RAPORT ȘTIINȚIFIC

Descriere științifică:

Prima etapă a proiectului, *Realizarea experimentului* ${}^{56}Fe(p,p'\gamma)$, analiza finală și diseminarea datelor. Modernizarea sistemului de achiziție al GAINS, este împărțită în trei activitati:

- Activitatea 2.1: Modernizarea sistemului de achiziție al spectrometrului GAINS,
- Activitatea 2.2: Realizarea experimentului ${}^{56}Fe(p,p'\gamma)$ la Tandem 9MV, IFIN-HH,
- Activitatea 2.3: Analiza finală a datelor obținute în experimentul ⁵⁶Fe(p,p'γ), pregătirea lor pentru includere în baza de date EXFOR și diseminarea acestora.

Având ca rezultate etapă

- Un nou sistem de achizitie al spectrometrului GAINS care momentan colectează date în paralel cu cel vechi.
- Sectiunea eficace absolută și unghiular integrată a primei tranziții din ⁵⁶Fe emisa în urma reacției ⁵⁶Fe $(p,p'\gamma)$.

Mai jos este realizată descrierea științifică a celor două activități cu punere în evidență a rezultatelor etapei și gradul de realizare al obiectivelor.

Activitatea 2.1: Modernizarea sistemului de achiziție al spectrometrului GAINS

Activitatea de modernizare a sistemului de colectare a datelor folosit la spectrometrul GAINS [1] a cuprins două componente esențiale: (1) modernizarea sistemului hardware și a software-ului folosit de acesta și (2) adaptarea programelor de analiză pentru a putea procesa datele primare colectate. De asemenea, activitatea a cuprins și testarea noului sistem de achiziție.

Procesul de modernizare a sistemului hardware s-a desfăsurat în colaborare cu colegii de la Universitatea din Groningen, Olanda, care au furnizat componentele hardware și au contribuit esențial la instalarea lor. Echipa din IFIN-HH a contribuit la definirea logicii folosite de noul sistem de achiziție și la instalarea sa la GAINS. Mai precis, sistemul tradițional de colectare de date al GAINS era bazat pe un sistem de digitizoare de tip DC440 produs de firma ACQIRIS, operând la 420 Hz și având o rezoluție în amplitudine de 12 biți [2, 3]. Sunt necesare 6 unități, având câte doi detectori conectați la fiecare dintre ele și un sistem de trigger comun. Semnalele digitizate de acest sistem sunt transferate la un calculator care le procesează, stocând liste timp-amplitudine independent pentru fiecare detector. Acest sistem a fost înlocuit de unul bazat pe doar două unități digitizoare SIS3316-250-14 produse de firma STRUCK. La fiecare unitate pot fi conectati 16 detectori, ea operând la 250 Hz și fiind capabilă să digitizeze semnale cu o rezolutie de 14 biți [4]. Avantajele noului sistem sunt multiple: rezoluția superioară a ADC-urilor, simplitatea sistemului (2 unități în loc de 6), posibilitatea de a colecta date în coincidență (practic toți detectorii sunt conectati la aceeasi unitate, deci nu este necesară sincronizarea mai multor module). Nu în ultimul rând, notăm faptul că vechiul sistem folosit de-a lungul a aproape 18 ani devenise instabil datorită îmbătrânirii componentelor electronice și, posibil, a expunerii la radiație.

A doua parte a activității de modernizare a constat în adaptarea programelor folosite în analiză pentru a fi capabile să proceseze datele procesate de digitizoarele STRUCK. Astfel, echipa actualului proiect a modificat toate componentele pachetului software folosit în analiza datelor experimentale. În particular, menționăm faptul că nu a fost suficientă crearea unei interfețe între noul sistem de date și programele de analiză deja existente deoarece acestea folosesc caracteristicile sistemului hardware în interpretarea corectă a datelor (de exemplu, frecvența de digitizare e esențială în calculul energiei neutronilor pe baza timpului de zbor al acestora).

În sfârșit, testarea noului sistem de achiziție GAINS s-a efectuat prin colectarea unui set de date în paralel cu digitizoarele ACQIRIS și STRUCK. Analiza acestor date confirmă faptul că noul sistem funcționează corect.

<u>Activitatea 2.2: Realizarea experimentului ⁵⁶Fe(p,p'y) la Tandem 9MV, IFIN-HH</u>

Pentru măsurarea canalului inelastic indus de protoni pe ⁵⁶Fe am folosit Acceleratorul Tandem de 9 MV al IFIN-HH și un ansamblu experimental întrebuințat și în alte ocazii de către grupul nostru. Acesta este format din doi detectori cu germaniu hiper-pur (HPGe), cu o eficiență relativă de 50% și pozitionați la 110° si 150° față de direcția fascicolului incident de protoni (vezi Figura 1).



Figura 1 Ansamblul experimental folosit pentru măsurarea secțiunilor eficace de împrăștiere inelastică a protonilor pe ⁵⁶Fe.

Acest tip de detectori au atât eficiență cât și rezoluție gama foarte bune. Menționăm că unghiurile de detecție alese ne permit să integrăm unghiular secțiunile eficace diferențiale de la 110° și 150° folosind o dezvoltare în serie a acestora în baza vectorială a polinoamelor Legendre cuplată cu metoda Gauss prin cuadraturi [5, 6]. Pentru a putea determina secțiuni eficace *absolute*, trebuie să știm și câți protoni incidenti au trecut prin ținta noastră. Informația despre fascicolul incident ne-a fost oferită de o cupa Faraday plasată dupa tinta de ⁵⁶Fe. Curentul de pe cupa a fost colectat de un integrator de sarcină electrică.

Semnalul integratorului de sarcină, cât si cele ale detectorilor, au fost trimise unui sistem de achiziție complet digital. Acest modul are o frecventa de lucru de 500 MHz si o foarte buna rezolutie pentru determinarea amplitudinii (14 biți) [7]. Probabil cea mai relevantă caracteristică a acestui digitizer este că acesta procesează în timp real datele colectate fără a fi nevoit să transfere semnalele digitizate la PC pentru aplicarea algoritmilor digitali de extragere a amplitudinii și a timpului fiecărui puls. Această caracteristică permite conditii de lucru bune chiar și la rate de numarare relativ mari, specifice acestui tip de experimente. Timpul și amplitudinea fiecărui eveniment detectat au fost scrise în final pe PC în fisiere listă de timp și amplitudine.

A masura secțiuni eficace înseamna a determina și energia incidentă la care protonul a indus reacția inelastică. Însă, pentru că protonii pierd energie în mod aleator odată intrați în ținta de ⁵⁶Fe, nu exista nici o modalitate de a știi exact la ce energie a acestuia a fost generată reacția inelastică de interes. Evident, cu cât ținta este mai groasă, cu atat acest efect este mai pregnant. Pe de altă parte, folosirea unei ținte prea subțiri poate rezulta în timpi de măsură mari. Grosimea țintei a fost aleasă pe baza unor calcule de frânare a protonilor în ⁵⁶Fe folosind codul SRIM [8]. Conform acestuia, protonii de 4 MeV pierd 55 keV la trecerea printr-o țintă cu grosimea de 1 mg/cm². În final, am decis să utilizăm doua ținte de ⁵⁶Fe (îmbogățite izotopic 99.77%) de grosimi diferite: una foarte subțire (0.6 mg/cm²) și una relativ groasa (3.3 mg/cm²). Ținta subțire ne-a permis să măsurăm cu pași foarte mici în energia incidentă (50 keV), cu scopul de a sonda foarte multe rezonante din nucleul compus ⁵⁷Co, pe când cea groasa ne-a permis să strângem o statistică mai bună oferindu-ne totodată și posibilitatea unei verificări suplimentare a rezultatelor experimentale: punctele de secțiune eficace măsurate cu ținta groasă trebuie *să medieze* rezonantele de nucleu compus măsurate cu cea subțire (vezi Figura 2).



Figura 2 Secțiunea eficace inelastică de producere a primei tranziții gama (846 keV) în ⁵⁶Fe. Datele noastre experimentale obținute cu țintele de ⁵⁶Fe și cu ținta de ^{nat}Fe sunt comparate cu rezultatele raportate de Dyer et al. [12] dar și cu calcule teoretice realizate cu codul de calcul TALYS 1.96 [9] folosind parametrii default.

Dată fiind energia pierdută de protoni, vedem că suntem foarte departe de picul Bragg de absorbție completă chiar și pentru măsuratorile la energii incidente mici. Deci, putem presupune că, protonii pierd energie printr-un mecanism liniar. Acest lucru ne permite să modelăm energia protonilor în țintă folosind distribuția de probabilitate uniformă (i.e., valori echiprobabile). Folosind această distribuție putem apoi să calculăm foarte simplu energia medie a protoniilor în țintă și incertitudinea asociată acesteia [10].



Figura 3 Comparație între secțiunile de reacție (p,p') și (p,n) pe ⁵⁶Fe estimate de codul de calcul TALYS 1.96 [9] folosind parametrii default.

Am început acest experiment printr-o măsuratoare de calibrare în eficiență a detectorilor folosind o sursa de ¹⁵²Eu. Această calibrare este necesară pentru interpolarea și extrapolarea eficienței la energiile gama de interes din ⁵⁶Fe. Sursa de calibrare a fost amplasata în locul țintei și am măsurat într-o geometrie de detecție identică cu cea folosită ulterior pe durata experimentului. Pentru verificări suplimentare ale eficienței extrase, pe parcursul experimentului au fost efectuate mai multe măsuratori de calibrare.

Bariera coulombiana a protonilor pe ⁵⁶Fe este de aproximativ 4 MeV iar secțiunea eficace a canalului inelastic incepe să devină relevantă peste 4.5-5 MeV. În consecință, prima energie incidentă cu care am început măsurătorile a fost de 4.2 MeV. Pe parcursul experimentului au fost

înregistrate rate de numărare relativ mari (2000-12000 evenimente/s) ceea ce a generat pierderi din cauza timpului mort al detectoriilor. Procedura detaliată pentru calculul coeficientului de corecție de timp mort poate fi găsită în articolul nostru dedicat acestui subiect [11] (vezi si Activitatea 2.3 de mai jos).

Această măsurătoare a avut câteva particularități și dificultăți experimentale importante. În primul rând, secțiunea eficace a canalului de reacție ⁵⁶Fe(p,n)⁵⁶Co, aflat în competiție cu cel inelastic, este relativ mare (vezi Figura 3). Acest lucru, cuplat cu timpul mediu de viață de doar 77 de zile al nucleului rezidual ⁵⁶Co (instabil beta), a deschis posibilitatea activării țintei și, deci, a generării unei contribuții poluante în picurile gama de interes din ⁵⁶Fe (⁵⁶Co are factori de schema beta importanți spre mai multe niveluri excitate din ⁵⁶Fe). Pentru a putea sustrage acest poluant, după fiecare măsurătoare cu fascicol, am măsurat și 10 minute fără fascicol pentru a vedea cât de mare este această contribuție.

O a doua dificultate importantă a acestui experiment a fost dată de prezența unui alt poluant, și anume gama de 843 keV din ²⁷Al (vezi Figura 4). Din aceiasi figură se poate vedea și faptul că ambele game sunt localizate pe un "triunghi" de germaniu generat de neutronii care ajung în cristalul detectoriilor și produc reacții inelastice + elastice [i.e., canalul (p,n) pe ⁵⁶Fe este destul de intens producând relativ mulți neutroni]. Linia gama din ²⁷Al este generată de către împrăștierea inelastică a protoniilor scoși din fascicol (dupa interacția, cel mai probabil elastică, cu ținta de ⁵⁶Fe și/sau colimatorii) pe pereții camerei de reacție (care este din Al). Pentru sustragerea acestei contribuții poluante am măsurat mai multe energii incidente fără țintă dar și cu o țintă de ⁵⁸Ni. Acest nucleu nu are energii gama în regiunea 846 keV asociată lui ⁵⁶Fe și ar trebui, deci, să observăm în acea regiune doar picul de 843 keV (plus alte tranziții gama din canalul inelastic al ²⁷Al în alte zone ale spectrului). Aceasta ne-a permis ulterior în cadrul analizei de date să determinăm raportul dintre ariile picurilor gama asociate tranzițiilor de 1014 keV si 843 keV din ²⁷Al și să folosim acest raport pentru a corecta datele luate cu ținta de ⁵⁶Fe (vezi Activitatea 2.3 de mai jos). Este important de spus că măsurătoriile fără țintă și cu țintă de ⁵⁸Ni au fost făcute pe intreaga plaja 4-16 MeV de energii ale protoniilor ceea ce a necesitat timp de fascicol suplimentar.



Figura 4 Spectrele gama corespunzatoare energiilor incidente ale protonilor de 4.35 și 10.40 MeV. În figură se pot observa cele două picuri corespunzătoare energiilor de 843 keV (²⁷Al) și 846 keV (⁵⁶Fe) parțial suprapuse (spectrul reprezentat în negru) dar si complet suprapuse (spectrul reprezentat în roșu). Linia albastră descrie orientativ panta așa numitului triunghi de germaniu.

Probabilitatea de împrăștiere inelastică a protonilor pe ⁵⁶Fe are valori rezonabile, în jur de 300 mb, mai ales pentru producerea primei tranzitii de 846 keV. Deci, timpul de măsura necesar per punct de secțiune eficace a fost relativ scurt (10-20 minute), permițând acumularea unei statistici rezonabile (incertitudine sub 5-15%) chiar și cu ținta subtire. Experimentul a decurs in condiții foarte bune, cu

fascicol stabil chiar dacă la energii incidente foarte mari intensitatea fascicolului a variat destul de mult generând și rate de numărare semnificative. Am încercat să păstrăm fascicolul la intensități relativ mici (2-3 pnA), mai ales la energii incidente peste energia de prag a altor canale non-elastice, pentru a ține acest gen de probleme cât de cât sub control.

În acest experiment am măsurat cu succes intregul interval de energii incidente de la 4-16.5 MeV: cu pași de 50 keV intre 4.3-10.7 MeV (ținta subțire) și cu pași de 300 keV în întregul interval 4-16.7 MeV (ținta groasă). În total, au fost în jur de 150 de puncte de secțiune eficace. Această secțiune eficace cu rezoluție foarte bună în energia incidentă va fi comparată cu secțiunea eficace obținută pentru același nucleu țintă la sursa de neutroni GELINA în 2024. Cele două seturi de date vor fi deci foarte utile în demersul nostru de a găsi o legătura intre canalele inelastice neutronic și protonic pe ⁵⁶Fe.

Activitatea 2.3: Analiza finală a datelor obținute în experimentul ${}^{56}Fe(p,p'\gamma)$, pregătirea lor pentru includere în baza de date EXFOR și diseminarea acestora

Această secțiune a raportului de activitate descrie analiza de date și rezultatele extrase în experimentul 56 Fe(p,p' γ) 56 Fe descris în Activitatea 2.2 de mai sus.

Analiza de date a început prin sortarea acestora. Fișierele inițiale cu liste timp-amplitudine scrise de digitizer au fost utilizate, pentru fiecare energie incidentă măsurată în parte, în generarea de spectre de amplitudine (spectre γ) și de fișiere conținând rata de numărare. În funcție de rata de numărare am calculat coeficienții de corecție pentru timpul mort al detectorilor, *d*, pentru fiecare caz în parte. Procedura detaliată este descrisa in Ref [11]. În spectrele γ am identificat și apoi integrat picul de interes din ⁵⁶Fe, extrăgând astfel și mărimea N_{γ} din formula (1). În acest experiment, am reușit să detectăm cu statistică rezonabilă prima tranziție din ⁵⁶Fe având E_{γ}=846 keV. O altă mărime crucială ce trebuie extrasă în analiza de date este numărul de protoni incidenti, N_p din formula (1), folosind curentul colectat de integratorul de sarcină. Acesta este capabil să genereze un semnal de fiecare dată cand colectează o sarcină electrică de 10¹⁰ C. Știind acest numar de semnale și sarcina electrică a proiectilului oprit în cupa Faraday, putem determina numărul de protoni incidenți.

Așa cum am menționat deja, tranziția de interes a fost poluată atât în urma activării țintei cât și de γ de 843 keV din ²⁷Al (ambele game fiind localizate pe un fond radiativ local asociat unui "triunghi" de germaniu) (vezi Figura 4). În aceste condiții stabilirea limitelor de integrare și scăderea fondului radiativ a fost mai dificilă și a dus la incertitudini absolute mai mari decat ne asteptam inițial. Canalul inelastic pe ²⁷Al are și el valori relativ mari și, deci, contribuția poluantă a liniei de 843 keV nu a putut fi neglijată. Pentru a o scadea ne-am folosit de măsurătorile fără țintă și de cele cu ținta de ⁵⁸Ni care ne-au permis să determinăm, ca funcție de energia incidentă, raportul dintre ariile picurilor gama de 843 si 1014 keV din Al. Aceasta valoare a fost scăzută din aria picului de 846 keV de interes. Incertitudinea cu care raportăm secțiunea eficace pentru aceasta gamă ține cont de toate aceste posibile erori sistematice introduse în analiza de date și are o valoare relativa în jur de 11%.

Pentru calibrarea în eficiență a detectoriilor ne-am folosit de o sursă de ¹⁵²Eu cu o activitate în 4π foarte bine cunoscută (incertitudine 1.5% în 1 σ).

Densitatea areala, ρ_s , a țintei de ⁵⁶Fe, folosită în formula (1) de mai jos, a fost determinata prin cântărire cu o balanța de mare precizie și măsurarea ariei cu un instrument laser. Plănuim să ne folosim și de tehnica de împrăștiere Rutherford la unghiuri înapoi (RBS-Rutherford Back Scattering) a unui fascicol alfa la Acceleratorul de 3 MV al IFIN-HH pentru a determina această marime fizica și în alt mod.

În final, având valorile tuturor acestor mărimi fizice, am putut determina secțiunile eficace diferențiale – la 110° și 150° – ca funcție de energia incidentă pentru tranziția de 846 keV folosind urmatoarea expresie:

$$\frac{d\sigma}{d\Omega}(\theta_i, E_p) = \frac{1}{4\pi} \cdot \frac{N_{\gamma}(\theta_i, E_p) \cdot A_s}{N_p(E_p) \cdot \varepsilon_j(E_{\gamma}) \cdot \rho_s} \cdot d \tag{1}$$

unde mărimile importante sunt numarul de game detectate (N_{γ}) , numarul de protoni colectați de cupa Faraday (N_p) , eficiența detectorilor, ε_j , densitatea areală a țintei, ρ_s , și factorul de corecție pentru timp mort, d, .

Având valorile secțiunilor diferențiale date de expresia (1), acestea pot fi inserate în formula de mai jos pentru a calcula secțiunea integrată unghiular:

$$\sigma(E_p) = 2\pi \cdot [w_{110^o} \cdot \frac{d_{\sigma}}{d_{\theta}} (110^o) + w_{150^o} \cdot \frac{d_{\sigma}}{d_{\theta}} (150^o)]$$
(2)

Detalii despre procedura de integrare unghiulară folosită aici - precum și despre derivarea expresiei (2) și a valoriilor coeficienților de integrare w_{110} și w_{150} - pot fi găsite în referintele [5, 6]. Similar cu cazul celei diferențiale, secțiunea eficace integrată unghiular poate fi interpretată ca fiind probabilitatea de emisie a acelei game *oriunde in* 4π ca urmare a împrăștierii inelastice a protonului incident pe nucleul țintă ⁵⁶Fe.

Rezultatele noastre pentru cea mai intensă tranziție din ⁵⁶Fe sunt aratate în Figura 2. Acestea sunt comparate de asemenea cu alte date raportate în literatură pentru canalul inelastic pe ⁵⁶Fe (P. Dyer et al. [12]) dar și cu calcule teoretice efectuate folosind codul TALYS 1.96 [9]. Putem observa un foarte bun acord atât între datele noastre obținute cu cele doua ținte de ⁵6Fe dar și cu datele lui Dyer et al. [12]. Predicția teoretică oferită de TALYS 1.96 [9] descrie destul de bine datele experimentale și, deci, va fi interesant de văzut (în fazele ulterioare ale prezentului proiectului) dacă putem îmbunătății aceasta putere descriptivă plecând de la compararea datelor inelastice protonic si neutronic pe ⁵⁶Fe.

În această etapă: (1) s-a modernizat sistemul de achiziție al spectrometrului GAINS, (2) s-a realizat experimentul de împrăștiere inelastică a protonilor pe ⁵⁶Fe la acceleratorul Tandem 9 MV al IFIN-HH, (3) datele obținute au fost analizate și urmează să fie trimise pentru a fi încărcate în baza de date EXFOR. Rezultatele etapei, conform planului de realizare, au fost îndeplinite cu succes.

Sumar al progresului

Pe parcursul acestei etape au fost realizate următoarele *livrabile*: (1) Sistemul de achiziție modernizat al spectrometrului GAINS. Noul sistem de achiziție o să colecteze date în paralel cu cel vechi; (2) Secțiunea eficace a primei tranziții γ din ⁵⁶Fe obținută în experimentul de împrăștiere inelastică a protonilor pe ⁵⁶Fe la acceleratorul Tandem 9 MV al IFIN-HH. Ca *indicatori de rezultat* mentionăm că datele experimentale sunt analizate și pregătite să fie incluse în baza de date EXFOR. La capitolul diseminare amintim două contribuții la conferința internațională "15th International Conference on Nuclear Data for Science and Technology - ND2022" publicate în revista EPJ Web of Conferences 284 și două prezentari orale la conferința internațională "Workshop on elastic and Inelastic Neutron Scattering (WINS2023)" desfășurată la Troy, USA în octombrie 2023. Cele doua contribuții sunt:

- A. Negret et al., A new measurement on ⁵⁶Fe(n,inl) using GAINS at GELINA, Proceedings for the "15th International Conference on Nuclear Data for Science and Technology (ND2022)", EPJ Web of Conferences 284, 01034 (2023)

- A. Olacel et al., The past and the future of the GAINS spectrometer @ GELINA, Proceedings for the "15th International Conference on Nuclear Data for Science and Technology (ND2022)", EPJ Web of Conferences 284, 01007 (2023).

Prezentarile orale este:

- A. Negret et al., Back on the iron throne: New measurements of the ⁵⁶Fe(n,inl) and ⁵⁶Fe(p,inl) cross sections, WINS2023, RPI, Troy, USA.

- A. Olacel et al., GAINS – Twenty years after, WINS2023, RPI, Troy, USA.

Rezumat executiv

Cea de-a doua etapă a proiectului a constat în realizarea experimentului de împrăștiere inelastică a protonilor pe ⁵⁶Fe la acceleratorul Tandem 9 MV al IFIN-HH, analiza datelor și pregătirea lor pentru includerea în baza de date EXFOR, dar și modernizarea sistemului de achizitie al spectrometrului GAINS folosit la experimentul de împrăștiere inelastică a neutronilor pe ⁵⁶Fe, activitate ce face parte din etapa viitoare a acestui proiect. Măsurătoarea 56 Fe(p,p' γ) 56 Fe a avut loc la sfârșitul lunii iunie 2023. S-au obtinut peste 150 valori de sectiuni eficace absolute și integrate unghiular corespunzătoare tranzitiei cu E_v=846 keV din ⁵⁶Fe. Materialul folosit pentru cele două tinte, îmbogățit izotopic (99.77%), a fost achiziționat în cadrul proiectului. Rezultatele experimentale obținute de noi au fost comparate cu alte valori disponibile în literatură dar și cu predicții teoretice obținute folosind codul de calcul TALYS 1.96. Observăm un foarte bun acord între teorie și experiment. Datele finale obținute în cadrul acestei etape vor fi de asemenea comparate cu datele neutronice ce vor fi măsurate la GELINA în următoarea etapă a prezentului proiect. Ansamblul experimental folosit în măsuratoarea de secțiuni eficace de împrăștiere inelastică a neutronilor pe ⁵⁶Fe este pregătit; detectorii sunt testați și functionează corect, cele doua sisteme de achiziție sunt funcționale și ținta este disponibilă. Putem, deci, să începem măsuratoarea 56 Fe(n,n' γ) 56 Fe imediat ce sursa de neutroni GELINA re-devine operatională. La finalul acestei etape au fost îndeplinite toate obiectivele intermediare menționate în planul de realizare al proiectului.

Listă de referințe:

[1] A. Olacel et al., Proceedings for the "15th International Conference on Nuclear Data for Science and Technology (ND2022)", EPJ Web of Conferences 284, 01007 (2023).

[2] https://acqiris.com/hardware/12-bit/

[3] L. C. Mihailescu, C. Borcea, and A. J. M. Plompen, Nucl. Instrum. Meth. Phys. Research A578, 298 (2007).

- [4] https://www.struck.de/sis3316.html
- [5] C. R. Brune, Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A 493, 106 (2002).
- [6] A. Olacel, PhD Thesis, Faculty of Physics, University of Bucharest, 2016.
- [7] https://www.caen.it/products/dt5730/.
- [8] http://www.srim.org/.
- [9] A. Koning, S. Hilaire and S. Goriely, Eur. Phys. J. A 59, 131 (2023).
- [10] A. Olacel, et al. Phys. Rev. C 106, 024609 (2022).
- [11] M. Boromiza et al., Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A 863, 15 (2017).
- [12] P. Dyer et al., Phys. Rev. C 23, 5 (1981).

Director de proiect Dr. Alexandru Negret