

UNIVERSITATEA "POLITEHNICĂ" din BUCUREȘTI FACULTATEA DE ȘTIINȚE APLICATE Nr. Decizie _____ din _____

TEZĂ DE DOCTORAT

HIGH-PRECISION NUCLEAR SPECTROSCOPY IN NI ISOTOPES AND DATA ANALYSIS TECHNIQUE DEVELOPMENT

(SPECTROSCOPIE NUCLEARĂ DE MARE PRECIZIE A IZOTOPILOR DE NICHEL ȘI DEZVOLTARE DE METODE DE ANALIZĂ DE DATE)

Doctorand: Fiz. Lucian STAN

Președinte	Prof. dr. Cristina STAN	de la	Univ. Politehnică
			București
Conducător	Prof. Dr. Gheorghe CĂTA-DANIL	de la	Univ. Politehnică
de doctorat			București
Referent	Prof. dr. Mihaela SIN	de la	Univ. București
Referent	CS I Dr. Nicolae Marius	de la	INCD Fizică și Inginerie
	MARGINEAN		Nucleară "Horia Hulubei"
Referent	CS II Dr. Constantin MIHAI	de la	INCD Fizică și Inginerie
			Nucleară "Horia Hulubei"

COMISIA DE DOCTORAT

BUCUREȘTI 2021

CHAPTER 1

Structura nucleară în vecinătatea închiderilor de pătură

1.1 Dovezi pentru existența păturilor nucleare

În chimie și fizica atomică, gazele nobile au cea mai mică reactivitate chimică dintre toate elementele. Această particularitate a dus la noțiunea că electronii se aranjează în pături când sunt parte a unui atom, iar gazele nobile corespund închiderilor acestor paturi. Aceaste este una dintre pietrele de temelie ale chimiei.

Un pas mai departe, în tărâmul nuclear, evoluția structurii intrinseci a nucleului cu N și Z sugerează un tipar similar de umplere a păturilor nucleare pentru anumite numere de protoni și neutroni. Una din diferențele față de modelul atomic este existența a două pături diferite, una pentru neutroni și una pentru protoni care, deși interacționează puternic, pot fi văzute, până la un punct, ca separate și independente.

Pentru nucleele par-pare, cu puține excepții în tabelul izotopilor, prima stare excitată este 2⁺, provinind din ridicarea unei perechi de nucleoni pe un orbital superior. O caracteristică a nucleelor magice este că această primă stare excitată este la o energie mai înaltă în comparație cu vecinii săi. Acest lucru este și mai evident pentru nucleele dublu magice, pentru care atât protonii, cât și numerele de neutroni, sunt magice.

Numeroase alte sistematici indică faptul că o schimbare structurală are loc în apropierea numerelor magice, cum ar fi raportul energiilor primelor state excitate de 4⁺ și 2⁺ pentru nucleele par-pare, care are un minim aproape de numerele magice, și probabilitațile de tranziție între primul 2⁺ și starea fundamentală, $B(E2, 2^+ rightarrow0^+)$, care prezintă în mod similar minime la numerele magice.

Astfel, trasând o paralelă cu cazul atomic și cu păturile de electroni, datele experimentale și evoluția structurii nucleare indică faptul că neutronii și protonii se aranjează separat în pături care se închid când Z sau N ating un număr magic. Acesta este principiul de bază al modelului păturilor nucleare.

Cu toate acestea, o astfel de corespondență nu este ușor de făcut. Electronii din atomi orbitează (în lipsa unui termen mai bun) în jurul nucleului, a cărui sarcină pozitivă creează potențialul electric care guvernează păturile atomice. Acest lucru nu este cazul pentru nuclee, pentru care potențialul central este dat de păturile închise anterior și o descriere a interacțiunii nucleon-pătură este cu siguranță netrivială.

1.2 Modelul în pături

Cea mai simplă formă a modelului în pături este modelul particulelor independente, care se aplică doar în apropierea numerelor magice. În această reprezentare, nucleonii de valență se mișcă într-un potențial central sferic generat de miez. Orbitele încep să fie umplute de jos în sus într-o manieră secvențială, separat pentru protoni și neutroni. Mișcarea nucleonilor de valență este văzută ca fiind "independentă", ceea ce înseamnă că nu sunt influențați de alți nucleoni de valență sau de nucleonii din păturile închise, cu excepția potențialului central.

Primul test al modelului în pături a fost găsirea unui potențial sferic care să permită reproducerea exactă a numerelor magice observate. Un astfel de potențial a fost propus pentru prima dată de Maria Goeppert Mayer and co. în 1949 și poate fi scris astfel:

$$V(r) = \frac{1}{2}\hbar\omega r + V_{l^2}l^2 + V_{ls}\vec{l}\vec{s}$$
(1.1)

Spinul și paritatea stării fundamentale, precum și momentul dipolar magnetic și momentul cvadrupolar electric sunt date de nucleonii și găurile de valență rămase, la fel ca și cele ale stărilor excitate care sunt create prin excitarea nucleonilor de valență la niveluri superioare. În cazul evident când numărul oricărui tip de nucleoni este foarte aproape de următoarea închidere a învelișului, dar mai mic, sistemul se aranjează ca și cum învelișul ar fi închis, cu particule imaginare numite găuri pe ultimul nivel care urmează să fie completat.

După introducerea cuplajului puternic spin-orbită și cu parametrii aleși în mod corespunzător, modelul în pături a fost capabil nu numai să reproducă corect numerele magice existente, ci și spinii, momentele magnetice și alte proprietăți nucleare ale unui număr de nuclee. Aceasta s-a dovedit a fi o descoperire majoră în înțelegerea fizicii nucleare și a pregătit calea pentru dezvoltările ulterioare.

Cu toate acestea, potențialul din ecuația 1.1 a cedat loc altor abordări de câmp care reproduc mai bine anumite proprietăți nucleare pe o gamă mai largă de nuclee. Acestea pornesc de la o interacțiune efectivă, practic o forță bi-nucleonică care este parametrizată în funcție de proprietățile care trebuie prezise și de nucleele care sunt investigațe. Apoi, această interacțiune efectivă este utilizată pentru a obține un potențial care poate fi apoi utilizat în calculele modelului în pături.

Modelul particulelor independente prezentat mai sus a fost un succes extraordinar pentru fizica structurii nucleare și deține încă un scop didactic important, dar puterea sa de predicție acoperă o paletă largă, dar limitată, de proprietăți al unui număr limitat de nuclee.

Cu toate acestea, considerații simple pot fi în continuare utile în determinarea spinilor și parităților stărilor de bază și a stărilor excitate ale nucleelor apropiate de închiderea păturilor, cum ar fi faptul că este mai favorabil din punct de vedere energetic ca perechile de nucleoni să își cupleze momentul unghiular la j = 0.

Trebuie remarcat faptul că, departe de valea de stabilitate, pentru nucleele exotice, alte aspecte ale complicatei forțe nucleare, cum ar fi partea tensorială, pot duce la eroziunea numerelor magice cunoscute, la dispariția lor și la formarea altora noi. Acest lucru este cunoscut sub numele de "evoluția păturilor".

1.3 Închiderea păturilor de la Z = 28

Numărul magic 28 este o consecință directă a cuplajului puternic spin-orbită. Aceast cuplaj elimină degenerarea, ducând la împărțirea păturii 1f în două, din care $1f_{7/2}$, care are aliniată l și s paralel și deci un potențial atractiv mai puternic, scade semnificativ în energie, pătrunzând în golul dintre perechile de pături 1d-2s și 1f-2p. Deoarece nivelul $1f_{7/2}$ poate deține până la 2j + 1 = 8 nucleoni deasupra învelișului anterior închis de 20, acest lucru creează numărul magic 28.

Elementul cu 28 de protoni se numește nichel, care este un metal de tranziție. Nichelul are 5 izotopi stabili. Lista actuală de izotopi cunoscuți este cuprinsă între nucleele dublu magice ⁴⁸Ni și ⁷⁸Ni, acoperind 32 de nuclizi. Izotopii Ni par-pari între N = 28 și N = 40 au stări excitate 0⁺ relativ joase, cu energii cuprinse între 1,5 și 5 MeV. Fiecare izotop din această regiune are cel puțin două astfel de stări identificate, unele având trei.

1.4 Modelarea nucleelor Ni

Izotopii Ni au fost ținte atractive pentru modelarea structurii nucleare și investigațiile teoretice încă din primele zile ale modelului în pături. Având un număr magic de protoni și cu trei izotopi dublu magici și un izotop magic-semi-magic, lanțul izotopic Ni a fost important nu numai pentru dezvoltarea și verificarea Modelului în pături și a nenumăratelor sale îmbunătățiri, ci și pentru observarea și studiul unor fenomene precum coexistența de formă și evoluția păturilor nucleare.

De exemplu, doar privind izomerismul de formă și căutarea apariției sale în nuclee de greutate medie, au fost făcute numeroase încercări de-a lungul anilor. Una dintre cele mai importante dezvoltări este modelul în pături Monte Carlo prin metoda diagonalizării cuantice Monte Carlo. Acesta este utilizat pentru a rezolva sisteme cuantice cu interacțiuni de două corpuri. Spre deosebire de calculele obișnuite ale modelului în pături, în care elementele de matrice trebuie calculate pentru toate perechile posibile de determinanți Slater în spațiul Hilbert, metoda QMCD se bazează pe alegerea vectorilor de bază adecvați pentru calcularea valorilor proprii.

Primele stări sunt determinate prin alte metode. Apoi se creează un nou vector de bază folosind o anumită valoare a variabilei, σ_1 . Hamiltonianul este diagonalizat în spațiul creat de vectorii de bază anteriori existenți și de noul vector. Valoarea proprie a energiei obținută cu noul vector și fără este apoi comparată. Dacă noul vector de bază scade suficient valoarea proprie a energiei, atunci se adaugă la setul de vectori de bază. Acest proces se repetă până când sunt disponibili suficienți vectori de bază pentru a obține valori proprii rezonabile. Cu toate acestea, deoarece procedura selectează doar cei mai importanți vectori de bază, diagonalizarea hamiltionianului în subspațiul definit de acești vectori este mult mai ușoară din punct de vedere al calculului, deoarece minimizează dimensiunea subspațiului prin eliminarea componentelor mai puțin importante.

Cu toate acestea, chiar dacă adăugarea unor noi vectori de bază îmbunătățește valoarea proprie a energiei, aceasta nu atinge cu adevărat o precizie perfectă decât dacă numărul de vectori de bază este suficient de mare. Pentru a lua in considerare acest lucru, trebuie utilizată o extrapolare. Acest lucru se realizează prin ajustarea funcției energie-varianță a energiei pentru un număr suficient de mare de vectori de bază.

Marile avantaje ale modelului Monte Carlo Shell sunt că poate trata o mare varietate de stări în același spațiu de model și cu același hamiltonian și faptul că poate face calcule cu un număr relativ mare de nucleoni de valență.

Izotopii Ni de interes din această teză necesită simularea păturii complete pf, incluzând uneori și orbitele $g_{9/2}$ și $d_{5/2}$. MCSM nu numai că poate prezice energiile de legătură, energiile nivelurilor excitate, spinii și paritățile, probabilitățile de tranziție reduse, ci și deformările stărilor și alcătuirea lor. Acest lucru se face diagonalizând matricea cuadrupolară a fiecărui vector de bază pentru starea investigată, oferind momentele cuadrupolare Q_0 și Q_2 .

1.5 Cuplajul particulă-fonon

Mai departe de numerele magice, adăugarea atât a neutronilor de valență, cât și a protonilor duce la interacțiuni reziduale mari, iar orbitele unei singure particule date de modelul sferic în pături nu mai sunt în conformitate cu datele experimentale. Pentru astfel de sisteme nucleare, au fost necesare noi abordări pentru a face predicții într-un mod mai ușor și mai transparent din punct de vedere fizic, cum ar fi modelele colective, care se concentrează pe "comportamentul de grup" al nucleonilor.

Tratarea unor astfel de vibrații și rotații ale unui nucleu dintr-un punct de vedere microscopic este dificilă. Cu toate acestea, adăugarea anumitor concepte poate simplifica înțelegerea și utilizarea acestor tratamente colective, cum ar fi fononul. Fononii sunt particule virtuale care pot fi utilizate pentru a simplifica calculele. Aceștia se comportă ca bosoni, având valori de spin întregi. Mai mulți bosoni, identici sau nu, pot exista în același timp, iar impulsul lor unghiular total poate fi calculat folosind schema m. Mai mult, distrugerea unui fonon este însoțită de emisia unei raze γ , la fel ca în cazul particulelor care își schimbă orbita.

Pentru izotopii dublu magici, este dificil să fie excitați nucleoni pe orbite superioare, așa cum este demonstrat de energiile mari de excitație ale nivelurilor de 2⁺ din astfel de nuclee. În plus, deoarece toate nucleele dublu magice sunt sferice și nu sunt deformate, nu pot exista excitații de rotație. Cu toate acestea, vibrațiile nucleonilor pot oferi un mod mult mai puțin energic de a excita astfel de nuclee. Pentru nucleele care sunt aproape de izotopi dublu magici, excitațiile unei singure particule pot fi cuplate la aceste vibrații colective, creând un cuplaj particulă-fonon. Acest lucru creează un număr de stări bazat pe algebra momentului unghiular a cuplării fononului și a particulelor. Identificarea și studiul unor astfel de stări este complicată, deoarece atât excitațiile nucleului, cât și structura nucleului investigat trebuie să fie bine cunoscute.

1.6 Izomerism de formă

În fizica nucleară, izomerii sunt stări nucleare excitate care au o durată de viață care se întinde pe o gamă largă, de la nanosecunde la ani și mai mult. Durata lungă de viață (comparată cu scara nucleară) a izomerilor nucleari se datorează împiedicării dezexcitării stării nucleare excitate de anumite fenomene.

Izomeria de formă este un alt tip de mecanism care poate duce la crearea izomerilor nucleari. Pentru anumite nuclee, energia potențială prezintă un minim secundar pentru o anumită deformare. Acest lucru împiedică dezexcitarea γ către starea fundamentală, ducând la izomeri de lungă durată.

Cu toate acestea, fenomenele de tip izomerism de formă au fost descoperite recent într-o regiune de masă mult mai ușoară. ⁶⁶Ni, un nucleu proton-magic, are patru stări 0⁺ identificate. Dintre acestea, probabilitățile de tranziție reduse de la al treilea nivel (prolat) la primul 2⁺ s-au dovedit a fi destul de mici, indicând o întârziere semnificativă. Întârzierea tranziției de la a treia stare excitată poate fi explicată printr-o barieră considerabilă de potențial între această stare prolată și starea de bază sferică.

CHAPTER 2

Spectroscopie γ în reacțiile de transfer de neutroni sub bariera Coulomb

2.1 Reacții de transfer al neutronilor

Reacțiile de transfer de neutroni constau în schimbul de neutroni între proiectil și nucleul țintă. Neutronii pot fi transferați de la proiectil la nucleul țintă (stripping) sau viceversa (pick-up). Reacțiile de stripare a neutronilor permit examinarea nucleelor bogate în neutroni, aproape de valea de stabilitate.

Cu aproximativ cinci ani în urmă, grupul de structură nucleară de la IFIN-HH a inițiat un program experimental constând în studii de spectroscopie efectuate folosind fascicule neutrono-excedentare la energii sub bariera Coulomb. Experimentul ⁶²Ni (¹³C, ¹²C) ⁶³Ni a fost primul dintr-o serie de experimente de transfer efectuate la acceleratorul Tandem de 9 MV folosind spectrometrul RoSphere în configurația sa mixtă.

Reacțiile de transfer de neutroni aparțin categoriilor directe și intermediare ale reacțiilor nucleare. Reacțiile cu o singură etapă se caracterizează printr-un număr mic de interacțiuni nucleonice la suprafața nucleelor implicate și nu în volumul lor. Reacțiile sunt, de asemenea, semnificativ mai rapide decât omologii lor din nucleul compus.

Reacțiile de transfer de neutroni tind să fie favorizate de valorile Q care sunt aproape de zero. Dacă există energie suplimentară disponibilă, astfel de reacții vor favoriza popularea stărilor excitate până la un nivel în care se consumă cea mai mare parte a energiei disponibile. Pentru experimentele de spectroscopie γ , aceasta oferă un stimulent pentru creșterea energiei fasciculului, care este contrabalansată de deschiderea canalului de fuziune peste bariera Coulomb. Concluzia logică este utilizarea energiilor fasciculului puțin sub bariera Coulomb.

În cazul unei reacții de transfer, în sistemul de referință al laboratorului, nucleul țintă greu este considerat static și proiectilul ușor se mișcă cu o energie cinetică de câteva zeci de MeV.

Unele aspecte ale unei astfel de reacții sunt demne de remarcat. Spre deosebire de cazul fuziune-evaporare, nucleele reziduale nu apar cu o singură energie cinetică bine definită, ci cu o gamă de energii cinetice care depinde de detaliile cinematicii reacției. În mod similar, direcția vitezei nu este determinată în mod unic, ci formează un con centrat pe direcția fasciculului.

2.2 Dependența populării de valoarea Q

Numărul de reacții de transfer care pot fi imaginate este pe atât mare pe cât îl va purta imaginația experimentatorului. Cu toate acestea, nu toate aceste procese sunt posibile și chiar și cele permise de regulile de conservare care guvernează tărâmul nuclear pot avea secțiuni eficace semnificativ reduse care le fac inutilizabile în practică.

Una dintre cerințele cele mai des citate pentru secțiuni eficace de reacție ridicate este ca distanțele clasice de apropiere între cele două nuclee să fie similare în cazurile inițiale și finale. Acestea sunt strâns legate de funcțiile de undă radială Coulomb, care fac parte din integrala care determină amplitudinea DWBA, care este ea însăși proporțională cu secțiunea reacției. Dacă cele două distanțe de apropiere sunt similare ca valoare, atunci cele două funcții de undă radială Coulomb se vor suprapune, iar integralala amplitudinii DWBA va avea o valoare mare.

Pentru reacțiile de transfer de neutroni, valorile Q mai mici sunt favorizate față de cele mai mari, în ciuda faptului că există mai puțină energie disponibilă pentru a depăși bariera Coulomb. Pentru experimentele de spectroscopie nucleară, popularea stărilor excitate din nucleul rezidual este de interes. Desigur, pentru a popula astfel de stări excitate, sistemul trebuie să aibă suficientă energie disponibilă, constând din suma valorii Q și o fracțiune din energia cinetică incidentă. Orice stare situată peste această valoare va fi inaccesibilă prin reacția dată.

Popularea stărilor excitate, în conformitate cu regulile de selecție, este limitată în continuare de condițiile date de impulsul unghiular transferat. Reacțiile de transfer, care implică viteze relative scăzute ale țintei și proiectilului, tind să maximizeze transferul momentului unghiular.

Reacțiile de transfer de neutroni populează selectiv stările nucleare care pot fi privite ca o cuplare între nucleu și neutronul, gaura sau grupul transferat pe o anumită orbită. Reacțiile de transfer de neutroni și protoni care duc la același nucleu rezidual vor duce, de obicei, la popularea unor niveluri diferite.

2.3 Metoda atenuării Doppler

În cazul radiației electromagnetice, efectul Doppler se manifestă ca o deplasare a lungimii de undă (și deci, a energiei) a cuantelor observate atunci când sursa are o viteză radială față de observator.

Acest fenomen poate fi utilizat pentru a obține durate de viață a nivelelor nucleare de ordinul a $10^{-14} - 10^{-11}$ secunde în experimentele cu reacții nucleare.

Conservarea energiei într-o reacție nucleară cu un fascicul accelerat duce la faptul că nucleul rezidual va avea o energie de recul semnificativă. Dacă nucleul este produs într-o stare excitată, viteza poate fi suficient de mare pentru a observa o deplasare Doppler a energiei fotonului γ .

Pentru a observa cel mai bine deplasarea Doppler în reacțiile nucleare, este de dorit o energie de recul cât mai mare (și, prin urmare, o energie a fasciculului mai mare), un unghi de observare cât mai aproape de 0° sau 180°, detectori cu o bună rezoluție energetica și raze γ cu energie mare.

Există două metode principale prin care deplasarea Doppler poate fi utilizată pentru a determina durata de viață a stărilor nucleare în experimentele cu reacții nucleare, Metoda atenuării Doppler și Metoda distanței de recul.

Metoda atenuării Doppler (DSAM) este utilizată pentru a determina timpii de viață de ordinul a $10^{-14} - 10^{-11}$ secunde. Astfel de timpi de viață sunt comparabili cu timpul de oprire a nucleului care călătorește în țintă în unele reacții. Aceasta înseamnă că cel puțin o fracțiune din razele gamma vor fi emise înainte ca nucleul să fie oprit prin interacțiunea sa cu restul țintei, iar acestea vor fi deplasate Doppler.

Astfel, energia deplasată Doppler va fi

$$E_{sh}(t) = E_0 \left\{ 1 + \frac{v(t)}{c} * \cos(\theta(t)) \right\}$$
(2.1)

unde $E_{sh}(t)$, v(t) și $\theta(t)$ depind de timpul trecut de la reacție. Există două metode de extragere a vieții nucleare din datele DSAM. Primul folosește energia detectată medie a razelor γ la un anumit unghi pentru a extrage factorul de atenuare. A doua metodă de extragere a duratei de viață nucleare folosind DSAM este folosirea fitării formei de linie.

Analiza DSAM în reacțiile de transfer de neutroni este ușor complicată de problema cinematică. Deoarece starea finală a unei astfel de reacții implică două nuclee, nucleul rezidual și ejectilul, impulsul rezidual nu mai este la fel de bine definit ca în reacțiile de fuziune.

2.4 Metodele de distanță de recul

Metoda distanței de recul utilizează o țintă subțire și un opritor plasat la o anumită distanță în spatele țintei. Datorită grosimii mici a țintei, în urma reacției nucleare, nucleul rezidual este expulzat din țintă, călătorind spre opritor.

După ce nucleul rezidual iese din țintă, acesta se va deplasa spre opritor până când îl lovește. Acesta este plasat la o distanță stabilită în spatele țintei. Raportul dintre distanța opritor-țintă și viteza reziduală va da timpul de zbor. Dacă nucleul rezidual este într-o stare excitată după reacție, acesta poate dezexcita fie în zbor, între țintă și opritor, fie în repaus, după ce a ajuns la opritor. Dacă este emisă în zbor, energia γ va fi măsurată cu o deplasare Doppler. Dacă este emis în repaus, nu va exista o deplasare Doppler.

Luând în considerare viteza nucleului și distanța țintă-opritor, durata de viață poate fi extrasă din raportul de raze gamma deplasate Doppler la numărul de raze γ nedeplasate provenite din aceeași tranziție. Acest raport este de obicei măsurat pentru mai multe distanțe țintă-opritor.

Cazul de mai sus se aplică nivelurilor care au doar populare directă. Cu toate acestea, dacă sunt prezente atât popularea directă, cât și cea laterală, imaginea devine puțin mai complicată. Astfel, pentru un nivel excitat în care toate nivelurile de mai sus sunt alimentate direct, numărul de raze γ emise după lovirea opritorului este

$$N_{oprit} = N(t) + \sum_{i} b_i N_i(t)$$
(2.2)

unde N_{oprit} este numărul de raze γ emise în repaus de nivelul de interes, N(t) este numărul de nuclee aflate încă în starea excitată de interes la atingerea opritorului, $N_i(t)$ este numărul de nuclee care au rămas în stări excitate care alimentează nivelul de interes și b_i este ramificarea de la stările excitate superioare la nivelul de interes.

Cunoscând timpul de viață a nivelurilor superioare, rapoartele de ramificare și raporturile de intensitate directă a populării, durata de viață a nivelului de interes poate fi calculată prin fitarea datelor cu funcția de mai sus. Trebuie acordată o mare atenție propagării erorilor, mai ales că duratele de viață determinate nu sunt independente (dacă τ_i a fost determinat folosind τ_i).

2.5 Aliniere și corelații unghiulare

Determinarea spinilor și parităților stărilor excitate obținute în reacțiile nucleare este o parte importantă a muncii efectuate cu spectrometrul RoSphere. Aceste caracteristici fizice importante pot fi obținute din timpul de viață a stărilor sau din comparații cu modele teoretice.

Cu toate acestea, aceste metode indirecte nu dau întotdeauna rezultate exacte sau unice, ceea ce poate duce la ambiguități sau greșeli în atribuirea spinilor și parităților în schemele de nivel finale.

Prezența mai multor detectori la unghiuri polare și azimutale diferite în raport cu

axa fasciculului oferă oportunități semnificative pentru corelații unghiulare.

In reacțiile nucleare de tipul celor utilizate la acceleratorul Tandem de 9 MV, un fascicul de ioni nepolarizat accelerat lovește o țintă nepolarizată. Cu toate acestea, direcția fasciculului definește o axă de polarizare pentru nucleele rezultante, care ajung într-o stare de polarizare simetrică axial.

O rază γ emisă dintr-o astfel de stare are o distribuție un
ghiulară care poate fi scrisă ca

$$W(\theta) = \sum_{\lambda \, even} B_{\lambda}(I) A_{\lambda}(\gamma) Q_{\lambda}(\gamma) P_{\lambda}(\cos \theta)$$
(2.3)

unde $B_{\lambda}(I)$ sunt parametrii de aliniere, $A_{\lambda}(\gamma)$ sunt coeficienții de distribuție unghiulară, $Q_{\lambda}(\gamma)$ sunt factorii de corecție a unghiului solid și $P_{\lambda}(\cos \theta)$ sunt polinoamele Legendre. Cu toate acestea, când se fac măsurători experimentale, primii trei termeni sunt grupați în coeficienți pentru polinoamele Legendre care pot fi extrași din distribuțiile măsurate. Mai mult decât atât, numai termenii dipol și cuadrupol sunt luați în considerare de obicei, deoarece termenii de ordin superior sunt neglijați, fiind de obicei foarte mici

$$W(\theta) = a_0 + a_2 P_2(\cos \theta) + a_4 P_4(\cos \theta) \tag{2.4}$$

Cu toate acestea, informații pot fi obținute prin detectarea a două raze γ care sunt succesive într-o cascadă, împreună cu detectarea direcției lor relative. Aceasta este metoda corelațiilor $\gamma - \gamma$ unghiulare. Dacă starea inițială are un fel de orientare (cum ar fi simetria axială), atunci metoda se numește Corelații direcționale din stări orientate (DCO).

Cu toate acestea, pentru configurații experimentale precum RoSphere, unghiurile polare și azimutale ale detectoarelor nu sunt la alegerea cercetătorului. Astfel de configurații multi-detector prezintă alte oportunități. Numărul mare de detectori duce la un număr impresionant de perechi de detectori care pot înregistra razele γ . Datorită simetriei axiale a setului și a amplasării detectorilor, aceste perechi de detectori pot fi apoi aranjate în grupuri pe baza pozițiilor lor relative, pentru care se pot crea matrici $E_{\gamma} - E_{\gamma}$. Fiecare grup corespunde unui anumit set de parametri $\theta_1, \theta_2, \varphi_2 - \varphi_1$. Valorile experimentale obținute permit o fitare a funcției lor de corelație direcțională și astfel se pot obține spinii stărilor și raporturile de amestecare ale tranzițiilor care le conectează.

CHAPTER 3

Pachet software de amestecare a evenimentelor pentru corelații unghiulare în reacțiile de transfer

Greutatea medie a izotopului ⁶³Ni și poziția sa în valea de stabilitate au făcut din acesta un subiect atractiv de cercetare și experiment în ultimele șapte decenii. Intrarea pentru ⁶³Ni din baza de date ENSDF conține date evaluate de la nu mai puțin de 36 de articole diferite cuprinse între 1956 și 2012. Baza de date XUNDL conține date încă neevaluate din alte cinci articole cuprinse între 2011 și 2017.

În 2015, în timpul unei pauze în campania experimentală, a fost efectuat un test folosind aranjamentul experimental RoSphere și acceleratorul Tandem 9MV. Un fascicul de ¹³C a fost accelerat și a lovit o țintă de ⁶² Ni. Energia fasciculului a fost aleasă să fie 28 MeV, puțin sub bariera Coulomb. ⁶³ Ni a fost produsul de reacție pe care testul a urmărit să-l studieze, produs în reacția ⁶²Ni (¹³C, ¹²C) ⁶³Ni. Datorită unor întârzieri suferite de experimentul care ar fi trebuit să urmeze, experimentul de test a fost menținut timp de 5-6 zile. Testul a fost un succes, generând zeci de noi propuneri și experimente care au folosit reacții de transfer în anii următori.

Datorită timpului fasciculului mai lung decât era așteptat și a numărului mare de detectori din RoSphere, a fost posibil să se măsoare proprietățile unui număr de stări excitate din ⁶³Ni utilizând măsurători de timp rapide sau DSAM pentru durate de viață și corelații unghiulare pentru determinarea spinilor și parităților.

Pentru experimentul inițial, RoSphere se afla în configurația standard a acelei perioade, montând 14 detectori cu semiconductor HPGe cu scuturi anti-Compton. Detectorii HPGe au fost plasați după cum urmează: 5 detectori în inelul de 37° , 5 detectori în inelul de 143° , 3 detectori în inelul de 90° și ultimul în inelul 110° . ținta utilizată a fost un strat izotopic auto-susținut de 10 mg/cm^2 de ^{62}Ni .

În ciuda abundenței de experimente care au studiat structura nucleară a ⁶³Ni, schema sa de nivel de spin jos nu este bine cunoscută. Profitând de rezoluția energetică excelentă a detectorilor HPGe din matricea RoSphere, împreună cu capacitatea de a înregistra informații de coincidență de la acești detectori, am reușit să extindem semnificativ schema de nivel cunoscută. 24 de tranziții noi care nu au fost identificate până la această lucrare și trei tranziții sunt doar provizorii au fost adăugate. Toate stările implicate în aceste tranziții erau deja cunoscute din experimente anterioare, deși energiile lor de excitație evaluate aveau adesea mari incertitudini, de ordinul a 10 keV. Măsurătorile noastre permit determinarea acestor energii de excitație cu o precizie mult mai bună.

Folosind informațiile de coincidență obținute din matricile γ - γ împreună cu intensitățile, noile tranziții γ au fost plasate în schema de nivel, așa cum se poate vedea în Fig.3.1. Faptul că plasarea noilor tranziții a fost compatibilă cu informațiile deja disponibile despre stările excitate din ⁶³ Ni conferă încredere suplimentară sarcinilor noastre.



Figure 3.1: Schema de nivel a ⁶³Ni obținută din acest experiment. 24 de tranziții noi au fost identificate și plasate în schema de nivel și sunt reprezentate cu roșu. Încă trei tranziții sunt doar provizorii datorită statisticii foarte scăzute.

Intensitățile corectate pentru eficiență au fost, de asemenea, extrase din date, permițând calcularea rapoartelor de ramificare și a rapoartelor directe de populare, care au fost apoi utilizate în determinările duratelor de viață prin metoda DSAM.

Doar câteva dintre nivelurile excitate cunoscute au durata de viață măsurată.

Având în vedere capacitățile excelente de timp și rezoluție energetică ale spectrometrului ROSPHERE, am putut extrage timpii de viață folosind DSAM și tehnici de fast timing. Pentru măsurătorile DSAM, măsurătorile au fost efectuate utilizând două metode, fitarea liniei și schimbarea poziției centroidului.

Duratele de viață obținute au fost utilizate pentru a extrage probabilitățile de tranziție reduse și pentru a determina caracterul tranzițiilor γ și, astfel, fie pentru a determina, fie pentru a restricționa spinii și paritățile stărilor implicate.

Spinii și paritățile unui număr de stări excitate deja cunoscute din ⁶³Ni ere deja determinați în experimentele anterioare, în timp ce pentru alții sunt disponibile doar valori provizorii. Experimentul întreprins folosind spectrometrul RoSphere a prezentat o oportunitate excelentă pentru a verifica și extinde aceste atribuiri.

Numărul mare de detectori și de unghiuri detector-detector disponibile înseamnă că datele experimentale actuale sunt adecvate pentru corelații unghiulare și analize DCO. Pentru aceasta, combinațiile posibile de treisprezece dintre detectorii HPGe disponibili au fost împărțite în unsprezece grupuri DCO pe baza unghiului dintre detectori și a celui față de fascicul.

Pentru fiecare dintre cele unsprezece grupuri definite, trebuiau sortate matrici separate γ - γ . Pentru normalizare, au fost utilizate programul Jumbler și procedura de amestecare a datelor pentru normalizarea datelor prezentate în Cap.5. Au fost pregătite două seturi de unsprezece matrici de grup, aranjate într-un cub index- $E_{\gamma_1} - E_{\gamma_2}$. Primul set, denumit în continuare setul de date, a reprezentat împărțirea datelor în cele unsprezece grupuri DCO, cu porțile de timp necesare.

Au fost investigate toate perechile posibile de tranziții γ din Fig.??. Cu toate acestea, doar 32 de astfel de perechi au putut fi analizate, în timp ce altele nu au putut fi investigate din cauza statisticii slabe.

Pentru fiecare pereche de tranziții γ , porțile pe tranziție și de fundal, împreună cu factorii de arie, au fost introduse într-un program Bash pentru a extrage intensitățile grupului. Trebuiau selectate, de obicei, porți de normalizare separate, folosind tranziții intense γ nedeplasate din spectrul experimental. Scriptul extrage, de asemenea, valorile de normalizare și le aplică intensităților grupului pentru a extrage intensitățile normalizate. A fost efectuată și propagarea erorilor.

După obținerea intensităților normalizate pentru cele unsprezece grupuri, acestea au fost introduse în programul Corleone, împreună cu unghiurile relevante pentru grupuri. Pentru a le fita, trebuiau introduse ipoteze pentru spinii celor trei niveluri implicate. Programul produce apoi o serie de soluții posibile, fiecare cu o valoare χ^2 , lățimea distribuției de spin (σ) și raporturile de amestecare pentru cele două tranziții. Dacă este necesar, lățimea distribuției de spin sau raporturile de amestecare puteau fi blocate la o anumită valoare.

Pentru cele 16 niveluri excitate cercetate, au fost selectate o serie de ipoteze de spin și apoi testate prin fitarea cu programul Corleone. Analiza a fost făcută de la



Figure 3.2: Fituri pentru formele de linie DSAM din partea de spini josi ai schemei de nivel ⁶³Ni. Spectrele de la detectorii din față și din spate se află în dreapta și, respectiv, în stânga. Energiile de tranziție și duratele de viață obținute sunt marcate pe fiecare grafic.

partea de jos a schemei de nivele în sus. Pentru fiecare combinație de ipoteze de spin, soluțiile posibile au fost înregistrate într-un tabel pentru verificare încrucișată ulterioară. Soluțiile au fost considerate posibile dacă au valori fizic compatibile pentru lățimea distribuției de spin și erorile rapoartelor de amestecare.

După ce s-au adunat toate soluțiile, acestea au fost verificate încrucișat pentru compatibilitate. Cascadele care trec prin același nivel trebuiau să fie compatibile cu aceeași atribuire de spin pentru acel nivel. În mod similar, raporturile de amestecare pentru fiecare tranziție trebuiau să fie compatibile între diferitele cascade care conțin acea tranziție.

In urma acestei proceduri, s-au obținut valori de spin definitive pentru 9 din cele 16 niveluri din schema ⁶³Ni. 5 dintre acestea sunt de acord cu valorile din literatură. Pentru 3 dintre aceste niveluri excitate, spinul a fost în acord cu valoarea provizorie dată în literatură. Pentru unul dintre aceste niveluri, nu au existat valori anterioare în literatură.

Dintre celelalte 7 niveluri, pentru 5 dintre ele, mai multe atribuiri de spin erau compatibile cu datele. 3 dintre ele erau compatibile cu 2 atribuiri diferite de spin, în timp ce pentru 2 dintre ele, 4 atribuiri de spin erau de acord cu datele.

Dintre cele 37 de tranziții γ din schema de niveluri, rapoartele de amestecare au putut fi atribuite pentru 14 dintre ele. În toate cele 14 cazuri, valoarile raportului de amestecare au fost în acord pentru toate cascadele investigate. Pentru fiecare tranziție γ , valoarea raportului de amestecare este rezultatul unui fit prin toate rapoartele de amestecare disponibile din toate cascadele în care este prezentă.

Din păcate, pentru 11 dintre tranzițiile din schema de nivel, raportul de amestecare nu a putut fi determinat, deoarece cel puțin unul dintre spinii nivelurilor excitate implicate nu a fost identificat în mod unic. În funcție de atribuirea acestui spin pentru aceste niveluri, raportul de amestecare ar fi fost diferit. Deoarece spinul nu a putut fi determinată cu datele disponibile, nici raportul de amestecare nu a putut fi determinat.

Pentru celelalte 12 tranziții, statistica a fost insuficientă pentru a efectua o analiză DCO sau porțile nu au putut fi curățate de contaminanți.

3.1 Concluzie

Acest capitol a prezentat adaptarea software-ului de amestecare a evenimentelor pentru analiza DCO utilizând spectrometrul RoSphere și pachetele de analiză GASPware și Corleone. Acest software permite normalizări fiabile pentru datelor obținute utilizând RoSphere, sporind valoarea analizei DCO ulterioare. Analiza DCO a fost apoi efectuată pentru ⁶³Ni, rezultând spini ai nivelurilor excitate și raporturi de amestecare ale tranzițiilor.

CHAPTER 4

Determinări de timpi de viață pentru nivelurile excitate în⁶⁴Ni folosind dispozitivul plunger într-o reacție de transfer sub-barieră cu doi neutroni

Izomerii de formă sunt stări nucleare excitate care au dezexcitarea împiedicată de diferențele dintre forma lor și forma stărilor pe care s-ar dezexcita. Calculele teoretice au identificat candidați mai ușori ai izomerilor de formă începând cu 1989. Majoritatea acestor studii au identificat izotopii Ni ca fiind cele mai ușoare nuclee care ar putea prezenta astfel de fenomene. Dintre acestea, izotopul ⁶⁶Ni a fost prezentat ca un candidat probabil în mai multe studii și a fost selectat pentru investigații ulterioare prin calcule MCSM și investigații experimentale. Calculele au prezis existența a patru stări 0⁺ în ⁶⁶ Ni. Ultima stare 0⁺, care este foarte prolată, este separată de starea fundamentală sferică printr-o șa considerabilă în PES, indicând că dezexcitarea sa către stări sferice ar putea fi îngreunată semnificativ.

Un experiment la acceleratorul Tandem 9MV din București a fost efectuat pentru a studia aceste stări. Experimentul a fost realizat folosind o țintă subțire și dispozitivul Plunger, permițând măsurători de durată de viață folosind metoda RDDS. A fost identificată a patra stare și, în urma analizei RDDS, durata de viață a fost extrasă ca fiind $(19.6^{+(7.5)}_{-(6.6)} \text{ ps})$. Valorile corespunzătoare B(E2) pentru aceste tranziții sunt de 0.21(7) unități Weisskopf, prezentând o piedică semnificativă.

Întârzierea celei de-a patra stări (prolată) 0⁺ a fost explicată de bariera de potențial semnificativă dintre această stare și minimul stării fundamentale sferice. Acest lucru a făcut din ⁶⁶ Ni cel mai ușor nucleu în care au fost identificate structuri asemănătoare izomeriei de formă până în acest moment.

În urma căutării cu succes a structurilor asemănătoare izomeriei de formă în ⁶⁶Ni, atenția s-a îndreptat către izotopul ⁶⁴Ni. Aceleași calcule ale modelului în pături Monte Carlo au prezis și apariția acelorași fenomene în ⁶⁴Ni, așa cum se poate vedea în Fig.4.1.

Doar două stări excitate 0^+ fuseseră identificate anterior în ⁶⁴Ni. De asemenea,



Figure 4.1: Suprafața energiei potențiale a stărilor 0⁺ din izotopul ⁶⁴ Ni, calculată folosind calculele modelului în pături Monte Carlo. Patru stări 0⁺ apar din nou, două sferice, una oblată și una prolată, ca în ⁶⁶ Ni. Cea prolată, prezentată în această figură, este separată de starea fundamentală sferică printr-o barieră potențială care ar trebui să ducă la o durată de viață mai lungă decât este așteptat.

doar una dintre aceste stări excitate a avut o durată de viață măsurată de 0.04 (2) ps, cu o incertitudine foarte mare.

Pentru a investiga aceste aspecte și a aduna mai multe informații spectroscopice despre nivelurile excitate și structura nucleară a ⁶⁴ Ni, a fost propus un experiment la acceleratorul tandem 9MV din IFIN-HH. Experimentul a fost împărțit în două părți, prima fiind o măsurare a distribuției unghiulare. Scopul acestei secțiuni a experimentului a fost de a investiga distribuția unghiulară a tranziției 2503 keV de la starea 3849 keV pentru a se stabili dacă este o stare 0⁺. Tranziția γ de 2124 keV din ¹¹B, populată în împrăștieri inelastice, s-a suprapus peste tranziția de interes de 2503 keV la anumite unghiuri datorită unei deplasări semnificative Doppler. În ciuda acestei probleme si unei statistici oarecum slabe, experimentul a condus la concluzia că nivelul de 3849 keV investigat nu a fost de 0⁺.

A doua parte a acestui experimenta constat dintr-o măsurătoare RDDS utilizând spectrometrul RoSphere și dispozitivul plunger București. 64 Ni a fost produs în reacția de transfer cu doi neutroni 62 Ni (18 O, 16 O) 64 Ni , cu fasciculul 18 O având o energie ușor

sub bariera Coulomb pentru a suprima orice reacție de fuziune concurentă. În acest experiment, s-au utilizat șase distanțe diferite opritor-țintă. Nucleele reziduale ⁶⁴Ni au ieșit din ținta subțire cu o viteză de 6.43 $\mu m/ps$.

Datele de la cei 15 detectori HPGe au fost analizate pentru a extrage durata de viață a nivelurilor excitate din ⁶⁴ Ni folosind metoda distanței de recul. Nu s-au observat raze γ sau niveluri excitate noi fața de cele deja cunoscute.

Timpii de viață au fost obținuți pentru un număr de niveluri excitate pentru care sau observat tranziții γ . Deoarece singura condiție adecvată de poarta a fost pe tranziția $2^+ \rightarrow 0^+_1$ de 1345 keV, doar componenta nedeplasată a fost observată pentru fiecare tranziție $\gamma \dim {}^{64}\text{Ni}$.

În timp ce detectorii BGO utilizați pentru ecranarea anti-Compton au rezoluții energetice foarte slabe, ei au dimensiuni foarte mari și o eficiență excelentă de detectare a razelor γ . Acest lucru a deschis posibilitatea construirii unui filtru de multiplicitate pentru analiza datelor.

Pentru fiecare dintre cele șase distanțe țintă-opritor utilizate în acest experiment, intensitățile au fost extrase pentru tranzițiile de interes folosind o poartă pe tranziția $2^+ \rightarrow 0^+_1$ de 1345 keV. Filtrul de multiplicitate a fost utilizat pentru anumite tranziții, în timp ce altele au fost analizate fără această caracteristică.

Pentru cele două stări 0⁺ cunoscute din ⁶⁴Ni, care nu au alimentare laterală în reacția utilizată în acest experiment, intensitățile au fost obținute doar din matrici cu multiplicitate doi, deoarece este de așteptat ca acestea să apară doar în combinație cu tranziția 1345 keV. Intensitățile în funcție de timpul de zbor au fost apoi fitate cu o exponențială simplă.

Această analiză, pentru prima stare excitată 0⁺ la 2867 keV, poate fi văzută în Fig. 4.2, cu o durată de viață de 1.362 ± 0.288 ps. O analiză similară pentru a doua stare excitată 0⁺ la 3026 keV oferă o durată de viață de 3.917 ± 0.389 ps. O problemă specială a fost pusă de cascada γ 359-323-1239-1264 keV. Deoarece aceste niveluri se dezexcite unul pe altul, există o alimentare laterală semnificativă care complică procedura de fitare, necesitând cunoașterea duratei de viață, a populațiilor și a rapoartelor de ramificare a nivelurilor superioare și formule Bateman mai complicate.

Aceste ecuații Bateman sunt semnificativ mai complicate decât o exponențială simplă, mai ales prin apariția în formule a duratei de viață și a raporturilor de alimentare de la alte niveluri. Chiar și așa, acesta este un caz simplificat în care fiecare nivel este alimentat doar de o singură altă tranziție.

Fitarea datelor experimentale și extragerea duratei de viață a nivelurilor de interes necesită cunoașterea duratei de viață a nivelurilor precedente și a raporturilor de alimentare, care pot fi extrase fie din date, fie din aceeași fitare. Este cu siguranță de preferat să extragem valorile din alte fitări și apoi să le includem ca parametri în noua fitare, deoarece acest lucru limitează parametrii liberi și îmbunătățește calitatea și erorile procedurii de fitare, dar acest lucru nu este întotdeauna posibil.



Figure 4.2: Determinarea duratei de viață a primei stări excitate 0^+ de la 2867 keV folosind metoda RDM. Datele de la doar trei distanțe au putut fi utilizate, deoarece tranziția de 1521 keV devine neobservabilă la distanțe mai mari. Durata de viață stabilită este de 1.362±0,288 ps.

Cu toate acestea, mai puțin simplu este modul de propagare corectă și transparentă a erorilor asociate cu celelalte durate de viață și cu rapoartele de alimentare. Acest lucru este crucial pentru a putea publica date fiabile cu erori estimate corect.

Pentru a aborda această problemă, am conceput o soluție simplă folosind o procedură de fitare Monte Carlo folosind limbajul de programare ROOT. Datorită puterii imense a computerelor moderne, se pot face milioane de fitări în doar câteva minute. Acest lucru permite nu numai fitarea datelor folosind ceilalți parametri extrasați anterior, ci și variația acestor parametri în cadrul erorilor lor. Toate aceste valori sunt apoi utilizate pentru a extrage eroarea totală a fitării care conține atât eroarea procedurii de fitare, cât și propagarea erorilor din valorile anterioare utilizate în fitare.

Analiza datelor a decurs de sus în jos. Intensitățile normalizate ale tranziției de 359 keV au fost fitate cu o exponențială simplă. Pentru următoarea tranziție γ de 323 keV, a fost utilizată următoarea formulă

$$N_1(t_f) = N_1(0) * e^{-\frac{t_f}{\tau_1}} + N_0(0) * \frac{\tau_1}{\tau_0 - \tau_1} * (e^{-\frac{t_f}{\tau_0}} - e^{-\frac{t_f}{\tau_1}}) + N_0(0) * e^{-\frac{t_f}{\tau_0}}$$
(4.1)

unde τ_0 este durata de viață a nivelului 4531 keV obținut anterior folosind tranziția de 359 keV și $N_1(0) = f_r * N_0(0)$, unde f_r este raportul numărului a nucleelor populate

direct în starea excitată de 4172 keV împărțită la numărul de nuclee populate direct în starea excitată de 4531 keV. Pentru cazul nostru, f_r a fost stabilit ca fiind 0.555 ± 0.106 dintr-un test anterior cu o țintă groasă întreprins cu RoSphere.

Cu toate acestea, în loc să folosim $\tau_0 = 12.514$ ps și $f_r = 0.555$ și să fităm pur și simplu cu aceste valori, am făcut un milion de fitări cu τ_0 și f_r distribuite aleatoriu pe o gaussiană centrată pe aceste valori și cu $\sigma_{\tau} = 1.318$ ps și $\sigma_{f_r} = 0.106$. Fiecare fitare a dus la o valoare τ_1 și la eroarea sa asociată, care au fost apoi utilizate pentru a adăuga 100 de puncte, distribuite tot pe o gaussiană, la o histogramă finală. După un milion de astfel de fitări, fitarea acestei histograme finale cu o gaussiană permite extragerea valorii finale τ_1 și a erorii sale asociate.

O analiză similară, deși folosind formule și mai complexe, a fost efectuată și pentru tranzițiile ulterioare, 1239 și 1264 keV.

Din cele unsprezece stări excitate pentru care am extras timpii de înjumătățire, doar două aveau valori măsurate anterior conform bazei de date ENSDF.

Pentru nivelul 2610 keV, ENSDF oferă un timp de înjumătățire de 1.73 ps, de aproape două ori mai mic decât valoarea extrasă aici, de 3.37 ps. În timp ce nivelul 2610 keV primește o alimentare laterală importantă, aceasta reprezintă doar 10% din intensitatea observată, restul provenind din popularea directă.

Nivelul 2610 keV a fost cercetat și are o durată de viață de 1.73 (28) ps din analiza formei de linie din spectrul obținut de la un singur detector HPGe cu eficiență de 24% plasat la 0°.

Timpul de înjumătățire al nivelului 0_2^+ de 2867 keV este dat în literatură ca fiind 40 (20) fs, în contradicție clară cu valoarea de 937 (199) fs extrasă în această lucrare. Valoarea de 40 fs pentru timpul de înjumătățire este incompatibilă cu curba de înjumătățire observat.

Cele mai importante rezultate din această analiză sunt duratele de viață pentru cele două niveluri 0^+ cunoscute la 2867.3 și 3025.9 keV. Timpii de înjumătățire obținuți sunt de 0.93(20) și 2.71(27) ps, cu probabilitățile de tranziție reduse corespunzătoare B(E2) de 4.8(10) și 1.02(10) W.u. Niciuna dintre aceste valori nu indică vreo întârziere, așa cum s-a căutat în acest experiment, dar se așteaptă o astfel de întârziere pentru a treia stare excitată 0^+ , care nu a putut fi identificată în experimentele folosind RoSphere.

4.1 Concluzie

Acest capitol a prezentat analiza timpilor de viață a stărilor nucleare excitate din ⁶⁴Ni extrase folosind metoda RDM în urma unei reacții de transfer de neutroni. Pentru aceste măsurători au fost utilizate spectrometrul RoSphere și dispozitivul plunger București. În ciuda faptului că a treia stare 0^+ excitată căutată nu a fost identificată, timpii de viață extrași se vor dovedi utili pentru înțelegerea structurii nucleare a ⁶⁴Ni. Timpul de viață al celorlalte două stări excitate de 0^+ nu are nicio întârziere.

În cele din urmă, a fost dezvoltată o procedură pentru propagarea erorilor folos
ind rutine Root.

CHAPTER 5

Pachet software pentru normalizarea măsurătorilor de corelație unghiulară. Corelații unghiulare în ⁶⁴Ni utilizând spectrometrul FIPPS

Pentru a investiga mai bine stările nucleare excitate din ⁶⁴ Ni, a fost propus un experiment la Institutul Laue-Langevin din Grenoble, Franța, utilizând spectrometrul FIPPS format din 16 detectori HPGe de tip clover. Cu denumirea 3-17-36, experimentul a avut loc în 2019 pe o perioadă de 20 de zile.

Experimentul a fost realizat folosind o țintă radioactivă conținând oxid de nichel plasată într-un flux de neutroni termici din reactorul ILL. Conținutul de nichel al țintei era format din aproximativ 10% ⁶³Ni, restul fiind compus din ⁶² Ni și urme ale altor izotopi Ni. Prin captarea neutronilor pe ⁶³ Ni, s-a populat starea de captură 9657 keV 1⁻ în ⁶⁴Ni. Deoarece ținta radioactivă conținea și cantități semnificative de ⁶²Ni, ⁶³ Ni a fost, de asemenea, produs în timpul acestui experiment și ar putea fi investigat în mod similar.

Eficiența mare a FIPPS, împreună cu rezoluția înaltă a detectorilor HPGe și numărul lor mare, fac perfecte aceste date pentru construirea schemelor de nivel excitat folosind tranzițiile γ detectate, relațiile de coincidență dintre ele și intensitățile relative. Mai mult, datorită numărului mare de detectori și a numărului mare de perechi de detectori la diverse unghiuri, datele obținute utilizând FIPPS se pretează foarte bine analizei de corelație unghiulară. Deoarece reacția de captură a neutronilor duce la o distribuție complet izotropă a spinului, nu există corecții de aliniere care trebuie luate în considerare în timpul analizei.

Pentru a obține corelațiile unghiulare, este necesară o corecție pentru eficiența diferită a cristalelor datorită plasării și construcției lor. Găsirea unei soluții la problema normalizării datelor pentru corelația unghiulară și măsurătorile DCO este de maximă importanță. În caz contrar, anumite valori nu pot fi extrase deloc sau vor avea erori asociate foarte mari, limitând cantitatea și utilitatea informațiilor obținute despre structura nucleară. O alternativă atractivă pentru normalizarea eficienței folosind anumite perechi de raze γ a fost prezentată de echipa GRIFFIN de la TRIUMF. Metoda lor de amestecare a evenimentelor are avantajul de a fi aplicabilă oricărei perechi raze γ , indiferent de energia lor, și de a utiliza datele în sine pentru normalizare, cu toate variațiile asociate parametrilor detectorilor și sistemului de achiziție încorporate.

Pentru a obține această normalizare, perechea de tranziții γ care urmează să fie studiată este utilizată pentru normalizare în urma unei proceduri de amestecare a evenimentelor. În această procedură, evenimentele de coincidență reală înregistrate de sistemul de achiziție în timpul experimentului sunt descompuse și informațiile din fiecare detector sunt asociate aleatoriu în "evenimente false" cu semnale ale detectorilor de la un alt eveniment necorelat în timp.

La mod ideal, această procedură creează o matrice de intensitate γ - γ -unghi care menține aceiași termeni de eficiență ca și datele originale, dar înlocuiește corelația unghiulară fizică dintre cele două tranziții cu o distribuție izotropă. Matricea de intensitate γ - γ -unghi poate fi apoi utilizată pentru a produce valori de normalizare pentru orice pereche de tranziții la orice unghi și apoi poate fi utilizată pentru a normaliza datele reale pentru a obține un grafic de corelație unghiular corectat care poate fi fitat.

Pentru a implementa această procedură, a fost utilizată o combinație între rutina gsort din pachetul GASPware și un program special care a fost scris folosind bibliotecile C++ și Qt.

Pentru a valida funcționarea procedurii, au fost efectuate o serie de teste pentru a verifica funcționarea programelor și cei mai buni parametri posibili pentru aceastea. Verificările au fost făcute utilizând bine-cunoscuta cascadă $0^+ \rightarrow 2^+ \rightarrow 0^+$ 1680-1345 keV. Corelațiile unghiulare pentru această cascadă nu ar trebui să aibă efecte de raport de amestecare și să depindă doar de spinii cunoscuți, ducând la o soluție unică pentru fitare.

Valorile teoretice pentru coeficienții A_2 și A_4 pentru o cascadă $0^+ \rightarrow 2^+ \rightarrow 0^+$ sunt $A_2 = 0.357$ și $A_4 = 1.143$. Normalizarea de referință produce $A_2 = 0.346 \pm 0.003$ și $A_4 = 1.080 \pm 0.003$, după cum se poate vedea în figură. .5.1.

De departe cea mai dramatică dovadă a valorii acestei proceduri de normalizare a fost dată de cascada 483-362 keV $1/2^- \rightarrow 3/2^- \rightarrow 3/2^-$ din ⁶³ Ni. Corelația unghiulară folosind normalizarea obișnuită este prezentată în Fig. 5.2, prezentând o dispersie foarte mare a punctelor. Acest lucru este cauzat de faptul că normalizarea utilizată s-a bazat pe o pereche de tranziții în care una dintre razele γ are o energie foarte mare și, astfel, raporturile de eficiență ale detectoarelor nu au fost aceleași ca și pentru tranzițiile de joasă energie 483 și 362 keV.

Corelațiile unghiulare obținute folosind noua normalizare sunt prezentate în fig.5.2 și arată o îmbunătățire dramatică atât în eroarea fiecărui punct individual, cât și în dispersia lor. Această nouă normalizare ne permite să extragem cu încredere valorile A_2 și A_4 pentru această cascadă, deși raporturile de amestecare nu pot fi obținute în



Figure 5.1: O comparație între normalizarea finală obținută din procedura de amestecare și normalizarea de referință utilizată pe cascada 1680-1345 keV. Pătratele roșii arată valoarea de referință obținută folosind cascada 6630-1680 keV $1^+ \rightarrow 0^+ \rightarrow 2^+$ din ⁶⁴Ni. Punctele negre arată datele normalizate utilizând un factor de multiplicare de 10 și întregul set de date.

mod trivial, deoarece ambele tranziții pot avea rapoarte de amestecare diferite de zero, ceea ce duce la o soluție non-unică. Cu toate acestea, acest grafic subliniază în mod clar utilitatea acestei noi proceduri de normalizare, care, sperăm, va duce în scurt timp la adoptarea pe scară largă a acesteia pentru experimentele RoSphere și FIPPS.

In urma acestor rezultate, s-a decis analizarea restului datelor $^{64}\rm{Ni}$ din experimentul FIPPS folosind această procedură.

Pentru analiza de corelație unghiulară care trebuie efectuată, sunt necesare două matrici de intensitate γ - γ -unghi, matricea de date și matricea amestecată. Ambele conțin exact aceleași calibrări run-cu-run, porți de timp pe semnalele HPGe și BGO și aceeași procedură de addback. Principala diferență rezidă după finalizarea acestor operațiuni. În timp ce matricea de date este construită imediat după aceste proceduri, pentru matricea de amestecare, datele sunt apoi scrise pe disc într-un format redus.

Fișierele de date "tăiate" sunt apoi introduse în programul Jumbler. Acest program distruge evenimentele adevărate și produce fișiere "amestecate" în care semnalele au fost asociate aleatoriu pentru a forma evenimente "false". Aceste fișiere "amestecate" sunt apoi sortate într-o matrice de intensitate $\gamma - \gamma$ -unghi, așa cum sa făcut pentru matricea de date.

Pentru prima γ din cascadă, se extrag trei matrici de intensitate γ -intensitate, corespunzătoare vârfului γ și fundalului. Matricile de fundal sunt apoi scăzute din matricea de vârf folosind un factor de multiplicare, rezultând o matrice intermediară cu fondul substras.

Această matrice de intensitate γ -unghi este apoi tăiată în trei vectori, unul core-



Figure 5.2: Corelații unghiulare ale cascadei 483-362 keV $1/2^- \rightarrow 3/2^- \rightarrow 3/2^-$ din ⁶³ Ni utilizând normalizarea obținută prin procedura curentă (puncte negre) și o altă normalizare obținut folosind două tranziții γ unghiular necorelate.

spunzând celui de-al doilea vârf γ și celelalte două corespunzând fundalului, care sunt apoi din nou scăzute pentru a produce un vector de intensitate unghiular final. Acest lucru are ca rezultat doi vectori de corelație unghiulară cu intensitățile în funcție de unghi, unul din date si unul de normalizare.

Raportul celor doi vectori va fi funcția de corelație unghiulară pentru acea cascadă γ , care poate fi apoi fitată pentru a obține parametrii experimentali A_2 și A_4 . În cazul nostru, procedura de fitare a fost realizată cu un program ROOT simplu care a returnat valorile A_2 și A_4 și erorile acestora, care sunt apoi utilizate pentru a investiga spinii nivelurilor implicate și raporturile de amestecare ale celor două tranziții.

Un număr de cascade γ din ⁶⁴Ni au fost analizate folosind această metodă folosind date luate cu spectrometrul FIPPS la ILL. Pentru majoritatea acestor raze γ analizate, am încercat să găsesc cascade cu alte tranziții fără raport de amestecare, cum ar fi cele care implică un nivel cu spin 0⁺. Aceasta permite o determinare unică a raportului de amestecare a celeilalte tranziții. Cu toate acestea, în cazurile în care nu s-a putut găsi un astfel de partener de raport de amestecare 0, este preferabilă o tranziție care are raportul de amestecare determinat. Acesta este cazul cascadei 7380-930, unde tranziția 930 keV a fost studiată folosind alte trei cascade, dând o medie $\delta_{930} = 0.73$, care a fost apoi utilizată la fitare.

5.1 Concluzie

Acest ultim capitol a prezentat implementarea tehnicii de normalizare a amestecării evenimentelor pentru datele în format GASPware luate utilizând aranjamentul FIPPS. Cu toate acestea, această procedură poate fi implementată cu ușurință pentru orice date luate în format GASPware, cum ar fi cu aranjamentul RoSphere.

Procedura a fost verificată prin compararea cu alte proceduri de normalizare, obținând rezultate excelente. Aceasta va fi adoptată și pentru măsurători viitoare, deoarece utilizarea corelațiilor unghiulare a oferit informații spectroscopice valoroase. Mai mult, va fi investigată utilizarea acestei proceduri pentru analiza DCO precum cea discutată în ??.

Îmbunătățirile procedurii implementate vor fi, de asemenea, investigate și implementate pentru a îmbunătăți fiabilitatea, precizia, viteza și utilizarea discului.