

## **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 atribuii 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 apropierei 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 pana la o energie de 2.2 MeV. Din analiza DWBA a distributiilor unghiulare si a asimetriilor s-au putut determina in mod neambiguu spini si paritati pentru un mare numar de nivele excitate ale  $^{133}\text{Ba}$ . In particular, chiar la energii de excitatie joase, de pana la 1 MeV, au fost rezolvate multe din ambiguitatile existente. Caracterizarea extrem de buna a structurii acestui nucleu a prilejuit o testare detaliata cu prezicerile catorva modele nucleare de structura. Astfel, s-a aratat ca schema supersimetrica  $E(5/4)$  nu este adecvata (cuplarea, in anumite conditii, a doi orbitali,  $s_{1/2}$  si  $d_{3/2}$ , la un miez  $E(5)$ ). Un acord mult mai bun s-a obtinut facand calcule complete de IBFM (Interacting Boson-Fermion Model) in care s-a cuplat la miezul  $^{134}\text{Ba}$  (descries pe baza modelului IBA) un fermion care putea ocupa toti orbitalii de paritate pozitiva disponibili ( $g_{7/2}$ ,  $d_{5/2}$ ,  $d_{3/2}$ ,  $s_{1/2}$ ). Au fost efectuate, de asemenea, calcule cu modelul in paturi, utilizand o baza de diagonalizare mare (in care au fost inclusi toti orbitalii din paturile  $Z, N = 50 - 82$ , trunchiindu-se astfel incat sa fie permise doar una sau doua gauri neutronice in  $g_{7/2}$  si  $d_{5/2}$ , si numai doi, sau patru protoni sa poata fi excitati din paturile inferioare  $g_{7/2}$  si  $d_{5/2}$ , in 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 excitatie, mode de dezintegrare gama, factori spectroscopici in reactia (d,p).

**Etapa 3:** Structura nucleului  $^{131}\text{Ba}$  prin reactia  $^{132}\text{Ba}(d, p, t)$  si sistematica excitatiilor de monopol ( $0^+$ ) si quadrupol ( $2^+$ ) in izotopii Bariului prin reactia 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 buna rezolutie energetica, prin reactia directa de pickup  $^{132}\text{Ba}(d, t)$ , la 25 MeV, utilizand de asemenea un fascicul de deuteroni polarizati. In acest fel, s-au putut face atribuirii neambigue de spin si paritate la un mare numar de nivele excitate, analog cazului  $^{133}\text{Ba}$  raportat la faza a doua. In particular, mai multe stari  $3/2^+$  si  $5/2^+$  (reprezentand fragmentarea orbitalilor neutronic  $d_{3/2}$  si  $d_{5/2}$ ) au putut fi determinate in mod neambiguu pana la energia de excitatie de cca 1.5 MeV. O asemenea caracterizare detaliata a structurii acestui nucleu permite o mult mai buna apreciere a meritelor unor modele nucleare folosite pentru intelegerea structurilor observate. In particular, pentru acest nucleu au fost efectuate calcule cu modelul bosonilor si fermionilor in interactie (IBFM), in care s-a cuplat la miezul  $^{132}\text{Ba}$  o gaura neutronica in oricare din orbitalii  $s_{1/2}$ ,  $d_{3/2}$ ,  $d_{5/2}$ ,  $g_{7/2}$ . Acest model da o descriere rezonabila a proprietatilor starilor excitate pana la cca 1.5 MeV; atat rapoartele de ramificare cat si tariile spectroscopice masurate in reactia (d,t) sunt descrise rezonabil de bine. S-a constatat o observare experimentală aproape completa a distributiei orbitalilor  $s_{1/2}$  si  $d_{3/2}$ , in timp ce pentru  $d_{5/2}$ , si, mai ales,  $g_{7/2}$ , au fost observate mult mai putine stari decat se astepta.

2. Sistematica excitatiilor de monopol si quadrupol in izotopii Bariului prin reactia (p,t). S-a efectuat un studiu al nucleului  $^{128}\text{Ba}$  prin reactia  $^{130}\text{Ba}(p, t)^{128}\text{Ba}$  la 25 MeV, completand sistematica existenta pentru starile  $0^+$  si  $2^+$  din izotopii par-pari ai Ba. Mergand pe aceasta sistematica, de la  $^{128}\text{Ba}$  la  $^{134}\text{Ba}$ , se urmareste sistematica acestor stari: numarul lor, distributia energetica si taria excitarii in reactia (p,t). Toate aceste date experimentale sunt intelese destul de bine intr-o analiza bazata pe modelul bosonilor in interactie (IBM) in care izotopii respectivi evolueaza intr-o zona foarte apropiata de simetria  $O(6)$ .

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

S-au facut masuratori ale reactiei  $^{168}\text{Er}(p, t)^{166}\text{Er}$ . Rezultatele preliminare privind starile excitate  $0^+$  indica deosebiri surprinzatoare fata de cazul nucleului  $^{168}\text{Er}$ , studiat in urma cu cativa ani prin reactia  $^{170}\text{Er}(p, t)^{168}\text{Er}$ . Se intrevea redactarea unui articol inca in 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")