

Contractor: IFIN-HH

Cod fiscal : 3321234 (anexa la procesul verbal de avizare interna nr. ....)

De acord,  
DIRECTOR GENERAL  
Acad. Nicolae Victor Zamfir

Avizat,  
DIRECTOR DE PROGRAM  
Dr. Radu Mihai

### RAPORT DE ACTIVITATE AL FAZEI

Contractul nr.: 10N/2019

Proiectul: PN 19 06 01 03

Activitati de cercetare si dezvoltare legate de studiul materiei in conditii extreme de temperatura si presiune si structura nucleara exotica

Faza: Nr. 5 (Tripla coexistenta de forma si dezintegrare beta permisa/interzisa a starilor izomere in  $^{96}\text{Y}$  catre  $^{96}\text{Zr}$  in cadrul modelului complex Excited Vampir)

Termen de încheiere a fazei: 15.07.2020

1. Obiectivul proiectului:

Cercetari teoretice si experimentale in descrierea materiei subatomice.

2. Rezultate preconizate pentru atingerea obiectivului:

Descrierea microscopica realista a fenomenelor de coexistenta la nucleeele de masa medie. Studiul interactiilor si simetriilor fundamentale. Formalism pentru dezintegrarea beta interzisa implementat in codurile Vampir. Coduri de calcul pentru scenariile de astrofizica in sisteme solare explozive.

Obtinerea de informatii privind starile extreme ale materiei formata din constituinti care interactioneaza puternic si dinamica asociata.

Realizarea si testarea unor prototipuri de detectori si a electronicii aferente pentru experimente internationale de mare anvergura.

Dezvoltarea de tehnologii pentru tratarea cu plasma a suprafetelor diferitelor materiale combinate cu tehnologii de depunere a straturilor subtiri.

3. Obiectivul fazei:

Efectele coexistentei de forma in  $^{96}\text{Y}$  si  $^{96}\text{Zr}$  asupra dezintegrării  $\beta^-$  interzisa de rang 1 a starii fundamentale  $0^-$  si permisa Gamow-Teller a izomerului  $8^+$  al  $^{96}\text{Y}$  catre  $^{96}\text{Zr}$  au fost studiate in

cadru modelului *complex* Excited Vampir ce merge dincolo de aproximatia de camp mediu. Structura starilor parinte si fiica, precum si proprietatile dezintegrarii beta au fost investigate utilizand o interactie efectiva derivata din matricea G bazat pe potentialul Bonn CD si un spatiu de model mare. Este discutata influenta coexistentei si amestecului de forme asupra proprietatilor starilor implicate in dezintegrarile  $\beta^-$  permise si interzise studiate si se prezinta comparatia cu datele existente. De asemenea se discuta procedee de imbunatatire a calculelor spatiilor de faza asociate diferitelor tipuri de dezintegrare beta.

#### 4. Rezultate preconizate pentru atingerea obiectivului fazei:

Dezvoltarea formalismului pentru dezintegrarea beta interzisa (first forbidden) si implementarea in codurile modelului complex Excited Vampir. Descrierea structurii izomerilor de forma in  $^{96}\text{Y}$ . Calculul dezintegrarii beta interzisa a starii fundamentale  $0^-$  a nucleului  $^{96}\text{Y}$  catre starile  $0^+$  in  $^{96}\text{Zr}$ . Dezintegrarea Gamow-Teller a izomerului  $8^+$  in  $^{96}\text{Y}$  catre starile fiica in  $^{96}\text{Zr}$ .

#### 5. Rezumatul fazei: (maxim 5 pagini)

Nucleele bogate in neutroni in regiunea  $A \sim 100$  relevante pentru procesul astrofizic de ardere rapida de neutroni manifesta variatii semnificative ale unor proprietati asociate cu aparitia deformatiei pentru numarul de neutroni  $N=58$ .

Investigatiile noastre precedente ce merg dincolo de aproximatia de camp mediu au identificat tripla coexistenta de forma la nuclee cu  $N=57-58$  [1,2]. In aceasta faza PN se studiaza noi fenomene ce necesita tripla coexistenta de forma pentru descrierea completa a caracteristicilor identificate la spini josi si intermediari.

Proprietatile starilor implicate in dezintegrarea  $\beta^-$  interzisa de rang 1 a starii fundamentale  $0^-$  si permisa Gamow-Teller a izomerului  $8^+$  al  $^{96}\text{Y}$  catre  $^{96}\text{Zr}$  sunt investigate in cadrul modelului variational *complex* Excited Vampir cu proiectie pe simetriei inainte de variatie.

In cadrul studiului prezent a fost dezvoltat formalismul asociat dezintegrarii  $\beta^-$  interzisa de rang 1 pentru tranzitiile de tip  $0^- \rightarrow 0^+$  implicand calculul analitic al elementelor de matrice uniparticula in baza de oscilator armonic si implementarea lor in codurile Vampir in care s-au dezvoltat subrutine specifice pentru calculul densitatilor de tranzitie utilizand functiile de unda Excited Vampir corespunzatoare.

Am calculat timpul de injumatatire al starii fundamentale  $0^-$  a nucleului  $^{96}\text{Y}$ , considerand tranzitiile interzise de rang 1  $0^- \rightarrow 0^+$  catre cele mai joase 4 stari  $0^+$ , in timp ce pentru izomerul  $8^+$  au fost considerate starile  $7^+$ ,  $8^+$  si  $9^+$  in  $^{96}\text{Zr}$ . Timpul de viata partial al unei tranzitii a fost obtinut prin :

$$\frac{1}{t_{1/2}} = \frac{f}{K}$$

cu  $K=6146$  s si factorul de faza :

$$f = \int_1^{W_0} C(W) W (W^2 - 1)^{\frac{1}{2}} (W_0 - W)^2 F(Z, W) dW$$

unde  $F(Z, W)$  este functia Fermi ce corecteaza integrala de spatiul fazelor pentru distorsia Coulombiana a functiei de unda a electronului langa nucleu,  $W$  este energia totala, masa de repaos si cinetica,  $(W^2 - 1)^{\frac{1}{2}}$  este momentul si  $W_0$  este energia maxima a electronului.

Pentru tranzitiile Gamow-Teller  $C(W)=B(GT)$  cu

$$B_{if}(GT) = \frac{g_A^2}{2J_i + 1} |M_{GT}|^2$$

unde  $M_{GT} = \sum_{ab} m_{GT}(ab) \left\langle \xi_f J_f \left\| \left[ c_a^\dagger \tilde{c}_b \right]_1 \right\| \xi_i J_i \right\rangle$  este compus din  $m_{GT}(ab) = \langle a \| \hat{\sigma} \| b \rangle$

elementul de matrice redus uniparticula si densitatile de tranzitie de un corp reduce, utilizand baza de oscilator armonic. Nu s-a aplicat *quenching* pentru  $g_A$ , deoarece se foloseste un spatiu de model larg ce contine toti partenerii spin-orbita, atat pentru protoni cat si pentru neutroni. Rezultatele prezente nu includ o posibila reducere a tariei GT de  $\approx 10\%$  datorita excitarii  $\Delta$ . Pentru tranzitiile interzise de rang 1 asociate cazului  $0^- \rightarrow 0^+$  factorul de forma este

$$C(W) = k + kb/W$$

unde  $k$  si  $kb$  depind de elementele de matrice interzise de ordin intai nucleare ale operatorilor de rang 0

$$O(0^-) \leftrightarrow \sum_{ab} o^{(0)}(0^-)(ab) \left\langle \xi_f J_f \left\| [c_a^\dagger \tilde{c}_b]_0 \right\| \xi_i J_i \right\rangle$$

Elementele de matrice uniparticula reduce apar in urmatoarele combinatii :

$$k = \xi_0^2 + \frac{1}{9}w^2 \quad kb = \frac{2}{3}\mu_1\gamma_1[-\xi_0w]$$

$$\xi_0 = V + \frac{1}{3}wW_0 \quad V = v + \xi w'$$

Elementele de matrice reduce uniparticula sunt

$$w = -g_A\sqrt{3}\langle a||r[\mathbf{C}_1 \times \boldsymbol{\sigma}]^0||b \rangle$$

$$w' = -g_A\sqrt{3}\langle a||\frac{2}{3}rI(1,1,1,1,r)[\mathbf{C}_1 \times \boldsymbol{\sigma}]^0||b \rangle$$

$$v = \frac{\epsilon_{mec}g_A\sqrt{3}}{M}\langle a||[\boldsymbol{\sigma} \times \nabla]^0||b \rangle$$

unde 
$$\mathbf{C}_{lm} = \sqrt{\frac{4\pi}{2l+1}}\mathbf{Y}_{lm}$$

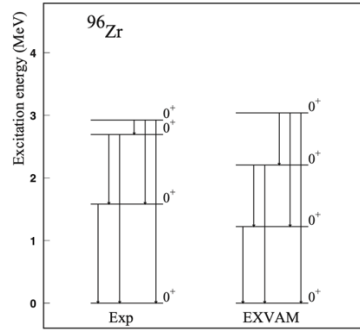
si factorul Coulombian pentru distributia de sarcina nucleara sferica uniforma este

$$I(1,1,1,1, r) = \frac{3}{2} \begin{cases} 1 - \frac{1}{5}\left(\frac{r}{R}\right)^2 & 0 \leq r \leq R \\ \frac{R}{r} - \frac{1}{5}\left(\frac{R}{r}\right)^3 & r \geq R \end{cases}$$

### Rezultate si discutii

Rezultatele EXVAM reliefeaza o mare varietate de structuri in ambele nuclee  $^{96}\text{Y}$  si  $^{96}\text{Zr}$ . In  $^{96}\text{Y}$  functia de unda a starii fundamentale  $0^-$  este construita dintr-o unica configuratie sferica caracterizata pe partea neutronica de ocuparea cu 1 particula a orbitalului  $2s_{1/2}$  si 5.65 ocuparea orbitalului  $1d_{5/2}$ . Izomerul  $8^+$  este un amestec de diferite configuratii deformate *prolate*. Energia de excitare EXVAM de 1.653 MeV este in bun acord cu valoarea experimentală de 1.541 MeV, ca si momentul cuadropolar spectroscopic  $-97.3 \text{ efm}^2$  fata de  $-98(11) \text{ efm}^2$ . In  $^{96}\text{Zr}$  rezultatele EXVAM indica tripla coexistenta de forma in structura celor mai joase 4 stari  $0^+$  conform tabelului, iar spectrul teoretic reproduce satisfactor datele experimentale conform figurii:

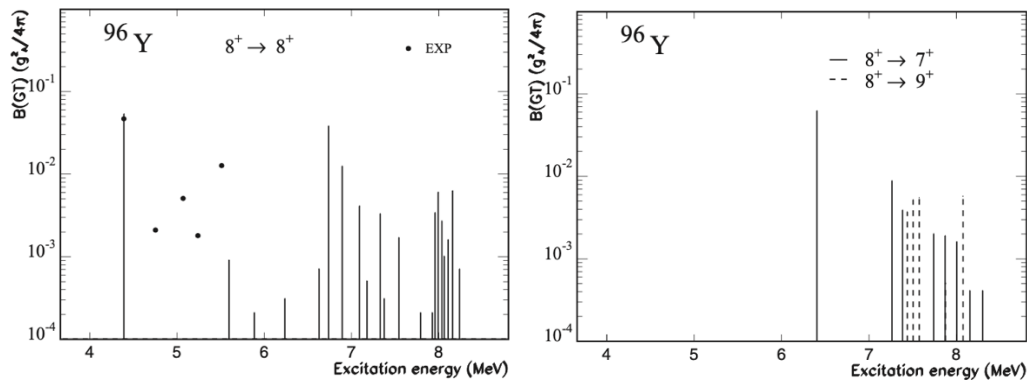
$I[\hbar]$	Spherical	Prolate	Oblate
$0_1^+$	94%	1%	4%
$0_2^+$	19%	45%	35%
$0_3^+$	30%	54%	15%
$0_4^+$	36%	16%	47%



Tranzițiile de tip E0 EXVAM indicate în tabel sunt în bun acord cu datele existente, ceea ce da suport scenariului privind tripla coexistență de formă prezisă teoretic [3]

Transition	EXVAM
$\rho^2(E0; 0_2^+ \rightarrow 0_1^+)$	0.0215
$\rho^2(E0; 0_3^+ \rightarrow 0_1^+)$	0.0048
$\rho^2(E0; 0_3^+ \rightarrow 0_2^+)$	0.0525
$\rho^2(E0; 0_4^+ \rightarrow 0_1^+)$	0.0084
$\rho^2(E0; 0_4^+ \rightarrow 0_2^+)$	0.0104
$\rho^2(E0; 0_4^+ \rightarrow 0_3^+)$	0.0155

Structura stărilor  $8^+$  în  $^{96}\text{Zr}$  indică amestec variabil de stări deformate *oblate* și *prolate* în sistemul intrinsec. Starea  $8^+$  yrast dominată de o configurație *prolate* are energie de excitație EXVAM 4.549 MeV, iar experimental 4.390 MeV. Stările fiică  $7^+$  și  $9^+$  manifestă amestec variabil de stări *prolate*. Timpul de înjumătățire EXVAM al stării  $8^+$  în  $^{96}\text{Y}$  este 9.3 s indicând foarte bun acord cu valoarea experimentală de 9.6 (2) s. Distribuțiile Gamow-Teller către stările fiică calculate sunt prezentate în figurile următoare:



S-au calculat ramurile de dezintegrare ale stării  $0^-$  în  $^{96}\text{Y}$  către stările  $0^+$  în  $^{96}\text{Zr}$  luând în considerare efectul de mediu asupra componentelor *time-like* ale curentului axial utilizând un factor de creștere de schimb mezonice de 1.15 și 1.19. Acordul cu datele este evidențiat în tabelul de mai jos. Rezultatele publicate [3] indică bun acord cu datele experimentale atât pentru tranzițiile de tip *first-forbidden*, pentru cele permise de tip Gamow-Teller, ca și pentru proprietățile electromagnetice investigate acordând suport scenariului nostru teoretic asupra triplei coexistențe de formă și a implicațiilor acesteia pentru ambele nuclee, părinte și fiică.

$I[\hbar]$	$\epsilon_{\text{mec}} = 1.15$	$\epsilon_{\text{mec}} = 1.19$	Exp.
$0_{gs}^+$	5.60	5.53	5.59 (1)
$0_2^+$	6.40	6.32	6.97 (4)
$0_3^+$	6.52	6.45	7.41 (6)
$0_4^+$	6.48	6.42	7.92 (9)

- [1] A. Petrovici, Phys. Rev. C 85, 034337 (2012)  
 [2] L. W. Iskra, ..., A. Petrovici et al., Europhys. Lett. 117, 12001 (2017)  
 [3] A. Petrovici and A.S. Mare, Phys. Rev. C 101, 024307 (2020)

*Calculul factorilor spatiu de faza pentru tranzitiile beta permise.*

Timpii de viata pentru dezintegrarile beta sunt calculati ca o suma pe toate probabilitatile de tranzitie posibile ( $Q_\beta > 0$ ) pe stari ale nucleului fiica. Pentru tranzitiile permise, probabilitatea pe unitatea de timp ca un nucleu de masa  $A$  si sarcina  $Z$  sa se dezintegreze  $\beta$  este

$$P = \frac{G_\beta^2}{2\pi^3} \int_1^{W_0} pW(W_0 - W)^2 S_0(Z, W) dW \quad (1)$$

unde  $G_\beta$  este constanta interactiei slabe,  $p$  este impulsul particulei  $W = E/(m_e c^2) + 1$  este energia sa totala in unitati de energie de repaus a electronului/pozitronului, iar  $W_0 = Q_\beta - mc^2$  este energia cinetica maxima. Formula de mai sus este scrisa in unitati naturale ( $\hbar=m=c=1$ ).

$$S_0(Z, W) = F_0(Z, W) |M|^2, \quad (2)$$

unde  $F$  este functia Fermi, ce tine cont de distorsiunea functiei de unda radiale a electronului/pozitronului, indusă de sarcina nucleară a nucleului fiica. Din (1) si (2) se vede ca pentru calculul timpilor de viata sunt necesare atat calculul elementelor de matrice  $|M|$ , cat si calculul factorului spatiu de faza:

$$S_f = \frac{G_\beta^2}{2\pi^3} \int_1^{W_0} pW(W_0 - W)^2 F_0 dW \quad (3)$$

Calculul acestor factori se face prin obtinerea/construirea mai intai a functiei Fermi corespunzatoare tipului de tranzitie dorit. In mod traditional aceste functii Fermi au fost obtinute intr-o forma analitica, pornindu-se de la de la functia Fermi pentru un nucleu punctiform, asa cum a fost introdusa de Fermi

$$F_0(Z, W) = 4(2pR)^{2(\gamma-1)} e^{\pi\eta} \frac{|\Gamma(\gamma+i\eta)|^2}{|\Gamma(1+2\gamma)|^2}, \quad (4)$$

cu

$$\gamma = \sqrt{1 - (\alpha Z)^2}, \quad \eta = \pm \alpha Z W / p.$$

cu  $R$ =raza nucleară si  $\alpha$  este constanta structurii fine. Apoi, descrierea spectrelor de emisie  $\beta$  și calcularea factorilor spațiu de fază au fost modificate constant prin introducerea mai multor corecții care să descrie cât mai corect interacțiunea particulei emise cu câmpul

nucleului final. Printre acestea se numără corecția de dimensiune finită a nucleului, corecțiile radiative, factorul de formă, ecranare atomică, suprafață difuză nucleară, etc.

Cu toate că o descriere analitică a spectrului și a factorului spațiu de fază este ideală pentru ușurinta calculului, ea poate fi greu de particularizat în funcție de nucleu. Propunem o abordare numerică de determinare a funcției Fermi. Aceasta poate fi construită într-un tratament relativist din funcțiile de undă radiale ( $f$  și  $g$ ) ale particulei  $\beta$  emise, soluții ale unei ecuații Dirac, prin evaluarea acestora pe suprafața nucleară

$$F(Z, W) = \frac{f_1^2(Z, W, R) + g_{-1}^2(Z, E, R)}{2p^2}.$$

În funcție de alegerea potențialului, funcțiile radiale de undă pot conține diferite corecții preluate apoi de funcția Fermi. Potențialul electrostatic utilizat poate fi potențialul Coulombian obișnuit, sau poate fi unul construit dintr-o densitate de sarcină realistă (protonică) a nucleului fiică descrisă de

$$\rho_e(\vec{r}) = \sum_i (2j_i + 1) v_i^2 |\psi_i(\vec{r})|^2,$$

unde  $\psi_i$  reprezintă funcțiile de undă protonice pentru starea uni-particulă sferică  $i$  și amplitudinea de ocupare  $v_i$ . Funcțiile de undă protonice sunt determinate prin rezolvarea ecuației Schrödinger în potențialul Wood-Saxon. Potențialul Coulombian este determinat prin integrare densității de sarcină

$$V(Z, r) = \alpha \int \frac{\rho_e(\vec{r}')}{|\vec{r} - \vec{r}'|} d\vec{r}'.$$

Potențialul poate fi modificat astfel încât să înglobeze și ecranarea atomică prin parametrizarea acestuia cu funcția de ecranare  $\phi(r)$ , soluție a ecuației Thomas-Fermi. Rezolvarea numerică a ecuației Dirac radiale este bazată pe subrutina RADIAL. Această metodă are avantajul de a avea precizia numerică a funcțiilor de undă ca parametru de intrare, astfel că funcțiile obținute pot fi considerate exacte pentru potențialul ales. În cazul potențialului construit din densitatea de sarcină realistă funcțiile obținute conțin corecția de dimensiune finită a nucleului fiică, corecția de suprafață difuză nucleară și efecte de ecranare atomică. Alte corecții electrostatice pot fi introduse prin modificarea corespunzătoare a potențialului. Spre exemplu, introducerea corecției de deformare nucleară ar implica un potențial deformat și rezolvarea ecuației Dirac prin metoda canalelor cuplate. Diferențele care apar în timpii totali de înjumătățire între o metodă analitică de calculare a factorilor spațiu de fază și una numerică sunt în [1,2].

[1] S. Stoica, M. Mirea, O. Nănescu, J. Un-Nabi, and M. Ishfaq, *Advances in High Energy Physics*, Volume 2016, Article ID 8729893

[2] J.Un-Nabi, M. Ishfaq, O. Nițescu, M. Mirea and S.Stoica *Universe* **6**, 5 (2020).

6. Rezultate, stadiul realizării obiectivului fazei, concluzii și propuneri pentru continuarea proiectului (se vor preciza stadiul de implementare a proiectului, gradul

de indeplinire a obiectivului cu referire la tintele stabilite si indicatorii asociati pentru monitorizare si evaluare).

A fost realizat studiul triplei coexistente de forma si dezintegrarea beta permisa/interzisa a starilor izomere in  $^{96}\text{Y}$  catre  $^{96}\text{Zr}$  in cadrul modelului complex Excited Vampir utilizand procedee variationale cu proiectie pe simetrii si interactii efective construite din potentialul Bonn CD. Sunt prezentate pentru prima data rezultate privind dezintegrarea beta *first-forbidden* de tip  $0^- \rightarrow 0^+$ . Rezultatele obtinute au fost publicate in Phys. Rev. C 101, 024307 (2020). Investigatiile prezentate vor fi continuate cu studii privind alte elemente de matrice de tip *first-forbidden*.

Obiectivul fazei a fost realizat integral.

In ceea ce priveste continuarea activitatilor pe proiect aferente fazei nr.6/09.12.2020: au fost proiectate PCB-urile aferente sistemului de achizitie, au fost asamblate componentele si s-a inceput implementarea firmware-ului pe acestea.

Responsabil proiect

Prof. Dr. Mihai Petrovici