

- Denumire Proiect:** Momente electromagnetice statice și dinamice pentru stări nucleare excitate
- Etapa 15.09.2009:**
1. Timpi de viață și momente magnetice pentru stări exotice în nuclee neutrono-deficitare.
  2. Simetria de izospin în nucleele oglindă  $^{31}\text{P}$  -  $^{31}\text{S}$ .

## SINTEZA LUCRĂRII

### 1. Obiectivul etapei

Prezentul proiect are ca obiectiv general obținerea de date originale cu caracter fundamental privind structura nucleelor excitate, prin determinări de momente electromagnetice statice și de tranziție. Cercetările sunt orientate spre elucidarea unor aspecte importante ale structurii nucleare în diverse zone de masă, atât în zona nucleelor stabile sau apropiate de stabilitate, cât și în zona nucleelor tranziționale sau foarte depărtate de stabilitate. Astfel, obiectivele specifice vizează măsurători de timpi de viață ale stărilor excitate în nuclee ușoare stabile cu  $A \approx 30-40$ , determinări de momente magnetice și cuadrupolare pentru stări izomere în nuclee neutrono-deficitare populate în reacții de fuziune-evaporare, precum și studii de izomerie și momente magnetice în nuclee bogate în neutroni populate prin fisiune. Realizarea acestor obiective comportă efectuarea unor experimente complexe, folosind facilitățile de mare performanță ale unor centre europene de prestigiu. Menționăm faptul că, datorită condiționărilor impuse de planificarea experimentelor și a lucrului în colaborări internaționale, activitățile prevăzute pentru realizarea celor trei obiective specifice se efectuează în paralel pe parcursul derulării proiectului. În cadrul activităților anterioare au fost finalizate studii privind noi izomeri de viață scurtă în nuclee de Sn bogate în neutroni populate în fisiunea ionilor relativisti [1], precum și studii privind structura de spin înalt a nucleului stabil  $^{37}\text{Cl}$  [2].

Studiile prevăzute pentru etapa prezentă se încadrează în primele două direcții de cercetare menționate mai sus. Un obiectiv important îl constituie studiul momentelor nucleare pentru stări izomere în nuclee neutrono-deficitare din zonele de masă  $A \approx 190$  și  $A \approx 80$ , populate în reacții de fuziune-evaporare. Stările izomere din nucleele ușoare de Pb ( $Z=82$ ) reprezintă probe importante pentru elucidarea structurii complexe a acestor nuclee exotice, implicând excitații intrus și coexistența de forme. Un interes deosebit îl prezintă elucidarea fenomenului de rotație magnetică, manifestat prin apariția unor benzi regulate dipolare în nuclee neutrono-deficitare de Pb cu masa  $191 \leq A \leq 202$ . Scopul prezentului studiu este determinarea momentului electric cuadrupolar și a deformării unei stări izomere cap de bandă de rotație magnetică în nucleul  $^{193}\text{Pb}$ . Se are de asemenea în vedere extinderea studiilor de momente magnetice în nuclee foarte ușoare de Pb cu un număr de neutroni situat în apropierea mijlocului păturii neutronice 82-126. Nucleul  $^{188}\text{Pb}_{106}$ , cu trei stări izomere care oferă o ilustrare unică a triplei coexistențe de forme, sferică, oblate și prolate, reprezintă un candidat important pentru aceste studii. Prin măsurători de timpi de viață și momente magnetice va fi de asemenea elucidată structura stărilor joase în nucleul impar-impar tranzițional  $^{86}\text{Y}$ . Al doilea obiectiv al etapei îl reprezintă investigarea simetriei de izospin a interacției nucleare prin măsurători de timpi de viață pentru stări excitate analoge în nucleele oglindă din zona  $A \approx 30$ . Studiile se vor focaliza asupra perechii de nuclee oglindă  $^{31}\text{S}$ - $^{31}\text{P}$ , urmărindu-se determinarea timpilor de viață și a probabilității de tranziție reduse  $B(E1)$  corespunzând stărilor analoge  $7/2^-$ .

### 2. Activități desfășurate și rezultate obținute

#### 2.1 Timpi de viață și momente electromagnetice pentru stări exotice în nuclee neutrono-deficitare.

Studiile de izomerie și momente nucleare au fost realizate aplicând tehnicile spectroscopiei  $\gamma$  în fascicol pulsant și metoda distribuțiilor unghiulare perturbate observate diferențial în timp (TDPAD). Experimentele au fost efectuate la acceleratoarele de ioni ale Laboratorului Național Legnaro (LNL), Italia, și ale IFIN-HH. Nucleele excitate în stări izomere au fost populate și aliniate în reacții de fuziune-evaporare induse de fascicule de ioni accelerați. Pentru fiecare caz studiat au fost stabilite reacția optimă de populare, precum și sistemul adecvat de iradiere și detecție a radiațiilor  $\gamma$  de dezexcitare. Determinarea momentelor magnetice

s-a realizat plasând ținta în câmpul magnetic extern generat de un electromagnet. Pentru determinarea momentelor electrice cuadrupolare a fost studiată interacția electrică în gradientul de câmp electric produs de rețele cristaline cu simetrie axială. Razele  $\gamma$  au fost detectate folosind detectori HPGe de diverse dimensiuni, precum și detectori scintilatori de NaI(Tl). Unghiurile de detecție față de direcția fascicolului au fost de  $\pm 45^\circ$  și  $\pm 135^\circ$  în studiile de momente magnetice și de  $0^\circ$  și  $90^\circ$  în studiile de momente electrice cuadrupolare. Pentru analiza datelor experimentale înregistrate în modul listă au fost produse pentru fiecare detector matrici timp-energie și au fost create spectre energetice și temporale de interes. Detalii specifice fiecărui experiment vor fi date mai jos.

### 2.1.1 Studii de izomerie și momente cuadrupolare în nucleul $^{193}\text{Pb}$

Studii anterioare privind schema de nivele excitate a  $^{193}\text{Pb}$  au relevat o structură complexă, incluzând cinci benzi de rotație magnetică, precum și trei stări izomere de spini  $21/2^-$ ,  $29/2^-$  și  $33/2^+$  și cu timpi de înjumătățire de 21.5, 9.4 și respectiv 180 ns [3–6]. Stările izomere de 21.5 ns și 180 ns au fost interpretate ca stări sferice de excitație neutronică pe baza măsurătorilor de momente magnetice și cuadrupolare efectuate anterior de grupul nostru [6]. Momentul magnetic măsurat pentru starea izomeră de 9.4 ns, cap de bandă de rotație magnetică yrast din  $^{193}\text{Pb}$ , a condus la descrierea acestei stări printr-o configurație de cuplaj a excitației de gol neutronic  $\nu(1i_{13/2}^{-1})$  cu excitația protonică intrus  $\pi(3s_{1/2}^{-2}1h_{9/2}1i_{13/2})11^-$  [7].

În prezentul studiu stările izomere ale  $^{193}\text{Pb}$  au fost populate și aliniate în reacția  $^{170}\text{Er}(^{28}\text{Si},5n)$ , folosind un fascicol pulsant de  $^{28}\text{Si}$  de 143 MeV (durata impulsului de iradiere 2 ns, perioada de repetiție 800 ns) și o țintă de grosime  $0.5 \text{ mg/cm}^2$ . Interacția cuadrupolară a fost investigată în gradientul de câmp electric creat de rețeaua cristalină a Hg solid. Pentru aceasta, nucleele excitate de  $^{193}\text{Pb}$  recolate din țintă au fost implantate într-un strat de Hg solid de 0.2 mm, răcit la temperatura  $T = 170.0(1) \text{ K}$ . Pentru detecția razelor  $\gamma$  s-au folosit detectori HPGe planari cu o rezoluție temporală de 8.5 ns și 6.5 ns pentru energii în jur de 200, respectiv 500 keV. Rezultatele obținute, ilustrate în Fig.1, au extins considerabil informațiile privind izomerii din  $^{193}\text{Pb}$ : a fost identificată o nouă stare izomeră de viață scurtă, s-a stabilit ferm spinul stării izomere de 9.4 ns cap de bandă magnetică și s-a determinat momentul electric cuadrupolar al acestei stări.

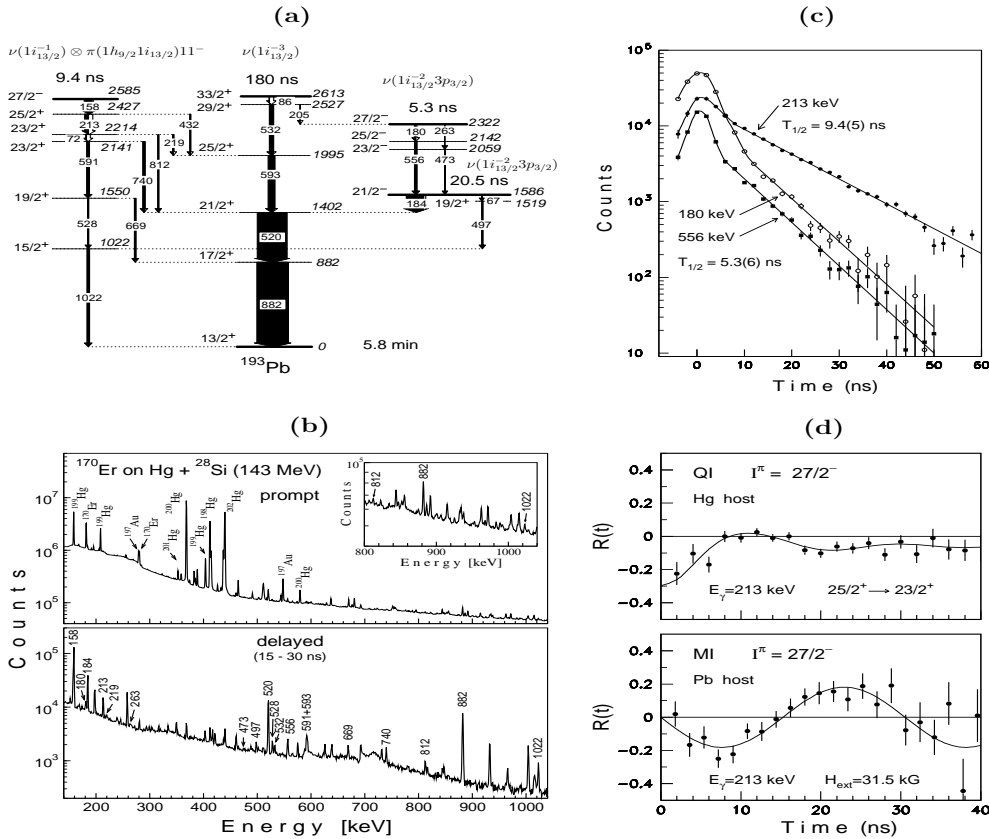


Figura 1: Rezultate privind nucleul  $^{193}\text{Pb}$ : (a) schema de dezexcitare a stărilor izomere (referințele [3–6] și studiul prezent)); (b) spectre  $\gamma$  prompte și întârziate; (c) spectre temporale pentru raze  $\gamma$  din dezintegrarea izomerilor de viață scurtă; (d) spectre TDPAD experimentale și teoretice pentru starea izomeră de 9.4 ns, cap de bandă de rotație magnetică.

Tabelul 1: Momente electrice cuadrupolare experimentale în nuclee neutrono-deficitare de Pb comparate cu valori teoretice calculate cu modelul TAC. Cu asterisc sunt marcate rezultatele studiului prezent.

Nucleu	$I^\pi$	$E_x$ (keV)	$T_{1/2}$ (ns)	Configurație	$Q_s^{exp}(eb)^a$	Ref.	$Q_s^{TAC}(eb)$
$^{192}\text{Pb}$	$12^+$	2623	1100(50)	$\nu(1i_{13/2}^{-2})$	0.32(4)	[8]	
	$11^-$	2743	756(20)	$\pi(1h_{9/2}1i_{13/2})$	2.9(3)	[8]	-2.9
$^{193}\text{Pb}$	$13/2^+$	x	5.8 min	$\nu(1i_{13/2}^{-1})$	+0.195(10)	[9]	+0.25
	$21/2^-$	1586+x	20.5(4)	$\nu(1i_{13/2}^{-2}3p_{3/2})$	0.22(2)	[6]	+0.26
	$27/2^-$	2322+x	5.3(6)	$\nu(1i_{13/2}^{-2}3p_{3/2})$	$\leq 0.5$	*	+0.32
	$27/2^-$	2584+x	9.4(5)	$\nu(1i_{13/2}^{-1}) \otimes \pi(1h_{9/2}1i_{13/2})11^-$	2.6(3)	*	-2.4
	$33/2^+$	2613+x	180(15)	$\nu(1i_{13/2}^{-3})$	0.45(4)	[6]	+0.46
$^{194}\text{Pb}$	$12^+$	2628	370(13)	$\nu(1i_{13/2}^{-2})$	0.48(3)	[6]	
	$11^-$	2933	133(7)	$\pi(1h_{9/2}1i_{13/2})$	3.6(4)	[8]	-2.8
$^{195}\text{Pb}$	$13/2^+$	203	15 min	$\nu(1i_{13/2}^{-1})$	+0.306(15)	[9]	+0.33
$^{196}\text{Pb}$	$12^+$	2694	270(4)	$\nu(1i_{13/2}^{-2})$	0.65(5)	[12]	
	$11^-$	3191	724)	$\pi(1h_{9/2}1i_{13/2})$	3.6(6)	[13, 14]	-3.0

<sup>a</sup> Valori absolute, exceptând cazurile în care este dat semnul.

Schema de dezexcitare a stărilor izomere, incluzând rezultatele studiului prezent, este ilustrată în Fig.1a. Analiza spectrelor energetice prompte și întârziate (Fig.1b) a permis stabilirea caracterului izomeric al stării excitate la 2322 keV, pentru care s-a determinat un timp de înjumătățire de  $T_{1/2}=5.3(6)$  ns (Fig.1c). Multipolaritățile tranzițiilor  $\gamma$  au fost stabilite din analiza raportului intensităților înregistrate în spectrele prompte la  $0^\circ$  și  $90^\circ$ ,  $R_{ADO} = I_\gamma(0^\circ)/I_\gamma(90^\circ)$ . Au fost confirmate multipolaritățile atribuite anterior pentru toate tranzițiile implicate în dezexcitarea izomerului de 9.4 ns, cu excepția tranziției de 812 keV, considerată  $E2$ , pentru care s-a obținut  $R_{ADO}=1.0(1)$  și corespunzător un amestec  $M1+E2$ . În consecință spinul  $29/2$  atribuit anterior stării izomere a fost redus cu o unitate, și corespunzător au fost reduși spinii membrilor benzii magnetice yrast. Cu noile atribuirii de spini, stările acestei benzi magnetice din  $^{193}\text{Pb}$  se încadrează în sistematica energetică a benzilor yrast  $M1$  din nucleele de Pb [10]. Analiza spectrelor TDPAD (Fig.1d) a permis determinarea tăriei interacției cuadrupolare  $\nu_Q = eQ_s V_{zz}/h=1.11(9)$  GHz pentru izomerul  $27/2^-$  de 9.4 ns. Folosind calibrarea gradientului de câmp electric a nucleelor de Pb implantate în Hg solid,  $V_{zz} = 17.4(9) \cdot 10^{21}$  V/m<sup>2</sup> la  $T = 170$  K [11], s-a obținut valoarea absolută  $|Q_s|(27/2^-, 9.4\text{ns}) = 2.6(3)$  eb pentru momentul electric spectroscopic. Menționăm că acesta este izomerul cu timpul de viață cel mai scurt pentru care s-a determinat momentul cuadrupolar static prin metodă diferențială în timp. S-a stabilit de asemenea o limită superioară  $|Q_s|(27/2^-, 5.3\text{ns}) \leq 0.5$  eb pentru momentul electric spectroscopic al stării izomere de 5.3 ns.

Informațiile privind momentele electrice cuadrupolare determinate experimental pentru stări excitate în nuclee neutrono-deficitare de Pb, incluzând rezultatele grupului nostru de cercetare (referințele [6, 8] și studiul prezent) sunt prezentate în Tabelul 1. Se observă că stările descrise prin configurații normale, de excitații neutronice, au momente cuadrupolare mici, specifice sfericității. Pe de altă parte, stările implicând promovarea unei perechi de protoni în orbitale peste gap-ul  $Z=82$  au momente cuadrupolare semnificativ mai mari, ceea ce indică o deformare asociată excitației intrus. Valorile experimentale au fost comparate cu valorile calculate folosind modelul de cranking cu axă înclinată (TAC) [15]. După cum se observă în Tabelul 1, modelul TAC furnizează o descriere foarte bună a datelor experimentale. În particular, pentru starea  $27/2^-$  cap de bandă de rotație magnetică a fost calculată o deformare cuadrupolară oblate  $\epsilon_2 = -0.1$ , similară deformării calculate pentru stările protonice  $11^-$ . Acest rezultat indică faptul important că deformarea benzilor de rotație magnetică în nucleele de Pb este dominată de efectul de polarizare datorat stării protonice intrus  $\pi(1h_{9/2}1i_{13/2})11^-$ .

### 2.1.2 Momente magnetice pentru stări izomere coexistente în nucleul $^{188}\text{Pb}$

Nucleele de Pb oferă una dintre cele mai interesante ilustrări a fenomenului de coexistență de forme. În timp ce structura izotopilor din apropierea nucleului stabil dublu magic  $^{208}\text{Pb}$  este dominată de configurații sferice, în izotopii foarte ușori stările sferice coexistă cu stări deformate prolate și oblate. O situație unică o prezintă nucleul  $^{186}\text{Pb}$ , sferic în starea fundamentală, unde primele două stări excitate sunt stări  $0^+$  cu deformare oblate și respectiv prolate [16]. Nucleul  $^{188}\text{Pb}$  este de asemenea foarte interesant, deoarece schema sa de nivele conține trei stări izomere, de spini  $8^-$ ,  $11^-$  și  $12^+$ , care au fost interpretate ca o manifestare specifică a triplei coexistențe de forme [17]. Scopul studiului prezent îl constituie determinarea momentelor

magnetice și elucidarea configurațiilor acestor stări izomere. Rezultatele obținute sunt ilustrate în Fig.2.

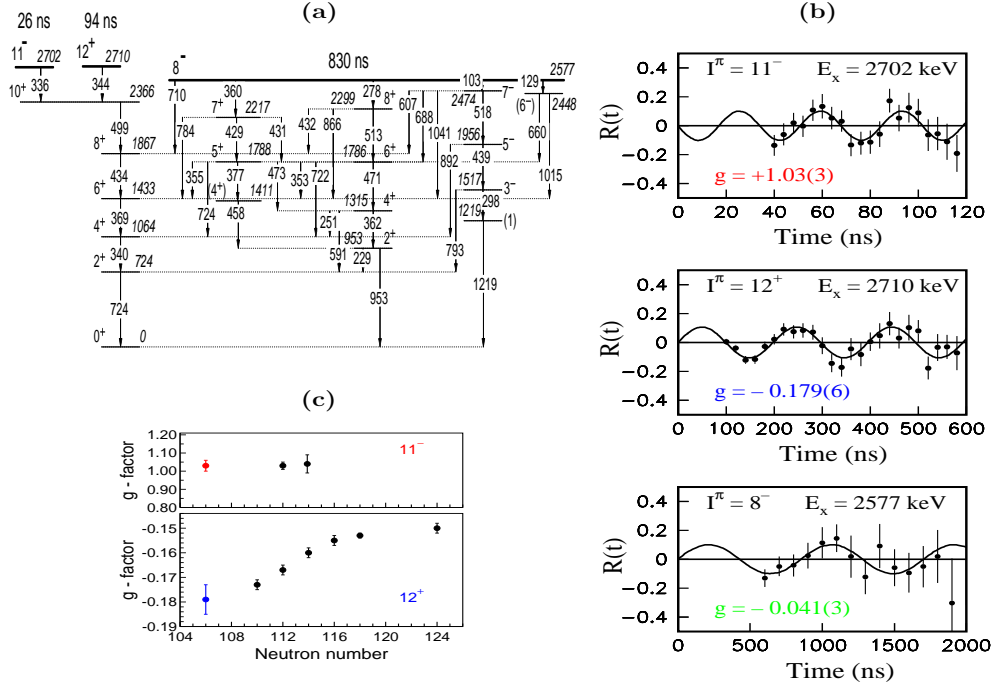


Figura 2: Rezultate privind nucleul  $^{188}\text{Pb}$ : (a) schema de dezexcitare a stărilor izomere [17]; (b) spectre TDPAD experimentale și curbele de fit pentru stările izomere  $11^-$ ,  $12^+$  și  $8^-$ ; (c) sistematica factorilor  $g$  experimentali pentru stările izomere  $11^-$  și  $12^+$  din ref. [18] (negru) și prezentul studiu (color).

Stările izomere ale  $^{188}\text{Pb}$  au fost populate și aliniat în reacția  $^{164}\text{Er}(^{28}\text{Si},5n)$ , folosind un fascicol pulsant de  $^{28}\text{Si}$  de 143 MeV (durata impulsului de iradiere 2 ns, perioada de repetiție 6.4  $\mu\text{s}$ ) și o țintă îmbogățită izotopic de 1 mg/cm<sup>2</sup>. Perturbarea distribuțiilor unghiulare a fost investigată în câmp magnetic extern vertical de 18.6(5) kG. Pentru detecția razelor  $\gamma$  s-au folosit detectori HPGe planari și de volum mare. Menționăm secțiunea relativ mică a canalului de reacție de interes (14% din secțiunea de formare a nucleului compus) precum și ponderea substanțială ( $\approx 50\%$  din secțiunea totală) a fisiunii nucleului compus, generatoare de fond intens de activare. Pentru a crește statistica, au fost create spectre temporale folosind, pentru fiecare stare izomeră, o sumă de porți energetice pe razele  $\gamma$  din dezintegrare. În cazul stării izomere  $11^-$  de viață relativ scurtă,  $T_{1/2}=26$  ns, au fost folosiți detectori HPGe planari, iar spectrele de timp s-au creat în coincidență cu raza  $\gamma$  de dezexcitare  $E1$  de 336 keV, precum și cu razele  $\gamma$   $E2$  de 499, 434, 369, 340 și 724 keV, care depopulează stările yrast (vezi Fig.2a). În cazul stării izomere  $12^+$  cu  $T_{1/2}=94$  ns, detecția s-a realizat folosind detectori HPGe de volum mediu și mare, iar porțile de coincidență au fost puse pe tranziția de dezexcitare  $E2$  de 344 keV, precum și pe cascada de tranziții yrast. Cazul cel mai dificil l-a constituit starea izomeră  $8^-$  cu  $T_{1/2}=830$  ns, pe de-o parte datorită populării foarte slabe, iar pe de alta datorită faptului că dezintegrarea sa prezintă o fragmentare puternică pe multe ramuri slabe (Fig.2a). Pentru construirea spectrelor de perturbare s-au folosit razele  $\gamma$  de 434, 369, 340 și 724 keV din banda yrast. Spectrele TDPAD experimentale și curbele de fit corespunzând celor trei stări izomere sunt ilustrate în Fig.2b. Factorul  $g$  determinat pentru izomerul  $11^-$ ,  $g(11^-)=+1.03(3)$ , confirmă configurația protonică intrus  $\pi(3s_{1/2}^{-2}1h_{9/2}1i_{13/2})$  atribuită acestei stări. Valori similare au fost determinate recent pentru stările  $11^-$  din  $^{194,196}\text{Pb}$  [19] (Fig.2c), ceea ce confirmă stabilitatea configurației intrus cu deformare oblate. Pentru starea izomeră  $12^+$  s-a determinat o valoare  $g(12^+)=-0.179(6)$ , în acord cu configurația de doi cuasineutroni  $\nu(1i_{13/2}^{-2})$ . În Fig.2c sunt ilustrate valorile cunoscute pentru factorul  $g$  al stării  $12^+$ , incluzând rezultatul prezent. Valoarea obținută pentru  $^{188}\text{Pb}$  continuă tendința de scădere a valorilor  $g(12^+)$  cu scăderea numărului de neutroni, observată anterior pentru  $^{192-200}\text{Pb}$ . Se confirmă structura similară a acestor stări sferice și efectul important al polarizării miezului, în particular al excitațiilor spin-orbită  $\nu i_{13/2} \rightarrow \nu i_{11/2}$ , care scade pe măsura scăderii numărului de neutroni în orbitalul  $i_{13/2}$ . Un interes deosebit îl prezintă factorul  $g$  al stării izomere  $8^-$ , interpretată ca stare de deformare prolate [17]. Valoarea foarte mică și negativă dedusă experimental,  $g(8^-)=-0.041(3)$ , este în acord foarte bun cu valoarea calculată pentru configurația deformată de doi cuasineutroni  $K=8^-, 7/2^- [514] \otimes 9/2^+ [624]$ ,  $g(8^-)_{calc}=-0.032$ . Menționăm că starea  $8^-$  apare sistematic ca izomer în lanțul izotonic  $N=106$ , de la nucleul deformat bogat în neutroni

$^{174}\text{Er}$  ( $Z=68$ ) până la nucleul neutrono-deficitar  $^{188}\text{Pb}$  ( $Z=82$ ) [20]. Factorul  $g$  raportat în prezentul studiu pentru starea  $8^-$  furnizează pentru prima dată o confirmare directă a configurației atribuite acestei stări.

### 2.1.3 Izomerie și momente magnetice în nucleul $^{86}\text{Y}$

Nucleul impar-impar  $^{86}\text{Y}$ , cu 39 protoni și 47 neutroni, este situat la în zona de tranziție de la izotopii aproape sferici ( $N=48-50$ ) la izotopii caracterizați prin deformări permanente semnificative ( $N \leq 44$ ). În cadrul unui studiu finalizat recent de grupul nostru, schema de nivele a acestui nucleu a fost considerabil extinsă la spini și energii înalte de excitație, și s-au efectuat calcule detaliate de model în pături într-un spațiu de valență format din orbitalii protonici și neutronici  $f_{5/2}$ ,  $p_{3/2}$ ,  $p_{1/2}$  și  $g_{9/2}$  [21]. La energii joase, schema de nivele a  $^{86}\text{Y}$  este caracterizată prin apariția stărilor izomere. Studiul prezent este dedicat elucidării structurii acestor stări, prin măsurători de timpi de viață și momente magnetice. Rezultatele obținute sunt ilustrate în Fig.3.

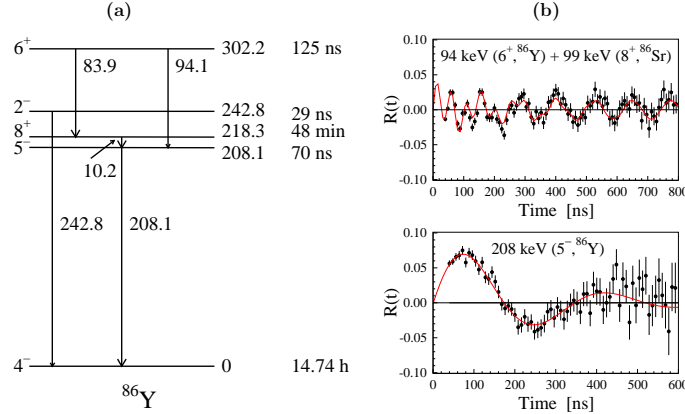


Figura 3: Rezultate privind nucleul  $^{86}\text{Y}$ : (a) schema de dezexcitare a stărilor izomere (ref.[22] și studiul prezent); (b) spectre TDPAD experimentale și curbe de fit pentru stările izomere  $6^+$  și  $5^-$ .

Tabelul 2 : Momente magnetice experimentale pentru starea fundamentală și stări izomere în  $^{86}\text{Y}$  comparate cu valori calculate folosind factori  $g$  efectivi standard (a) și factori  $g$  empirici (b).

$E_x$	$J_i^\pi$	$\mu^{exp}$	$\mu^{SM}$	
			a	b
0	$4^-$	$< 0.6$	+0.65	+0.98
208	$5^-$	-0.415(15)	-0.25	-0.40
218	$8^+$	+4.8(3)	+4.10	+4.67
243	$2^-$	-1.06(6)	-1.35	-1.27
302	$6^+$	+3.78(12)	+3.09	+3.52

Au fost efectuate două experimente independente. În primul experiment, dedicat determinării timpilor de viață, stările excitate în  $^{86}\text{Y}$  au fost populate în reacția  $^{73}\text{Ge}(^{16}\text{O}, p2n)^{86}\text{Y}$  la 57 MeV. Tinta a constat dintr-un strat de  $\text{GeO}_2$  de  $0.8 \text{ mg/cm}^2$ , cu o îmbogățire de 75%  $^{73}\text{Ge}$ , depus pe o folie de Ta. Radiațiile  $\gamma$  au fost detectate folosind cinci detectori HPGe, iar timpii de viață au fost deduși din analiza spectrelor de coincidențe  $\gamma$ - $\gamma$  întârziate. Pentru stările izomere de spini  $6^+$ ,  $2^-$  și  $8^+$  (Fig.3a), timpii de viață au fost determinați în acord foarte bun cu valorile raportate anterior în literatura [22]. Studiul prezent a relevat pentru prima dată caracterul izomeric al stării  $5^-$  la 208 keV, pentru care a fost determinată o valoare  $T_{1/2}=70(7)$  ns. Măsurătorile de momente magnetice s-au realizat prin metoda TDPAD, stările izomere de interes fiind populate și aliniat în reacția  $^{85}\text{Rb}(^3\text{He}, 2n)^{86}\text{Y}$  la 30 MeV. Tinta a fost plasată în câmp magnetic extern de  $22.1(3)$  kG. În Fig.3b sunt ilustrate spectre de modulație experimentale și curbele corespunzătoare de fit, care au permis estimarea valorilor  $g(5^-)=-0.083(3)$  și  $g(6^+)=+0.63(2)$  pentru factorii  $g$  ai stărilor izomere  $5^-$  și  $6^+$ . Proprietățile stărilor joase din  $^{86}\text{Y}$  au fost comparate cu prevederile calculului de model în pături. Pentru stările de paritate negativă,  $2^-$ ,  $4^-$  și  $5^-$ , funcțiile de undă evidențiază amestecuri de configurații, cu protonul în orbitalii de paritate negativă  $f_{5/2}$ ,  $p_{3/2}$  și  $p_{1/2}$ , și neutronul în orbitalul de paritate pozitivă  $g_{9/2}$ . Stările  $6^+$  și  $8^+$  au fost descrise prin configurația dominantă  $\pi g_{9/2} \otimes \nu g_{9/2}$ . Analiza momentelor magnetice experimentale cunoscute în nucleele din zonă a permis estimarea empirică a unui set de factori  $g$  efectivi, de spin  $g_s$ , orbital  $g_l$  și tensorial  $g_p$ , pentru proton și neutron:

$$g_{s,eff}(\pi)=+3.778, g_{l,eff}(\pi)=+1.102, g_{p,eff}(\pi)=+3.606$$

$$g_{s,eff}(\nu)=-2.415, g_{l,eff}(\nu)=-0.019, g_{p,eff}(\nu)=-0.615.$$

Momentele magnetice și probabilitățile de tranziție  $B(M1)$  în  $^{86}\text{Y}$  au fost calculate folosind atât valorile standard pentru factorii  $g$ :  $g_{s,eff}=0.7g_{s,free}$ ,  $g_{l,eff}=g_{s,free}$ , și  $g_{p,eff}=0$ , cât și setul empiric de valori dedus în prezentul studiu. Momentele magnetice experimentale ale stărilor joase din  $^{86}\text{Y}$  sunt în bun acord cu valorile calculate, după cum se ilustrează în Tabelul 2. Se constată o descriere substanțial mai bună în cazul folosirii setului de valori empirice. Pentru probabilitatea redusă  $B(M1)$  a tranziției  $5^- \rightarrow 4^-$  au fost calculate valorile  $2.2 \times 10^{-2}$  W.u. și  $1.9 \times 10^{-5}$  W.u., folosind factori  $g$  standard, respectiv setul de valori empirice. Valoarea experimentală extrem de mică,  $B(M1)_{exp}=2.0(7) \times 10^{-5}$  W.u., a fost remarcabil reprodusă de calculul de model în pături folosind setul de factori  $g$  empirici. Pentru prima dată a fost astfel

ilustrată importanța factorilor  $g$  tensoriali și au fost determinate valorile acestora pentru protoni și pentru neutroni în spațiul de configurații considerat.

## 2.2 Simetria de izospin în nucleele oglindă $^{31}\text{P}$ - $^{31}\text{S}$ .

Investigarea nucleelelor oglindă prezintă un interes considerabil, deoarece permite testarea directă a validității simetriei de sarcină a forțelor nucleare și a rolului efectelor coulombiene asupra structurii nucleare. Dacă simetria de sarcină a forței nucleare este exactă, tranzițiile  $E1$  sunt interzise în nuclee  $N=Z$  între stări cu același izospin, și au tării egale în nuclee oglindă. O modalitate de a studia încălcarea simetriei de izospin este observarea experimentală a unor deviații de la cele două reguli menționate mai sus. Scopul prezentului studiu a fost acela ca, pe baza determinării timpilor de viață, să se verifice dacă tăriile tranzițiilor  $E1$  care depopulează stările analoge  $7/2^-$  în perechea de nuclee oglindă  $^{31}\text{P}$  -  $^{31}\text{S}$  sunt egale. Schemele parțiale de nivele incluzând stările de interes în cele două nuclee sunt ilustrate în Fig.4a.

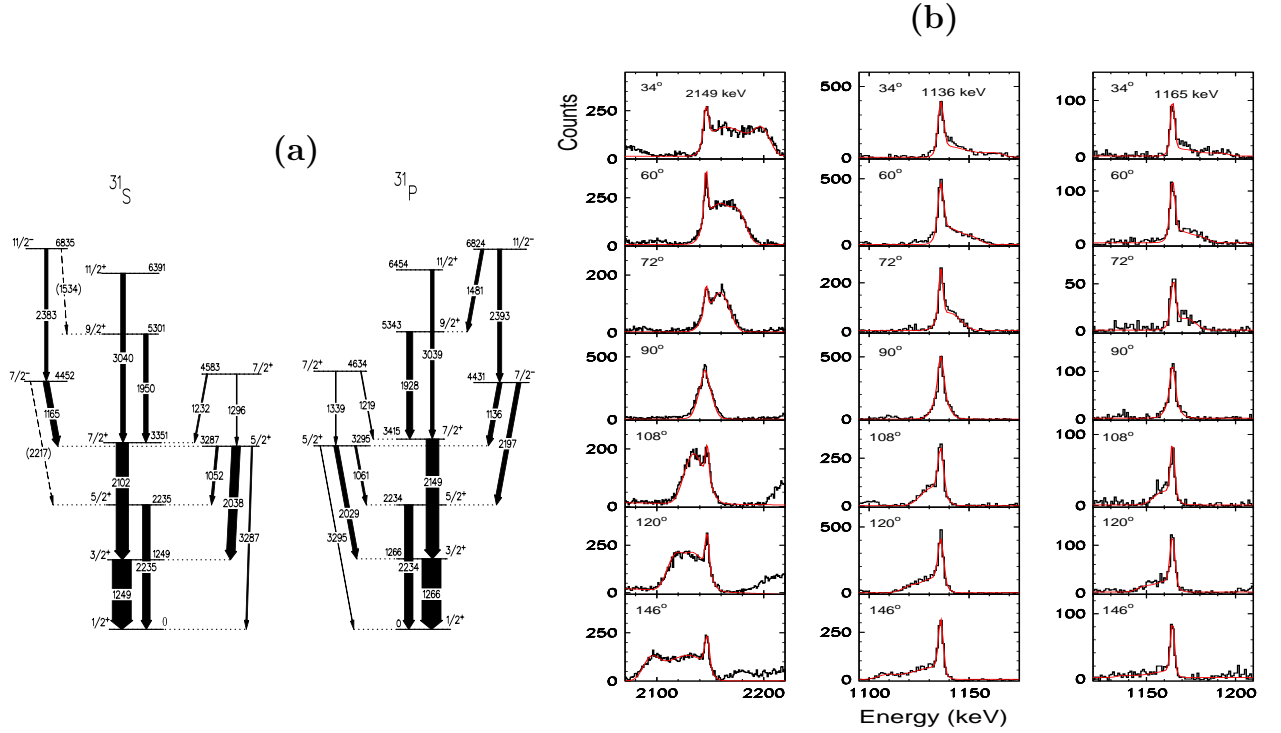


Figura 4: Rezultate privind nucleele oglindă  $^{31}\text{P}$  și  $^{31}\text{S}$ : (a) scheme parțiale de nivele [23–25]; (b) spectre experimentale DSAM și curbele de fit (culoarea roșie), obținute în cazul reacției  $^{20}\text{Ne}+^{12}\text{C}$  pentru liniile gama de 1136 și 2149 keV din  $^{31}\text{P}$  și 1165 keV din  $^{31}\text{S}$ .

Măsurătorile de timpi de viață a stărilor excitate în  $^{31}\text{P}$  și  $^{31}\text{S}$  s-au realizat prin metoda atenuării deplasării Doppler (DSAM). Au fost efectuate două experimente independente, folosind facilitățile de accelerare și detecție ale LNL. În ambele experimente razele  $\gamma$  au fost detectate cu sistemul multi-detector GASP. În primul experiment au fost utilizate reacțiile  $^{24}\text{Mg}(^{16}\text{O},2\alpha p)^{31}\text{P}$  și  $^{24}\text{Mg}(^{16}\text{O},2\alpha n)^{31}\text{S}$ , folosind un fascicol de  $^{16}\text{O}$  de 70 MeV și o țintă de  $750 \mu\text{g}/\text{cm}^2$   $^{24}\text{Mg}$  pe o foiță de Au de  $15 \text{mg}/\text{cm}^2$ . Experimentul a permis determinarea timpilor de viață ai stărilor excitate în nucleul  $^{31}\text{P}$ , bine populat în reacția utilizată [24]. Pe de altă parte, secțiunea mică de populare și fondul intens nu au permis determinarea timpilor de viață în nucleul  $^{31}\text{S}$ . În aceste condiții a fost efectuat un al doilea experiment, în care stările excitate din  $^{31}\text{S}$  și  $^{31}\text{P}$  au fost populate folosind canalele de evaporare de un neutron și respectiv un proton, ale reacției  $^{20}\text{Ne}+^{12}\text{C}$ . Fascicolul de  $^{20}\text{Ne}$  a fost livrat pentru prima dată de sistemul de accelerare Piave-ALPI al LNL. S-a folosit o țintă de  $^{12}\text{C}$  de  $0.75 \text{mg}/\text{cm}^2$  pe care a fost evaporat un strat de Au de  $10 \text{mg}/\text{cm}^2$ . Datele de coincidențe  $\gamma$ - $\gamma$  înregistrate în modul listă au fost sortate pentru a crea șapte matrici asimetrice, având pe prima axă detectorii plasați la unghiurile de 34°, 60°, 72°, 90°, 108°, 120° și respectiv 146°, iar pe a doua axă toți ceilalți detectori. Din aceste matrici au fost create spectre  $\gamma$  comandate de porți înguste pe tranzițiile intense de 1266 keV în  $^{31}\text{P}$  și respectiv 1249 keV în  $^{31}\text{S}$ . Pentru analiza datelor experimentale a fost folosit codul LINESHAPE [26]. Incetinirea nucleelelor excitate în țintă și în suportul de Au a fost simulată folosind tehnici Monte Carlo și a fost creată distribuția statistică a proiecțiilor vitezelor de recul față de direcția de detecție a radiațiilor  $\gamma$ . Pentru puterea de stopare electronică a fost adoptată parametrizarea Northcliffe-Schilling [27].

In Fig.4b sunt ilustrate forme de linie experimentale precum și curbele de fit, pentru tranzițiile de 2149 și 1136 keV în  $^{31}\text{P}$  și pentru tranziția de 1165 keV din  $^{31}\text{S}$ . Timpii de viață determinați în studiul prezent pentru nivelele din  $^{31}\text{P}$  sunt în acord foarte bun cu valorile raportate anterior [23, 24]. Pentru stările de interes  $7/2^-$  au fost obținute valorile  $\tau(7/2^-, ^{31}\text{P})=0.6(1)$  ps și  $\tau(7/2^-, ^{31}\text{S})=1.0(2)$  ps.

După cum se observă în Fig.4a, tranzițiile care depopulează starea de paritate negativă  $7/2^-$  au rapoarte de branșare diferite în nucleele oglindă  $^{31}\text{P}$  și  $^{31}\text{S}$ . În timp ce în  $^{31}\text{P}$  tranzițiile  $E1$  de 1136 keV  $7/2^- \rightarrow 5/2_2^+$  și 2197 keV  $7/2^- \rightarrow 5/2_1^+$  au intensități similare, în  $^{31}\text{S}$  starea se dezexcită doar prin tranziția de 1165 keV  $7/2^- \rightarrow 5/2_2^+$ , și nu a fost observată tranziția  $7/2^- \rightarrow 5/2_1^+$ . Pe baza timpului de viață al stării  $7/2^-$  determinat în studiul prezent pentru  $^{31}\text{S}$ , s-a obținut valoarea  $B(E1)=6.1(1.2)\times 10^{-4}$  W.u. pentru tranziția  $7/2^- \rightarrow 5/2_2^+$ , iar pentru tranziția neobservată  $7/2^- \rightarrow 5/2_1^+$  a fost stabilită o limită superioară  $B(E1) < 1.8\times 10^{-6}$  W.u. Probabilitățile reduse  $B(E1)$  în cazul  $^{31}\text{P}$  sunt  $B(E1)=4.5(8)\times 10^{-4}$  W.u. și  $B(E1)=8.2(6)\times 10^{-5}$  W.u pentru tranzițiile  $7/2^- \rightarrow 5/2_2^+$  și respectiv  $7/2^- \rightarrow 5/2_1^+$ . Menționăm că o asimetrie în rapoartele de branșare ale tranzițiilor care dezexcită starea  $7/2^-$  a fost raportată recent și în cazul perechii de nucleee oglindă  $^{35}\text{Ar}$ - $^{35}\text{Cl}$  [28]. Datele experimentale oferă astfel probe privind prezența unui amestec de izospin în structura stărilor implicate. Pentru o estimare cantitativă a acestui amestec sunt necesare noi date experimentale, în particular determinări de timpi de viață pentru stări analoge în nucleeele oglindă  $A=35$ .

### 3. Concluzii

Toate obiectivele stabilite până în prezent în cadrul proiectului ”**Momente electromagnetice statice și dinamice pentru stări nucleare excitate**” au fost realizate integral. Rezultatele obținute constituie obiectul următoarelor lucrări publicate, acceptate spre publicare sau în curs de redactare:

1. New sub- $\mu\text{s}$  isomers in  $^{125,127,129}\text{Sn}$  and isomer systematics of  $^{124-130}\text{Sn}$   
..... G. Ilie, M. Ionescu-Bujor, A. Iordachescu,.. *et al.*  
Phys. Rev. C **77**, 064313 (2008).
2. High spin structure of  $^{37}\text{Cl}$ , intruder excitations and the *sd-fp* shell gap  
M. Ionescu-Bujor, A. Iordachescu, .. N.Marginean, ..*et al.*  
Phys. Rev. C **80**, 034314 (2009).
3. Isomerism of low-lying states in  $^{86}\text{Y}$   
.... N. Marginean, M. Ionescu-Bujor, A. Iordachescu, G. Suliman... *et al.*  
Eur. Phys. J. A, trimisă spre publicare.
4. Spin, quadrupole moment and deformation of the magnetic rotational bandhead in  $^{193}\text{Pb}$   
.....M. Ionescu-Bujor, A. Iordachescu, N. Marginean,... *et al.*  
Phys. Lett. B, trimisă spre publicare.
4. *g* factors of coexisting isomers in  $^{188}\text{Pb}$   
M. Ionescu-Bujor, A. Iordachescu, G. Suliman, N. Marginean,... *et al.*  
Phys. Rev. C, trimisă spre publicare.

## Bibliografie

- [1] R. Lozeva *et al.*, Phys. Rev. C **77**, 064313 (2008).
- [2] M. Ionescu-Bujor *et al.*, Phys. Rev. C **80**, 034314 (2009).
- [3] J.M. Lagrange *et al.*, Phys. Rev. C **54**, 1106 (1996).
- [4] G. Baldisiefen *et al.*, Phys. Rev. C **54**, 1106 (1996).
- [5] L. Ducroux *et al.*, Z. Phys. A **356**, 241 (1996).
- [6] M. Ionescu-Bujor *et al.*, Phys. Rev. C **70**, 034305 (2004).
- [7] S. Chmel *et al.*, Phys. Rev. Lett. **79**, 2002 (1997).
- [8] M. Ionescu-Bujor *et al.*, Phys. Lett. B **650**, 141 (2007).
- [9] S. B. Dutta *et al.*, Z. Phys. A **341**, 39 (1991).
- [10] G.D. Dracoulis *et al.*, Phys. Rev. C **79**, 031302 (2009).
- [11] H. -E. Mahnke *et al.*, Phys. Lett. B **88**, 48 (1979).

- [12] S. Zywietz *et al.*, Hyp. Int. **9**, 109 (1981).
- [13] K. Vyvey *et al.*, Phys. Rev. Lett. **88**, 102502 (2002).
- [14] K. Vyvey *et al.*, Eur. Phys. J. A **22**, s01, 1 (2004).
- [15] S. Chmel *et al.*, Phys. Rev. C **75**, 044309 (2007).
- [16] A.N. Andreyev *et al.*, Nature (London) **405**, 430 (2000).
- [17] G.D. Dracoulis *et al.*, Phys. Rev. C **769**, 054318 (2004).
- [18] N.J. Stone, At. Data Nucl. Data tables **90**, 75 (2005).
- [19] K. Vyvey *et al.*, Phys. Rev. C **69**, 064318 (2004).
- [20] G.D. Dracoulis *et al.*, Phys. Lett. B **635**, 200 (2006).
- [21] C. Rusu *et al.*, Nucl. Phys. A **818**, 1 (2009).
- [22] B. Singh, Nuclear Data Sheets **94**, 1 (2001).
- [23] P.M. Endt, Nucl. Phys. A **633**, 1 (1998), și referințele incluse.
- [24] M. Ionescu-Bujor *et al.*, Phys. Rev. C **73**, 024310 (2006).
- [25] D.G. Jenkins *et al.*, Phys. Rev. C **72**, 031303 (2005).
- [26] J.C. Wells și N.R. Johnson, Report No. ORNL-6689, 1991, p. 44.
- [27] L.C. Northcliffe și R.F. Schilling, Nucl. Data, Sect. A **7**, 233 (1970).
- [28] J. Ekman *et al.*, Phys. Rev. Lett. **92**, 132502 (2004).

DIRECTOR PROIECT,

Dr. Manuela IONESCU-BUJOR