

FYZIKÁLNY ÚSTAV SLOVENSKEJ AKADÉMIE VIED

Oddelenie jadrovej fyziky

Mgr. Dušan Kamas

Autoreferát dizertačnej práce

**Šupkové efekty v jadrových reakciách úplnej fúzie
t'azkých iónov v oblasti zložených jadier s $Z \geq 80$
a $N=126$**

na získanie akademického titulu *philosophiae doctor*

v odbore doktorandského štúdia:

4.1.5. Jadrová a subjadrová fyzika

Bratislava, 2019

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. Dušan Kamas**
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

Študijný program: Jadrová a subjadrová fyzika

Študijný odbor: 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

Úvod.....	2
Ciele dizertačnej práce	3
Teoretický úvod.....	4
Určenie separačnej účinnosti hmotnostného spektrometra MASHA	6
Účinné prierezy evaporáčnych reziduí	8
Zhrnutie výsledkov.....	14
Referencie.....	15
Zoznam publikovaných prác	17
Summary	19

Úvod

V experimentoch zameraných na štúdium chemických vlastností supert ťažkých prvkov, bolo zistené, že 112-ty prvok (Cn) má zvýšenú prchavosť v porovnaní s ortuťou, čo je jeho chemický analóg. To umožnilo po prvýkrát vytvoriť program na štúdium vlastností supert ťažkých prvkov pomocou kombinácie metódy hmotnostnej spektrometrie a metódy ISOL (Isotope Separation On Line). Najvhodnejší izotop 112. prvku pre zvolenú metódu je ^{283}Cn , ktorého polčas rozpadu je 3,8 s [1]. Pri implementácii techniky ISOL v zariadení MASHA [2] sa ako testovacie reakcie vybrali $^{40}\text{Ar} + ^{144}\text{Sm}$ a $^{40}\text{Ar} + ^{166}\text{Er}$, pri ktorých sa syntetizovali krátko žijúce izotopy ortuti a radónu ako produkty úplnej fúzie po odparení neutrónov. Údaje o účinných prierezoch fúzie pre vyššie uvedené reakcie v literatúre chýbajú. Z tohto dôvodu bol vytvorený systém pohyblivých absorbérov, ktorý umožňuje meranie absolútnych účinných prierezov pre alfa-rádioaktívne izotopy s polčasom rozpadu $\geq 0,1$ s. Prvok 112 je chemický analóg ortuti a radón, ako inertný plyn, nám umožňuje určiť hranicu účinnosti separačnej techniky.

Ďalšou motiváciou na uskutočnenie týchto experimentov je štúdium fúzijských reakcií s terčovými jadrmi v blízkosti uzavretej šupky s 82 neutrónmi. Bolo uskutočnené systematické študovanie vplyvu deformácie vstupného kanála a jeho nábojovej asymetrie na účinné prierezy evaporačných reziduí pri excitačných energiách v blízkosti Coulombovskej bariéry s použitím jadrových reakcií $^{40}\text{Ar} + ^{144}\text{Sm}$, $^{36}\text{Ar} + ^{148}\text{Sm}$ a $^{40}\text{Ca} + ^{144}\text{Nd}$, všetky produkujúce rovnaké izotopy ortuti. Všetky merané reakcie sú opísané v Tab. 1, kde v prvom stĺpci je ukázaná Q hodnota reakcie, V_c je výška Coulombovskej bariéry, R_c je poloha bariéry, B_{fis} je štiepna bariéra, $E_{n,sep}$ je separačná energia neutrónov a E^* je excitačná energia.

Tab. 1. Reakcie syntézy a ich parametre.

reakcia	Q [MeV]	V_c [MeV]	R_c [fm]	B_{fis} [MeV]	$E_{n,sep}$ [keV]	E^* [MeV]
$^{40}\text{Ar} + ^{144}\text{Sm} \rightarrow ^{184}\text{Hg}$	-90.66	129.57	11.52	10.96	-10615.5	38.91
$^{36}\text{Ar} + ^{148}\text{Sm} \rightarrow ^{184}\text{Hg}$	-83.22	130.95	11.38	10.96	-10615.5	47.73
$^{40}\text{Ca} + ^{144}\text{Nd} \rightarrow ^{184}\text{Hg}$	-92.25	140.11	11.43	10.96	-10615.5	47.87
$^{48}\text{Ca} + ^{142}\text{Nd} \rightarrow ^{190}\text{Hg}$	-98.80	136.53	11.78	13.67	-9815.3	37.73
$^{40}\text{Ar} + ^{166}\text{Er} \rightarrow ^{206}\text{Rn}$	-90.85	138.90	11.80	12.27	-9472.9	48.05

Stabilizujúci vplyv šupiek sa prejaví na rozdelení výťažkov izotopov výparných reziduí. Výťažky budú určované použitím metódy zachytávania produktov jadrových reakcií na fóliách.

Nové výsledky umožnia zdokonaľiť, alebo vytvoriť nové alternatívne teoretické modely popisu fúzie, ktoré môžu byť použité v oblasti supert ťažkých jadier a taktiež rozšíria naše znalosti o r-procese nukleosyntézy jadier vo vesmíre.

Ciele dizertačnej práce

1. Realizácia experimentov na zväzku ťažkých iónov s použitím metódy zachytávania vyrazených produktov jadrových reakcií na fóliách a s využitím hmotnostného spektrometra MASHA. Určenie účinnosti spektrometra.
2. Experimentálne určenie energetickej závislosti účinných prierezov a excitačných funkcií jadrových reakcií $^{144}\text{Sm}(^{40}\text{Ar},xn)^{184-x}\text{Hg}$, $^{148}\text{Sm}(^{36}\text{Ar},xn)^{184-x}\text{Hg}$, $^{144}\text{Nd}(^{40}\text{Ca},xn)^{184-x}\text{Hg}$, $^{142}\text{Nd}(^{48}\text{Ca},xn)^{190-x}\text{Hg}$ a $^{166}\text{Er}(^{40}\text{Ar},xn)^{206-x}\text{Rn}$ v oblasti okolobariérnych excitačných energií.
3. Určenie vplyvu jadrovej štruktúry na izotopické výťažky výparných reziduí vybraných jadrových reakcií v závislosti od deformácie ťažkých iónov a terčových jadier a ich nábojovej symetrie vo vstupnom kanále jadrovej reakcie.
4. Porovnanie získaných experimentálnych výsledkov s teoretickými výpočtami.

Teoretický úvod

Dizertačná práca je zameraná na štúdium vplyvu deformácie, hmotnostnej a nábojovej asymetrie jadier vo vstupnom kanále na účinné prierezy evaporačných reziduí. V práci je v krátkosti popísaná reakcia syntézy, jej priebeh a účinný prierez. Ten sa skladá z dvoch hlavných častí, účinný prierez samotnej fúzie nalietajúceho jadra s terčovým a druhá časť nezávislá od prvej popisuje premenu vytvoreného zloženého jadra cez jeden alebo niekoľko konkurujúcich výstupných kanálov. Celkový účinný prierez preto môžeme vyjadriť ako súčin dvoch faktorov

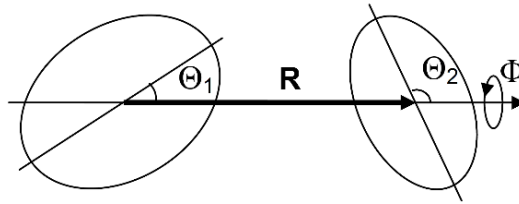
$$\sigma_t = \sigma_{fuz}(E_p - E_B, l)w(E^*, l), \quad (1)$$

kde σ_{fuz} je účinný prierez vytvorenia zloženého jadra a w je pravdepodobnosť premeny zloženého jadra daným výstupným kanálom. E_p je energia projektilu, E_B je výška potenciálovej bariéry, E^* je energia vzbudenia zloženého jadra a l je orbitálny moment hybnosti.

Ďalej sa práca venuje problematike deformácie jadier, ktorá je spôsobená kolektívnym pohybom nukleónov v jadre. Je objasnený vplyv deformácie jadier a ich natočenia na výšku bariéry [3-10] a tvar záchytnej jamy v jadrovej-jadrovom potenciáli [10]. Je tu popísaná interakcia deformovaných jadier a interakčný potenciál, ktorý pozostáva z Coulombovskej $V_c(R, \Theta_1, \Theta_2, \Phi)$ a jadrovej $V_N(R, \Theta_1, \Theta_2, \Phi)$ časti

$$V(R, \Theta_1, \Theta_2, \Phi) = V_c(R, \Theta_1, \Theta_2, \Phi) + V_N(R, \Theta_1, \Theta_2, \Phi), \quad (2)$$

kde R je vzdialenosť medzi ťažiskami jadier a Θ_1 , Θ_2 a Φ sú uhly, ktoré popisujú vzájomnú orientáciu dvoch osovo symetrických deformovaných jadier (Obr. 1).



Obr. 1. Uhly Θ_1 , Θ_2 a Φ popisujúce vzájomnú orientáciu deformovaných jadier a vzdialenosť medzi ich ťažiskami R .

Popísaný je účinný prierez fúzie, ktorý môže byť zložený z parciálnych vln,

$$(\sigma)_{fus}(E) = \frac{\pi \hbar^2}{2\mu E} \sum_{l=0}^{\infty} (2l + 1) T_l(E), \quad (3)$$

kde μ je redukovaná hmotnosť systému, E je energia v ťažiskovej sústave a $T_l(E)$ sú pravdepodobnosti penetrácie parciálnou bariérou.

V modeli zviazaných kanálov pomocou ktorého možno počítať účinné prierezy fúzie dvoch jadier je potom bližšie rozoberaný vplyv deformácie a natočenia jadier na pravdepodobnosť penetrácie $T_l(E)$. Ukázali sme si ako sa zmení pravdepodobnosť penetrácie bariéry pre rôzne kombinácie interagujúcich jadier v závislosti na ich deformácií. Tak isto sme ukázali ako sa pravdepodobnosť penetrácie zmení pri zahrnutí efektu prenosu neutrónov, ktorý nastáva ešte pred prekonaním Coulombovskej bariéry kolidujúcim jadrom a má nezanedbateľný vplyv vo fúznej dynamike.

Určenie separačnej účinnosti hmotnostného spektrometra MASHA

MASHA bola vytvorená za účelom odmerania hmotnosti 112-teho a 114-teho superťažkého prvku. Jedným z hlavných problémov pri syntetizovaní superťažkých prvkov sú ich nízke účinné prierezy. Nízke účinné prierezy v kombinácii s nízkou separačnou účinnosťou meracej sústavy znemožňujú merať tieto superťažké prvky. Preto je potrebné dosiahnuť čo najvyššiu separačnú účinnosť. Ukázalo sa, že z hľadiska účinnosti je najväčším problémom hmotnostného spektrometra horúci výparník. Preto je potrebné skúmať závislosť materiálu horúceho výparníka na separačnú účinnosť a jej časový priebeh, keďže materiál sa kvôli nahrievaniu na vysokú teplotu časom opotrebuje. Účinnosť sme merali na reakciách vedúcich na izotopy Hg a Rn za použitia dvoch rôznych uhlíkových štruktúr ako materiálu výparníka (grafén a uhlíkové nanotrúbky). Voľba izotopov Hg bola vykonaná na základe predpokladaných podobných chemických vlastností s prvkom 112 a izotopy Rn boli zvolené kvôli jeho inertnosti a teda rozpadovej vetve. Experiment bol rozdelený na dve časti. V prvej časti sa použila známa metóda, pri ktorej sú produkty rozpadu zachytávané na fóliách a následne sú detegované ich alfa častice. V druhej časti sa merali rovnaké reakcie použitím hmotnostného spektrometra a detektorov vo fokálnej rovine. Pri prvej metóde sme boli schopný pomocou korekcií aproximovať namerané výťažky reakcií na takmer stopercentnú účinnosť. Následným porovnaním výťažkov nameraných prvou metódou s korekciami a výťažkov nameraných na hmotnostnom spektrometri sme určili separačnú účinnosť meracej sústavy.

Z každej reakcie sa robilo niekoľko meraní na prvom type výparníka (grafén) a tak isto na druhom type (nanotrúbky). Zároveň sa na reakcii $^{40}\text{Ar} + ^{144}\text{Sm}$ robili dve dlhšie merania, jedno za použitia grafénu a druhé za použitia nanotrubiek na zistenie časového vývoja účinnosti pre oba typy výparníkov. Z nameraných výťažkov sme jednoducho vypočítali účinné prierezy pomocou známej formuly

$$\sigma = \frac{(N \cdot M_{tg} \cdot Z \cdot e)}{(\rho \cdot N_A \cdot I)}. \quad (7)$$

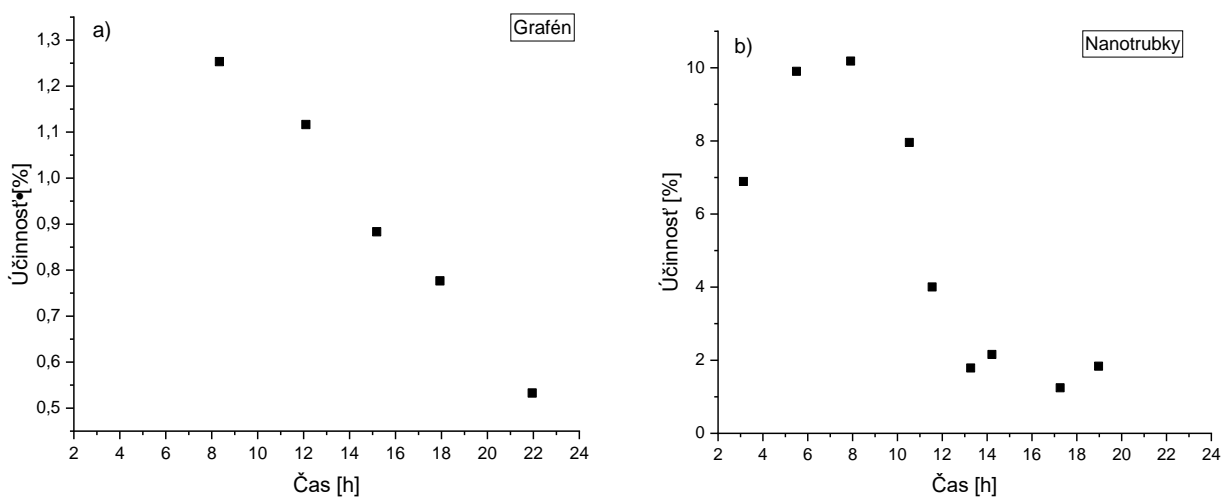
Museli sme však zohľadniť korekcie na všetky elementy ovplyvňujúce namerané výťažky poprípade nameraný integrál. Hodnoty účinných prierezov nameraných pomocou hmotnostného spektrometra sme dali do pomeru s hodnotami získanými pomocou metódy zachytávania produktov na fóliách pri rovnakej energii projektilu. Dostali sme hodnoty separačnej účinnosti meracej aparatury, ktorej hodnoty sú prehľadne spísané v Tab. 7.

Vidno, že v prípade všetkých izotopov sú namerané účinnosti s použitím nanotrubiek vyššie ako pri použití grafénu. Tak isto pozorujeme lepšie hodnoty pre izotopy ^{180}Hg a ^{201}Rn , než pre ^{181}Hg a ^{202}Rn . Na Obr. 16 môžeme vidieť časový vývoj separačnej účinnosti pre oba typy výparníkov.

Tab. 2. Porovnanie separačnej účinnosti registrácie izotopov ^{180}Hg , ^{181}Hg , ^{201}Rn , ^{202}Rn pri použití dvoch typov výparníka rôznych uhľikových štruktúr pri reakciách $^{40}\text{Ar} + ^{144}\text{Sm}$ a $^{40}\text{Ar} + ^{166}\text{Er}$.

reakcia	izotop	typ výparníka	účinnosť [%]
40Ar+144Sm	180Hg	grafén	0.53±0,08
40Ar+144Sm	180Hg	nanotrúbky	8.24±1,24
40Ar+144Sm	181Hg	grafén	0.18±0,03
40Ar+144Sm	181Hg	nanotrúbky	1.15±0,17
40Ar+166Er	201Rn	grafén	3.99±0,6
40Ar+166Er	201Rn	nanotrúbky	6.54±0,98
40Ar+166Er	202Rn	grafén	1.08±0,16
40Ar+166Er	202Rn	nanotrúbky	1.35±0,2

Pre všetky izotopy sa preukázalo, že nanotrúbky majú vyššiu separačnú účinnosť, ako grafén. Pri izotope ^{180}Hg bola nameraná separačná účinnosť dokonca viac než 10 krát väčšia. Z časového vývoja účinnosti na Obr. 5 vidno, že už na začiatku merania majú nanotrúbky podstatne vyššiu účinnosť. V prípade grafénu vidno, že účinnosť klesá s časom takmer lineárne. Ak sa však pozrieme na priebeh pri nanotrúbkách, vidíme že prvých 10 hodín sa účinnosť takmer nemenila a ostávala na úrovni 8-10%, no potom prudko klesla na hodnotu okolo 2%, ktorá sa držala ďalších 8 hodín. Túto záverečnú 2% emisiu možno pripísať uvoľňovaniu iónov zo stien terčovej komory, difúzneho kanálu a vnútornému povrchu iónového zdroja.

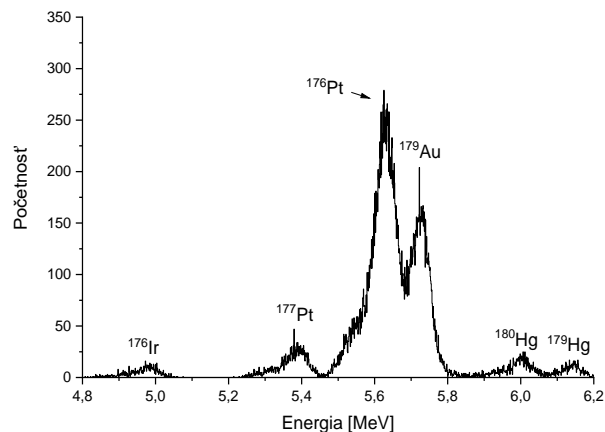


Obr. 5. Časový vývoj separačnej účinnosti meracej sústavy použitím výparníka materiálového typu: a) grafén, b) nanotrúbky.

Účinné prierezy evaporačných reziduí

V dizertačnej práci je skúmaný vplyv deformácie jadier vo vstupnom kanále, ako aj vplyv ich hmotnostnej a nábojovej asymetrie. Boli merané výťažky všetkých reakcií spomenutých v úvode. Výťažky reakcií sa merali za použitia metódy zachytávania produktov na fóliách. V práci je dôkladne popísaná celá metodika, ako aj schéma meracej sústavy. Základom metodiky je dvojestupňový cyklus. Kde v prvom stupni sa ožarujú Al fólie produktami reakcií a v druhom stupni sa merajú alfa častice z ich rozpadov. Keďže sa použitím tejto metódy neurčujú produkty priamo, bolo potrebné odvodiť príslušné korekcie na polčas rozpadu a pravdepodobnosť alfa premeny výsledných produktov. Počet produktov na fólií v prvom stupni lineárne narastá s časom v dôsledku ožarovania, no zároveň kvôli vlastnému rozpadu aj exponenciálne klesá. V druhom stupni už len exponenciálne klesá v dôsledku rozpadu.

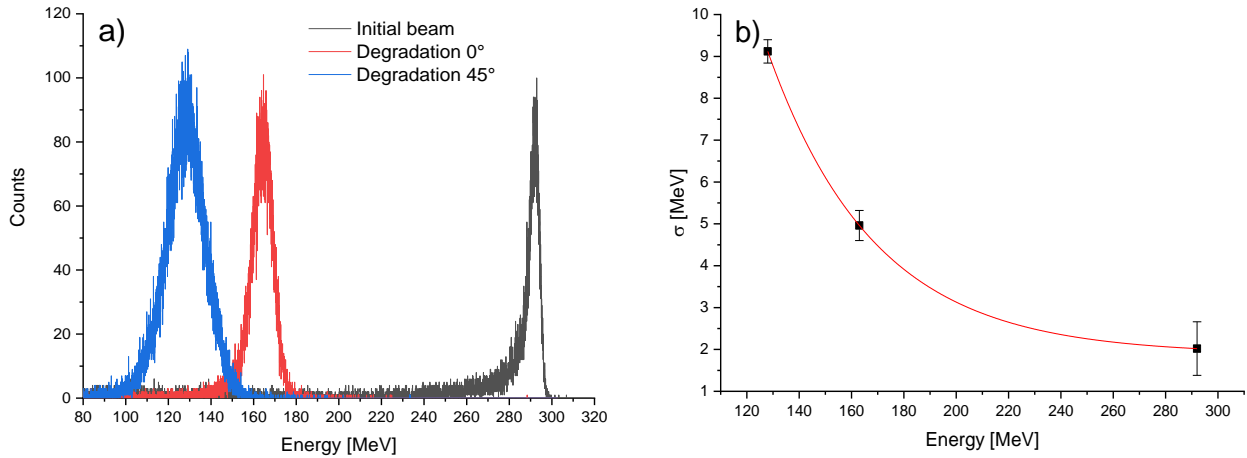
Pred experimentom sa simulovali geometrické účinnosti detektorov v meracej sústave. Energetické spektrá všetkých meraných reakcií boli pred experimentom simulované programom GEANT4 za použitia výpočtov účinných prierezov modelom zviazaných kanálov. Príklad takto simulovaného spektra je na Obr. 7.



Obr. 7. Energetické spektrum reakcie $^{36}\text{Ar} + ^{148}\text{Sm} \rightarrow ^{184-xn}\text{Hg}$ pre energiu nalietajúceho projektilu 190 MeV simulované pomocou GEANT4.

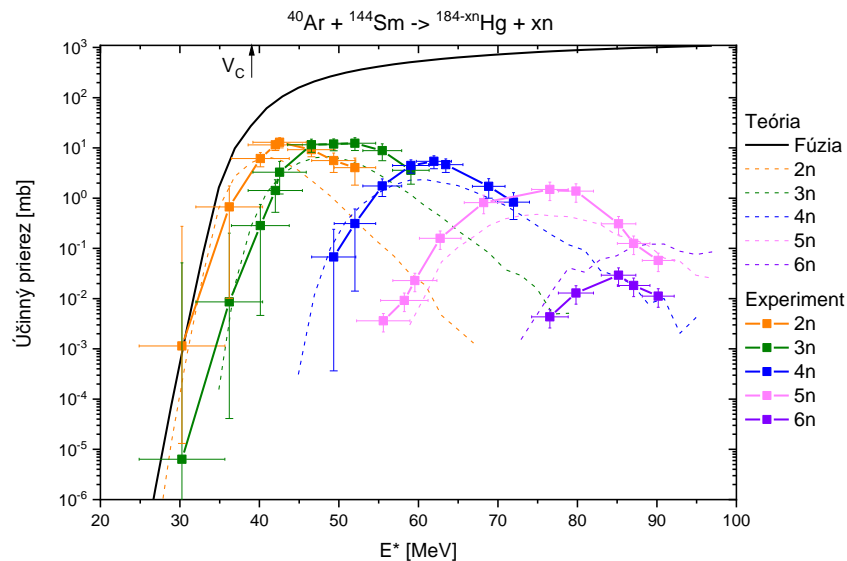
Boli namerané výťažky všetkých spomínaných reakcií pre rôzne energie nalietajúceho jadra. Po spracovaní spektier a vypočítaní účinných prierezov sme spozorovali nesúlad s teoretickými účinnými prierezmi. Zistili sme, že krivky účinných prierezov sú rozšírené v dôsledku znižovania energie degradáciou zväzku niklovými fóliami a s tým súvisiacou rozšírenou disperziou energie zväzku. Tento efekt sme nasimulovali pomocou GEANT4, no simulácie nezodpovedali reálnemu rozšíreniu disperzie energie zväzku, čo sme si vysvetlili nehomogenitou reálnych fólií. Preto sme urobili experiment na ktorom sme namerali energetické spektrum zväzku s a bez použitia degradačnej fólie. Takýmto spôsobom bola získaná informácia

o zmene monochromatickosti zväzku v závislosti od množstva pohltenej energie zväzku v degradačnej fólii. Výsledky tohto experimentu sú zobrazené na Obr. 8.



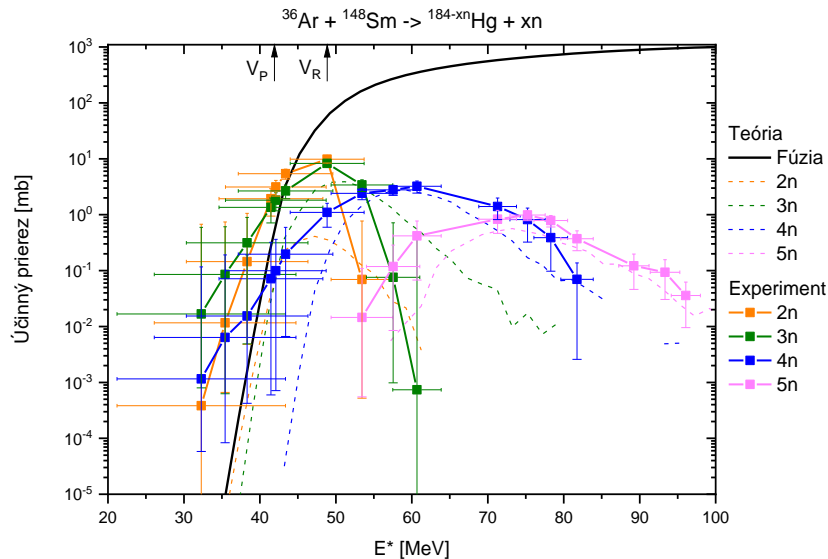
Obr. 8. a) Namerané energetické spektrum zväzku ^{40}Ar bez terča a niklovej fólie, po vložení niklovej fólie hrúbky $10,3 \mu\text{m}$ pod uhlom 0° , titánovej podložky terča o hrúbke $1,5 \mu\text{m}$ a terčového materiálu Sm_2O_3 o hrúbke $0,48 \mu\text{m}$ a po natočení Ni fólie pod uhol 45° . b) Závislosť FWHM od energie zväzku v strede hrúbky terča.

Z experimentálnych meraní vyplynulo, že pri použití niklovej fólie hrúbky $10,3 \mu\text{m}$ pod uhlom 45° disperzia energie zväzku narastie na viac ako štvornásobok pôvodnej hodnoty. Nameraná závislosť disperzie energie zväzku bola použitá, ako funkcia odozvy pri dekonvolučnej metóde [16] pomocou ktorej sme odstránili nežiadúci efekt súvisiaci s degradáciou zväzku z nameraných účinných prierezov. Takto upravené spektrá sú vyobrazené na Obr. 9, 10 a 12-15.



Obr. 9. Experimentálne určené účinné prierezy neutrónových kanálov reakcie syntézy $^{40}\text{Ar} + ^{144}\text{Sm}$ namerané pomocou metódy zachytávania na fóliách (kanály 2n, 3n, 4n). Kanály 5n a 6n boli namerané na spektrometri MASHA vo fokálnej rovine. V_C je výška Coulombovskej bariéry.

V reakcii $^{40}\text{Ar} + ^{144}\text{Sm}$ sú dominantné 2n a 3n kanály s približne rovnakou maximálnou hodnotou účinného prierezu ($\sigma_{2n} = 12,99$ mb a $\sigma_{3n} = 12,41$ mb), pričom účinné prierezy kanálov s vyšším počtom vyparených neutrónov postupne klesajú, pretože pri vyšších excitovaných stavoch zohrávajú stále väčšiu rolu štiepne kanály ($\sigma_{4n} = 5,43$ mb, $\sigma_{5n} = 1,49$ mb a $\sigma_{6n} = 0,03$ mb). Coulombovská bariéra pri tejto reakcii dosahuje hodnotu 39 MeV, čo znamená, že pre energie menšie ako táto hodnota v reakčnom mechanizme dominuje podbariérová fúzia. To je hlavnou príčinou rádovo nižšej hodnoty účinného prierezu 1n kanálu, ktorý sa nám však nepodarilo v spektrách odlišiť.

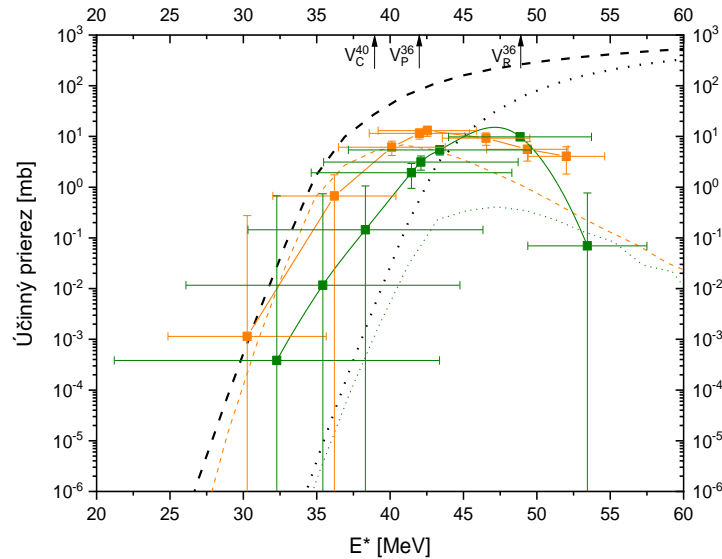


Obr. 10. Experimentálne určené účinné prierezy neutrónových kanálov reakcie syntézy $^{36}\text{Ar} + ^{148}\text{Sm}$ namerané pomocou metódy zachytávania na fóliách. V_P je výška Coulombovskej bariéry pre polárnu orientáciu jadier a V_R pre ekvatoriálnu orientáciu.

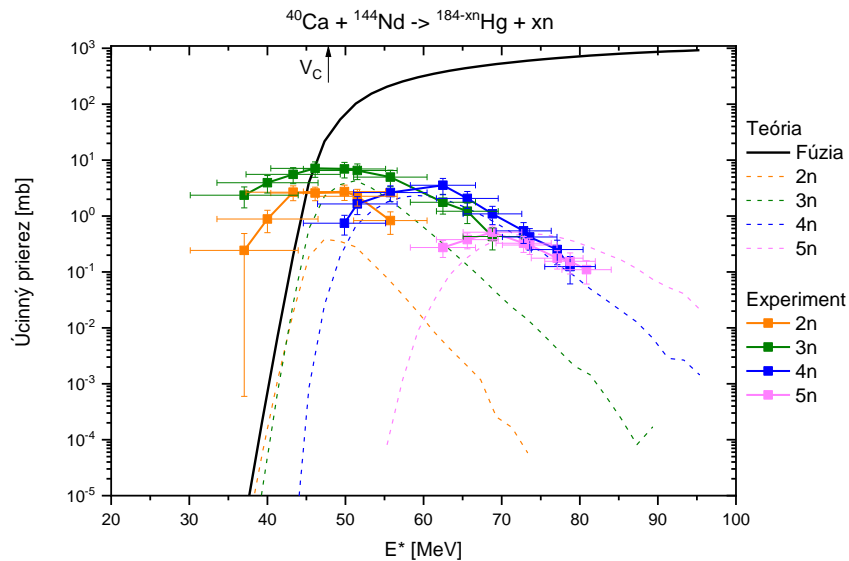
Podobné správanie ako v reakcii $^{40}\text{Ar} + ^{144}\text{Sm}$ pozorujeme aj pri reakcii $^{36}\text{Ar} + ^{148}\text{Sm}$, ktorá vedie na rovnaké izotopy ($\sigma_{2n} = 9,82$ mb, $\sigma_{3n} = 8,26$ mb, $\sigma_{4n} = 3,22$ mb a $\sigma_{5n} = 0,99$ mb), avšak na rozdiel od reakcie $^{40}\text{Ar} + ^{144}\text{Sm}$, v ktorej ide o reakciu dvoch sférických jadier, tu sú obe jadrá deformované. Výška Coulombovskej bariéry pri polárnej orientácii jadier je $V_P = 42$ MeV a pri ekvatoriálnej orientácii je $V_R = 49$ MeV. Tieto dve hodnoty sa v experimente prejavujú ako ich stredná hodnota, ktorá vzniká pri náhodnej orientácii interagujúcich jadier.

Porovnaním reakcií $^{40}\text{Ar} + ^{144}\text{Sm}$ a $^{36}\text{Ar} + ^{148}\text{Sm}$, ktoré viedli k rovnakému izotopu, bol v práci ukázaný vplyv deformácie jadier vo vstupnom kanále na pozíciu Coulombovskej bariéry a rovnako aj na pozíciu maxima 2n kanálu, čo je bližšie zobrazené na Obr. 11. Vidno, že prahová hodnota excitačnej energie úplnej fúzie v reakcii $^{40}\text{Ar} + ^{144}\text{Sm}$ je približne 27 MeV, zatiaľ čo pri reakcii $^{36}\text{Ar} + ^{148}\text{Sm}$ je okolo 35 MeV. Tento rozdiel je následným dôsledkom rozdielnej Q hodnoty týchto reakcií (-90,66 MeV pre $^{40}\text{Ar} + ^{144}\text{Sm}$ proti -83,22 MeV pre $^{36}\text{Ar} + ^{148}\text{Sm}$). Rozdiel v prahovej energii týchto reakcií spôsobuje rozdielne polohy maxim účinných prierezov 2n kanálov približne 5 MeV, zatiaľ čo polohy maxim kanálov s vyšším počtom vyparených neutrónov sú približne rovnaké z dôvodu ustrednenia spôsobeného v procese výparu neutrónov. Prahová hodnota

excitačnej energie spôsobuje v oboch reakciách potlačenie nízkoenergetickej časti 2n aj 3n kanálu. Teória navyše predpokladá aj výrazné potlačenie maximálnej hodnoty účinného prierezu 2n kanálu, čo sa však experimentálne nepotvrdilo.

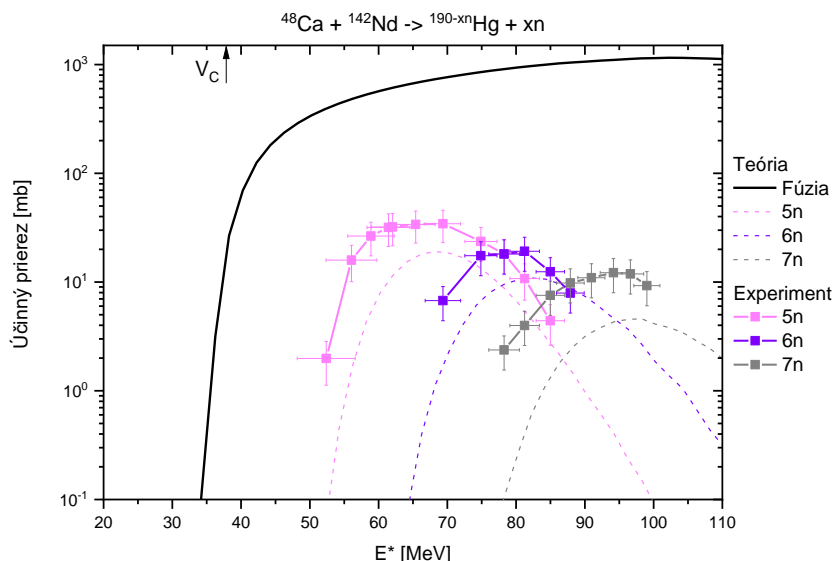


Obr. 11. Porovnanie vplyvu deformácie na excitačné funkcie (účinné prierezy) 2n kanálov reakcií ⁴⁰Ar + ¹⁴⁴Sm (oranžová) a ³⁶Ar + ¹⁴⁸Sm (zelená). Teoretické dáta sú vykreslené bodkovanými a čiarkovanými čiarami a pomocou symbolov sú vykreslené experimentálne určené body. V_C⁴⁰ je výška Coulombovskej bariéry v reakcii ⁴⁰Ar + ¹⁴⁴Sm, V_P³⁶ je výška Coulombovskej bariéry pre polárnu orientáciu jadier a V_R³⁶ pre ekvatoriálnu orientáciu v reakcii ³⁶Ar + ¹⁴⁸Sm.



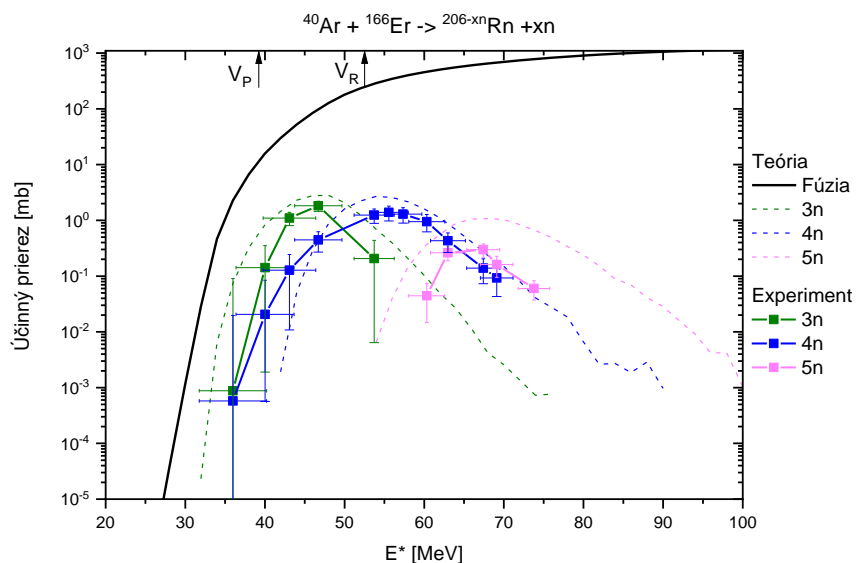
Obr. 12. Experimentálne určené účinné prierezy neutrónových kanálov reakcie syntézy ⁴⁰Ca + ¹⁴⁴Nd namerané pomocou metódy zachytávania na fóliách. V_C je výška Coulombovskej bariéry.

Podobne aj v reakcii $^{40}\text{Ca} + ^{144}\text{Nd}$ je Coulombovská bariéra posunutá no tentokrát v dôsledku rozdielnej nábojovej asymetrie ako v reakcii $^{40}\text{Ar} + ^{144}\text{Sm}$. Navyše, na rozdiel od reakcie $^{40}\text{Ar} + ^{144}\text{Sm}$ nemá terčové jadro uzavretú neutrónovú šupku, teda nie je tzv. magické jadro. To sa znovu prejavuje potlačením účinných prierezov evaporačných reziduí v oblasti Coulombovskej bariéry, čo vidno najviac na 2n kanále, ktorý je v porovnaní s reakciou $^{40}\text{Ar} + ^{144}\text{Sm}$ potlačený, avšak nie až tak ako predpovedá teória. V oboch prípadoch možno povedať, že sa prejavuje vplyv magickosti jadra ^{144}Sm na účinné prierezy fúzie pri okolobariérových energiách.

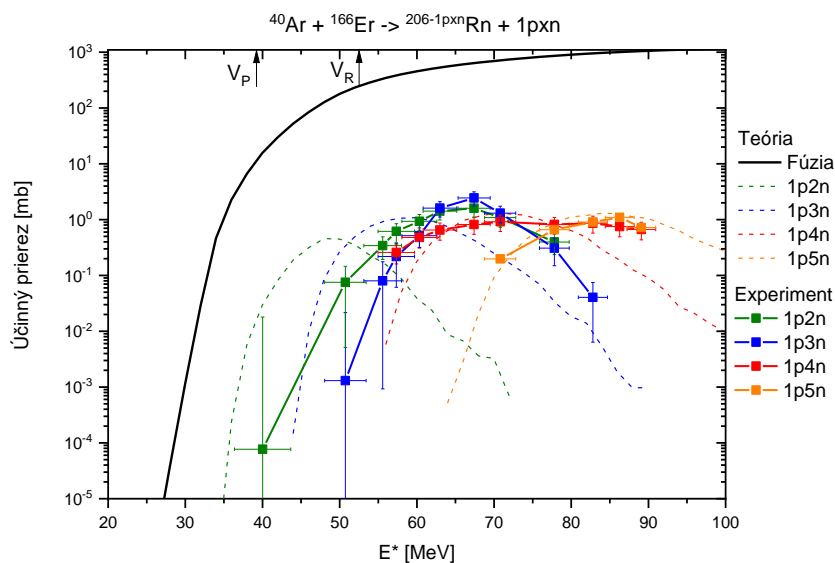


Obr. 13. Experimentálne určené účinné prierezy neutrónových kanálov reakcie syntézy $^{48}\text{Ca} + ^{142}\text{Nd}$ namerané pomocou metódy zachytávania na fóliách. V_c je výška Coulombovskej bariéry.

V reakcii $^{48}\text{Ca} + ^{142}\text{Nd}$ boli identifikované kanály 5n, 6n a 7n pričom kanály s nižším počtom odparených neutrónov sme nezaregistrovali, pretože tie vedú na izotopy ortuti, ktoré nepodliehajú alfa rozpadu. V reakcii $^{40}\text{Ar} + ^{166}\text{Er}$ sme namerali okrem xn kanálov aj niektoré $1pxn$ kanály pričom najvyššiu hodnotu účinného prierezu dosahuje 3n kanál ($\sigma_{3n} = 1,82$ mb) v prípade xn kanálov a $1p3n$ kanál ($\sigma_{1p3n} = 2,45$ mb) v prípade $1pxn$ kanálov. Ďalej sme si všimli, že pri všetkých reakciách, ktoré viedli na izotopy ortuti boli hodnoty experimentálne stanovených účinných prierezov v porovnaní s vypočítanými mierne vyššie. V reakcii $^{40}\text{Ar} + ^{166}\text{Er}$, ktorá viedla na izotopy radónu, boli naopak všetky účinné prierezy xn kanálov o niečo nižšie v porovnaní s vypočítanými hodnotami, čo mohlo byť spôsobené mierne vyššími hodnotami prierezov $1pxn$ kanálov. To naznačuje, že štiepne kanály alebo iné evaporačné kanály, ako sú kanály pxn alebo αxn , sú nižšie v porovnaní s hodnotami predpovedanými modelom zviazaných kanálov pre reakcie vedúce k izotopom ortuti a naopak pre reakciu $^{40}\text{Ar} + ^{166}\text{Er}$ sú vyššie.



Obr. 14. Experimentálne určené účinné prierezy neutrónových kanálov reakcie syntézy $^{40}\text{Ar} + ^{166}\text{Er}$ namerané pomocou metódy zachytávania na fóliách. V_P je výška Coulombovskej bariéry pre polárnu orientáciu jadier a V_R pre ekvatoriálnu orientáciu.



Obr. 15. Experimentálne určené účinné prierezy pxn kanálov reakcie syntézy $^{40}\text{Ar} + ^{166}\text{Er}$ namerané pomocou metódy zachytávania na fóliách. V_P je výška Coulombovskej bariéry pre polárnu orientáciu jadier a V_R pre ekvatoriálnu orientáciu.

Zhrnutie výsledkov

Bola navrhnutá, realizovaná a v experimente použitá multidetektorová metóda merania účinných priereзов fúzie ťažkých iónov s terčovými jadrami, ktorá pracuje na princípe zberu vyrazených jadier, ktorých hmotnosť a náboj sa určuje s využitím alfa spektrometrie. Použitý metodický postup bol pred vykonaním experimentu simulovaný vzhľadom na reálne geometrické pomery a fyzikálne premenné. V rámci rozpracovania novej metódy boli určené účinnosti registrácie všetkých detektorov nabitých častíc. Získané fyzikálne výsledky výt'azkov produktov reakcií boli porovnané s výsledkami získanými použitím hmotnostného spektrometra MASHA. Na zväzku ťažkých iónov bola zistená časová závislosť intenzity produktov jadrových reakcií pri použití grafénu a nanotrubiiek ako základného materiálu horúceho výparníka. Zistilo sa, že z hľadiska účinnosti je použitie nanotrubiiek, ako materiálu horúceho výparníka, výhodnejšie než použitie grafénu, čo sa preukázalo aj na časovom vývoji účinnosti.

Prvýkrát boli experimentálne určené účinné prierezy jadrových reakcií $^{144}\text{Sm}(^{40}\text{Ar},xn)^{184-x}\text{Hg}$, $^{148}\text{Sm}(^{36}\text{Ar},xn)^{184-x}\text{Hg}$, $^{144}\text{Nd}(^{40}\text{Ca},xn)^{184-x}\text{Hg}$, $^{142}\text{Nd}(^{48}\text{Ca},xn)^{190-x}\text{Hg}$, $^{166}\text{Er}(^{40}\text{Ar},xn)^{206-x}\text{Rn}$ a ich excitačné funkcie. V rámci korektného vyhodnotenia výsledkov získaných v experimente bola skúmaná zmena monochromatickosti urýchleného zväzku ťažkých iónov v závislosti od časti kinetickej energie pohltenej v absorpčnej fólii. Získaná závislosť bola použitá na korekciu vplyvu rôznej monochromatickosti zväzku na získané dáta. V rámci spracovania experimentálnych dát bola využitá matematická metóda dekonvolúcie s použitím Goldovho algoritmu. Jej praktickým použitím boli získané účinné prierezy a excitačné funkcie skúmaných jadrových reakcií v súlade s teoretickými výsledkami. V rámci interpretácie experimentálnych výsledkov boli použitím modelu zviazaných kanálov, berúceho do úvahy deformáciu jadier a modelu výmeny nukleónov vypočítané teoretické závislosti účinných priereзов na kinetickej energii nalietaujúcich ťažkých iónov a excitačnej energii produktu fúzie s terčovým jadrom. Experimentálne výsledky boli porovnané s teoretickými výpočtami.

Pri meraní účinných priereзов fúzijských reakcií sa ukázalo, že účinné prierezy kanálov s odparovaním neutrónov majú v porovnaní s teoretickými vyššie hodnoty pre všetky reakcie vedúce na izotopy ortuti a naopak nižšie pri reakcii vedúcej na izotopy radónu. Tento nesúlad medzi experimentálnymi a teoretickými hodnotami sme prisúdili vyšším predpokladaným teoretickým hodnotám účinných priereзов štiepných kanálov, či iných evaporáčnych kanálov, ako pxn či axn v prípade reakcií vedúcich na Hg izotopy a naopak nižším hodnotám v reakcii vedúcej na Rn izotopy. V reakciách vedúcich na izotop ^{184}Hg sa jasne preukázal vplyv deformácie jadier vo vstupnom kanále, ako aj vplyv hmotnostnej a nábojovej asymetrie. Pri reakcii $^{144}\text{Sm}(^{40}\text{Ar},xn)^{184-x}\text{Hg}$, v ktorej sú vo vstupnom kanále sférické jadrá, pričom terčové jadro ^{144}Sm je navyše magické fúzia začína pri nižších excitačných energiách, ako pri reakciách $^{148}\text{Sm}(^{36}\text{Ar},xn)^{184-x}\text{Hg}$ a $^{144}\text{Nd}(^{40}\text{Ca},xn)^{184-x}\text{Hg}$, čo vidno aj na polohe teoretickej Coulombovskej bariéry. Prvýkrát bol experimentálne dokázaný zásadný energetický rozdiel medzi bariérou pri fúzii nedeformovaných jadier a bariérou pri fúzii pri ekvatoriálnej a polárnej orientácii deformovaných jadier. Je demonštrovaný excitačnými funkciami pre $2n$ kanál. Zistené potvrdzuje významný vplyv štruktúry jadier na proces fúzie ťažkých iónov s terčovými jadrami.

Referencie

- [1] Y. Oganessian *et al.*, *Measurements of cross sections and decay properties of the isotopes of elements 112, 114, and 116 produced in the fusion reactions $^{233,238}\text{U}$, ^{242}Pu , and $^{248}\text{Cm} + ^{48}\text{Ca}$* , Physical Review C, vol. 70, Issue 6 (2004)
- [2] A. M. Rodin *et al.*, *MASHA Separator on the Heavy Ion Beam for Determining Masses and Nuclear Physical Properties of Isotopes of Heavy and Superheavy Elements*, Instruments and Experimental Techniques, Vol. 57, No. 4, pp. 386–393 (2014)
- [3] C. Y. Wong, Phys. Rev. Lett. **31**, 766 (1973)
- [4] J. O. Fernandez-Niello, C. H. Dasso, and S. Landowne, Comput. Phys. Commun. **54**, 409 (1989)
- [5] C. H. Dasso, J. Fernandez-Niello, and S. Landowne, Phys. Rev. C **41**, 1014 (1990).
- [6] W. Reisdorf, J. Phys. G **20**, 1297 (1994)
- [7] V. Yu. Denisov, Yad. Fiz. **62**, 1431 (1999) [Phys. At.Nucl. **62**, 1349 (1999)]; V. Yu. Denisov, Eur. Phys. J. A **7**, 87 (2000)
- [8] I. I. Gontchar *et al.*, Phys. Rev. C **65**, 034610 (2002)
- [9] V. Yu. Denisov and W. Norenberg, Eur. Phys. J. A **15**, 375 (2002); V. Yu. Denisov, Eur. Phys. J. A **25** (Suppl. 1), 619 (2005)
- [10] V. Yu. Denisov and N. A. Pilipenko, Phys. Rev. C **76**, 014602 (2007); Ukr. J. Phys. **53**, 845 (2008)
- [11] I. Červeň. *Fyzika po kapitolách*, FEI STU (2005)
- [12] J. Rossbach, P. Schmuser. *Basic course on accelerator optics* (1992)
- [13] M. Huyse, Nuclear Physics A **701**, 265 (2002)
- [14] A. Efremov, V. Bekhterev, S. Bogomolov, G. Gulbekyan, A. N. Lebedev, V. N. Loginov, Yu. I. Smirnov, and M. Leporis. Beam Inter. Mater. Atom. Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., Sec. B **204**, 368 (2003)

- [15] V.A. Shchepunov et al. Nucl. Instr. Meth. B **204**, 606 (2003)
- [16] M. Morhac, J. Kliman, V. Matousek, M. Veselsky, I. Turzo, *Efficient one- and two-dimensional gold deconvolution and its application to y-ray spectra decomposition*, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A 401, 385-408 (1997)

Zoznam publikovaných prác

- [1] S. Motycak, A.M. Rodin, A. S. Novoselov, A. V. Podshibyakin, L. Krupa, A. V. Belozerov, V. Yu. Vedeneyev, A. V. Gulyaev, A. V. Gulyaeva, J. Kliman, V. S. Salamatin, S. V. Stepantsov, E. V. Chernysheva, S. A. Yuchimchuk, A. B. Komarov, and **D. Kamas**, *A New Beam Diagnostic System for the MASHA Setup*. Physics of Particles and Nuclei Letters, Vol. 13, No. 5, pp. 586–590 (2016)
- [2] A. S. Novoselov, S. Motycak, A.M. Rodin, A. V. Podshibyakin, L. Krupa, A. V. Belozerov, V. Yu. Vedeneyev, A. V. Gulyaev, A. V. Gulyaeva, J. Kliman, V. S. Salamatin, S. V. Stepantsov, E. V. Chernysheva, S. A. Yuchimchuk, A. B. Komarov, and **D. Kamas**, *Data Acquisition system for the focal plane detector of the mass separator MASHA*. Physics of Particles and Nuclei Letters, Vol. 13, No. 5, pp. 595–597 (2016)
- [3] V. Yu. Vedenev, A.M. Rodin, A. V. Belozerov, E. V. Chernysheva, S. N. Dmitriev, A. V. Gulyaev, A. V. Gulyaeva, M. G. Itkis, J. Kliman, L. Krupa, A. S. Novoselov, V. S. Salamatin, S. V. Stepantsov, S. A. Yuchimchuk, A. B. Komarov, **D. Kamas**, C. Granja, S. Pospisil, *The current status of the MASHA setup*. Hyperfine Interaction, Springer Netherlands (2017)
- [4] L. Krupa, A. S. Novoselov, S. Motycak, A.M. Rodin, A. V. Podshibyakin, A. V. Belozerov, V. Yu. Vedeneyev, A. V. Gulyaev, A. V. Gulyaeva, J. Kliman, V. S. Salamatin, S. V. Stepantsov, E. V. Chernysheva, S. A. Yuchimchuk, A. B. Komarov, and **D. Kamas**, *Production of radon isotopes in the reactions $^{48}\text{Ca}+^{242}\text{Pu}$ and $^{48}\text{Ca}+^{208}\text{Pb}$ on mass separator MASHA*. The International Symposium on Exotic Nuclei, 4-10 September 2016, Kazan, Russia. World Scientific (2017)
- [5] A. S. Novoselov, S. Motycak, A.M. Rodin, A. V. Podshibyakin, A. V. Belozerov, V. Yu. Vedeneyev, A. V. Gulyaev, A. V. Gulyaeva, J. Kliman, L. Krupa, V. S. Salamatin, S. V. Stepantsov, E. V. Chernysheva, S. A. Yuchimchuk, A. B. Komarov, **D. Kamas**, C. Granja, S. Pospisil, *Production and investigation of new isotopes near neutron $N=126$ shell closure using TIMEPIX detectors*. The International Symposium on Exotic Nuclei, 4-10 September 2016, Kazan, Russia. World Scientific (2017)
- [6] A.M. Rodin, E. V. Chernysheva, S.N. Dmitriev, L. Krupa, A. S. Novoselov, A. V. Podshibyakin, V. Yu. Vedeneyev, A. V. Gulyaev, J. Kliman, V. S. Salamatin, S. V. Stepantsov, S. A. Yuchimchuk, A. B. Komarov, A. Opichal, J. Pechousek and **D. Kamas**, *Features of the solid-state ISOL method for fusion evaporation reactions induced*

by heavy ions. International Symposium on Exotic Nuclei (EXON 2018), September 10-15, 2018, Petrozavodsk, Russia, World Scientific, Singapore (2019) (v tlači)

- [7] E. V. Chernysheva, A. S. Novoselov, A. M. Rodin, A. V. Podshibyakin, V. Yu. Vedeneyev, A. V. Gulyaev, J. Kliman, L. Krupa, M. Holik, V. S. Salamatin, S. V. Stepantsov, S. A. Yuchimchuk, A. B. Komarov, **D. Kamas**, A. Opichal, J. Pechousek and A. Maher, *Determination of separation efficiency of MASHA spectrometer by means of measurement of absolute cross-sections of evaporation residues*. International Symposium on Exotic Nuclei (EXON 2018), September 10-15, 2018, Petrozavodsk, Russia, World Scientific, Singapore (2019) (v tlači)
- [8] A. S. Novoselov, A. M. Rodin, A. V. Podshibyakin, V. Yu. Vedeneyev, A. V. Gulyaev, J. Kliman, L. Krupa, V. S. Salamatin, S. V. Stepantsov, S. A. Yuchimchuk, A. B. Komarov, **D. Kamas**, A. Opichal, J. Pechousek and E. V. Chernysheva, *Control and data acquisition systems of the MASHA setup*. International Symposium on Exotic Nuclei (EXON 2018), September 10-15, 2018, Petrozavodsk, Russia, World Scientific, Singapore (2019) (v tlači)
- [9] D. Kamas, A. Opichal, E.V. Chernysheva, A. V. Gulyaev, M. Holik, J. Kliman, L. Krupa, A.S. Novoselov, A.V. Podshibyakin, A.M. Rodin, V.S. Salamatin, S.V. Stepantsov, V. Yu. Vedeneyev, S. A. Yuchimchuk, *Study of evaporation-residue cross sections in complete fusion reactions leading to Hg and Rn isotopes*. Phys. Rev. C (zaslané)

Summary

This work consists of two main parts. The first part focuses on the separation properties of the Mass Analyzer for SuperHeavy Atoms (MASHA), which combines the ISOL method for the synthesis and separation of radioactive nuclei with classical mass spectrometry. In particular, the separation efficiency of the spectrometer is studied, which decreases mainly in the hot catcher. Therefore, the separation efficiency is examined using two different carbon structures as the evaporator material. The separation efficiency for both types of hot catchers is also monitored as it evolves over time .

The yields of the synthesis reactions leading to the isotopes Hg and Rn were measured using the catcher foil method and also by using a mass spectrometer and detectors in the focal plane. By comparing the yields obtained by both methods, we estimated the separation efficiency for two types of hot catchers. For all isotopes, nanotubes have been shown to have a higher separation efficiency than graphene. The highest efficiency was measured for the ^{180}Hg isotope, where it was $8.24 \pm 1.24\%$. We also observed the time evolution of efficiency for both types of hot catchers. It can be seen from the time evolution of the efficiency that nanotubes are already substantially more efficient in the beginning. In the case of graphene, the efficiency was shown to decrease linearly over time, but with nanotubes the efficiency of the first 10 hours remained virtually unchanged and remained at 8-10%, but then dropped sharply to around 2%, which was held for a further 8 hours. This final 2% emission can be attributed to ion release from the target chamber walls, the diffusion channel, and the inner surface of the ion source.

The second part is focused on the study of the excitation functions of xn channels in synthesis reactions leading to the Hg and Rn isotopes. Reactions were measured using a catcher foil method with U400M cyclotron accelerated beams. The beams ^{36}Ar , ^{40}Ar , ^{40}Ca and ^{48}Ca are used to produce Hg and Rn isotopes in the fusion reactions $^{144}\text{Sm}(^{40}\text{Ar}, xn)^{184-x}\text{Hg}$, $^{148}\text{Sm}(^{36}\text{Ar}, xn)^{184-x}\text{Hg}$, $^{144}\text{Nd}(^{40}\text{Ca}, xn)^{184-x}\text{Hg}$, $^{142}\text{Nd}(^{48}\text{Ca}, xn)^{190-x}\text{Hg}$, and $^{166}\text{Er}(^{40}\text{Ar}, xn)^{206-x}\text{Rn}$. An improved version of the catcher foil method used in this experiment is described. The data processing required for this method is also outlined, including the deconvolution method used for the elimination of effects caused by decreasing beam energy due to the absorbing foils.

By comparison of the $^{40}\text{Ar} + ^{144}\text{Sm}$ and $^{36}\text{Ar} + ^{148}\text{Sm}$ reactions leading to the same isotope, an influence from the Coulomb barrier position on the position of the $2n$ channel maximum was shown. Slightly higher values of experimentally determined cross sections in comparison with those calculated were shown for all reactions leading to mercury isotopes. But in the reaction $^{40}\text{Ar} + ^{166}\text{Er}$, leading to radon isotopes, all xn -evaporation channel cross sections were slightly lower compared to calculated values, which could be caused by slightly higher values of $1pxn$ -evaporation channel cross sections. This indicates that fission channels or other evaporation channels, like pxn or αxn , are lower compared to values predicted by the coupled-channel model for the reactions leading to mercury isotopes and, vice versa, are higher for the reaction $^{40}\text{Ar} + ^{166}\text{Er}$.