

**SLOVENSKÁ TECHNICKÁ UNIVERZITA V BRATISLAVE  
FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A INFORMATIKY**

**Ing. Ľuboslav Motyák**

Autoreferát dizertačnej práce

**Použitie hmotnostnej spektrometrie v skúmaní jadrových reakcií  
vyvolaných ňľkými iónmi**

na získanie akademického titulu:  
Philosophiae Doctor  
v doktorandskom študijnom programe  
5.2.48 Fyzikálne inžinierstvo

Bratislava  
jún 2017

Dizertná práca bola vypracovaná v dennej forme doktorandského štúdia na Ústave jadrového a fyzikálneho inžinierstva Fakulty elektrotechniky a informatiky STU v Bratislave.

Predkladateľ :           Ing. Ľuboslav Motyák  
Ústav jadrového a fyzikálneho inžinierstva FEI STU  
Ilkovičova 3, 812 19, Bratislava

Ľahovník :                Ing. Ján Kliman, DrSc.  
Fyzikálny ústav SAV  
Dúbravská cesta 9, 845 11 Bratislava 45

Oponenti:                prof. Ing. Ján Mudroň, CSc.  
Akadémia ozbrojených síl generála Milana Rastislava Štefánika  
Demänová 393, 031 06 Liptovský Mikuláš-6

Ing. Ľuboslav Gmuca, CSc.  
Fyzikálny ústav SAV  
Dúbravská cesta 9, 845 11 Bratislava 45

Autoreferát bol rozposlaný: .....

Obhajoba dizertnej práce sa koná: ..... o ..... hod.

na: .....

pred komisiou pre obhajobu dizertnej práce doktorandského štúdia  
vymenovanou dňa ..... predsedom spoločnej odborovej komisie  
vo vednom odbore 5.2.48 Fyzikálne inžinierstvo.

Predseda spoločnej odborovej komisie:  
Prof. Ing. Július Círák, CSc.  
Ústav jadrového a fyzikálneho inžinierstva FEI STU  
812 19 Bratislava

# 1. Úvod

Jedným zo smerov rozvoja fyziky ťažkých iónov je hľadanie ostrova stability, ktorý je fixovaný na dvakrát magické jadro ťažšie ako  $^{208}\text{Pb}$ . Existencia takýchto jadier za makroskopickou hranicou stability je možná vďaka mikroskopickej stabilizácii ťažkými efektmi. V poslednom období boli v JINR Dubna prostredníctvom jadrových reakcií s urýchleným zväzkom izotopov  $^{48}\text{Ca}$  objavené nové prvky ťažšie ako  $Z = 118$  [1]. Tieto objavy naznačujú priblíženie sa k ostrovu stability super ťažkých elementov. V súčasnosti ešte nie je možné s istotou potvrdiť existenciu super ťažkého dvakrát magického jadra. Preto je v jadrovej fyzike kladený dôraz na experimentálne overenie teoretických predpovedí o existencii dlhovekých a možno aj stabilných super ťažkých elementov. V súčasnosti sú prakticky vyčerpané kombinácie zväzkov a terciárov zo stabilných a kvázistabilných izotopov existujúcich v prírode, preto je potrebné detailne študovať vplyv uzavretých ťažkých ťažkých na vznik super ťažkých prvkov pri rôznej hmotnostnej asymetrii vstupných a výstupných kanálov v jadrových reakciách prebiehajúcich v okolí Coulombovskej bariéry. Princíp spočíva v skúmaní fúzie pri čo možno najnižších energiách vzbudenia jadier, čo zabezpečuje vysokú neutrónovú nadbytok syntetizovaných jadier. V jadrových reakciách zameraných na produkciu super ťažkých elementov je účinný prierez rádovo v pikobarnoch, preto sú uvedené experimenty veľmi náročné. Tým vznikajú vysoké nároky na stabilitu a efektívnosť experimentálnych zariadení. Východiskom je použitie hmotnostných spektrometrov s vysokou efektívnosťou kvalitným hmotnostným rozlíšením a rýchlou časovou odozvou.



## 2. ZADANIE DIZERTA NEJ PRÁCE

Autor práce: Ing. Ľuboslav Motyák  
Študijný program: fyzikálne inžinierstvo  
Študijný odbor: 5.2.48. fyzikálne inžinierstvo  
Evidenčné číslo: FEI-104400-36151  
ID študenta: 36151  
Vedúci práce: Ing. Ján Kliman, DrSc.  
Názov práce: **Použitie hmotnostnej spektrometrie v skúmaní jadrových reakcií vyvolaných ťažkými iónmi**

Jazyk, v ktorom sa práca vypracuje: slovenský jazyk

Špecifikácia zadania: Riešenie zadania sa skladá z dvoch navzájom spojených častí, a to z prípravy hmotnostného spektrometra a z vykonania experimentu.  
1. Príprava hmotnostného spektrometra MASHA:  
- Zabezpečiť riadenie jednotlivých častí spektrometra (vakuový systém, chladenie, ECR iónový zdroj, termostát - výparník, iónooptický systém) a meranie pracovných charakteristík (teploty, magnetických polí, frekvencie, výkonu vŕ generátora, napájacích napätí a prúdov z napájacích zdrojov). Zaisťovať blokovanie nevhodných postupov operátora spektrometra, ktoré by viedli k havárii.  
- Navrhnúť a realizovať meranie energie ťažkých iónov urýchlených v cyklotróne.  
- V skúšobných experimentoch zistiť vlastnosti stripových a pixelových Si detektorov a vybrať vhodný Ge detektor pre spektroskopiu gama kvánt.  
- Experimentálne určiť základné parametre hmotnostného spektrometra, jeho účinnosť a časovú odozvu.  
2. Realizácia experimentu:  
- Testovať možnosť skúmania jadrových reakcií  $^{48}\text{Ca} + ^{208}\text{Pb}$  a  $^{48}\text{Ca} + ^{242}\text{Pu}$  na hmotnostnom spektrometri MASHA.  
- Študovať vplyv jadrovej štruktúry vstupných kanálov na účinné prierezy jadrových reakcií  $^{144}\text{Sm}(^{40}\text{Ar}, xn)^{184-xn}\text{Hg}$  a  $^{148}\text{Sm}(^{36}\text{Ar}, xn)^{184-xn}\text{Hg}$ .

Dátum zadania: 05. 09. 2011

Dátum odovzdania: 15. 06. 2017

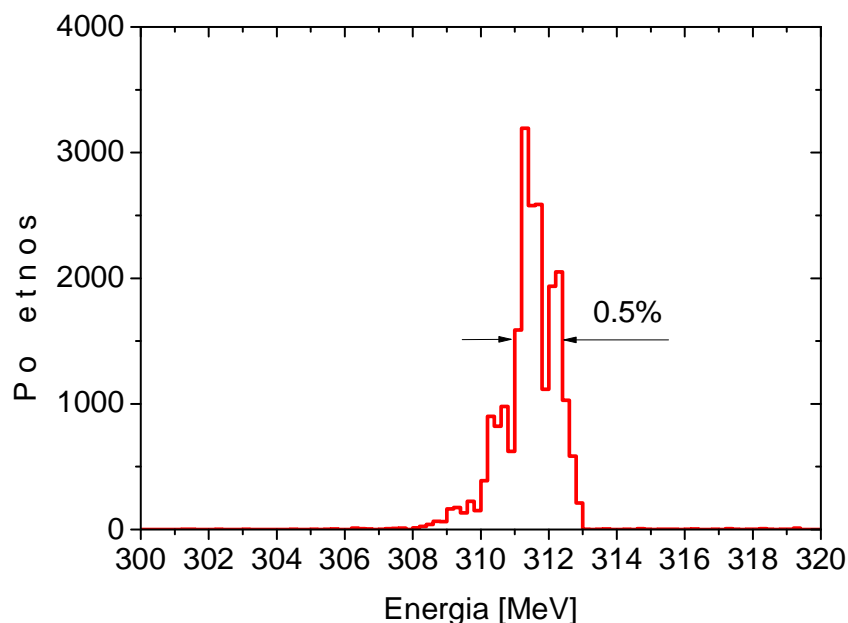
Ing. Ľuboslav Motyák  
riešiteľ

prof. Ing. Julius Cirák, CSc.  
vedúci pracoviska

prof. Ing. Julius Cirák, CSc.  
garant študijného programu

### 3. Obsah dizerta nej práce

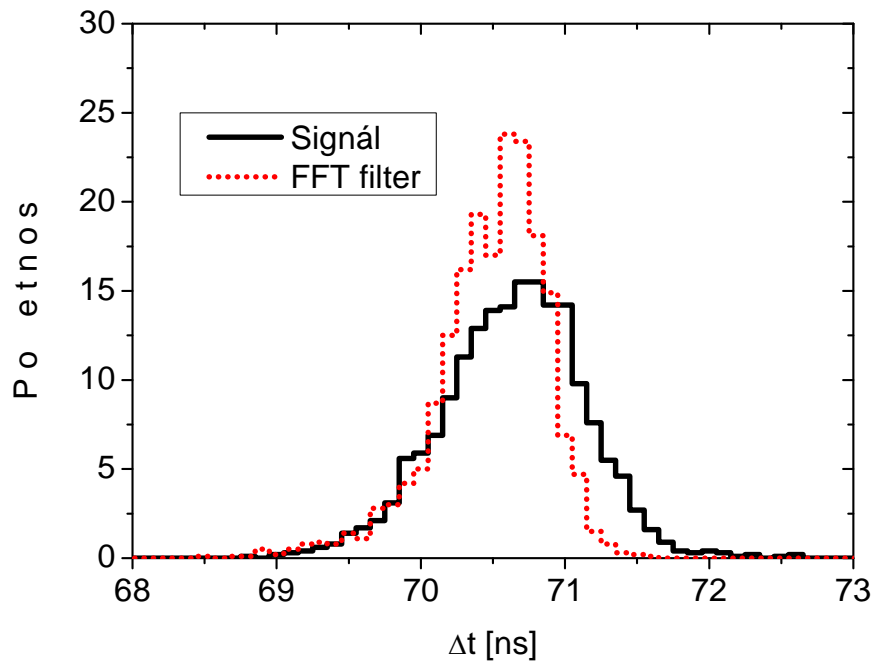
Dizerta ná práca sa zaoberá jadrovými reakciami meranými prostredníctvom hmotnostného spektrometra a technickou realizáciou uvedeného spektrometra. Pre efektívnu produkciu super ťažkých elementov na urýchlovači je potrebné určiť s dostatočnou presnosťou energiu zväzku. Medzi dôležité parametre patrí aj tok zväzku, ktorý spolu s energiou zväzku umožňuje určiť energetickú závislosť iného prierezu jadrovej reakcie. Merania energie zväzku môžu byť vo všeobecnosti rozdelené na kalibračné, pri ktorých je zväzok absorbovaný a na nedeštruktívne monitorovacie merania, ktoré neovplyvujú zväzok. V prípade kalibračného merania je potrebné priviesť zväzok do zariadenia určeného na meranie energie zväzku, preto nemôže byť v rovnakom čase použitý v experimente. V zariadení MASHA bola na meranie energie zväzku použitá metóda založená na dobe preletu medzi dvoma detektormi [2] v kombinácii s polovodičovým detektorom. Doba preletu medzi detektormi bola meraná mikrokanálovými a kapacitnými detektormi. Energetické spektrum namerané prostredníctvom TDC je zobrazené na obrázku obr. 1.



Obr. 1 Meranie energie zväzku pomocou TDC.

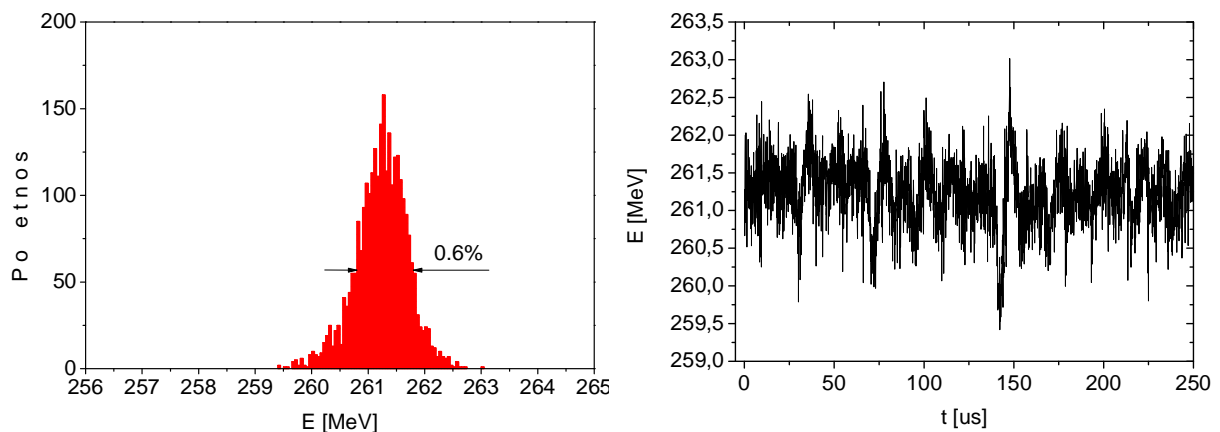
Meranie energie zväzku pomocou digitizérov umožnilo on-line spracovanie signálu. Ich najväčšou výhodou v porovnaní s TDC je univerzálnosť. Presnosť merania energie zväzku digitizérom je možné zlepšiť použitím matematických algoritmov na spracovanie signálov. Tento prístup bol použitý pri konštrukcii rýchleho časového diskriminátora, pracujúceho na princípe konštantnej časti amplitúdy, ktorým bola určená pozícia pík v signáloch meraných

digitizérom. Tým bol filtrovaný pomocou FFT (Fast Fourier Transformation). Filtrovanie signálu metódou FFT zlepšovalo presnosť merania energie zväzku predovšetkým v prípade nízkej intenzity zväzku obr. 2.



Obr. 2 časové spektrum určené pomocou FFT filtra a bez použitia FFT filtra.

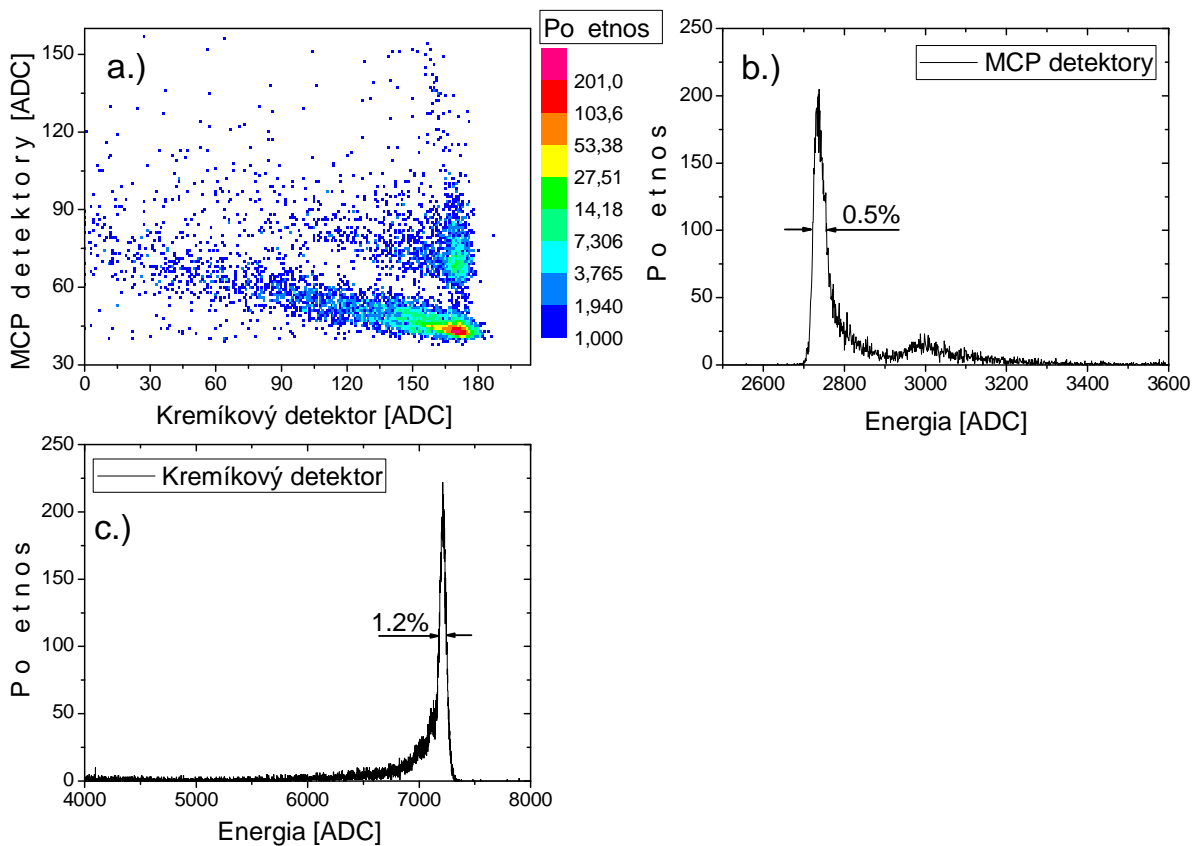
Systém dosahoval časové rozlíšenie 180 ps. FFT filter umožnil aj frekvenčnú analýzu signálu, na základe ktorej bolo možné určiť pôvod úniku na kapacitných detektoroch. V grafoch obr. 3 je zobrazená energia zväzku meraná digitizérom.



Obr. 3 Energetické spektrum merané digitizérom a závislosť energie od času.

Presnosť merania energie pomocou TDC je porovnateľná s presnosťou merania digitizérom. Rozšírenie píku merané digitizérom v spektre obr. 3 je spôsobené predovšetkým tým, že

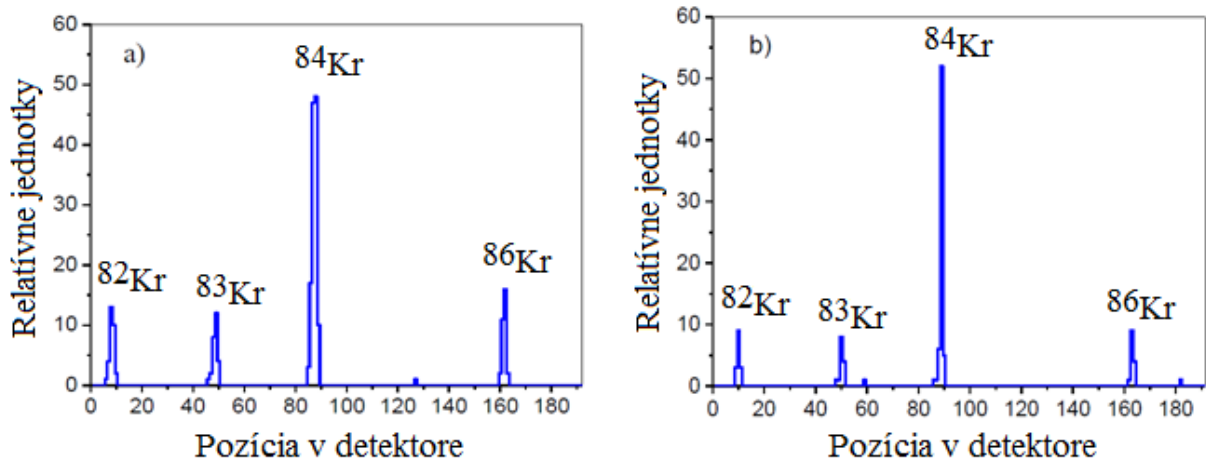
digitizér meral energiu aj pri nízkej intenzite zväzku kde sa prejavovali –umy a meranie bolo tým pádom menej presné. Digitizér meral o 0.1% nižšiu energiu v porovnaní s TDC, čo bolo spôsobené nepresným meraním oneskorenia medzi prvou a druhou vetvou zariadenia určeného na meranie energie zväzku. Na zvýšenie presnosti merania energie zväzku bolo vďaka pred experimentom urobené meranie oneskorenia signálu v prvej a druhej vetve zariadenia určeného na merania energie. Systém používaný na meranie energie zväzku pozostávajúci z mikrokanálových násobičov má podobné energetické rozlíšenie ako zariadenie používajúce kapacitné detektory. Dokáže však merať energiu zväzkov, ktoré majú malú intenzitu, čo kapacitné detektory neumôžňujú. Experimentálne určená energia zväzku  $^{48}\text{Ca}$  mikrokanálovými detektormi a polovodičovým detektorom je uvedená na obr. 4.



Obr. 4 V grafoch sú uvedené výsledky merania energie zväzku dvomi MCP detektormi a jedným kremíkovým detektorom. Na obrázku a.) je zobrazený trojrozmerný graf, kde na osi y je vynesená energia meraná MCP detektormi a na osi x je energia zväzku meraná polovodičovým detektorom. Na obrázku b.) je projekcia uvedeného trojrozmerného grafu na os y a na obrázku c.) je zobrazená projekcia na os x.

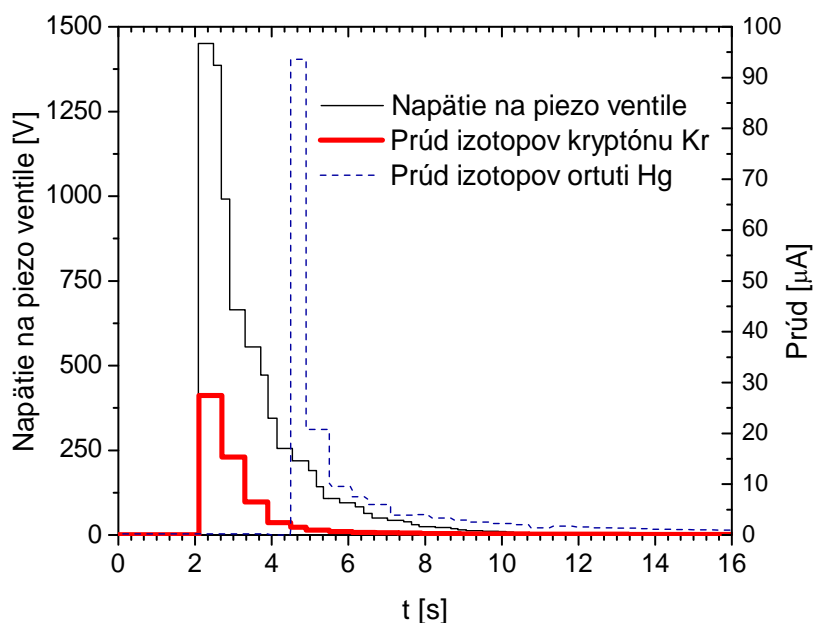
Meranie doby prieletu v kombinácii s polovodi ovým detektorom umoži uje ur i aj hmotnos zväzku. Nevýhoda uvedeného systému spo íva v tom, že dokáže mera energiu zväzku len ak neprebíha iný experiment a kalibrácia celého zariadenia je možná len pri malých energiách. Pri vyších energiách neexistuje vhodný kalibra ný fiari , preto je potrebné kalibráciu aproximova , o zna ne zhor ťuje presnos merania energie zväzku. Na meranie intenzity zväzku v reálnom ase bola pouflitá elektróda umiestnená za ter om, ktorá pracovala ako kolektor sekundárnych elektrónov emitovaných z ter a dopadajúcim zväzkom. Elektróda bola pripojená k napä ovému zdroju s prúdovým rozsahom 50  $\mu$ A, ktorý zároveň pracoval ako ve mi presný mera toku. Kvôli lepšiemu zberu emitovaných elektrónov bolo na elektródu zo zdroja privádzane napätie 100 V. Elektróda umiestnená za ter om umoži uje aj ve mi presnú fokusáciu zväzku na ter . Zaostre nie zväzku na ter spo íva v nastavení parametrov iónovodu tak, aby bol prúd na uvedenej elektróde maximálny. Systém diagnostiky zväzku zna né roz íruje schopnosti zariadenia MASHA a umoži uje mera napríklad ú inný prierez jadrových reakcií v závislosti od energie zväzku. Presné ur enie parametrov zväzku zvä ťuje aj pravdepodobnos syntézy super ťkých elementov. Uvedené meranie energie a intenzity zväzku je stárou sú as ou hmotnostného spektrometra. Riadenie založené na PLC systémoch [3] umoži ovalo realizova rôzne merania zamerané predovšetkým na zlepšenie základných vlastností spektrometra MASHA, t.j. hmotnostného rozlí enia  $m/m$  a ú innosti spektrometra. Veli ina  $m$  je hmotnos iónu a  $m$  predstavuje ťrku píku v polovici jeho výšky. V meraniach zameraných na optimalizáciu iónového zdroja boli pouflité vzácne plyny pridávané k héliu v iónovom zdroji s rýchlosťou  $1 \times 10^{-7}$  mbar/sec. Sekundárny zväzok emitovaný z iónového zdroja obsahoval viac ako 90% héliu. Vzácny plyn Kr, pomocou ktorého bolo realizované meranie tvoril len 1 až 3 percenta zväzku. Kryptón bol zakúpený z NIST (National Institute of Standards and Technology) a do iónového zdroja bol privádzaný v kalibrovaných množstvách. Zvyšnú as tvorili zostatkové plyny z atmosféry, ktoré do iónového zdroja prenikali cez vákuové tesnenia. Na obrázku obr. 5 sú experimentálne namerané hmotnostné spektrá pouflitého kryptónu.





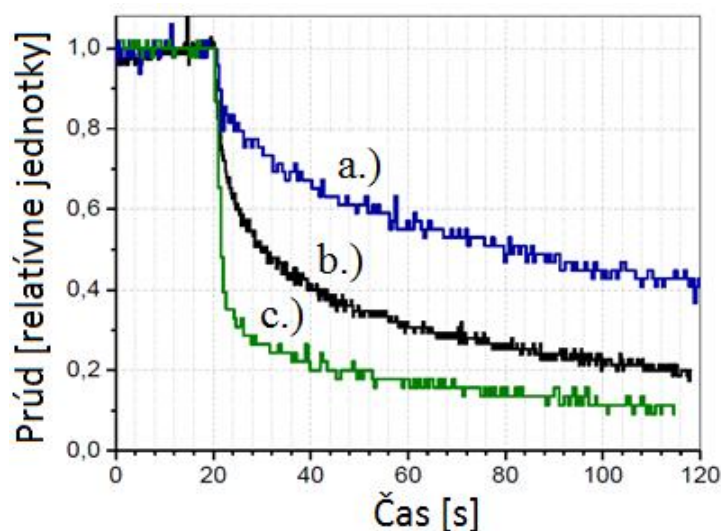
Obr. 5 Hmotnostné spektrum namerané pomocou vzácneho plynu Kr v dvoch módoch iónového zdroja. Na obrázku a.) je vysoko efektívny mód s efektívnosťou 60% a hmotnostným rozlíšením  $m/m = 1700$ . Na obrázku b.) je mód z vysokou rozlišovacou schopnosťou  $m/m = 3000$  a efektívnosťou 38%.

V móde zobrazenom na obrázku obr. 5 a.) bol prúd z iónového zdroja na úrovni  $550 \mu\text{A}$  a vysokofrekvenčný výkon iónového zdroja dosahoval  $60 \text{ W}$ . V uvedenom móde bola rozlišovacia schopnosť pomerne nízka kvôli chromatickej aberácii v magnetickom optickom systéme a veľkej hustote ionizovaných atómov. Na obrázku obr. 5 b.) sú pozorované piky podstatne užšie s hmotnostným rozlíšením  $3000$ . Efektívnosť v uvedenom móde dosahovala  $38 \%$ . Pri stanovení účinnosti bola ako detektor použitá jednoduchá matica zložená z vodičov na ktoré dopadali ióny s elementárnym nábojom  $+1$ . Prúd na jednotlivých vodičoch usporiadaných v matici, generovaný dopadajúcimi iónmi, bol následne mieraný a z jeho veľkosti bol určený presný počet atómov, ktoré dopadli na detektor. Po optimalizácii iónového zdroja boli uskutočnené dva experimenty s dvoma technologickými variantami iónových zdrojov. V prvom prípade bol použitý iónový zdroj zhotovený z nehrdzavejúcej ocele. V druhej variante bol použitý ten istý iónový zdroj no povrch jeho ionizačného objemu bol pokrytý chemicky inertným nitridom titanu (TiN). Táto technologická úprava bola urobená za účelom zníženia extrakčnej účinnosti atómov ortuti. Atómy ortuti boli do iónového zdroja injektované pomocou piezoelektrických ventilov riadených PLC systémom. Výsledok je uvedený na obrázku obr. 6.



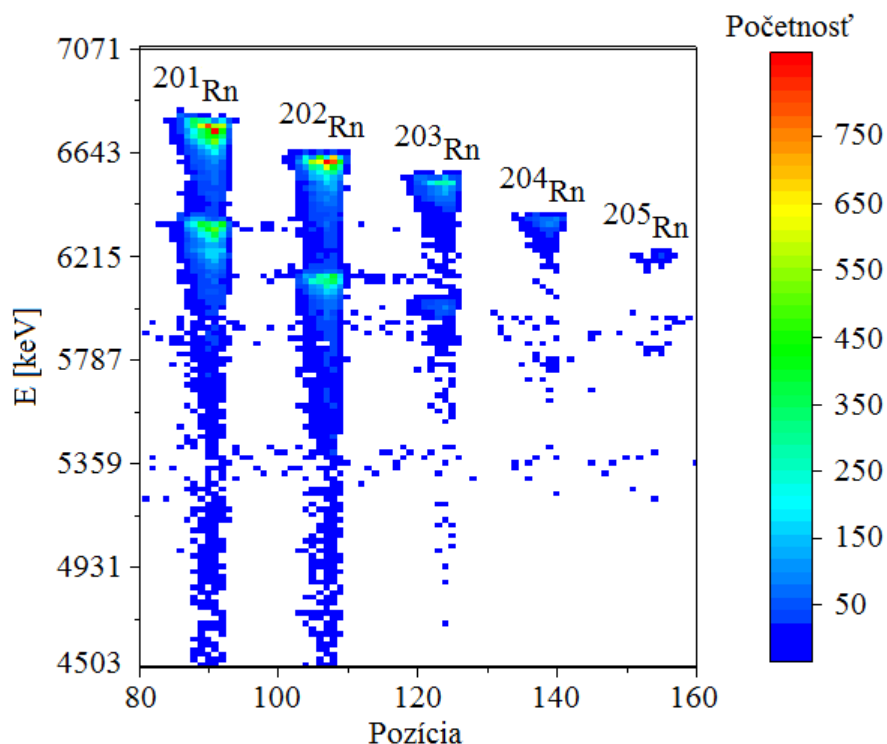
Obr. 6 V grafe je zobrazený impulz generovaný napä ovým zdrojom, ktorý bol pripojený k piezo ventilu a riadený pomocou PLC systému. Zobrazená je aj asová odozva prvého variantu iónového zdroja na injektované izotopy ortuti a kryptónu.

Po injektovaní do iónového zdroja boli izotopy ortuti ionizované a následne pomocou magnetickej optiky fokusované do detektora prúdu. Rozdiel v asovej odozve medzi uvedenými iónovými zdrojmi je zobrazený na obrázku obr. 7.



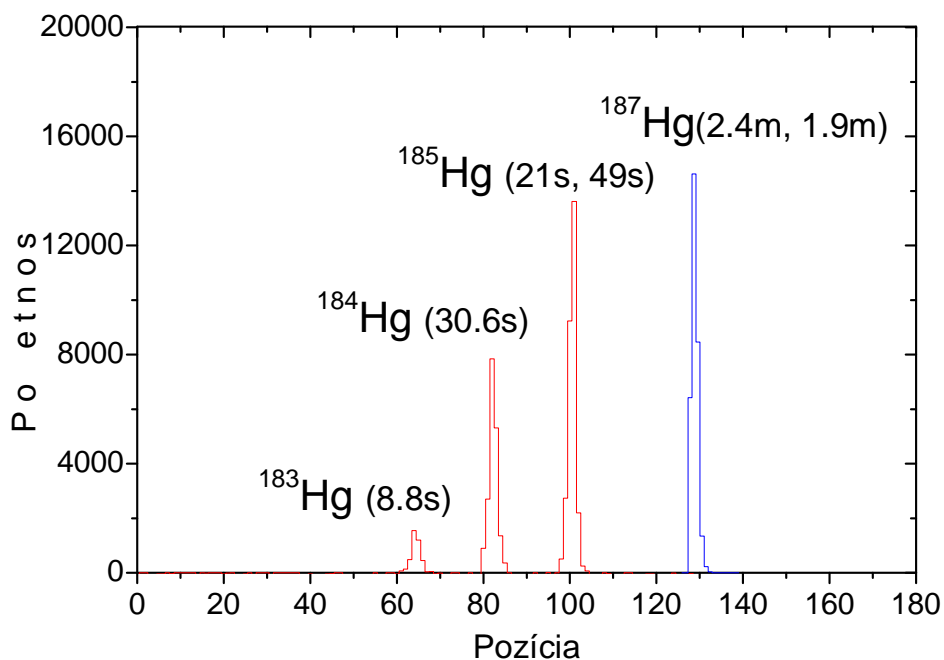
Obr. 7 Porovnanie dvoch typov iónových zdrojov. Závislos a) bola nameraná na iónovom zdroji z nehrdzavejúcej ocele. Závislos b) bola nameraná pomocou iónového zdroja pokrytého nitridom titanu (TiN) a priebeh c) bol získaný ionizáciou inertného plynu Kr.

Rozdiel medzi poufítými variantmi iónových zdrojov je zna ný. Ur enie asovej odozvy iónového zdroja prebiehalo spôsobom uvedeným v nasledujúcej asti. Hne ako prúd z iónového zdroja dosiahol maximálnu efektívnos zdroja, injektovanie ortuti do zdroja bolo preru-ené pomocou piezoventilu. Grafy na obrázku obr. 7 teda zobrazujú extrahovanie iónov z iónového zdroja po vypnutí ich injektovania do uvedeného zdroja. V prvom experimente s nepokrytým iónovým zdrojom klesol za 4 sekundy po et extrahovaný atómov ortuti zo zdroja po zavretí piezoventilu o 18 percent. V druhom experimente s pokrytým iónovým zdrojom klesla intenzita extrahovaných atómov ortuti o 36 percent. Uvedený rozdiel je zna ný av-ak na meranie super afkých elementov chemicky podobných ortuti je výsledok nedostato ný, preto je potrebné h ada al-ie moŕností ako zlep-i efektívnos iónového zdroja a zrýchli jeho asovú odozvu. V h adaní al-ích moŕností zlep-enia základných parametrov hmotnostného spektrometra je potrebné pokračova , aby bolo moŕné mera aj nové izotopy s nízkym ú inným prierezom produkcie a krátkym pol asom rozpadu. V experimente bol na detekciu alfa fiarenia poufítý stripový detektor typu PIPS.(Passivated Implanted Planar Silicon) [4]. Uvedený typ detektora má ve mi tenkú m tvu oblas v ktorej nie je detekovaná energia dopadajúcich alfa astíc. M tva oblas je tvorená elektródou, cez ktorú prechádza fiarenie do citlivého objemu detektora. Hrúbka citlivej polovodi ovej vrstvy je 300  $\mu\text{m}$  a elektródy 50 nm. V experimentoch bolo celkovo poufítých 352 stripov. Umiestnením detektorov vo fokálnej rovine, na ktorú dopadal separovaný sekundárny zväzok, bola dosiahnutá efektívnos detekcie alfa astíc a -tiepných fragmentov na úrovni 90 %. Jednotlivé detektory boli pripojené k nábojovo citlivým zosil ova om umiestneným v najmen-jej moŕnej vzdialenosti od detektorov. Zo zosil ova ov bol signál privedený na 166 kanálové multiplexory a následné do 166kanálových digitizérov [5]. Hlavným výstupom detek ného systému je trojrozmerné spektrum, v ktorom farba ozna uje po et astíc, na osi x je zobrazená pozícia , t.j. hmotnos iónu a na osi y je energia astíc v keV. V poufitej závislosti je moŕné zobrazi po et izotopov separovaných v hmotnostnom spektrometre, energiu alfa rozpadov separovaných izotopov a po et dcérskych produktov. Uvedeným spôsobom boli registrované izotopy Rn, ktoré boli produkované v jadrovej reakcii  $^{48}\text{Ca} + ^{242}\text{Pu}$  a implantované v stripovom detektore pri energií 38 keV, kde sa následne rozpadali prostredníctvom emisie alfa astíc. Výsledné trojrozmerné spektrum vý afkov izotopov Rn je znázornené na obr. 8.



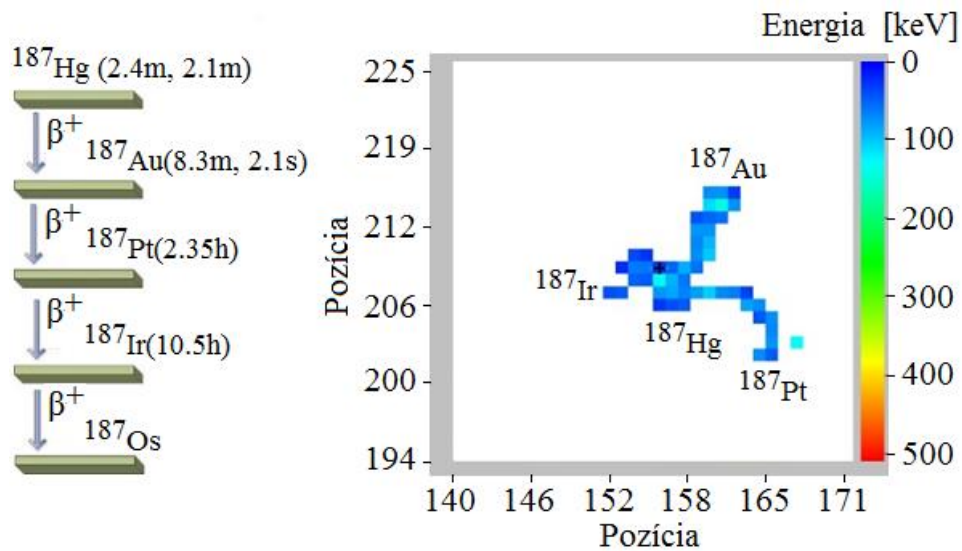
Obr. 8 Spektrum alfa rozpadov v závislosti od hmotnosti izotopov radónu merané pomocou kremíkových stripových detektorov. Jednotlivé izotopy boli hmotnostne separované v spektrometri MASHA

Druhým polovodičovým detektorom používaným v spektrometri MASHA je kremíkový detektor TIMEPIX s pixelovou štruktúrou [6]. Uvedený detektor s rozmermi 14 x 14 mm umožní merať energiu a dráhu gama žiarenia, alfa častíc, beta žiarenia a fragmentov žiarenia. Umožní tiež rozlíšiť druh nabitých častíc. Na povrchu má vytvorený ohmický kontakt, ktorý tvorí mŕtvu vrstvu s hrúbkou 1.5  $\mu\text{m}$ . Zložený je z 256 x 256 číselných pixelov s rozmermi 55  $\mu\text{m}$  a hrúbkou 300  $\mu\text{m}$ . Každý pixel predstavuje samostatný detektor, ktorý je zabezpečený vlastným spektrometrickým kanálom. Na nasledujúcom obrázku obr. 9 je zobrazený výsledok registrácie izotopov Hg, ktoré boli produkované v úplnej fúzii zväzku  $^{48}\text{Ca}$  s jadrami Nd. Stripový detektor a TIMEPIX boli spolu umiestnené vo fokálnej rovine hmotnostného spektrometra.

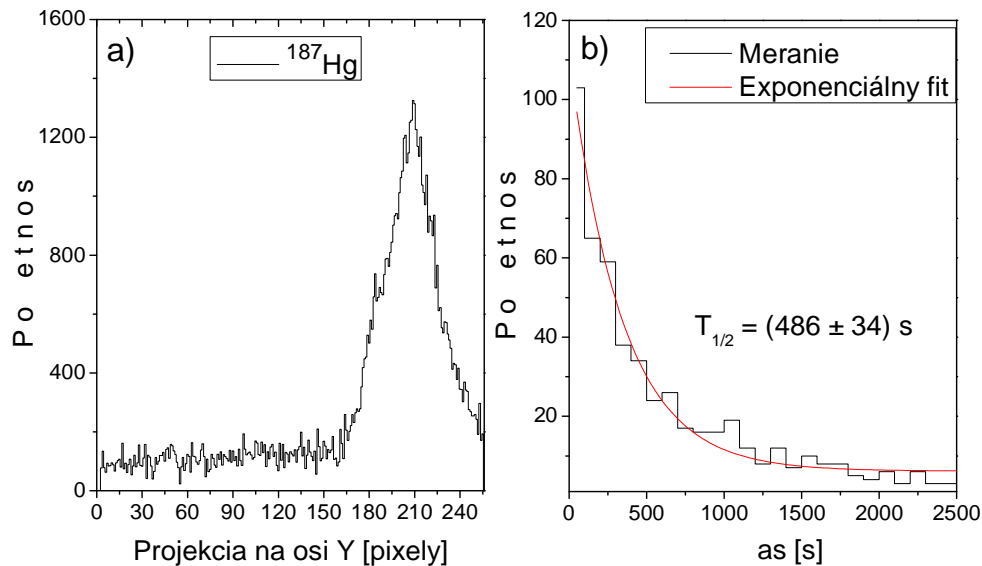


Obr. 9 Hmotnostné spektrum produktov jadrovej reakcie  $^{48}\text{Ca} + ^{\text{nat.}}\text{Nd}$ . červené píky zobrazujú alfa rozpad izotopov ortuti meraný stripovým detektorom. Modrý pík patrí beta rozpad izotopu  $^{187}\text{Hg}$ , ktorý bol identifikovaný TIMEPIX detektorom.

Izotopy ortuti boli produkované pomocou úplnej fúzie v jadrovej reakcii  $^{48}\text{Ca} + ^{\text{nat.}}\text{Nd}$ . Jadrá vznikajúce v uvedenej jadrovej reakcii sa obvykle rozpadajú cez emisiu alfa a beta žiarenia, prípadne pomocou elektrónového záchytu. Rozpady jadier boli registrované v tom istom ase stripovým detektorom a TIMEPIX detektorom. Po as merania bol v detektoroch implantovaný sekundárny zväzku ortuti s energiou 38 keV, kde sa následne jednotlivé izotopy rozpadali. Izotop ortuti  $^{187}\text{Hg}$  po as rozpadu na stabilný izotop  $^{187}\text{Hg}$   $^{187}\text{Au}$   $^{187}\text{Pt}$   $^{187}\text{Ir}$   $^{187}\text{Os}$  emitoval –tyri beta astice. Z toho vyplýva, že pomocou detektora TIMEPIX je možné identifikovať rozpad izotopu  $^{187}\text{Hg}$  na základe stôp vytvorených beta asticami v detektore, ktoré vychádzajú z jedného bodu v ktorom je implantované jadro  $^{187}\text{Hg}$  obr. 10.



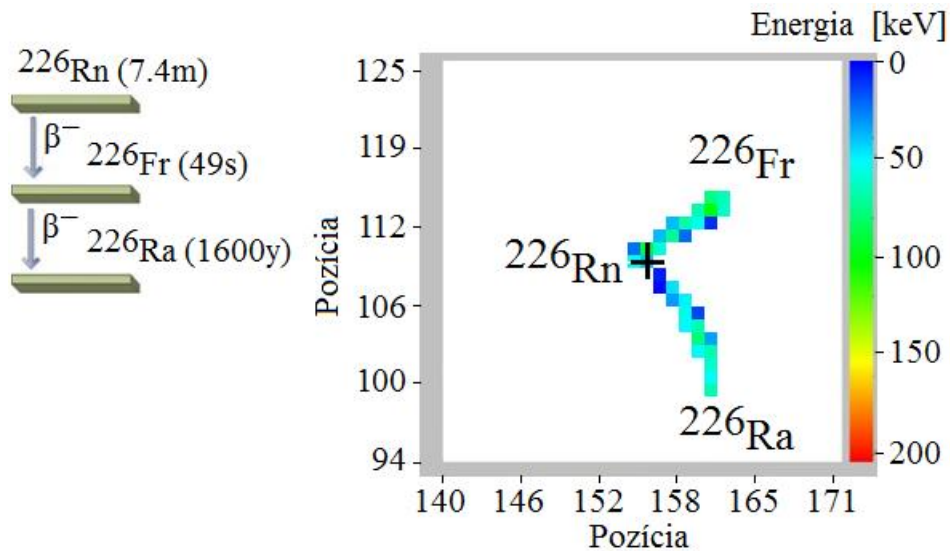
Obr. 10 Príklad identifikácie  $^{187}\text{Hg}$  izotopu pomocou TIMEPIX detektora.



Obr. 11 Na obrázku a.) je zobrazený tvar sekundárneho zväzku  $^{187}\text{Hg}$  v smere osi y. Na obrázku b.) je nameraná rozpadová krivka izotopu  $^{187}\text{Hg}$  a exponenciálny fit uvedeného merania s pol asom rozpadu izotopu  $^{187}\text{Au}$  ( $T_{1/2}=486$  s).

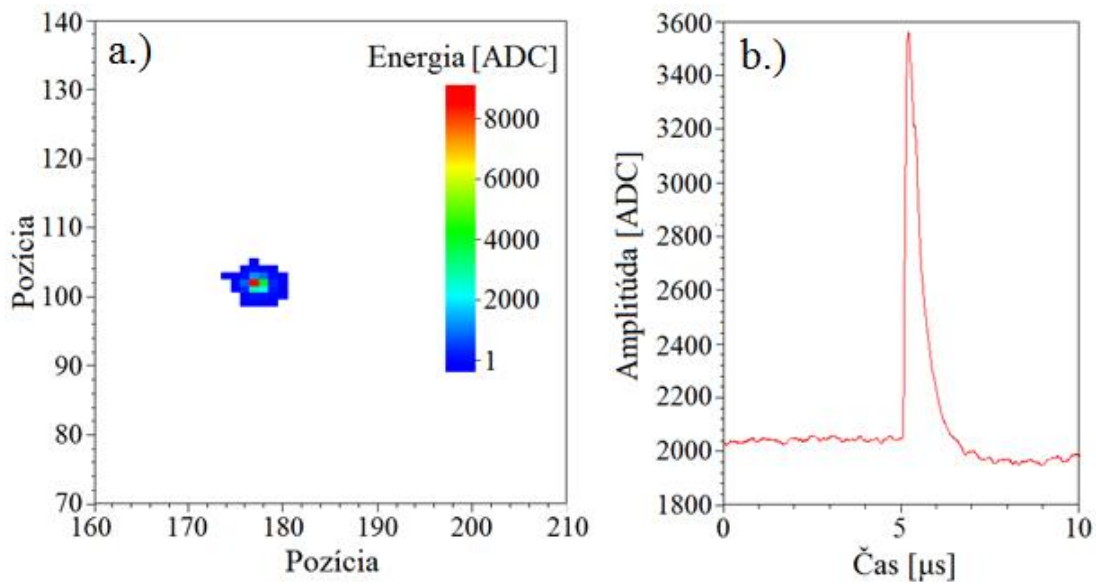
V experimentoch boli pomocou TIMEPIX detektorov merané pozície jednotlivých izotopov ortuť, dráhy beta fliaenia, čas v ktorom boli emitované beta astice a ich energia. Uvedený detektor bol poufity aj na registráciu produktov transfer reakcie  $^{48}\text{Ca}+^{232}\text{Th}$ . Kompozitný ter bol v uvedenom experimente zhotovený z vrstvy pyrolitického grafitu s hrúbkou 0.6 mm do ktorej bolo deponované tórium  $^{232}\text{Th}$ . Na uvedený ter, ktorý bol zahriaty na teplotu 1800 a 2000 K dopadal zväzok  $^{48}\text{Ca}$  s energiou 315 MeV. Produkty reakcie boli v ter i spomalené na tepelnú energiu. Vysoká teplota, na ktorú bol ter zahriaty, umofl ovala rýchlu difúziu atómov

radónu do ECR zdroja v ktorom boli jadra radónu ionizované na nábojový stupeň +1. Následne boli atómy urýchlené na energiu 38 keV a pomocou magnetickej optiky implantované do TIMEPIX detektora, v ktorom sa rozpadali. Výsledok experimentu je zobrazený na obr. 12.



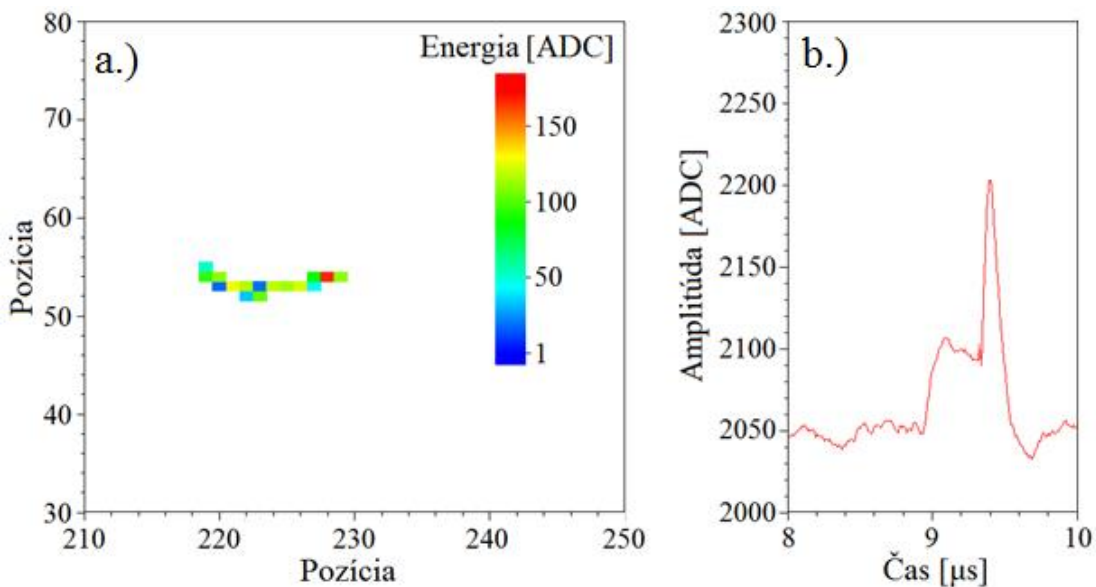
Obr. 12 Identifikácia izotopov z rozpadu  $^{226}\text{Rn}$  pomocou detektora TIMEPIX.

Ako je možné pozorovať na obr. 12,  $^{226}\text{Rn}$  sa rozpadá emisiou prvej beta častice na  $^{226}\text{Fr}$  a emisiou ďalšej beta častice na  $^{226}\text{Ra}$ . Energii častíc bolo možné určiť z amplitúdy signálu na elektróde, ktorá bola spoločná pre všetky pixely. Pri vysokom počte častíc dopadajúcich do detektora však na uvedenej elektróde dochádza k naloženiu jednotlivých píkov. Detektorom TIMEPIX je možné rozlíšiť typ dopadajúcich častíc, čo je jeho podstatnou výhodou. Častice bolo možné identifikovať z tvaru signálu generovaného na spoločnej elektróde ako aj na základe energie a dráhy častíc v detektore. Na obr. 13 je znázornená identifikácia alfa častíc z tvaru energie deponovanej časticami na jednotlivých pixeloch, ako aj z tvaru signálu na spoločnej elektróde.



Obr. 13 Identifikácia alfa astíc pomocou detektora TIMEPIX. Na obrázku a.) je tvar energie deponovanej alfa asticou na jednotlivých pixeloch a na obrázku b.) je signál generovaný alfa asticou v polovodi ovom detektore.

Identifikácia beta flarenia pomocou detektora TIMEPIX je zobrazená na obrázku obr. 14.

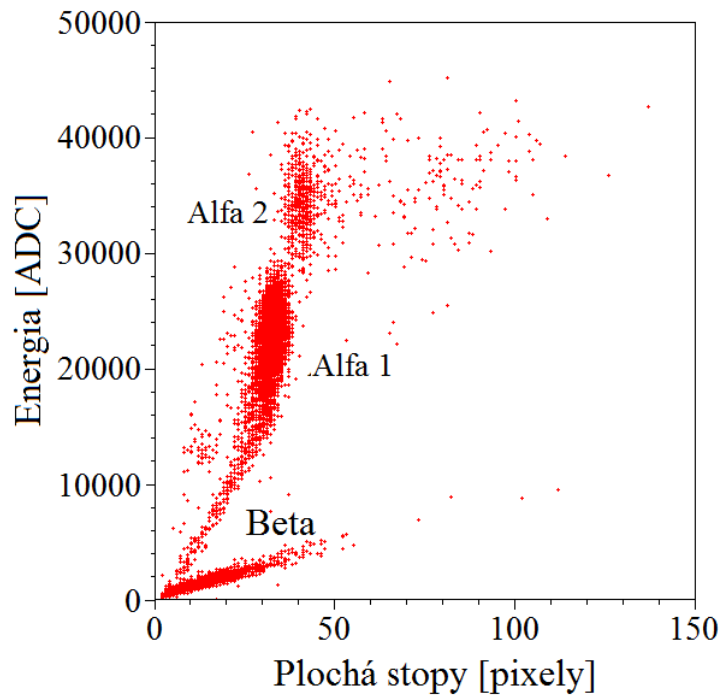


Obr. 14 Na obrázku a.) je energia deponovaná beta asticou v detektore a na obrázku b.) je tvar signálu generovaný beta asticou.

Rozdiel v registrácií alfa astíc a elektrónov z beta rozpadu je zrejmy na obrázkoch obr. 13 a obr. 14. Ako je možné pozorovať na obr. 13, energia alfa astice je v jednotlivých pixeloch deponovaná v rovnakom ase, tomu zodpovedá aj forma signálu. Stopa beta astice

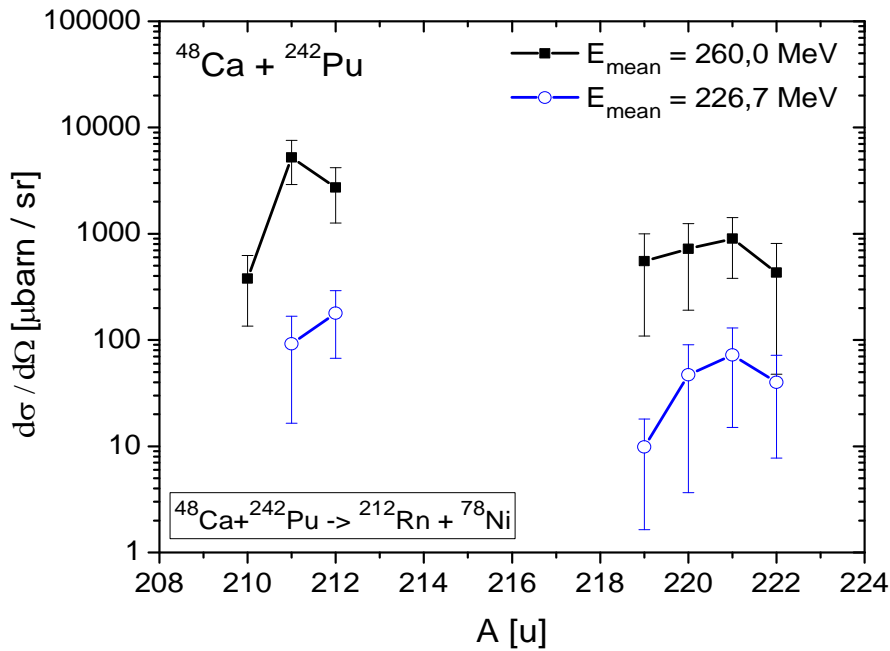


v detektore má formu dráhy, pozdĺ ktorej je postupne strácaná energia, čomu zodpovedá aj tvar napäťového impulzu obr. 14. Identifikáciu častíc si je možné predstaviť aj v dvojrozmernej závislosti, kde na osi y je celková energia deponovaná časticou v detektore TIMEPIX a na osi x je celková plocha stopy v polovodičovom detektore vytvorená dopadajúcou časticou obr. 15.



Obr. 15 Identifikácia častíc pomocou dvojrozmernej závislosti.

Jednotlivé oblasti v grafe obr. 15 predstavujú dva odlišné typy častíc. Uvedeným spôsobom bolo možné určiť pomocou polovodičového detektora TIMEPIX typ častice, jej energiu, pozíciu a čas v ktorom bola častica zaregistrovaná. Experimentálne pozorované únné prierezy jadrovej reakcie  $^{48}\text{Ca} + ^{242}\text{Pu}$  sú uvedené na obrázku obr. 16.



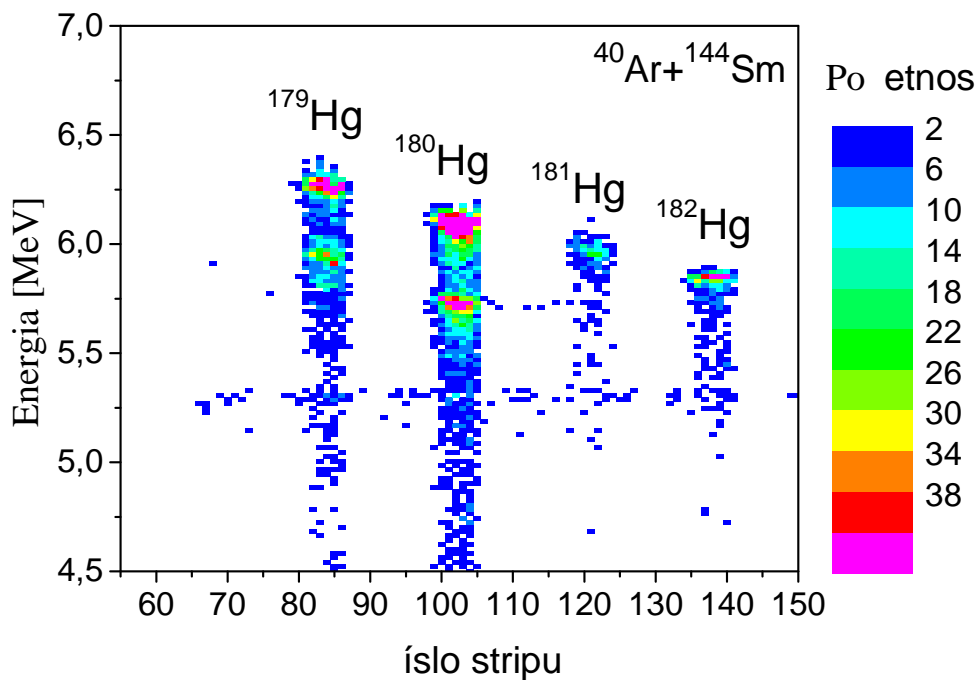
Obr. 16 Úinné prierezy izotopov radónu produkovaných v reakciách  $^{48}\text{Ca} + ^{242}\text{Pu}$  pri energiách zväzku v strede hrúbky ter a  $E_m = 226.7 \text{ MeV}$  a  $E_m = 260.0 \text{ MeV}$ .

Experimentálne pozorovaná jadrová reakcia s terom  $^{242}\text{Pu}$  je kváziófúziou. Ak sa produkty kváziófúznej reakcie delia po asprechodu do základného stavu na fragmenty, potom platí nasledujúci vzťah:

$$\frac{Z_{CN}}{A_{CN}} = \frac{Z_{FF}}{A_{FF}} \quad (1.1)$$

V prípade, keď  $Z_{CN} = 114$ ,  $A_{CN} = 290$  a  $Z_{FF} = 86$  potom  $A_{FF} = 219$ . Maximálny výskyt izotopov radónu by mal byť teda v okolí hmotnosti  $A = 219$ . V experimente bol však pozorovaný maximálny výskyt pri hmotnosti  $A = 212$ . Uvedený nesúlad je zrejme spôsobený uzavretou neutrónovou šupkou  $N = 126$ . Ide o partnerom izotopu  $^{212}\text{Rn}$  v kváziófúziách zloženého jadra  $^{290}\text{Fl}$  je dvojmagické jadro  $^{78}\text{Ni}$  ( $^{48}\text{Ca} + ^{242}\text{Pu} \rightarrow ^{212}\text{Rn} + ^{78}\text{Ni}$ ). Supermagické elementy vznikajú ako výparné rezidua v jadrových reakciách úplnej fúzie. Je známe, že zložené jadrá produkované vo fúzióvých jadrových reakciách sú stabilnejšie v prípade, ak majú štruktúru blízku uzavretým neutrónovým a protónovým šupkám. Vznik výparných rezidií v úplnej fúznej reakcii je možné rozdeliť na dve časti. V prvom kroku je vytvorené zložené jadro prostredníctvom fúznej reakcie zväzku v teri. Následne vznikajú výparné rezidua emisiou rýchlych častíc zloženým jadrom po asprechodu zloženého jadra do základného stavu. V procese vzniku výparných rezidií si navzájom konkurujú vyparovanie rýchlych častíc s fúziou. Meranie úinného prierezu výparných rezidií teda poskytuje informácie o fúziách

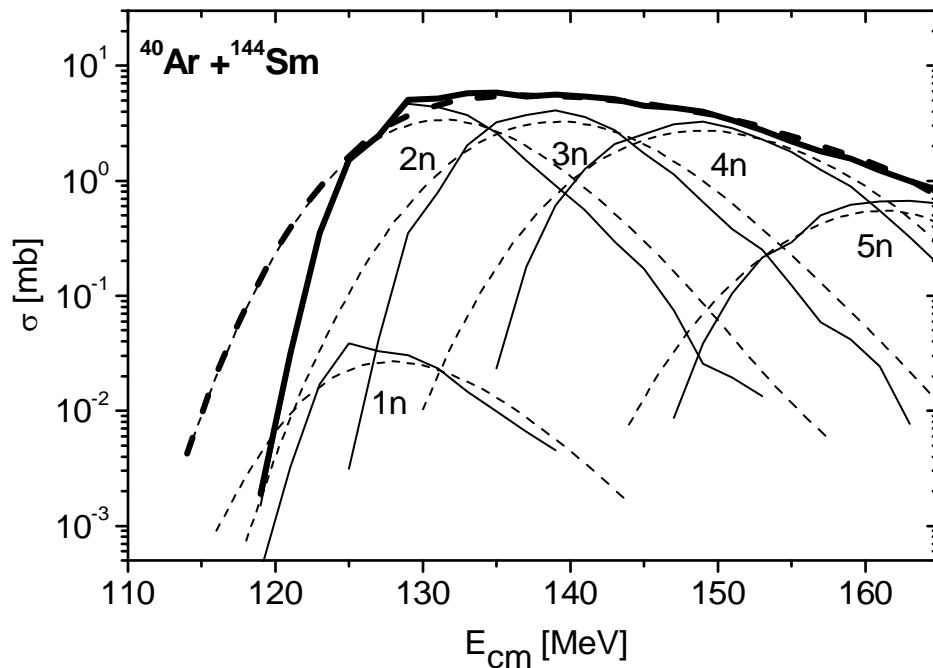
a taktiefl o prechode vzbuđeného jadra do základného stavu. Pre hlbšie pochopenie jadrových reakcií je vhodné pozorovať vplyv uzavretých šupiek, statických deformácií a vibrácií interagujúcich jadier na úinný prierez fúzió-výparných jadrových reakcií. Uvedené experimenty nie je možné realizovať v prípade super ťvých elementov, pretože jadrové reakcie v ktorých vznikajú super ťvé elementy majú veľmi nízky úinný prierez. Podobné experimenty je však možné realizovať s ťhými jadrami  $Z=80-90$ , ktoré majú úinné prierezy v jadrových reakciách na úrovni milibarnov. Zariadenie MASHA bolo použité na meranie úinného prierezu výparných reziduí v jadrových reakciách  $^{40}\text{Ar}+^{144}\text{Sm}$  a  $^{40}\text{Ar}+^{166}\text{Er}$  obr. 17.



Obr. 17. Dvojmerná závislos energie alfa ťstíc od hmotnosti izotopov Hg produkovaných v jadrovej reakcii  $^{40}\text{Ar}+^{144}\text{Sm}$ .

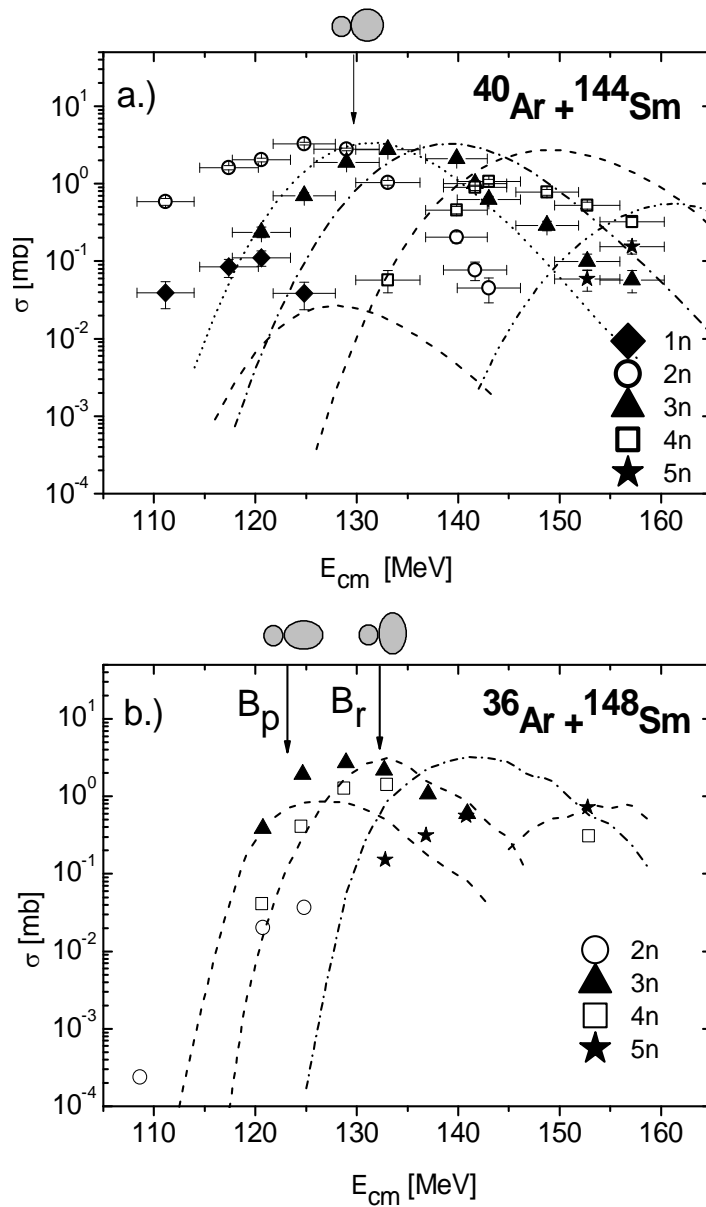
Cyklotrón U-400M produkoval zväzok iónov  $^{40}\text{Ar}$  s konštantnou energiou 260 MeV. Energia zväzku sa na požadovanú hodnotu nastavovala prostredníctvom tenkej titánovej fólie s hrúbkou 6 ó 14  $\mu\text{m}$  v ktorej zväzok strácal energiu. Urí presnú energiu zväzku, pri ktorej prebieha jadrová reakcia je pomerne náročné, pretože energia zväzku sa rozptyľuje na defektoch v teri a v titánovej fólii. Na energiu zväzku majú vplyv aj ionizačné straty v materiáloch, cez ktoré prechádza zväzok a taktiefl samotná jadrová reakcia, ktorá prebieha v rôznych oblastiach tera, preto je obvykle pri analýze nameraných údajov uvažovaná energia zväzku v strede hrúbky tera  $E_0$ . V prípade strmšej závislosti úinného prierezu od energie zväzku je potrebné vypoítať priemernú fúzió-výparnú excitačnú funkciu na intervale

energií ( $E_0 - E$ ,  $E_0$ ), kde  $E$  vyjadruje energetické straty zväzku v materiáloch cez ktoré prechádza zväzok. Na nasledujúcom obrázku obr. 18 je zobrazená excita ná funkcia reakcie  $^{40}\text{Ar} + ^{144}\text{Sm}$  vypo ítaná programom NRV [7] pre výparné kanály  $1n$  a  $5n$ .



Obr. 18 Plnou íarou je ozna ený ú inný prierez výparných rezíduí vypo ítaný pre jednotlivé kanály prostredníctvom modelu zviazaných kanálov [7]. Preru-ovanou íarou je ozna ený ú inný prierez vypo ítaný v prípade rozptýlenej energie zväzku. Preru-ovanou hrubou íarou je ozna ený sú et ú inných prierezov vypo ítaný v prípade rozptýlenej energie a plnou hrubou íarou je ozna ený sú et ú inných prierezov.

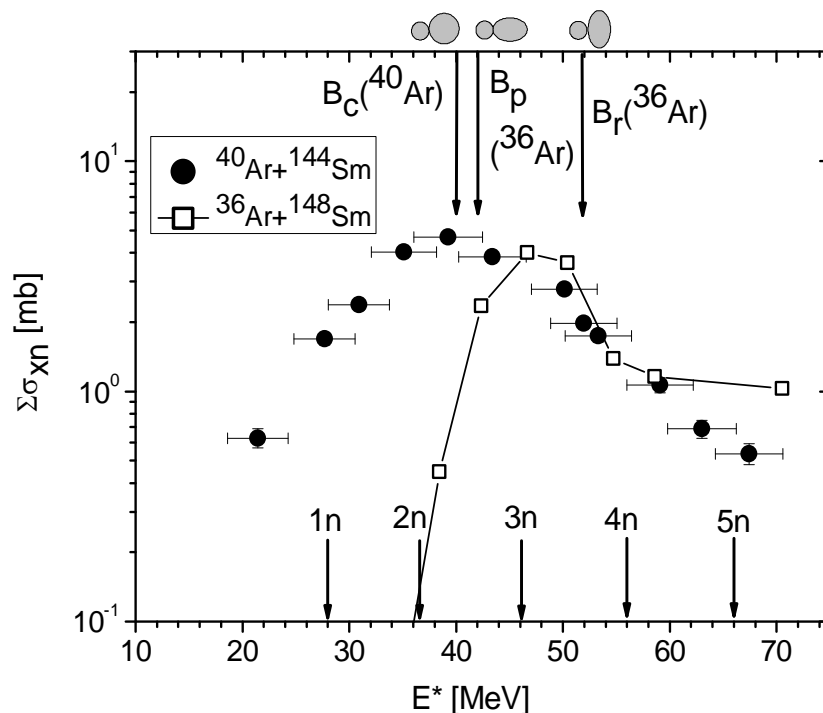
Rozptyl energie zväzku bol pri výpo toch uvaľovaný na úrovni  $\pm 3$  MeV. Izotopy samária sú vhodné pre pozorovanie vplyvu deformácie jadier na ú inný prierez jadrovej reakcie, pretože nadobúdajú tvar od nedeformovaných sférických  $^{144}\text{Sm}$  aľ po silne deformované izotopy  $^{154}\text{Sm}$  [8,9]. Produkty reakcií  $^{40}\text{Ar} + ^{144}\text{Sm}$  a  $^{36}\text{Ar} + ^{148}\text{Sm}$  boli separované hmotnostným separátorom MASHA a registrované stripovým detektorom umiestneným vo fokálnej rovine separátora. V uvedených reakciách bola absolútna hodnota ú inného prierezu normovaná na teoreticky vypo ítaný vý aľok úplnej fúzie. Samáriový ter bol zhotovený z oxidu  $\text{Sm}_2\text{O}_3$  s hustotou  $0.5\text{mg/cm}^2$ . istota poufítého samária bola 98.5%. Na obrázku obr. 19 je zobrazený ú inný prierez výparných rezíduí vznikajúcich v reakciách  $^{40}\text{Ar} + ^{144}\text{Sm} \rightarrow ^{184-x}\text{Hg} - xn$  a  $^{36}\text{Ar} + ^{148}\text{Sm} \rightarrow ^{184-x}\text{Hg} - xn$ , kde  $x$  ozna uje výparný kanál.



Obr. 19 Na obrázku a.) je zobrazený vypoítaný a experimentálne určený úinný prierez reakcie  $^{40}\text{Ar} + ^{144}\text{Sm}$  a na obrázku b.) je reakcia  $^{36}\text{Ar} + ^{148}\text{Sm}$  prevzatá z práce [10]. Úinný prierez je zobrazený v závislosti od energie zväzku v afliskovej sústave. Priebeh interakcií v prípade sférického izotopu  $^{144}\text{Sm}$  a deformovaného izotopu  $^{148}\text{Sm}$  je graficky znázornený v hornejasti grafov.  $B_p$  a  $B_r$  sú označené zodpovedajúce Coulombove bariéry. Prerušovanou čiarou sú označené úinné prierezy vypoítane z modelu zviazaných kanálov pomocou NRV kódu.

Porovnaním reakcií zobrazených na obrázku obr. 19, pri ktorých vznikal ten istý izotop  $^{184}\text{Hg}$  je možné určiť vplyv vlastností vstupných kanálov na excitačnú funkciu výparných rezíduí. Na obrázku obr. 19 je možné pozorovať v reakcií  $^{40}\text{Ar} + ^{144}\text{Sm}$  väčší výtlačok 2n kanála v porovnaní s 3n kanálom, zatiaľ čo v reakcií  $^{36}\text{Ar} + ^{148}\text{Sm}$  je väčší výtlačok 3n kanála väčší

v porovnaní s 2n kanálom. Pozorovaný rozdiel v ú innom priereze analyzovaných reakcií je spôsobený rozdielnou pravdepodobnosťou jadrovej fúzie. V jadrovej reakcií  $^{40}\text{Ar}+^{144}\text{Sm}$  majú izotopy uzavretú šupku a sféricky tvar, preto má v uvedenej reakcii Coulombová bariéra len jednu hodnotu  $B_C = 129,6 \text{ MeV}$ . Hodnota Coulombovej bariéry bola určená semiempirickým modelom zviazaných kanálov [7]. V jadrových reakciách medzi sférickým jadrom  $^{36}\text{Ar}$  a deformovaným jadrom  $^{148}\text{Sm}$  ( $\epsilon_2 = 0.161$ ,  $\epsilon_4 = 0.059$ ) závisí výška Coulombovej bariéry od orientácie deformovaného izotopu. V prípade polárnej orientácie izotopu  $^{148}\text{Sm}$  je výška Coulombovej bariéry  $B_p = 123.1 \text{ MeV}$  a pri ekvatoriálnej orientácii je výška bariéry  $B_r = 132.5 \text{ MeV}$  obr. 19. S nameranými údajmi bol porovnaný model zviazaných kanálov riešený numericky prostredníctvom NRV kódu. V uvedenom modeli bol použitý Woods-Saxon potenciál s parametrami  $V_0 = -50 \text{ MeV}$ ,  $r_0 = 1.25 \text{ fm}$  a  $a^{vol} = 0.4 \text{ fm}$ . Experimentálne namerané údaje a teoreticky vypočítané ú inné prierezy skúmaných jadrových reakcií sú v dobrej zhode. Na obrázku obr. 20 je zobrazený experimentálne určený celkový ú iný prierez ( $\Sigma\sigma_{xn}$ ) v závislosti od excitačnej energie zlúčených jadier  $E^*$  v reakciách  $^{40}\text{Ar}+^{144}\text{Sm}$  a  $^{36}\text{Ar}+^{148}\text{Sm}$ .



Obr. 20 Celkový ú iný prierez zobrazený v závislosti na excitačnej energii zlúčeného jadra.

Šípky v spodnej časti grafu označujú polohu maximálnych prierezov v jednotlivých kanáloch.

Pre obe reakcie majú maxima excitačných funkcií v závislosti od excitačnej energie zlúčených jadier rovnakú polohu obr. 20. Účinný prierez v skúmaných jadrových reakciách má nad energiou  $E^* > 45$  MeV ten istý priebeh. Na nízkych energiách pod Coulombovou bariérou sa priebiehy účinných prierezov podstatne líšia obr. 20. Tvar meranej excitačnej funkcie závisí od fúznej excitačnej funkcie  $\sigma_{\text{fus}}(E)$  ako aj od priebehu vyparovania ťažkých jadier. V uvedených jadrových reakciách je prechod zlúčeného jadra  $^{184}\text{Hg}$  do základného stavu rovnaký, avšak funkcia  $\sigma_{\text{fus}}(E)$  nie je rovnaká, pretože závisí od výšky fúznej bariéry. V reakcii  $^{40}\text{Ar} + ^{144}\text{Sm}$  je 2n kanál iasto ne pod Coulombovou bariérou. V jadrovej reakcii  $^{36}\text{Ar} + ^{148}\text{Sm}$  je 2n kanál hlboko pod bariérou pre všetky konfigurácie jadier a 3n kanál je pod bariérou v prípade ekvatoriálnej konfigurácie jadier a nad bariérou v prípade polárnej konfigurácie izotopov. Účinný prierez 2n a 3n kanála jadrovej reakcie  $^{36}\text{Ar} + ^{148}\text{Sm}$  preto silne závisí od pozície Coulombovej bariéry a excitačnej energie zlúčeného jadra.

## 4. Závery dizerta nej práce

Bol navrhnutý systém merania energie zväzku  $\alpha$  iónov, ktorý je umiestnený na vstupe hmotnostného spektrometra a pozostáva z kapacitných detektorov. Energia zväzku bola určená z periódy, za ktorú zväzok náboja preletí medzi kapacitnými detektormi umiestnenými od seba v presne definovanej vzdialenosti. Zariadenie umožní určiť energiu zväzku s relatívnou chybou 0,3 - 1% v závislosti od vzdialenosti medzi detektormi. Bolo realizované aj meranie energie odkloneného zväzku pomocou preletových detektorov pracujúcich na princípe mikrokanálových násobičov sekundárnych elektrónov a Si(Au) kremíkového detektora. Systém umožní určiť energiu zväzku s relatívnou chybou 0,5% v prípade preletových detektorov a 1,2% pri použití kremíkového detektora. Okrem Faradayovho valca, ktorý slúži na absolútne meranie intenzity zväzku, bolo vyvinuté aj nedeštruktívne monitorovanie zväzku založené na registrácii sekundárnych elektrónov emitovaných z tercia. Na riadenie a kontrolu hmotnostného spektrometra, pracujúceho v rádionom prostredí, bol použitý modulárny PLC systém WAGO 750-837. Riadenie jednotlivých zariadení zabezpečovalo 5 analógových výstupov, 14 analógových vstupov, 37 digitálnych výstupov a 60 digitálnych vstupov. S novým riadiacim systémom boli testované dve konštrukčné varianty iónového zdroja, ako aj dva pracovné režimy s hmotnostným rozlíšením 1700 a 3000, v ktorých bola zistená účinnosť zdroja 60% a 38%. Bol vytvorený systém určený na analýzu produktov jadrových reakcií, ktorý pozostával zo stripových detektorov umiestnených vo fokálnej rovine spektrometra. Multiplexným spracovaním signálov z 352 stripov Si(Al) detektora bolo možné určiť hmotnosť a rozpadovú schému separovaných jadier. Použitý systém umožnil analyzovať asové priebehy napätia na stripových detektoroch, čo je jeho značnou výhodou. V rámci experimentov s TIMEPIX detektorom bola získaná detailnejšia informácia o pozíciách, energiách a smeroch registrácie implantovaných jadier, alfa častíc a elektrónov z beta rozpadu. Na základe uvedených informácií bolo možné rozlíšiť jednotlivé izotopy a druh registrovaných častíc. Porovnaním vlastností HPGe a BEGe detektorov bolo zistené, že BEGe detektor má pri 8,7-krát nižšej účinnosti 2-krát nižší detekčný limit. BEGe detektor umožní získať rovnakú štatistickú informáciu ako HPGe detektor v jadrových reakciách s dvakrát nižším účinným prierezom. Izotopy radónov a ortuti boli produkované v mnohonukleónových transfer reakciách  $^{242}\text{Pu}(^{48}\text{Ca},x\text{n})^{222-x\text{n}}\text{Rn}$  a  $^{208}\text{Pb}(^{48}\text{Ca},x\text{n})^{222-x\text{n}}\text{Rn}$  pri dvoch energiách zväzku  $^{48}\text{Ca}$ . Vplyv dvojmagického  $^{78}\text{Ni}$  a uzavretej šupky  $N=126$  na účinný prierez jadrovej reakcie bol pozorovaný v reakciách  $^{48}\text{Ca} + ^{242}\text{Pu}$ . V jadrových reakciách



$^{40}\text{Ar}+^{144}\text{Sm}\rightarrow^{184}\text{Hg}$ ,  $^{36}\text{Ar}+^{148}\text{Sm}$  a  $^{40}\text{Ar}+^{166}\text{Er}\rightarrow^{206}\text{Rn}$  bola pozorovaná silná korelácia medzi úinným prierezom výparných rezíduí a –truktúrou ter ových jadier, ktorá bola spôsobená priestorovou orientáciou deformovaných ter ových jadier v priebehu interakcie. Vplyv vstupnej asymetrie na xn excita né funkcie zlofeneého jadra bol skúmaný prostredníctvom porovnania dvoch jadrových reakcií  $^{40}\text{Ar}+^{144}\text{Sm}$  a  $^{36}\text{Ar}+^{148}\text{Sm}$ , ktorých produktom je rovnaké zlofeneé jadro  $^{184}\text{Hg}$ . Zmeny priebehu excita ných funkcií zlofeneého jadra  $^{184}\text{Hg}$  pozorované v rôznych výparných kanáloch sú spôsobené priestorovou orientáciou a deformáciami ter ových jadier.

## Literatúra

- [1] V. Zagrebaev et al., Physical Review C 78 (2008) 034610.
- [2] Z. Kormány, Nucl. Instr. and Meth. in Phys. Res. A 337 (1994) 258.
- [3] Manual Wago I/O System 750-837.
- [4] E. Steinbauer et al., Nucl. Instr. Meth. B 85 (1994) 642.
- [5] User Manual Digital Gamma Finder (DGF) PIXIE-16 (2009).
- [6] J. Jakubek et al., Nucl. Instr. and Meth. in Phys. Res. A 591 (2008) 155.
- [7] Nrv: <http://nrv.jinr.ru/nrv/>
- [8] W.Reisdorf et al., Phys.Rev.Lett 49 (1982) 1181.
- [9] W. Reisdorf, et al., Nucl.Phys.A 438 (1985) 212.
- [10] M.Schadel et al., GSI Report (2003) 20.

# Zoznam publikovaných prác

## 1. The current status of the MASHA setup

V. Yu. Vedeneev, A. M. Rodin, L. Krupa, A. V. Belozerov, E. V. Chernysheva, S. N. Dmitriev, A. V. Gulyaev, A. V. Gulyaeva, D. Kamas, J. Kliman, A. B. Komarov, S. Motycak, A. S. Novoselov, V. S. Salamatin, S. V. Stepantsov, A. V. Podshibyakin, S. A. Yukhimchuk, C. Granja, S. Pospisil

Hyperfine Interactions 19 (2017) 238 DOI: 10.1007/s10751-017-1395-9

## 2. A new beam diagnostic system for the MASHA setup

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, D. Kamas

Phys. Part. Nuclei Lett. 13 (2016) 586 DOI: 10.1134/S1547477116050356

## 3. Data acquisition system for the focal plane detector of the mass separator MASHA

S. Novoselov, M. Rodin, S. Motycak, V. Podshibyakin, L. Krupa, V. Belozerov, V. Yu. Vedeneyev, V. Gulyaev, V. Gulyaeva, J. Kliman, V. S. Salamatin, S. V. Stepantsov, E. V. Chernysheva, S. A. Yukhimchuk, B. Komarov, D. Kamas

Phys. Part. Nuclei Lett. 13 (2016) 595 DOI: 10.1134/S154747711605037X

## 4. Applications of superconducting quantum interference devices

F. Janicek, A. Cerman, M. Perny, I. Brilla, L. Marko, S. Motycak

Electric Power Engineering (EPE), 2015 16th International Scientific Conference DOI: 10.1109/EPE.2015.7161204

## 5. Application of the Broad Energy Germanium detector: A technique for elucidating - decay schemes which involve daughter nuclei with very low energy excited states

M. Venhart, J.L. Wood, A.J. Boston, T.E. Cocolios, L.J. Harkness-Brennan, R.-D. Herzberg, D.T. Joss, D.S. Judson, J. Kliman, V. Matoušek, <sup>TM</sup>Motyák, R.D. Page, A. Patel, K. Petřík, M. Sedlák, M. Veselský

Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A 849 (2017) 112

**6. The measurement of the evaporation residues excitation functions in the fusion reactions  $^{144}\text{Sm}(^{40}\text{Ar};xn)$  and  $^{166}\text{Er}(^{40}\text{Ar};xn)$**

E. V. Chernysheva, A.M. Rodin, A. V. Belozerov, S. N. Dmitriev, A. V. Gulyaev, A. V. Gulyaeva, M. G.Itkis, A. S. Novoselov, Yu. Ts.Oganessian, V. S. Salamatin, S. V. Stepantsov, V. Yu. Vedeneev, S. A. Yukhimchuk, L. Krupa, J. Kliman, S. Motycak, I. Sivacek

Proceedings of International Symposium on Exotic Nuclei EXON 2014, 8 ó 13 September 2014, Kaliningrad, Russia. ISBN: 978-981-4699-45-7

**7. Using MASHA+TIMEPIX setup for registration beta decay isotopes produced in heavy ion induced reactions**

A.M. Rodin, A. V. Belozerov, E. V. Chernysheva, S. N. Dmitriev, A. V. Gulyaeva, M. G.Itkis, A. S. Novoselov, Yu. Ts.Oganessian, V. S. Salamatin, S. V. Stepantsov, V. Yu. Vedeneev, S. A. Yukhimchuk, L. Krupa, C. Granja, S. Pospisil, J. Kliman, S. Motycak, I. Sivacek

Proceedings of International Symposium on Exotic Nuclei EXON 2014, 8 ó 13 September 2014, Kaliningrad, Russia. ISBN: 978-981-4699-45-7

## Abstract

Subject of this thesis is observation of nuclear reactions by using mass separator MASHA. To determine a nuclear cross section depending on beam energy, a diagnostic system has been constructed. This system consists of measurement of energy and intensity of beam of heavy ions. Beam energy based on time of flight between two detectors has been measured by using pick up detectors, microchannel plates and semiconductor detectors. Beam intensity has been observed by Faraday cup and by detection of secondary electrons that were emitted by beam from target. The signal from capacity detectors and micro-channel detectors has been processed by digitizer. Designed system enables to determine kinetic energy of beam of heavy ions with relative error of 0,3 ó 1%. Multiplex system of signal processing from stripe detectors allows to determine the weight of analyzed products from nuclear reactions, energy of alpha particles emitted by products of nuclear reactions and exact time, when particular events have been observed. Pixel detector enables besides mentioned parameters, also to determine properties of decay chain from the shape of signal generated by mentioned detector during observation of alpha particles and electrons. The new control system enables to determine basic parameters of mass spectrometer as e.g. mass resolution, efficiency and time response of spectrometer. Individual parts of mass spectrometer have been controlled by means of PLC modules. Logic of PLC system was programmed in CoDeSys and graphical interface was performed in LabVIEW. Other software of spectrometer and graphical interface were programmed in C++ MFC. In tested multi-nucleon transfer reactions  $^{242}\text{Pu}(^{48}\text{Ca},\text{xn})^{222-\text{xn}}\text{Rn}$  and  $^{208}\text{Pb}(^{48}\text{Ca},\text{xn})^{222-\text{xn}}\text{Rn}$  in energy near Coulomb barrier, it was possible to observe an emission impact of double magic  $^{78}\text{Ni}$  and neutron shell closure  $N=126$  on nuclear cross section of nuclear reaction. The influence of entrance channel asymmetry on xn excitation functions of compound nucleus has been investigated in nuclear reactions  $^{144}\text{Sm}(^{40}\text{Ar},\text{xn})^{184-\text{xn}}\text{Hg}$  and  $^{148}\text{Sm}(^{36}\text{Ar},\text{xn})^{184-\text{xn}}\text{Hg}$ . It has been proved that changes related to excitation functions of compound nucleus  $^{184}\text{Hg}$  in various evaporation channels are caused by spatial orientation and deformations of target nucleus. Experimental results match with theoretical Channel Coupling Model.