

UNIVERZITA KOMENSKÉHO V BRATISLAVE
FAKULTA MATEMATIKY, FYZIKY A INFORMATIKY
FYZIKÁLNY ÚSTAV SLOVENSKEJ AKADEMIE VIED
ODDELENIE JADROVEJ FYZIKY

Mgr. Ivan Siváček

Autoreferát dizertačnej práce

HMOTNOSTNÁ SPEKTROSKOPIA EXOTICKÝCH
JADIER

na získanie vedecko-akademickej hodnosti *philosophiae doctor*
v odbore doktorandského štúdia:
4.1.5 Jadrová a subjadrová fyzika

Bratislava, 2014

Dizertačná práca bola vypracovaná v dennej forme doktorandského štúdia na Fyzikálnom ústave Slovenskej akadémie vied v Bratislave a v rámci pôsobenia doktoranda v Laboratóriu jadrových reakcií G.N. Flerova v Spojenom ústave jadrových výskumov v Dubne, Ruskej Federácii.

Predkladateľ: **Mgr. Ivan Siváček**
Fyzikálny ústav SAV, Oddelenie jadrovej fyziky
Dúbravská cesta 9, 845 11 Bratislava

Školiteľ: **Ing. Ján Kliman, DrSc.**
Fyzikálny ústav SAV, Oddelenie jadrovej fyziky
Dúbravská cesta 9, 845 11 Bratislava

Oponenti: **Prof. Ing. Vladimír Nečas, PhD.**
Slovenská technická univerzita v Bratislave, Fakulta
elektrotechniky a informatiky, Katedra jadrovej fyziky
a techniky, Ilkovičova 3, 812 19 Bratislava

Doc. RNDr. Karol Holý, CSc.
Univerzita Komenského v Bratislave, Fakulta matematiky,
fyziky a informatiky, Katedra jadrovej fyziky a biofyziky,
Mlynská dolina, 842 48 Bratislava

Ing. Štefan Gmuca, CSc.
Fyzikálny ústav SAV, Oddelenie jadrovej fyziky,
Dúbravská cesta 9, 845 11 Bratislava

Autoreferát bol rozoslaný dňa _____.

Obhajoba dizertačnej práce sa koná dňa _____ o _____ hod. na Fyzikálnom ústave Slovenskej akadémie vied v Bratislave, Dúbravská cesta 9, 845 11 Bratislava v miestnosti 295 budovy Chemického ústavu, blok C pred komisiou pre obhajobu dizertačnej práce doktorandského štúdia vymenovanou dňa _____ predsedom spoločnej odborovej komisie vo vednom odbore 4.1.5 Jadrová a subjadrová fyzika.

Predseda spoločnej odborovej komisie:

Prof. RNDr. Jozef Masarik, DrSc.
Fakulta matematiky, fyziky a informatiky UK
Mlynská dolina, 842 48 Bratislava

Obsah:

1. Úvod
2. Ciele dizertačnej práce
3. Súčasný stav problematiky
4. Hmotnostný spektrometer MASHA
5. Štúdium registrácie častíc metódou Monte Carlo
6. Určenie základných charakterítik spektrometra MASHA
7. Hlavné výsledky dizertačnej práce
8. Záver
9. Zoznam literatúry
10. Zoznam publikovaných prác
11. Summary

1. Úvod

Od usporiadania chemických prvkov do periodickej tabuľky podľa ich chemických vlastností D.I. Mendelejevom začali zaujímať vedcov jej prázdne miesta. S objavom izotopov F. Soddyho pred vyše 100 rokmi [1] a vytvorením prvého umelého prvku – technécia S. Perreiom a E. Segrém v roku 1936 [2] sa objavili možnosti umelo vytvárať nové chemické prvky a ich izotopy. Horná hranica výskytu chemických prvkov je ohraničená spontánnym štiepením jadier ťažších ako ^{238}U ($Z=92$). Prvé chemické prvky ťažšie ako urán – transurány boli identifikované v spáde po výbuchoch atómových a vodíkových bômb a v jadrových reaktoroch. Prvý umelo vytvorený prvok bolo mendeleevium ($Z=101$), ktoré bolo v roku 1955 vytvorené v Lawrence Berkeley National Laboratory tímom okolo S.G. Thompsona [3]. Od vtedy je jednou z priorit v poznávaní prírody výskum vlastností atómových jadier a ich vnútornej štruktúry.

Súčasná technológia v jadrovej fyzike ponúka možnosti experimentálne poznávať hranice existencie atómových jadier v extrémnych podmienkach – takzvaných exotických jadier. Urýchľovače nabitých častíc a iónov umožňujú v jadrových reakciách vytvárať izotopy počtom neutrónov vzdialené od línie β -stability. Výskum v tejto oblasti umožňuje študovať princípy vzniku chemických prvkov a ich izotopov v prírode, vlastnosti jadrových síl v závislosti od počtu neutrónov a protónov a v poznávaní kolektívnych vlastností jadier pomocou vlastností jednotlivých nukleónov [4]. Nemenej zaujímavou otázkou je existencia „ostrova stability“ v oblasti najťažších známych prvkov. Týmto pojmom sa označujú jadrá, u ktorých sa prejavuje zvýšená stabilita vzhľadom k prítomnosti uzavretej vrstvy neutrónov a protónov. Teoretické modely predpokladajú jeho polohu v tabuľke izotopov v regióne superťažkých jadier, v rozmedzí $Z = 114 - 124$, $N = 172 - 184$ [5].

Hmotnostný spektrometer MASHA [6] je nové zariadenie Laboratória jadrových reakcií G.N. Flerova v SÚJV Dubna určené na spektrometriu alfa častíc a štiepných fragmentov z rozpadu superťažkých prvkov so súčasťou priamou identifikáciou ich hmotnosti metódou hmotnostnej separácie. Zariadenie je na zväzku iónov cyklotrónu U400M od roku 2010. Rádioaktívne sekundárne zväzky sú na spektrometri MASHA vytvárané v jadrových reakciách ťažkých iónov na princípe metódy ISOL (isotope separation on-line) [7].

2. Ciele dizertačnej práce

Cieľom dizertačnej práce je experimentálne určenie základných charakteristík hmotnostného spektrometra MASHA (Mass Analyzer of Super-Heavy Atoms), určeného na stanovenie izotopického rozdelenia ťažkých a veľmi ťažkých produktov jadrových reakcií. Cieľ bude dosiahnutý experimentálnym určením:

- účinnosti spektrometra v závislosti od hmotnosti a náboja analyzovaných jadier
- časovej odozvy spektrometra
- hmotnostného rozlíšenia spektrometra
- izotopického rozdelenia exotických jadier – produktov jadrových reakcií s ťažkými iónmi so súčasou identifikáciou ich alfa rozpadov.

3. Súčasný stav problematiky

Doposiaľ známe informácie o hmotnosti pozorovaných superťažkých jadier pochádzajú z experimentov na kinematických separátoroch. Tieto jadrá sú vytvárané v reakciách úplnej fúzie ťažkých iónov s terčami, pri čom v rôznych laboratóriách sú využívané rôzne kombinácie projektil – terč. Produkty týchto jadrových reakcií sú následne separované a implantované do polohovo-citlivého spektrometrického detektora, v ktorom sa po implantácii hľadajú korelácie (α - α , α - γ prípadne α -zostatky po výpare (evaporation residues)), alebo rozpadové reťazce k známym izotopom. Špičkou vo výskume superťažkých prvkov sú kinematické separátory SHIP v GSI Darmstadt [8], GFRS vo FLNR, SÚJV Dubna [9], GARIS v RNC Wako [10] a plynom plnený separátor v LBNL, Berkeley [11]. Doposiaľ najťažším pozorovaným prvkom je $Z = 118$ [12], pokus o vytvorenie prvku so $Z = 120$ bol zatiaľ neúspešný [13].

Časové charakteristiky kinematických separátorov závisia iba od doby prieletu produktov reakcií iónovo-optickým systémom. Touto metódou je preto možné pripravovať rádioaktívne zväzky izotopov s dobami života až na úrovni $\sim \mu\text{s}$. Nevýhodou sú horšie charakteristiky z hľadiska uhlovej a energetickej emitancie sekundárnych zväzkov spolu s nízkymi intenzitami vzhľadom k potrebnej hrúbke terčov. Z toho dôvodu sú možnosti precíznej hmotnostnej separácie obmedzené. Často sú využívané rotačné terče pre zabezpečenie dostatočného chladenia terča pri vysokých intenzitách primárnych zväzkov. Pre vylepšenie iónovo-optických charakteristík sekundárnych zväzkov sa používajú akumulčné prstence a iónové pasce.

Metódou ISOL je možné pripraviť intenzívne sekundárne zväzky s dobrými iónovo-optickými charakteristikami, avšak za cenu výrazne horších časových charakteristík. Takýto typ zariadenia sa skladá z terča pre produkciu rádioaktívnych jadier, termalizátora tiež označovaného aj „catcher“, iónového zdroja a iónovo-optického systému. Fyzikálne procesy v týchto častiach ISOL hmotnostného separátora umožňujú vysokú selektivitu chemických prvkov pre vytváranie sekundárnych zväzkov. Termalizovanie (zabrzdenie a neutralizácia atómov – produktov jadrových reakcií) a následná ionizácia v iónovom zdroji spolu s urýchlením vytvárajú sekundárne zväzky nízkych energií s dobrými iónovo-optickými parametrami. Takéto zväzky môžu byť následne hmotnostne separované s veľmi vysokým hmotnostným rozlíšením, v niektorých prípadoch až izobaricky [14].

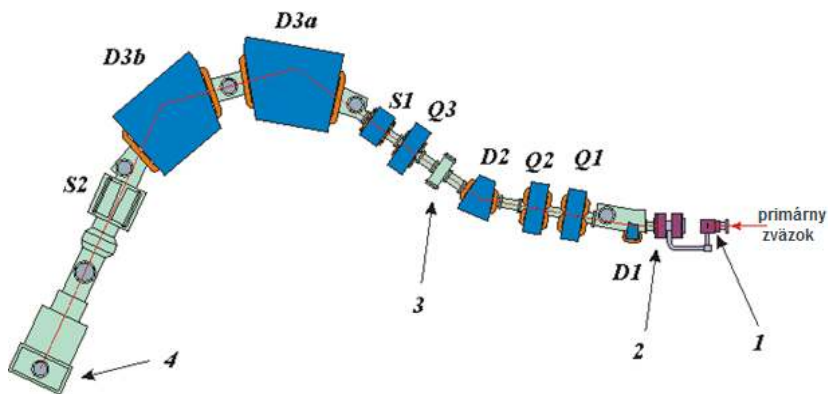
Princípom metódy ISOL je zabrzdzenie (presnejšie termalizovanie) produktov jadrových reakcií, ionizácia na požadovaný ionizačný stupeň (obyčajne 1+, alebo 1-) a následné urýchlenie na nízke energie (niekoľko desiatok keV) pre hmotnostnú separáciu. Z toho dôvodu je možné takto vytvárať rádioaktívne zväzky v prakticky akýchkoľvek jadrových reakciách – či už úplnej fúzie, trieštenia, prenosu, alebo štiepenia. Termalizácia prebieha najčastejšie v horúcich termalizátoroch (hot catcher) [15], alebo v plynových článkoch [16,17]. Horúci termalizátor je nahrievaný na vysoké teploty v závislosti od materiálu, pri čom emituje prchavé prvky. Môže byť spojený priamo s terčom – resp. ako hrubý, vysokoteplotný terč. V plynových termalizátoroch je možné pripraviť aj zväzky prvkov, ktoré nie je možné vzhľadom k ich chemickej povahe termalizovať vo vysokoteplotných termalizátoroch.

Inou dôležitou vlastnosťou ISOL metódy je chemická selektivita. Vysoká selektivita je dosiahnuteľná laserovou ionizáciou [17]. Často sú tiež využívané aj plazmové a ECR iónové zdroje, kde pôsobí nárazová ionizácia elektrónov urýchľovaných vysokofrekvenčným poľom. Niektoré prvky s veľkou elektrónovou afinitou, alebo ionizačným potenciálom je možné ionizovať vo vysokoteplotných iónových zdrojoch na princípe povrchovej termoionizácie. V požadovanom iónovom stave sú produkty jadrových reakcií urýchľované rozdielom elektrických potenciálov a injektované do iónovo-optického systému, kde sú hmotnostne separované. Následne môžu byť požadované izotopy implantované na povrch spektrometrických detekčných systémov, alebo dodatočne urýchlené na vysoké energie až niekoľko desiatok MeV na nukleón [18].

Hmotnostné separátory fungujúce na princípe ISOL sú pomerne rozšírené. Každý je špecifický, niektoré sú určené na presný cieľ, iné sú zamerané na vysokú variabilitu sekundárnych zväzkov. Hmotnostný spektrometer ISOLDE v CERN patrí medzi svetovú špičku. Vysoké hmotnostné rozlíšenie $M/\Delta M = 15\,000$ spolu s intenzívnymi sekundárnymi zväzkami, variabilitou iónových zdrojov a možnosťou dodatočného urýchlenia až do 2,2 MeV/u z neho robí vyhľadávané medzinárodné pracovisko pre výskum jadrovej štruktúry. Leuvenský hmotnostný separátor LISOL dosahuje hmotnostné rozlíšenie $M/\Delta M = 1500$, avšak vďaka plynovému termalizátoru s technológiou IGISOL [17] je schopný pripravovať sekundárne zväzky izotopov s dobami života na úrovni ~ms. Predmetom tejto dizertačnej práce je experimentálne určenie základných charakteristík hmotnostného spektrometra MASHA.

4. Hmotnostný spektrometer MASHA

MASHA (obrázok 1) sa skladá z terčového bloku s vysokoteplotným uhlíkovým termalizátorom. K dispozícii sú pevné terče a rotačný terč. Pred terčom sa nachádza blok diagnostiky polohy a energie primárneho zväzku. Nasleduje ECR iónový zdroj (electron cyclotron resonance), v ktorom sú plynné (resp. prchavé) produkty jadrových reakcií s vysokou účinnosťou ionizované na stupeň $1+$ a urýchlené na energiu 38 keV [19]. Iónovo-optický systém s hmotnostným rozlíšením $M/\Delta M = 1300$ [20] je optimalizovaný pre separáciu izotopov až po $A = 300$ s prvkami zabezpečujúcimi korekcie fokusácie zväzku druhého rádu. Vo finálnej fokálnej rovine sa nachádza detekčný systém pozostávajúci z kremíkového multistripového detektora studňovej geometrie, lamelového detektora stabilných iónov a kremíkového pixelového trekového spektrometrického detektora s vysokým bodovým rozlíšením pre sledovanie trajektórií nabitých častíc.



Obr. 1: Schéma hmotnostného separátora MASHA.

- 1 – terč a termalizátor
- 2 – ECR iónový zdroj
- 3 – Prvotný fokálny bod F1
- 4 – Hlavná fokálna rovina s detektormi

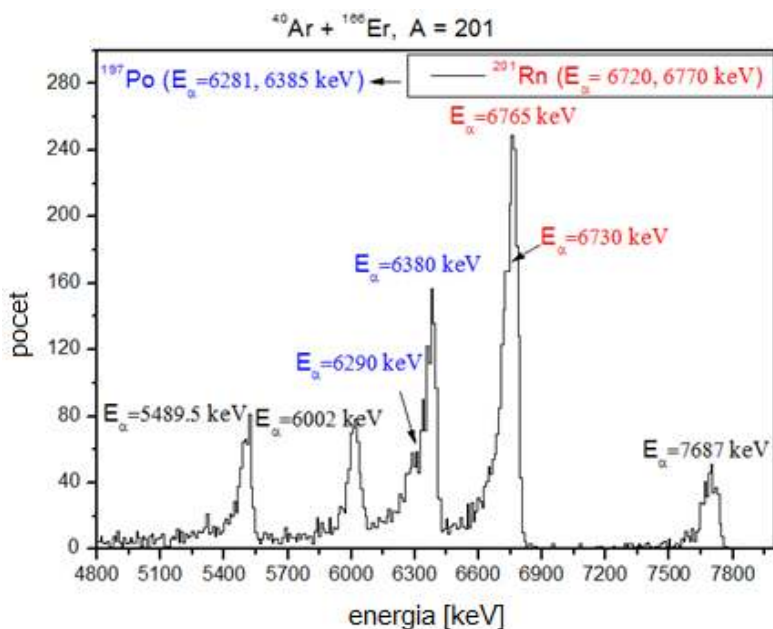
Po pripojení na zväzok cyklotrónu U400M v Laboratóriu jadrových reakcií v roku 2010 boli na spektrometri MASHA realizované testovacie experimenty pre určenie jeho základných charakteristík. Pomocou kalibrovaných tokov inertných plynov do komory ECR iónového zdroja bola

zistená účinnosť ionizácie a separácie v závislosti od náboja jadra a taktiež hmotnostné rozlíšenie. Nasledoval experiment stanovenia transportnej účinnosti primárneho zväzku ^{40}Ar v experimente bez terča. V reakciách úplnej fúzie iónov ^{40}Ar so samáriovými a erbiovými terčami boli hmotnostne separované a spektrometricky sledované neutrónovo-deficitné izotopy ortuti (chemický analóg kopernicia [21]) a radónu. Bola určená časová odozva spektrometra a jeho účinnosť. Určiť hmotnosť izotopu ^{283}Cn vytvoreného v reakcii ^{48}Ca s ^{238}U sa v prvých experimentoch nepodarilo. Bola však rozpracovaná metodika registrácie neutrónovo-nadbytočných izotopov radónu s $A \leq 232$ vytvorených v reakciách mnohonukleónového prenosu medzi projektilom ^{48}Ca a terčom ^{232}Th [22]. V budúcnosti čaká hmotnostný spektrometer MASHA presun na zväzok cyklotrónu U400, na ktorom sa v minulosti už podarilo syntetizovať a sledovať rozpady izotopov superťažkých prvkov až po $Z = 118$ [12]. Pri tejto príležitosti bude implementovaný aj plynový termalizátor [16].

5. Štúdium registrácie častíc metódou Monte Carlo

V simulačnom balíku Geant4 (geometry and tracking) bola vytvorená kópia kremikového fokálneho multistripového detektora pre lepšie pochopenie sprievodných efektov pri registrácii nabitých častíc metódou Monte Carlo. Vytvorením programu simulácie bola ohodnotená pravdepodobnosť registrácie alfa častíc z rozpadu implantovaných jadier pre každý strip studňového detektora a pravdepodobnosť zachytenia alfa častice emitovanej prvým a druhým dcérsym jadrom v rozpadovom reťazi.

Simuláciou energetickej kalibrácie fokálneho detektora bola ohodnotená korekcia potrebná pre spresnenie energie pík alfa častíc kalibračného žiariča ^{226}Ra . Vzhľadom k prechodu žiarenia cez ochrannú vrstvu žiariča a mŕtvu vrstvu v detektore bola skutočná energia registrovaná detektorom zmenšená o 18 – 82 keV v závislosti od geometrického usporiadania.



Obr. 2: Amplitúdové spektrum alfa častíc registrovaných vo fokálnom detektore počas experimentu syntézy neutrónovo-deficitných izotopov radónu. V spektre sú zobrazené aj kalibračné píky z rozpadového radu ^{226}Ra .

V nameraných amplitúdových spektrách alfa častíc bola pozorovaná deformácia píku smerom k nízkym energiám (obrázok 2). Štúdiom efektov prebiehajúcich pri registrácii alfa častíc vo fokálnom detektore bol pomocou Monte Carlo simulácií stanovený príspevok jednotlivých procesov k deformácii píku – prechod necitlivými vrstvami detektora, delenie náboja medzi susedné stripy a difúznosť hraníc mŕtvej vrstvy.

Simuláciami trajektórií nabitých častíc v trekovom pixelovom detektore bolo určené energetické spektrum spolu so spektrom dĺžok stôp β -častíc z rozpadu neutrónovo-nadbytočných izotopov $^{229-232}\text{Rn}$. Porovnaním simulovaných spektier s reálnymi bola stanovená prahová energia oddeľujúca šumový signál od skutočného elektrónového spektra. Analýzou simulovanej a experimentálne získanej závislosti energie deponovanej v stope od dĺžky stopy pre nabité častice boli identifikované rôzne typy častíc registrovaných v trekovom detektore. Na koniec bola stanovená pravdepodobnosť identifikácie rozpadu neutrónovo-nadbytočných izotopov $^{229-232}\text{Rn}$ podľa registrácie 4 stôp β -častíc vychádzajúcich z jedného miesta v pixelovom detektore. Tieto stopy boli s definovanými parametrami osobitne pre každý izotop – minimálna a maximálna energia, minimálna dĺžka stopy a časový interval zodpovedajúci 4-násobku doby polpremeny.

6. Určenie základných charakteristík spektrometra MASHA

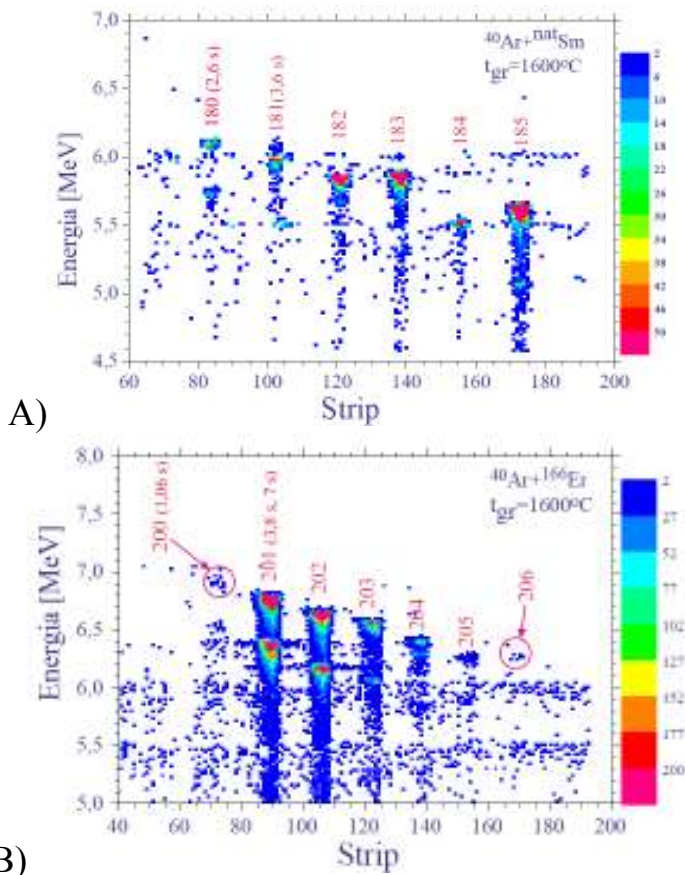
Pre vytváranie sekundárnych zväzkov exotických jadier je dôležité poznať charakteristiky zariadenia na zväzku. Je potrebné poznať hmotnostné rozlíšenie iónovo-optického systému, s akým dokáže magnetický analyzátor oddeliť hmotnosti susedných izotopov a ako ich dokáže fokusovať do hmotnostných píkov vo fokálnej rovine. Ďalej je potrebné poznať účinnosti jednotlivých procesov, resp. celkovú účinnosť spektrometra. Tento údaj je dôležitý z hľadiska stanovovania výťažkov a pri hľadaní zriedkavých udalostí, akými sú napríklad syntéza a následný rozpad izotopov superťažkých prvkov. Táto charakteristika je priamo závislá od časovej odozvy spektrometra, ktorá má zásadný vplyv pri formovaní sekundárnych zväzkov krátkožijúcich izotopov. Určuje, aká časť jadier vytvorených v jadrových reakciách sa rozpadne počas transportu do fokálnej roviny spektrometra.

V práci sú popísané experimenty s kalibrovanými tokmi inertných plynov, ktorých výsledkom je určenie efektívnosti ionizácie v závislosti od protónového čísla inertného plynu, časová konštanta poklesu tlaku v komore termalizátora pri odsávaní plynov cez extrakčný otvor ECR iónového zdroja, závislosť tejto konštanty od hmotnostného čísla inertného plynu a hmotnostné rozlíšenie iónovo-optického systému.

V experimentoch na zväzku ťažkých iónov z cyklotrónu U400M bola určená celková účinnosť hmotnostného spektrometra MASHA z výťažkov krátkožijúcich, neutrónovo-deficitných izotopov ortuti $^{180,181,182}\text{Hg}$ z reakcie $^{144}\text{Sm}(^{40}\text{Ar}, xn)^{184}\text{Hg}^*$. Ďalej bola určená doba difúzie izotopov ortuti $^{179,180,181}\text{Hg}$ z termalizátora spolu s ich transportom do ECR iónového zdroja. Tento proces determinuje časovú odozvu spektrometra pri formovaní sekundárnych zväzkov exotických jadier.

Sledovaním výťažkov jadrových reakcií $^{nat}\text{Sm}(^{40}\text{Ar}, xn)^{y-xn}\text{Hg}$ a $^{166}\text{Er}(^{40}\text{Ar}, xn)^{206-xn}\text{Rn}$ pri energii zväzku 270 MeV boli kremíkovým multistriповým detektorom identifikované hmotnostné a energetické spektrá produktov týchto reakcií. V prípade samáriového terča bola prepočítaná

energia v strede hrúbky terča 255 MeV a pri sledovaní výťažkov neutrónovo-deficitných izotopov Rn v reakcii primárneho zväzku ^{40}Ar s erbioým terčom bola energia zväzku regulovaná absorbátormi – titánovými fóliami rôznych hrúbok na energie 202, 217 a 231 MeV. Dvojdimenzionálne energetické a hmotnostné spektrá z rozpadu izotopicky rozdelených výťažkov týchto reakcií sa nachádzajú na obrázku 3.



Obr. 3: Dvojrzmerné spektrum alfa častíc z fokálneho detektora separátora MASHA A) izotopov ortuti a B) izotopov radónu pri energii zväzku 202 MeV. Na osi x je číslo stripu reprezentujúce hmotnosť, na osi y je energia alfa častice. Farebná škála označuje počet zaregistrovaných alfa častíc.

Z projekcie týchto dvojrozmerných spektier na os x – číslo stripu boli vytvorené hmotnostné spektrá. Z nich boli stanovené hmotnostné rozlíšenia $M/\Delta M$ pre hmotnostné píky zodpovedajúce hmotnosti M a šírkou píku v polovičnej výške ΔM . Z projekcií jednotlivých hmotnostných píkov na os y – energiu α -častíc boli vytvorené energetické spektrá z α -rozpadu hmotnostne separovaných jadier sekundárneho zväzku. V týchto spektrách boli identifikované energetické píky zodpovedajúce rozpadu izotopicky rozdelených produktov sledovaných jadrových reakcií. V niektorých prípadoch boli v spektrách identifikované aj píky z rozpadu ich dcérskych produktov premeny. Týmto bola potvrdená správnosť hmotnostnej kalibrácie a metodiky experimentálneho merania hmotnosti so súčasou identifikáciou rozpadov exotických jadier – produktov jadrových reakcií s ťažkými iónmi. Hmotnostný spektrometer MASHA je pripravený k priamemu určovaniu hmotností izotopov superťažkých prvkov so súčasou spektrometrickou identifikáciou alfa častíc a štiepných fragmentov z ich rozpadu.

7. Hlavné výsledky dizertačnej práce

- Bolo zistené, že geometrická účinnosť fokálneho detektora studňovej geometrie pre registráciu alfa častíc z rozpadu implantovaných jadier je v strednej časti fokálnej roviny 92% a v krajných častiach 95%.
- Bolo zistené, že pravdepodobnosť registrácie alfa častice z rozpadu implantovaného jadra v píku je 90% v strednej časti fokálnej roviny, na okrajoch fokálnej roviny je to 93%.
- Pravdepodobnosť registrácie druhej alfa častice v rade – z rozpadu dcérskeho jadra je v strednej časti fokálnej roviny 70%, v okrajových častiach je to 85%.
- Pravdepodobnosť registrácie tretej alfa častice v rozpadovom rade je v strednej časti fokálnej roviny 60%, v okrajových častiach fokálnej roviny je 80%.
- Bola stanovená korekcia skutočnej registrovanej energie pre kalibračné píky spektrometrického kalibračného žiariča ^{226}Ra registrované v stripoch fokálneho studňového detektora v rozmedzí 18 – 82 keV v závislosti od geometrického usporiadania.
- Bolo zistené, že deformáciu píkov alfa častíc smerom k nízkym energiám spôsobuje prechod žiarenia mŕtvou vrstvou detektora a difúznosťou jej hraníc, delenie vytvoreného náboja medzi susedné stripy a povrchová hlinniková štruktúra elektród tvoriaca stripy.
- Porovnaním experimentálnych údajov s Monte Carlo simuláciami bolo zistené, že β -častice z rozpadových radov izotopov $^{229-232}\text{Rn}$ v 300 μm hrubom kremíkovom pixelovom detektore nie je možné podľa energetických spektier odlišiť.
- Bola určená prahová hranica 60 keV, podľa ktorej je možné odlišiť šumové signály od spektra β -častíc v pixelovom detektore.
- Bola určená pravdepodobnosť identifikácie izotopov $^{229-232}\text{Rn}$ podľa registrácie 4 β -častíc emitovaných z jedného pixelu v trekovom detektore s definovanými parametrami.

- Podľa závislosti deponovanej energie v stope od dĺžky stopy bola potvrdená správnosť identifikácie rôznych tipov nabitých častíc a ich charakteristických stôp v trekovom detektore.
- Bola stanovená závislosť účinnosti ionizácie inertných plynov v ECR iónovom zdroji od ich protónového čísla, ktorá pre atómy xenónu predstavuje 84%.
- Bola určená účinnosť konverzie primárneho zväzku ^{40}Ar na sekundárny $25 \pm 5 \%$.
- Bola stanovená celková účinnosť spektrometra MASHA zo sumárneho výťažku 2n, 3n a 4n kanála reakcie $^{144}\text{Sm}(^{40}\text{Ar}, xn)^{184}\text{Hg}^*$ na $7 \pm 1,4 \%$.
- Bolo zistené, že pri odsávaní plynov z komory termalizátora cez extrakčný otvor ECR iónového zdroja sa v komore termalizátora znižuje tlak xenónu (prírodná izotopická zmes) s časovou konštantou $\tau = 1,56 \text{ s}$.
- Hodnota tejto časovej konštanty je úmerná odmocnine zo strednej hmotnosti prírodnej izotopickej zmesi inertného plynu \sqrt{M} .
- Meraním časovej závislosti nárastu a poklesu aktivity vo fokálnom detektore pri prerušovaní sekundárneho a primárneho zväzku iónov deflektorom a následnou dekonvolúciou časových závislostí bola určená doba emisie rádioaktívnych izotopov ortuti s $A = 179, 180$ a 181 z termalizátora spolu s ich transportom do iónového zdroja na $\langle \tau_{\text{dif}} \rangle = 1,8 \pm 0,3 \text{ s}$.
- Z hmotnostného spektra prírodnej zmesi izotopov xenónu $^{\text{nat}}\text{Xe}$ registrovaného lamelovým detektorom bolo určené hmotnostné rozlíšenie $M/\Delta M = 1300$ pre hmotnosť $A = 132$.
- Sledovaním výťažkov reakcie $^{\text{nat}}\text{Sm}(^{40}\text{Ar}, xn)^y\text{-xn}\text{Hg}$ pri energii primárneho zväzku na terči 255 MeV bolo určené hmotnostné rozdelenie neutrónovo-deficitných izotopov ortuti a podľa identifikácie píkov ich α -rozpadu vo fokálnom detektore bola potvrdená správnosť izotopickej analýzy.

- Z hmotnostných píkov tvorených registrovanými α -časticami izotopicky rozdelených produktov reakcie $^{nat}\text{Sm}(^{40}\text{Ar}, xn)^{y-xn}\text{Hg}$ bolo určené hmotnostné rozlíšenie $M/\Delta M = 1200$ pre hmotnosť $A = 185$.
- Sledovaním výťažkov reakcie $^{166}\text{Er}(^{40}\text{Ar}, xn)^{206-xn}\text{Rn}$ pri energiách primárneho zväzku na terči 202 MeV, 217 MeV a 231 MeV bolo určené izotopické rozdelenie neutrónovo-deficitných izotopov radónu a podľa identifikácie píkov ich α -rozpadu vo fokálnom detektore bola potvrdená správnosť izotopickej analýzy.
- Z hmotnostných píkov tvorených registrovanými α -časticami izotopicky rozdelených produktov reakcie $^{166}\text{Er}(^{40}\text{Ar}, xn)^{206-xn}\text{Rn}$ bolo určené hmotnostné rozlíšenie $M/\Delta M = 1000$ pre hmotnosť $A = 201$.

8. Záver

Z hlavných výsledkov dizertačnej práce vyplýva, že hmotnostný spektrometer MASHA dosahuje na zväzku ťažkých iónov vlastnosti porovnateľné s obdobnými zariadeniami vo svete. Nakoľko jeho hlavným cieľom je priame určovanie hmotností superťažkých prvkov, jeho hmotnostné rozlíšenie musí byť dostatočné pre rozdelenie susedných hmotností okolo $A = 300$. Experimentami s tokmi inerných plynov do ECR iónového zdroja bolo zistené hmotnostné rozlíšenie $M/\Delta M = 1300$ pre izotop ^{132}Xe a následne z hmotnostných spektier tvorených registrovanými α -časticami z rozpadu rádioaktívnych izotopov ortuti a radónu bolo potvrdené vysoké hmotnostné rozlíšenie $M/\Delta M = 1200$ pre izotop ^{185}Hg a $M/\Delta M = 1000$ pre izotop ^{201}Rn . Takéto hmotnostné rozlíšenie predstavuje $\Delta M \sim 3$ stripy, so vzdialenosťou susednej hmotnosti na fokálnej rovine ~ 14 stripov pri hmotnosti $A = 300$. S týmito parametrami je možné nielen presne určiť hmotnosť, ale aj nasmerovať sekundárny zväzok do okrajových častí fokálnej roviny. Ako bolo zistené z výsledkov Monte Carlo simulácií, týmto spôsobom je možné výrazne zvýšiť pravdepodobnosť registrácie rozpadového reťazca viacerých α -častíc.

Nakoľko bolo preukázané, že kopernícium ($Z = 112$) je chemickým analógom ortuti [23], experimenty stanovujúce celkovú účinnosť a časovú odozvu boli vykonané pomocou krátkožijúcich, neutrónovo-deficitných izotopov ortuti z jadrovej reakcie $^{144}\text{Sm}(^{40}\text{Ar}, xn)^{184}\text{Hg}^*$. Doba difúzie produktov reakcií z termalizátora je spolu s ich transportom do ECR iónového zdroja hlavnou časovou charakteristikou limitujúcou intenzitu krátkožijúcich sekundárnych zväzkov. Experimentálne bola táto veličina určená sledovaním α -rozpadu izotopov $^{179,180,181}\text{Hg}$ vo fokálnom detektore. Tredná hodnota predstavuje $\langle \tau_{\text{dif}} \rangle = 1,8 \pm 0,3$ s. V experimentoch na ISOLDE [24] bola zistená účinnosť pre izotopy ortuti 7,8% s časovou odozvou 30 s. Tu je však využívaný primárny zväzok protónov dopadajúci na vysokoteplotný hrubý terč ($170\text{g}/\text{cm}^2$) z roztopeného olova. Na hmotnostnom spektrometri MASHA sú k produkcii sekundárnych zväzkov využívané reakcie ťažkých iónov s tenkými terčami ($0,63\text{ mg}/\text{cm}^2$). Meraním sumárneho

výtazku 2n, 3n a 4n kanála reakcie $^{144}\text{Sm}(^{40}\text{Ar}, xn)^{184}\text{Hg}^*$ bola stanovená celková účinnosť na $7 \pm 1,4 \%$ pre izotopy $^{180,181,182}\text{Hg}$. Táto hodnota je charakteristická pre ISOL zariadenie so systémom vysokoteplotného termalizátora.

Spektrometer MASHA potvrdil v experimentoch sledovania výtazkov reakcie $^{166}\text{Er}(^{40}\text{Ar}, xn)^{206-xn}\text{Rn}$ správnosť izotopického rozdelenia exotických jadier produkovaných v tejto reakcii registrovaním ich alfa rozpadov v multistriptom fokálnom detektore. Tým boli zároveň otvorené možnosti výskumu nových izotopov radónu v neutrón-nadbytočnej oblasti izotopov. Bol navrhnutý spôsob, ako je možné pomocou kremikového pixelového detektora s vysokým priestorovým a energetickým rozlíšením identifikovať β -rozpad neutrónovo-nadbytočných izotopov radónu produkovaných v reakciách mnohonukleónového prenosu medzi projektilom ^{48}Ca a terčom ^{232}Th .

Bola preukázaná pripravenosť hmotnostného spektrometra MASHA nielen pre priame meranie hmotností supertiažkých jadier so súčasťou spektrometriou α -častíc a fragmentov spontánneho štiepenia, ale aj na nové možnosti využitia pri skúmaní vlastností nových, doposiaľ nepreskúmaných izotopov vzdialených od línie β -stability.

9. Zoznam literatúry

- [1] Experimental nuclear physics, edited by E. Segre, volume 1, New York – London 1953, ruský preklad
- [2] Heiserman, D. L. (1992). "Element 43: Technetium". Exploring Chemical Elements and their Compounds. New York: TAB Books. ISBN 0-8306-3018-X
- [3] S. Thompson et al., Physical Review **98** (1955)
- [4] M. Huyse: The Why and How of Radioactive-Beam Research, Lect. Notes Phys 651 (2004) 1-32
- [5] Gupta, M. (2010, April 13). The Superheavy Elements. SciTopics. Retrieved March 24, 2014, from http://www.scitopics.com/The_Superheavy_Elements.html
- [6] Yu.Ts. Oganessian et al., Nucl. Instr. Meth. B **204** (2003) 606
- [7] P. Van Duppen, Lect. Notes Phys. **700** (2006) 37
- [8] S. Hofmann: Techniques for the discovery of new elements, Nucl. Instr. Meth. B **126** (1997) 310
- [9] V.K. Utyonkov et al., Nucl. Instr. Meth. A **481** (2002) 71
- [10] K. Morita et al., Journal of Physical Society of Japan **76** (2007) 1
- [11] P.A. Ellison et al., Phys. Rev. Lett. **105** (2010)
- [12] Yu.Ts. Oganessian et al., Physical Review C **74** (2006)
- [13] Yu.Ts. Oganessian et al., Physical review C **79** (2009)
- [14] E. Kugler: The ISOLDE Facility, Hyperfine Interactions **129** (2000) 23
- [15] A.M. Rodin et al.: Mass-Spectrometer MASHA – Testing Results on Heavy Ion Beam, Preprint of the JINR, Dubna 2011, P15-2011-47
- [16] A.M. Rodin et al., Proceedings of EXON 2012, 1 – 6 October 2012, Vladivostok, Russia. ISBN: 978-981-4508-85-8. (<http://exon2012.jinr.ru>)
- [17] Yu. Kudryavtsev et al., Nucl. Instr. Meth. B **204** (2003) 336
- [18] J.A. Nolen: Radioactive beam facilities in North America, Nuclear Physics A **746** (2004) 9
- [19] A. Efremov et al.: Nucl Instr. Meth. B **204** (2003) 368
- [20] A.M. Rodin et al., Hyperfine Interact **196** (2010) 279
- [21] V. Pershina et al., Chemical Physics Letters, **365** (2002) 176

- [22] A.M. Rodin et al., *Hyperfine Interact* (2014), DOI 10.1007/s10751-014-1010-2
- [23] R. Eichler et al., *Nuclear Physics A* **787** (2007) 373
- [24] Lukic S. et al., *Nucl. Instr. Meth. A* **565** (2006) 784

10. Zoznam publikovaných prác

1. MASS-SPECTROMETRIC METHOD TO STUDY THE PROPERTIES OF HEAVY NUCLEI
A. M. Rodin , V. Belozеров, E. V. Chernysheva, G. G. Chubaryan, A. V. Gulyaev, A. V. Gulyaeva, S. N. Dmitriev, M. G. Itkis, J. Kliman, L. Krupa, Yu. Ts. Oganessian, V. S. Salamatin, **J. Sivacek**, S. V. Stepantsov, D. V. Vanin, S. A. Yukhimchuk
Proceedings of International Symposium on Exotic Nuclei EXON 2012, 1 – 6 October 2012, Vladivostok, Russia. ISBN: 978-981-4508-85-8.
2. Rodin A.M., Belozеров A.V., Vanin D.V., Dmitriev C.N., Itkis M.G., Kliman J., Krupa L., Lebedev A.N., Oganessian Yu.Ts., Salamatin V.S., **Sivacek I**, Tschernysheva E.V., Yukhimchuk S.A.
Mass-Spectrometer MASHA – Testing Results on Heavy Ion Beam, Preprint of the JINR, Dubna 2011(in Russian)
3. Родин А.М., Стрекаловский О.В., Белозеров А.В., Ванин Д.В., Веденеев В.Ю., Гуляев А.В., Гуляева А.В., Крупа Л., Кулик В.Д., Саламатин В.С., **Сивачек И.**, Степанцов С.В., Чернышева Е.В.
Монитор пучка заряженных частиц для сепаратора масс сверхтяжелых ионов. Инженерные и научные приложения на базе технологий National Instruments –2012: Сборник трудов XI международной научно-практической конференции, Москва 6-7 декабря 2012 г. – М.: ДМК-пресс, 2012. – стр. 441-443.
4. A. M. Rodin, A. V. Belozеров, E. V. Chernysheva, S. N. Dmitriev, A. V. Gulyaev, A. V. Gulyaeva, M. G. Itkis, J. Kliman, N. A. Kondratiev, L. Krupa, A. S. Novoselov, Yu. Ts. Oganessian, A. V. Podshibyakin, V. S. Salamatin, **I. Siváček**, S. V. Stepantsov, D. V. Vanin, V. Yu. Vedeneev, S. A. Yukhimchuk, C. Granja, S. Pospisil
Separation efficiency of the MASHA facility for short-lived mercury isotopes
Hyperfine Interact (2014), DOI 10.1007/s10751-014-1010-2

5. **I. Siváček**, J. Kliman, A.M. Rodin, L. Krupa, A.V. Belozеров, A.V. Podshibyakin, V.S. Salamatin, S.V. Stepantsov, V.Yu. Vedeneev
Possibilities of research for on-line mass separator with heavy ion reactions
Journal of Physics: Conference series (2014) (odovzdané do tlače)

6. Масс сепаратор “MASHA” - результаты тестов на пучке тяжелых ионов
Родин А.М., Белозеров А.В., Ванин Д.В., Веденеев В.Ю., Дмитриев С.Н., Иткис М.Г., Климан Я., Кондратьев Н.А., Крупа Л., Оганесян Ю.Ц., Сагайдак Р.Н., Саламатин В.С., **Сивачек И.**, Степанцов С.В., Чернышова Е.В., Юхимчук С. А.
Приборы и техника эксперимента (2014) (odovzdané do tlače)

12. Summary

The work is devoted to the issue of mass spectroscopy of exotic nuclei at mass spectrometer MASHA (Mass Analyzer of SuperHeavy Atoms). The main objective of this spectrometer is a direct mass measurement of superheavy nuclei by the method of mass separation in magnetic field together with the alpha particle and spontaneous fission fragments spectrometry. The aim of this work is to determine the basic characteristics MASHA mass separator by mass spectroscopy of exotic nuclei.

MASHA is the ISOL-type setup (isotope separation on-line) consisting of primary beam diagnostics part, target with hot catcher, ECR ion source, ion-optical mass analyzer and spectrometric detectors at the focal plane. Special attention was paid to detection systems. Processes occurring during the particle registration in focal plane detectors were investigated with Monte Carlo simulations together with experimental data analysis.

Geometrical efficiency for registering alpha decay of ions implanted in well-shape silicon strip detector was assessed to 92 – 95 % depending on position of implantation. Geometrical efficiency for registering alpha decay of 2nd and 3rd daughter nuclei in central part of focal plane is 70% and 60% respectively. This probability rises up to 85% and 80% in marginal parts of focal plane.

Effects that occur during alpha particles registration in silicon multistrip detector was explained. An 18 – 82 keV correction for the true registered energy from spectrometric ²²⁶Ra calibration source was made for every strip.

Detection possibilities for new neutron-rich radon isotopes with $A \leq 232$ with silicon pixelated track detector with high position and energy resolution was outlined. Energy and track-length spectra were analyzed comparing experimental data with Monte Carlo simulations resulting in 60 keV threshold energy for dividing noise and β -particle spectra, various particle tracks identification and estimation of probability for identification Rn decay in pixelated track detector.

Experiments with calibrated leaks of noble gasses into ECR ion source showed linear dependency of ionisation efficiency on proton number of noble gas. Ionisation and separation efficiency for natural composition of xenon isotopes was assessed to 84% with mass resolution $M/\Delta M = 1300$ for ¹³²Xe. Another experiments were performed with noble gasses. Hot catcher chamber

with noble gas atmosphere was evacuated thru extraction window of ECR ion source by turbomolecular pumps. It was observed, that the pressure were falling with time constant $\tau = 1.56$ s for Kr. The dependency of τ on mean atomic mass of noble gas is proportional to \sqrt{M} .

Overall efficiency was measured as total yield of 2n, 3n and 4n reaction channel of reaction $^{144}\text{Sm}(^{40}\text{Ar}, xn)^{184}\text{Hg}^*$. Efficiency of MASHA spectrometer for short-lived mercury isotopes is 7 ± 1.4 %. Measurement of short-lived mercury isotopes decay in the focal plane detector revealed diffusion time from hot catcher to ECR ion source of $^{179,180,181}\text{Hg}$ isotopes to $\langle \tau_{\text{diff}} \rangle = 1,8 \pm 0,3$ s.

For the verification of mass-to-charge calibration of ion-optical system yields of $^{\text{nat}}\text{Sm}(^{40}\text{Ar}, xn)^{y-xn}\text{Hg}$ and $^{166}\text{Er}(^{40}\text{Ar}, xn)^{206-xn}\text{Rn}$ reactions were observed. Spectrometric identification of alpha particle peaks in mass spectra verified the mass calibration for isotopic separation and confirmed readiness of mass spectrometer MASHA for direct mass measurement of isotopes of superheavy elements together with their alpha and fission fragments spectroscopy.