

Mgr. Martin Venhart

**Autoreferát dizertačnej práce**

Gamma-spectroscopy of K-isomers and Non-yrast States  
in  $^{254}\text{No}$  – Influence of Deformed Shell Gaps  
 $Z = 100$  and  $N = 152$

Na získanie vedecko-akademickej hodnosti *philosophiae doctor*  
v odbore doktorandského štúdia:  
11–24–9 Jadrová a subjadrová fyzika

Bratislava 2008

Dizertačná práca bola vypracovaná v dennej forme doktorandského štúdia na Katedre jadrovej fyziky Fakulty matematiky, fyziky a informatiky, Univerzity Komenského v Bratislave.

**Predkladateľ:** Mgr. Martin Venhart  
Katedra jadrovej fyziky a biofyziky  
Fakulta matematiky, fyziky a informatiky UK  
842 48 Bratislava

**Školiteľ:** Prof. RNDr. Štefan Šáro, DrSc.  
Fakulta matematiky, fyziky a informatiky UK

**Oponenti:** Prof. Ing. Vladimír Nečas, PhD. FEI STU Bratislava  
RNDr. Stanislav Dubnička, DrSc. SAV Bratislava  
Ing. Štefan Gmuca, CSc. SAV Bratislava

Autoreferát bol rozoslaný dňa .....

Obhajoba dizertačnej práce sa koná dňa ..... o ..... h

na Fakulte matematiky, fyziky a informatiky Univerzity Komenského, Mlynská dolina, 842 48 Bratislava, miestnosť č. F1 377 pred komisiou pre obhajobu dizertačnej práce doktorandského štúdia vymenovanou dňa ..... predsedom spoločnej odborovej komisie vo vednom odbore 11–24–9 Jadrová a subjadrová fyzika.

**Predseda spoločnej odborovej komisie:**

Prof. RNDr. Jozef Masarik, DrSc.  
FMFI UK, 842 48 Bratislava

# 1 Úvod

Vlastnosti a štruktúra ťažkých ( $Z > 100$ ) atómových jadier je pomerne málo prebádaná a nedostatočne pochopená. Je to tak v dôsledku viacerých faktorov a tými sú: komplexnosť problematiky, vysoká náročnosť experimentálneho štúdia vlastností týchto jadier, najmä veľmi nízky účinný prierez reakcií úplnej syntézy. Fyzika ťažkých jadier potrebuje pre svoje zdokonalenie ďalšie systematické experimentálne skúmanie vlastností týchto jadier. Najefektívnejším spôsobom sa javí pokračovanie v štúdiu rôznych typov jadrových reakcií úplnej syntézy pri vytvorení podmienok pre experimentálnu prácu s vyššou štatistikou nameraných údajov. Medzi najväčšie svetové centrá spektroskopického výskumu ťažkých jadier patria Univerzita v Jyväskylä - JYFL (Fínsko), GSI Darmstadt (Nemecko), Argonne National Laboratory (USA) a GANIL (Francúzsko).

Významným nástrojom na štúdium štruktúry atómových jadier je jadrová spektroskopia. Jadrá sú produkované v reakciách úplnej syntézy, produkty reakcií separované pomocou rýchlostných alebo hmotnostných separátorov a následne analyzované poliami detektorov rôzneho typu. Na spektroskopii promptných prechodov, prebiehajúcich bezprostredne po reakcii sa využívajú spektrometre gama žiarenia alebo konverzných elektrónov v okolí terčovej komory (in-beam spektroskopia). V súčasnosti spektroskopický výskum ťažkých jadier sleduje viaceré smery:

- In-beam spektroskopia rotačných stavov v párnopárných jadrách poskytuje informáciu o parametroch ako sú momenty hybnosti jadra, stabilita voči štiepeniu a deformácia. V uplynulých rokoch prebehlo v JYFL viacero experimentov tohto druhu na za využitia spektrometrov ako napríklad SACRED alebo JUROGAM. Boli získané dáta o jadrách  $^{250}\text{Fm}$  [Bas06] a  $^{252,254}\text{No}$  [Lep06, ?]. V budúcnosti je planované štúdium  $^{256}\text{Rf}$ .
- In-beam spektroskopia nepárnych jadier umožňuje stanovenie kvázičasticovej štruktúry základného a izomérických stavov. Toto je veľmi dôležité z hľadiska overenia a spresnenia existujúcich teoretických modelov jednočasticových orbitálov v ťažkých jadrách. V JYFL boli experimentálne študované izotopy  $^{251}\text{Md}$  [Cha07],  $^{251}\text{No}$  [Her02] a  $^{255}\text{Lr}$  [Gre05].
- Rozpadová koincidenčná alfa-gama spektroskopia študuje rozloženie nízkoležiacich orbitálov v nepárnych jadrách. Najvýznamnejším svetovým centrom tohto typu výskumu je GSI Darmstadt, kde boli v minulých rokoch študované viaceré jadrá. Z najvýznamnejších výsledkov možno spomenúť systematiku Nilssonových hladín v nepárnych izotopoch einsteinia [Hes05], štúdium  $^{251,253,255}\text{No}$  (vid' napr. [Hes06] a referencie tam uvedené) a iné.

- Spektroskopia K-izomérov v páрно-párnych jadrách v súčasnosti prekonáva výrazný boom. Dôkazom toho sú úspešné experimenty v JYFL (experimenty prezentované v predkladanej práci), GSI a Argonne. K-izoméria je spojená s fenoménom K-zakázaných prechodov, t. j. elektromagnetických prechodov jednoznačne narušujúcich výberové pravidlo, podľa ktorého zmena projekcie spinu na os jadra (kvantové číslo  $K$ ) nesmie byť väčšia než je rád multipólu. Vďaka prímiesiam vlnových funkcií s vyšším  $K$ , tieto prechody nie sú úplne zakázané, ale výrazne potlačené. K-zakázané prechody sú pozorované pri rozpade vysokospinových stavov na vyššie členy rotačných pásov. Preto nutnou podmienkou formovania K-izoméru je deformácia jadra (je podmienkou generovania rotačných stavov) a existencia vysokospinových orbitálov v blízkosti Fermiho energie. V prípade páрно-párnych jadier sú potom izomérické hladiny tvorené narušením valenčného páru nukleónov (narušených párov môže byť aj viac). Obe podmienky sú splnené v oblasti jadier so  $Z = 100$  a  $N = 152$ .

## 2 Ciele dizertačnej práce

Predkladaná práca je postavená na analýze dvoch experimentov zameraných na štúdium K-izomérov v jadre  $^{254}\text{No}$ . Experimenty prebehli v rámci dlhodobého programu výskumu K-izomérov v JYFL. K-izomér v  $^{254}\text{No}$  bol po prvý krát pozorovaný Ghiorso a kol. [Ghi73] v nepriamej identifikácii. V súvislosti s rozvojom experimentálnych metód bolo možné pristúpiť k novému experimentu s vysokou štatistikou nameraných údajov. Cieľmi práce bolo:

- Príprava a realizácia experimentov v JYFL
- Detailná analýza
- Potvrdenie existencie K-izoméru v  $^{254}\text{No}$
- Hľadanie doteraz neznámych izomérických hladín
- Získanie presnejších hodnôt doby polpremeny izomérických hladín
- Priradenie nukleónovej štruktúry pozorovaných stavov
- Porovnanie nameraných dát s existujúcimi teoretickými modelmi
- Porovnanie vlastností  $^{254}\text{No}$  s okolitými páрно-párnymi jadrami

Výsledky boli čiastočne publikované v:

R.-D. Herzberg, P. T. Greenlees, P. A. Butler, G. D. Jones, M. Venhart, I. G. Darby, S. Eeckhaudt, K. Eskola, T. Grahn, C. Gray-Jones, F. P. Heßberger, P. Jones, R. Julin,

S. Juutinen, S. Ketelhut, W. Korten, M. Leino, A.- P. Leppänen, S. Moon, M. Nyman, R. D. Page, J. Pakarinen, A. Pritchard, P. Rahkila, J. Sarén, C. Scholey, A. Steer, Y. Sun, Ch. Theisen and J. Uusitalo

### **Nuclear isomers in superheavy elements as stepping stones towards the island of stability**

Nature (London) **442** (2006) 896

## **3 K-izoméria**

Vo všeobecnosti sú izoméry metastabilné excitované stavy atómových jadier. V závislosti na štruktúre sa izoméry môžu rozpadat' alfa, beta rozpadom, spontánnym štiepením, emisiou protónu alebo gama prechodmi na základný stav toho istého jadra. Teoreticky sú izoméry opísané ako energetické pasce v jadrách [Wal99]. Existuje niekoľko typov energetických pascí:

- **Tvarové izoméry**

Existencia krátkožijúcich, spontánne sa štiepiacich izomérov je vysvetlená populáciou stavu v druhom minime štiepnej bariéry. Takýto stav musí prekonať výrazne nižšiu bariéru čo rezultuje do krátkej doby polpremeny. Spätný gama prechod na základný stav je potlačený v dôsledku rozdielnej kvadrupólovek deformácie. Mnohé takéto izoméry sú známe v oblasti izotopov Pu, Am a Cm [Fle67].

- **Spinové izoméry**

Izoméry v sférických jadrách sú spinové izoméry. Sú to vysokospinové hladiny, ktoré na prechod na nižšie energie potrebujú veľkú zmenu spinu. Takéto elektromagnetické prechody sú výrazne potlačené. Typický prípad je izomér v  $^{180}\text{Ta}$ . Je to stav  $J^\pi = 9^-$  s excitačnou energiou 75,3 keV a dobou polpremeny  $>1,3 \cdot 10^{15}$  rokov. Základný stav je  $J^\pi = 1^+$ , preto je pri rozpade potrebná emisia málo pravdepodobného M8 žiarenia.

- **K-izoméry**

Predstavujú špeciálnu formu spinovej pasce. Ich existencia súvisí s orientáciou spinového vektora. K-izoméry sú excitované stavy s vysokým spinom. Rozpadajú sa K-potlačenými prechodmi na kolektívne stavy založené na rotácii nižšie ležiacich vnútorných konfiguráciách. Preto kvadrupólová deformácia hrá významnú úlohu, pretože len deformované jadrá môžu generovať spin prostredníctvom kolektívnej rotácie. V páro-párnych jadrách sú K-izoméry tvorené mnohokvázičasticovými stavmi. Tieto vznikajú rozbitím nukleón-nukleónového páru v blízkosti Fermiho

hladiny. Excitačná energia jednej kvázičastice je potom

$$E_j = \sqrt{(\epsilon_j - \lambda)^2 + \Delta^2}, \quad (1)$$

kde  $\epsilon_j$  je jednočasticová energia,  $\lambda$  je Fermiho energia a  $\Delta$  je parameter energetickej medzery. Štúdium vlastností K-izomérov teda umožňuje priame skúmanie jednočasticových energií a párovej interakcie.

K-izoméry úzko súvisia s fenoménom K-potlačených prechodov. Výberové pravidlá elektromagnetických prechodov vyžadujú aby pri prechode platilo

$$\lambda \geq \Delta K, \quad (2)$$

kde  $\lambda$  je multipolarita emitovaného žiarenia a  $K$  je projekcia spinu na os symetrie jadra. Kvôli slabým prímiesiam ostatných hodnôt kvantového čísla  $K$  vo vlnových funkciách počiatočného a konečného stavu sú tieto prechody potlačené (namiesto úplného zákazu). Typicky tieto K-potlačené prechody napájajú vyššie excitované stavy v rotačných pásoch.

Stupeň potlačenia  $\nu$  je definovaný ako

$$\nu = \Delta K - \lambda. \quad (3)$$

Pomocou stupňa potlačenia  $\nu$  možno zaviesť redukované potlačenie (*reduced hindrance*)  $f_\nu$  ako

$$f_\nu = \left( \frac{T_{1/2}^\gamma}{T_{1/2}^W} \right)^{1/\nu} = F_W^{1/\nu}, \quad (4)$$

kde  $T_{1/2}^\gamma$  je experimentálne získaná hodnota doby polpremeny<sup>1</sup> a  $T_{1/2}^W$  je Weisskopfova jednočasticová doba polpremeny. Hodnota  $f_\nu = 1$  zodpovedá nepotlačenému jednočasticovému prechodu. Systematické štúdium ukázalo že  $f_\nu > 100$  [Loe68]. Známe sú aj menej potlačené prechody. Extrémne nízke hodnoty  $f_\nu$  ukazujú na nezachovanie kvantového čísla  $K$  (napr. v dôsledku Coriolisovho zmiešavania, narušenia axiálnej symetrie ...).

## 4 Použitie experimentálne metódy

### 4.1 Produkcia exotických jadier

Jadrá pre spektroskopický výskum supert'azkých prvkov sú produkované pomocou fúzo-  
evaporačných reakcií. Pri týchto reakciách je statický terčik bombardovaný zväzkom  
t'azkých iónov urýchlených na presnú energiu.

---

<sup>1</sup>pokiaľ sa rozpadá viacerými vetvami, tak je potrebné uvažovať parciálnu dobu polpremeny

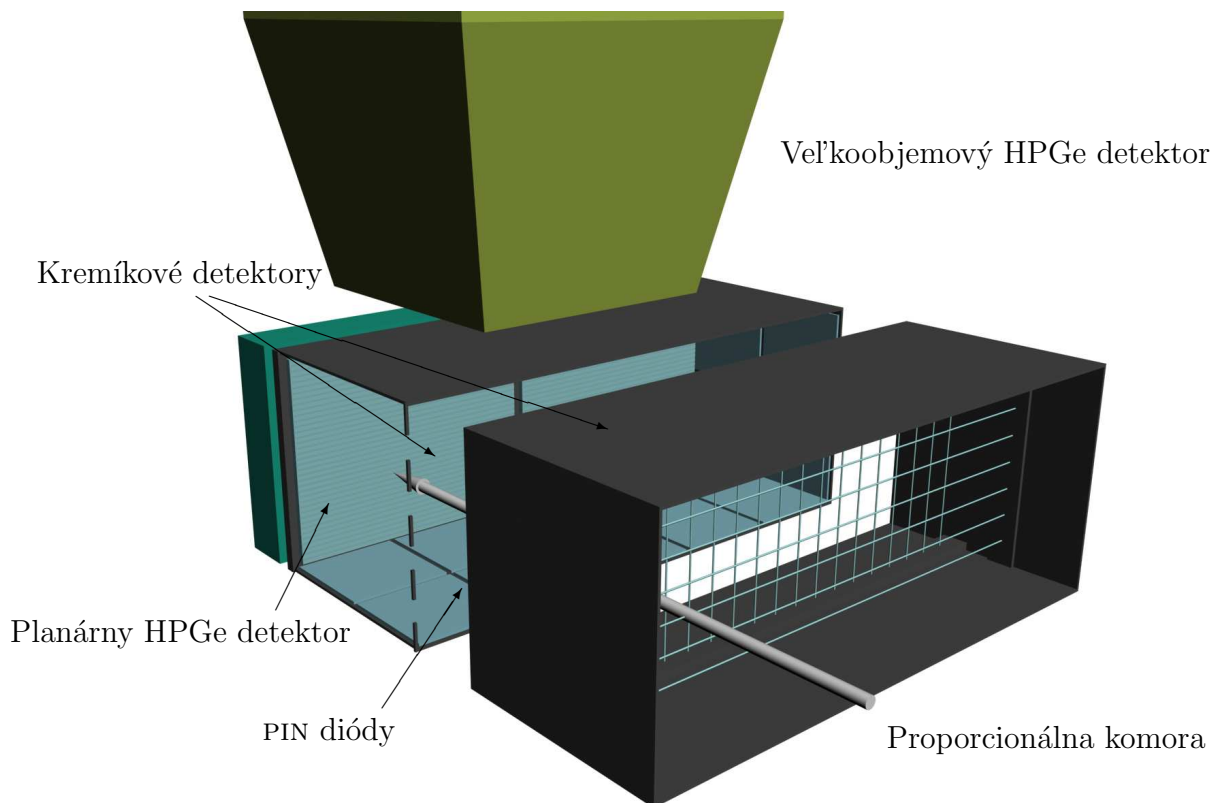
## 4.2 Experimentálna báza

Oba experimenty boli realizované s využitím experimentálnych zariadení pracujúcich v súčasnosti v JYFL na línii cyklotrónu K-130 [Hei95]. Srdcom systému je plynom plnený kinematický separátor RITU [Lei95]. Iónovo-optická konfigurácia je  $Q_V D Q_H Q_V$ . Pracovným médiom dipolovej komory je zriedený héliový plyn. Pracovný princíp je založený na výrovnaní nábojového stavu produktov jadrových reakcií v dôsledku zrážok s atómami pracovného média. Separátor pracuje ako hmotnostný filter a rozlíšenie je na úrovni 20 - 25 amu.

Vo fokálnej rovine RITU je umiestnený spektrometer GREAT [Pag03]. Tento predstavuje unikátny multidetekčný systém vyvinutý pre koincidenčnú spektroskopiu alfa, beta a gama žiarenia, konverzných elektrónov, protónov a štiepných fragmentov. Pozostáva z rôznych typov detektorov:

- **Prieletová mnohovláknová proporcionálna komora** - jej princípálny význam spočíva v odlíšení medzi evaporáčnymi rezíduami prilietavajúcimi zo separátora a ich rádioaktívnou premenou. Meria tiež hodnotu ToF a energetických strát v plyne.
- **Obojstranné stripové kremíkové detektory** - dva implantačné detektor umiestnené vedľa seba. Každý z nich obsahuje 60 vertikálnych a 40 horizontálnych stripov, rozmery sú 60 mm × 40 mm a hrúbka 300 μm. Ich vysoká granularita umožňuje pozičnú koreláciu medzi implantovanými rezíduami a ich následnou rádioaktívnou premenou.
- **PIN diódy** - pole 28 PIN diódy je umiestnené v zadnej hemisfére implantačných detektorov (relatívne vzhľadom na smer zväzku). Každá z diód má rozmery 28 mm × 28 mm a hrúbku 500 μm. Pole sa využíva na meranie konverzných elektrónov, prípadne protónov alebo alfa častíc ktoré unikli z kremíkových detektorov.
- **Planárny HPGe detektor** - sa nachádza za kremíkovými detektormi v vlastnom kryostate s berýliovým okienkom. Kryštál má aktívnu plochu 120 mm × 60 mm a hrúbku 15 mm. Detektor pozostáva z 24 vertikálnych a 12 horizontálnych stripov. Slúži na meranie nízkoenergetických gama kvánt a roentgenovského žiarenia.
- **Veľkoobjemový HPGe detektor** - meria vysokoenergetické gama kvantá. Pozostáva zo štyroch kryštálov dĺžky 105 mm a priemeru 70 mm. Pre zvýšenie pomeru pík/Compton je vybavený antikomptonovským BGO štítom. Pre zvýšenie detekčnej účinnosti bol detekčný systém počas jedného z analyzovaných experimentov vybavený dvomi dodatočnými veľkoobjemovými HPGe detektormi.

Schématický náčrt spektrometra GREAT je na obr. 1.



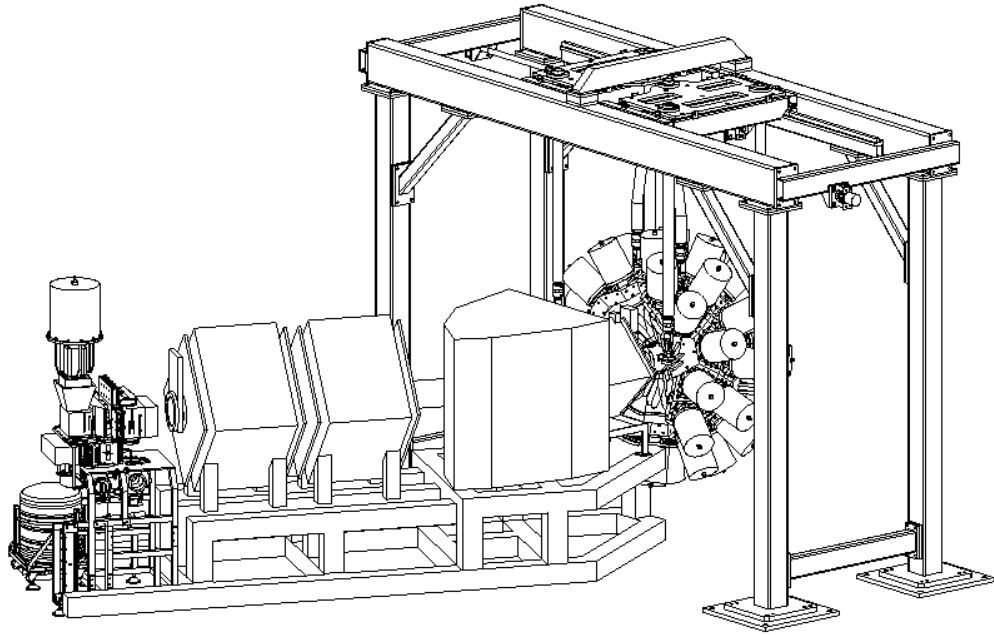
Obrázok 1: Schematický náčrt spektrometra GREAT.

Pri terčovej komore je umiestnené detektorové pole JUROGAM. Pozostáva z 43 HPGe detektorov, pričom každý z nich je vybavený antikomptonovským BGO štítom. Pole slúži na meranie gama kvánt emitovaných bezprostredne po fúzii dvoch jadier a evaporácii častíc. Píková účinnosť celého poľa je 4.1 % pri energii 1.332 MeV a typické energetické rozlíšenie 2.8 keV. Pred každým detektorom je umiestnená 1 mm hrubá medená platnička na zníženie pozadia nízkoenergetických roentgenovských kvánt pochádzajúcich zo štiepenia a na ochranu kryštálov pred poškodením štiepnymi fragmentami. Celé pole je implemetované do automatického systému plnenia tekutým dusíkom a detektory sú plnené 3 krát denne. Schématický náčrt celej experimentálnej bázy je na obr. 2

### 4.3 Spektroskopia dlhožijúcich izomérov

Pokiaľ doba polpremeny študovaného izomérického stavu presahuje niekoľko  $\mu\text{s}$ , konvenčná spektroskopia gama žiarenia v promptnej koincidencii s implantáciou evaporáčného rezídua sa stáva nepoužiteľnou v dôsledku vysokého pozadia. Preto bola navrhnutá metóda trojných pozičných korelácií [Jon02]. Je založená na predpoklade, že vysoko spinové K-izoméry sa rozpadajú kaskádou gama čiar na základný stav študovaného jadra. Mno-





Obrázok 2: Experimentálna báza v JYFL.

hé z týchto prechodov sú nízkoenergetické kolektívne prechody, ktoré vo zvýšenej miere podliehajú vnútornej konverzii. Pokiaľ je diskriminačná hladina kremíkového detektora dostatočne nízka, emitované konverné a Augerove elektróny spolu s nízkoenergetickým charakteristickým roentgenovským žiarením vytvoria dostatočný signál, ktorý je možné pozične korelovať s implantáciou evaporačného rezídua a následným alfa rozpadom. Signály elektrónov potom slúžia ako trigger pre detektory gama žiarenia v okolí fokálnej roviny separátora RITU. Výsledkom tejto metódy sú gama spektrá s vysokou čistotou. Táto metóda vyžaduje neštandardný mód práce pozične citlivých kremíkových detektorov. Zosilnenie je rôzne pre predné a zadné stripy, predná strana meria konverné elektróny (energie do 1 MeV), kým zadná alfa častice a implantácie evaporačných rezíduí.

Metódu trojných korelácií je možné využiť aj na in-beam spektroskopiu rotačných stavov nad izomérickými hladinami pomocou sféry JUROGAM. Zníženie pozadia je možné triggerovaním pomocou implantácií evaporačných rezíduí nasledovaných emisiou elektrónov v zvolenom časovom okne.

## 5 Experimentálne výsledky

### 5.1 Detaily experimentov

Jadrá  $^{254}\text{No}$  boli produkované v reakcií  $^{208}\text{Pb}(^{48}\text{Ca},2n)^{254}\text{No}$  pri energii zväzku 219 MeV v laboratórnej sústave. Účinný prierez tejto reakcie je okolo 2  $\mu\text{barn}$  [Gag89] a transmisia separátora RITU bola odhadnutá na 35 %. Sumarizácia analyzovaných experimentov je v tab. 1. Na kalibráciu boli využité štandardné zdroje žiarenia  $^{152}\text{Eu}$  (gama žiarenie),  $^{133}\text{Ba}$  (gama žiarenie, konverzné elektróny),  $^{239}\text{Pu}$ ,  $^{241}\text{Am}$  a  $^{244}\text{Cm}$  (alfa častice).

Tabuľka 1: Sumarizácia analyzovaných experimentov.

	<b>R35</b>	<b>JR48</b>
<b>Dátum</b>	2. 5. - 8. 5. 2005	3. 4. - 10. 4. 2006
<b>Použité spektrometre</b>	GREAT	JUROGAM GREAT 2 VEGA detektory <sup>2</sup>
<b>Doba ožarovania</b>	148 hod.	110 hod.
<b>Celková dávka</b>	$2,0 \cdot 10^{17}$ čast.	$4,6 \cdot 10^{16}$ čast.
<b>Projektil</b>	$^{48}\text{Ca}^{10+}$	$^{48}\text{Ca}^{10+}$
<b>Energia zväzku</b>	219 MeV	219 MeV
<b>Priemerná intenzita zväzku</b>	61 pnA	19 pnA
<b>Terčik</b>	$^{208}\text{PbS}$	$^{208}\text{Pb}$ (kovový)
<b>Hrúbka terčika</b>	416 $\mu\text{g}/\text{cm}^2$	446 $\mu\text{g}/\text{cm}^2$

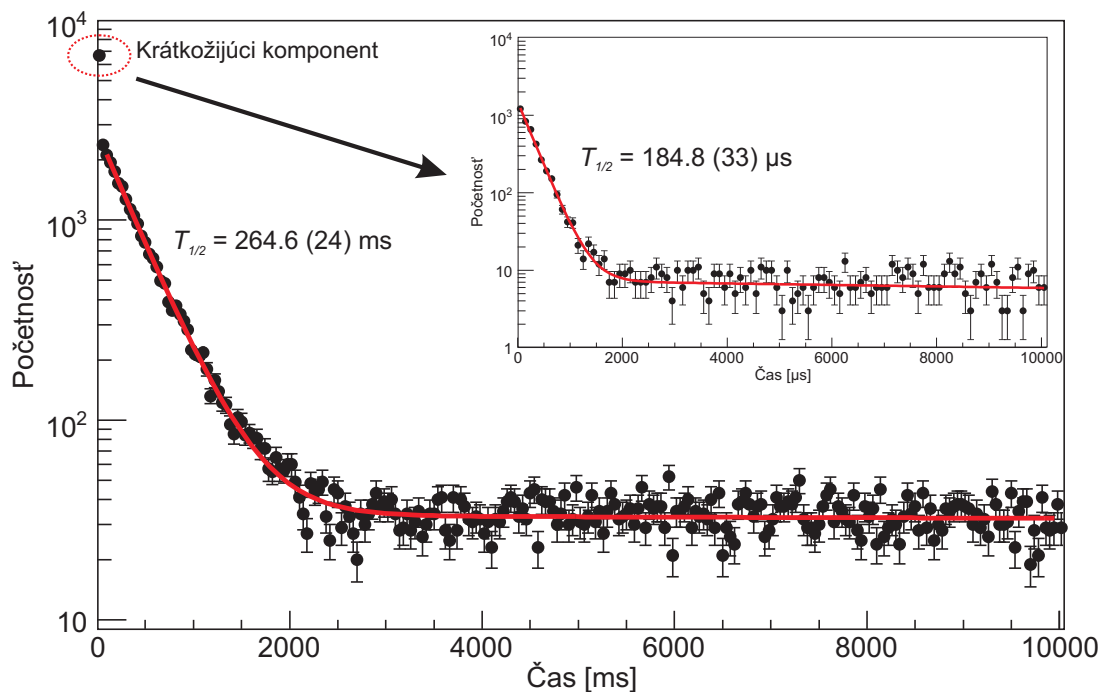
### 5.2 Pozorované korelačné ret'azce

Na identifikáciu izomérických rozpadov boli študované pozičné korelácie medzi implantáciou evaporáčného rezídua a detekciou kalorimetrického signálu pochádzajúceho z kaskády konvertovaných prechodov. Zvolené časové okno bolo 10 s. Časová distribúcia pozorovaných korelácií je na obr. 3. Evidentne sú viditeľné dve komponenty exponenciálneho rozpadu. Na získanie hodnoty doby polpremeny boli rozpadové krivky fitované funkciou

$$N(\Delta t) = ae^{-(\lambda+r)\Delta t} + be^{-r\Delta t}, \quad (5)$$

kde  $\lambda$  je rozpadová konštanta izomérického stavu a  $r$  pochádza z náhodných korelácií. Získané hodnoty doby polpremeny spolu s izomérickými pomermi je v tab. 2. Izomérický pomer je pomer medzi počtom pozorovaných rozpadov izómeru a základného stavu. Počet pozorovaných alfa rozpadov bol korigovaný na alfa vetviaci pomer 0.9 [Fir96] a účinnosť detektora pre alfa častice 55 %. Kvôli nízkej diskriminačnej hladine bola účinnosť detekcie kalorimetrického signálu elektrónov 100 %.

Získaná doba polpremeny dlhožijúceho izoméru je vo vynikajúcej zhode s tou ktorú pozoroval Ghiorso a kol. Krátkožijúci izomér bol doteraz neznámy. Analýza korelačných reťazcov typu evaporáčné rezíduum - elektrón - elektrón preukázala že rozpad krátkožijúceho izoméru napája priamo dlhožijúci izomér.



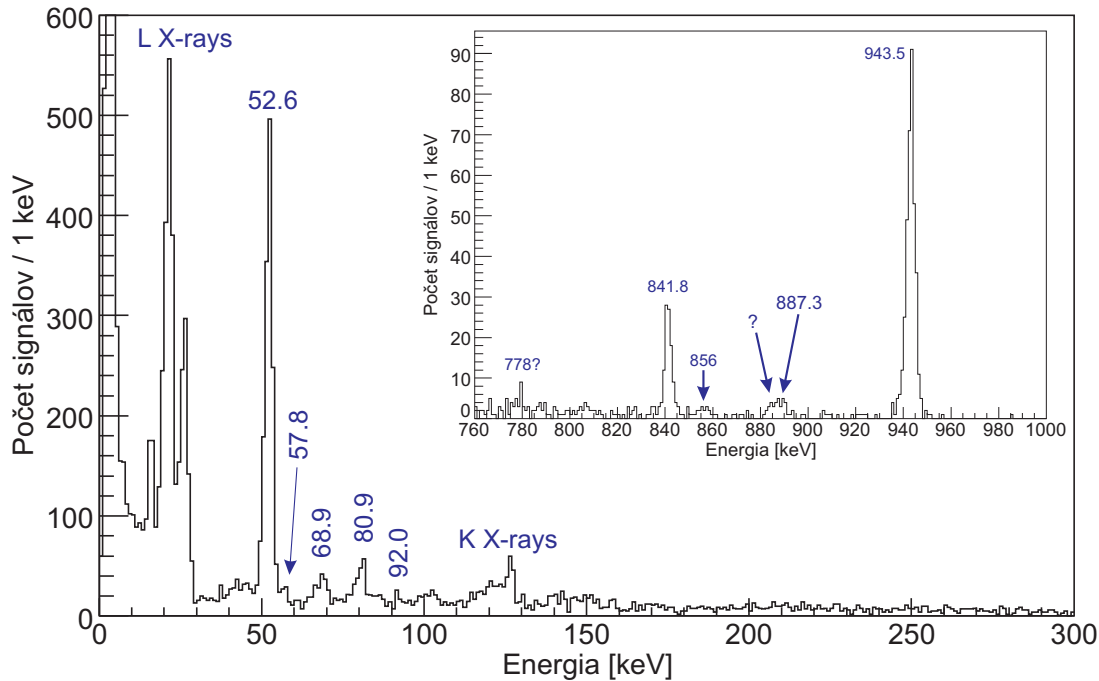
Obrázok 3: Časová distribúcia korelácií medzi implantáciou evaporáčného rezídua a detekciou kalorimetrického signálu od konverzných elektrónov. Expanzia prvých binov histogramu je zobrazená na menšom histograme.

Tabuľka 2: Získané hodnoty doby polpremeny a izomérické pomery.

Stav	Doba polpremeny	Počet rozpadov	Izomérický pomer
m1	264.6(24) ms	26 192(171)	29.5(2) %
m2	184.8(33) μs	4 139(69)	4.7(1) %
zákl.s.	49.2(4) s	43 884(229)	-

### 5.3 Vlastnosti 264.6 ms izoméru

Na detailné štúdium rozpadových vlastností dlhožijúceho izoméru bolo zvolené časové okno 2 – 1700 ms. Prímes krátkožijúceho komponentu je v tomto okne zanedbateľná. Elektróny boli využité ako trigger pre gama detektory. Výsledkom sú spektrá s vysokou čistotou - vid' obr. 4



Obrázok 4: Gama žiarenie v koincidencii s korelovanými elektrónmi pri časovom okne 2 – 1700 ms. Nízkoenergetická časť bola meraná planárnym HPGe detektorom, vysokoenergetická (menšie spektrum) pomocou veľkoobjemových HPGe detektorov.

Na základe analýzy gama spektier, gama-gama koincidencií a kalorimetrickej energie konverzných elektrónov bola zostavená rozpadová schéma na obr. 5. K-izomér je stav  $K^\pi = 8^-$  s excitačnou energiou 1293,0 keV. Rozpadá sa K-potlačeným E1 prechodom s energiou 52,6 keV do rotačného pásu ktoré je vybudovaný na dvojkvázicasticovej hladine  $K^\pi = 3^+$  s excitačnou energiou 987,5 keV. Štúdium štruktúry rotačného pásu umožnilo jednoznačné priradenie dvojkváziprotónovej štruktúry  $1/2^- [521]_\pi \otimes 7/2^- [514]_\pi$  stavu  $K^\pi = 3^+$ . Tento stav sa rozpadá vysokoenergetickými K-potlačenými (stupeň zákazu nedostačuje na to aby sa hladina stala izomérickou) do rotačného pásu nad základným stavom [Eec05]. Jednoznačné priradenie štruktúry nie je možné z rozpadových vlastností. Na základe pozorovania silného E1 prechodu spájajúceho izomérickú hladinu s dvojkvázicasticovou excitáciou a na základe teoretických modelov bolo navrhnuté priradenie štruktúry  $7/2^- [514]_\pi \otimes 9/2^+ [624]_\pi$ . Možná je aj neutrónová štruktúra  $7/2^+ [613]_\nu \otimes 9/2^- [734]_\nu$  a v tomto prípade by bola relatívne dlhá doba polpremeny spôsobená čiastočne výraznou

štruktúrou zmenou pri 52,6 keV E1 prechode. Pozorované redukované potlačenie 691 je vo veľmi dobrej zhode s Loebnerovou systematikou a tak podporuje dvojkváziprotónové štruktúru a zároveň je indikátorom zachovania axiálnej symetrie  $^{254}\text{No}$  aj pri vysokej hodnote spinu.

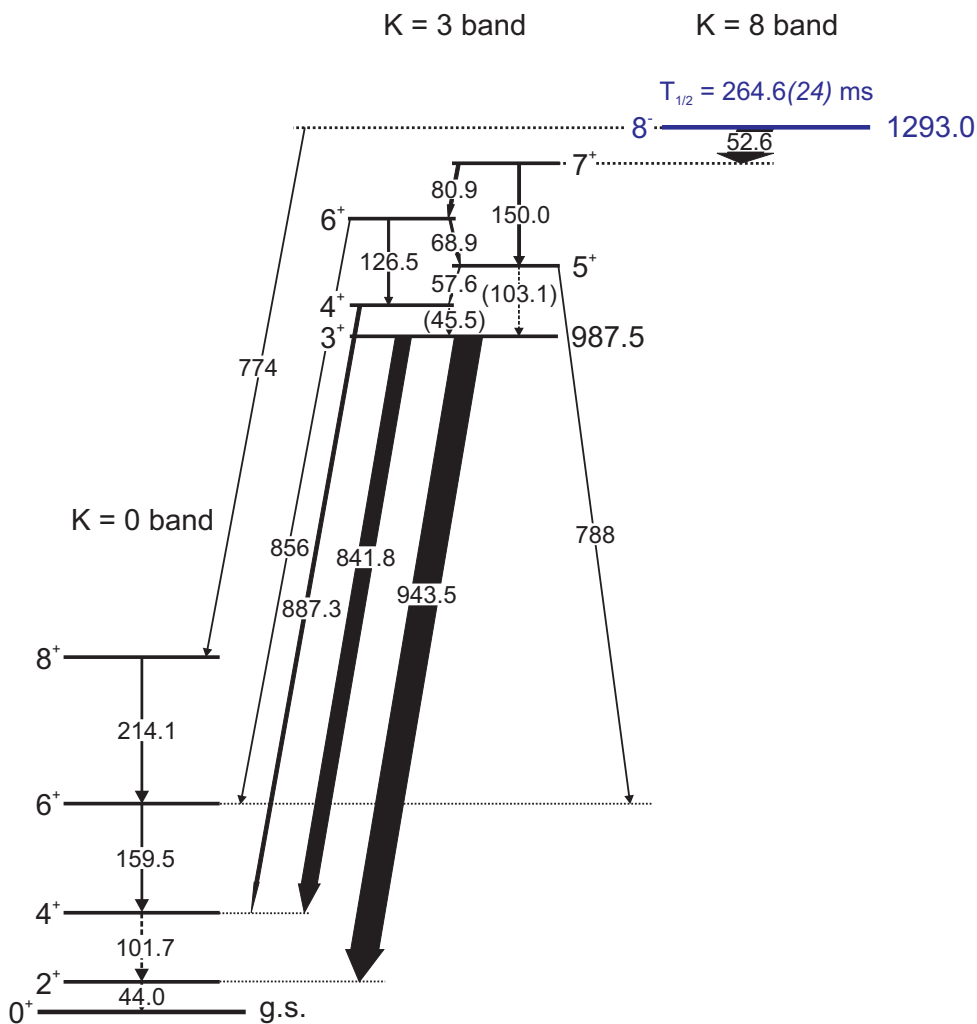
Na jednoznačné priradenie štruktúry je potrebné študovať vlastnosti rotačného pásu vybudovaného nad hladinou  $K^\pi = 8^-$ . Preto bol realizovaný in-beam experiment ktorého cieľom bolo študovať stavy ležiace nad izomérickou hladinou. Tieto stavy môžu byť populované aj pri rozpade krátkožijúceho izoméru keďže tento sa rozpadá priamo na  $K^\pi = 8^-$  izomér

Veľmi nízka excitačná energia stavu  $K^\pi = 3^+$  svedčí o takmer degenerácii protónových orbitálov  $1/2^-$  [521] a  $7/2^-$  [514]. Tieto uzatvárajú medzeru pri  $Z = 102$ . Štúdium vlastností orbitálu  $1/2^-$  [521] je veľmi dôležité, nakoľko tento pochádza zo sférického  $2f_{5/2}$  orbitálu. Tento je veľmi dôležitý pretože jeho vlastnosti sú kritické z hľadiska lokalizácie ďalšieho protónového magického čísla pre ktoré teória zatiaľ stále nenachádza konsenzus.

## 5.4 Vlastnosti 184.8 $\mu\text{s}$ izoméru

Krátkožijúci izomér bol študovaný za použitia časového okna 0 – 1300  $\mu\text{s}$ . Namerané spektrum žiarenia v koincidencii s korelovanými elektrónmi je na obr. 6 Štatistika získaná v oboch experimentoch bohužiaľ nebola dostatočná na jednoznačné vybudovanie rozpadovej schémy. Preto všetky argumenty sú postavené na špekuláciách a teoretických predpovediach. Keďže analýzou pozičných korelácií bolo preukázané, že rozpad krátkožijúceho izoméru priamo napája dlhožijúci. Preto je navrhovaná rozpadová schéma výsledkom kombinácie dát získaných počas in-beam experimentu (stavy ležiace nad izomérickou hladinou  $K^\pi = 8^-$ ) a priamo z rozpadu krátkožijúceho izoméru.

Navrhnutá schéma je na obrázku 7. Boli identifikované dve rozpadové vetvy a predbežne bola izomérickému stavu priradená štvorkvázicasticová štruktúra  $K^\pi = 16^+$ . Vhodným kandidátom teoreticky predpovedaným v literatúre [Her06, Tan06] je dvojjprotónový-dvojneutrónový stav  $7/2^+[613]_\nu \otimes 9/2^- [734]_\nu \otimes 7/2^- [514]_\pi \otimes 9/2^+ [624]_\pi$ . V rozpadovej vetve vedúcej priamo na hladinu  $K^\pi = 8^-$  bol identifikovaný fragment rotačného pásu. Štúdiom intenzít pozorovaných gama čiar bolo zistené že ich intenzita v rámci chyby merania zodpovedá dvojkváziprotónovému charakteru  $K^\pi = 8^-$  izomérického stavu. Na potvrdenie tohto by bolo potrebné navýšiť existujúcu štatistiku dát. Druhá vetva musí viesť cez neizomérický dvojkvázicasticový stav ležiaci vyššie než stav  $K^\pi = 8^-$ . Vzhľadom na predpokladaný protónový charakter  $K^\pi = 8^-$  je vhodným kandidátom je stav  $K^\pi = 7^-$  s nukleónovou štruktúrou  $7/2^- [514]_\pi \otimes 7/2^+ [633]_\pi$ . Jeho excitačnú energiu nie je možné z dát ktoré boli k dispozícii určiť.

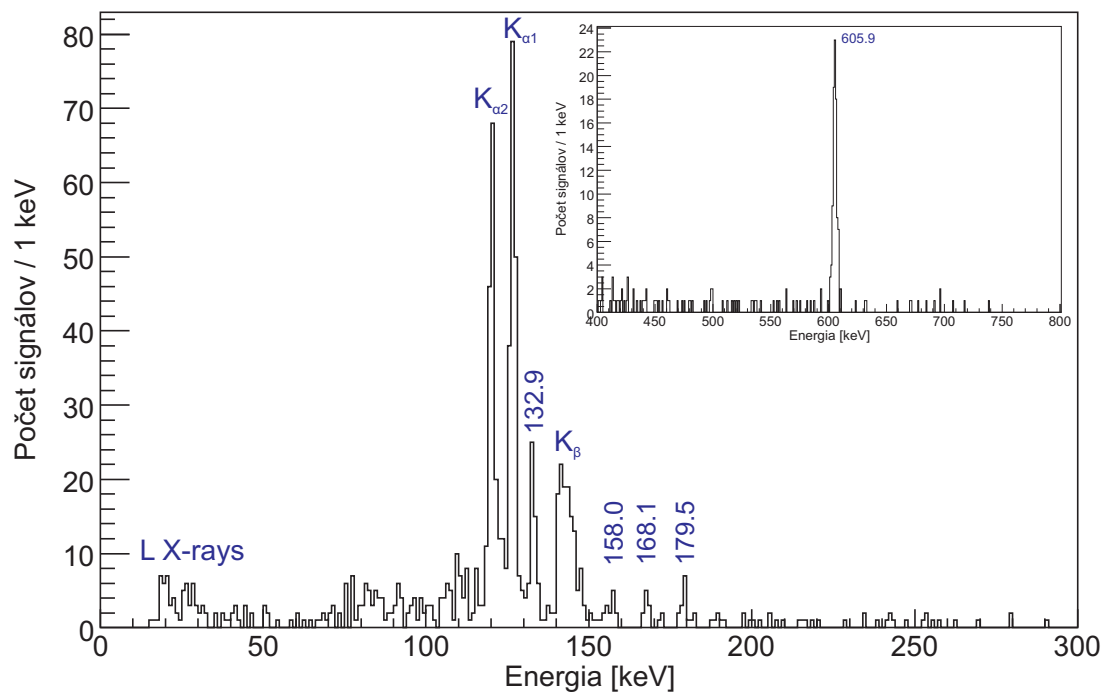


Obrázok 5: Rozpadová schéma 264.6 ms izomérického stavu. Rotačný pás nad základným stavom bol pozorovaný v predošlých experimentoch až po hladinu so spinom  $22\hbar$  [Eec05].

## 6 Ostatné experimenty

Experimenty analyzované v rámci dizertačnej práce boli realizované v rámci dlhodobého program výskumu K-izomérov v JYFL a taktiež GSI Darmstadt. Všetky tieto experimenty využili metódu trojných korelácií.

Na úspešný experimenty R35 a JR48 nadviazal v roku 2006 experiment pri ktorom boli študované K-izoméry v izotope  $^{250}\text{Fm}$ . V tomto jadre je známy K-izomér objavený Ghiorsoom a kol. podobne ako v  $^{254}\text{No}$  [Ghi73]. Jadrá boli produkované v reakcii  $^{204}\text{HgS}(^{48}\text{Ca}, 2n)^{250}\text{Fm}$ . Jednoznačne sa podarilo identifikovať K-izomér, určiť jeho dobu polpremeny (ktorá je vo vynikajúcej zhode s predošlou hodnotou), spin a paritu  $K^\pi = 8^-$  a priradiť dvojkvázineutrónovú štruktúru. Doteraz neznámy krátkožijúci izomér bol iden-



Obrázok 6: Gama žiarenie v koincidencii s korelovanými elektrónmi pri časovom okne 0 – 1300  $\mu$ s. Nízkoenergetická časť bola meraná planárnym HPGe detektorom, vysokoenergetická (menšie spektrum) pomocou veľkoobjemových HPGe detektorov.

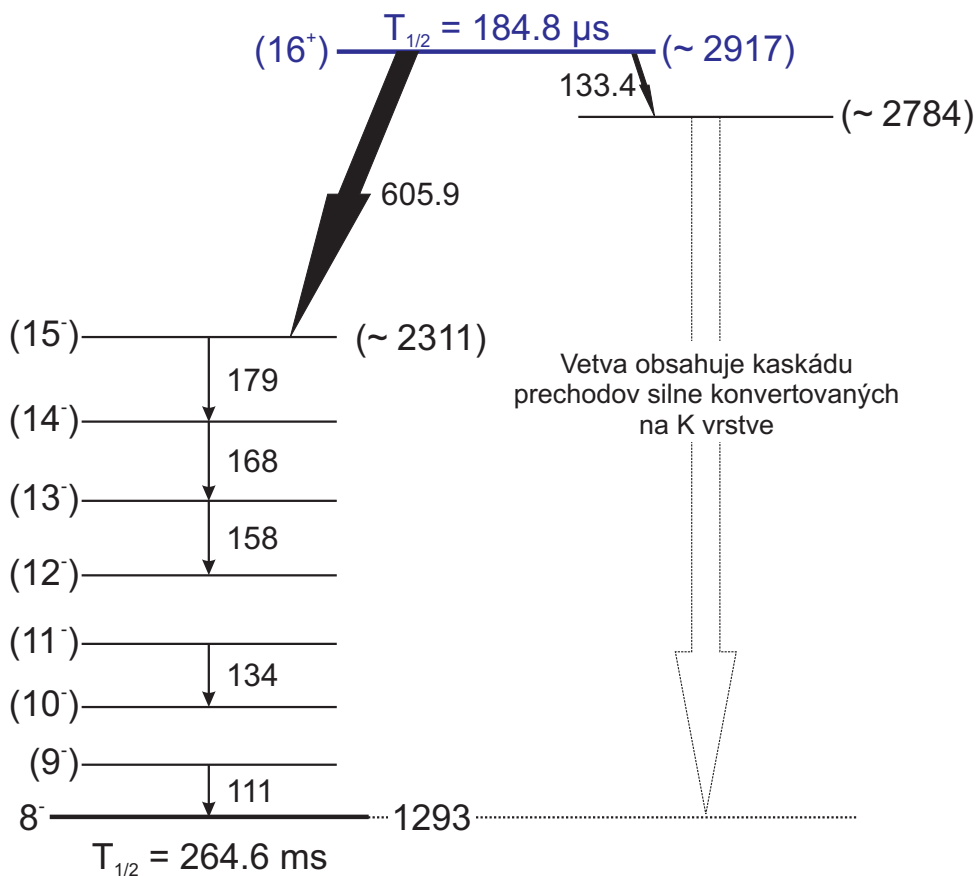
tifikovaný. Jednoznačné priradenie dvojkvázineutrónovej štruktúry bolo možné vďaka simultánnemu in-beam meraniu za pomoci sféry JUROGAM. V rozpadovej schéme bola pozorovaná nová hladina, ktorá bola interpretovaná ako dvojkvázicasticová s oktapólovou prímiesou. Pre detailnejšiu diskusiu vid' [Gre07].

Podobná rozpadová schéma bola pozorovaná v  $^{252}\text{No}$ . K-izomér bol identifikovaný a detailne študovaný v GSI Darmstadt [Sul07]. Jadrá boli produkované v reakcii  $^{206}\text{PbS}(^{48}\text{Ca},2n)^{252}\text{No}$ . V tomto prípade nebolo možné stanoviť kvázicasticovú štruktúru v dôsledku absencie in-beam spektrometra v okolí terčovej komory rýchlostného separátora SHIP. Preto bude výskum tohoto K-izoméru pokračovať v JYFL in-beam experimentom.

## 7 Systematika dvojkvázicasticových hladín

Experimenty analyzované v rámci dizertačnej práce spolu s výsledkami ostatných spomínaných experimentov umožnili vytvoriť obmedzenú systematiku hladín v okolí deformovaných uzavretých vrstiev  $Z = 100$  a  $N = 152$ . Sumarizácia identifikovaných stavov je v tab. 3.

Získané výsledky boli porovnané s výpočtami založenými na Woods-Saxonovom potenciále - vid' obr. 8.



Obrázok 7: Navrhnutá rozpadová schéma izoméru s dobou polpremeny 184.8  $\mu$ s.

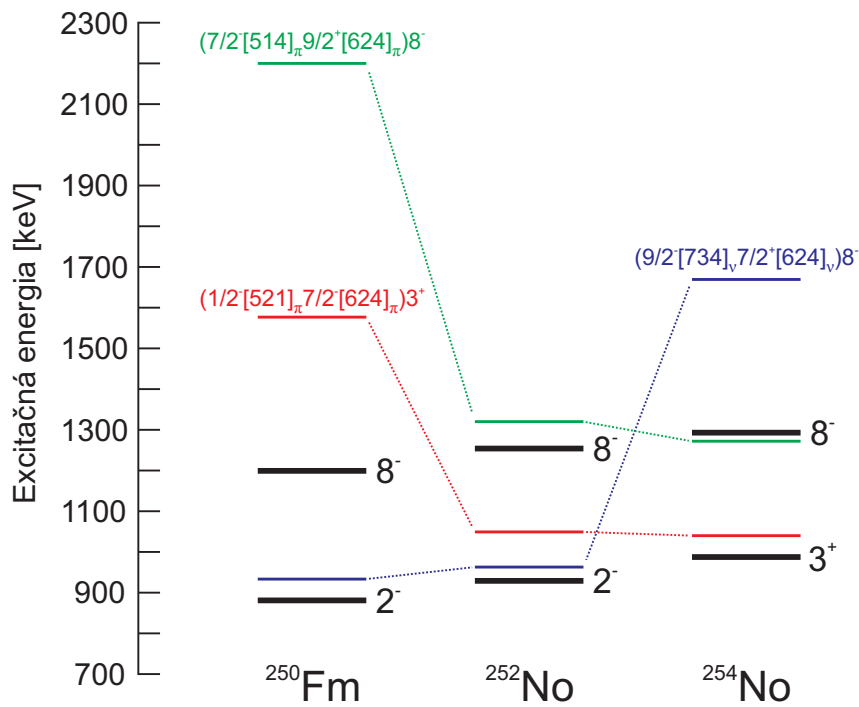
Tabuľka 3: Dvojkvázičasticové stavy v jadrách v okolí  $Z = 100$  a  $N = 152$ .

Izotop	$K^\pi$	Excitačná energia [keV]	Štruktúra	Referencia
$^{254}\text{No}$	$3^+$	987,5	$1/2^- [521]_\pi \otimes 7/2^- [514]_\pi$	táto práca, [Her06]
	$8^-$	1293,0	$7/2^- [514]_\pi \otimes 9/2^+ [624]_\pi$	
$^{252}\text{No}$	$2^-$	929,0	$9/2^- [734]_\nu \otimes 5/2^+ [622]_\nu$	[Sul07]
	$8^-$	1254,0	$9/2^- [734]_\nu \otimes 7/2^+ [624]_\nu$	
$^{250}\text{Fm}$	$2^-$	881,0	$9/2^- [734]_\nu \otimes 5/2^+ [622]_\nu$	[Gre07]
	$8^-$	1199,2	$9/2^- [734]_\nu \otimes 7/2^+ [624]_\nu$	

## 8 Zhrnutie výsledkov

Cieľom predkladanej práce bolo detailné spektroskopické štúdium K-izomérických stavov v jadre  $^{254}\text{No}$ . Úloha predkladateľa spočívala v príprave, realizácii a najmä detailnej ana-





Obrázok 8: Porovnanie experimentálne získaných dát s výpočtami založenými na Woods-Saxonovom potenciále. Teoretické výpočty boli prevzaté z [Gre07].

lyze nameraných dát a ich následnej fyzikálnej interpretácie. Analyzované boli dva experimenty, ktoré prebehli na Univerzite v Jyväskylä. Jednoznačne bola potvrdená existencia K-izoméru a doteraz známa hodnota doby polpremeny bola upresnená. Bol pozorovaný doteraz neznámy izomérický stav. Vysokoúčinný detekčný systém vo fokálnej rovine plynom plneného separátora RITU umožnil detailnú gama spektroskopiu prechodov priradených rozpadu oboch izomérických stavov. Izomér s dobou polpremeny bol jednoznačne stanovený ako  $K^\pi = 8^-$  stav rozpadajúci sa emisiou K-potlačeného 52,6 keV E1 prechodu do pásu so silne rotačným charakterom. Tento je vybudovaný na hladine  $K^\pi = 3^+$ . Štúdium štruktúry rotačného pásu bol jednoznačne priradený dvojkváziprotónový charakter stavu  $K^\pi = 3^+$ . Tento stav obsahuje orbitál  $1/2^- [521]$  ktorý je veľmi dôležitý z hľadiska modelov predpovedajúcich pozíciu ďalšieho protónového magického čísla. Výsledky tejto práce preto poskytujú dôležité vstupné parametre pre tieto teoretické výpočty, ktorých cieľom je vyriešiť jednu z centrálnych otázok fyziky supert'azkých jadier. Meranie vlastností K-potlačených prechodov taktiež potvrdilo zachovanie axiálnej symetrie pre jadro  $^{254}\text{No}$ .

Nový krátkožijúci izomér je pri použitej reakcii populovaný s veľmi malou pravdepodobnosťou. Preto dosiahnutá štatistika umožnila len špekulácie ohľadne jeho excitačnej energie, spine, parite a nukleónovej štruktúry. Predbežne bol tento stav identifikovaný ako stav  $K^\pi = 16^+$  so štvorkvázicasticovou štruktúrou. Bude potrebné meranie s výraz-

ne vyššou štatistikou na vyriešenie tohto problému. V rozpade bol pozorovaný fragment rotačného pásu ktorý bol interpretovaný ako pás nad izomérickou hladinou  $K^\pi = 8^-$ . Počas druhého experimentu bol použitý aj in-beam spektrometer JUROGAM na potvrdenie týchto prechodov. Avšak aj v tomto prípade sa dosiahnutá úroveň štatistiky ukázala ako nedostatočná.

Bola objavená tiež indikácia existencie tretieho izomérického stavu. Na jeho jednoznačné potvrdenie bude však potrebné výrazné navýšenie štatistiky.

Výsledky týchto experimentov boli zahrnuté do širšieho experimentálneho štúdia problematiky K-izomérov v JYFL Jyväskylä ako aj GSI Darmstadt. Predkladateľ dizertačnej práce úzko spolupracoval so skupinami v spomínaných inštitútoch pri analýze a interpretácii dát. Výsledkom je čiastočná systematika dvojkvázicových hladín v jadrách v blízkosti uzavretých deformovaných vrstiev  $Z=100$  a  $N=152$ . Všetky výsledky boli porovnané s modelovými výpočtami založenými na Wood-Saxonovom potenciále.

## 9 Summary

Spectroscopic studies of K-isomers in transfermium nucleus  $^{254}\text{No}$  have been carried out at Accelerator Laboratory of the University of Jyväskylä employing the RITU gas-filled separator. Along with the separator, two very efficient spectrometer, the JUROGAM at target position and the GREAT at focal plane have been used. Combination of both detection systems allowed the powerfull recoil-electron tagging techniques to be used.

The decay scheme of known K-isomeric state with half-life of 264.6 ms has been discovered and in addition new short-lived isomer with the half-life of 184.8  $\mu\text{s}$  has been identified. New  $K^\pi = 3^+$  rotational band has been observed for the first time. Structure of this band provides unambiguous assumption of two-quasiproton structure to the band-head. This state involves the  $2f_{5/2}$  proton orbital which properties are crucial for prediction of position of next proton spherical shell.

The results presented extend the knowledge of isomeric and non-yrast structures in transfermium nuclei and therefore provide valuable input to nuclear structure calculations in the heavy element region.

## 10 Zoznam publikácií autora dizertačnej práce

### 10.1 Publikácie v karentovaných časopisoch

1. R.-D. Herzberg, P. T. Greenlees, P. A. Butler, G. D. Jones, M. Venhart, I. G. Darby, S. Eeckhautd, K. Eskola, T. Grahn, C. Gray-Jones, F. P. Heßberger, P. Jones, R. Julin, S. Juutinen, S. Ketelhut, W. Korten, M. Leino, A. - P. Leppänen, S. Moon, M. Nyman, R. D. Page, J. Pakarinen, A. Pritchard, P. Rahkila, J. Sarén, C. Scholey,

- A. Steer, Y. Sun, Ch. Theisen and J. Uusitalo  
**Nuclear isomers in superheavy elements as stepping stones towards the island of stability**  
 Nature (London) **442** (2006) 896
2. R.-D. Herzberg, P. T. Greenlees, P. A. Butler, G. D. Jones, I. G. Darby, S. Eeckhaudt, T. Grahn, C. Gray-Jones, F. P. Heßberger, P. Jones, R. Julin, S. Juutinen, S. Ketelhut, M. Leino, A.-P. Leppänen, S. Moon, M. Nyman, R. D. Page, J. Pakarinen, A. Pritchard, P. Rahkila, M. Sandzelius, J. Sarén, C. Scholey, J. Uusitalo and M. Venhart  
**Isomer spectroscopy in  $^{254}\text{No}$**   
 Phys. Scr. **T125** (2006) 73
3. P. T. Greenlees, R.-D. Herzberg, S. Ketelhut, P. A. Butler, T. Grahn, C. Gray-Jones, G. D. Jones, P. Jones, R. Julin, S. Juutinen, T.-L. Khoo, M. Leino, S. Moon, M. Nyman, J. Pakarinen, P. Rahkila, D. Rostron, J. Sarén, C. Scholey, J. Sorri, S. Tandel, J. Uusitalo and M. Venhart  
**High-K structure in  $^{250}\text{Fm}$  and the influence of the deformed shell gaps at  $N = 152$  and  $Z = 100$**   
 submitted to Phys. Rev. Lett.
4. B. Sulignano, S. Heinz, F. P. Heßberger, S. Hofmann, D. Ackermann, S. Antalic, B. Kindler, I. Kojouharov, P. Kuusiniemi, B. Lommel, R. Mann, K. Nishio, A. G. Popeko, Š. Šáro, B. Streicher, M. Venhart and A. V. Yeremin  
**Identification of a K-isomer in  $^{252}\text{No}$**   
 Eur. Phys. J. A **33** (2007) 327
5. S. Hofmann, D. Ackermann, S. Antalic, H. G. Burkhard, V. F. Comas, R. Dressler, Z. Gan, S. Heinz, J. A. Heredia, F. P. Heßberger, J. Khuyagbaatar, B. Kindler, I. Kojouharov, P. Kuusiniemi, M. Leino, B. Lommel, R. Mann, G. Münzenberg, K. Nishio, A. G. Popeko, Š. Šáro, H. J. Schött, B. Streicher, B. Sulignano, J. Uusitalo, M. Venhart and A. V. Yeremin  
**The reaction  $^{48}\text{Ca} + ^{238}\text{U} \rightarrow ^{286}\text{112}^*$  studied at the GSI-SHIP**  
 Eur. Phys. J. A **32** (2007) 251
6. F. P. Heßberger, S. Hofmann, D. Ackermann, S. Antalic, B. Kindler, I. Kojouharov, P. Kuusiniemi, M. Leino, B. Lommel, R. Mann, K. Nishio, A. G. Popeko, B. Sulignano, Š. Šáro, B. Streicher, M. Venhart and A. V. Yeremin  
**Alpha-gamma decay studies of  $^{255}\text{No}$**   
 Eur. Phys. J. A **29** (2006) 165

7. F. P. Heßberger, S. Hofmann, D. Ackermann, S. Antalic, B. Kindler, I. Kojouharov, P. Kuusiniemi, M. Leino, B. Lommel, R. Mann, K. Nishio, A. G. Popeko, B. Sulignano, Š. Šáro, B. Streicher, M. Venhart and A. V. Yeremin  
**Alpha-gamma decay studies of  $^{255}\text{Rf}$ ,  $^{251}\text{No}$  and  $^{247}\text{Fm}$**   
 Eur. Phys. J. A **30** (2006) 561
  
8. S. Antalic, A. N. Andreyev, D. Ackermann, L. Bianco, D. Cullen, I. G. Darby, S. Franchoo, S. Heinz, F. P. Heßberger, S. Hofmann, M. Huyse, B. Kindler, I. Kojouharov, A.-P. Leppänen, S. R. Leshner, B. Lommel, R. Mann, G. Münzenberg, K. Nishio, R. D. Page, J. Pakarinen, J. J. Ressler, Š. Šáro, B. Streicher, B. Sulignano, J. Thomson, P. van Duppen, M. Venhart, D. Wiseman and R. Wyss  
**The isotopes in Po-Rn region**  
 Acta Phys. Pol. **38** (2007) 1557
  
9. B. Streicher, F. P. Heßberger, D. Ackermann, S. Antalic, B. Kindler, I. Kojouharov, P. Kuusiniemi, B. Lommel, R. Mann, B. Sulignano, Š. Šáro and M. Venhart  
**Alpha-gamma decay studies of  $^{261}\text{Sg}$**   
 Acta Phys. Pol. **38** (2007) 1561
  
10. D. T. Joss, I. G. Darby, R. D. Page, J. Uusitalo, S. Eeckhaudt, T. Grahn, P. T. Greenlees, P. M. Jones, R. Julin, S. Juutinen, S. Kettelhut, M. Leino, A. - P. Leppänen, M. Nyman, J. Pakarinen, P. Rahkila, J. Sarén, C. Scholey, A. Steer, A. J. Cannon, P. D. Stevenson, J. S. Al-Khalili, S. Ertürk, M. Venhart, B. Gall, B. Hadinia and J. Simpson  
**Probing the limit of nuclear existence: Proton emission from  $^{159}\text{Re}$**   
 Phys. Lett. B **641** (2006) 34
  
11. R. D. Page, L. Bianco, I. G. Darby, J. Uusitalo, D. T. Joss, T. Grahn, R.-D. Herzberg, J. Pakarinen, J. Thomson, S. Eeckhaudt, P. T. Greenlees, P. M. Jones, R. Julin, S. Juutinen, S. Kettelhut, M. Leino, A.-P. Leppänen, M. Nyman, P. Rahkila, J. Sarén, C. Scholey, A. Steer, M. B. Gómez Hornillos, J. S. Al-Khalili, A. J. Cannon, P. D. Stevenson, S. Ertürk, B. Gall, B. Hadinia, M. Venhart, and J. Simpson  
 **$\alpha$  decay of  $^{159}\text{Re}$  and proton emission from  $^{155}\text{Ta}$**   
 Phys. Rev. C **75** (2007) 061302

## 10.2 Ostatné publikácie

1. B. Sulignano, F. P. Heßberger, S. Hofmann, D. Ackermann, S. Antalic, I. Kojouharov, P. Kuusiniemi, R. Mann, K. Nishio, Š. Šáro, B. Streicher and M. Venhart  
**Evidence for an isomeric state in  $^{251}\text{No}$**   
 GSI Scientific Report, Vol. 2005-1 (2005) 75

2. F. P. Heßberger, S. Hofmann, D. Ackermann, S. Antalic, I. Kojouharov, P. Kuusiniemi, R. Mann, K. Nishio, Š. Šáro, B. Štreicher, B. Sulignano and M. Venhart  
**Decay spectroscopy of  $^{255}\text{No}$**   
GSI Scientific Report, Vol. 2005-1 (2005) 73
3. F. P. Heßberger, S. Hofmann, D. Ackermann, S. Antalic, I. Kojouharov, P. Kuusiniemi, R. Mann, K. Nishio, Š. Šáro, B. Štreicher, B. Sulignano and M. Venhart  
**Nilsson levels in odd-mass odd-Z nuclei in the region  $Z=(99-105)$**   
GSI Scientific Report, Vol. 2005-1 (2005) 74
4. D. T. Joss, I. G. Darby, R. D. Page, J. Uusitalo, S. Eeckhauudt, T. Grahn, P. T. Greenlees, P. M. Jones, R. Julin, S. Juutinen, S. Ketelhut, M. Leino, A.-P. Leppänen, M. Nyman, J. Pakarinen, P. Rahkila, J. Sarén, C. Scholey, A. N. Steer, J. S. Al-Khalili, A. J. Cannon, P. D. Stevenson, S. Ertürk, B. Gall, B. Hadinia, M. Venhart, and J. Simpson  
**Discovery of the proton emitting nucleus  $^{159}\text{Re}$**   
AIP Conf. Proc. **961** (2007) 28
5. C. Dossat, Ch. Theisen, A. Bürger, E. Clément, A. Görgen, W. Korten, S. Eeckhauudt, P. Jones, T. Grahn, P. T. Greenlees, R. Julin, S. Juutinen, M. Leino, A.-P. Leppänen, M. Nyman, J. Pakarinen, P. Rahkila, J. Sarén, C. Scholey, J. Sorri, J. Uusitalo, and M. Venhart  
**Spectroscopy of the very-neutron deficient  $^{189}\text{Bi}$**   
AIP Conf. Proc. **961** (2007) 196
6. R. D. Page, L. Bianco, I. G. Darby, D. T. Joss, T. Grahn, R.-D. Herzberg, J. Pakarinen, J. Thomson, J. Uusitalo, S. Eeckhauudt, P. T. Greenlees, P. M. Jones, R. Julin, S. Juutinen, S. Ketelhut, M. Leino, A.-P. Leppänen, M. Nyman, P. Rahkila, J. Sarén, C. Scholey, A. N. Steer, M. Venhart, J. Simpson, J. S. Al-Khalili, A. J. Cannon, P. D. Stevenson, S. Ertürk, B. Gall, and B. Hadinia  
**Probing single-particle structures beyond the proton drip line**  
AIP Conf. Proc. **961** (2007) 137
7. A. V. Yeremin, A. V. Belozerov, M. L. Chelnokov, V. I. Chepigin, V. A. Gorshkov, A. P. Kabachenko, O. N. Malyshev, Yu. Ts. Oganessian, A. G. Popeko, A. V. Shutov, A. I. Svirikhin, A. Lopez-Martens, K. Hauschild, Ch. Briancon, A. Korichi, D. Curien, O. Dorvaux, B. Gall, F. Khalfallah, M. Rousseau, N. Rowley, M. Guttormsen, S. Siem, A.-C. Sunde, N. Syed, F. Hanappe, A. Minkova, Š. Šáro, M. Venhart, and Ch. Theisen  
**Gamma and electron spectroscopy of heavy nuclei at FLNR JINR**  
AIP Conf. Proc. **912** (2007) 119

# Referencie

- [Bas06] J. E. Bastin *et al.*, Phys. Rev. C **73** 024308 (2006)
- [Eec05] S. Eeckhaudt *et al.*, Eur. Phys. J. A **25** (2005) 605
- [Fir96] R. B. Firestone, V. S. Shirley, C. M. Baglin, S. Y. F. Chu and J. Zipkin, *Table of Isotopes* 8<sup>th</sup> ed. Vol. II, John Wiley and Sons, Inc., New York (1996)
- [Fle67] G. N. Flerov *et al.*, Nucl. Phys. A **102** (1967) 443
- [Gag89] H. W. Gäggeler *et al.*, Nucl. Phys. A **502** (1989) 561
- [Ghi73] A. Ghiorso, K. Eskola, P. Eskola, M. Nurmia, Phys. Rev. C **7** (1973) 2032
- [Gre05] P. T. Greenlees, private communication (2005)
- [Gre07] P. T. Greenlees, R.-D. Herzberg, S. Ketelhut *et al.*, submitted to PRL (2007)
- [Hei95] P. Heikkinen and E. Liukkonen, 14<sup>th</sup> International Conference on Cyclotrons and Their Applications, Cape Town (1995)
- [Her02] R.-D. Herzberg *et al.*, Eur. Phys. J. A **15** (2002) 205
- [Her06] R.-D. Herzberg, P. T. Greenlees, P. A. Butler, G. D. Jones, M. Venhart *et al.*, Nature (London) **442** (2006) 896
- [Hes05] F. P. Heßberger, S. Antalic, B. Štreicher, S. Hofmann *et al.*, Eur.Phys.J. A **26** (2005) 233
- [Hes06] F. P. Heßberger, S. Hofmann *et al.*, Eur. Phys. J. A **29** (2006) 165
- [Cha07] A. Chatillon, C. Theisen *et al.*, Phys. Rev. Lett. **98** (2007) 132503
- [Jon02] G. D. Jones, Nucl. Instr. and Meth. A **488** (2002) 471
- [Lei95] M. Leino *et al.*, Nucl. Instr. and Meth. B **99** (1995) 653
- [Lep06] A.-P. Leppänen, J. Uusitalo, P. T. Greenlees, R.-D. Herzberg *et al.*, Eur. Phys. J. A **28** (2006) 301
- [Loe68] K. E. G. Löbner, Phys. Lett. B **26** (1968) 42
- [Pag03] R. D. Page *et al.*, Nucl. Instr. and Meth. B **204** (2003) 634
- [Sul07] B. Sulignano *et al.*, Eur. Phys. J. A **33** (2007) 327

[Tan06] S. K. Tandel, T. L. Khoo *et al.*, Phys. Rev. Lett **97** (2006) 082502

[Wal99] P. M. Walker and G. D. Dracoulis, Nature (London) **399** (1999) 35