

## **Rezultate ale cercetarilor obtinute in cadrul proiectului PNCDI-2 IDEI Nr. 117/01.10.2007**

### **Rezumat proiect**

Proiectul IDEI Nr. 117/2007 este intitulat “**Spectroscopie nucleara de inalta rezolutie prin reactii de transfer cu proiectile usoare polarizate**”. Ca atare, isi propune sa abordeze cercetari de structura nucleara complementare celor care se obtin de regula prin intermediul spectroscopiei gama in reactii cu ioni grei, prin studiul unor reactii de transfer directe, cu proiectile usoare. Complementaritatea consta in principal prin popularea unui mare numar de stari de spin jos, precum si posibilitatea de a extrage cu usurinta informatii privind structura microscopica (de model inpaturi) a starilor respective (spre deosebire de reactiile cu ioni grei, unde se populeaza preponderent stari de spin inalt, colective). Pentru a obtine insa rezultate comparabile in calitate, este necesar ca aceste studii sa fie efectuate cu o instrumentatie care sa asigure (i) o inalta rezolutie energetica; (ii) o mare sensibilitate (spectrele sa fie practic fara fond strain). In momentul de fata exista foarte putine instalatii capabile sa raspunda acestor cerinte la un nivel care sa faca spectroscopia respectiva competitiva cu spectroscopia gama. Unicul laborator din Europa dotat cu asemenea instrumente este cel al Universitatii Tehnice din Muenchen (TUM). TUM dispune de un accelerator Tandem de 15 MV. Acesta este dotat cu o sursa de ioni polarizati de tip Stern-Gerlach, lucru extrem de important, intrucat efectuarea unor reactii cu fascicule polarizate da posibilitatea unor atribuirii neambigue de spin starilor din nucleul final. Reactiile propriu-zise, induse de protoni sau deuteroni polarizati, sunt analizate cu un instrument unic, spectrograful magnetic de tip Q3D, dotat cu un detector de plan focal cu catod segmentat, care asigura: o rezolutie energetica excelenta (la nivel de ~5 keV FWHM pentru ioni cu energie tipica de 25 MeV) si o recunoastere a tipului particulei emergente (inlaturand 'fondul' creat de celelalte canale de reactie deschise).

Experimentele propuse de noi pe ideile de mai sus au fost deci efectuate la spectrograful Q3D al Universitatii Tehnice din Muenchen, in colaborare cu un grup axat pe studii de reactii nucleare. Colaborarea stabilita in acest scop a avut ca suport si un grant castigat la DFG (Deutsche Forschungsgemeinschaft).

### **Echipa:**

- Dr. CS1 Bucurescu Dorel
- Dr. CS3 Irina Cata-Danil
- Dr. CS Filipescu Dan
- Drd. CS Suliman Gabriel
- Dr. CS Dan Ghita

### **Implicare tineri cercetatori:**

Cei mai tineri membri ai echipei (ultimii trei din lista de mai sus) au fost puternic implicati la realizarea tuturor etapelor, in ultimii doi ani alaturandu-se echipei un al tanar doctorand (neacoperit din acest contract totusi), Pascu Sorin. La inceputul anului 2010 s-a sustinut **o teza de doctorat**, bazata in principal pe rezultate obtinute in cadrul acestui proiect (Dl. Suliman Gabriel).

Mai jos, sunt descrise rezultatele obtinute la fiecare etapa. Urmeaza o lista a publicatiilor stiintifice realizate in cadrul proiectului.

## Etape / realizari:

**Etapa 1:** Studiul structurii nucleului  $^{130}\text{Ba}$  prin reactia cu transfer de doi nucleoni  $^{132}\text{Ba}(p,t)^{130}\text{Ba}$  (15.12.2007).

Nucleul  $^{130}\text{Ba}$  a fost considerat un caz ideal pentru investigarea unor posibile simetrii de structura nucleara, intr-o zona in care se discuta simetria dinamica  $O(6)$  (nuclee "moi" in parametrul de deformare asimetrica gamma) precum si o posibila simetrie de punct critic de tranzitie de faza intre simetriile dinamice  $U(5)$  (vibrator anarmonic) si  $SU(3)$  (rotor simetric). Pentru studiul acestui nucleu a fost propusa reactia cu transfer de 2 neutroni (p,t), care distinge cu mare usurinta excitatiile monopolare (starile  $0^+$ ) si cele quadrupolare (starile  $2^+$ ). S-a obtinut mai intai o tinta de  $^{132}\text{Ba}$  cu o imbogatire izotopica de 100%, la separatorul de izotopi de la Orsay (Franta), plecand de la material izotopic imbogatit numai 11.9% in  $^{132}\text{Ba}$  (a carui concentratie naturala este de numai 0.1%). S-au masurat 8 spectre intre 8 si 40 de grade, cu o rezolutie energetica de cca 8 keV (dictata in principal de calitatile sursei). S-au determinat distributii unghiulare pentru 27 de stari excitate pana la o energie de excitatie de 2.6 MeV, pentru marea majoritate fiind atribuite spinul si paritatea, in urma unor analize DWBA. Structura de nivele observata a nucleului  $^{130}\text{Ba}$  a fost comparata cu calcule efectuate pe baza modelului bosonilor in interactie (IBA). Aceasta analiza a condus la concluzia ca structura nucleului respectiv este foarte apropiata de simetria dinamica  $O(6)$ .

**Etapa 2:** 1. Teste privind masurarea unor reactii de transfer in cinematica inversa cu un fascicul stabil de masa medie. 2. Structura nucleului  $^{133}\text{Ba}$  prin reactia  $^{132}\text{Ba}(p,d,p)$ . (30.08.2008).

1. Interesul pentru reactiile directe de transfer efectuate in cinematica inversa (tinta usoara si fascicul greu) este foarte mare, dat fiind ca aceasta metoda de studiu este potrivita in viitor facilitatilor cu fascicule radioactive. Din acest motiv, impreuna cu grupul de la Muenchen, s-a pus la punct o metoda de detectie, care a fost testata cu fascicule de ioni grei stabile. In cinematica inversa, o reactie directa de tip (d,p) de exemplu, se caracterizeaza prin concentrarea nucleului greu final pe directia fasciculului, si prin emisia particulei usoare (protonul, in acest caz) la unghiuri inapoi. Din acest motiv, dispozitivul experimental propus a utilizat un detector de siliciu "inelar", de grosime 1 mm, dublu segmentat (pe o fata dupa 48 inele circulare, pe cealalta dupa 48 sectoare – deci care asigura masurarea simultana a 2304 'pixeli'). Au fost masurate cu acest detector distributii unghiulare quasi-continue ale protonilor in reactia  $d(^{54}\text{Fe},p)^{55}\text{Fe}$  la o energie a fasciculului de  $^{54}\text{Fe}$  de 259 MeV (4.8 MeV/A) – unghiurile masurate corespunzand, in reactia corespunzatoare de cinematica 'directa', la 10 pana la 30 de grade. Aceste distributii unghiulare au fost comparate cu cele masurate separat, in reactia  $^{54}\text{Fe}(d,p)^{55}\text{Fe}$ . Detectorul respectiv va fi folosit pentru studii cu fascicule radioactive, in primul rand la instalatia ISOLDE de la CERN, Geneva.

2. Nucleul  $^{133}\text{Ba}$  a fost propus pentru un studiu mai detaliat datorita apropierii sale de  $^{134}\text{Ba}$ , un nucleu par-par care este unul din cei mai buni candidati pentru simetria de punct critic de tranzitie de faza  $E(5)$ . Daca in nucleele par-pare s-a aratat ca simetria respectiva este doar usor rupta, nu este clar in ce masura aceasta simetrie se manifesta in structura nucleelor impare invecinate (care rezulta din cuplarea unui fermion – nucleonul impar, la miezul par-par cu simetrie  $E(5)$ ). Nucleul  $^{133}\text{Ba}$  a fost studiat prin intermediul reactiei  $^{132}\text{Ba}(d,p)$ , efectuata cu deuteroni polarizati. S-au masurat deci distributii unghiulare (sectiuni eficace diferentiale ca functie de unghi) si asimetrii ale protonilor, pentru 10 unghiuri, intre 6 si 40 de grade, pentru stari

excitate până la o energie de 2.2 MeV. Din analiza DWBA a distribuțiilor unghiulare și a asimetriilor s-au putut determina în mod neambiguu spinii și parități pentru un mare număr de nivele excitate ale  $^{133}\text{Ba}$ . În particular, chiar la energii de excitație joase, de până la 1 MeV, au fost rezolvate multe din ambiguitățile existente. Caracterizarea extrem de bună a structurii acestui nucleu a prilejuit o testare detaliată cu prezicerile catorva modele nucleare de structură. Astfel, s-a arătat că schema supersimetrică  $E(5/4)$  nu este adecvată (cuplarea, în anumite condiții, a doi orbitali,  $s_{1/2}$  și  $d_{3/2}$ , la un miez  $E(5)$ ). Un acord mult mai bun s-a obținut făcând calcule complete de IBFM (Interacting Boson-Fermion Model) în care s-a cuplat la miezul  $^{134}\text{Ba}$  (descries pe baza modelului IBA) un fermion care putea ocupa toți orbitalii de paritate pozitivă disponibili ( $g_{7/2}$ ,  $d_{5/2}$ ,  $d_{3/2}$ ,  $s_{1/2}$ ). Au fost efectuate, de asemenea, calcule cu modelul în paturi, utilizând o bază de diagonalizare mare (în care au fost incluși toți orbitalii din paturile  $Z, N = 50 - 82$ , trunchiindu-se astfel încât să fie permise doar una sau două gauri neutronice în  $g_{7/2}$  și  $d_{5/2}$ , și numai doi, sau patru protoni să poată fi excitați din paturile inferioare  $g_{7/2}$  și  $d_{5/2}$ , în paturile superioare  $d_{3/2}$ ,  $s_{1/2}$ ,  $h_{11/2}$ ). Aceste calcule au produs cel mai bun acord cu datele experimentale cunoscute: energii de excitație, mode de dezintegrare gamă, factori spectroscopici în reacția (d,p).

**Etapa 3:** Structura nucleului  $^{131}\text{Ba}$  prin reacția  $^{132}\text{Ba}(d,p,t)$  și sistematica excitațiilor de monopol ( $0^+$ ) și quadrupol ( $2^+$ ) în izotopii Bariului prin reacția de transfer (p,t); teste ale modelului IBFM (30.06.2009).

1. Studiul nucleului  $^{131}\text{Ba}$ . Acest nucleu a fost studiat cu o foarte bună rezoluție energetică, prin reacția directă de pickup  $^{132}\text{Ba}(d,t)$ , la 25 MeV, utilizând de asemenea un fascicul de deuteroni polarizați. În acest fel, s-au putut face atribuiri neambigue de spin și paritate la un mare număr de nivele excitate, analog cazului  $^{133}\text{Ba}$  raportat la faza a doua. În particular, mai multe stări  $3/2^+$  și  $5/2^+$  (reprezentând fragmentarea orbitalilor neutronici  $d_{3/2}$  și  $d_{5/2}$ ) au putut fi determinate în mod neambiguu până la energia de excitație de cca 1.5 MeV. O asemenea caracterizare detaliată a structurii acestui nucleu permite o mult mai bună apreciere a meritelor unor modele nucleare folosite pentru înțelegerea structurilor observate. În particular, pentru acest nucleu au fost efectuate calcule cu modelul bosonilor și fermionilor în interacție (IBFM), în care s-a cuplat la miezul  $^{132}\text{Ba}$  o gaură neutronică în oricare din orbitalii  $s_{1/2}$ ,  $d_{3/2}$ ,  $d_{5/2}$ ,  $g_{7/2}$ . Acest model da o descriere rezonabilă a proprietăților stărilor excitate până la cca 1.5 MeV; atât rapoartele de ramificare cât și tăriile spectroscopice măsurate în reacția (d,t) sunt descrise rezonabil de bine. S-a constatat o observare experimentală aproape completă a distribuției orbitalilor  $s_{1/2}$  și  $d_{3/2}$ , în timp ce pentru  $d_{5/2}$ , și, mai ales,  $g_{7/2}$ , au fost observate mult mai puține stări decât se aștepta.

2. Sistematica excitațiilor de monopol și quadrupol în izotopii Bariului prin reacția (p,t). S-a efectuat un studiu al nucleului  $^{128}\text{Ba}$  prin reacția  $^{130}\text{Ba}(p,t)^{128}\text{Ba}$  la 25 MeV, completând sistematica existentă pentru stările  $0^+$  și  $2^+$  din izotopii par-pari ai Ba. Mergând pe această sistematică, de la  $^{128}\text{Ba}$  la  $^{134}\text{Ba}$ , se urmărește sistematica acestor stări: numărul lor, distribuția energetică și taria excitației în reacția (p,t). Toate aceste date experimentale sunt înțelese destul de bine într-o analiză bazată pe modelul bosonilor în interacție (IBM) în care izotopii respectivi evoluează într-o zonă foarte apropiată de simetria  $O(6)$ .

**Etapa 4:** Masuratori de mare precizie de reacții de transfer de unul sau doi nucleoni, cu fascicule polarizate, pe alte nuclee de masă medie. (Septembrie 2010).

S-au făcut masuratori ale reacției  $^{168}\text{Er}(p,t)^{166}\text{Er}$ . Rezultatele preliminare privind stările excitate  $0^+$  indică deosebiri surprinzătoare față de cazul nucleului  $^{168}\text{Er}$ , studiat în urmă cu câțiva ani prin reacția  $^{170}\text{Er}(p,t)^{168}\text{Er}$ . Se întrevăde redactarea unui articol încă în cursul anului 2010.

**Publicații** (pana la data de 20 apr. 2010):

- 1) G. Suliman, D. Bucurescu, *et al.*, *European Physical Journal* **A36**(2008)243.
- 2) T. von Egidy, D. Bucurescu, *Physical Review* **C78**(2008)0151301(R).
- 3) N.V. Zamfir, D. Bucurescu, G. Cata-Danil, M. Ivascu, N. Marginean, *Acta Physica Polonica* **B40** (2009) 503.
- 4) C. Rusu, C.A. Ur, D. Bucurescu, *et al.*, *Nuclear Physics* **A818**(2009)1.
- 5) G. Suliman, D. Bucurescu, *et al.*, *European Physical Journal* **A41**(2009)299-313.
- 6) S. Pascu, G. Cata-Danil, D. Bucurescu, *et al.*, *Physical Review* **C79**(2009)064323
- 7) S. Pascu, G. Cata-Danil, D. Bucurescu, *et al.*, *Physical Review* **C81**(2010)014304
- 8) G. Suliman, D. Bucurescu, *et al.*, *European Physical Journal* (2010) in curs de publicare

Lucrarea 5) a fost selectionata de catre editorii revistei pentru a fi prezentata in sectiunea "Highlights" a revistei "Europhysics News" (textul respectiv va apare in Vol. 40 / Nr. 5 al acestei reviste). De asemenea, una din figurile articolului a aparut pe coperta Vol. 41, Nr. 3 al revistei in care a fost publicata lucrarea (se ataseaza fisierele care prezinta aceasta coperta si textul "highlight")