

# RAPORT ȘTIINȚIFIC SINTETIC

PERIOADA 2011-2016

Studiul stărilor izomere utilizând spectroscopia  $\gamma$  a nucleelor din vecinătarea  $^{78}\text{Ni}$  constituie un subiect de interes actual pentru fizica nucleară actuală. Realizarea experimentelor propuse în cadrul acestui proiect a permis testarea diferitelor interacții nucleare și investigarea evoluției formelor nucleare. Totodată, din comparația valorilor observabilelor experimentale cu cele prezise de calculele teoretice noi constrângeri pot fi aduse acestora din urmă în vederea îmbunătățirii puterii lor de predicție. Prezentul raport este conținut principalele rezultate obținute în urma experimentelor realizate la laboratorul GANIL (Franța) (studiul  $^{72,75}\text{Cu}$ ) și IPN Orsay ( $^{69}\text{Cu}$ ).

## Metode utilizate

Nucleele de interes au fost produse prin fragmentarea unui fascicol de  $^{86}\text{Kr}$  pe o țintă de Be la o energie de 60.4 MeV/A. Tehnica experimentală folosită pentru studiul nucleelor de  $^{72,75}\text{Cu}$  a fost aceea de separare a fragmentelor prin metoda timpului de zbor și implantarea acestora într-o folie subțire de Kapton (75  $\mu\text{m}$ ). Acest lucru a presupus utilizarea unor grosimi suplimentare de material pentru încetinerea fragmentelor ce se doreau să fie studiate. Fragmenetele au fost identificate într-o matrice timp de zbor - pierdere de energie într-un detector de siliciu aflat în planul focal al spectrometrului LISE2k [1]. Pentru un bun control al impantării nucleelor după acest detector a fost plasat un degrador de Aluminium cu grosimea de 115  $\mu\text{m}$ , ce putea să fie rotit astfel încât grosimea să efectivă să poată să varieze. Pentru detecția radiațiilor  $\gamma$  s-au utilizat trei detectori HPGe, unul din aceștia fiind de tip LEPS (folosit pentru detecția radiațiilor de joasă energie), plasati în geometrie compactă. Datorită acestei configurații eficiența detectorilor prezintă o puternică dependență de profilul de implantare al ionilor. Din acest motiv pentru reconstrucția distribuțiilor spațiale ale nucleelor implantate s-a utilizat un detector sensibil la poziție cu suprafață activă de 63 mm X 63 mm, plasat după degradorul de Aluminum. Mai mult, pentru rejectarea evenimentelor asociate cu ionii care nu au fost stopați în folia de Kapton, un altul detector de siliciu a fost plasat în spatele acesteia, semnalul acestuia fiind folosit ca veto pentru detectorii de germaniu.

Pentru optimizarea condițiilor de implantare în etapa premergătoare experimentului, a fost necesară realizarea de simulații LISE++ [2] pentru calculul grosimii degradorului de Aluminum țindând cont de posibilul efect de staggling inducă de către acesta, dar și pentru stabilirea condițiilor de selecție și transmisie optime a nucleelor de  $^{75}\text{Cu}$  prin spectrometru. De asemenea, au fost realizate simulații Monte Carlo, utilizând pachetul GEANT4 [3] pentru a avea o estimare a eficiențelor detectorilor utilizați. În cadrul programului dezvoltat astfel, a fost introdusă geometria de detecție, dar și caracteristicile individuale ale detectorilor. Validarea rezultatelor simulărilor a fost făcută prin comparația cu rezultatele experimentale obținute cu o sursă de calibrare de  $^{133}\text{Ba}$  plasată în diferite puncte ale foliei de implantare.

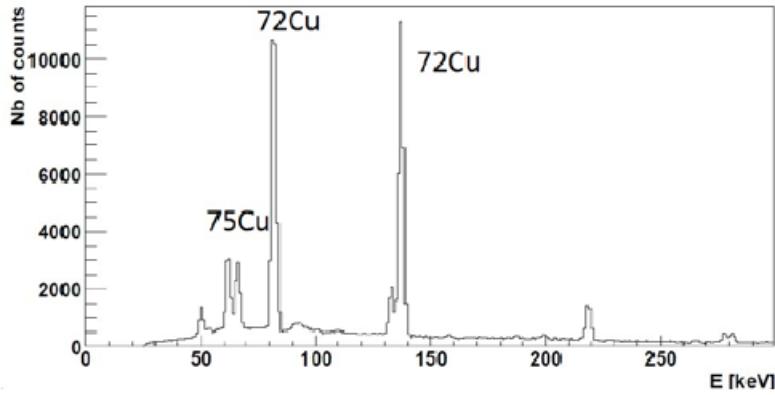


Figura 1: Spectrul gamma condiționat cu implantarea nucleelor de  $^{75}\text{Cu}$ .

Rezultatele experimentale prezentate în următoarea secțiune au fost obținute folosind coincidențele  $\gamma\text{-}\gamma$ , dar și prin determinarea timpilor de înjumătățire al tranzițiilor de interes.

## Rezultate obținute

Datorită energiei relativ scăzute a fascicolului primar, producerea de stări de sarcină ale nucleelor nu a fost neglijabilă, acest fapt a condus la suprapunerea în matricea de coincidență a nucleelor caracterizate de aceleași valoare a raportului  $A/Q$ . De exemplu nucleul de  $^{72}\text{Cu}^{+1}$  se suprapune cu nucleul de  $^{75}\text{Cu}$  complet stripat, astfel condiționând spectrul  $\gamma$  cu implantarea acestora a fost obținută Figura 1, unde se poate observa prezența atât a gammelor din nucleul de  $^{75}\text{Cu}$ , cât și a celor din  $^{72}\text{Cu}$ .

Punând o poartă pe diferitele tranziții prezente în spectru, informații despre timpii de viață ai acestora au putut fi extrase. Pentru acesta distribuțiile de timp au fost fitate cu o funcție ce reprezintă convoluția dintre o gaussiana și o exponențială. Un asemenea spectru de timp cu funcția de fit corespunzătoare este ilustrat în Figura 2 pentru tranzițiile din nucleul  $^{75}\text{Cu}$ .

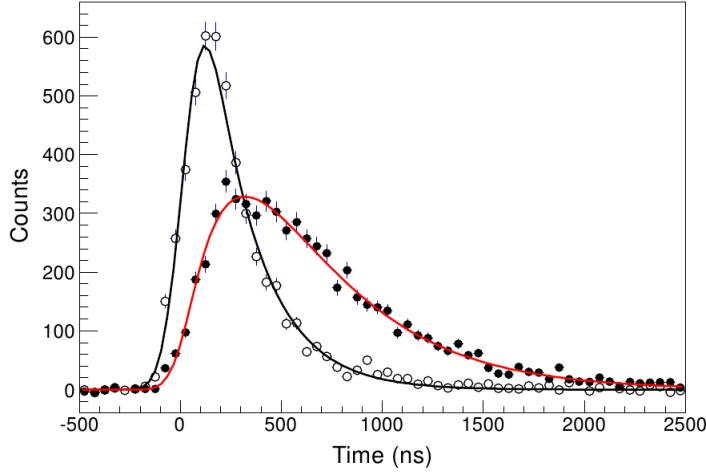


Figura 2: Distribuțiile de timp condiționate cu energiile de 61.7 (linia roșie) și 66.2 keV (linia neagră) aparținând nucleului de  $^{75}\text{Cu}$ .

O particularitate a structurii nucleului de  $^{75}\text{Cu}$  o reprezintă existența la joasă energie a două stări izomere, a căror spin și paritate nu sunt cunoscute. Rezultatele coincidențelor  $\gamma$ - $\gamma$  au arătat faptul ca aceste două tranziții nu sunt în coincidență, așa cum se crezuse inițial [4], ci paralele în schema de nivele. Ținând cont de acest nou rezultat, dar și de sistematica evoluției stărilor  $1/2^-$  și  $3/2^-$  pentru nucleele neutronoexcedentare de cupru, o nouă schemă de nivele este propusă în Figura 3 cu două posibile scenarii pentru asignarea spinului și a parității.

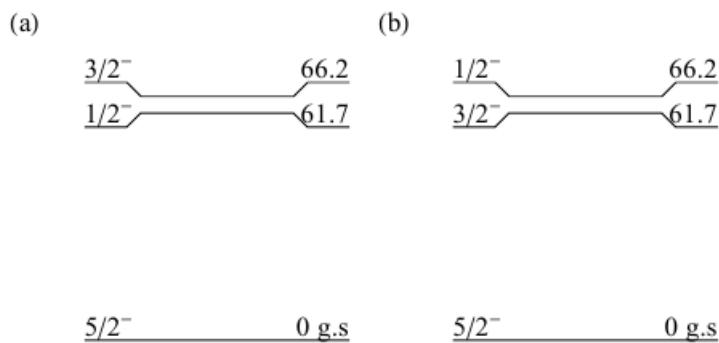


Figura 3: Scenarii propuse pentru asignarea spinului și a parității stărilor din nucleul de  $^{75}\text{Cu}$ .

Folosind aceelași metoda a coincidențelor  $\gamma$ - $\gamma$  au fost determinați și coeficienții de conversie pentru stările de joasă energie din  $^{72}\text{Cu}$ . Valorile obținute sunt comparate cu predicțiile BRICC [5] în Tabelul 1. Starea izomeră cu energia 270 keV și cu timpul de viață de  $1.54\ \mu\text{s}$  se dezexcită numai prin emisia unei tranziții de 50 keV. Coeficientul de conversie al acestei tranziții a fost determinat experimental ca având valoarea de  $8.5(5)$ . Această valoare este în bun acord cu valoarea de  $7.74$  prezisă pentru o tranziție de tip E2, prin urmare caracterul acestei tranziții poate fi considerat a fi E2. Aplicând același raționament s-a stabilit caracterul tranzițiilor de  $82$  și  $138$  keV ca fiind unul de tip M1. Cunoscând spinul și paritatea stării fundamentale [6], și folosind aceste informații o schemă de nivele a putut fi propusă (Figura 4).

Tabelul 1: Energiile  $\gamma$  și valorile coeficientilor de conversie comparate cu predicțiile lor teoretice pentru  $^{72}\text{Cu}$ .

$E_\gamma(\text{keV})$	$\alpha_{exp}$	$\alpha(E1)$	$\alpha(M1)$	$\alpha(E2)$
50	8.5(5)	$4.45 \times 10^{-1}$	$3.64 \times 10^{-1}$	8.33
82	$8.6 \times 10^{-2}(5)$	$1.00 \times 10^{-1}$	$9.18 \times 10^{-2}$	1.14
138	$6.5 \times 10^{-2}(3)$	$2.07 \times 10^{-2}$	$2.28 \times 10^{-2}$	$1.81 \times 10^{-1}$

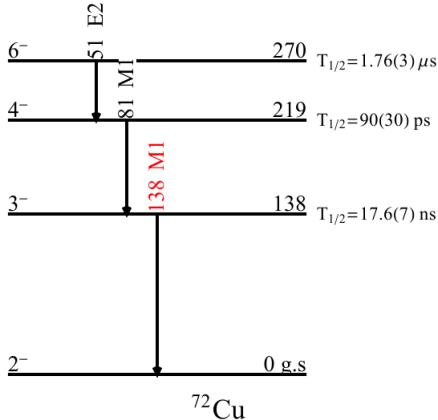


Figura 4: Schema de nivele propusă pentru  $^{72}\text{Cu}$ .

Rezultatele experimentale obținute au fost comparate cu predicțiile modelului în pături folosind două interacții dezvoltate pentru această regiune de masă. Codul utilizat pentru aceste calcule a fost NUSHELLX [7]. Într-o abordare simplistă a calculelor de model în pături, nucleele având  $Z=29$  și  $N=40$  pot fi privite precum o singura particule de orbitează în jurul unui miez de  $^{56}\text{Ni}$ . Astfel, protonii aflați deasupra închiderii de pătură  $Z=28$  vor ocupa într-o configurație simplă orbitalul  $\pi p_{3/2}$ . Pentru nucleele cu  $N < 40$  neutronii ocupă orbitalii  $p_{3/2}$ ,  $f_{5/2}$  și  $p_{1/2}$ , iar cele pentru cele caracterizate de  $N > 40$  orbitalul neutronic  $g_{9/2}$  începe să fie ocupat. Prin urmare, spectrul de joasă energie al izotopilor impar-impar de Cu ar trebui să fie dominat de configurații de tipul  $\pi p_{3/2}\nu g_{9/2}$ . Un al doilea multiplet așteptat să apară este  $(2 - 7)^-$ , provenind din configurația  $\pi f_{5/2}\nu g_{9/2}$ . Existența acestor două multiple este corect reproducă de cele două interacții utilizate: jj44b [8] și JUN45 [9], totuși comparați dintre probabilitățile de tranziție redusă experimentală cu cele teoretice arată un accord calitativ mai bun cu rezultatele prezise de interacția jj44b.

Așa cum s-a menționat la începutul acestui raport, obiectivul principal al proiectului îl reprezintă studiul evoluției structurii nucleare a izotopilor neutronoexcedentati ai cuprului. Un al experiment ce a vizat acest obiectiv a constat în studiul reacției  $^{70}\text{Zn}(\text{d},^3\text{He})^{69}\text{Cu}$ . Acest experiment a fost efectuat la acceleratorul tandem de la IPNOrsay, pentru detecția nucleului emergent fiind folosit spectrometrul magnetic Split-Pole. Astfel a putut fi obținut spectrul de energie de excitare al nucleului de  $^{69}\text{Cu}$  pana la 7MeV. Spectrul de energie a fost reconstruit pornind de la poziția particulelor detectate în planul focal al spectrometrului, rezolutia energetică obținută folosind acest ansamblu experimental a fost de aproximativ 18 keV. Totodată variind unghiul spectrometrului s-a putut determina distribuția unghiulară a stărilor observate și, implicit, spinul acestora. Un exemplu de spectru de energie obținut pentru unghiul de  $21^\circ$  al spectrometrului este prezentat în Figura 5.

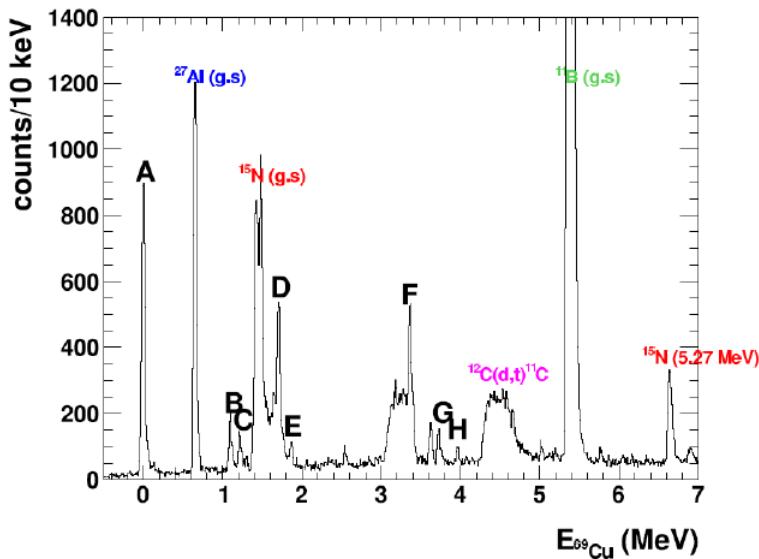


Figura 5: Spectrul energiei de excitare al nucleului de  $^{69}\text{Cu}$ .

Stările observate sunt indexate de la A la H. În cadrul aceluiași spectru se pot observa și peakuri cu o lărgime mai mare ce corespund reacțiilor pe contaminanți din țintă datorate cinematicii diferite de reacție. Din determinarea distribuției unghiulare au fost obținuți factorii spectroscopici, iar din suma acestora a fost dudus centrul distribuției tăriei orbitalului  $\pi f_{7/2}$  la energia de 2.45 MeV. Această informație este una extrem de utilă pentru teoreticieni, care acum pot dezvolta noi interacții astfel încât valoarea experimentală să poată fi reprodusă.

## Diseminarea rezultatelor

Pe parcursul desfășurării proiectului rezultatele au fost prezentate în cadrul mai multor conferințe și publicate în două articole în reviste intexate ISI:

- Sesiune Anuală de Comunicări Științifice a Facultății de Fizica, "Gamma spectroscopy of isomers in neutron rich nuclei:  $^{75}\text{Cu}$ "
- Carpathian Summer School of Physics; Exotic Nuclei and Nuclear Particle Astrophysics (IV) From Nuclei to Stars, "Study of isomeric states using gamma spectroscopy around  $N=40$ "
- Dynamics of open nuclear systems, "Low energy isomeric levels of nuclei near  $N=40$ "
- Zakopane Conference on Nuclear Physics 2012, "Gamma spectroscopy of isomeric states in neutron rich nuclei:  $^{75}\text{Cu}$ "
- Zakopane Conference on Nuclear Physics 2014, "Single-particle Strength in Neutron-rich  $^{69}\text{Cu}$ "
- "Single particle strength in neutron-rich  $^{69}\text{Cu}$  from the  $^{70}\text{Zn}(\text{d},^3\text{He})^{69}\text{Cu}$  proton pick-up reaction", P. Morfoue et al., Physical Review C 93, 064308 (2016)

- ”Nearly degenerate isomeric states of  $^{75}\text{Cu}$ ”, C. Petrone et al., Physical Review C 94, 024319 (2016)

Toodată prin implementarea acestui proiect, noi tineri cercetători au fost formați în domeniul structurii nucleare, mai precis datele obținute au constituit subiectul tezei de doctorat al Cristinei Petrone (susținută în 2013 la Universitatea din București) și a lui Pierre Morfouace (susținută în 2014 la Universitatea Paris Sud XI).

## Bibliografie

- [1] R. Anne *et al.*, Nuclear Instruments and Methods A **257** (1987), 215.
- [2] O.B. Tarasov and D. Bazin, Nucle. Instrum and Meth. B 376 (2016), 185.
- [3] S. Agostinelli *et al.*, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A **506** (2003), 250.
- [4] J.M. Daugas *et al.*, Physical Review C **81** (2010), 034304.
- [5] T. Kibedi *et al.*, Nuclear Instruments and Method A **589**, 202 (2008). Available at <http://bricc.anu.edu.au>
- [6] B. Cheal *et al.*, Physical Review Letters **104** (2010), 252502
- [7] NuShellX@MSU, B. A. Brown, W. D. M. Rae, E. McDonald and M. Horoi, <http://www.nscl.msu.edu/~brown/resources/resources.html>; NuShellX, W. D. M. Rae, <http://www.garsington.eclipse.co.uk/>.
- [8] B. Brown and A. Lisetskiy, unpublished
- [9] M. Honma, T. Otsuka, T. Mizusaki and M. Hjorth-Jensen, Physical Review C **80** (2009), 064323