

# RAPORT ȘTIINȚIFIC IDEI-126

## FAZA 5

Decembrie 2015

### Obiectiv

Compararea rezultatelor experimentale cu predicții teoretice ale modelelor de structură și interacție nucleară.

Studiul stărilor izomere utilizând spectroscopia  $\gamma$  a nucleelor din vecinătatea  $^{78}\text{Ni}$  constituie un interes deosebit pentru fizica nucleară actuală. Realizarea acestor studii permite testarea diferitelor modele nucleare, precum și investigarea evoluției formelor nucleare, dar și a coexistenței de formă. Totodată, din comparația valorilor observabilelor experimentale cu cele prezise de calculele teoretice noi constrângeri pot fi aduse acestora din urmă în vederea îmbunătățirii acordului. În cadrul acestui raport vor fi interpretate rezultate experimentale obținute în urma experimentului E959 la laboratorul GANIL (Franța). Comparația valorilor experimentale obținute cu cele prezise de modelul în pături nucleare este folosită pentru determinarea spinilor și a parităților stărilor izomere observate experimental pentru nucleele de  $^{72}\text{Cu}$  și  $^{75}\text{Cu}$ .

### Rezultate obținute

Pentru o mai bună înțelegere a structurii nucleare din această regiune de masă au fost realizate calcule de model în pături în spațiul de valență  $f_{5/2}p_{g_{9/2}}$  utilizând codul NuShellX [1].

Două interacții dezvoltate pentru această regiune de masă au fost utilizate jj44b [2] și jun45 [3]. JUN45 este o interacție realistă bazată pe un potențial de tipul Bonn-C ce a fost obținută prin fitarea a 400 de energii de legătură și excitare a nucleelor caracterizate de numerele de masă  $A=63-96$ . Datorită dificultăților în reproducerea colectivității ce caracterizează mijlocul păturii  $f_{5/2}p_{g_{9/2}}$  nucleele cu  $N > 46$  și  $Z > 33$  au fost excluse în procedura de determinare a paramerilor interacției. Prin urmare, este de așteptat ca aceasta să ofere descriere corectă a nucleelor cu  $Z \sim 32$  and  $N \sim 50$ . Interacția jj44b a fost obținută prin fitul a 600 de energii de legătură și excitare a nucleelor caracterizate de  $Z=28-30$  și  $N=48-50$ .

În calculul probabilităților de tranziție reduse au fost utilizate următoarele valori pentru sarcinile efective:  $e_{\pi}=1.5e$  și  $e_{\nu} = 1.1e$ , dar și un factor de scalare de  $g_s = 0.7g_{free}$  a factorului giromagnetic  $g$  pentru reproducerea momentelor magnetice și quadrupolare pentru nuclee aflate în această regiune de masă [3].

Tabelul 1: Comparația probabilităților de tranziție experimentale cu cele prezise teoretic pentru  $^{72}\text{Cu}$ .

$E_{level}^{exp} (keV)$	$E\gamma^{exp}$	$I_i^\pi \rightarrow I_f^\pi$	Transition type	Transition rates $^{exp} (W.u)$	jj44b	jun45
270	50	$6^- \rightarrow 4^-$	E2	6.91(1)	5.55	3.31
220 <sup>1</sup>	82	$4^- \rightarrow 3^-$	M1	0.46(2)	0.66	0.96
138 <sup>1</sup>	138	$3^- \rightarrow 2^-$	M1	$5.1(5) \times 10^{-4}$	$7.87 \times 10^{-3}$	$5.45 \times 10^{-3}$

<sup>1</sup> Dată fiind rezoluția slabă a detectorilor de germaniu utilizați, pentru determinarea probabilităților de tranziție redusă a tranzițiilor de 81 și 138 keV au fost adoptate valorile din Ref. [4].

Pentru  $^{72}\text{Cu}$  multipolaritățile tranzițiilor observate au fost stabilite prin determinarea coeficienților de conversie, dar și prin comparația valorilor experimentale ale probabilităților de tranziție prezise de cele două interacții - Tabelul 1. Ambele interacții reproduc rezonabil de bine valorile experimentale, observând-se totuși o ușoară tentința de a supraestima valorile experimentale pentru tranzițiile de tip M1, în special pentru interacția jun45.

Într-o abordare simplă a modelului în pături nucleare, nucleele având  $Z=29$  și  $N=40$  pot fi privite precum o singură particulă 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 multiplu așteptat să apară este  $(2-7)^-$ , provenind din configurația  $\pi f_{5/2} \nu g_{9/2}$ . Existența acest două multiplete este corect reprodusă de cele două interacții.

În concluzie din comparația valorilor teoretice și experimentale a probabilităților de tranziție și cunoscând spinul și paritatea stării fundamentale  $2^-$  [5], o nouă schemă de nivele a putut fi determinată - Figura 1. Existența stărilor izomere observate experimental este atribuită diferenței de configurații pronice și neutronic observate între stările  $6^-$ ,  $4^-$  și  $3^-$  - construite pe o configurație de tipul  $\pi p_{3/2} \nu g_{9/2}$  - și starea fundamentală - dominată de protoni aflați în orbitalul  $\pi f_{5/2}$ .

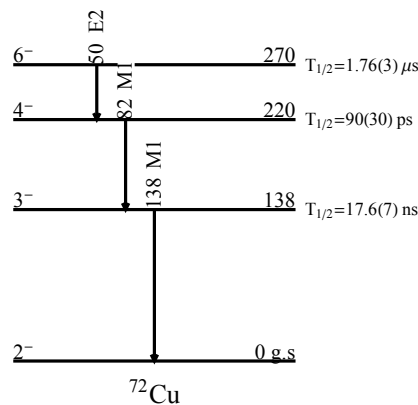


Figura 1: Schema de nivele propusă pentru  $^{72}\text{Cu}$ .

Pentru izotopii impar-par ai cuprului, experimente de excitare coulombiană [6] au arătat că stările de joasă energie au un caracter unipaticulă bazat pe orbitalii  $\pi f_{5/2}$ ,  $\pi 2p_{3/2}$  și  $\pi 2p_{1/2}$ . Calcule teoretice ce 'iau în considerare efectul forței de tip tensorial au prezis scăderea în energie a orbitalului  $\pi 1f_{5/2}$  pe măsură ce orbitalul neutronic  $\nu g_{9/2}$  începe să fie ocupat,

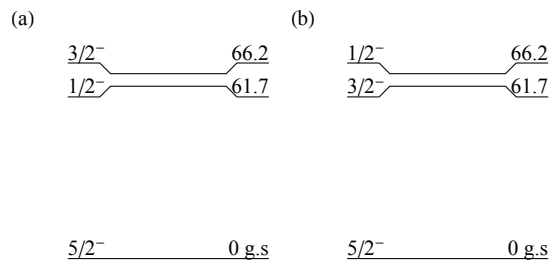


Figura 2: Schema de nivele experimentală pentru  $^{75}\text{Cu}$  cu cele două scenarii posibile.

Tabelul 2: Probabilități de tranziție reduse în cazul scenariilor (a) and (b) pentru  $^{75}\text{Cu}$ .

$E_\gamma[\text{keV}]$	Tranzitie	Multipolarity	Scenariul A	Scenariul B	jj44b	jun45
61.7	$1/2^- \rightarrow 5/2^-$	$E2$	22(1)		16.55	15.35
4.5	$3/2^- \rightarrow 1/2^-$	$M1$	$0.03(2)^c$		0.23	0.09
		$M1$	$0.02(1)^d$		0.23	0.09
66.2	$3/2^- \rightarrow 5/2^-$	$M1^c$	$7.5(6) \times 10^{-5c}$		$2.6 \times 10^{-3}$	$2.3 \times 10^{-3}$
		$E2^d$	$17(1)^d$		2.93	3.11
61.7	$3/2^- \rightarrow 5/2^-$	$M1^a$		$2.43(8) \times 10^{-4}$	$2.6 \times 10^{-3}$	$2.3 \times 10^{-3}$
		$E2^b$		22(1)	2.93	3.11
4.5	$1/2^- \rightarrow 3/2^-$	$M1$		$0.008(6)^a$	0.47	0.18
		$M1$		$0.02(1)^b$	0.47	0.18
66.2	$1/2^- \rightarrow 5/2^-$	$E2$		$30(2)^a$	16.55	15.35
		$E2$		$17(1)^b$	16.55	15.35

ajungând în cele din urmă stare fundamentală pentru  $^{75}\text{Cu}$  [7]. Această inversie a fost demonstrată experimental printr-o măsurătoare de spin și moment magnetic care a identificat starea fundamentală ca fiind  $5/2^-$  pentru  $^{75}\text{Cu}$  [8].

Așa cum menționam în raportul cu privire la activitatea desfășurată în cadrul proiectului pentru anul 2014, ambele interacții reușesc să reproducă inversia spinului stării fundamentale pentru nucleul de  $^{75}\text{Cu}$ . Pentru anul acesta ne-am propus stabilirea celui mai probabil scenariu de asignare a spinilor stărilor experimentale observate - Figura 2. Pentru acesta am folosit cele două interacții pentru a compara valorile probabilităților de tranziție reduse cu cele experimentale - rezultate sunt prezentate în Tabelul 2.

Din analiza efectuată pentru nucleul de  $^{72}\text{Cu}$  s-a putut observa o ușoară tendință a celor două interacții de a supraestima valorile probabilităților de tranziție redusă de tip M1. Ținând cont de această observație, putem spune că și pentru  $^{75}\text{Cu}$  este de așteptat să existe o supraestimare cu cel mult un ordin de mărime pentru tranzițiilor de tip M1. Aplicând acest raționament la valorile prezentate în Tabelul 2, se poate observa că în cazul scenariului (a) există o discrepanță mult mai mare decât cea așteptată, în timp ce pentru scenariul (b) diferența dintre valorile teoretice și cele experimentale este mult mai apropiată. Astfel putem concluziona că cel mai probabil scenariu pentru stările experimentale observate pentru  $^{75}\text{Cu}$  este scenariul (b) cu o următoarea frecvență a stărilor de joasă energie :  $1/2^- \rightarrow 3/2^- \rightarrow 5/2^-$ .

## Concluzii

Rezultatele calculelor de model în pături obținute cu două interacții, jj44b [2] și jun45 [3], au arătat un acord calitativ mai bun între rezultatele experimentale și cele prezise de interacția jj44b. Pe baza comparației predicțiilor teoretice cu rezultatele experimentale noi scheme de nivele au fost propuse pentru stările de joasă energie din  $^{72}\text{Cu}$  și  $^{75}\text{Cu}$ .

## Bibliografie

- [1] NuShellX@MSU, B. A. Brown, W. D. M. Rae, E. McDonald and M. Horoi, <http://www.nsl.msu.edu/~brown/resources/resources.html>; NuShellX, W. D. M. Rae, <http://www.garsington.eclipse.co.uk/>.
- [2] B. Brown and A. Lisetskiy, unpublished
- [3] M.Honma, T. Otsuka, T. Mizusaki and M. Hjorth-Jensen, *Physical Review C* **80** (2009), 064323
- [4] Stanoiu, M. : Spectroscopie gamma en ligne de noyaux legeres riches en neutrons produits par fragmentation de faisceau radioactif et Mesures de temps de vie des niveaux excites dans des noyaux proches de  $^{68}\text{Ni}$ . PhD thesis, Universite de Caen/ Basse-Normandie, 2003.
- [5] B. Cheal *et al.*, *Physical Review Letters* **104** (2010), 252502
- [6] I. Stefanescu *et al.*, *Physical Review C* **79** (2009), 064302
- [7] T.Otsuka *et al.*, *Physical Review Letters* **87** (2001),082502
- [8] K.T. Flanagan *et al.*, *Physical Review Letters* **103**, 142501 (2009).

# SCIENTIFIC RAPPORT IDEI-126

## PHASE 5

### Objective

The study of isomeric states through  $\gamma$ -spectroscopy of nuclei located near the  $^{78}\text{Ni}$  represents one of the most highlights of nuclear physics today. By obtaining experimental results, the different theoretical approaches can be tested, also the investigations of phenomena such as shape evolution or shape coexistence can be performed. Moreover, from the comparison of the experimental values with the predictions of various models, new constrains can be added to the theory such that the agreement between the two is improved. In this rapport the experimental result obtained in the E595 experiment performed at GANIL (France) will be discussed. Shell model results will be used to determine the spin and parities of the isomeric states experimentally observed for the  $^{72,75}\text{Cu}$  nuclei.

### Results obtained

To better understand the nuclear structure in this mass region shell model calculations were employed in the valence space  $f_{5/2}pg_{9/2}$  using NuShellX code [1].

Two interactions developed for this region were used: jj44b [2] and jun45 [3]. JUN45 is a realistic interaction based on Bonn-C potential, that was obtained by fitting over 400 points of bounding energies and excitation energies of nuclei with  $A=63-96$ . Due to the difficulties in reproducing the collectivity that characterizes the middle of the  $f_{5/2}pg_{9/2}$  shell the nuclei with  $N > 46$  and  $Z > 33$  were excluded in the fitting procedure. Therefore, one might expect that the prediction power of this interaction to be greater for nuclei with  $Z \sim 32$  and  $N \sim 50$ . The jj44b interaction was obtained by fitting 600 points of bounding energies and excitation energies of nuclei characterized by  $Z=28-30$  and  $N=48-50$ .

For calculating the transitions rates the following effective charges were where used:  $e_{\pi}=1.5e$  and  $e_{\nu} = 1.1e$ , also a quenching factor of  $g_s = 0.7g_{free}$  for the giromagnetic factor used in reproducing the magnetic and quadrupole moments of the nuclei located in this mass region [3].

In the case of  $^{72}\text{Cu}$  the multipolarities of the transition experimentally observed were determined from the conversion coefficients values, but also by comparing the experimental values of the transistons rates with the predictions of the two interactions - Tabel 1. Both of

Table 1: Comparison between the experimental and theoretical transition rates for  $^{72}\text{Cu}$ .

$E_{level}^{exp} (keV)$	$E_{\gamma}^{exp}$	$I_i^{\pi} \rightarrow I_f^{\pi}$	Transition type	Transition rates $^{exp} (W.u)$	jj44b	jun45
270	50	$6^- \rightarrow 4^-$	E2	6.91(1)	5.55	3.31
220 <sup>1</sup>	82	$4^- \rightarrow 3^-$	M1	0.46(2)	0.66	0.96
138 <sup>1</sup>	138	$3^- \rightarrow 2^-$	M1	$5.1(5) \times 10^{-4}$	$7.87 \times 10^{-3}$	$5.45 \times 10^{-3}$

<sup>1</sup> Due to the poor time resolution of the HPGe detectors, for determining the transitions rates of the 81keV and 138 keV we adopted the values presented in Ref. [4].

the interactions manage to reproduce well the experimental values, however it can be observed a slightly tendency to overestimate the values of the M1 transition rates, especially for JUN45 interaction.

In a simple approach of the shell model, the nuclei with  $Z=29$  and  $N=40$  can be treat as a single particle outside of a  $^{56}\text{Ni}$  core. Thus, in a simple configuration the protons outside the closed shell  $Z=28$  will occupy the  $\pi p_{3/2}$  orbital. For nuclei with  $N<40$  neutrons are located in the  $p_{3/2}$ ,  $f_{5/2}$  and  $p_{1/2}$  orbitals, while for those whit  $N>40$  the  $g_{9/2}$  begins to be filled. Thus, the low energy spectrum of odd-odd Copper isotopes should be dominated by  $\pi p_{3/2} \nu g_{9/2}$  configurations. A second multiplet that is expected to appear is  $(2-7)^-$ , due to the  $\pi f_{5/2} \nu g_{9/2}$  configuration. The existence of these two multiplets is predicted by both of the interactions.

In conclusion from the comparison of the theoretical values with the experimental transitions rates and knowing the spin and parity of the ground state -  $2^-$  [5], a new level scheme could be determined - Figure 1. The existence of the low-energy isomeric states is attributed to the different proton and neutron configurations observed between the  $6^-$ ,  $4^-$  and  $3^-$  states - based on a configuration of  $\pi p_{3/2} \nu g_{9/2}$  - and the ground stated - dominated by protons in the  $\pi f_{5/2}$  orbital.

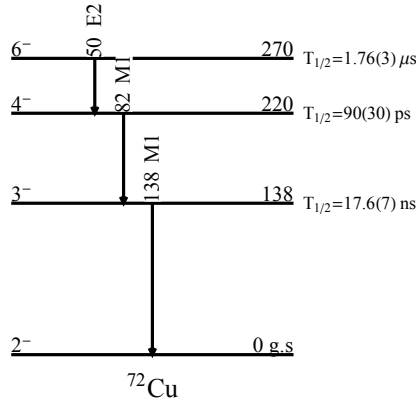


Figure 1: Proposed level scheme for  $^{72}\text{Cu}$ .

In the study of the odd-A Copper isotopes, coulomb excitation experiments have shown that the low-energy states have a single-particle character based on the  $5/2^-$ ,  $\pi 2p_{3/2}$  and  $\pi 2p_{1/2}$  orbitals. Theoretical calculations that take into consideration the effect of the tensor force have predicted the dropping in energy of the  $\pi 1f_{5/2}$  with the increasing occupancy of the  $\nu g_{9/2}$  orbital, that eventually becomes a ground state in  $^{75}\text{Cu}$  [7]. This inversion was experimentally proven by a spin and magnetic moment measurement that indentified the ground state of  $^{75}\text{Cu}$  as being a  $5/2^-$  [8].

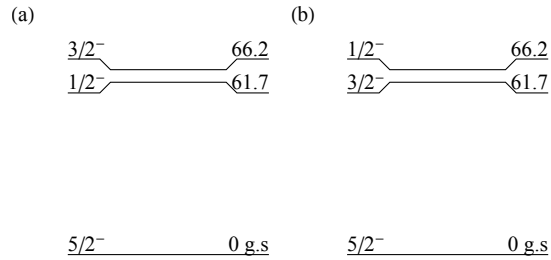


Figure 2: Proposed level scheme for  $^{75}\text{Cu}$  with two possible scenarios.

Table 2: Transitions rates in the case of scenarios (a) and (b) for the level scheme of  $^{75}\text{Cu}$ .

$E_\gamma$ [keV]	Transition	Multipolarity	Scenario A	Scenario B	jj44b	jun45
61.7	$1/2^- \rightarrow 5/2^-$	$E2$	22(1)		16.55	15.35
4.5	$3/2^- \rightarrow 1/2^-$	$M1$	0.03(2) <sup>c</sup>		0.23	0.09
		$M1$	0.02(1) <sup>d</sup>		0.23	0.09
66.2	$3/2^- \rightarrow 5/2^-$	$M1^c$	$7.5(6) \times 10^{-5c}$		$2.6 \times 10^{-3}$	$2.3 \times 10^{-3}$
		$E2^d$	17(1) <sup>d</sup>		2.93	3.11
61.7	$3/2^- \rightarrow 5/2^-$	$M1^a$		$2.43(8) \times 10^{-4}$	$2.6 \times 10^{-3}$	$2.3 \times 10^{-3}$
		$E2^b$		22(1)	2.93	3.11
4.5	$1/2^- \rightarrow 3/2^-$	$M1$		0.008(6) <sup>a</sup>	0.47	0.18
		$M1$		0.02(1) <sup>b</sup>	0.47	0.18
66.2	$1/2^- \rightarrow 5/2^-$	$E2$		30(2) <sup>a</sup>	16.55	15.35
		$E2$		17(1) <sup>b</sup>	16.55	15.35

As we already discuss in the previous rapport regarding the activity developed inside the project on the year of 2014, both of the theoretical interactions manage to reproduce the inversion of the spin and parity of the ground state for  $^{75}\text{Cu}$ . For this year, we have proposed to establish the most possible scenario for the spins assignment of the experimentally observed states -Figure 2. For this propose we used the two interactions to compare the values of the transitions rates with the experimental ones- the results are presented in Table 2.

From the analysis performed for  $^{72}\text{Cu}$  nucleus it could be observed that both interactions overpredict the transitions rates of M1 transitions. Keeping in mind this observation, it is expected also for  $^{75}\text{Cu}$  nucleus to find a similar situation. By looking at the values presented Table 2 and applying this argumentation it can be said that in the case of the scenario (a) the discrepancy is more important than is expected to occur, while for the scenario (b) the difference between the theoretical and experimental values is more closer. Thus we can conclude that the most probable scenario for the experimentally observed states for  $^{75}\text{Cu}$  is scenario (b) with the following decay sequence of the low isomeric states:  $1/2^- \rightarrow 3/2^- \rightarrow 5/2^-$ .

## Conclusions

Shell model results obtained with two interactions, jj44b [2] and JUN45 [3], have shown a better agreement between the experimental results and the values predicted by the calculations using jj44b interaction. Based on the comparison between theoretical predictions and experimental

values new level schemes were proposed for low-lying isomeric states of  $^{72}\text{Cu}$  and  $^{75}\text{Cu}$ .

## References

- [1] 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/>.
- [2] B. Brown and A. Lisetskiy, unpublished
- [3] M.Honma, T. Otsuka, T. Mizusaki and M. Hjorth-Jensen, Physical Review C **80** (2009), 064323
- [4] Stanoiu, M. : Spectroscopie gamma en ligne de noyaux legeres riches en neutrons produits par fragmentation de faisceau radioactif et Mesures de temps de vie des niveaux excites dans des noyaux proches de  $^{68}\text{Ni}$ . PhD thesis, Universite de Caen/ Basse-Normandie, 2003.
- [5] B. Cheal *et al.*, Physical Review Letters **104** (2010), 252502
- [6] I. Stefanescu *et al.*, Physical Review C **79** (2009), 064302
- [7] T.Otsuka *et al.*, Physical Review Letters **87** (2001),082502
- [8] K.T. Flanagan *et al.*, Physical Review Letters **103**, 142501 (2009).