



**UNIVERSITATEA "POLITEHNICA" din BUCUREȘTI  
FACULTATEA DE ȘTIINȚE APLICATE**

Nr. Decizie \_\_\_\_\_ din \_\_\_\_\_

# **TEZĂ DE DOCTORAT**

**Collective properties of rare-earth nuclei:  
Lifetime measurements using recoil distance  
Doppler shift technique**

(Proprietăți colective ale nucleelor pământurilor rare: măsurări de timp de viață utilizând tehnica deplasării Doppler)

Doctorand: Ing. Fiz. **Turturică Andrei Emanuel**

**COMISIA DE DOCTORAT**

Președinte	Prof. Dr. Cristina STAN	de la	Univ. Politehnica București
Conducător de doctorat	Prof. Dr. Gheorghe CĂTA-DANIL	de la	Univ. Politehnica București
Referent	Prof. Dr. Mircea-Iacob GIURGIU	de la	Univ. Tehnică de Construcții București
Referent	CS I Dr. Nicolae Marius MĂRGINEAN	de la	INCD Fizică și Inginerie Nucleară „Horia Hulubei”
Referent	CS II Dr. Constantin MIHAI	de la	INCD Fizică și Inginerie Nucleară „Horia Hulubei”

**BUCUREȘTI 2021**

---

# Contents

<b>1</b>	<b>Introducere</b>	<b>4</b>
<b>2</b>	<b>Modele teoretice</b>	<b>5</b>
2.1	Modelul în pături . . . . .	6
2.2	Colectivitatea . . . . .	7
2.3	Modelul bazat pe Hamiltonianul colectiv în cinci dimensiuni - 5DCH . . . . .	8
<b>3</b>	<b>Măsurători de timp de viață la acceleratorul Tandem de 9MV</b>	<b>9</b>
3.1	Introducere . . . . .	9
3.2	Acceleratorul Tandem de 9 MV . . . . .	9
3.3	Spectrometrul Rosphere . . . . .	10
3.4	Metoda distanței de recul . . . . .	11
<b>4</b>	<b>Investigarea structurii a <math>^{136}\text{Nd}</math></b>	<b>14</b>
4.1	Aranjamentul experimental . . . . .	14
4.2	Rezultate . . . . .	16
4.3	Interpretarea rezultatelor . . . . .	17
<b>5</b>	<b>Investigarea structurii a <math>^{154}\text{Er}</math></b>	<b>18</b>
5.1	Introducere . . . . .	18
5.2	Aranjamentul experimental . . . . .	18
5.3	Rezultate . . . . .	20
5.4	măsurători de corelatii unghiulare . . . . .	21
5.5	Interpretarea rezultatelor . . . . .	22

## List of Figures

1	Schema de nivele propusa de modelul in paturi care evidentiaza paturile corespunzatoare numerelor magice 2, 8, 20, 28, 50, 82, 126 și 184. Figura preluata din [1]. . . . .	6
2	Faimosul triunghi Casten ce evidentiază limitele idealizate ale modelului colectiv precum și valorile $R_{4/2}$ specifice fiecărei limite. Figură preluată din [2]. . . . .	7
3	Spectrometrul ROSPHERE în configurația de 25 detectori de germaniu	11
4	Figură schematică cu principiul de funcționare a metodei distanței de recul. Figură preluată din [3]. . . . .	12
5	Camera de reacție plunger construită după modelul Koln. Figură preluată din [4]. . . . .	13
6	Schemă de nivele parțială ce evidențiază nivelele de interes în analiza $^{136}\text{Nd}$ . Intensitatea tranzițiilor sunt cele observate experimental. Timpii de viață prezentați sunt măsurati folosind metoda distanței de recul. . .	15
7	Timpii de viață medii pentru nivelele $2_1^+$ , $4_1^+$ , $7_1^-$ , $9_1^-$ pentru fiecare distanță măsurată în direcția înainte ( $37^\circ$ ) și nivelul $14_1^+$ măsurat în direcția înapoi ( $143^\circ$ ). Liniile orizontale reprezintă media ponderată a acestor valori și eroarea corespunzătoare (a). Valori normate ale componenteii shiftate (black circles) și neshiftate (red squares) pentru tranzițiile $2_1^+ \rightarrow 0^+$ , $4_1^+ \rightarrow 2_1^+$ , $7_1^- \rightarrow 6_1^+$ , $9_1^- \rightarrow 7_1^-$ măsurate în direcția înainte și tranziția $14_1^+ \rightarrow 12_1^+$ măsurată în direcția înapoi. (b) . . . . .	16
8	Sistematica probabilităților reduse de tranziție pentru izotopii neutrono deficitari ai neodimiului comparate cu predicțiile modelului 5DCH. Figură preluată din [5]. . . . .	17
9	Schema de nivele parțială a $^{154}\text{Er}$ care evidențiază nivelele de interes pentru această analiză construită pe baza tranzițiilor observate experimental. . . . .	19
10	Timpul mediu de viață al nivelelor $2_1^+$ , $4_1^+$ , $6_1^+$ , $8_1^+$ , și $10_1^+$ măsurate în direcția înainte ( $37^\circ$ ). Liniile orizontale reprezintă media ponderată a acestor valori și eroarea corespunzătoare (a). Valorile normate ale componenteii shiftate (black circles) și neshiftate (red squares) pentru tranzițiile $2_1^+ \rightarrow 0^+$ , $4_1^+ \rightarrow 2_1^+$ , $6_1^+ \rightarrow 4_1^+$ , $8_1^+ \rightarrow 6_1^+$ , and $10_1^+ \rightarrow 8_1^+$ măsurate în direcția înainte (b). . . . .	20
11	Schema de nivele parțială a $^{154}\text{Er}$ care evidențiază nivelele nou identificate și tranzițiile compatibile cu schema de nivele cunoscută. . . . .	21

12	Măsurătorile de corelații unghiulare obținute pentru $^{154}\text{Er}$ . Panoul de jos arata fit-ul pentru cascada cunoscută $4_1^+ \rightarrow 2_1^+ \rightarrow 0_1^+$ care evidențiază posibilele erori. Panoul de sus arată fit-ul pentru cascada nou identificată $2_2^+ \rightarrow 2_1^+ \rightarrow 0_1^+$ . . . . .	22
13	Probabilitățile reduse de tranziție B(E2) calculate folosind modelul IBA-1 comparate cu valorile măsurate experimental. . . . .	23

## List of Tables

1	Unghiurile fiecărui detector în spectrometrul ROSPHERE precum și distanțele față de centru a detectorilor de germaniu [6]. . . . .	10
2	Timpii de viață măsurati în această analiză. Probabilitățile reduse de tranziție calculate alături de valorile cunoscute anterior experimentului. . . . .	17
3	Timpii de viață măsurati în această teză alături de probabilitățile de tranziție calculate. . . . .	21

# 1 Introducere

Elementele pământurilor rare sunt o serie de 15 elemente chimice metalice cu numere atomice cuprinse între 57 și 71, numite și lantanide, plus alte două elemente, scandiu și andriu cu numerele atomice 21 și, respectiv, 39. Aceste elemente au proprietăți chimice unice și sunt utilizate în multe domenii ale tehnologiei și științei. Din punct de vedere nuclear, nucleele pământurilor rare prezintă, de asemenea, fenomene interesante, cum ar fi prezența izomerilor k, apariția structurilor super-deformate sau coexistența de forma. De asemenea, pământurile rare prezintă o serie de proprietăți ce sunt utilizate în mai multe ramuri ale tehnologiei nucleare. De exemplu, gadoliniu este utilizat ca agent de contrast RMN, prometiul este utilizat în bateriile nucleare, iterbiu este utilizat în medicina nucleară și așa mai departe. Toate aceste proprietăți necesită studii specifice efectuate în laboratoarele nucleare pentru a aduce noi informații care contribuie la testarea modelelor dezvoltate de colegii noștri din fizică teoretică sau pentru a găsi noi utilizări în tehnologiile nucleare. Această teză are ca scop studiul comportamentului colectiv pentru două nuclee neutrone deficitare din categoria pământuri rare,  $^{136}\text{Nd}$  și  $^{154}\text{Er}$ , prin măsurarea duratei de viață a stărilor nucleare excitate. Măsurătorile au fost efectuate folosind tehnici de spectroscopie nucleară și sisteme de detecție, dispozitive mecanice și electronice de ultimă generație, disponibile la Institutul Național de Fizică și Inginerie Nucleară - Horia Hulubei din București-Măgurele (IFIN-HH). Teza este structurată în șase capitole, două constând în conținut original despre izotopii  $^{136}\text{Nd}$  și  $^{154}\text{Er}$ , două constând în informații complementare pentru capitolele originale la care se adaugă introducerea și concluziile. Capitolul doi este dedicat explicării în mod sumar a modelelor colective ce descriu izotopii studiați în acesta teza. Fiecare dintre cele trei limite, vibrator, rotor și  $\gamma$ -soft sunt evidențiate. De asemenea, în finalul capitolului, este descris modelul bazat pe un hamiltonian colectiv în cinci dimensiuni, deoarece este folosit pentru interpretarea izotopului  $^{136}\text{Nd}$ . În capitolul 3, încep prin a descrie sistemul de detecție de ultimă generație numit ROSPHERE și detectorii utilizați pentru măsurarea fotonilor și particulelor încărcate produse în reacțiile nucleare ce folosesc fascicule de ioni stabili livrate de acceleratorul TANDEM 9MV. În continuare, prezint tehnicile utilizate de grupul de spectroscopie nucleară în IFIN-HH pentru a măsura timpii de viață sub-nanosecundă, cu o descriere comprehensivă a metodei distanței de recul (RDDS). În capitolul 4 accentul este plasat asupra conținutului original al acestei teze. Timpii de viață ale stărilor nucleare excitate din  $^{136}\text{Nd}$  au fost măsurate folosind metoda RDDS. Această măsurătoare este interesantă, deoarece a necesitat încă două metode alături de tehnica RDDS pentru a obține și a confirma șapte timpii de viață nucleari. Rezultatele experimentale sunt interpretate folosind modelul hamiltonian colectiv în cinci dimensiuni. Capitolul 5 este dedicat măsurării timpului de viață nuclear a stărilor excitate în  $^{154}\text{Er}$ . În acest caz, am măsurat cinci stări, iar rezultatele au fost interpretate folosind modelul IBA-1. Mai mult, am încercat să identific a doua

stare  $I^\pi = 2^+$  care este inceputul benzii  $\gamma$  și prima stare  $I^\pi = 3^-$ , folosind măsurători de corelații unghiulare. În final, în capitolul șase am enumerat concluziile generale ale acestei teze.

## 2 Modele teoretice

Până când o teorie explică toate fenomenele unui sistem fizic, există de obicei mai multe iterații care încearcă să descrie proprietățile fizice ale sistemului menționat cât mai corect posibil. Aceste modele în general impun unele ipoteze simplificatoare care conduc la rezultate satisfăcătoare. Totuși, odată ce ne îndepărtăm de acele prezumții inițiale, obținem rezultate care diferă semnificativ de observațiile experimentale. Această abordare nu este complet fără scop, deoarece relevă unele argumente pro și contra pentru ipotezele inițiale care va conduce la o înțelegere mai bună pentru viitor. Primul model teoretic care a explicat unele proprietăți observate experimental în nucleee a fost un model colectiv, modelul picătură de lichid. Cel mai bun rezultat al acestui model este formula semi-empirică pentru obținerea energiei de legatură a nucleelor. Ca bază a acestui model, au existat mai multe ipoteze: mai întâi, raza nucleului a fost aproximată la  $R = r_0 A^{(1/3)}$ , masa nucleelor era considerată incompresibilă și sferică în formă. În al doilea rând, energia de legatură medie pe nucleon pentru nucleeele cu  $A < 30$  crește rapid la 8.8 MeV pentru  $A = 60$ , cu maxime corepunzatoare nucleelor cu masa 4, 8, 20, 50 și apoi scade încet. De asemenea, nucleeele cu un anumit număr de nucleoni: 4, 8, 20, 50, 82, 126, acum cunoscute sub numele de numere magice, au maxime locale în energie. În al treilea rând, energia de legatură este sistematic mai mare pentru nucleeele pare decât impar-impar sau par-impar, care sugerează tendința de împerechere a nucleonilor identici. Aplicațiile acestui model au fost limitate, deci un nou model cu o abordare complet diferită a devenit reperul fizicii nucleare. Modelul în pături nuclear s-a inspirat din modelul atomic în pături la care s-au adăugat câteva modificări minore. A devenit rapid cel mai puternic instrument de predicție, dar a utilitatea a fost limitată în principal pentru nucleeele din apropierea păturilor închise. Pentru nucleeele dintre pături, numărul posibil de configurații poate fi atât de mare încât face calculele practic imposibile. Faimosul fizician Talmi a spus că ”în cazul  $^{154}\text{Sm}$  sunt în jur de  $3 \times 10^{14}$  stări cu spin și paritate  $I^\pi = 2^+$  care pot fi construite cu protonii și neutronii din păturile  $Z = 50 - 82$  și  $N = 82 - 126$ ”. În mod clar, fizica nucleară avea nevoie de ceva nou, și astfel a fost dezvoltat modelul colectiv al lui Bohr și Mottelson.

## 2.1 Modelul în pături

În modelul atomic în pături, energia de ionizare ca funcție de numărul de electroni are un tipar specific cu maxime la anumite numere intitulate numere magice la 2, 10, 18, 36, 54, 86. Analog în fizica nucleară energia de excitație în funcție de numărul atomic  $Z$  prezintă un tipar cu maxime de stabilitate regională la 2, 8, 20, 28, 50, 82 și 126 [7]. Această similitudine a inoculat ideea unui nucleu format din pături închise de protoni și neutroni care exercită un potențial, de obicei un potențial oscilator armonic modificat sau o groapa de potențial modificat. Nucleonii care se află în afara păturilor închise se mișcă liber în acest potențial central și determina proprietățile nucleului.

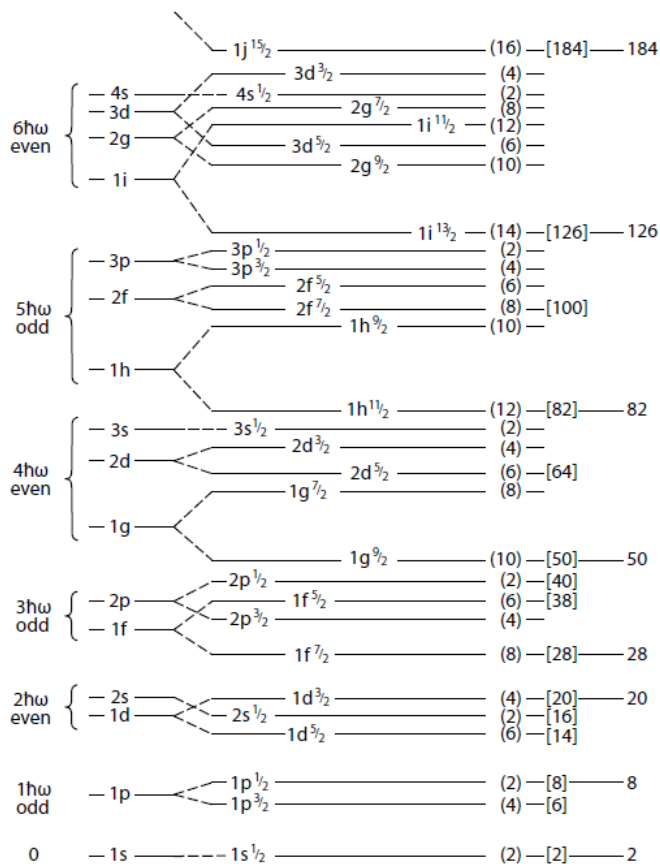


Figure 1: Schema de nivele propusă de modelul în pături care evidențiază păturile corespunzătoare numerelor magice 2, 8, 20, 28, 50, 82, 126 și 184. Figură preluată din [1].

## 2.2 Colectivitatea

Termenul de colectivitate provine din ipoteza că nucleonii se mișcă coerent și colectiv în interiorul nucleului atomic. Inițial, teoreticienii au propus aceste fenomene deoarece credeau că suprafața nucleară descrisă de modelul picăturii de lichid ar putea vibra, schimbându-și ușor forma sferică. Una din ipotezele fundamentale ale modelului în pături constă în faptul că miezul este format din pături închise inerte. Această ipoteză nu este pe deplin corectă deoarece există forțe de polarizare între nucleonii de valență și cei din păturile închise și forțe de împerechere între nucleoni din păturile închise. Forța de împerechere conferă nucleului o formă sferică, în timp ce forțele de polarizare tind a deforma nucleul. Echilibrul dintre aceste forțe determina forma nucleului. Acest fenomen este motivul pentru care toate nucleele din apropierea păturilor închise sunt sferice. Pe măsura ce adăugăm mai mulți nucleoni, obținem structuri care sunt mai predispuse la deformare. În cele din urmă, ajungem la o regiune, de obicei atunci când numărul de nucleoni este jumătate din cei necesari pentru închiderea păturii, unde nucleul este deformat permanent în starea fundamentală. De obicei, se definesc trei limite în modelul colectiv pentru a descrie diferitele mișcări ale materiei nucleare. Acestea sunt limite idealizate pe care rareori le întâlnim în realitate, dar nucleele se află între aceste limite și sunt perfect exemplificate de faimosul Triunghiul Casten din Fig. 2.

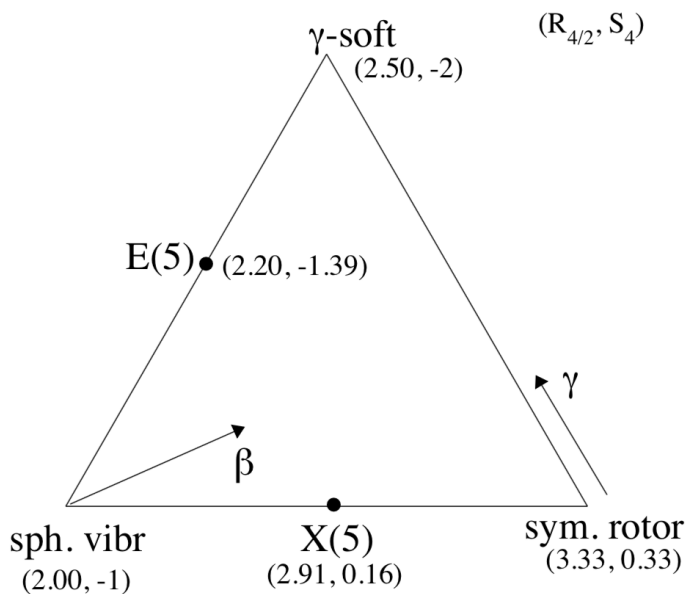


Figure 2: Faimosul triunghi Casten ce evidențiază limitele idealizate ale modelului colectiv precum și valorile  $R_{4/2}$  specifice fiecărei limite. Figură preluată din [2].



## 2.3 Modelul bazat pe Hamiltonianul colectiv în cinci dimensiuni - 5DCH

Rezultatele experimentale obținute în această teză au fost interpretate din punct de vedere teoretic folosind calcule de ameste de configuratie [8] bazate pe teoria Hartree-Fock-Bogoliubov implementată folosind forța D1S Gogny [9, 10]. Metoda Hartree-Fock este o tehnică de calcul utilizată pentru a determina funcțiile de undă și energiile unui sistem cuantic staționar. Această metodă este utilizat pe scară largă pentru a obține soluții ale ecuației Schrodinger în cazul atomilor, moleculelor, nano-structurile și alături de transformarea Bogoliubov a cunoscut o creștere în utilizare în fizica nucleară. Energia de împerechere a nucleonilor în cazul elementelor grele este una dintre aplicațiile în care metoda Hartree-Fock-Bogoliubov este utilizată cu mare succes. Metoda Hartree-Fock afirmă că funcția de undă a sistemului poate să fie aproximata folosind un determinant Slater dacă sistemul este compus din fermioni sau de permanent cu N-orbitali dacă sistemul este format din bosoni. Metoda a fost dezvoltată în jurul anului 1930, dar a fost utilizata sporadic până în 1950 din cauza cerințele sale de calcul care nu au putut fi satisfăcute de tehnologia computacionala disponibilă. Forța Gogny D1S este postulată a fi [9]:

$$\begin{aligned}
 V(r) = & \sum_{i=1,2} (W + BP_{\sigma} - HP_{\tau} - MP_{\sigma}P_{\tau})_i e^{-r^2/\mu_i^2} \\
 & + t_0(1 + x_o P_{\sigma}) \rho^{\alpha} \left( \frac{r_1 + r_2}{2} \right) \delta(r_1 - r_2) \\
 & + i(W_{LS}(\sigma_1 + \sigma_2) \overleftarrow{\nabla}_1 - \nabla_2 \delta(r_1 - r_2) \overrightarrow{\nabla}_1 - \nabla_2)
 \end{aligned} \tag{1}$$

Hamiltonianul final este de forma [8]:

$$\hat{H}_{coll} = \frac{1}{2} \sum_{k=1}^3 \frac{\hat{J}_k^2}{J_k} - \frac{1}{2} \sum_{m,n=0 \text{ and } 2} D^{-1/2} \frac{\partial}{\partial a_m} D^{1/2} (B_{mn})^{-1} \times \frac{\partial}{\partial a_n} + V(a_0, a_2) - \Delta V(a_0, a_2), \tag{2}$$

unde  $a_0 = \beta \cos \gamma$  și  $a_2 = \beta \sin \gamma$ , iar D este metrica. Vectorii și valorile proprii sunt obținute folosind ecuația următoare [8]:

$$\hat{H}_{coll} |JM\rangle = E(J) |JM\rangle \tag{3}$$

Vectorii proprii orto-normați  $|JM\rangle$  cu momentul cinetic J și proiecția M sunt dezvoltate astfel [8]:

$$|JM\rangle = \sum_K g_K^J(a_0, a_2) |JMK\rangle, \tag{4}$$

unde  $|JMK\rangle$  este o superpozitie a matricilor de rotatie Wigner.

## 3 Măsurători de timp de viață la acceleratorul Tandem de 9MV

### 3.1 Introducere

Domeniul fizicii nucleare este unul dintre cele mai provocatoare domenii ale fizicii datorită dificultăților sale în observarea mișcării, interacției etc. a nucleonilor din interiorul nucleului. Ca rezultat, relația dintre forța nucleară tare și forța Coulomb nu este pe deplin înțeleasă. Prin urmare, ne lipsesc informații esențiale pentru a descrie fără echivoc ce se întâmplă în interiorul nucleului. Spectroscopia nucleară este o ramură a fizicii nucleare care încearcă să obțină informații sensibile despre structura nucleară prin măsurarea nucleelor excitate. În special, accentul se pune pe măsurarea timpilor de viață a stărilor nucleare. Măsurătorile de timp de viață ale stărilor nucleare excitate sunt esențiale în studierea structurii nucleare datorită conexiunii puternice dintre elementele cu matrice redusă, calculate folosind timpii de viață măsurati și funcțiile de undă ale stărilor nucleare. Având în vedere că valorile timpilor de viață variază de la attosecond la miliarde de ani, cercetătorii au dezvoltat mai multe metode de măsurare a acestor valori, fiecare preferabil pentru un interval de timp specific, și unele dintre ele extinzându-se pe mai multe ordine de mărime. Nucleele pe care le studiez au o durată de viață de ordinul picosecundelor sau mai jos, deci mai multe metode sunt potrivite pentru această regiune. Cea mai bună metodă este metoda distanței de recul (RDDS), care, având în vedere echipamentele laboratorului din IFIN-HH, București, este potrivită pentru a măsura timpi de viață de la o picosecundă la o nanosecundă. O alta metoda utilizată este Metoda Doppler Shift Attenuation, care poate măsura timpi de la o femtosecundă la o picosecundă. În cele din urmă, Metoda fast-timing este potrivită pentru măsurarea timpilor de viață de la câteva zeci de picosecunde la nanosecunde și chiar microsecunde în funcție de rezoluția temporală a detectoarelor. Acest capitol va descrie metodele folosite în laboratorul din IFIN-HH pentru a măsura timpi de viață cu un accent special pe metoda distanței de recul utilizată pentru măsurarea stărilor nucleare excitate în  $^{136}\text{Nd}$  și  $^{154}\text{Er}$ . Voi descrie, de asemenea, setup-ul experimental utilizat de laboratorul IFIN-HH pentru a detecta fotonii gama emisi de nucleele excitate.

### 3.2 Acceleratorul Tandem de 9 MV

Acceleratorul tandem FN Pelletron de 9 MV a fost construit de High Voltage Engineering Corporation (HVEC) în 1973 și are acum o tensiune terminală de 9 MV. Acceleratorul a suferit actualizări majore începând cu 2006. Cureaua de încărcare a fost înlocuită cu o un sistem Pelletron mai fiabil, au fost instalate noi surse de ioni, iar sistemul de vid și sistemele de alimentare cu energie electrică au fost modernizate.

Acest accelerator folosește un terminal central de înaltă tensiune pentru a accelera ioni negativi extrasi din sursele de ioni. Odata ce ionii negativi ajung la terminalul central, sunt folosite folii de carbon pentru extragerea electronilor astfel că ionii devin pozitivi și apoi accelerați departe de terminal. Acceleratorul este echipat cu o sursă de ioni sputtering și una duo-plasmatron cu schimb de sarcină Li / Na pentru extragerea ionilor negativi. În teorie, se pot accelera toate tipurile de ioni, dar cei mai utilizați sunt  ${}^4\text{He}$ ,  ${}^7\text{Li}$ ,  ${}^{12}\text{C}$ ,  ${}^{13}\text{C}$ ,  ${}^{16}\text{O}$  și  ${}^{18}\text{O}$ .

### 3.3 Spectrometrul Rosphere

Datele experimentale din  ${}^{136}\text{Nd}$  și  ${}^{154}\text{Er}$  prezentate în această teză au fost obținute folosind spectrometrul ROSPHERE [6]. În această secțiune, voi descrie configurația sistemului de detecție. Spectrometrul are 25 de poziții distribuite în mod egal pe 5 inele așa cum este descris în Tabelul 1.

Ring no.	$\theta$ (degrees)	$\phi$ (degrees)	Distance Ortec (mm)	Distance Canberra (mm)
1	37	0, 72, 144, 216 and 288	179	210
2	70	36, 108, 180, 252 and 324	186	217
3	90	0, 72, 144, 216 and 288	176	208
4	110	36, 108, 180, 252 and 324	186	217
5	143	0, 72, 144, 216 and 288	179	210

Table 1: Unghiurile fiecărui detector în spectrometrul ROSPHERE precum și distanțele față de centru a detectorilor de germaniu [6].

Există patru tipuri de detectori utilizați în setup:

- Detectorii de Germaniu hiper pur echipați cu scuturi anti-Compton BGO, folosiți pentru detectarea cu rezoluție energetică bună a fotonilor gama (25 detectori)
- Detectori scintilatori de  $\text{La}(\text{Br}_3)\text{Ce}$ , folosiți pentru detectarea fotonilor gama cu rezoluție temporală foarte bună (10 detectori)
- Detectori scintilatori lichizi, folosiți pentru detectarea neutronilor (5 detectori)
- Celule solare, folosite pentru detectarea particulelor încărcate (Sorcerer setup [7])

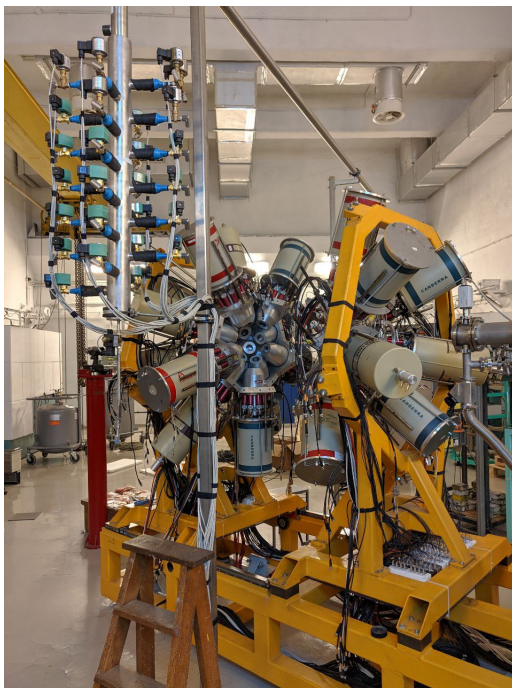


Figure 3: Spectrometrul ROSPHERE în configurația de 25 detectori de germaniu.

### 3.4 Metoda distanței de recul

Fizicienii folosesc cu succes această metodă de mult timp și a fost îmbunătățit constant pentru a se potrivi cu cerințele noilor sisteme de detecție. Aceasta este cea mai de încredere metodă pentru măsurarea timpilor de viață care variază de la o picosecundă la o nanosecundă. Necesită camere de reacție extrem de sofisticate care manipulează distanțele țintă-stopant cu o precizie mai mică de un micrometru folosind sisteme piezoelectrice, necesită echipamente ce pot măsura aceste distanțe cu precizie și trebuie să mențină un vid ridicat în interiorul camerei. Aceste specificații mecanice extrem de ridicate reprezintă una dintre dezavantajele semnificative ale acestei metode. În Figura 4 este reprezentată o schemă simplificată a metodei distanței de recul. Modul de funcționare este următorul: nucleul de interes este produs de un fascicul de ioni incident pe o țintă subțire. Nucleele nou produse părăsesc ținta cu viteze de aproximativ 1% din viteza luminii. Din acest motiv, ținta trebuie să fie suficient de subțire pentru a permite ieșirea nucleelor de recul din ea și în același timp, trebuie să fie suficient de rigidă pentru a-și menține planaritatea. Stopantul are rolul de a opri nucleele de recul pe care dorim să le măsurăm și a lăsa fasciculul să treacă cu interacțiune minimă.

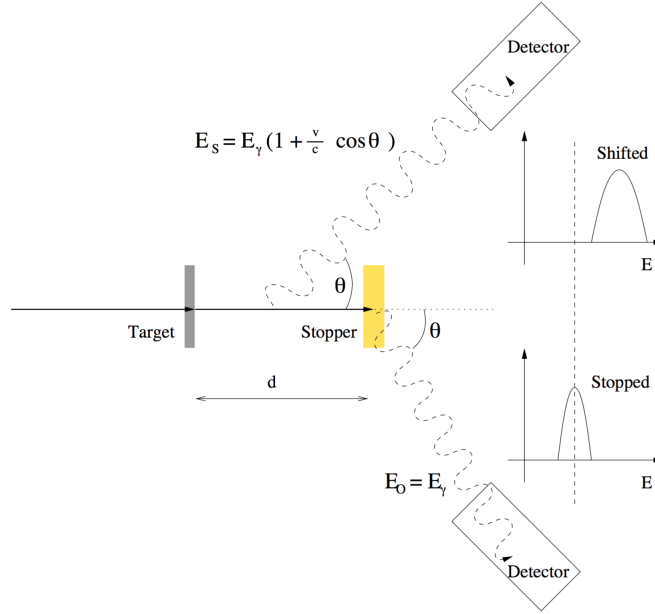


Figure 4: Figură schematică cu principiul de funcționare a metodei distanței de recul. Figură preluată din [3].

**DDCM pentru măsurători în coincidență** Deoarece DDCM aplicat măsurătorilor de coincidență rezolvă mai multe probleme, este firesc ca această versiune să fie folosită, cu mare succes, în laboratorul IFIN-HH. În acest caz, folosim o poartă pentru a selecta cascada de dezintegrare care ne interesează. În acest fel, eliminăm toate celelalte moduri de populare a stărilor excitate, deci nu trebuie să ne facem griji cu privire la tranzițiile neidentificate care ne-ar putea alimenta nivelul de interes. În același timp, prin această condiționare, curățăm spectrele de tranziții nedorite. Pentru a descrie matematic acest lucru, pornim de la ecuația ratei pentru nivelul  $i$ , dar numai cu o tranziție care alimentează nivelul și una care îl depopulează, cunoscută și sub numele de condiționare directă [4]:

$$\frac{d}{dt}n_i(t) = -\lambda_i n_i(t) + \lambda_h n_h(t) \quad (5)$$

rezolvând această ecuație obținem [2]:

$$\tau(x) = \frac{I_{AU}^{BS}(x)}{v \frac{d}{dx} I_{AS}^{BS}(x)}, \quad (6)$$

unde  $I_{AU}^{BS}$  reprezintă intensitatea componentei ne-shiftate a tranziției care depopulează nivelul, condiționată de componenta shiftată a tranziției care alimentează

nivelul. În unele cazuri, cum ar fi atunci când o tranziție în același nucleu se suprapune în energie cu tranzițiile pe care le folosim în porțile directe, trebuie să folosim o poartă indirectă pentru a elimina acest contaminant. Astfel că vom condiționa pe tranziția care populează nivelul superior și trebuie să ținem cont de durata de viață a acestui nivel, deci formula de viață devine [2]:

$$\tau(x) = \frac{I_{AU}^{CS}(x) - \alpha I_{BU}^{CS}(x)}{v \frac{d}{dx} I_{AS}^{CS}(x)}, \quad (7)$$

cu:

$$\alpha = \frac{I_{AU}^{CS}(x) + I_{AS}^{CS}(x)}{I_{BU}^{CS}(x) + I_{BS}^{CS}(x)}. \quad (8)$$

**Camera de reacție Plunger** Una dintre camerele de reacție utilizate pe scară largă este cea proiectată de Departamentul de Fizică Nucleară al Universității din Köln și reprezentată în Figura 5. Acest dispozitiv se numește plunger datorită formei sale și este compus din patru parti: camera de reacție, sistemul de rulmenti, sistemul de ationare, și sistemul de montare.

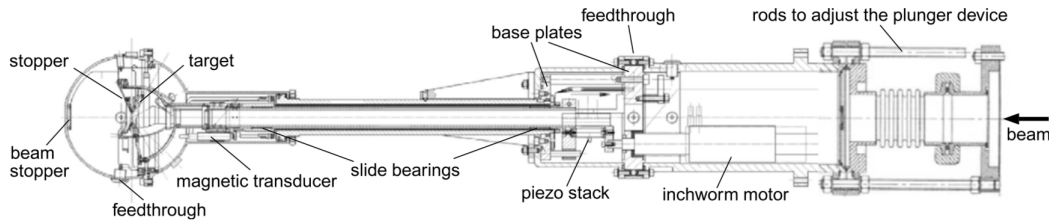


Figure 5: Camera de reacție plunger construită după modelul Koln. Figură preluată din [4].

Camera de reacție constă dintr-un suport rigid pe care este așezat stopperul și un suport mobil pe care ținta este fixată. Sistemul de rulmenti este formată din trei tuburi concentrice, un tub exterior ce asigura vidul camerei, un tub mijlociu care este fixat pe tubul exterior cu rolul de a susține tubul interior ținut de câte doi rulmenți la fiecare capăt. Sistemul de actionare constă dintr-un motor piezoelectric numit inchworm, conectat la tubul interior care controlează miscarea liniară a suportului de țintă prin efectuarea de ajustări grosiere și un alt cristal piezo, mai sensibil, pentru ajustări fine.

## 4 Investigarea structurii a $^{136}\text{Nd}$

Ca parte a acestei teze de doctorat, care are ca scop studierea colectivității în nucleele cu masă medie, am propus un experiment pentru măsurarea timpului de viață pentru stările de energie mică din banda Yrast în  $^{136}\text{Nd}$ . Este bine cunoscut că regiunea care conține  $^{136}\text{Nd}$  are un grad ridicat de asimetrie axială și alături de regiunea centrată pe  $^{108}\text{Ru}$  prezintă cele mai mari abateri de la simetria axială [12]. Cercetătorii le-au studiat intens, iar majoritatea izotopilor au un comportament colectiv bine documentat. Acesta nu este cazul pentru  $^{136}\text{Nd}$ , deoarece lipsesc informațiile experimentale. Înaintea acestui experiment erau cunoscuți doar timpii de viață pentru  $I^\pi = 7^-$  și  $I^\pi = 9^-$  în banda de paritate negativă și mai multe limite superioare pentru stările  $I^\pi = 4^+$  și  $I^\pi = 6^+$  din banda Yrast [13]. Recent, un experiment de excitare Coulombiană a măsurat probabilitatea redusă de tranziție (B(E2)) a primei stări  $I^\pi = 2^+$  în  $^{136}\text{Nd}$  [14], iar acestea sunt aproape toate informațiile experimentale disponibile pentru acest izotop. În acest context, grupul de spectroscopie nucleară al Institutului Național de Fizică și Inginerie Nucleară (IFIN-HH) a propus un experiment la acceleratorul tandem 9MV din București-Măgurele. Obiectivele experimentului au fost măsurarea stărilor de energie joasă din banda Yrast în  $^{136}\text{Nd}$  până la starea  $I^\pi = 10^+$  și orice altă stare non-Yrast posibilă cu durata de viață în intervalul metodei distanței de recul (RDDS) [4]. Cunoscând sistematica vecinilor  $^{136}\text{Nd}$ , ne așteptăm ca timpii de interes să fie sub 50 ps. De asemenea, folosind B(E2) obținut de T.R. Saito, am calculat timpul de viață pentru starea  $I^\pi = 2^+$  a fi de 34(5) ps, care se încadrează în intervalul pentru metoda RDDS care folosește efectul Doppler pentru a măsura timpi de viață între o picosecunda și o nanosecunda. Aceste valori vor ajuta la completarea imaginii despre tranziția izotopilor Nd de la forma prolate (N=70) la forma sferică (N=80). Grupul nostru a colaborat cu grupul de teoreticieni ai lui J.P. Delaroche pentru nucleul  $^{138}\text{Nd}$ , măsurat cu un an mai devreme la acceleratorul tandem de 9 MV. Pentru acest proiect, au furnizat calcule de amestec a configurațiilor [8] pe baza calculelor Hartree-Fock-Bogoliubov (CHFb) implementate folosind forța D1S Gogny [9, 10] și au obținut valori pentru mai multe observabile folosind hamiltonienul colectiv cinci-dimensional (5DCH) care se rezolvă așa cum este descris în [15]. Având în vedere succesul acestei colaborări, au fost de acord să ofere o interpretare teoretică pentru proiectele viitoare, iar  $^{136}\text{Nd}$  este un caz bun, deoarece este interesant pentru ambele grupuri.

### 4.1 Aranjamentul experimental

Măsurătorile de timp de viață în  $^{136}\text{Nd}$  au fost efectuate la Acceleratorul Tandem de 9 MV al Institutului de Fizică și Inginerie Nucleară Horia Hulubei din București - Măgurele. Nucleele de  $^{136}\text{Nd}$  au fost create în reacția de fuziune-evaporare  $^{124}\text{Te}(^{16}\text{O},4n)$  folosind o țintă produsă de laboratorul de ținte din IFIN-HH [16], de  $^{124}\text{Te}$

cu  $0,37 \text{ mg/cm}^2$  grosime, depusă pe un substrat de Aur cu grosimea de  $3,2 \text{ mg/cm}^2$ . Am folosit codurile CASCADE [17] și Compa [18] pentru a obține secțiunea de interacție pentru  $^{136}\text{Nd}$  corespunzătoare canalului  $4n$ . Secțiunea de interacție este de  $250 \text{ mb}$  obținută la o energie a fasciculului de  $75 \text{ MeV}$  și, din acest motiv, a fost utilizat  $^{16}\text{O}$  accelerat la  $78 \text{ MeV}$  pentru a compensa pierderile de energie în substratul de aur orientat spre fascicul. Nucleele de recul au avut o viteză de  $3,02 \mu\text{m/ps}$  ( $v/c = 1.01\%$ ) și au fost oprite folosind o folie de aur de  $5 \text{ mg/cm}^2$  grosime [5]. S-au efectuat măsurători în coincidență  $\gamma - \gamma$  pentru a curăța spectrele de tranzițiile gama nedorite rezultate din alte canale de reacție și excitația Coulombiana a foilor de aur. Camera de reacție folosită este dispozitivul Plunger pentru capacitatea sa de a regla distanța stopper-tintă cu precizie ridicată. Pentru detectarea fotonilor  $\gamma$ , am folosit sistemul de detecție ROSPHERE[6] din care am folosit două inele, fiecare cuprinzând cinci detectori HPGe la  $37^\circ$  și  $143^\circ$  în raport cu direcția fasciculului. Am măsurat la 15 distanțe țintă-stopant în intervalul  $10 - 280 \mu\text{m}$  [5].

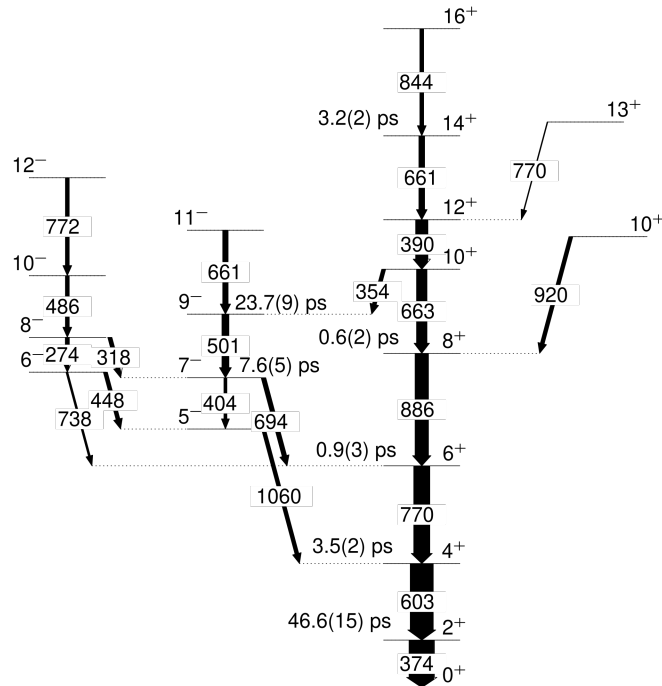


Figure 6: Schemă de nivele parțială ce evidențiază nivelele de interes în analiza  $^{136}\text{Nd}$ . Intensitatea tranzițiilor sunt cele observate experimental. Timpii de viață prezentați sunt mășurați folosint metoda distanței de recul.



## 4.2 Rezultate

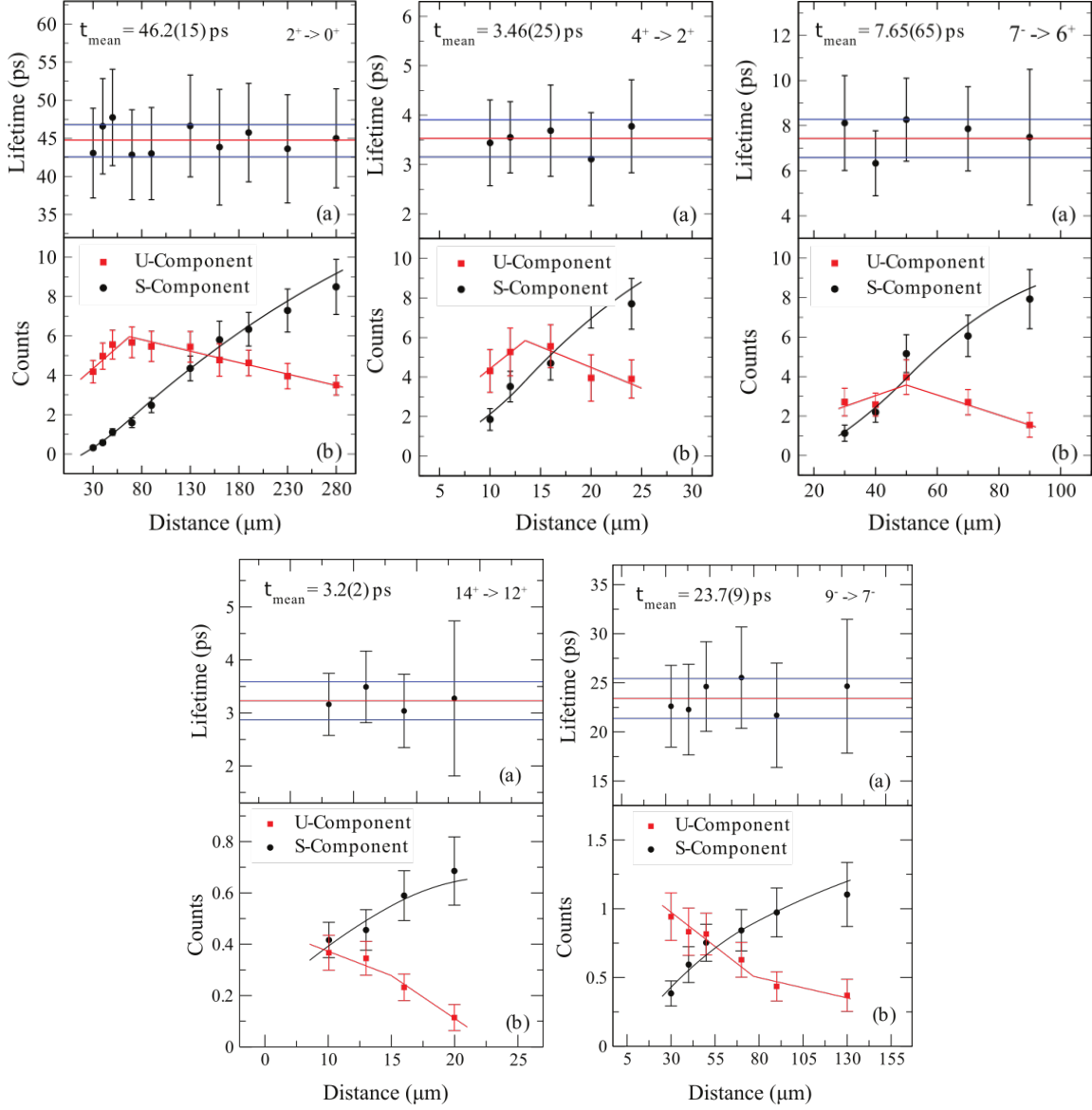


Figure 7: Timprii de viață medii pentru nivelele  $2_1^+$ ,  $4_1^+$ ,  $7_1^-$ ,  $9_1^-$  pentru fiecare distanță măsurată în direcția înainte ( $37^\circ$ ) și nivelul  $14_1^+$  măsurat în direcția înapoi ( $143^\circ$ ). Liniile orizontale reprezintă media ponderată a acestor valori și eroarea corespunzătoare (a). Valori normate ale componentei shiftate (black circles) și neshiftate (red squares) pentru tranzițiile  $2_1^+ \rightarrow 0^+$ ,  $4_1^+ \rightarrow 2_1^+$ ,  $7_1^- \rightarrow 6_1^+$ ,  $9_1^- \rightarrow 7_1^-$  măsurate în direcția înainte și tranziția  $14_1^+ \rightarrow 12_1^+$  măsurată în direcția înapoi. (b)

$E_x [keV]$	$J_n^\pi$	$E_\gamma [keV]$	Gate	$\tau [ps]$	B(E2)[W.u.] (previous)	B(E2)[W.u.] (present)
373.75	$2_1^+$	373.7	$4_1^+ \rightarrow 2_1^+$	46.2(15)	80(11) <sup>a</sup>	56.8(19)
976.46	$4_1^+$	602.7	$6_1^+ \rightarrow 4_1^+$	3.46(25)	> 21 <sup>b</sup>	71(5)
2439.80	$7_1^-$	404.1	$9_1^- \rightarrow 7_1^-$	7.65(65)	14(5) <sup>b</sup>	54(5) <sup>c</sup>
2941.0	$9_1^-$	501.2	$11_1^- \rightarrow 9_1^-$	23.75(92)	71(24) <sup>b</sup>	25.9(10)
4347.8	$14_1^+$	661.3	$16_1^+ \rightarrow 14_1^+$	3.14(27)	> 27 <sup>b</sup>	49(5)

Table 2: Timpii de viață măsurați în această analiză. Probabilitățile reduse de tranziție calculate alături de valorile cunoscute anterior experimentului.

### 4.3 Interpretarea rezultatelor

Pentru interpretarea rezultatelor am ales modelul bazat pe un Hamiltonian colectiv cinci-dimensional care se bazează pe calcule de amestec de configurație Hartree-Fock-Bogoliubov implementate folosind forța D1S Gogny [9, 10] descris în capitolul 2. Modelul oferă predicții pentru mai multe observabile, cum ar fi momentul de inerție a benzilor yrast, momente quadrupolare spectroscopice, probabilități de tranziție B(E2) etc. În principal suntem interesați de probabilitatea de tranziție redusă B(E2). Valorile B(E2) obținute experimental sunt afișate în figura 8 alături de valorile prezise de 5DCH [5].

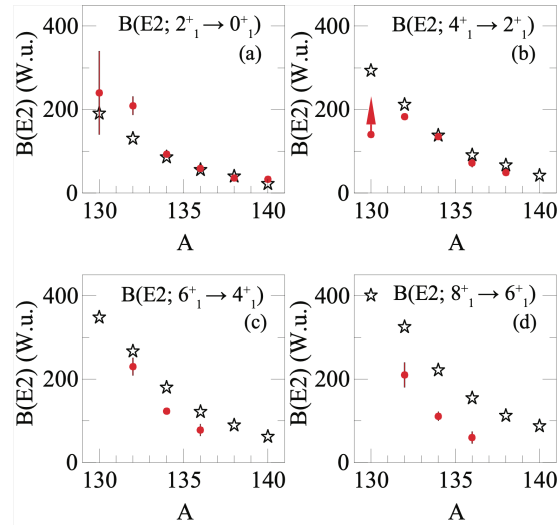


Figure 8: Sistemica probabilităților reduse de tranziție pentru izotopii neutrono deficitari ai neodimiului comparate cu predicțiile modelului 5DCH. Figură preluată din [5].

## 5 Investigarea structurii a $^{154}\text{Er}$

### 5.1 Introducere

Al doilea nucleu studiat pentru această teza este  $^{154}\text{Er}$ . Acest izotop este un nucleu din categoria pământuri rare cu  $Z = 68$  și  $N = 86$ . Regiunea pământurilor rare a fost studiată intensiv datorita particularităților sale unice precum natura vibrațională a stări cu energie joase în banda fundamentală [19, 20], apariția unei insule de izomeri cu timp de viață foarte lungi [21], și tranziția de la forma prolate la forma oblate a stărilor cu spini mari [22]. Au fost efectuate studii pentru lanțurile izotopice ale Er, Dy și Gd pentru a înțelege structura nucleară afectată de forțele centrifuge și Coriolis [23]. S-a observat că izotonii cu  $N \geq 87$  prezintă deformații cuadripolare considerabile, în timp ce pentru  $N < 87$ , avem de-a face cu nuclee sferice sau oblate [23]. În cazul  $^{154}\text{Er}$ , mai multe experimente au dezvăluit structura superdeformată [24, 25] la spini înalți. De asemenea, regiunea cu spin mare a fost studiată utilizând experimente de captura a electronilor [26] și reacții de ioni grei [27, 28, 29] care au dezvăluit schema de nivele excitate, au măsurat timpii de viață ai stărilor nucleare și ai măsurat momentele cuadripolare ale formelor colective ce coexistă la spini înalți [30]. Pentru stările de energie joasă, situația este diferită deoarece informațiile experimentale sunt rare. Din perspectiva timpilor de viață, numai izomerul  $I^\pi = 11^-$  cu energia de 3025 keV are o durată de viață cunoscută de 39 (4) ns. Pentru spinii mai mari, două experimente au măsurat timpul de viață pentru banda de paritate negativă [28, 29], dar au obținut rezultate complet diferite. Prin urmare, valorile nu pot fi de încredere. Mai mult, schema de nivele este incompletă, cu primul  $I^\pi = 3^-$  și al doilea  $I^\pi = 2^+$  nefiind identificate. Toate aceste informații lipsă sunt valoroase din punct de vedere colectiv. Având în vedere situația descrisă până acum, am decis să măsurăm timpii de viață din banda yrast și să identificăm stările excitate care lipsesc. Nivelurile de paritate pozitivă în banda fundamentală, până la  $I^\pi = 12^+$  sunt în intervalul metodei RDDS, în timp ce stările de paritate negativă mai mari decât  $I^\pi = 13^-$  sunt în intervalul metodei Fast-timing. De asemenea, am efectuat măsurători de corelație unghiulară pentru a identifica începutul benzii gama.

### 5.2 Aranjamentul experimental

Măsurătorile de timp de viață în  $^{154}\text{Er}$  au fost efectuate tot la Acceleratorul Tandem de 9 MV din Institutul de Fizică și Inginerie Nucleară - Horia Hulubei din București-Magurele. Nucleele de  $^{154}\text{Er}$  au fost produse în reacția nucleară de fuziune-evaporarea  $^{144}\text{Sm}(^{13}\text{C}, 3n)$  utilizând o țintă fabricată de laboratorul de ținte din IFIN-HH [16]. Ținta a fost realizată din  $^{144}\text{Sm}$  cu o grosime de  $0,37 \text{ mg/cm}^2$  depusă pe un substrat de aur de  $3,2 \text{ mg/cm}^2$ . Pentru calculele secțiunilor de interacție am folosit codurile

CASCADE [17] și Compa [18]. Secțiunea de interacție este de 200 mb obținută la energia proiectilului de 59 MeV. Fasciculul a fost accelerat la 60 MeV pentru a compensa pierderile de energie din substratul de aur. Viteza de recul a fost calculată la 1,91  $\mu\text{m}/\text{ps}$  ( $v/c = 0.65\%$ ). Stopperul a fost o folie de aur cu 4,5  $\text{mg}/\text{cm}^2$  grosime. Fiind un experiment RDDS, a fost utilizată ca și cameră de reacție dispozitivul plunger. Pentru detectarea fotonilor, am folosit spectrometrul ROSPHERE[6] cuprinzând în acel moment 14 detectori de germaniu plasati pe patru inele la  $37^\circ$  (cinci detectori),  $90^\circ$  (trei detectori),  $110^\circ$  (un detector) și  $143^\circ$  (cinci detectori), iar în pozițiile rămase completate cu detectori scintilatori de  $\text{LaBr}_3(\text{Ce})$ . Am măsurat la 11 distanțe țintă-stopper în intervalul 8  $\mu\text{m}$  - 50  $\mu\text{m}$ .

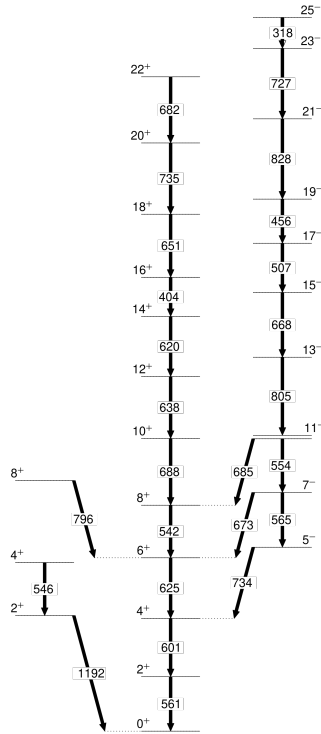


Figure 9: Schema de nivele parțială a  $^{154}\text{Er}$  care evidențiază nivelele de interes pentru această analiză construită pe baza tranzițiilor observate experimental.

### 5.3 Rezultate

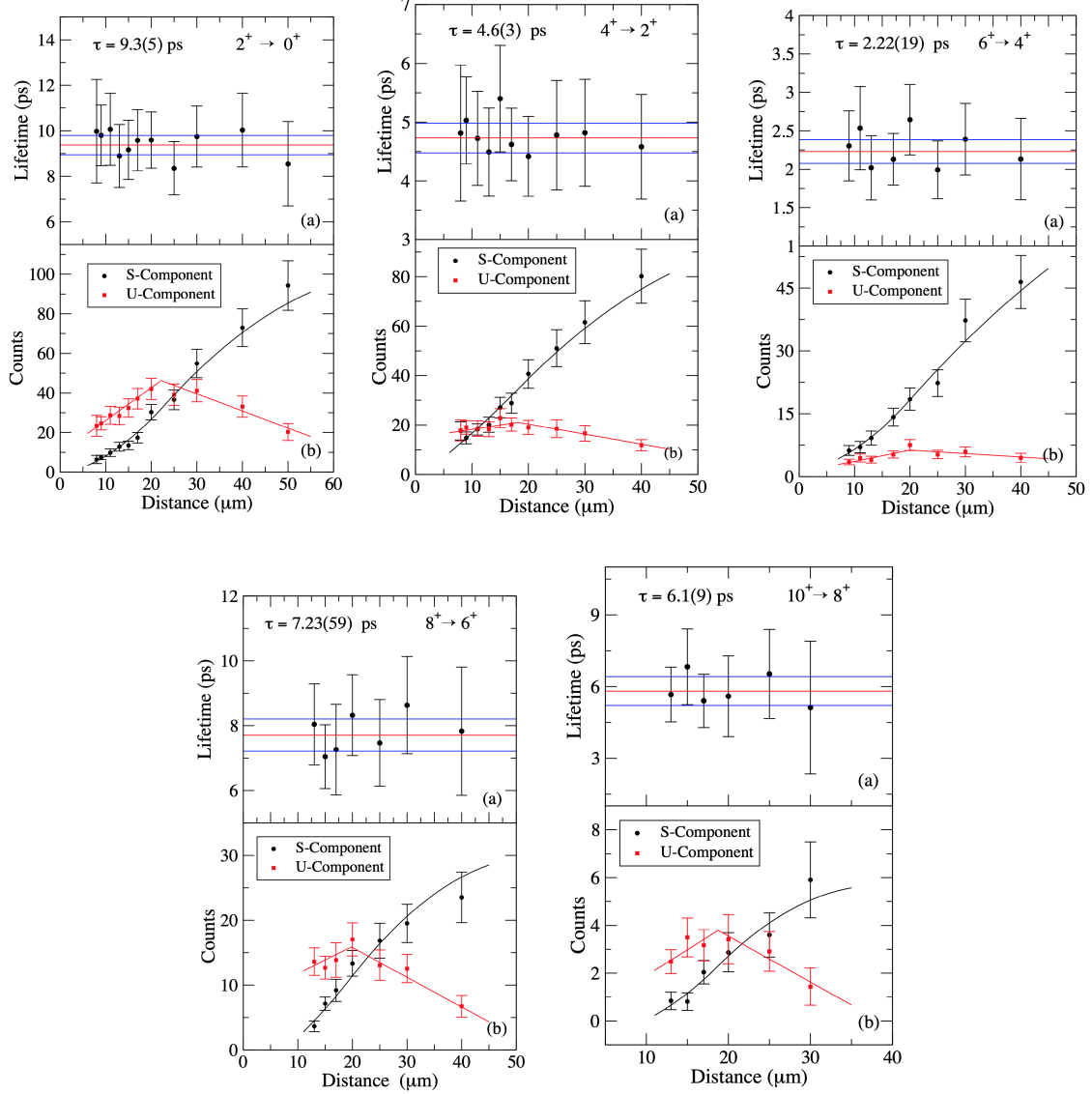


Figure 10: Timpul mediu de viață al nivelelor  $2_1^+$ ,  $4_1^+$ ,  $6_1^+$ ,  $8_1^+$ , și  $10_1^+$  măsurate în direcția înainte ( $37^\circ$ ). Liniile orizontale reprezintă media ponderată a acestor valori și eroarea corespunzătoare (a). Valorile normate ale componentei shiftate (black circles) și neshiftate (red squares) pentru tranzițiile  $2_1^+ \rightarrow 0^+$ ,  $4_1^+ \rightarrow 2_1^+$ ,  $6_1^+ \rightarrow 4_1^+$ ,  $8_1^+ \rightarrow 6_1^+$ , and  $10_1^+ \rightarrow 8_1^+$  măsurate în direcția înainte (b).

$E_x[keV]$	$J_n^\pi$	$E_\gamma[keV]$	Gate	$\tau[ps]$	B(E2)[W.u.] (present)
560.9	$2_1^+$	560.9	$4_1^+ \rightarrow 2_1^+$	9.3(5)	31.9(17)
1162.2	$4_1^+$	601.4	$6_1^+ \rightarrow 4_1^+$	4.6(3)	45.6(30)
1787.6	$6_1^+$	625.5	$8_1^+ \rightarrow 6_1^+$	2.22(19)	77.7(67)
2329.5	$8_1^+$	541.9	$10_1^+ \rightarrow 8_1^+$	7.23(59)	48.7(40)
3016	$10_1^+$	687.8	$12_1^+ \rightarrow 10_1^+$	6.1(9)	17.8(26)

Table 3: Timpii de viață măsurați în această teză alături de probabilitățile de tranziție calculate.

## 5.4 măsurători de corelații unghiulare

Un aspect important în studierea comportamentului colectiv al nucleelor de masă medie este începutul banzii gama, adică a doua stare  $I^\pi = 2^+$ . În cazul  $^{154}\text{Er}$ , stările din banda gama nu erau cunoscute înainte de acest experiment, iar unul dintre obiectivele noastre era acela de identifica aceste stări lipsă. Figura 11 prezintă schema de nivel construită utilizând tranziții observate în experimentul actual. Am folosit matrici de coincidență  $\gamma - \gamma$  și  $\gamma - \gamma - \gamma$  pentru a identifica cu exactitate modul de dezexcitare. Tranzițiile din cascada nou identificata sunt compatibile cu schema de nivel cunoscută anterior și credem că această tranziție este începutul benzii gama. Următorul pas constă în atribuirea de spini pentru aceste nivele nou găsite.

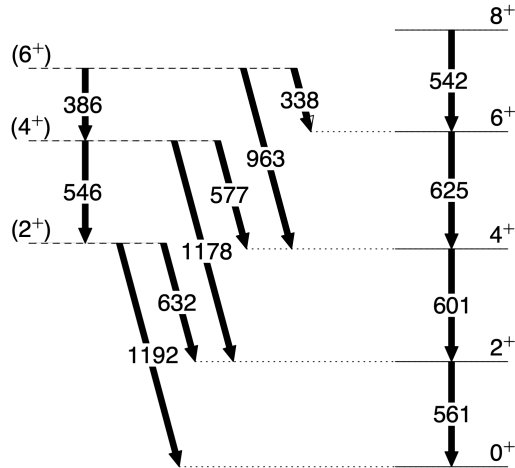


Figure 11: Schema de nivele parțială a  $^{154}\text{Er}$  care evidențiază nivelele nou identificate și tranzițiile compatibile cu schema de nivele cunoscută.

Am identificat erori minore în unghiul detectorilor cauzate de montarea în spectrometru sau de deschiderea unghiulara a acestora. Acest lucru poate fi văzut în măsurătoarea cascadei  $4_1^+ \rightarrow 2_1^+ \rightarrow 0_1^+$ , folosind tranzițiile 601,4 keV și 560,8 keV, afișate în Figura 12 (panoul inferior). Acesta analiza a fost efectuată asupra nivelelor cu spin, paritate și amestec cunoscute pentru testarea aranjamentului experimental cu scopul de a identifica posibilele erori. Două unghiuri la 53 grade și 144 de grade par să prezinte erori semnificative și, din păcate, nu am identificat sursa acestor erori. Unghiul de 144 de grade este susceptibil la erori deoarece conține doar două perechi, dar unghiul de 53 are șase perechi și nu ar trebui să aibă probleme.

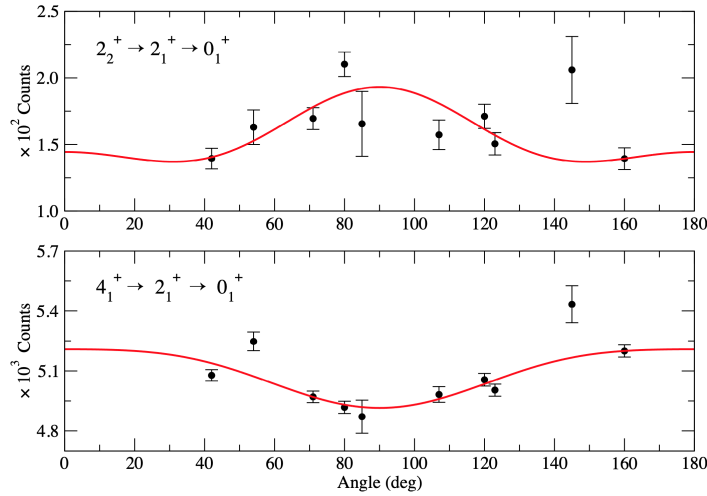


Figure 12: Măsurătorile de corelații unghiulare obținute pentru  $^{154}\text{Er}$ . Panoul de jos arata fit-ul pentru cascada cunoscută  $4_1^+ \rightarrow 2_1^+ \rightarrow 0_1^+$  care evidențiază posibilele erori. Panoul de sus arată fit-ul pentru cascada nou identificată  $2_2^+ \rightarrow 2_1^+ \rightarrow 0_1^+$ .

Singura stare din banda gama suficient populată pentru a efectua o măsurătoare de corelație unghiulară este a doua stare  $I^\pi = 2^+$ . Chiar și așa, punctele sunt foarte împrăștiate și nu putem atribui în mod definitiv spinul nivelului. Punctele și fit-ul sunt prezentate în panoul superior din Figura 12. Din nou, putem vedea că punctul de la 144 de grade este afectat de erori, confirmând că există o problemă cu unghiul detectorului. Cel mai bun fit posibil rezulta pentru parametrii  $a_2$  și  $a_4$  următoarele valori:  $a_2 = -0.250 \pm 0.033$ ,  $a_4 = 0.128 \pm 0.053$ .

## 5.5 Interpretarea rezultatelor

Observabila pentru care am calculat valorile teoretice este probabilitatea redusă de tranziție  $B(E2)$  pentru fiecare tranziție în banda fundamentală până la  $I^\pi = 10_1^+$ .

Calcululele obținute sunt în acord cu valorile experimentale pentru primele trei tranziții. Ulterior, probabilitatea redusă de tranziție scade brusc, iar modelul teoretic nu este echipat pentru a prezice acest comportament. Modelul bosonilor de interacție prezice o scădere a valorilor  $B(E2)$ , caracteristică ce oferă o predictivitate mai bună fata de modelul geometric tradițional, dar, în acest caz, se pare că începe să scadă după starea de  $I^\pi = 10^+$ . Chiar și așa, scăderea valorilor experimentale este cauzata de efecte non-colective, iar IBA-1 nu poate modela acest comportament. Scăderea bruscă poate fi explicată datorită amestecării configurațiilor normale și configurațiilor cvasiparticulare. În acest caz, nivelul  $I^\pi = 8_2^+$  cu energia de 2583,6 keV afectează nivelele vecine prin scăderea probabilității de tranziție.

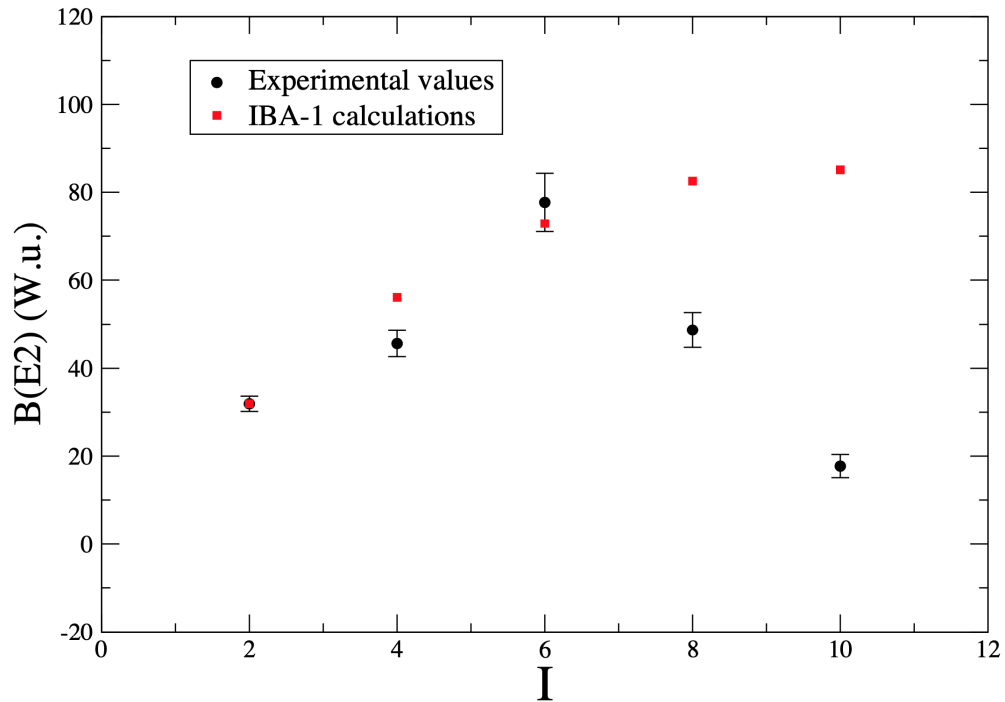


Figure 13: Probabilitățile reduse de tranziție  $B(E2)$  calculate folosind modelul IBA-1 comparate cu valorile măsurate experimental.



## References

- [1] C. Costache, *Advanced spectroscopic techniques applied in the study of nuclear structure*. PhD thesis, Universitatea Politehnica Bucuresti, 2021.
- [2] C. Mihai, *Dezvoltari ale metodelor Doppler de determinare a timpilor de viata nucleari*. PhD thesis, Universitatea din Bucuresti, 2011.
- [3] S. F. Ashley, *Recoil Distance Doppler Shift Lifetime Measurements of Excited States in  $^{103}\text{Pd}$  and  $^{106,107}\text{Cd}$* . PhD thesis, University of Surrey, 2007.
- [4] A. Dewald, O. Möller, and P. Petkov, “Developing the recoil distance doppler-shift technique towards a versatile tool for lifetime measurements of excited nuclear states,” *Progress in Particle and Nuclear Physics*, vol. 67, no. 3, pp. 786 – 839, 2012.
- [5] A. Turturică, C. Costache, P. Petkov, J.-P. Delaroche, M. Girod, J. Libert, G. Cătă-Danil, S. Pascu, C. Mihai, M. Boromiza, D. Bucurescu, C. Clisu, D. Filipescu, N. M. Florea, I. Gheorghe, A. Ionescu, R. Lică, N. M. Mărginean, R. Mărginean, R. E. Mihai, A. Mitu, A. Negret, C. R. Niță, A. Olăcel, A. Oprea, T. Sava, C. Sotty, L. Stan, I. Știru, R. Șuvăilă, S. Toma, G. V. Turturică, and S. Ujeniuc, “Collective properties of neutron-deficient nd isotopes: Lifetime measurements of the yrast states in  $^{136}\text{Nd}$ ,” *Phys. Rev. C*, vol. 103, p. 044306, Apr 2021.
- [6] D. Bucurescu, I. Cătă-Danil, G. Ciocan, C. Costache, D. Deleanu, R. Dima, D. Filipescu, N. Florea, D. Ghiță, T. Glodariu, M. Ivașcu, R. Lică, N. Mărginean, R. Mărginean, C. Mihai, A. Negret, C. Niță, A. Olăcel, S. Pascu, T. Sava, L. Stroe, A. Șerban, R. Șuvăilă, S. Toma, N. Zamfir, G. Cătă-Danil, I. Gheorghe, I. Mitu, G. Suliman, C. Ur, T. Braunroth, A. Dewald, C. Fransen, A. Bruce, Z. Podolyák, P. Regan, and O. Roberts, “The rosphere  $\gamma$ -ray spectroscopy array,” *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, vol. 837, pp. 1–10, 2016.
- [7] T. Beck, C. Costache, R. Lică, N. Mărginean, C. Mihai, R. Mihai, O. Papst, S. Pascu, N. Pietralla, C. Sotty, L. Stan, A. Turturică, V. Werner, J. Wiederhold, and W. Witt, “Sorcerer: A novel particle-detection system for transfer-reaction experiments at rosphere,” *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, vol. 951, p. 163090, 2020.

- [8] S. RAMAN, C. NESTOR, and P. TIKKANEN, “Transition probability from the ground to the first-excited 2+ state of even–even nuclides,” *Atomic Data and Nuclear Data Tables*, vol. 78, no. 1, pp. 1–128, 2001.
- [9] P. Möller, R. Bengtsson, B. G. Carlsson, P. Olivius, and T. Ichikawa, “Global calculations of ground-state axial shape asymmetry of nuclei,” *Phys. Rev. Lett.*, vol. 97, p. 162502, Oct 2006.
- [10] J. P. Reville, E. S. Paul, X. Wang, M. A. Riley, J. Simpson, R. V. F. Janssens, J. Ollier, A. J. Boston, M. P. Carpenter, C. J. Chiara, C. R. Hoffman, F. G. Kondev, T. Lauritsen, P. J. Nolan, J. M. Rees, S. V. Rigby, C. Unsworth, S. Zhu, and I. Ragnarsson, “Quadrupole moments of coexisting collective shapes at high spin in  $^{154}\text{Er}$ ,” *Phys. Rev. C*, vol. 88, p. 031304, Sep 2013.
- [11] F. A. Beck, J. Dudek, B. Haas, J. C. Merdinger, A. Nourreddine, Y. Schutz, J. P. Vivien, P. Hubert, D. Dassié, G. Bastin, L. Nguyen, J. P. Thibaud, and W. Nazarewicz, “High-spin structure in  $^{154}\text{Er}$ ,” *Z. Phys. A Atomic Nuclei*, vol. 319, p. 119–132, 1984.
- [12] D. Ward, J. Sharpey-Schafer, T. Alexander, H. Andrews, O. Häusser, and J. Keinonen, “Remeasurement of lifetimes for high spin states in  $^{154}\text{Er}$ ,” *Physics Letters B*, vol. 99, no. 5, pp. 378–382, 1981.
- [13] P. Aguer, G. Bastin, A. Charmant, Y. El Masri, P. Hubert, R. Janssens, C. Michel, J. Thibaud, and J. Vervier, “Lifetimes of high-spin yrast states in  $^{154}\text{Er}$ ,” *Physics Letters B*, vol. 82, no. 1, pp. 55–59, 1979.
- [14] K. S. Toth, D. C. Sousa, J. C. Batchelder, J. M. Nitschke, and P. A. Wilmarth, “Decay properties of  $^{154}\text{Tm}$  and observation of fine structure in its  $\alpha$ -particle spectrum,” *Phys. Rev. C*, vol. 56, pp. 3410–3413, Dec 1997.
- [15] E. Mccutchan, “Nuclear data sheets for a=136,” *Nuclear Data Sheets*, vol. 152, pp. 331–667, 2018.
- [16] J. Borggreen, G. Sletten, S. Bjørnholm, J. Pedersen, R. Janssens, I. Ahmad, P. Chowdhury, T. Khoo, Y. Chung, and P. Daly, “Nuclear structure effects in the feeding of yrast states of gd, dy and er nuclei,” *Nuclear Physics A*, vol. 443, no. 1, pp. 120–134, 1985.
- [17] F. S. Stephens, M. A. Deleplanque, R. M. Diamond, A. O. Macchiavelli, and J. E. Draper, “Structural changes in  $^{156}\text{Er}$  at high spins,” *Phys. Rev. Lett.*, vol. 54, pp. 2584–2587, Jun 1985.

- [18] J. Pedersen, B. B. Back, F. M. Bernthal, S. Bjørnholm, J. Borggreen, O. Christensen, F. Folkmann, B. Herskind, T. L. Khoo, M. Neiman, F. Pühlhofer, and G. Sletten, “Island of high-spin isomers near  $n = 82$ ,” *Phys. Rev. Lett.*, vol. 39, pp. 990–993, Oct 1977.
- [19] K. Lagergren, B. Cederwall, T. Bäck, R. Wyss, E. Ideguchi, A. Johnson, A. Ataç, A. Axelsson, F. Azaiez, A. Bracco, J. Cederkäll, Z. Dombrádi, C. Fahlander, A. Gadea, B. Million, C. M. Petrache, C. Rossi-Alvarez, J. A. Sampson, D. Sohler, and M. Weiszflog, “Coexistence of superdeformed shapes in  $^{154}\text{Er}$ ,” *Phys. Rev. Lett.*, vol. 87, p. 022502, Jun 2001.
- [20] L. A. Bernstein, J. R. Hughes, J. A. Becker, L. P. Farris, E. A. Henry, S. J. Asztalos, B. Cederwall, R. M. Clark, M. A. Deleplanque, R. M. Diamond, P. Fallon, I. Y. Lee, A. O. Macchiavelli, F. S. Stephens, J. A. Cizewski, and W. Younes, “Superdeformation in  $^{154}\text{Er}$ ,” *Phys. Rev. C*, vol. 52, pp. R1171–R1174, Sep 1995.
- [21] C. J. Lister, D. Horn, C. Baktash, E. der Mateosian, O. C. Kistner, and A. W. Sunyar, “High spin states in  $^{156}\text{Yb}$  ( $n = 86$ ),” *Phys. Rev. C*, vol. 23, pp. 2078–2085, May 1981.
- [22] C. Baktash, E. der Mateosian, O. C. Kistner, and A. W. Sunyar, “Irregularities in side-feeding patterns, energies, and multipolarities in the  $^{154}\text{Er}$  yrast cascade to spin 36,” *Phys. Rev. Lett.*, vol. 42, pp. 637–640, Mar 1979.
- [23] T. Saito, N. Saito, K. Starosta, J. Beller, N. Pietralla, H. Wollersheim, D. Balabanski, A. Banu, R. Bark, T. Beck, F. Becker, P. Bednarczyk, K.-H. Behr, G. Benzoni, P. G. Bizzeti, C. Boiano, A. Bracco, S. Brambilla, A. Brünle, and Q. Zhong, “Yrast and non-yrast  $2+$  states of  $^{134}\text{Ce}$  and  $^{136}\text{Nd}$  populated in relativistic coulomb excitation,” *Physics Letters B*, vol. 669, pp. 19–23, 10 2008.
- [24] J. P. Delaroche, M. Girod, J. Libert, H. Goutte, S. Hilaire, S. Péru, N. Pillet, and G. F. Bertsch, “Structure of even-even nuclei using a mapped collective hamiltonian and the  $d1s$  gogny interaction,” *Phys. Rev. C*, vol. 81, p. 014303, Jan 2010.
- [25] J. Dechargé and D. Gogny, “Hartree-fock-bogolyubov calculations with the  $d1$  effective interaction on spherical nuclei,” *Phys. Rev. C*, vol. 21, pp. 1568–1593, Apr 1980.
- [26] J. Berger, M. Girod, and D. Gogny, “Time-dependent quantum collective dynamics applied to nuclear fission,” *Computer Physics Communications*, vol. 63, no. 1, pp. 365–374, 1991.

- [27] J. Libert, M. Girod, and J.-P. Delaroche, “Microscopic descriptions of superdeformed bands with the gogny force: Configuration mixing calculations in the  $a \sim 190$  mass region,” *Phys. Rev. C*, vol. 60, p. 054301, Sep 1999.
- [28] N. M. Florea, L. Stroe, R. Mărginean, D. G. Ghiță, D. Bucurescu, M. Badea, C. Costache, R. Lică, N. Mărginean, C. Mihai, D. V. Moșu, C. R. Niță, S. Pascu, and T. Sava, “The status of the target preparation laboratory at ifin-hh bucharest, romania,” *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry volume*, vol. 305, p. 707–711, 2015.
- [29] F. Pühlhofer, “On the interpretation of evaporation residue mass distributions in heavy-ion induced fusion reactions,” *Nuclear Physics A*, vol. 280, no. 1, pp. 267–284, 1977.
- [30] J. Srebrny, C. Droste, T. Morek, K. Starosta, A. Wasilewski, A. Pasternak, E. Podsvirova, Y. Lobach, G. Hagemann, S. Juutinen, M. Piiparinen, S. Törmänen, and A. Virtanen, “Transition probabilities in negative parity bands of the  $119\text{i}$  nucleus,” *Nuclear Physics A*, vol. 683, no. 1, pp. 21–47, 2001.