



Nr. ieșire 7302/07.12.2022

Nr. intrare /...

RAPORT STIINTIFIC

Către,

*Unitatea Executivă pentru Finanțarea Învățământului Superior, a Cercetării, Dezvoltării și
Inovării (UEFISCDI)*

Program 4 - Cercetare fundamentală și de frontieră

Tip proiect: Proiecte de cercetare exploratorie

Proiect: Posibila emisie alfa din rezonante gigantice cuadripolare induse de neutroni rapizi

(Acronim: GQRpad), <https://www.nipne.ro/proiecte/pn3/59-proiecte.html>

Contract nr: PCE 7 /2022 (PN-III-P4-PCE-2021-1260)

Perioada de raportare: 01.06.2022 – 31.12.2022

Coordonator: Institutul National de Cercetare-Dezvoltare pentru Fizica si Inginerie Nucleara
„Horia Hulubei” (IFIN-HH)

Director de proiect: Dr. Vlad Avrigeanu

Etapa 1: Analiza consistenta a reactiilor induse de nucleoni incidenti pe nucleul ^{93}Nb , incluzand in particular emisia de particule alfa, la energii incidente inferioare si in jurul barierei Coulomb.

Obiectivele si activitățile etapei:

1.1 Analiza corespunzătoare a (i) parametrilor densitatilor de nivele nucleare NLD, potentialele de model optic OMP pentru nucleoni, (iii) functiilor de forta radiative RSF, (iv) factorilor spectroscopici pentru reactii directe DR, si (v) sectiunilor eficiente calculate de emisie alfa, si a sensibilitatii acestora fata de ipoteze si parametri de model nuclear.

1. Descrierea stiintifica

1.1. Introducere

Cunoasterea potentialului de model optic (OMP) pentru particule alpha prezinta o importanta majora atat din punctul de vedere al cercetarilor fundamentale, care inca nu au ajuns la o intelegere deplina a diferitelor intrebari ridicate de modelele existente, cat si pentru evaluarea datelor de productie de gaze (bule de He – ‘He bubbles’) si defecte de iradiere in instalatii de fuziune nucleara. Validarea OMP dezvoltat anterior¹ in IFIN-HH si adoptat ca optiune standard a codului de calcul TALYS², de larg uz international, a fost obtinuta anterior^{3,4} prin analiza datelor de

¹V. Avrigeanu, M. Avrigeanu, and C. Manaiescu, Phys. Rev. C **90**, 044612 (2014)

²A.J. Koning, S. Hilaire, and S. Goriely, TALYS-1.96 - A nuclear reaction program; <http://www.talys.eu/>

emisie alfa indusa de neutroni rapizi pe izotopii stabili ai Fe, Co, Ni, Cu, si Zn. In acest scop au fost realizate calcule consistente de modele nucleare ale sectiunilor eficace de reactie, utilizand valori ale parametrilor de model stabiliti prin analiza unor date diferite independente, precum si fara implicarea unor factori empirici de renormare pentru emisia de particule alfa si/sau nucleoni, pentru energii incidente de pana la ~21 MeV si toate datele disponibile pentru diferitele canale de reactie si izotopi ai unui element. Un acord satisfacator a fost astfel obtinut intre sectiunile eficace masurate ale reactiilor (n, α) induse pe izotopii elementelor mentionate mai sus, incluzand si toate canalele de reactie concurente, cu calcule consistente de modele nucleare folosind potentialul mentionat mai sus¹. Luarea in considerare suplimentara s-a dovedit in final necesara si utila pentru (i) popularea starilor excitate joase ale nucleelor reziduale prin reactii directe (DR) de tip ‘pick-up’, si (ii) un proces similar ‘Giant Quadrupole Resonance’ (GQR) care poate contribui la descrierea marimii sectiunilor eficace ale unor reactii (n, α) la energiile GQR ale nucleelor excitate respective. Ca urmare a concluziilor opuse rezultate anterior⁵ in urma studiului emisiei de particule alfa in reactii induse de nucleoni in zonele de masa A~60 si A~90, a devenit de interes realizarea aceluiasi tip de analiza in cazul nucleului tinta ⁹³Nb, cunoscut ca un element natural mono-izotopic de referinta pentru studiile de reactii nucleare.

1.2 Rezultatele etapei anuale

1.2.1 Ca urmare a absentei unor date independente necesare pentru stabilirea parametrilor de modele nucleare anterior realizarii calculelor de sectiuni eficace ale reactiilor induse de neutroni incidenti pe nucleul ⁹³Nb – ca, de exemplu, date medii de rezonante neutronice pe izotopii stabili (neexistand in natura un izotop ⁹²Nb necesar in acest scop) – a fost necesara in prealabil o analiza a modului de propagare a incertitudinilor acestor parametri asupra incertitudinii sectiunilor eficace de reactie calculate. Incertitudinile acestor parametri urmand a fi corelate cu incertitudinea datelor primare implicate in determinarea lor si/sau sistematica disponibila pentru acesti parametri, s-a impus ca analiza respectiva sa fie realizata in cazul unui lant de izotopi stabili caracterizati cat mai mult posibil de existenta datelor primare necesare. Acest ansamblu de conditii a fost identificat in

³ V Avrigeanu and M. Avrigeanu, *Validation of an optical potential for incident and emitted low-energy alpha-particles in the A~60 mass range* (Invited Part of a collection: [Light Clusters in Nuclei and Nuclear Matter: Nuclear Structure and Decay, Heavy Ion Collisions, and Astrophysics](#)), Eur. Phys. J. A **57**, 54 (2021)

⁴V Avrigeanu and M. Avrigeanu, *Validation of an optical potential for incident and emitted low-energy alpha-particles in the A~60 mass range. II. Neutron-induced reactions on Ni isotopes* (Part of a collection: [Light Clusters in Nuclei and Nuclear Matter: Nuclear Structure and Decay, Heavy Ion Collisions, and Astrophysics](#)), Eur. Phys. J. A **58**, 189 (2022)

⁵ V. Avrigeanu and M. Avrigeanu, Phys.Rev.C **91**, 064611 (2015); . *ibid.* **96**, 044610 (2017).

cazul izotopilor stabili ^{58,60-62,64}Ni, rezultatele analizei respective formand obiectul unei prezentari⁶ orale la editia din 2022 a conferintei de referinta in domeniul datelor nucleare (in curs de evaluare pentru publicare in revista EPJ Web of Conf.) cu urmatorul ‘Abstract’:

“The major role of consistent parameter sets within analysis of neutron-induced alpha-particle emission, for the assessment of a possible difference between the optical model potentials (OMPs) which describe either alpha-particle elastic scattering and induced reactions or alpha-emission from excited compound nuclei, is shown. They are involved at variance with use of either empirical rescaling factors of the gamma and/or neutron widths or even combinations of all options of a computer code for main input parameters. Suitable description of all competitive reaction channels, confirmed by a careful uncertainty analysis in order to avoid parameter ambiguities and/or error compensation, support further consideration of additional direct processes.”

1.2.2 Un alt element suplimentar programului initial, de validare a potentialului¹ si pentru emisia de particule alfa, l-a reprezentat o supraestimare asumata recent cu un factor de 2 a primei masuratori directe⁷ a sectiunii eficace a reactiei ⁵⁹Cu(p,α)⁵⁶Ni la energia incidenta de 6 MeV. Aceasta a impus o analiza proprie pentru a sustine acest potential de model optic pentru particule alfa. Rezultatele acestei analize de ipoteze si parametri de model, in cadrul acestui proiect, au fost prezentate odata cu sectiunile eficace ale reactiei respective obtinute in vederea actualizarii imbunatatite a evaluarilor de uz international extins TENDL-2021⁸ in lucrarea⁹ publicata cu urmatorul ‘Abstract’:

“Due consideration of proton optical-model potential (OMP) anomalies at sub-Coulomb energies for medium-weight nuclei is shown to be critical for the analysis of the unprecedented measurement of ⁵⁹Cu(p,α)⁵⁶Ni reaction cross section at an energy of ~6 MeV [Phys. Rev. C **104**, L042801 (2021)]. The variation in predicted cross sections from standard statistical-model calculations and the cross-section range corresponding to the anomalous proton imaginary-potential depth, for target nuclei off the line of stability, are

⁶V. Avrigeanu and M. Avrigeanu, [Additional reaction mechanisms to statistical alpha-emission and the related optical-potential validation](https://indico.frib.msu.edu/event/52/contributions/847/attachments/445/1938/ND2022-258_Fusion_VAvrigeanu.pdf), Int. Conf. on Nucl. Data for Sci. and Tech. (ND2022), July 25-29, 2022, Sacramento, California, US (https://indico.frib.msu.edu/event/52/contributions/847/attachments/445/1938/ND2022-258_Fusion_VAvrigeanu.pdf); submitted to EPJ Web of Conf. (15.10.2022)

⁷J. S. Randhawa, R. Kanungo, J. Refsgaard, P. Mohr, T. Ahn, M. Alcorta, C. Andreoiu, S. S. Bhattacharjee, B. Davids, G. Christian *et al.*, Phys. Rev. C **104**, L042801 (2021)

⁸A. J. Koning and D. Rochman, TENDL-2021: TALYS-based evaluated nuclear data library, https://tendl.web.psi.ch/tendl_2021/tendl2021.html

⁹V. Avrigeanu and M. Avrigeanu, *Charged-particle optical potentials tested by first direct measurement of the ⁵⁹Cu(p,α)⁵⁶Ni reaction*, Phys. Rev. C **106**, 024615 (2022), doi:10.1103/PhysRevC.106.024615; <https://doi.org/10.1103/PhysRevC.106.024615>

distinct and well separated. Consequently, the new measurement provides, under unique conditions, tests of proton isoscalar and isovector real-potential components, the anomalous imaginary potential, as well as previous alpha-particle OMP, for nuclei off the line of stability.”

2.2.3 In sfarsit, obiectivul principal al etapei de fata a fost realizat in conditiile asumate anterior. Astfel, validarea potentialului de model optic pentru particule alfa mentionat¹ a fost obtinuta prin analiza datelor de emisie alfa indusa de neutroni rapizi pe nucleul tinta ⁹³Nb, fiind realizate calcule consistente de modele nucleare ale sectiunilor eficace de reactie, utilizand valori ale parametrilor de model stabiliti prin analiza unor date diferite independente precum si fara implicarea unor factori empirici de renormare pentru emisia de particule alfa si/sau nucleoni, pentru energii incidente de pana la ~21 MeV si toate datele disponibile pentru diferitele canale de reaction si izotopi ai unui element. Un acord satisfacator a fost astfel obtinut intre sectiunile eficace masurate ale reactiilor (n,α) induse pe ⁹³Nb, incluzand si toate canalele de reactie concurente, cu aceeasi validare in final a luarii in considerare suplimentara a (i) popularii starilor excitate joase ale nucleelor reziduale prin DR de tip ‘pick-up’, si (ii) procesului similar GQR care poate contribui la descrierea marimii sectiunilor eficace ale unor reactii (n,α) la energiile GQR ale nucleelor excitate respective. Rezultatele acestei analize de ipoteze si parametri de model, in proiectului de fata, au fost prezentate odata cu sectiunile eficace ale reactiilor respective obtinute in vederea actualizarii imbunatatite a evaluarilor⁸ de uz international extins TENDL-2021 intr-o prezentare¹⁰ orala precum si intr-o lucrare¹¹ in curs de evaluare pentru publicare in jurnalul *Frontiers-in-Physics* acceptata (A. Prokofiev, Guest Ed., Nov. 4, 2022) cu urmatorul ‘Abstract’:

“The interest in Niobium has followed its employment within structural materials of nuclear reactors, activation monitor in reactor dosimetry, 14 MeV neutron flux determination, and also as an element of superconductor alloys in fusion reactors. A consequent large amount of experimental data for neutron interactions with ⁹³Nb nucleus triggered its use even as a ‘sample problem’ in nuclear model calculations (Gruppelaar and Nagel, 1985; Watanabe *et al.*, Phys. Rev. C **51**, 1891, 1995). However, scattered data for neutron-induced reactions on this only Nb natural isotope are yet pointing out a need of more accurate measurements to settle its evaluation (Liang *et al.*, Nucl. Sci. Eng. **187**, 107, 2017; Naik *et al.*, Nucl. Phys A **970**, 156, 2018) while newer measurements in the meantime may provide further opportunities for a suitable corresponding evaluation. Moreover, a concurrent suitable

¹⁰V. Avrigeanu and M. Avrigeanu, *Progress report on analysis fast-neutron induced alpha emission*, Report EFFDOC-1488, OECD/NEA JEFF Meeting, Nov. 24, 2022, https://www.oecd-nea.org/dbdata/nds_effdoc/effdoc-1488.pdf

¹¹V. Avrigeanu and M. Avrigeanu, *Consistent Assesment of Neutron-Induced Activation of ⁹³Nb*, submitted to *Frontiers-in-Physics* (Nov. 4, 2022)

account of excitation functions for various reaction channels, at variance with TALYS-1.96 as well as TENDL-2021 results (Report EFFDOC-1472, 2022), remains an actual goal of further nuclear model analysis. It is concerned within present work by paying more attention to use of consistent parameter sets that are formerly obtained or validated by analysis of other independent data. No empirical rescaling factors of the gamma and/or neutron widths have also been used, as well as a proper account of all available data for competitive reaction channels, to avoid compensation effects of less accurate model parameters. Remaining questions are emphasized as well as the value of additional measurements.”

1.3 Gradul de realizare a obiectivelor

Realizarea analizelor^{6,9-11}, care au constituit obiectivele etapei de fata a acestui proiect, este integrala, urmand insa ca publicarea a unora dintre aceste rezultate^{6,11} sa fie finalizata, daca nu pana la data limita a prezentei etape (31.12.2022), in cursul etapei urmatoare.

Un obiectiv major nerealizat inca o reprezinta angajarea unui masterand/doctorand/post-doc desi disponibilitatea pozitiei vacante a fost anuntata public la adresele din interior/exterior IFIN-HH, inclusiv pe pagina proiectului (<https://www.nipne.ro/proiecte/pn3/59-proiecte.html>, din 26.05.2022):

- <https://www.euraxess.gov.ro/jobs/814405>
- <https://jobs.research.gov.ro/anunt.php?id=5138>
- https://www.nipne.ro/jobs/01082022/asistent_cercetare_PCE-2021-1260.doc
- https://www.nipne.ro/proiecte/pn3/20220510_gqrpav_avrigeanu/OpenPosition_MSc-PhD_ASC_PCE-2021-1260.pdf
- întâlnire ,online’ a Scolii Doctorale de Fizica (UB), 4 iulie 2022, 12:00-14:00, Meeting ID: 892 2638 5569 , Passcode: 502677

Un aspect aparte il reprezinta in acst caz faptul ca pentru aceasta pozitie vacanta au fost primite aplicatii din partea unor doctoranzi/postdoc numai din afara Romaniei (3 din India), care insa nu au mai continuat dupa comunicarea bugetului disponibil.

2. Sumar al progresului

2.1 Livrabilele realizate sunt reprezentate de lucrarile^{6,9,10,11}, cu directorul proiectului de fata fiind autor corespondent.

2.2 Indicatori de rezultat, ca articole publicate, sau acceptate spre publicare în reviste indexate ISI, sunt de asemea lucrarile^{6,9,11}, ultima dintre ele urmand a fi finalizata in perioada imediat urmatoare.

2.3 Diseminarea rezultatelor: Participări la conferințe, ‘workshopuri’ si seminarii internaționale

O mentiune in acest sens - pentru o perioada contractuala cu putin mai mare decat $\frac{1}{2}$ ani - o reprezinta lucrarile^{6,10} prezentate oral, certificand o pozitie asumata si validata la nivel international.

2.4 Justificare diferentelor dintre rezultatele preconizate pentru primul an al acestui proiect, conform propunerii finantate, si realizările prezentate in cuprinsul acestui raport deriva din perioada contractuala cu putin mai mare decat $\frac{1}{2}$ ani de la inceperea activitatii acestui proiect. Sunt insa indeplinite toate conditiile pentru recuperarea acestor diferente si derularea proiectului conform planificarii initiale.

3. Rezumat executiv al activitatilor realizate în perioada de implementare

Cunoasterea potentialului de model optic (OMP) pentru particule alfa este de maxima importanta atat din punctul de vedere al cercetarilor fundamentale, care inca nu au ajuns la o intelegere deplina a diferitelor intrebari ridicate de modelele existente, cat si pentru evaluarea datelor de productie de gaze (bule de He – ‘*He bubbles*’) si defecte de iradiere in instalatii de fuziune nucleara. Validarea OMP dezvoltat anterior in IFIN-HH, adoptat ca optiune standard a codului de calcul TALYS, de larg uz international, si obtinuta anterior si pentru emisia de particule alfa din nuclee excitate - prin analiza datelor de emisie alfa indusa de neutroni rapizi pe izotopii stabili ai Fe, Co, Ni, Cu, si Zn – s-a realizat ca obiectiv al acestei etape a proiectului de fata in cazul elementului Nb, de referinta pentru analizele de modele nucleare.

In acelasi timp s-au impus analize suplimentare, datorita fie absentei unor date independente necesare pentru stabilirea parametrilor de modele nucleare anterior realizarii calculului de sectiuni eficiente ale reactiilor induse de neutroni incidenti pe nucleul ^{93}Nb – ca, de exemplu, date medii de rezonante neutronice pe izotopii stabili – fie datorita unor date noi masurate intretimp pentru reactia $^{59}\text{Cu}(p,\alpha)^{56}\text{Ni}$ si conducand la invalidarea potentialului in discutie. Astfel, au devenit necesare in prealabil (i) o analiza a modului de propagare a incertitudinilor acestor parametri asupra incertitudinii sectiunilor eficiente de reactie calculate, si (ii) o analiza proprie a reactiei $^{59}\text{Cu}(p,\alpha)^{56}\text{Ni}$. Incertitudinile parametrilor respectivi urmand a fi corelate cu incertitudinea datelor primare implicate in determinarea acestora si/sau sistematica disponibila pentru acesti parametri, s-a impus ca analiza respectiva sa fie realizata in cazul unui lant de izotopi stabili caracterizati cat mai mult posibil de existenta datelor primare necesare. Acest ansamblu de conditii a fost identificat in cazul izotopilor stabili $^{58,60-62,64}\text{Ni}$, permitand obtinerea unor concluzii viabile. Pe de alta parte, analiza supraestimarii asumata recent cu un factor de 2 a primei masuratori pentru reactia $^{59}\text{Cu}(p,\alpha)^{56}\text{Ni}$ a demonstrat corectitudinea potentialului pentru particule alfa, discrepanta atribuita initial acestuia fiind in fapt datorata unui OMP pentru protoni neindicat dincolo de linia de stabilitate.

Realizarea analizelor care au constituit obiectivele etapei de fata a acestui proiect a fost integrala, urmand insa ca publicarea acestor rezultate sa fie finalizata, daca nu pana la data limita a prezentei etape (31.12.2022), in cursul etapei urmatoare. Pentru moment aceste rezultate au format obiectul a 2 prezentari orale la conferinte si 'workshop'-uri internationale si a 3 lucrari publicate (1) sau in curs de evaluare (1) si redactare (1) pentru publicare in jurnale ISI. Pagina proiectului (<https://www.nipne.ro/proiecte/pn3/60-proiecte.html>) a devenit functionala inca din 26.05.2022 in vederea anuntului public cat mai rapid al disponibilitatii unei pozitii vacante.

Ne asumăm răspunderea pentru corectitudinea datelor prezentate.

Director de proiect,



Vlad AVRIGEANU