



Universitatea Politehnica din București, Facultatea de Științe Aplicate  
Institutul Național de Cercetare-Dezvoltare pentru Fizică și Inginerie Nucleară  
"Horia Hulubei"  
CERN Doctoral Student Programme

# Dezvoltarea sistemului "ISOLDE Decay Station" și studii de spectroscopie $\gamma$ ale nucleelor exotice din vecinătatea "Insulei de Inversie" $N=20$

## Rezumatul Tezei Doctorale

Răzvan LICĂ

**Conducător de doctorat**

Prof. Dr. Gheorghe CĂTA-DANIL

**Coordonator științific IFIN-HH**

CS1 Dr. Nicolae Marius MĂRGINEAN

**Coordonator științific CERN**

Prof. Dr. Maria Jose GARCIA BORGE



# Cuprins

<b>1 Tehnici de producere a fasciculelor radioactive. Instalația ISOLDE, CERN</b>	<b>3</b>
1.1 Introducere . . . . .	3
1.2 Instalații de producere a fasciculelor radioactive . . . . .	4
1.2.1 Istoric . . . . .	4
1.2.2 Asemănări și deosebiri între tehnicile ISOL și In-Flight . . . . .	6
1.2.3 Intensitatea fasciculelor . . . . .	7
1.2.4 Instalații principale . . . . .	8
1.3 Instalația de separare a isotopilor On-Line (ISOLDE) a CERN . . . . .	10
1.3.1 Țintele folosite . . . . .	11
1.3.2 Surse de ioni . . . . .	12
1.3.3 Separatoare de masă . . . . .	14
1.3.4 Aranjamente experimentale la ISOLDE . . . . .	16
<b>2 Aranjamentul experimental ISOLDE Decay Station</b>	<b>19</b>
2.1 Introducere . . . . .	19
2.2 Sistemul de achiziție de date . . . . .	23
2.3 Detectorii de tip germaniu hiperpur (HPGe) ai IDS . . . . .	26

---

2.4	Configurația de eficiență înaltă $\beta$ - $\gamma$ . . . . .	29
2.5	Configurația de măsurare de timpi rapizi . . . . .	31
2.6	Configurația pentru spectroscopie de particule . . . . .	33
2.7	Configurația pentru spectroscopie de neutroni . . . . .	34
<b>3</b>	<b>Simulări Monte Carlo ale ISOLDE Decay Station</b>	<b>37</b>
3.1	Introducere . . . . .	37
3.1.1	Pachetul de simulări GEANT4 . . . . .	39
3.2	Codul G4IDS . . . . .	41
3.2.1	Prezentare generală . . . . .	41
3.2.2	Importarea geometriilor complexe de tip CAD folosind CAD-Mesh . . . . .	45
3.3	Rezultate si comparații cu rezultate experimentale . . . . .	46
3.3.1	Eficiența absolută a detectorilor HPGe din experimentul IS530	48
3.3.2	Detectori de tip VETO pentru energii înalte $\beta$ . . . . .	48
<b>4</b>	<b>Interpretarea teoretică a "Insulei de Inversie" de la N=20</b>	<b>55</b>
4.1	Introducere . . . . .	55
4.2	Dovezi experimentale pentru "Insula de Inversie" $N = 20$ . . . . .	57
4.3	Interpretarea din perspectiva modelului în pături . . . . .	62

4.4	Motivația fizică pentru studiul experimental al $^{34}\text{Al}$ și $^{34}\text{Si}$ . . . . .	66
4.4.1	Măsuratori precedente ale $^{34}\text{Al}$ și $^{34}\text{Si}$ la GANIL . . . . .	68
4.4.2	Măsuratori precedente ale dezintegrării $\beta$ a $^{34}\text{Mg}$ la ISOLDE . . . . .	71
<b>5</b>	<b>Studiul dezintegrării <math>\beta</math> a <math>^{34}\text{Mg}</math> la ISOLDE, CERN</b>	<b>73</b>
5.1	Aranjamentul experimental . . . . .	73
5.2	Rezultate experimentale . . . . .	76
5.2.1	Intensități absolute în lanțul de dezintegrare al $^{34}\text{Mg}$ . . . . .	76
5.2.2	Schema de nivele a $^{34}\text{Al}$ . . . . .	80
5.2.3	Schema de nivele a $^{34}\text{Si}$ . . . . .	82
<b>6</b>	<b>Interpretarea rezultatelor experimentale și compararea acestora cu calculele de model în pături</b>	<b>91</b>
6.1	Coduri de calcul de model în pături . . . . .	91
6.1.1	Comparații între măsurători și calcule de model în pături folosind interacția SDPF-U-MIX . . . . .	94
6.2	Schema de nivele a $^{34}\text{Al}$ . . . . .	97
6.2.1	Calcule de model în pături . . . . .	97
6.2.2	Atribuirii de spini și parități . . . . .	99
6.2.3	Diferența de energie între configurații intruse și normale . . . . .	101
6.3	Schema de nivele a $^{34}\text{Si}$ . . . . .	102

---

6.3.1	Calcul de model în pături . . . . .	102
6.3.2	Atribuiri de spini și parități . . . . .	106
6.3.3	Probabilitatea redusă de tranziție între stările $2_1^+ \rightarrow 0_2^+$ . . . .	107
6.3.4	Amestecul între configurații intruse și normale pentru stările $0_1^+$ and $0_2^+$ . . . . .	109
6.3.5	Starea sferică $2^+$ în $^{34}\text{Si}$ . . . . .	111
	<b>Concluzii și perspective</b>	<b>115</b>
	<b>Bibliografie</b>	<b>117</b>

**Cuvinte cheie:** instalații de producere a fasciculelor radioactive, simulări GEANT4, sistem de detectori, spectroscopie nucleară, dezintegrare  $\gamma$ , scheme de nivele, configurații intruse, dezintegrare  $\beta$ , calcule de model în pături

# Tehnici de producere a fasciculelor radioactive. Instalația ISOLDE, CERN

---

Studiul isotopilor radioactivi este foarte important în fizica nucleară fundamentală, astrofizică și aplicații cum ar fi producerea de energie în reactoarele nucleare, fizica stării solide și tratamente medicale. Producerea nucleelor radioactive îndepărtate de linia de stabilitate întâmpină numeroase obstacole, în principal din cauza secțiunilor reduse de reacție și, de cele mai multe ori, producerea isotopilor contaminanți. Progresul științei nucleare din 1950 a fost reprezentat, printre altele, de către progresele majore ale producției și tehnologiei de separare a fasciculelor de ioni radioactivi. În prezent, există două metode complementare utilizate pe scară largă la diferitele facilitati: Isotope On-Line (ISOL) și metoda de separare în timpul zborului - In Flight. Alte tehnici mai noi se aplică la facilități de dimensiuni mai mici și implică metode de producere sau etape de extracție ușor diferite.

Metoda ISOL utilizează fascicule de ioni ușori (sau neutroni, fotoni) care induc fragmentare, spalație și / sau fisiune într-o țintă groasă adusă la o temperatură ridicată. Ulterior nucleele rezultate difuzează din țintă, sunt ionizate folosind diferite surse și sunt separate folosind un separator de masă. Fasciculele sunt inițial accelerate la câteva zeci de kV dar pot fi ulterior post- accelerate folosind tehnici speciale.

Metoda In-Flight utilizează fascicule de ioni de mare energie care induc fragmentare (în cazul proiectilelor cu masă mare) sau la procese de fuziune-evaporare

---

(pentru proiectile mai ușoare) într-o țintă subțire. Nucleele energetice ionizate ale diferitelor specii atomice ies din țintă și sunt trimise la un separator de fragmente. Ulterior, fragmentele separate pot fi trimise direct la experiment.

În prezent, există trei instalații principale de tip ISOL care oferă o mare varietate de fascicule: CERN-ISOLDE și GANIL-SPIRAL în Europa și TRIUMF în America de Nord. ISOLDE este cel mai vechi, fiind precursorul tuturor instalațiilor ISOL din întreaga lume și se afla la CERN, Geneva, Elveția. Principalele instalații In Flight de ioni grei în funcțiune începând cu anii 1990, NSCL-MSU, GANIL, GSI și RIKEN, au o fracțiune din ce în ce mai mare a timpului lor de fascicul consacrat programului de producere a fasciculelor radioactive datorită oportunităților științifice ample.

ISOLDE folosește o varietate de ținte groase, cea mai utilizată fiind carbura de uraniu (UCx), care sunt iradiate cu un fascicul pulsat de protoni având o intensitate medie de  $2 \mu\text{A}$  și fiind accelerat la 1,4 GeV de Synchrotron Proton Booster (PSB) al complexului de acceleratoare CERN. În 2016, ISOLDE a primit 61% din numărul total de protoni livrați tuturor experimentelor din cadrul CERN, fiind de departe utilizatorul principal al fasciculelor de protoni. Protonii inițiază fisiune, spalație și reacții de fragmentare în ținta încălzită și apoi izotopii exotici produși difuzează și efuzează prin ea printr-o linie de transfer care este cuplată la o sursă de ioni. Sunt utilizate surse de plasmă, cavități termice sau surse de ionizare laser pentru a ioniza fasciculele de ioni radioactivi. Aceste fascicule pot fi livrate direct la aranjamente experimentale temporare sau fixe după ce au fost accelerate folosind un potențial de accelerare de 30-60 kV și separate folosind Separatorul cu scop general (General Purpose Separator) sau Separatorul de înaltă rezoluție (High Resolution Separator). Există, de asemenea, posibilitatea răcirii și compactării fasciculului într-o capcană Penning umplută cu un gaz tampon, multiplicarea stări de sarcină și accelerarea acestuia cu un accelerator liniar la 3.1 MeV/u. În principiu, toate fasciculele de energie joasă din ISOLDE pot fi post-accelerate. Acest lucru a fost realizat în trecut de sistemul post-accelerator REX-ISOLDE. Instalația HIE-ISOLDE vizează creșterea intensității fasciculului primar de protoni la  $6 \mu\text{A}$  și energia fasciculului radioactiv la valori care depășesc 7,5 MeV/u pentru raportul masă-sarcină  $A/q = 4,33$  în 2017.



# Aranjamentul experimental ISOLDE Decay Station

---

Aranjamentul experimental ISOLDE Decay Station (IDS) este o instalație permanentă în cadrul ISOLDE, CERN, fiind operațională începând cu 2014. Acesta este un sistem de detectori flexibil și versatil pentru detectia radiațiilor  $\gamma$ , particulelor încărcate și neutronilor utilizați pentru studiile spectroscopice de dezintegrare  $\beta$  a fasciculelor radioactive livrate de ISOLDE. În cei trei ani petrecuți la ISOLDE ca student doctorand, am contribuit la dezvoltarea acestui sistem și la desfășurarea tuturor experimentelor de fizică nucleară din cadrul IDS.

Sistemul de achiziție de date (DAQ) utilizat pentru IDS este similar cu cel dezvoltat de STFC, Daresbury, Marea Britanie, utilizat pe scară largă la JYFL. Aceasta constă din 3 module NUTAQ VHS-ADC de 105 MSPS, ADC pe 14 biți și FPGA Virtex4, fiecare având 16 canale. Canalele sunt citite în mod asincron în mod single și fiecare eveniment este marcat în timp, utilizând un ceas extern. Sistemul este capabil să facă față ratelor mai mici de 30 kHz/ch.

Detectorii de germaniu hiperpur (HPGe) de tip Clover (CANBERRA EURO-BALL) reprezintă componenta de detecție principală a IDS. Acestea sunt compuse din 4 cristale HPGe cu diametrul de 50 mm și 70 mm lungime încapsulate în același criostat și oferă o foarte bună eficiență și rezoluție energetică pentru detectarea radiațiilor  $\gamma$ . Deoarece sunt folosite în fiecare experiment, a fost foarte importantă caracterizarea lor cu ajutorul simulărilor în GEANT4 pentru a descrie mai bine eficiența acestora.

---

Împreună cu nucleul compus din cei patru detectori HPGe de tip clover utilizați pentru detectarea radiațiilor  $\gamma$ , patru configurații diferite pot fi asamblate în funcție de cazul fizic studiat:

- spectroscopie  $\beta - \gamma$  de înaltă eficiență
- studii de masuratori de timpi de viață utilizând detectori LaBr<sub>3</sub>(Ce)
- spectroscopie de particule încărcate întârziate  $\beta$  folosind detectori de Si
- spectroscopie de neutroni întârziați  $\beta$

# Simulări Monte Carlo ale ISOLDE Decay Station

---

Datorită cererii ridicate de simulări în fizica particulelor, fizica nucleară, științe medicale și aplicate, un efort comun a fost făcut pentru a construi un pachet cuprinzător de simulare. Ca rezultat, pachetul GEANT4 (Geometry and Tracking) pentru simularea trecerii particulelor prin materie a fost creat, și este utilizat pe scară largă, disponibil în mod gratuit, actualizat și oferă biblioteci extinse de fizică și clase de design de geometrie. Oferă simulări bazate pe teorie, date sau parametrizare. Fenomenele fizice reproduse în GEANT4 pornesc de la interacțiuni hadronice de la energii termice până la 1 PeV, interacțiuni electromagnetice, precum și producerea și propagarea fotonilor optici. GEANT4, dezvoltat pentru prima oară în 1994-1998 de colaborarea RD44, a fost complet rescris în C++ cu un design modern comparativ la predecesorul său, GEANT3, datând din 1982 și scris în FORTRAN.

Un cod dedicat, G4IDS (Geant4 IDS), a fost creat pentru sistemul de detectori al IDS ca parte a acestei lucrări, pe baza pachetului GEANT4. Acesta reprezintă un efort comun depus de mine împreună cu Christophe Sotty (KU Leuven, IFIN-HH) și a avut ca punct de pornire un cod anterior elaborat de Florin Rotaru (IFIN-HH). Geometria cadrului de susținere și a detectorilor au fost atent definite, folosind modele din AutoCAD. Scopul principal al codului a fost de a evalua eficiența de detecție a detectorilor de la IDS, începând cu detectorii HPGe. Pe măsură ce sistemul IDS a devenit mai complex, alți detectori și camere de implantare au fost incluse în simulări, astfel încât ultima iterație a codului conține următoarele geometrii:

- 
- Detectori HPGe de tip clover
  - Detectori LaBr<sub>3</sub>(Ce)
  - Scintilatoare din plastic
  - Camera de implantare în formă de T pentru măsurători de timpi de viață
  - Camera de implantare a IS530 pentru spectroscopia  $\beta - \gamma$
  - Suportul detectorilor

Datorită implementării mai simple a geometriei detectorilor și posibilitatea de a rula codul G4IDS cu cea mai recentă versiune a lui GEANT4 (geant4.10.01.p02), acordul între măsurători și experiment a fost îmbunătățit comparativ cu versiunile anterioare, eroarea relativă fiind în jurul valorii de 5%. Trebuie remarcat că simulările nu sunt renormalizate pentru a se potrivi cu datele, ele reprezintă exact rezultatul plasării unui detector la distanța specificată de sursă.

O altă aplicație pentru codul G4IDS a fost găsirea unei soluții pentru reducerea fondului prezent în regiunea de energie înaltă ( $> 2$  MeV) a spectrelor HPGe în timpul experimentelor de spectroscopie la ISOLDE.

# Interpretarea teoretică a "Insulei de Inversie" de la $N=20$

---

Dispariția numărului magic  $N = 20$  în zona  $A = 32$  a produs una dintre cele mai vechi insule de inversie cunoscute, centrată pe  $^{32}\text{Mg}$ , dar granițele sale sunt încă necunoscute atât din punct de vedere experimental cât și teoretic. Interesul pentru nucleele cu  $N \sim 20$  bogate în neutroni datează de la măsuratoarea de masă a lui C. Thibault publicată în 1975 când a descoperit o regiune de deformare puternică în jurul  $^{31}\text{Na}$ , imposibil de descris prin modelul în pături *sd* la acel moment. Explicată calitativ de faptul că stările fundamentale sunt dominate de excitația neutronilor dincolo de închiderea de pături  $N = 20$ , această regiune a fost prin urmare etichetată "Insula de Inversie" de Warburton et. al in 1990.

În cadrul modelului în pături, termenul "inversie" se referă la faptul că stările  $2p - 2h$  (excitarea a două particule dincolo de închiderea de pătură) sunt energetic favorizate față de stările  $0p - 0h$  (fără excitări peste închiderea de pătură). Această inversare a stărilor produce efecte similare cu coexistența de formă cunoscută și caracterizată pe scară largă în nucleele mai grele și în vecinii lor. Trecerea la deformare rezultă din o combinație subtilă a unei reduceri a închiderii de pătură la  $N = 20$  și o creștere a corelațiilor cuadrupolare atunci când pătura de protoni  $0d_{5/2}$  este golită. Într-o descriere microscopică, configurația păturii închise are zero gauri de particule excitate ( $0p - 0h$ ), în timp ce configurația deformată are mai multe găuri cu mai multe particule  $np - nh$  excitate din pătura *sd* în *fp*.

Rezultatele experimentale recente cu privire la stările  $0_{1,2}^+$  în  $^{34}\text{Si}$  și  $^{32}\text{Mg}$  au confirmat descrierea în care o trecere între regimul normal și cel de tip intruder are

---

loc între aceste două nuclee. Cu toate acestea, având același spin, cele două stări  $0^+$  se amestecă probabil în fiecare nucleu, îngreunând determinarea punctului de trecere dintre configurațiile normale și cele intruder. Starea fundamentală a  $^{33}\text{Al}$  ( $N = 20$ ) este considerată în afara "Insulei de inversie"  $N = 20$ , deși trebuie notat faptul că un amestec semnificativ ( $\sim 50\%$ ) al configurațiilor de tip intruder a fost determinat pentru cazul acestei stări fundamentale. Prin urmare,  $^{34}\text{Al}$  ( $N = 21$ ) oferă un mare potențial pentru a explora această trecere din două motive: primul, deoarece au fost descoperite două stări ce se dezintegrează  $\beta$  având spini și parități  $4^-$  și  $1^+$  corespunzând configurațiilor normale și respectiv intruse. În al doilea rând, o discontinuitate a suprafeței  $S_{2n}$  a fost găsită între lanțurile Al și Mg la  $N = 21$ , sugerând o schimbare structurală.

# Studiul dezintegrării $\beta$ a $^{34}\text{Mg}$ la ISOLDE, CERN

---

Rezultatele raportate în acest capitol au fost extrase în urma experimentului IS530 care a avut loc în septembrie 2015 la ISOLDE și a reprezentat continuarea măsurării dezintegrării  $\beta$  a  $^{34}\text{Mg}$  efectuată în 2012. Unul dintre obiectivele principale ale studiului de față a fost acela de a afla care dintre cele două stări care se dezintegrează  $\beta$  în  $^{34}\text{Al}$  este starea fundamentală și care este diferența de energie dintre aceste două stări. Rezultatele au fost publicate deja în *R. Lica et al., Phys. Rev. C95, 021301 (2017)*. În cazul lui  $^{34}\text{Si}$ , a existat un mare interes în determinarea valorii  $B(E2; 2_1^+ \rightarrow 0_2^+)$  cu precizie îmbunătățită, indicând modul în care configurațiile normale și cele intruse sunt intercalate, în comparație cu calculele de model în pături care tratează nucleele folosind pătura de valență completă  $sd - pf$ . S-au extras totodată informații de interes astrofizic, cum ar fi timpul de înjumătățire al dezintegrării  $\beta$ , probabilitățile de emisie de neutroni și intensitățile absolute în lanțul de dezintegrare al  $^{34}\text{Mg}$ . Sistemul de detecție a constat din cinci detectori HPGe Clover în geometrie apropiată (patru la 75 mm și unul la 60 mm față de punctul de implantare) și a unui scintilator de plastic NE102 în forma dreptunghiulară având 3 cm grosime care acoperă un unghi solid în jurul punctului de implantare de 95%. Fascicolul de ioni radioactivi  $^{34}\text{Mg}$  a fost produs la instalația ISOLDE-CERN de către protonii accelerați de PS-Booster la 1.4 GeV și trimiși într-o țintă de carbură de uraniu (UCx). Atomii de magneziu au difuzat termic din țintă și au fost ionizați selectiv folosind RILIS. După ce a fost accelerat la 40 kV, fascicolul de masă  $A = 34$  a fost selectat cu separatorul GPS și, în final, implantat pe banda mobilă din centrul ISOLDE Decay Station (IDS).





# Interpretarea rezultatelor experimentale si compararea acestora cu calculele de model in pături

---

Calculele de model în pături folosind interacția SDPF-U-MIX au fost validate de-a lungul timpului prin rezultatele experimentale extrase pentru izotopii pari-pari unde configurațiile implicate au în mare parte structuri  $np - nh$  fixe. Trebuie remarcat faptul că atunci când are loc amestecul de configurații cu diferite structuri de găuri - particule, așa cum este cazul unor izotopi având  $N = 19$  și  $N = 21$ , diferite câștiguri în energie datorate corelațiilor încep să apară.

Echilibrul dintre pierderile energetice datorate interacției monopolare și câștigurile datorate corelațiilor sunt foarte delicate, prin urmare, există o dificultate crescută în predicția diferențelor de energie între benzile stărilor normale și cele intruse mai ales dacă acestea sunt mai mici de 100 keV. Acesta a fost cazul  $^{34}\text{Al}$ , unde diferența măsurată între cele două stări normale și intruse a fost de 46.6 keV și predicția calculelor de model în pături a supraestimat aceasta valoare cu  $\sim 450$  keV.

În cazul  $^{34}\text{Si}$ , stările calculate având parități negative sunt deplasate în energie față de cele experimentale, așa cum era deja cazul pentru  $^{30,32}\text{Mg}$ . Această deplasare provine probabil dintr-o închidere de pătura la  $N = 20$  supraestimată sau de corelații prea mari în starea fundamentală a  $^{34}\text{Si}$ . Această tendință este confirmată

---

de faptul că primele stări  $3^-$  și  $4^-$  sunt, de asemenea, supraestimate de calcule. Rezultatele experimentale prezente ale valorii  $B(E2; 2_1^+ \rightarrow 0_2^+) = 47(20)e^2 fm^4$  au fost comparate cu calcule de model în pături folosind diferite interacții și au confirmat faptul că starea fundamentală a  $^{34}\text{Si}$  este dominată de configurația sferică pe când următoarele stări excitate  $0_2^+$  și  $2_1^+$  sunt dominate de configurații de tip intrus.

