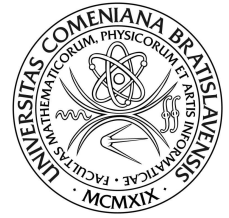




UNIVERZITA KOMENSKÉHO V BRATISLAVE

Fakulta matematiky, fyziky a informatiky



Mgr. Zdenka Kalaninová

Autoreferát dizertačnej práce

**Alfa rozpad neutrónovo-deficitných izotopov
rádia a franciá**

na získanie akademického titulu 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 Katedre jadrovej fyziky a biofyziky.

Predkladateľ: **Mgr. Zdenka Kalaninová**
Univerzita Komenského
Fakulta matematiky, fyziky a informatiky
Katedra jadrovej fyziky a biofyziky
Mlynská dolina, 842 48 Bratislava

Školiteľ: **doc. Mgr. Stanislav Antalic, PhD.**

Oponenti: **Ing. Štefan Gmuca, CSc.**
Fyzikálny ústav SAV
Slovenská akadémia vied
Dúbravská cesta 9, 845 11 Bratislava

Ing. Ján Kliman, DrSc.
Fyzikálny ústav SAV
Slovenská akadémia vied
Dúbravská cesta 9, 845 11 Bratislava

prof. Ing. Vladimír Nečas, PhD.
Ústav jadrového a fyzikálneho inžinierstva
Fakulta elektrotechniky a informatiky STU
Ilkovičova 3, 812 19 Bratislava

Obhajoba dizertačnej práce sa koná o h
pred komisiou pre obhajobu dizertačnej práce v odbore doktorandského štúdia vymenovanou predsedom odborovej komisie

.....

na

Predseda odborovej komisie:

.....

Obsah

1	Úvod	2
2	Ciele práce	2
3	Experimentálny setup	3
4.1	SHIP	3
4.2	Detektory	3
4	Výsledky	3
5.1	Reakcia $^{56}\text{Fe} + ^{147,149}\text{Sm}$	4
5.2	Reakcia $^{60}\text{Ni} + ^{141}\text{Pr}$	9
5	Záver	11
	Summary	11
	Publikácie	14
	Literatúra	18

1 Úvod

Štruktúra atómového jadra je predmetom výskumu už od roku 1911, kedy bolo jadro objavené E. Rutherfordom [Rut11]. Súčasný teoretický model popisujú vlastnosti známych jadier veľmi dobre. Mnohé modely sú založené na semi-empirickom prístupe a využívajú parametre získané z fitovania experimentálnych dát. Nezriedka sa predpovede rôznych modelov výrazne líšia pre jadrá, ktoré neboli doposiaľ experimentálne študované. Aby bolo možné pochopiť štruktúru atómových jadier a optimalizovať jadrové modely, je nevyhnutné produkovať a študovať nové jadrá ďaleko od línie β stability.

V oblasti neutrónovo-deficitných jadier v okolí protónovej uzavretej vrstvy $Z = 82$ je možné študovať viaceré fenomény, ktoré dosiaľ nie sú dostatočne pochopené. Ide napríklad o existenciu stavov s rôznou deformáciou v rámci jedného jadra, výrazné deformačné zmeny medzi susednými izotopmi, alebo zriedkavý proces jadrovej premeny — oneskorené štiepenie po β premene. Jadrá z danej oblasti majú veľmi krátke doby polpremeny a nízke účinné prierezy, preto na ich štúdium potrebujeme vysoko citlivé experimentálne zariadenia.

Na separátore SHIP v GSI, Darmstadt (Nemecko) sme nedávno realizovali experimenty zamerané na štúdium jadier z okolia $Z = 82$ — neutrónovo-deficitných izotopov rádia ($Z = 88$) a franciá ($Z = 87$). Výsledky meraní sú témou tejto dizertačnej práce.

2 Ciele práce

Dizertačná práca sa zameriava na štúdium rozpadových vlastností neutrónovo-deficitných izotopov rádia a franciá metódami α a γ spektroskopie. Dáta pre tieto izotopy boli zberané v dvoch experimentoch realizovaných na rýchlostnom filtri SHIP v GSI, Darmstadt používajúc reakcie $^{56}\text{Fe} + ^{147,149}\text{Sm}$ a $^{60}\text{Ni} + ^{141}\text{Pr}$. Konkrétne ciele práce sú:

V reakciách $^{56}\text{Fe} + ^{147,149}\text{Sm}$:

- Štúdium rozpadových vlastností izotopov $^{201-203}\text{Ra}$ a $^{200-202}\text{Fr}$. Pre niektoré z týchto nuklidov (najmä izotopy rádia) je dosiaľ známych len veľmi málo informácií. Navyše je nesúlad medzi niektorými publikovanými dátami (napr. pre izotop ^{202}Ra). Výsledky našich meraní by mali priniesť podrobnejšie informácie o rozpadových vlastnostiach uvedených izotopov.

- Overiť produkciu nového izotopu ^{200}Ra v reakcii $^{56}\text{Fe} + ^{147}\text{Sm}$.

V reakcii $^{60}\text{Ni} + ^{141}\text{Pr}$:

- Štúdium rozpadových vlastností izotopov $^{198-199}\text{Fr}$. Pokiaľ vieme, pre ^{198}Fr neboli pred našou štúdiou publikované žiadne experimentálne informácie, a pre ^{199}Fr bolo pozorovaných len päť rozpadových reťazcov [Tag99].
- Overiť produkciu nového izotopu ^{197}Fr v danej reakcii.

3 Experimentálny setup

3.1 SHIP

Jadrá skúmané v tejto práci boli produkované na rýchlostnom filtri SHIP v GSI, Darmstadt (Nemecko). SHIP je elektromagnetický vákuový separátor navrhnutý na prietovú separáciu produktov reakcií úplnej fúzie [Mün79]. Zväzky sú dodávané z lineárneho urýchľovača UNILAC, ktorý dokáže poskytnúť zväzok každého stabilného prvku až po urán s energiou do 20 MeV/u. Pre naše merania bola typická intenzita zväzku ~ 500 pA (1 pA = 6.242×10^9 projektilov/s). Terče sú tenké fólie s hrúbkou ~ 0.4 mg/cm². Terčový materiál je naparený na tenkú uhlíkovú fóliu a je prirkytý ďalšou uhlíkovou fóliou kvôli zníženiu radiačného poškodenia a zvýšeniu emisivity terča.

3.2 Detektory

Po prelete cez separátor sú jadrá implantované do 16-stripového polohovocitlivého kremíkového detektora (PSSD) s hrúbkou 300 μm a aktívnou plochou (80 \times 35) mm. Energetické rozlíšenie pre α častice je ~ 30 keV (FMHM). Účinnosť registrácie α častíc s plnou energiou je ~ 54 %. Blízko pred PSSD (proti smeru zväzku) je umiestnených šesť kremíkových (tzv. 'BOX') detektorov. Registrujú častice uniknuté z PSSD v spätnom smere s geometrickou účinnosťou 80 % z 2π . Energetické rozlíšenie α častíc meraných systémom PSSD + BOX je ~ 70 keV (FWHM). Na registráciu γ kvánt slúži 4-kryštálový germániový detektor umiestnený tesne za PSSD (v smere zväzku). Účinnosť detektie γ kvánt s energiou 120 keV je ~ 10 %.

4 Výsledky

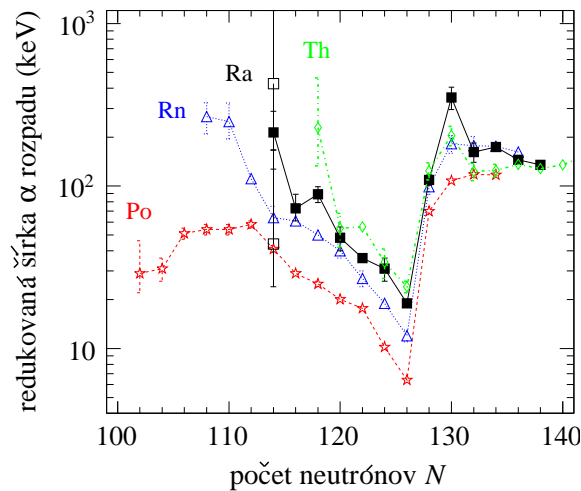
V práci sú prezentované a diskutované výsledky dvoch experimentov realizovaných na separátore SHIP v GSI (Darmstadt). Obe merania boli zamerané na štúdium neutrónovo-deficitných izotopov v oblasti olova ($Z =$

82). Izotopy boli produkované vo fúzo-výparných reakciách $^{56}\text{Fe} + ^{147,149}\text{Sm}$ a $^{60}\text{Ni} + ^{141}\text{Pr}$. Výsledky analýz boli publikované v dvoch publikáciách v časopise *Physical Review C* [Kal13, Kal14] a sú stručne zhrnuté pre jednotlivé izotopy v nasledujúcich sekciách.

4.1 Reakcia $^{56}\text{Fe} + ^{147,149}\text{Sm}$

4.1.1 Izotop ^{202}Ra

Doteraz boli registrované iba dve jadrá izotopu ^{202}Ra , pričom každé v inom experimente [Lei96, Uus05]. Energie α rozpadov a doby polpremien z týchto meraní boli výrazne rozdielne, čo viedlo k rozdielnym hodnotám redukovaných šírok (430_{-260}^{+2020} keV [Lei96] a 44_{-20}^{+83} keV [Uus05]). Jedna hodnota naznačovala klesajúci trend redukovaných šírok pre páro-párne izotopy rádia s klesajúcim počtom neutrónov, a druhá, naopak, rastúci trend (viď Obr. 1).



Obr. 1: Systematika redukovaných šírok α rozpadov páro-párnych izotopov od polónia ($Z = 84$) po tórium ($Z = 90$) v blízkosti uzavretej vrstvy $N = 126$. Hodnoty redukovaných šírok okrem hodnôt pre ^{202}Ra sú z Refs. [And13, Her10, nndc]. Pre ^{202}Ra , čierne prázdne štvorčeky reprezentujú predošlé merania [Lei96, Uus05] a čierny plný štvorček je hodnota z našich dát.

V našom meraní sme v reakcii $^{56}\text{Fe} + ^{149}\text{Sm}$ registrovali 16 rozpadov, ktoré sme na základe korelácií s rozpadmi dcérskych izotopov ^{198}Rn a ^{194}Po priradili izotopu ^{202}Ra . Meraná energia α rozpadu pre tento izotop bola $7722(7)$ keV a doba polpremeny $3.8_{-0.8}^{+1.3}$ ms. Maximálny účinný prierez, $0.2(1)$ nb, bol nameraný pri energii zväzku 244 MeV. Redukovaná šírka α rozpadu ^{202}Ra vyhodnotená z našich dát, 210_{-50}^{+70} keV, potvrdzuje stúpajúci trend redukovaných

šírok s klesajúcim počtom neutrónov pre páro-párne izotopy rádia (viď Obr. 1).

4.1.2 Izotop ^{201}Ra

Pred našou štúdiou bolo identifikované jediné syntetizované jadro priradené izotopu ^{201}Ra . Event bol registrovaný na separátore RITU na Univerzite v Jyväskylä (JYFL) [Uus05]. Rozpad s energiou 7905(20) keV a dobou polpremeny $1.6_{-0.7}^{+7.7}$ ms bol priradený stavu $13/2^+$.

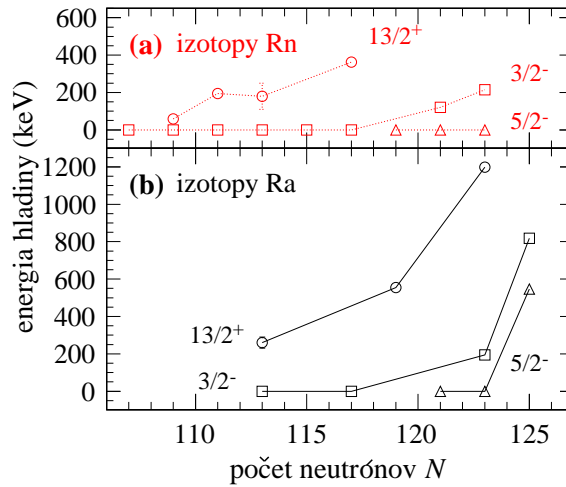
V našich meraniach sme v reakcii $^{56}\text{Fe} + ^{147}\text{Sm}$ pri energii zväzku 249 MeV registrovali tiež jeden rozpadový reťazec, ktorý sme priradili izotopu ^{201}Ra . Meraná energia α rozpadu ^{201}Ra bola 7842(12) keV a doba polpremeny 8_{-4}^{+40} ms. Alfa rozpad dcérskych jadier ^{197}Rn a ^{193}Po sme priradili stavom $3/2^-$. Na základe porovnania redukovaných šírok α rozpadu ^{201}Ra a okolitých izotopov sme pozorovaný rozpad ^{201}Ra vyhodnotili ako nepotlačený, a teda sme ho priradili tiež stavu $3/2^-$. Pripomíname, že energie a doby polpremeny ^{201}Ra vyhodnotené z našich dát a z experimentu na RITU [Uus05] sú rozdielne, a každý rozpad bol priradený inej hladine. Hladinám $13/2^-$ v dcérskych jadrách ^{189}Pb , ^{193}Po a ^{197}Rn bola nedávno priradená hodnota excitačnej energie [Sau13], čo nám umožnilo lokalizovať tento stav v ^{201}Ra na 260(30) keV. Účinný prierez produkcie ^{201}Ra pri energii zväzku 249 MeV bol 40_{-30}^{+80} pb.

Vo väčšine ľahkých páro-nepárnych izotopov rádia a ich dcérskych produktov α premeny, izotopov radónu, je spin a parita základného stavu $3/2^-$ (viď Obr. 2). Ale stav $13/2^+$ má klesajúci trend s klesajúcim počtom neutrónov, a v najviac neutrónovo-deficitných oblastiach môžeme očakávať, že tieto hladiny majú veľmi blízke energie, prípadne aj vymenené poradie.

4.1.3 Izotop ^{203}Ra

Predchádzajúce dáta pre izotop ^{203}Ra boli získané v dvoch experimentoch na RITU v JYFL [Lei96, Uus05]. V prvom experimente bolo registrovaných sedem rozpadových reťazcov [Lei96] a v druhom niekoľko desiatok [Uus05]. V oboch meraniach boli rozpady priradené stavom $3/2^-$ a $13/2^+$. Rozpadové vlastnosti z oboch štúdií sa zhodujú až na dobu polpremeny stavu $3/2^-$: $1.0_{-0.5}^{+5.0}$ ms [Lei96] a 31_{-9}^{+17} ms [Uus05].

My sme pozorovali v reakcii $^{56}\text{Fe} + ^{149}\text{Sm}$ deväť rozpadov ^{203}Ra , z čoho päť sme priradili stavu $3/2^-$ a štyri stavu $13/2^+$. Maximálny účinný prierez produkcie pre súčet oboch stavov je 0.2(1) nb pri energii zväzku 244 MeV. Pomer rozpadov zo stavov $13/2^+$ a $3/2^-$ z našich dát je 0.8(5). Naopak, v predchádzajúcich meraniach bolo pozorovaných viac rozpadov zo stavu



Obr. 2: Systematika jednočasticových hladín pre párnó-nepárne izotopy (a) radónu ($Z = 86$) a (b) rádia ($Z = 88$). Hodnoty excitačných energií sú z Refs. [Sau13, nndc] okrem hodnoty pre ^{201}Ra , ktorá je z našich dát.

$13/2^+$; spomínaný pomer je ~ 6 [Lei96] a ~ 3 [Uus05]. Rozdiel je možné pripísať nízkej štatistike vo všetkých meraniach. Poznávame, že poradie ani energetický rozdiel medzi stavmi $13/2^+$ a $3/2^-$ nie sú známe ani v ^{203}Ra , ani v dcérskych izotopoch ^{199}Rn , ^{195}Po a ^{191}Pb .

4.1.4 Izotop ^{200}Ra

Dosiaľ nebol zaznamenaný rozpad izotopu ^{200}Ra . My sme hľadali aj α rozpad aj emisiu protónu z jadra ^{200}Ra v reakcii $^{56}\text{Fe} + ^{147}\text{Sm}$ pri energii zväzku 263 MeV zodpovedajúcej očakávanému maximu excitačnej funkcie pre ^{200}Ra . Keďže nebol nájdený žiaden vyhovujúci reťazec, určili sme horný limit produkcie ^{200}Ra v danej reakcii a pri danej energii zväzku ako 30 pb.

4.1.5 Izotop ^{200}Fr

V izotope ^{200}Fr je známy stav 3^+ rozpadajúci sa α rozpadom. V našich meraniach sme produkovali ^{200}Fr v reakcii $^{56}\text{Fe} + ^{147}\text{Sm}$ a potvrdili sme rozpadové vlastnosti stavu 3^+ . Pre dcérsky izotop ^{196}At , okrem známeho α prechodu s energiou 7045(5) keV zo základného stavu na základný stav v ^{192}Bi , sme zaznamenali aj ďalší α prechod s energiou 6732(8) keV. Z rozdielu Q_α hodnôt pre oba prechody sme určili energiu stavu populovaného v ^{192}Bi 6732(8)-keV α čiarou na 320(10) keV. Maximálny účinný prierez produkcie ^{200}Fr bol meraný pri energii zväzku 263 MeV a dosahoval 1.8(2) nb.

Registrovali sme jeden vysokoenergetický event, ktorý sme priradili oneskorenému štiepeniu po β premene izotopu ^{200}Fr . Energia štiepneho eventu (nekorigovaná na nelineárnu odozvu detektora pre ťažké fragmenty, tzv. ‘pulse height defect’) bola 136(30) MeV. Vyhodnotená pravdepodobnosť procesu β -oneskoreného štiepenia pre ^{200}Fr je viac než 1.4 %.

V koincidencii s implantovanými jadrami sme registrovali niekoľko fotónov, pričom tieto koincidenčné eventy boli nasledované α rozpadmi ^{200}Fr . Energie niektorých fotónov zodpovedali $K_{\alpha 2}$ a $K_{\alpha 1}$ RTG kvantám franciá. To značí prítomnosť krátkožijúceho izoméru v ^{200}Fr rozpadajúceho sa vnútornými prechodmi. Doba polpremeny tohto izoméru je $0.6_{-0.2}^{+0.5} \mu\text{s}$ a jeho excitačná energia musí byť vyššia než 101.13 keV, čo predstavuje väzbovú energiu orbitálneho elektrónu na K vrstve v atóme franciá.

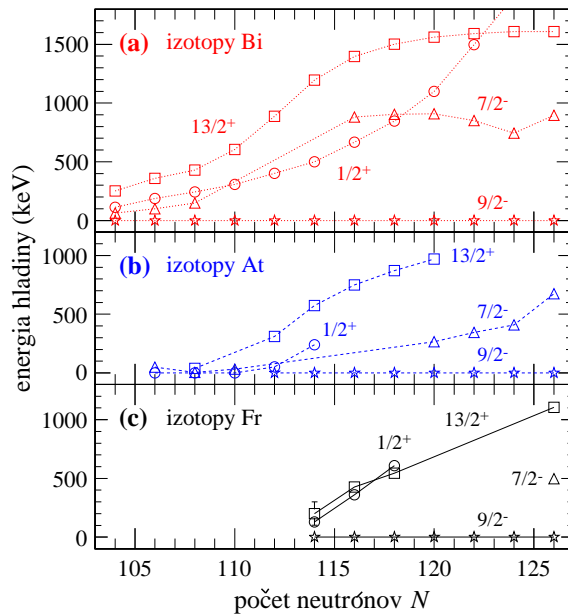
4.1.6 Izotop ^{201}Fr

V jadre ^{201}Fr sú dve známe dlhožijúce hladiny rozpadajúce sa α rozpadom: základný stav $9/2^-$ a izomérny stav $1/2^+$. Rozpad izoméru bol identifikovaný na základe registrácie iba troch rozpadových reťazcov [Uus05].

V našich dátach sme registrovali väčšinu rozpadov ^{201}Fr v reakcii $^{56}\text{Fe} + ^{149}\text{Sm}$ a potvrdili sme rozpadové vlastnosti základného stavu $9/2^-$. Registrovali sme tiež tri rozpadové reťazce zo stavu $1/2^+$. Z rozdielu Q_{α} hodnôt rozpadov základného a izomérneho stavu sme určili excitačnú energiu stavu $1/2^+$ na 130(14) keV. Izomérny pomer z našich dát je 0.02(1). Maximálny účinný prierez produkcie ^{201}Fr , 4.0(4) nb, bol meraný pri energii zväzku 275 MeV.

Podobne ako v prípade ^{200}Fr , aj pre ^{201}Fr sme registrovali fotóny v koincidencii s implantovanými jadrami, ktoré boli nasledované α rozpadmi ^{201}Fr . Energia γ píku, 85.7 keV, zodpovedá energii $K_{\alpha 1}$ RTG kvánt franciá. Ďalšia slabšia čiara bola pozorovaná na energii 106.3 keV. Pozorovanie sme interpretovali ako prítomnosť krátkožijúceho izoméru s dobou polpremeny $0.7_{-0.2}^{+0.5} \mu\text{s}$ v jadre ^{201}Fr rozpadajúceho sa vnútornými prechodmi. Analýzou teoretických hodnôt konverzných koeficientov a dôb polpremeny pre rôzne multipolarity prechodov sme predbežne stanovili charakter prechodu produkujúceho registrované $K_{\alpha 1}$ RTG kvantá na $M2$. Ak predpokladáme, že $M2$ prechod deexcituje izomér priamo na základný stav $9/2^-$, môžeme predbežne určiť spin a paritu izomérneho stavu ako $13/2^+$. Dolný limit pre excitačnú energiu izoméru sme určili ako ~ 101 keV, keďže energia musí byť vyššia než väzbová energia orbitálneho elektrónu na K vrstve pre francium, čo je 101.13 keV. Horný limit pre excitačnú energiu izoméru je ~ 300 keV na základe klesajúceho trendu konverzného koeficientu so stúpajúcou energiou prechodu. Excitačná energia izoméru v rozsahu $\sim (101 - 300)$ keV potvrdzuje klesajúci trend energie hladiny $13/2^+$ s klesajúcim počtom neutrónov

pre nepárno-párne izotopy franciá (viď Obr. 3). Podobný trend má aj hladina $1/2^+$. Obe tieto hladiny majú predpokladaný sploštený tvar, kým základný stav neutrónovo-deficitných izotopov franciá je sférický. Z klesajúceho trendu hladín $1/2^+$ a $13/2^+$ môžeme očakávať zmenu deformácie základného stavu pre ľahšie izotopy franciá. Podobný trend pre hladiny $13/2^+$ a $1/2^+$ je zrejmý aj pre izotopy astátu a bizmutu. Uvažujúc $M2$ prechod v ^{201}Fr s energiou (101 – 300) keV, jeho $B(M2)$ hodnota je (0.2 – 1.1) W.u.. To je porovnateľné s $B(M2)$ hodnotami pre susedné nepárno-párne izotopy franciá: 0.10(2) W.u. pre ^{203}Fr [Jak13], 0.17(4) W.u. pre ^{205}Fr [Jak12] a izotopy astátu: 0.09(1) pre ^{197}At [And08], 0.16(5) W.u. pre ^{199}At [Jak10], 0.15(1) pre ^{201}At [Dyb83].



Obr. 3: Systematika jednočasticových hladín pre nepárno-párne izotopy (a) bizmutu ($Z = 83$), (b) astátu ($Z = 85$) a (c) franciá ($Z = 87$). Chybová úsečka pre stav $13/2^+$ v ^{201}Fr ($N = 114$) zobrazuje možný energetický rozsah pre túto hladinu, presná hodnota nie je známa. Hodnoty excitačných energií sú z Refs. [Jak13, Jak12, nndc] okrem hodnôt pre ^{201}Fr , ktoré sú z našich dát.

4.1.7 Izotop ^{202}Fr

V izotope ^{202}Fr sú známe dva stavy rozpadajúce sa α rozpadom: základný stav 3^+ a izomérny stav 10^- . Oba stavy sme registrovali v reakcii $^{56}\text{Fe} + ^{149}\text{Sm}$ a potvrdili sme ich rozpadové vlastnosti. Izomerný pomer z našich dát je 0.6(1). Maximálny účinný prierez pre sumu oboch stavov bol meraný pri energii zväzku 260 MeV a má hodnotu 25(2) nb.

4.2 Reakcia $^{60}\text{Ni} + ^{141}\text{Pr}$

4.2.1 Izotop ^{199}Fr

Pred našou štúdiou bol rozpad izotopu ^{199}Fr registrovaný iba v experimente na separátore GARIS v inštitúte RIKEN, kde bolo registrovaných päť rozpadových reťazcov s energiou α rozpadu 7655(40) keV a dobou polpremeny 12_{-4}^{+10} ms [Tag99].

V našich meraniach sme registrovali rozpad ^{199}Fr v reakcii $^{60}\text{Ni} + ^{141}\text{Pr}$. Zaznamenali sme jednu α čiaru z rozpadu ^{199}Fr , avšak korelovanú s α rozpadom dvoch stavov s rôznymi spinmi a paritami v dcérskom jadre ^{195}At . Navrhli sme dve interpretácie nášho pozorovania [Kal13]:

- (a) Vidíme rozpad stavu $7/2^-$ s energiou 7675(6) keV a dobou polpremeny $6.0_{-0.7}^{+1.0}$ ms obsadzujúci izoméru hladinu $7/2^-$ v dcérskom jadre ^{195}At . Táto hladina sa buď rozpadá α rozpadom, alebo sa deexcituje na základný stav $1/2^+$, ktorý sa rozpadá α rozpadom. Preto vidíme korelácie ^{199}Fr s rozpadom oboch stavov v ^{195}At .
- (b) V ^{199}Fr existujú dva stavy rozpadajúce sa α rozpadom s veľmi podobnými energiami a dobami polpremen: stav $7/2^-$ s energiou 7676(6) keV a dobou polpremeny $6.2_{-0.8}^{+1.1}$ ms obsadzujúci stav $7/2^-$ v ^{195}At a stav $1/2^+$ s energiou 7664(11) keV a dobou polpremeny $4.5_{-1.3}^{+3.1}$ ms obsadzujúci stav $1/2^+$ v ^{195}At .

Vzhľadom na nízku štatistiku nemôžeme uprednostniť ani jeden zo scenárov. Maximálny účinný prierez produkcie ^{199}Fr bol nameraný pri energii zväzku 272 MeV a mal hodnotu 3(1) nb.

Niekoľko mesiacov po publikovaní našich výsledkov pre ^{199}Fr [Kal13] boli publikované informácie o rozpade tohto izotopu aj z experimentu na separátore RITU v JYFL [Uus13]. Na RITU priradili rozpadu ^{199}Fr tri α čiary: $E_\alpha = 7644(20)$ keV, $T_{1/2} = 5_{-2}^{+7}$ ms z rozpadu základného stavu $1/2^+$ (3 eventy), $E_\alpha = 7668(15)$ keV, $T_{1/2} = 7_{-2}^{+3}$ ms z rozpadu stavu $7/2^-$ (17 eventov), a $E_\alpha = 7808(20)$ keV, $T_{1/2} = 1.6_{-0.6}^{+1.6}$ ms z rozpadu stavu $13/2^+$ (4 eventy).

Naše dáta potvrdzujú rozpadové vlastnosti ^{199}Fr namerané na separátore GARIS, a taktiež potvrdzujú dve α čiary zaznamenané na RITU. Rozpad s energiou 7808(20) keV a dobou polpremeny $1.6_{-0.6}^{+1.6}$ ms registrovaný na RITU sme pre izotop ^{199}Fr nepozorovali. Aktivitu s podobnou energiou a dobou polpremeny sme v dátach zaznamenali, avšak priradili sme ju izotopu ^{198}Fr . Na RITU, naopak, pre ^{198}Fr túto aktivitu nepozorovali.

Ťažšie neutrónovo-deficitné nepárno-párne izotopy francia majú základný stav $9/2^-$ (viď Obr. 3(c)), ktorý má predpokladaný sférický tvar. Pre izotop ^{199}Fr sme rozpad tohto stavu neregistrovali, ale zaznamenali sme rozpad stavu $7/2^-$ a prípadne aj $1/2^+$. Nakoľko oba tieto stavy majú predpokladaný sploštený tvar, je možná počnúc $A = 199$ zmena deformácie základného stavu oproti ťažším franciovým izotopom.

4.2.2 Izotop ^{198}Fr

Pokiaľ vieme, pred našou štúdiou neboli publikované žiadne experimentálne informácie o rozpade ^{198}Fr . V našich meraniach sme v reakcii $^{60}\text{Ni} + ^{141}\text{Pr}$ registrovali dva stavy rozpadajúce sa α rozpadom s dobami polpremeny 1.1(7) a 15(3) ms a energiami v rozsahu (7580 – 7930) a (7470 – 7920) keV. Na základe korelácií týchto rozpadov s dcérskymi rozpadmi, ktoré svojimi vlastnosťami zodpovedali izotopu ^{194}At , sme priradili materské rozpady izotopu ^{198}Fr . Pre 15(3)-ms stav sme registrovali aj indikáciu α píku s energiou 7710 keV, ktorý predpokladáme, že populuje ~ 210 -keV excitovanú hladinu v ^{194}At . Maximálny účinný prierez pre súčet oboch stavov v ^{198}Fr sme našli pri energii zväzku 282 MeV, a mal hodnotu 1.3(3) nb.

Krátko po našej štúdii rozpadu ^{198}Fr [Kal13] bola publikovaná práca popisujúca rozpad tohto izotopu na RITU v JYFL [Uus13]. Na RITU pozorovali dve α čiary priradené ^{198}Fr s energiami 7613(15) a 7684(15) keV a dobami polpremeny 15_{-5}^{+12} a 16_{-5}^{+13} ms. Pre každú čiaru bolo registrovaných 5 rozpadových reťazcov. Na RITU nebol pozorovaný rozpad 1.1(7)-ms stavu, ktorý sme registrovali v našom meraní. Nepozorovanie tohto stavu na RITU je v súlade s našimi výsledkami, nakoľko rozpad 1.1(7)-ms stavu sme pozorovali s relatívnou intenzitou iba 15(5) % oproti 85(5) % pre 15(3)-ms stav.

4.2.3 Izotop ^{197}Fr

V reakcii $^{60}\text{Ni} + ^{141}\text{Pr}$ pri energii zväzku 300 MeV sme registrovali rozpad jedného jadra nového izotopu ^{197}Fr . Identifikácia bola urobená na základe korelácie so známymi dcérskymi α rozpadmi ^{193}At a ^{189}Bi . Meraná energia α rozpadu ^{197}Fr bola 7728(15) keV a doba polpremeny $0.6_{-0.3}^{+3.0}$ ms. Keďže sme daný prechod vyhodnotili ako nepotlačený, priradili sme rozpadajúcemu sa stavu v ^{197}Fr spin a paritu $7/2^-$ podľa spinu a parity $7/2^-$ v dcérskom jadre ^{193}At . Účinný prierez produkcie ^{197}Fr bol 18_{-15}^{+41} pb.

Registrovaný α rozpad ^{197}Fr má nezvyčajne vysokú redukovanú šírku, 600_{-300}^{+2900} keV, aj keď hodnota je zaťažená veľkou neistotou. Aj niektoré ďalšie nuklidy v blízkosti ^{197}Fr majú vysoké redukované šírky α rozpadov, dokonca

vyššie než rozpady vedúce na dvojito-magické jadrá ^{100}Sn a ^{208}Pb .

5 Záver

V autoreferáte sú v stručnosti prezentované výsledky dizertačnej práce. Hlavným cieľom práce bolo vyhodnotenie rozpadových vlastností neutrónovo-deficitných rádií a francií. Dáta pre tieto izotopy boli získané v dvoch experimentoch realizovaných na rýchlostnom separátore SHIP v GSI, Darmstadt a boli analyzované metódami rozpadovej α a γ spektroskopie.

Výsledkom analýz bola identifikácia nového izotopu ^{197}Fr , identifikácia nových izomérnych stavov rozpadajúcich sa α rozpadom v izotopoch ^{201}Ra a ^{198}Fr a výrazné spresnenie rozpadových vlastností pre izotopy ^{202}Ra a ^{199}Fr . Tiež boli identifikované krátkožijúce izomérne stavy rozpadajúce sa vnútornými prechodmi v izotopoch ^{200}Fr a ^{201}Fr a oneskorené štiepenie po β premene v izotope ^{200}Fr . Okrem toho boli potvrdené známe rozpadové vlastnosti pre izotopy ^{203}Ra a ^{202}Fr .

V izotope ^{199}Fr bol registrovaný rozpad stavu $7/2^-$, a prípadne aj $1/2^+$. Oba stavy majú predpokladaný sploštený tvar. Avšak ťažšie nepárno-párne izotopy franciá majú základný stav $9/2^-$, ktorý má predpokladaný sférický tvar. Je preto možné, že počnúc hmotnostným číslom 199 sa v izotopoch franciá mení tvar základného stavu na sploštený zo sférického u ťažších izotopov.

Vyhodnotená redukovaná šírka α rozpadu v ^{202}Ra ukazuje pokračovanie narastajúcich redukovaných šírok s klesajúcim počtom neutrónov pre párnopárne izotopy rádia. Podobný trend bol pozorovaný v predošlých meraniach aj pre susedné párnopárne izotopy tória [Her10] a radónu [And06, Ket01]. Vysoká hodnota redukovanej šírky α rozpadu bola vyhodnotená aj pre nepárno-párny izotop ^{197}Fr . Aj keď jej neistota je veľká (keďže bol registrovaný len jeden event), izotop ^{197}Fr rozširuje počet izotopov v tejto oblasti, kde hodnoty redukovaných šírok α rozpadov sú porovnateľné alebo dokonca vyššie než redukované šírky prechodov vedúcich na dvojito magické jadrá ^{100}Sn a ^{208}Pb . Na bližšie preskúmanie tohto javu sú potrebné dáta s vyššou štatistikou.

Výsledky prezentované v dizertačnej práci boli publikované v dvoch publikáciách v časopise *Physical Review C* [Kal13, Kal14], v príspevku v časopise *GSI Scientific Report* [Kal13b] a prezentované na medzinárodných konferenciách. Cieľ práce bol splnený.

Summary

The main goal of the Thesis was to investigate decay properties of neutron-deficient radium and francium isotopes. Data for these isotopes were collected

in two experiments performed at the velocity filter SHIP at GSI, Darmstadt and were analyzed by the methods of α - and γ -decay spectroscopy. Decay properties of nine isotopes were studied:

- $^{201-203}\text{Ra}$ and $^{200-202}\text{Fr}$ produced in the fusion-evaporation reactions $^{56}\text{Fe} + ^{149}\text{Sm}$ and $^{56}\text{Fe} + ^{147}\text{Sm}$,
- $^{197-199}\text{Fr}$ produced in the fusion-evaporation reaction $^{60}\text{Ni} + ^{141}\text{Pr}$.

The main results on these isotopes are:

^{202}Ra For ^{202}Ra , significantly improved data were collected compared to previous studies. An α -decay energy of 7722(7) keV and a half-life of $3.8_{-0.8}^{+1.3}$ ms were determined. The evaluated reduced α -decay width of 210_{-50}^{+70} keV presents an increase of reduced α -decay widths with decreasing neutron number for even- A radium isotopes. Similar trend was also observed for neighboring even- A radon [And06, Ket01] and thorium [Her10] isotopes.

^{201}Ra A new α -decaying state in ^{201}Ra was identified yielding an α -decay energy of 7842(12) keV and a half-life of 8_{-4}^{+40} ms. Decay was attributed to the $3/2^-$ state.

^{200}Ra An upper limit of 30 pb was determined for the production cross section of ^{200}Ra in the reaction $^{56}\text{Fe} + ^{147}\text{Sm}$ at the expected maximum for the ^{200}Ra excitation function.

^{201}Fr Known α -decay data for ^{201}Fr were confirmed both for the the ground $9/2^-$ state and the intruder $1/2^+$ state. An indication of a short-lived isomeric state with a half-life of $0.7_{-0.2}^{+0.5}$ μs decaying by internal transition(s) was observed for this isotope. A tentative spin and parity of $13/2^+$ was attributed to this state.

^{200}Fr Known α -decay data for ^{200}Fr were confirmed. For the α -decay daughter of ^{200}Fr , ^{196}At , a new α line at 6732(8) keV was observed. A hint for a short-lived isomeric state with a half-life of $0.6_{-0.2}^{+0.5}$ μs in ^{200}Fr decaying by internal transition(s) was observed. A process of β -delayed fission in ^{200}Fr was identified with the probability of more than 1.4 %.

^{199}Fr Improved α -decay data compared to previous studies were collected for ^{199}Fr . Two possible decay schemes for this isotope were proposed: one of them considers the existence of two α -decaying states ($1/2^+$ and $7/2^-$) in ^{199}Fr with similar decay properties:

- $E_\alpha = 7664(11)$ keV, $T_{1/2} = 4.5_{-1.3}^{+3.1}$ ms for the $1/2^+$ state and

- $E_\alpha = 7676(6)$ keV, $T_{1/2} = 6.2_{-0.8}^{+1.1}$ ms for the $7/2^-$ state.

The second scenario considers only one α decaying state in ^{199}Fr with $E_\alpha = 7675(6)$ keV and $T_{1/2} = 6.0_{-0.7}^{+1.0}$ ms. This state would have spin and parity $7/2^-$. To confirm one of the scenarios, more statistics is needed. Both the $7/2^-$ and $1/2^+$ states are presumably associated with an oblate deformation. As decays of the presumably spherical $9/2^-$ state, which is the ground state in heavier odd- A francium isotopes, were not observed in ^{199}Fr , a possible change in the ground-state deformation from spherical to oblate may occur in francium isotopes at $A = 199$.

^{198}Fr The first α -decay data for the ^{198}Fr isotope were published. The measured α -decay energy range for this isotope was (7470 – 7930) keV. The energy and time distribution of α decays indicated the presence of two states in ^{198}Fr with half-lives of 1.1(7) and 15(3) ms.

^{197}Fr A new isotope, ^{197}Fr , was observed based on one α -decay chain. The measured α -decay energy for ^{197}Fr was 7728(15) keV and a half-life was $0.6_{-0.3}^{+3.0}$ ms. The decay was assumed to originate from the $7/2^-$ state. A remarkably high value of reduced α -decay width, $0.6_{-0.3}^{+2.9}$ MeV, was evaluated for this transition.

^{203}Ra , ^{202}Fr For ^{203}Ra , decays of the $3/2^-$ and $13/2^+$ states were registered and for ^{202}Fr , decays of the 3^+ and 10^- states were observed. Measured α -decay energies and half-lives for these states confirmed the known values.

A high value of reduced α -decay width for ^{202}Ra evaluated in this work shows a further increase of reduced α -decay widths with decreasing neutron-number for even- A radium isotopes. Similar trend was also observed for neighboring even- A radon [And06, Ket01] and thorium [Her10] isotopes in previous measurements. A remarkably high value of reduced α -decay width was also evaluated for the odd-even ^{197}Fr isotope. Although the uncertainty is large (as only one event was detected), the ^{197}Fr isotope extends the number of isotopes in this region, whose reduced α -decay widths are comparable with or even higher than reduced α -decay widths of transitions leading to regions of doubly-magic ^{100}Sn and ^{208}Pb . To investigate this phenomenon in more detail, experimental data with higher statistics are necessary.

The results were published in two articles in *Physical Review C* [Kal13, Kal14], in the contribution in *GSI Scientific Report* [Kal13b] and were pre-

sented at international conferences. The goal of the Thesis has been achieved.

Publikácie

Publikácie v karentovaných časopisoch súvisiace s problematikou dizertačnej práce:

- **Decay of $^{201-203}\text{Ra}$ and $^{200-202}\text{Fr}$**
Z. Kalaninová, S. Antalic, A.N. Andreyev, F.P. Heßberger, D. Ackermann, B. Andel, L. Bianco, S. Hofmann, M. Huyse, B. Kindler, B. Lommel, R. Mann, R.D. Page, P.J. Sapple, J. Thomson, P. Van Duppen, M. Venhart
Phys. Rev. C **89**, 054312 (2014)
- **β -delayed fission and α decay of ^{178}Tl**
 V. Liberati, A.N. Andreyev, S. Antalic, A. Barzakh, T.E. Cocolios, J. Elseviers, D. Fedorov, V.N. Fedoseev, M. Huyse, D.T. Joss, Z. Kalaninová, U. Köster, J.F.W. Lane, B. Marsh, D. Mengoni, P. Molkanov, K. Nishio, R.D. Page, N. Patronis, D. Pauwels, D. Radulov, M. Seliverstov, M. Sjödin, I. Tsekhanovich, P. Van den Bergh, P. Van Duppen, M. Venhart, M. Veselský
Phys. Rev. C **88**, 044322 (2013)
- **α decay of the very neutron-deficient isotopes $^{197-199}\text{Fr}$**
Z. Kalaninová, A.N. Andreyev, S. Antalic, F.P. Heßberger, D. Ackermann, B. Andel, M.C. Drummond, S. Hofmann, M. Huyse, B. Kindler, J.F.W. Lane, V. Liberati, B. Lommel, R.D. Page, E. Rapisarda, K. Sandhu, Š. Šáro, A. Thorntwaite, P. Van Duppen
Phys. Rev. C **87**, 044335 (2013)
- **β -delayed fission of $^{192,194}\text{At}$**
 A.N. Andreyev, S. Antalic, D. Ackermann, L. Bianco, S. Franchoo, S. Heinz, F.P. Heßberger, S. Hofmann, M. Huyse, Z. Kalaninová, I. Kojouharov, B. Kindler, B. Lommel, R. Mann, K. Nishio, R.D. Page, J.J. Ressler, B. Streicher, Š. Šáro, B. Sulignano, P. Van Duppen
Phys. Rev. C **87**, 014317 (2013)
- **Nuclear structure of heavy $N = 153$ isotones**
 S. Antalic, F.P. Heßberger, D. Ackermann, M. Block, S. Heinz, S. Hofmann, Z. Kalaninová, B. Kindler, M. Leino, B. Lommel, R. Mann, K. Nishio, Š. Šáro, B. Sulignano
Acta Physica Polonica B **44**, 387 (2013)
- **New developments of the in-source spectroscopy method at RILIS/ISOLDE**

B. A. Marsh, B. Andel, A. N. Andreyev, S. Antalic, D. Atanasov, A. E. Barzakh, B. Bastin, Ch. Borgmann, L. Capponi, T. E. Cocolios, T. Day Goodacre, M. Dehairs, X. Derkx, H. De Witte, D. V. Fedorov, V. N. Fedosseev, G. J. Focker, D. A. Fink, K. T. Flanagan, S. Franchoo, L. Ghys, M. Huyse, N. Imai, Z. Kalaninová, U. Köster, S. Kreim, N. Kesteloot, Yu. Kudryavtsev, J. Lane, N. Lequesne, V. Liberati, D. Lunney, K. M. Lynch, V. Manea, P. L. Molkanov, T. Nicol, D. Pauwels, L. Popescu, D. Radulov, E. Rapisarda, M. Rosenbusch, R. E. Rossel, S. Rothe, L. Schweikhard, M. D. Seliverstov, S. Sels, A. M. Sjödin, V. Truesdale, C. Van Beveren, P. Van Duppen, K. Wendt, F. Wienholtz, R. N. Wolf, S. G. Zemlyanoy
Nucl. Instr. and Meth. B **317**, 550 (2013)

- **Alpha-gamma decay studies of ^{253}No and its daughter products ^{253}Md , ^{249}Fm**

F.P. Heßberger, S. Antalic, D. Ackermann, Z. Kalaninová, S. Heinz, S. Hofmann, B. Streicher, B. Kindler, I. Kojouharov, P. Kuusiniemi, M. Leino, B. Lommel, R. Mann, K. Nishio, Š. Šáro, B. Sulignano, M. Venhart
Eur. Phys. J. A **48**, 75 (2012)

- **Isomeric states in ^{253}No and ^{253}Fm**

S. Antalic, F.P. Heßberger, D. Ackermann, S. Heinz, S. Hofmann, Z. Kalaninová, B. Kindler, J. Khuyagbaatar, I. Kojouharov, P. Kuusiniemi, M. Leino, B. Lommel, R. Mann, K. Nishio, Š. Šáro, B. Streicher, B. Sulignano, M. Venhart
Eur. Phys. J. A **47**, 62 (2011)

Ďalšie publikácie:

- **Decay of $^{200,201}\text{Fr}$**

Z. Kalaninová, S. Antalic, A.N. Andreyev, F.P. Heßberger, D. Ackermann, B. Andel, L. Bianco, S. Hofmann, M. Huyse, B. Kindler, B. Lommel, R. Mann, R.D. Page, P.J. Sapple, J. Thomson, P. Van Duppen, M. Venhart
odoslané do GSI SCIENTIFIC REPORT 2013

- **Decay of $^{201-203}\text{Ra}$**

Z. Kalaninová, S. Antalic, A.N. Andreyev, F.P. Heßberger, D. Ackermann, B. Andel, L. Bianco, S. Hofmann, M. Huyse, B. Kindler, B. Lommel, R. Mann, R.D. Page, P.J. Sapple, J. Thomson, P. Van Duppen, M. Venhart
odoslané do GSI SCIENTIFIC REPORT 2013

- **Alpha Decay of $^{197-199}\text{Fr}$**

Z. Kalaninová, A.N. Andreyev, S. Antalic, F.P. Heßberger, D. Ackermann, B. Andel, M.C. Drummond, S. Hofmann, M. Huyse, B. Kindler, J.F.W. Lane, V. Liberati, B. Lommel, R.D. Page, E. Rapisarda, K. Sandhu, Š. Šáro, A. Thornthwaite,

P. Van Duppen

GSI SCIENTIFIC REPORT 2012, PHN-ENNA-EXP-04 (2013)

- **Spontaneous Fission Properties of ^{259}Sg and ^{255}Rf**

F.P. Heßberger, S. Antalic, D. Ackermann, M. Block, S. Heinz, S. Hofmann, Z. Kalaninová, I. Kojouharov, J. Khuyagbaatar, B. Kindler, B. Lommel, R. Mann
GSI SCIENTIFIC REPORT 2012, PHN-ENNA-06 (2013)

- **Geant 4 simulations of ^{253}No α decay**

Z. Kalaninová, S. Antalic, F.P. Heßberger, D. Ackermann, L.-L. Andersson, Š. Šáro
GSI SCIENTIFIC REPORT 2011, PHN-NUSTAR-SHE-06 (2012)

- **Decay Study of ^{254}Sg**

F.P. Heßberger, S. Antalic, D. Ackermann, S. Heinz, S. Hofmann, Z. Kalaninová, I. Kojouharov, J. Khuyagbaatar, B. Kindler, B. Lommel, R. Mann
GSI SCIENTIFIC REPORT 2011, PHN-NUSTAR-SHE-05 (2012)

Konferencie a workshopy

- **Alpha decay of $^{197-199}\text{Fr}$**

Z. Kalaninová, A.N. Andreyev, S. Antalic, F.P. Heßberger, D. Ackermann, B. Andel, M.C. Drummond, S. Hofmann, M. Huyse, J.F.W. Lane, V. Liberati, B. Lommel, R.D. Page, E. Rapisarda, K. Sandhu, Š. Šáro, A. Thornthwaite, P. Van Duppen
Workshop “Shape Coexistence Across the Chart of the Nuclides”, 15. – 16. 04. 2013, York (Spojené kráľovstvo), *Abstract book*, s. 17 (2013)

- **Production and decay studies of $^{197-202}\text{Fr}$ at SHIP**

Z. Kalaninová, S. Antalic, A.N. Andreyev, F.P. Heßberger, D. Ackermann, B. Andel, M.C. Drummond, S. Hofmann, M. Huyse, J.F.W. Lane, V. Liberati, R.D. Page, E. Rapisarda, K. Sandhu, A. Thornthwaite, P. Van Duppen
Konferencia “Nuclear Structure and Related Topics”, 03. – 07. 07. 2012, Dubna (Rusko), *Abstract book*, s. 50 (2012)

- **Studies of very neutron-deficient radium and francium isotopes**

Z. Kalaninová

17th Conference of Czech and Slovak Physicists, 05. – 08. 09. 2011, Žilina (Slovakia), *Conference Proceedings*, s. 57 (2012)

- **Decay studies of neutron deficient Ra and Fr isotopes**

Z. Kalaninová

Študentská vedecká konferencia FMFI UK, 19. 04. 2011, Bratislava (Slovakia), *Conference Proceedings*, s. 213 (2011)

Ohlasy na autorkine práce

- **CRIS: A new method in isomeric beam production**
K.M. Lynch, *et al.*, *EPJ Web of Conferences* **63**, 01007 (2013)
- **Collinear Resonance Ionization Spectroscopy of Neutron-Deficient Francium Isotopes**
K.T. Flanagan, *et al.*, *Phys. Rev. Lett* **111**, 212501 (2013)
- **Systematic calculations of α decay properties based on results from recent experiments**
Yibin Qian, Zhongzhou Ren, *Phys. Rev. C* **88**, 044329 (2013)
- **Coupled-channel representation to describe fine structure in the alpha decay of odd-mass Bk isotopes**
Dongdong Ni, Zhongzhou Ren, *Phys. Rev. C* **88**, 014325 (2013)
- **Theoretical description of fine structure in the alpha decay of heavy odd-odd nuclei**
Dongdong Ni, Zhongzhou Ren, *Phys. Rev. C* **87**, 027602 (2013)
- **Comparison of the coupled-channel calculation with the WKB method for alpha-decay fine structure**
Dongdong Ni, Zhongzhou Ren, *AIP Conference Proceedings* **1533**, 109 (2013)
- **Decay of the high- K isomeric state to a rotational band in ^{257}Rf**
J. Rissanen, *et al.*, *Phys. Rev. C* **88**, 044313 (2013)
- **Nuclear Data Sheets for $A = 251 - 259$ (odd)**
E. Browne, J.K. Tuli, *NUCLEAR DATA SHEETS* **114**, 1041 (2013)
- **Ground-state configuration of the $N = 157$ nucleus No-259**
M. Asai, *et al.*, *Phys. Rev. C* **87**, 014332 (2013)
- **Influence of proton shell closure on production and identification of new superheavy nuclei**
A.N. Kuzmina, *et al.*, *Phys. Rev. C* **85**, 014319 (2012)
- **Influence of proton shell closure on production of new superheavy nuclei**
A.N. Kuzmina, *et al.*, *EPJ Web of Conferences* **38**, UNSP 17004 (2012)

Literatúra

- [And06] A.N. Andreyev *et al.*, *Phys. Rev. C* **74**, 064303 (2006).
- [And08] K. Andgren *et al.*, *Phys. Rev. C* **78**, 044328 (2008).
- [And13] A.N. Andreyev *et al.*, *Phys. Rev. Lett.* **110**, 242502 (2013).
- [Dyb83] K. Dybdal *et al.*, *Phys. Rev. C* **28**, 1171 (1983).
- [Her10] J.A. Heredia *et al.*, *Eur. Phys. J. A* **46**, 337 (2010).
- [Jak10] U. Jakobsson *et al.*, *Phys. Rev. C* **82**, 044302 (2010).
- [Jak12] U. Jakobsson *et al.*, *Phys. Rev. C* **85**, 014309 (2012).
- [Jak13] U. Jakobsson *et al.*, *Phys. Rev. C* **87**, 054320 (2013).
- [Kal13] Z. Kalaninová *et al.*, *Phys. Rev. C* **87**, 044335 (2013).
- [Kal13b] Z. Kalaninová *et al.*, *GSI Scientific Report 2012*, 134 (2013).
- [Kal14] Z. Kalaninová *et al.*, *Phys. Rev. C* **89**, 054312 (2014).
- [Ket01] H. Kettunen *et al.*, *Phys. Rev. C* **63**, 044315 (2001).
- [Lei96] M. Leino *et al.*, *Z. Phys. A* **355**, 157 (1996).
- [Mün79] G. Münzenberg *et al.*, *Nucl. Instr. and Meth.* **161**, 65 (1979).
- [nndc] Data extracted using the NNDC On-Line Data Service from the ENSDF database, URL: www.nndc.bnl.gov.
- [Rut11] E. Rutherford, *Phil. Mag.* **21**, 669 (1911).
- [Sau13] J. Sauvage *et al.*, *Eur. Phys. J. A* **49**, 109 (2013).
- [Tag99] Y. Tagaya *et al.*, *Eur. Phys. J. A* **5**, 123 (1999).
- [Uus05] J. Uusitalo *et al.*, *Phys. Rev. C* **71**, 024306 (2005).
- [Uus13] J. Uusitalo *et al.*, *Phys. Rev. C* **87**, 064304 (2013).