 Sep. 2023. Web. 11 Dec. 2024

²ETH ZÜRICH. Ion Beam Physics. Online. Dostupné z: <https://ams.ethz.ch/>. [cit. 2023-12-17].



Obr. 1. MILEA a její dílčí části: 1 – měnič vzorků, 2 – iontový zdroj, 3 – jednopotenciálová iontová čočka, 5 – LE elektrostatický analyzátor (ESA), 6 – LE magnet, 7 – LE analyzátor se dvěma Faradayovými válci (FC), 8 – urychlovač, 9 – kvadrupólový triplet, 10 – zasouvateľný FC, 12 – první HE magnet, 13 – HE analyzátor se sedmi pozičně nastavitelnými FC a držákem degradační fólie pro měření ^{10}Be , 14 – HE ESA, 16 – zasouvateľná ionizační komora, 17 – druhý HE magnet, 19 – ionizační komora (detektor). 4, 11, 15 a 18 jsou uzávěry typu „gate valve“, které jsou určeny k oddělení jednotlivých částí iontové trasy z důvodů ochrany vakua při servisních či havarijních událostech.

Chemické listy 2, ročník 117, M. Němec

Měření pomocí metody AMS³

Vzorky se vkládají do měniče vzorků, v případě přístroje MILEA má zásobník měniče vzorků 40 pozic (1, Obr. 1.). Z měniče vzorků jsou vzorky automaticky vsunovány do části přístroje, které se říká iontový zdroj (2, Obr.1). V tomto místě se vytvářejí páry cesia, které z části kondenzují na povrchu vzorku, kde vytvoří tenkou vrstvu cesia, a z části jsou ionizovány pomocí ionizátoru. Vzniklé ionty Cs^+ jsou rozdílem elektrických potenciálů urychlovány ke

³ Text kapitoly vychází z časopisu *Chemické Listy*. 2023, roč. 117, č. 2. 2023. ISSN 0009-2770. a mých zkušenostní z práce na zařízení MILEA

katodě, což je terč, ve kterém je nalisovaný vzorek. Při srážce iontů Cs^+ s povrchem katody dochází k odprašování vzorku, uvolněné atomy při kontaktu s elementárním cesiem obvykle získají jeden elektron za vzniku záporně nabitých iontů. Vzniklé ionty atomů a molekul jsou v nízko-energetické části (LE) zařízení MILEA tříděny podle jejich energie a poměru hmotnosti a náboje (m/z) magnetickými a elektrostatickými členy (3, 5, 6, Obr. 1). V elektrostatickém analyzátoru jsou vybrány ionty s podobnou energií (5, Obr. 1). V magnetickém poli magnetu (6, Obr. 1) jsou vybrány ionty o zvoleném poměru m/z (6, Obr. 1). V krátkých intervalech je směřován svazek stabilního izotopu do Faradayova válce umístěného před urychlovačem mírně mimo osu svazku (7, Obr. 1). Ionty v ose svazku jsou urychleny v tandemovém urychlovači (8, Obr. 1), ve kterém dochází ke změně náboje ze záporného na kladné (například BeO^- se změní na Be^{2+}). Další část přístroje je hmotnostní spektrometr pro vysoké energie (HE). V prvním HE magnetu (12, Obr. 1) jsou ze svazku vybrány ionty o poměru m/z odpovídající analyzovanému stopovému radionuklidu, které jsou směřovány dále, měřený stabilní nuklid je nasměřován do Faradayova válce umístěném v HE analyzátoru mimo osu svazku (13, Obr. 1). V dalších částech trasy AMS vybraný svazek prochází dalšími elektrostatickými a magnetickými filtry, konkrétní využití závisí na požadavcích koncové detekce, energii urychlených iontů a potřebě filtrovat další typy interferencí. Například pro měření ^{10}Be je za analyzátor do cesty svazku o m/z stopového izotopu vkládána tenká degradační fólie pro potlačení izobarického ^{10}B . Na konci trasy je jako detektor plynem plněná ionizační komora (19, Obr. 1), která dokáže zaznamenat jednotlivé ionty. V tomto detektoru se měří jednotlivé atomy měřeného radionuklidu.

Pro účely této práce jsme vyhodnocovali proud iontů $^9\text{BeO}^-$ naměřený na prvním Faradayově válci před urychlovačem (7, Obr. 1.)

Beryllium a AMS^{4,5,6}

Vznik ¹⁰Be

¹⁰Be může vznikat působením kosmického záření na atomy v atmosféře, nebo v horninách. V atmosféře jsou pro vznik ¹⁰Be nejčastější tříštivé reakce neutronů s kyslíkem a dusíkem, reakce s miony nabývají na významu až v nižších výškách, protože mají tyto částice delší dosah. Pro ¹⁰Be vzniklé v atmosféře se používá termín Meteorické. Při dešti se tyto atomy dostanou se srážkami na povrch Země, kde se váží na povrchy různých materiálů. Významně je ¹⁰Be vázáno na jílové minerály v půdě. V horninách vzniká ¹⁰Be při tříštivých reakcích kosmického záření s atomy kyslíku a křemíku. Vzniklé atomy, označované „in-situ“ jsou uzavřeny v zrnech minerálů. Pro měření se často využívá křemen z důvodu jeho rozšíření a možnosti izolace od ostatních minerálů. ¹⁰Be je čistý beta zářič a pro jeho měření radiometrickými metodami je nutná extrémně pečlivá separace od jiných zářičů beta. Kvůli obvykle nízké koncentraci a dlouhému poločasu přeměny (více než 1,5 milionu let) je většinou ¹⁰Be nemožné měřit pomocí tradičních radiometrických technik.

Příprava vzorku ¹⁰Be

Pro měření ¹⁰Be pomocí metody AMS je nejčastěji připravován vzorek v podobě oxidu berylnatého (oxidační číslo Be +II). Pokud chceme zkoumat beryllium vzniklé v horninách, musíme beryllium oddělit od ostatních rušivých prvků, které by snižovaly proud iontů v zařízení AMS. Nejdůležitější je odstranit co nejvíce atomů B, Mg, Al, Ti a Fe. Při měření beryllia vzniklého v křemenu (SiO₂) je dobré mít co nejčistší křemen, protože čím čistší je, tím jednodušší je chemický proces pro získání čistého oxidu berylnatého. Proto je velmi důležitý už samotný odběr vzorku v terénu.

Oxid berylnatý

Oxid berylnatý (BeO) je bílý prášek, nebo krystalická látka. Pro měření pomocí metody AMS jsme s ním pracovali v podobě prášku. Oxid berylnatý má zajímavé vlastnosti, například je

⁴ Chemické Listy. Online PDF. 2023, roč. 117, č. 2. 2023. ISSN 0009-2770. Dostupné z: <http://www.chemicke-listy.cz/ojs3/index.php/chemicke-listy/article/view/4195>. [cit. 2023-12-17].

⁵ Wikipedia contributors. "Beryllium-10." Wikipedia, The Free Encyclopedia. Wikipedia, The Free Encyclopedia, 7 Sep. 2023. Web. 7 Jan. 2024.

⁶ „Oxid berylnatý.“ Wikipedie: Otevřená encyklopedie. 3. 10. 2023, 20:58 UTC. 7. 01. 2024, 09:43 <https://cs.wikipedia.org/w/index.php?title=Oxid_beryllnat%C3%BD&oldid=23237914>.

hned po diamantu nejvíce tepelně vodivý nekov, má vysokou teplotu tání a je velmi silný elektrický izolátor. Tyto jeho vlastnosti mají spoustu využití, ale kvůli vysoké toxicitě, hlavně při vdechnutí, a jeho nízkému výskytu v přírodě se oxid berylnatý používá omezeně. Přesto ho, ale můžeme najít v počítačích s vysokou výpočetní rychlostí, ve sklech pro rentgeny a vysoce účinné lasery, díky nízké hustotě se používá v armádě ve zbraních. Oxid berylnatý není lehce dostupný, můžeme ho vytvořit spalováním beryllia v kyslíku nebo žháním berylnatých sloučenin. V přírodě se vyskytuje jako vzácný minerál Bromelit. Beryllium se v přírodě častěji vyskytuje v minerálech jako jsou beryl, chryzoberyl, fenakit.

Měření ^{10}Be

Oxid berylnatý se pro potřeby měření AMS míchá s práškovým kovem pro zlepšení tepelné a elektrické vodivosti. Nejčastěji je pro měření ^{10}Be využíván niob. Pro potřeby této práce jsme ověřovali, jaké jsou parametry iontových proudů při použití dalších tří kovů – železo, stříbro a měď. V podmínkách iontového zdroje zařízení MILEA výsledky systematického zkoumání použití těchto kovů zatím detailně nebyly publikovány. Pro měření byly použity kovy v podobě jemného prášku. Díky tomu je možné vzorek oxidu berylnatého s kovem dobře homogenizovat pro zajištění optimálních podmínek pro tvorbu iontů.

Metodika

Teoretická příprava

Nejdříve jsme vybrali vzorek oxidu berylnatého jako zdroj ^{10}Be , se kterým jsme prováděli testovací měření. Použit byl roztok označovaný STD KN-14-5-8A, který má nominální poměr izotopů $^{10}\text{Be}/^9\text{Be}$ $2,507 \cdot 10^{-12}$. Srážením amoniakem a žiháním byl z roztoku připraven bílý prášek BeO. Prášek byl pečlivě homogenizován, aby se dala jednotlivá měření porovnávat.

Pro každý zkoumaný kov (Fe, Ag, Cu) jsme se rozhodli připravit sérii šesti vzorků s různými poměry kovu a BeO. V rámci měření na zařízení MILEA jsou vzorky ^{10}Be momentálně měřeny s niobem, a proto jsme se rozhodli připravit jeden vzorek obsahující niob pro následné porovnání s ostatními provedenými měřeními.

Příprava vzorků

Dohromady jsme vytvořili 19 vzorků s poměry hmotností kovu a oxidu berylnatého v intervalu 0,5 až 10. (Tab. 1.).

Na analytické váze jsme nejdřív do malé křemenné nádoby odvážili trochu oxidu berylnatého (hmotnost byla okolo jednoho miligramu) a poté jsme do nádoby přidávali jeden z kovů, dokud jsme neměli požadovaný hmotnostní poměr. Kvůli nízké hmotnosti vzorků, která se pohybovala mezi 1 a 10 miligramy, bylo náročné dosáhnout přesných poměrů.

Všechny hmotnosti jednotlivých částí vzorku jsme si zaznamenali a následně z toho vypočítali poměr BeO/kov zaokrouhlený na 2 desetinná místa (Tab. 1). Poté jsme odvážené vzorky v křemenné nádobce homogenizovali tyčinkou z křemenného skla, aby byl v celém objemu směsi stejný poměr BeO/kov.

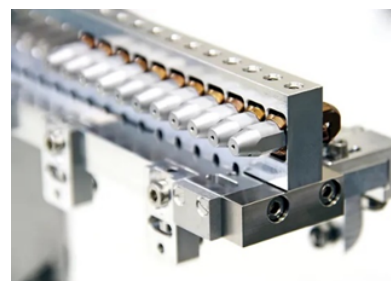
Všechny vzorky byly označeny jednoduchým kódem pro účely této práce a zároveň unikátním laboratorním kódem jako ostatní vzorky, které jsou na zařízení MILEA v Řeži měřeny.

Tab. 1. Seznam analyzovaných vzorků BeO s různými kovy a uvedeným poměrem BeO:kov.

Vzorky			
Kód	Kov/BeO	Kov	Kód laboratoře
Ag1	0,69	Ag	B0024
Ag2	1,85	Ag	B0025
Ag3	2,00	Ag	B0026
Ag4	4,43	Ag	B0027
Ag5	6,97	Ag	B0028
Ag6	9,54	Ag	B0029
Cu1	0,71	Cu	B0038
Cu2	0,86	Cu	B0037
Cu3	2,69	Cu	B0014
Cu4	4,23	Cu	B0015
Cu5	7,42	Cu	B0016
Cu6	8,38	Cu	B0017
Fe1	0,82	Fe	B0018
Fe2	1,59	Fe	B0019
Fe3	2,35	Fe	B0020
Fe4	4,76	Fe	B0021
Fe5	7,07	Fe	B0022
Fe6	8,76	Fe	B0023
Nb1	4,05	Nb	B0039

Vytvořenou směs jsme poté přesypali do terčových katod určených pro měření vzorků v přístroji MILEA (Obr. 2.). Přední otvor byl z venku utěsněn kuličkou z tvrdého materiálu (ZrO₂). Po sklepní byla směs v katodě zalisována pneumatickým lisem. Spolu se vzorkem byla vlisována hliníková kulička (průměr 1 mm), která se tlakem rozmáčkla a upevnila polohu analyzované směsi v terčové katodě. Vzorek je při měření postupně odprašován z přední strany.

Při přípravě vzorků je nezbytné pracovat v čistém prostředí, aby se zamezilo znehodnocení vzorku a zabezpečila ochrana personálu.



Obr. 2. Katody se vzorky v měniči vzorků připravené k měření.

Foto: IONPLUS. Ionplus [online]. [cit. 2023-12-17]. Dostupné z: <https://www.ionplus.ch/products>

Příprava měření

Vlastní měření probíhalo v pětidenní kampani určené pro měření beryllia. Terčové katody se vzorky byly umístěny do zásobníku. Zásobník byl založen do vakua a přístroj pomocí měniče vzorků po jedné zasouval do měřicí pozice iontového zdroje (ion source). Zde se vrchní vrstva katody a vzorku odprašovala a konvertovala na záporně nabitě ionty, které byly urychleny a vyvedeny dále do přístroje. První dny kampaně byly věnovány nastavování přístroje a testovacím měřením (Tab. 2.). Kvůli technickým obtížím byl pro nastavení (ladění) využit také vzorek B0039 připravený s niobem, což mělo vliv na průběh iontových proudů získaný při vlastním měření (proud iontů byl už na začátku měření vysoký). Vlastní měření vzorků uvedených v Tab. 1 bylo provedeno během 24 hodin pomocí automatického režimu nastaveného v ovládacím software.

Tab. 2. Nastavení přístroje při měření

Nastavení MILEA pro měření série 10217	
Accelerator voltage	250,8 kV
The stripper pressure	$8.5 \cdot 10^{-8}$ mbar
The detector pressure	22,1 mbar
Detector window size	10×6 mm ²
Degrader foil SiN, thickness	75 nm
LE magnet	353 mT
HE 1 magnet	297 mT
HE2 magnet	558 mT

Měření vzorků

S každým vzorkem byl nejdříve naměřen jeden „run“ (běh), který se skládal ze sedmnácti cyklů (dva pro „zahájení“ a 15 pro vlastní měření). V cyklu o délce cca 19 vteřin byly měřeny iontové proudy stabilního ⁹Be před a po urychlení a počty atomů ¹⁰Be na konci iontové trasy. Po dokončení stanoveného počtu cyklů byla katoda se vzorkem vyměněna za další. Tento proces potom přístroj zopakoval pro všechny vzorky v sérii. Další běhy již byly složeny pouze z 15 cyklů. Každý vzorek byl celkem měřen ve třinácti bězích. Celkově bylo změřeno 3743 cyklů. Čistý čas měření celé série byl 20 hodin, ale celková doba měření trvala téměř 24 hodin.

Celé toto měření bylo označené jako série s číslem 10217 a naměřená data exportována do souboru CSV (comma separated values).

Zpracování dat

Z naměřených hodnot nám přístroj automaticky vygeneroval tabulku obsahující 25 sloupců a 3744 řádků. Z této tabulky jsme využili především čtyři sloupce, z nichž byla odvozena většina našich grafů. První z nich identifikuje měřený vzorek, druhý a třetí specifikují konkrétní běh a odpovídající cyklus, a čtvrtý udává naměřený proud z Faradayova válce před urychlovačem (viz Obr. 1, sloupec 7). Kvalitní zpracování tohoto rozsáhlého datového souboru bylo náročné a klíčové pro získání relevantních závěrů.

Nejdříve byla data kontrolována v programu Bats, kde byla provedena hrubá kontrola správnosti. Poté byla data importována do Excelu, v němž jsem vytvářel jednoduché grafy.

Pro konečné zpracování byl použit program R pro analýzu dat a vytvoření složitějších grafů. R je programovací jazyk a prostředí určené pro statistickou analýzu dat a jejich grafické zobrazení⁷. Pro účely této práce jsem se naučil základy programování v R, abych tento programovací jazyk využil na vytváření grafů a analýzu naměřených dat. Pro psaní kódu jsem využíval RStudio, což je vývojové prostředí, umožňující komfortní práci v programovacím jazyce R⁸. Kvůli velkému množství dat a složitému rozdělení bylo jednodušší a vhodnější používat R než vytvářet grafy v tabulkovém kalkulátoru (například Excel).

Při práci s naměřenými daty se u každého vzorku naměřené hodnoty z prvních dvou cyklů v prvním běhu nepoužívaly, neboť při měření těchto dvou hodnot je vzorek poprvé vystaven podmínkám v přístroji a naměřené hodnoty mohou být zavádějící.

Naměřená data najdete v dokumentu s názvem 10217 - Auto Measurement - Be-kovy. Komentář k výsledkům najdete níže v kapitole Výsledky.

⁷ Wikipedia contributors. "R (programming language)." *Wikipedia, The Free Encyclopedia*. Wikipedia, The Free Encyclopedia, 7 Jan. 2024. Web. 7 Jan. 2024

⁸ „RStudio.“ *Wikipedie: Otevřená encyklopedie*. 3. 02. 2023, 17:21 UTC. 7. 01. 2024, 09:25 <<https://cs.wikipedia.org/w/index.php?title=RStudio&oldid=22408159>>

Použité chemikálie⁹

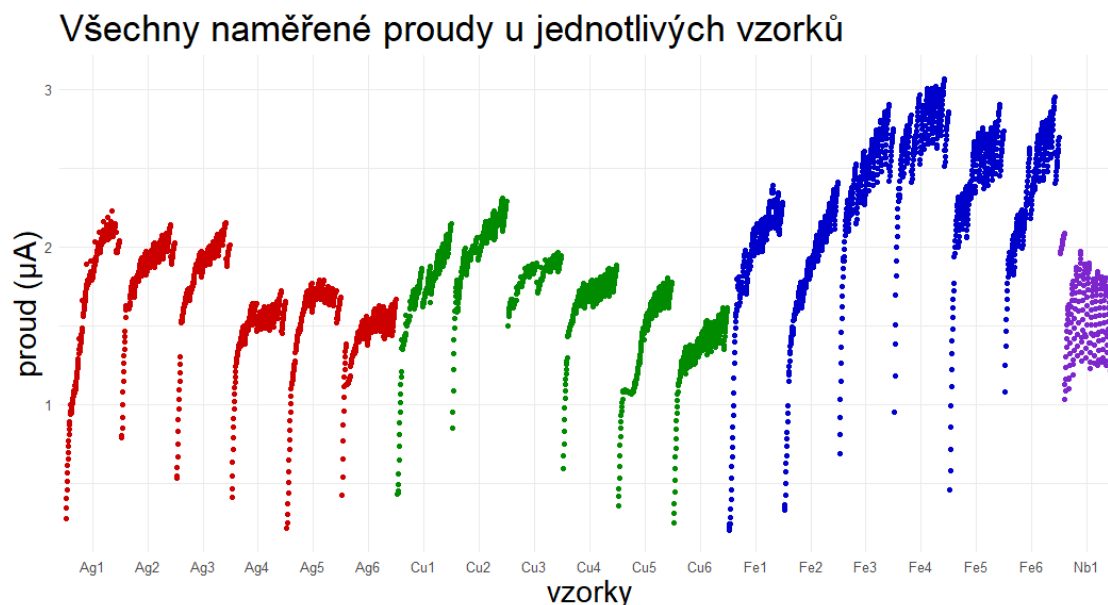
Tab. 3. Vlastnosti použitých chemikálií

materiál	Dodavatel	Specifikace	tepelná vodivost (W/mK)	elektrická vodivost (MS/m)	Hustota (kg/m ³)	A _r , M _r
Fe	Aldrich	≥99%, reduced, powder (fine)	80	10	7874	55,847
Cu	Aldrich	<4 micrometer, 99.7%	400	59	8960	63,546
Ag	Thermo	1-3 micrometer, 99.9% (metal basis)	430	62	10490	107,87
Nb	Aldrich	<45 micrometer, 99.8% trace metal basis	54	6,7	8570	92,906
BeO	Laboratorní preparát	kapalný standard KN-14-5-8A, cca 1M HNO ₃	330		3020	25,011

⁹ Dayah, Michael. Periodic Table - Ptable. Ptable, 1 Oct. 1997, ptable.com. Accessed 7 Jan. 2024

Výsledky a diskuse

Naměřená data



Obr. 3. Graf ukazuje průměrný proud BeO^- v jednotlivých cyklech měření pro všechny vzorky. Bravy ukazují na kov, který byl do vzorku přidán. (červené jsou vzorky se stříbrem, zelené s mědí, modré s železem a fialové s niobem)

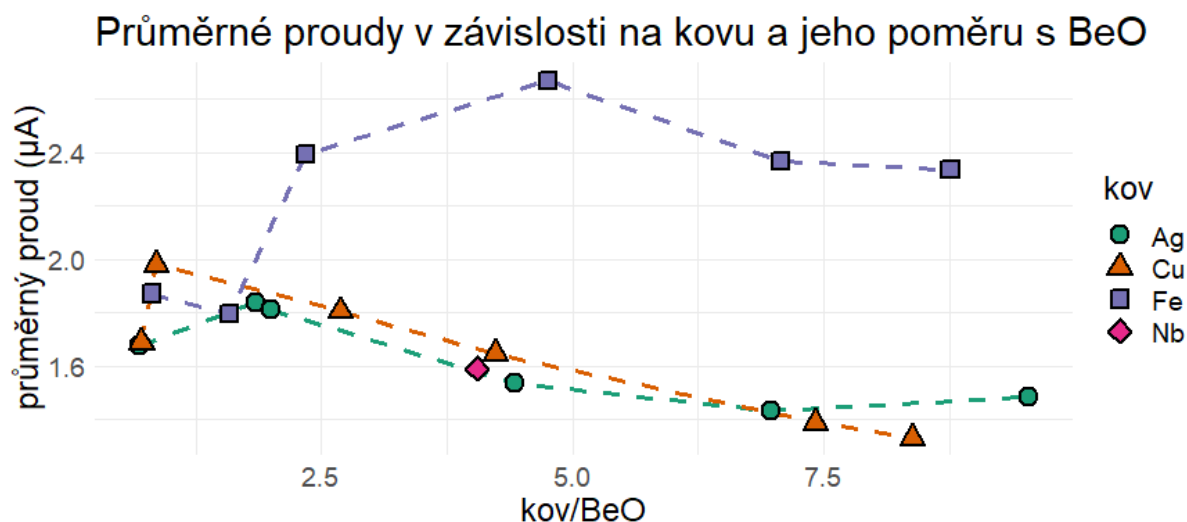
Měřením bylo získáno 3743 hodnot proudu iontů ${}^9\text{BeO}^-$ (Obr. 3.) ve Faradayově válci před urychlovačem (7, Obr. 1.). Stejný počet hodnot byl naměřen pro ionty ${}^9\text{Be}^{2+}$ ve Faradayově válci za urychlovačem a pro ionty ${}^{10}\text{Be}^+$ v detektoru. Pro účely této práce byla využita data z prvního Faradayova válce. Dále byl také zaznamenáván čas jednotlivých měření. Všechny naměřené hodnoty jsou uvedeny ve zvláštním souboru s názvem 10217 - Auto Measurement - Be-kovy.csv

Analýza dat

Data jsem se snažil zpracovávat především do grafů, které jsem vytvořil v programu R, případně v Excelu. Dále jsem v R používal funkci `summary()` pro získání základních informací o zkoumaných datech (průměr, maximum, minimum a medián).

Při analýze dat jsme se zaměřili na průměrné hodnoty proudu, abychom zjistili, jak různé poměry hmotností BeO a kovů ovlivňují měřený proud iontů ${}^9\text{BeO}^-$.

Výsledky proudů



Obr. 4. Závislost průměrného proudu iontů ${}^9\text{BeO}^-$ na poměru hmotností kovu a BeO ve vzorku.

Zprůměrované hodnoty proudů pro jednotlivé vzorky jsem zanesl do grafu v závislosti na kovu, který byl do vzorku přidán, a jeho poměru s oxidem berylnatým (Obr. 4.). Z grafu je vidět, že nejvyšších proudů dosahuje železo při hmotnostním poměru Fe/BeO okolo 5. Měď a stříbro mají mnohem nižší proudy a jsou účinnější v nižších koncentracích (hmotnostní poměr). Niob má podobný proud jako vzorky mědi a stříbra s podobnými koncentracemi.

Průměrný proud pro všechny vzorky s železem byl 2,24 μA . Průměrný proud pro všechny vzorky se stříbrem byl 1,63 μA . Průměrný proud pro všechny vzorky s mědí byl 1,64 μA .

Ze všech měřených vzorků jsme největší průměrný proud naměřili u vzorku Fe4 s poměrem hmotností Fe/BeO 4,76, u kterého byl průměrný proud 2,67 μA . Tento vzorek měl zároveň nejvyšší maximální proud (3,07 μA).

Průměrný proud vzorku Fe4 byl 1,68krát větší než průměrný proud vzorku s niobem Nb1 (podobné vzorky s niobem se používají pro měření ${}^{10}\text{Be}$ na přístroji MILEA). To, že je proud u vzorku Fe4 o cca 70 % vyšší než u vzorku Nb1, znamená snížení času, který je nutný pro měření (stejný počet změřených částic za kratší dobu) a tím pádem můžeme za určitý čas naměřit větší počet vzorků. Díky tomu se měření ${}^{10}\text{Be}$ pomocí metody AMS může stát

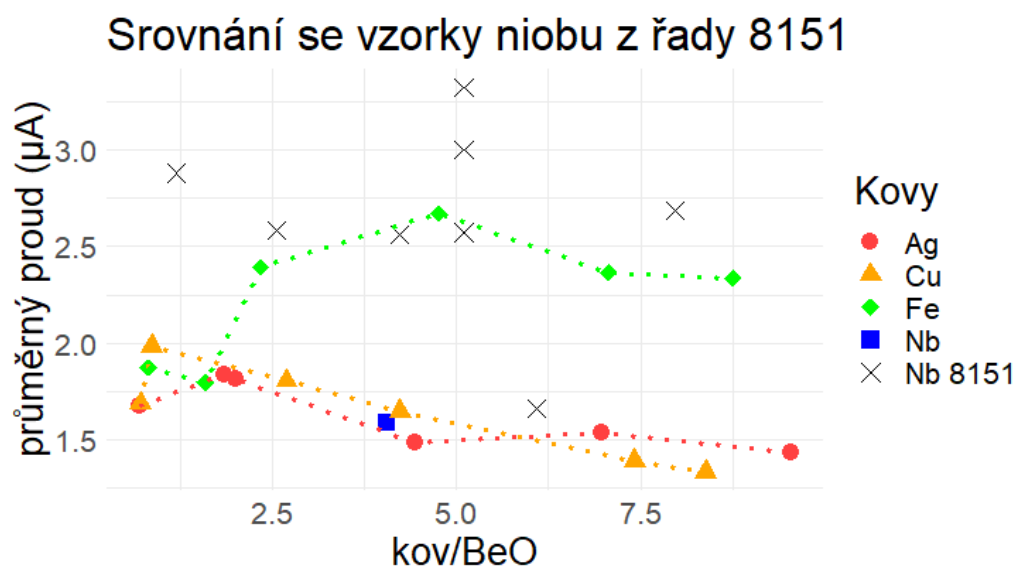
dostupnějším. Dále to také znamená, že za stejný čas měření můžeme dosáhnout vyšší přesnosti.

Železo má navíc ještě jednu výhodu a to, že je feromagnetické, díky tomu se s ním lépe pracuje (můžeme použít ruční magnet pro lepší manipulaci se vzorkem).

Průměrné proudy ze všech vzorků najdete v tabulce jako přílohu s číslem 1 v kapitole Přílohy.

V budoucnosti bude možné rozšířit měření i na další kovy.

Srovnání s dalšími vzorky



Obr. 5. Závislost průměrného proudu iontů ${}^9\text{BeO}^-$ na poměru hmotností kovu a BeO ve vzorku. Nb 8151 jsou vzorky ze série 8151 do kterých byl přidán niob. Ostatní body jsou vzorky měřené v rámci mé práce.

Pro porovnání jsme použili data z měření ${}^{10}\text{Be}$ s niobem provedeného dříve pro jiné účely (8151 - Auto Measurement - Be_JK_1). Z tohoto experimentu jsme použili data z osmi vzorků s niobem s různým hmotnostním poměrem BeO a Nb, tři vzorky ze série měly stejný hmotnostní poměr. Tyto vzorky jsou v grafu označeny Nb 8151 (černé křížky, Obr. 5.). Je patrné, že vzorky Nb 8151 mají vyšší proud než vzorek niobu, který byl měřen v rámci mé práce. To může být způsobené rozdílnými podmínkami při měření, především množstvím Cs v zásobníku, množstvím par Cs a účinností ionizace atomů Cs na přístroji MILEA při měření. Na sérii Nb 8151 lze dále pozorovat, že vzorky s Nb o stejném poměru Nb/BeO, jež byly analyzovány během jednoho měření, vykazují velký rozptyl v měřeném proudu. Pro tři vzorky (černé křížky nad sebou na Obr. 5), které byly připraveny ze stejné směsi s hmotnostním poměrem Nb/BeO 5,10, byly naměřeny proudy BeO^- přibližně 2,6 až 3,3 μA . Z tohoto

porovnání je patrné, že zatím nemůžeme se stoprocentní jistotou říci, že vzorky s železem jsou nejlepší pro měření ^{10}Be . Abychom mohli s jistotou určit, jestli se vyplatí do vzorků přidávat železo spíše než niob, bude vhodné provést podobné měření, které bude zkoumat více vzorků s železem a s niobem. Další vhodné měření, které by mohlo zvýšit porozumění této problematice, je měřit stejné vzorky (stejný poměr kovu a BeO) vícekrát a sledovat jak moc se liší naměřené proudy. Také se nabízí zopakovat celé toto měření s jiným nastavením přístroje a zkoumat, jestli se liší vývoj proudu (v závislosti na poměru kov/BeO).

Závěr

Z mé práce vychází jako nejlepší pro měření ^{10}Be pomocí metody AMS směs oxidu berylnatého (BeO) a železa s hmotnostním poměrem kov/ BeO okolo 5. Vzorek s poměrem Fe/BeO 4,76 měl průměrný proud $2,65 \mu\text{A}$, což je o cca 70 % vyšší proud než vzorek s niobem, který byl hmotnostním poměrem Nb/BeO (4,05) srovnatelný se vzorky, které se používají pro měření ^{10}Be na přístroji MILEA. Při používání železa místo niobu bychom mohli nejen dosáhnout přesnějších výsledků, ale také snížit čas měření a spotřebu zdrojů (například elektřiny, cesia a dalších). Abychom si mohli být dostatečně jistí, že se nám vyplatí do vzorků BeO přidávat železo místo niobu, bude třeba provést více podobných měření s železem a niobem pro potvrzení výsledků.

Zdroje

Wikipedia contributors. "Accelerator mass spectrometry." *Wikipedia, The Free Encyclopedia*. Wikipedia, The Free Encyclopedia, 6 Sep. 2023. Web. 11 Dec. 2024.

Wikipedia contributors. "R (programming language)." *Wikipedia, The Free Encyclopedia*. Wikipedia, The Free Encyclopedia, 7 Jan. 2024. Web. 7 Jan. 2024.

„Oxid beryllnatý.“ *Wikipedie: Otevřená encyklopedie*. 3. 10. 2023, 20:58 UTC. 7. 01. 2024, 09:43 https://cs.wikipedia.org/w/index.php?title=Oxid_beryllnat%C3%BD&oldid=23237914.

„RStudio.“ *Wikipedie: Otevřená encyklopedie*. 3. 02. 2023, 17:21 UTC. 7. 01. 2024, 09:25 <https://cs.wikipedia.org/w/index.php?title=RStudio&oldid=22408159>.

Chemické Listy. Online PDF. 2023, roč. 117, č. 2. 2023. ISSN 0009-2770. Dostupné z: <http://www.chemicke-listy.cz/ojs3/index.php/chemicke-listy/article/view/4195>. [cit. 2023-12-17].

ETH ZÜRICH. Ion Beam Physics. Online. Dostupné z: <https://ams.ethz.ch/>. [cit. 2023-12-17].

IONPLUS. Ionplus [online]. [cit. 2023-12-17]. Dostupné z: <https://www.ionplus.ch/>

Dayah, Michael. Periodic Table - Ptable. Ptable, 1 Oct. 1997, ptable.com. Accessed 7 Jan. 2024

Chemické Listy. 2023, roč. 117, č. 2. 2023. ISSN 0009-2770

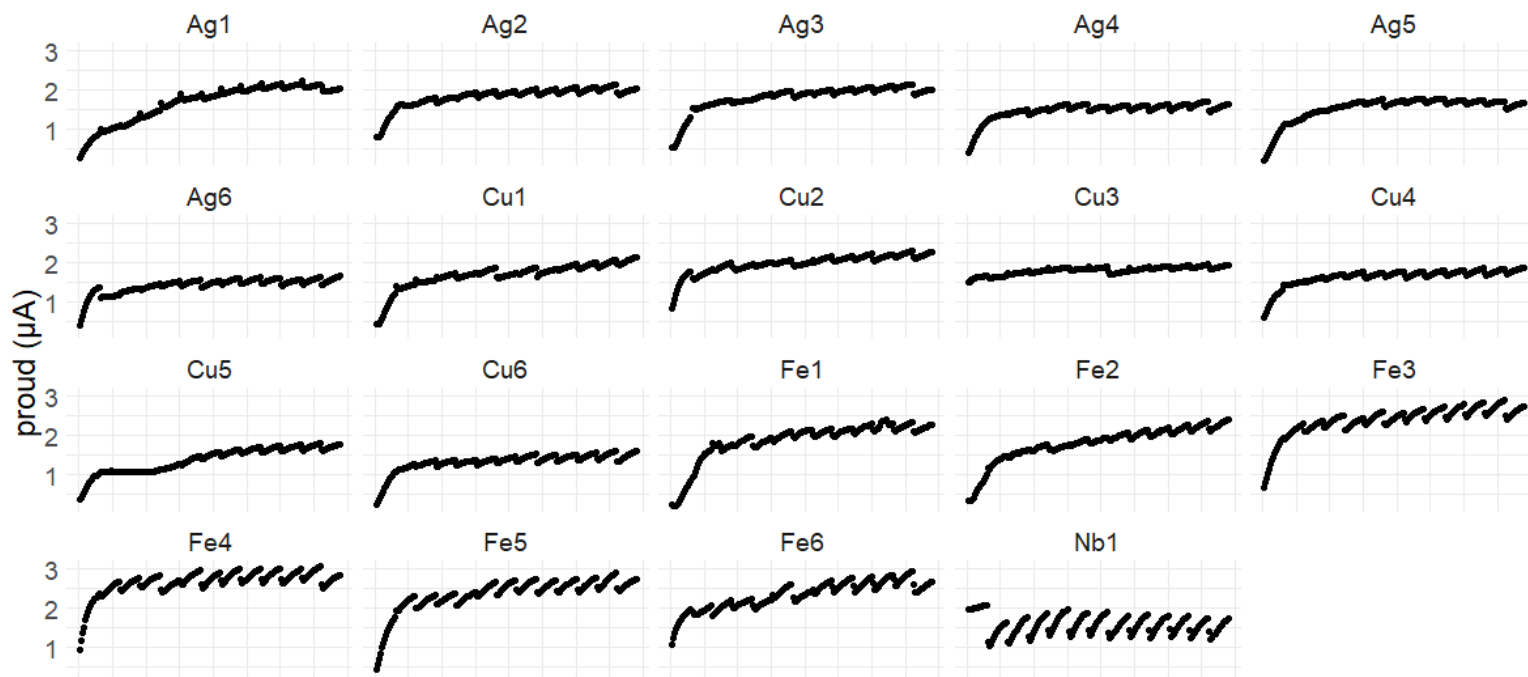
Přílohy

- 1) Tabulka s průměrnými proudy pro jednotlivé vzorky. Zelená barva ukazuje vzorky s vyšším proudem, červená barva naopak s nižším proudem.

kód	kov	kov/BeO	průměrný proud (μA)
Cu1	měď	0.71	1.165
Cu2	měď	0.86	1.365
Cu3	měď	2.69	1.237
Cu4	měď	4.23	1.122
Cu5	měď	7.42	0.949
Cu6	měď	8.38	0.915
Fe1	železo	0.82	1.287
Fe2	železo	1.59	1.235
Fe3	železo	2.35	1.629
Fe4	železo	4.76	1.814
Fe5	železo	7.07	1.616
Fe6	železo	8.76	1.603
Ag1	stříbro	0.69	1.150
Ag2	stříbro	1.85	1.257
Ag3	stříbro	2	1.245
Ag4	stříbro	6.97	1.054
Ag5	stříbro	9.54	0.980
Ag6	stříbro	4.43	1.013
Nb1	niob	4.05	1.082

2) Grafy pro jednotlivé vzorky ukazující proud v průběhu měření

Proud iontů ze vzorků



Všechna naměřená data najdete v dokumentu s názvem 10217 - Auto Measurement - Be-kovy.

3) Fotky z přípravy a měření vzorků

a. Křemenné nádoby na vzorky



b. Zápisky z přípravy vzorků

Plan

BeO/Cu	BeO	Mbe + Cu - 0,0005mg
	Mpe	Mcu
1:1	3mg	3mg
1:2	2mg	4mg
1:3	1,5mg	4,5mg
1:4	1mg	5mg
1:5	1mg	5mg
1:6	1mg	6mg

Vzorky

	Váha křemenné nádoby	m BeO	Cu [mg]	BeO:Cu
1.	1307,80 mg	7,50 mg	4,05	1:2,89
2.	1297,04 mg	0,87 mg	3,68	1:4,23
3.	1304,36 mg	1,17 mg	1,89	1:8,38
4.	1294,55 mg	1,53 mg	0,74 mg	1:0,48
5.	1298,63 mg	1,40 mg	2,67	1:1,86
6.	1266,03 mg	0,74 mg	5,86 mg	1:7,42

NAŠE SPOLEČNÁ ENERGIE DOKÁŽE UŽASNÉ VĚCI

c. Zařízení MILEA



d. Měření vzorků

