

**Denumire Proiect:** Momente electromagnetice statice și dinamice  
pentru stări nucleare excitate  
**Etapa 15.12.2007:** Schema de nivele de spin înalt a nucleului  $^{37}\text{Cl}$

## SINTEZA LUCRĂRII

### 1. Obiectivul etapei

Studiul stărilor de spin înalt în nucleele ușoare cu masa  $A \approx 30-40$  constituie un subiect de mare actualitate. Aceste nuclee au fost studiate anterior preponderent în reacții induse de ioni ușori (protoni, deuteroni, particule  $\alpha$ ) și în dezintegrări radioactive, ceea ce a limitat domeniul energiilor de excitație și a momentelor unghiulare ale stărilor populate la valori joase și medii. Posibilitatea populării acestor nuclee folosind reacții de fuziune-evaporare induse de ioni grei, precum și dezvoltările recente ale unor sisteme de detecție de mare eficiență, atât pentru radiațiile  $\gamma$  cât și pentru particulele încărcate, au creat premise pentru investigarea structurilor complexe de spini și excitații înalte. Interesul pentru aceste studii este în principal determinat de progresele recente ale modelului teoretic al păturilor nucleare, realizate atât prin îmbunătățirea interacțiilor efective, cât și prin extinderea considerabilă a spațiului de configurații. Datele experimentale privind excitațiile multiparticulă în nucleele ușoare cu  $A \approx 30-40$ , și în particular momentele electromagnetice dinamice, sunt esențiale pentru testarea calculelor de model în pături și elucidarea interacțiilor efective în păturile  $sd$  și  $pf$ . În plus calculele teoretice prezic la spini înalți efecte interesante de coexistență de forme și competiție a efectelor uniparticulă și colective, care pot fi elucidate experimental.

În cadrul unor studii recente pe care le-am realizat în colaborare internațională la Laboratorul Național Legnaro (LNL), Italia, au fost considerabil extinse schemele de nivele de spin înalt și au fost determinați timpii de viață ai stărilor excitate în nucleele de  $^{31}\text{P}$  [1] și  $^{34}\text{S}$  [2]. Compararea datelor experimentale cu prevederile unor calcule detaliate de model în pături, efectuate într-o bază largă de configurații, ne-a permis analiza critică a interacției efective SDFP-M dezvoltată recent pentru spațiul  $sd - fp$  [3, 4] și identificarea excitațiilor intrus protonice și neutronice în structura stărilor de spin înalt. Prezentul proiect are ca obiectiv extinderea acestor studii experimentale și teoretice la nucleele mai grele, în vederea testării interacțiilor efective la închiderea păturii neutronice  $N=20$ . În particular, prima etapă este dedicată elucidării schemei de nivele de spin înalt a nucleului  $^{37}_{17}\text{Cl}_{20}$ .

### 2. Activități desfășurate și rezultate obținute

Studiile experimentale au fost efectuate folosind tehnicile spectroscopiei  $\gamma$  în reacții induse de ioni grei. Experimentele au fost realizate la acceleratorul Tandem XTU al LNL. Nucleele de  $^{37}\text{Cl}$  au fost populate în reacția  $^{24}\text{Mg}(^{16}\text{O}, 3p)^{37}\text{Cl}$  prin bombardarea cu un fascicol de  $^{16}\text{O}$  de 70 MeV a unei ținte autosuportate de  $^{24}\text{Mg}$  de grosime  $0.4 \text{ mg/cm}^2$ . Folosind un cod de model statistic extins la stări de spini înalt, bazat pe aplicarea metodei Monte-Carlo în tratarea evaporării particulelor, a fost calculată o secțiune de 15 mb pentru canalul de reacție de evaporare a trei protoni, secțiunea de formare a nucleului compus fiind de 1033 mb. Randamentul relativ slab de populare a nucleelor de  $^{37}\text{Cl}$  a impus utilizarea unor sisteme complexe de mare eficiență pentru detecția radiațiilor  $\gamma$  și a particulelor încărcate emise.

Detecția radiațiilor  $\gamma$  de dezexcitare a nucleelor rezultate din reacție a fost realizată cu ajutorul sistemului multi-detector GASP compus din 40 de detectori HPGe cu supresie Compton și un filtru de multiplicitate format din 80 de detectori de BGO. Limita de observabilitate a sistemului se situează în jurul valorii de  $10^{-4}$ . Rezoluția energetică medie a detectorilor HPGe este de  $\approx 2.2 \text{ keV}$  la linia de 1332 keV a  $^{60}\text{Co}$ . Fiecare detector are o eficacitate de  $\approx 80\%$  din aceea a unui cristal de NaI(Tl) cu dimensiunile  $3 \times 3$ . Sistemul de supresie Compton pentru fiecare detector HPGe este compus din 8 cristale de BGO. Pentru o sursă de  $^{60}\text{Co}$  s-a obținut un raport fotic/total de  $\approx 20-25\%$  fără supresia Compton, raportul crescând la 60-65% când se utilizează supresia Compton. Filtrul de multiplicitate acoperă 80% din unghiul solid total. El este utilizat pentru a determina eveniment cu eveniment multiplicitatea și energia sumă a cascadelor de radiații  $\gamma$ . Prin condiții corespunzătoare impuse pe acești doi parametri se pot intensifica canalele de reacție de interes. În această geometrie eficacitatea totală a sistemului este de 3%. Condiționarea impusă în prezentul experiment pentru înregistrarea evenimentelor a fost coincidența a minimum doi detectori HPGe și un scintilator BGO. Calibrarea energetică s-a realizat cu surse standard de  $^{56}\text{Co}$ ,  $^{133}\text{Ba}$  și  $^{152}\text{Eu}$ . Pentru selecționarea canalelor de reacție și reconstrucția cinematică,

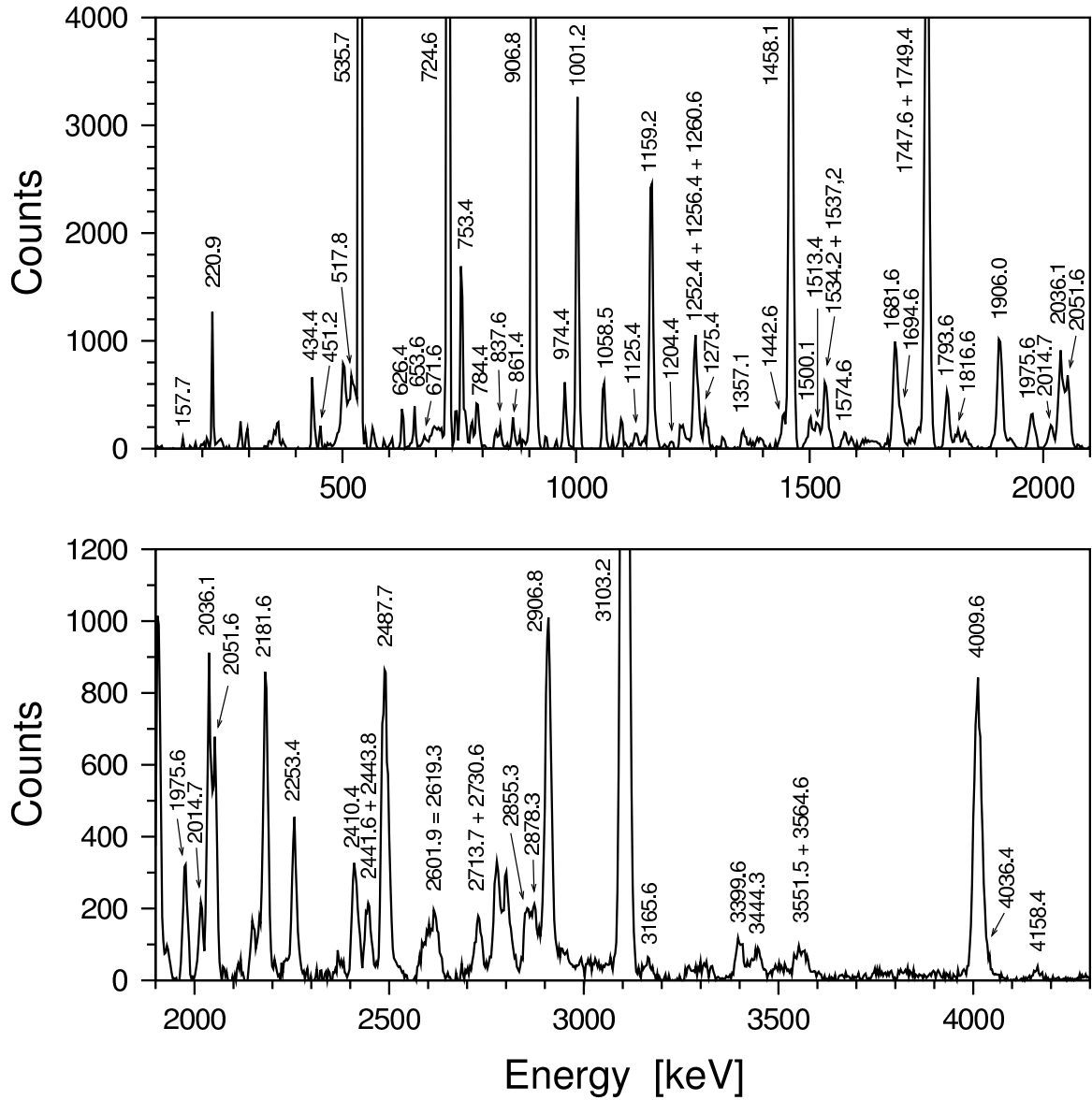


Figura 1: Spectru energetic în coincidență cu liniile  $\gamma$  de 536, 725, 907 și 3103 keV.

particulele ușoare încărcate emise în reacție au fost detectate cu sistemul ISIS compus din 40 de telescoape E- $\Delta$ E de Si, care acoperă  $\approx 92\%$  din unghiul solid total. Sistemul asigură o bună separare a protonilor de particulele  $\alpha$  și o transparență ridicată la radiațiile  $\gamma$ .

Procedura de prelucrare a datelor a cuprins operația de sortare a evenimentelor înregistrate în modul listă, precum și analiza detaliată a spectrelor de coincidențe. Pentru construirea schemei de nivele a nucleului de  $^{37}\text{Cl}$  au fost create matrici bidimensionale  $\gamma$ - $\gamma$  simetrice, coincidente cu trei protoni. Corecția Doppler a fost realizată prin reconstrucția cinematică a direcției de recul. Această corecție este esențială în cazul nucleelor ușoare, al căror moment unghiular este puternic afectat de evaporarea particulelor. Prin aplicarea acestei proceduri rezoluția energetică a fost îmbunătățită cu  $\approx 50\%$  comparativ cu aceea obținută prin aplicarea corecției Doppler simple.

Schema de nivele de spin înalt a nucleului  $^{37}\text{Cl}$ , determinată în reacții cu particule ușoare și grele anterior studiului prezent, avea valoarea maximă a spinului  $I = 13/2$ , atribuit unui nivel la energia de excitație de 5271 keV [5]. În cadrul studiilor noastre au fost observate tranzițiile  $\gamma$  cunoscute în  $^{37}\text{Cl}$  și au fost create numeroase spectre  $\gamma$  în coincidență cu aceste tranziții. Analiza acestor spectre a permis identificarea unui mare număr de tranziții  $\gamma$  noi. Pentru a stabili cascadele de populare, au fost create și numeroase spectre de coincidențe cu noile tranziții.

Exemple de spectre energetice în coincidență cu raze  $\gamma$  cunoscute în  $^{37}\text{Cl}$  sau atribuite acestui nucleu în cadrul studiilor prezente, sunt ilustrate în Figurile 1 și 2. Au fost identificate peste 60 tranziții  $\gamma$  noi, care au fost incluse într-o schemă de nivele complexă a  $^{37}\text{Cl}$ , extinsă până la o energie maximă de excitație de 17 MeV. Energiile și intensitățile tranzițiilor  $\gamma$  observate în prezentul studiu, precum și nivelele energetice care sunt

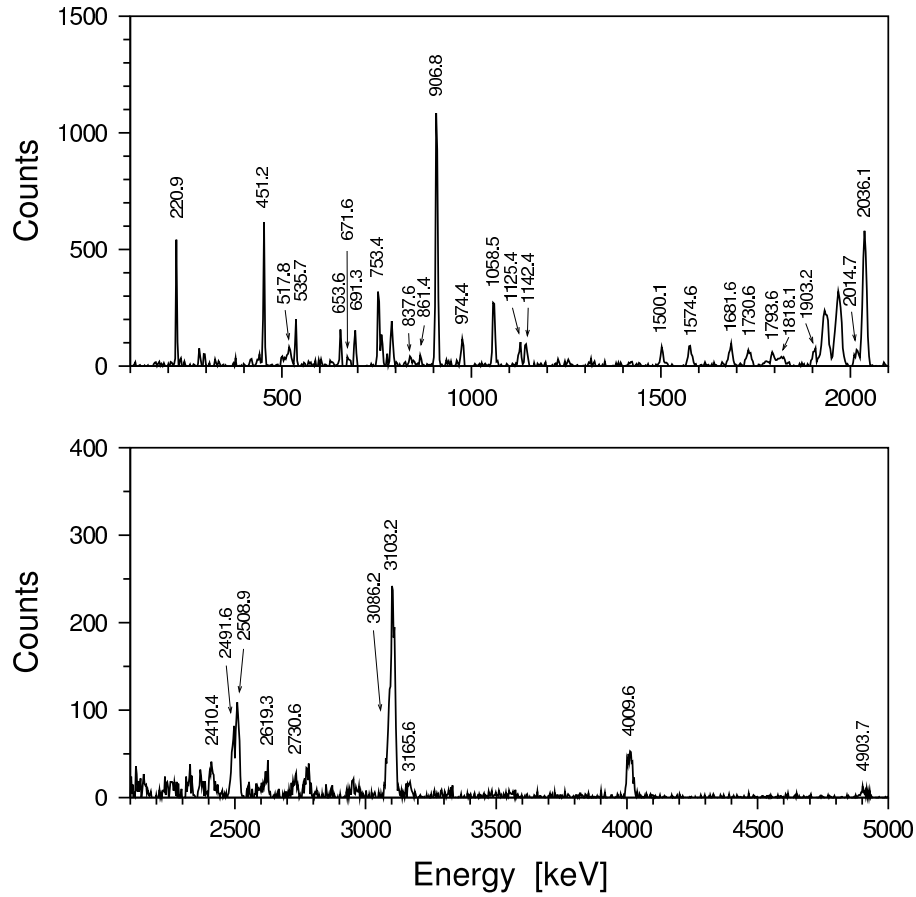


Figura 2: Spectru energetic în coincidență cu liniile  $\gamma$  de 451, 753, 974 și 4904 keV din  $^{37}\text{Cl}$ .

dezexcitate de aceste tranziții sunt incluse în Tabelul 1. În Figura 3 este prezentată schema de nivele construită pe baza datelor din Ref. [5] și a rezultatelor obținute în studiul prezent.

Tabelul 1: Energiile și intensitățile relative ale tranzițiilor  $\gamma$ , precum și nivelele energetice dezexcitate de aceste tranziții în nucleul  $^{37}\text{Cl}$ . Tranzițiile  $\gamma$  și nivelele noi, determinate pentru prima dată în prezenta lucrare, sunt marcate cu steluță.

$E_\gamma$ (keV)	$I_\gamma^{rel}$	$E_{nivel}$ (keV)	$E_\gamma$ (keV)	$I_\gamma^{rel}$	$E_{nivel}$ (keV)
157.6(3)*	2(1)	5705	1694.6(3)*	45(3)	5705
220.9(1)*	12(1)	7020	1730.6(1)*	16(4)	8530*
434.4(1)*	6(2)	5705	1747.6(1)*	196(21)	7453*
451.2(1)*	27(2)	6046	1749.4(1)	210(21)	7020
517.8(3)*	5(2)	9429*	1793.6(3)*	39(10)	8814*
535.7(1)	780(50)	4546	1816.6(3)	101(12)	4921
626.4(2)*	5(2)	5547	1818.1(4)	3(1)	4904
653.6(2)*	11(3)	7453*	1903.2(5)*	24(6)	8702*
671.6(2)*	6(3)	8530*	1906.0(1)*	114(11)	7453*
691.3(3)*	8(2)	5595	1975.6(3)*	41(8)	9429*
724.6(1)	374(30)	5271	2014.7(3)*	33(3)	8814*
753.4(1)*	109(10)	6799*	2036.1(1)	172(12)	6046
784.4(3)*	14(2)	5705	2051.6(2)*	71(7)	10963*
837.6(3)*	6(2)	7858*	2168.4(14)*	22(11)	12476*
861.4(4)*	5(2)	11433*	2181.6(1)*	83(8)	7453*
906.8(1)	846(30)	4010	2253.4(2)*	33(5)	6799*
911.2(5)	35(5)	4921	2410.4(7)*	61(7)	13843*

$E_\gamma$ (keV)	$I_\gamma^{rel}$	$E_{nivel}$ (keV)	$E_\gamma$ (keV)	$I_\gamma^{rel}$	$E_{nivel}$ (keV)
974.4(1)*	50(9)	7020	2441.6(14)*	40(9)	13841*
1001.2(1)	96(10)	5547	2443.8(2)*	60(11)	5547
1058.5(2)*	45(5)	7858*	2487.7(3)*	158(33)	11399*
1125.4(4)*	14(4)	6046	2491.6(2)*	22(2)	5595
1142.4(2)*	11(2)	6046	2508.9(2)	36(3)	5595
1159.2(1)*	116(4)	5705	2601.9(1)*	35(4)	5705
1169.5(3)	44(5)	4273	2619.3(9)*	31(5)	11433*
1204.4(2)*	22(5)	6799*	2713.6(9)*	16(7)	10572*
1244.6(6)*	8(2)	5705	2730.6(7)*	29(8)	11433*
1252.4(3)*	47(5)	6799*	2855.3(14)*	31(8)	10308*
1256.4(3)*	17(5)	7453*	2878.3(8)*	24(5)	13841*
1260.6(1)*	24(5)	5271	2906.8(1)*	168(21)	7453*
1275.4(3)	44(5)	6197	3086.2(5)	31(5)	3086
1357.1(3)	16(2)	4460	3103.2(1)	1000(19)	3103
1374.4(2)	11(2)	4460	3165.6(9)*	25(5)	17009*
1432.4(5)*	18(2)	5705	3399.6(11)*	17(3)	8671*
1442.6(1)*	34(4)	4546	3444.3(15)*	16(3)	8715*
1458.1(1)*	422(29)	8911*	3551.5(17)*	10(3)	10572*
1500.1(3)*	15(4)	6046	3564.6(14)*	15(5)	12476*
1513.4(7)*	24(3)	12476*	4009.6(1)	316(16)	4010
1534.2(3)*	16(6)	10963*	4036.4(21)*	9(2)	15435*
1537.2(2)	16(5)	5547	4158.4(13)*	8(2)	9429*
1574.6(3)*	21(4)	10105*	4903.7(23)	11(3)	4904
1681.6(2)*	62(4)	8702*			

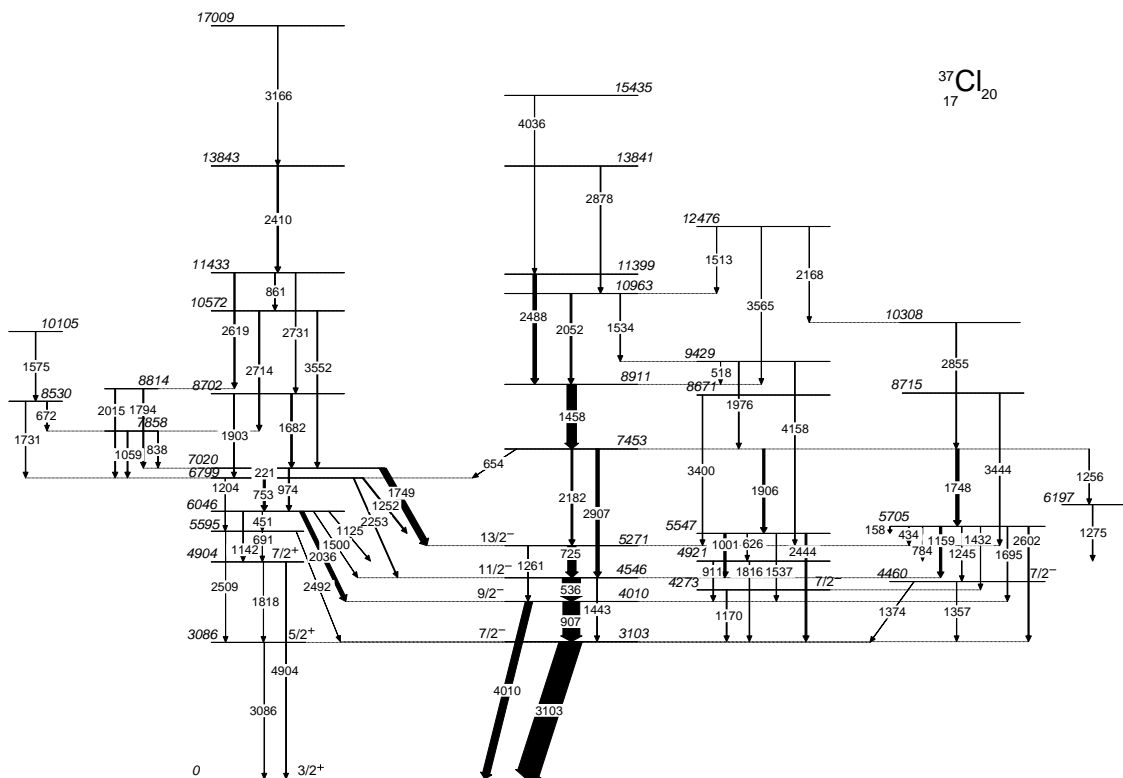


Figura 3: Schema de nivele a nucleului  $^{37}\text{Cl}$  stabilită în lucrarea prezentă. Grosimea săgeților care reprezintă tranzițiile  $\gamma$  este proporțională cu intensitatea acestora.

### 3. Concluzii

În prezenta lucrare stările de spin înalt din  $^{37}\text{Cl}$  au fost investigate pentru prima dată într-o reacție de fuziune-evaporare indusă de ioni grei, folosindu-se sisteme de detecție de mare eficiență. Au fost obținute informații experimentale originale, concretizate prin stabilirea unei scheme complexe de nivele excitate în  $^{37}\text{Cl}$ .

În etapa următoare, studiile vor fi continuate, atât pe plan experimental, cât și teoretic. Vor fi efectuate analize de distribuții unghiulare ale razelor  $\gamma$  pentru determinarea multipolarităților noilor tranziții și atribuirea de spini și parități nivelelor corespunzătoare. Timpii de viață ai nivelelor excitate vor fi investigați prin metoda atenuării deplasării Doppler. Structurile observate experimental vor fi comparate cu prevederile teoretice ale calculelor de model de pături nucleare.

Obiectivele etapei au fost realizate integral.

### Bibliografie

- [1] M. Ionescu-Bujor, A. Iordachescu, D.R. Napoli, S.M.Lenzi, N. Marginean, T. Otsuka, Y. Utsuno, R.V. Ribas, M. Axiotis, D. Bazzacco, A.M. Bizzeti-Sona, P.G. Bizzeti, F. Brandolini, D. Bucurescu, M.A. Cardona, G.de Angelis, M.De Poli, F. Della Vedova, E. Farnea, A. Gadea, D. Hojman, C.A. Kalfas, Th. Kroll, S. Lunardi, T. Martinez, P. Mason, P. Pavan, B. Quintana, C. Rossi Alvarez, C.A. Ur, R. Vlastou, S. Zilio, Phys. Rev. C 73, 024310 (2006).
- [2] P. Mason, N. Marginean, S.M.Lenzi, M. Ionescu-Bujor, F. Della Vedova, D.R. Napoli, T. Otsuka, Y. Utsuno, F. Nowacki, M. Axiotis, D. Bazzacco, P.G. Bizzeti, A. Bizzeti-Sona, F. Brandolini, M. Cardona, G.de Angelis, E. Farnea, A. Gadea, D. Hojman, A. Iordachescu, C. Kalfas, Th. Kroll, S. Lunardi, T. Martinez, C.M. Petrache, B. Quintana, R.V. Ribas, C. Rossi Alvarez, C.A. Ur, R. Vlastou, S. Zilio, Phys. Rev. C 71, 014316 (2005).
- [3] Y. Utsuno, T. Otsuka, T. Mizusaki, M. Honma, Phys. Rev. C 60, 054315 (1999).
- [4] Y. Utsuno, T. Otsuka, T. Glasmacher, T. Mizusaki, M. Honma, Phys. Rev. C 70, 044307 (2004).
- [5] P.M. Endt, Nucl. Phys. A **521**, 1 (1990), și referințele incluse.

DIRECTOR PROIECT,

Dr. Manuela IONESCU-BUJOR