

RAPORT STIINTIFIC FINAL

Contract Nr. 58 / 2022

Activitatea 1: Experimentul $^{40}\text{Ca}(n,n'\gamma)^{40}\text{Ca}$ la EC-JRC**Activitatea 1.1: Pregatirea experimentului și colectarea datelor experimentale**

Prima etapa în pregătirea oricărui experiment care își propune măsurarea de secțiuni eficace de reacție este de a estima valorile marimilor de interes, de exemplu, via calcule de reacții nucleare. Pentru efectuarea de asemenea calcule noi ne-am folosit de codul de calcul TALYS 2.0 [1] cu setări *standard* (i.e., valori *pre-definite* pentru toate ingredientele de reacție implicate) și energii incidente în intervalul 0.5-20 MeV (cu pași de 0.1 MeV). În general, pe lângă canalul inelastic care este destul de intens în acest interval de energii incidente, există și canalele de reacție aflate în competiție cu acesta care ar putea genera contribuții poluante. Principala dificultate de acest gen este legată de reacția (n,p) în urma căreia se formează, în general, un nucleu beta instabil care se poate dezintegra înapoi pe diverse stări excitate din nucleul țintă (generând astfel aceleași game cu cele de interes din canalul inelastic). Din fericire, prin reacția $^{40}\text{Ca}(n,p)$ se formează ^{40}K care este stabil și nu are tranziții gama de energii apropiate celor din ^{40}Ca . Următoarea etapă a activității noastre a constat în producerea țintei ce urma să fie bombardată de fasciculul de neutroni de la GELINA. Pentru a evita pe cât posibil oxidarea în aer, am folosit un compus de CaF_2 cu o densitate areală de 0.663 g/cm^2 și un diametru de 76.1 mm. Din păcate, pe parcursul experimentului ținta inițială a fost spartă (devenind inutilizabilă). În consecință, a nouă țintă de CaF_2 cu caracteristici similare a fost produsă și folosită în cea de-a doua parte a experimentului. Ultima etapă în pregătirea acestui experiment a constat în punerea la punct și optimizarea spectrometrului GAINS [2-6] și a electronicii adiacente. GAINS este un ansamblu experimental alcătuit din 12 detectori cu HPGe de volum mare plasați în jurul țintei la 110° , 150° și 125° în raport cu direcția fasciculului incident de neutroni, spectrometru folosit cu foarte mare succes de către grupul nostru în ultimii 15 ani pentru a măsura date nucleare [2-6]. Deși GAINS este un setup instalat permanent la sursa de neutroni GELINA a EC-JRC în Geel (Belgia), totuși - înainte de fiecare experiment al grupului nostru acolo și în funcție de nucleul țintă studiat - trebuie optimizată electronica de achiziție. Odată finalizate și aceste ultime pregătiri, am putut începe efectiv colectarea de date. Ca principiu de detecție, secțiunea eficace inelastică este determinată prin cuplarea tehnicii de spectroscopie gama cu cea de timp de zbor pentru măsurarea energiei gama și respectiv a energiei incidente a neutronilor. Determinând pentru fiecare semnal observat de către detectorii de HPGe amplitudinea și timpul, se poate extrage - pe lângă energia radiației produse - și energia neutronului care a generat reacția. Secțiunile eficace inelastice măsurate cu spectrometrul GAINS sunt normalizate la secțiunea standard $^{235}\text{U}(n,f)$ folosind o camera de fisiune care detectează fragmentele de fisiune generate de neutronii ce trec prin ea în drumul lor spre ținta de CaF_2 . Folosirea unui fascicul pulsant cuplată cu tehnica de timp de zbor ne permite să construim funcțiile de excitație gama într-o singură măsurătoare pentru întreg intervalul de energii incidente (0.5-20 MeV) ale fiecărui puls de neutroni. Pentru colectarea datelor venite de la detectori am folosit o achiziție bazată pe digitizare Acqiris™ DC440 care are 12 biți (4096 de canale) pentru determinarea amplitudinii și o frecvență de

digitizare a semnalului analog initial venit de la detectori de 420 MHz (ceea ce se transpune in 2.38 ns). În cadrul acestui experiment am colectat date timp de aproximativ 6 luni in conditii relativ stabile. Pentru calibrarea în eficacitate gama a detectorilor, am folosit o sursa calibrata de ^{152}Eu (detalii in Activitatea 1.2 de mai jos). Sintetizand, in acest experiment s-au masurat in conditii stabile functii de excitatie gama in intregul interval de energii incidente de la 0.5-20 MeV cu o buna rezolutie, atat in energia neutronilor (în jur de 35 keV la 1 MeV) cat si in cea a radiatiei gama, folosind tinte de CaF_2 . Rezultatele analizei datelor colectate in acest experiment sunt prezentate mai jos în cadrul Activitatii 1.2.

Activitatea 1.2: Analiza de date

Aceasta sectiune prezinta rezultatele extrase în urma analizei preliminare a datelor din experimentul $^{40}\text{Ca}(n,n'\text{g})^{40}\text{Ca}$ efectuat la sursa de neutroni GELINA a EC-JRC-Geel folosind spectrometrul GAINS. Deoarece colectarea de date a durat cateva luni de zile, acestea au fost mai întâi sortate identificand și eliminand run-urile necorespunzatoare. In urma sortarii au ramas date reprezentand aproximativ 1200h de masuratoare continua. Fisierile initiale de tip lista timp-amplitudine date de achiziția digitala au fost transformate mai intai in matrici timp-amplitudine 2-dimensionale (2600 de canale de timp, de cate 9.58 ns fiecare, si 4096 de canale de amplitudine) și apoi proiectate pe axele temporala si de amplitudine obtinand spectrele de timp si respectiv spectrele gama pentru fiecare detector în parte. Spectrele de timp au fost utilizate pentru calibrarea in timp de zbor (i.e., determinarea energiei incidente a neutronilor). Spectrele gama au fost folosite pentru a identifica și integra picul gama asociat tranzitiilor de interes din canalul inelastic. Facand aceasta pentru fiecare tranzitie in parte, si cupland informatia extrasa cu calibrarea in timp de zbor, am reusit in final sa determinam sectiunile eficace de interes (functii de excitatie). Desigur, alte corectii au trebuit a fi implementate: pentru eficacitatea detectorilor si a camerei de fisiune, pentru imprastierea multipla a neutronilor, etc. O etapa foarte importanta a analizei de date a fost interpolarea si extrapolarea eficacitatii detectorilor la energiile gama relativ mari specifice nucleului ^{40}Ca . Determinarea eficacitatii de detectie s-a bazat foarte mult pe simulari Monte Carlo [7] prin construirea unui model geometric cât mai realist al ansamblului experimental, model apoi validat prin comparatii cu punctele experimentale de eficacitate obtinute cu o sursa de calibrare (^{152}Eu). Pentru a ști câți neutroni incidenti au bombardat ținta de CaF_2 pe parcursul experimentului, a trebuit sa analizăm datele colectate de camera de fisiune. In urma analizei de date a rezultat o eficacitate de detectie a camerei de fisiune de $e_{FC}=0.855(7)$, sau 85.5(7)%. In final, avand valorile tuturor acestor marimi fizice, am putut determina sectiunile eficace inelastice diferentiale – la 110, 150 și 125 de grade – ca functie de energia incidenta, folosind urmatoarea expresie [2-6]:

$$\frac{d\sigma_j}{d\theta}(\theta_i, E_n) = \frac{1}{4\pi} \cdot \frac{Y_j(E_n) \cdot \varepsilon_{FC} \cdot \sigma_U(E_n) \cdot \rho_U \cdot A_s}{Y_{FC}(E_n) \cdot \varepsilon_j \cdot \rho_s \cdot A_U} \cdot \frac{1}{c_{ms}(E_n)} \quad (1)$$

unde marimile cele mai importante sunt numarul de evenimente colectate de detector (Y_j) si de camera de fisiune (Y_{FC}), eficienta detectorilor, ε_j , si a camerei de fisiune, ε_{FC} , precum si densitatea areala a tinteii, ρ_s . Avand valorile sectiunilor diferentiale date de expresia (1), acestea pot fi inserate in formula de mai jos pentru a le calcula pe cele integrate unghiular:

$$\sigma(E_n) = 2\pi \cdot \left[w_{110^\circ} \cdot \frac{d\sigma}{d\theta}(110^\circ) + w_{150^\circ} \cdot \frac{d\sigma}{d\theta}(150^\circ) \right] \quad (2)$$

Detalii suplimentare despre procedura de integrare unghiulara folosita aici, precum si despre derivarea expresiilor (1) si (2) si a valorilor coeficientilor de integrare unghiulara w_{110} si w_{150} , pot fi gasite in referintele [2-6, 8, 9]. Rezultatele noastre asociate canalului inelastic pentru primele doua cele mai intense tranzitii din ^{40}Ca sunt aratate in Figurile 1 si 2. Datele noastre sunt comparate in aceste figuri cu alte date experimentale raportate anterior in literatura (luate din baza de date EXFOR: R. Bass et al. [10-11]) si cu calcule teoretice efectuate cu codul TALYS 2.0 mentionat mai sus. Aceste sectiuni eficace gama au fost corectate pentru efecte secundare care au loc: efectul de imprastiere multipla a neutronilor in tinta relativ groasa de CaF_2 si efectul de atenuare a fascicolului neutronic în cei aproximativ 1.7 m de aer dintre camera de fisiune (unde fluxul incident este masurat) si tinta noastră. Ambele efecte sunt continute în coeficientul de corectie c_{ms} din expresia (1) de mai sus.

Activitatea 2: Experimentul $^{40}\text{Ca}(p,p'\gamma)^{40}\text{Ca}$ la IFIN-HH

Activitatea 2.1: Pregatirea experimentului și colectarea datelor experimentale

Pentru colectarea datelor experimentale am folosit un ansamblu, montat pe linia 5 a Acceleratorului Tandem de 9 MV al IFIN-HH, format din doi detectori cu germaniu hiper-pur (HPGe), de eficienta relativa ridicata (100%), pozitionati la 110° si 150° fata de directia fascicolului incident de protoni. Alegerea acestui tip de detectori a fost motivata de dorinta de avea atat rezolutie in energie cat si eficienta de detectie gama foarte bune (^{40}Ca emite radiatii gama de energie foarte mare, peste 3.5 MeV). De asemenea, cele doua unghiuri de detectie ne permit sa integram unghiular sectiunile eficace diferentiale folosind metoda Gauss prin cuadraturi [2-6]. Pentru a putea determina sectiuni eficace *absolute*, trebuie sa știm și câți protoni incidenti au trecut prin ținta de ^{40}Ca . Pentru aceasta ne-am folosit de o cupa Faraday care oprește fascicolul de protoni. Curentul de pe cupa a fost colectat cu mare precizie de către un integrator de sarcina electrica. Semnalul integratorului de sarcina, cat si cele ale detectorilor, au fost citite de o achizitie complet digitala de tip FASTER [12]. Acest modul are o frecventa de lucru de 125 MHz si o foarte buna rezolutie pentru determinarea amplitudinii (14 biti). Unul dintre motivele importante pentru alegerea acestui tip de achizitie este dat de faptul ca acest digitizer proceseaza in timp real datele colectate fara a fi nevoie sa transfere semnalele digitizate la PC pentru analiza (i.e., aplicarea algoritmilor digitali de trapezoid & CFD pentru extragerea amplitudinii si a timpului fiecarui puls). Aceasta caracteristica permite conditii de lucru bune chiar si la rate de numarare relativ mari, specifice acestui tip de experimente (spectroscopie gama online în fascicol). Astfel, au fost determinate timpul si amplitudinea fiecarui eveniment detectat si scrise pe PC in fisiere lista de timp & amplitudine. Un factor limitativ al experimentului a fost dat de pierderea de energie a proiectilului în interiorul tinte (acest proces produce o incertitudine importanta asociata energiei incidente). Grosimea tinte a fost aleasa ghidati de calcule de franare a protonilor în materialul ținte folosind codul SRIM [13].

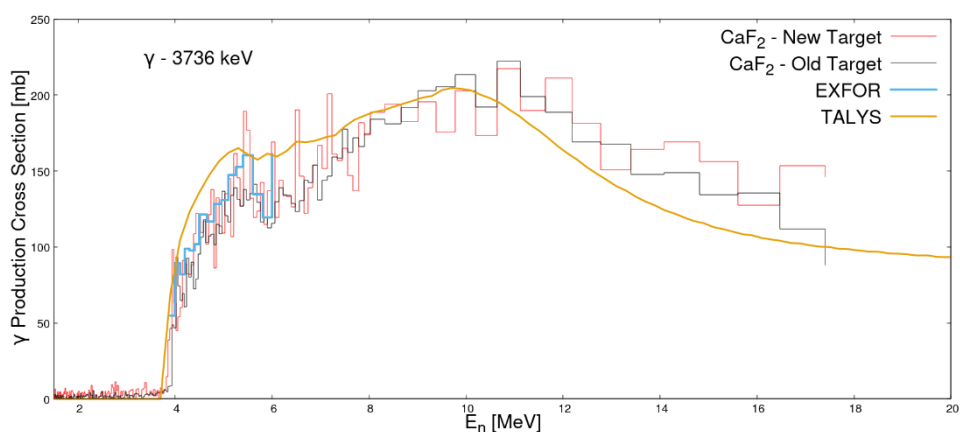


Figura 1: Sectiunea eficace inelastica de producere a primei tranzitii gama din ^{40}Ca obtinuta in cadrul experimentului $^{40}\text{Ca}(n,n'\gamma)^{40}\text{Ca}$. Datele noastre sunt comparate cu alte date experimentale luate din baza de date EXFOR [10,11] si cu calcule teoretice efectuate cu codul de calcul TALYS 2.0. Asa cum a fost mentionat in textul principal, am masurat folosind doua tinte si se poate observa acordul foarte bun dintre cele doua (cu fluctuatii/diferente generate doar de faptul ca prima tinta are o statistica mai buna).

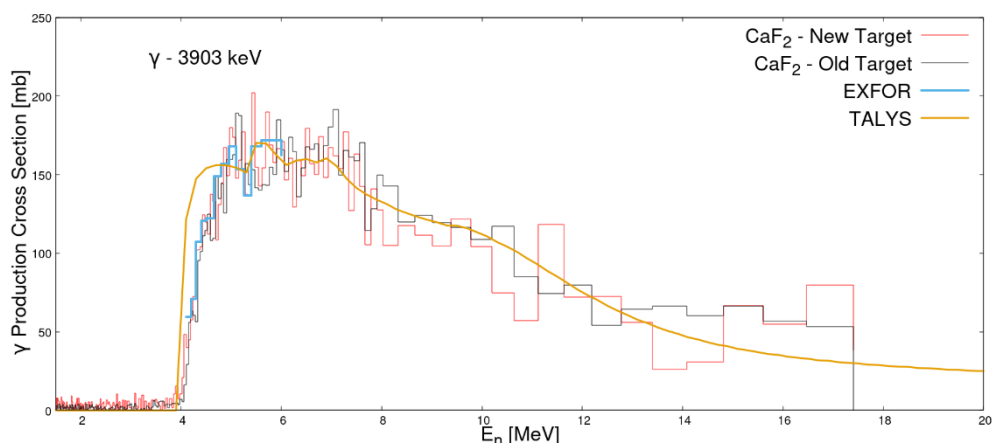


Figura 2: Aceiasi cu figura 1 dar pentru tranzitia de 3903 keV.

În final, am decis sa utilizam doua ținte de fluorura de calciu (CaF_2) de grosimi diferite: una foarte subtire (0.5 mg/cm^2) și una relativ groasa (2.7 mg/cm^2). Trebuie spus insa ca, pana si in cazul tinte groase, pierderea de energie a protonilor de 5 MeV este foarte mica (sub 500 keV). Protonii de energii mai mari pierd și mai puțină energie. Deci, suntem foarte departe de picul Bragg de absorbtie completa. Acest fapt ne permite sa presupunem ca mecanismul prin care protonii pierd energie în ținta este unul liniar și, in consecinta, putem calcula cu usurinta energia incidenta medie si incertitudinea asociata acestuia folosind functia de distributie uniforma [14]. Prima energie incidenta cu care am inceput masuratorile a fost de 5 MeV. Primele masuratori efectuate au fost însă unele fara fascicol pe tinta, si anume ne-am dorit calibrarea în eficienta a detectorilor (detaliata mai sus). Pe parcursul experimentului au fost inregistrate rate de numarare relativ mari (2000-18000 evenimente/s) ceea ce a generat pierderi din cauza timpului mort al detectoriilor. In acest context, informatia temporală foarte

precisa data de FASTER este folosită în cadrul analizei de date pentru determinarea corecțiilor de timp mort al achizitiei iar cea de amplitudine pentru a construi spectrele gama și a extrage numărul de evenimente din fiecare pic gama de interes asociat canalului inelastic (vezi Activitatea 2.2 de mai jos). Procedura detaliată pentru calculul coeficientului de corectie de timp mort poate fi găsită în articolul nostru dedicat acestui subiect [15]. Una dintre cele mai mari dificultăți ale acestui experiment a fost data de faptul că picul gama de simplă scăpare (3927 keV) al primei tranziții din ^{12}C (4438 keV) este (foarte) lărgit Doppler și se suprapune peste picul uneia dintre gamele de interes din ^{40}Ca (3903 keV), vezi Figura 3. Aceasta largire Doppler era de așteptat dat fiind faptul că timpul mediu de viață al primului nivel excitat al ^{12}C este foarte scurt iar acest nucleu este și suficient de ușor ca energia de recul absorbită în urma ciocnirii cu protonii să fie relativ mare. Minimizarea deci a contribuției în spectrul gama asociată canalului de reacție inelastic pe ^{12}C - dar și obținerea unor spectre cu, în general, un fond radiativ cât mai redus - au fost o prioritate pe parcursul experimentului. Pentru a ține cât de cât sub control această problemă, înainte de experiment am modificat parțial camera de reacție înlăturând pe cât posibil orice material care conține carbon. În primul rând discul gros de câțiva mm de carbon al cupei Faraday - disc folosit în experimentele noastre anterioare pentru a stopa fasciculul și a integra numărul de protoni incidenti - dar și colimatorii amplasați înainte de ținta, au fost totuși înlocuiți cu tantal. Cu toate acestea, un mic fond radiativ asociat carbonului a rămas. Acesta a fost, probabil, generat de reacțiile induse de protoni - scosi din fascicol după interacția cu colimatorul și/sau ținta - pe firele de teflon (C_2F_4) cu care colectam curentul de pe ținta și de pe cupa Faraday.

Figura 3 arată un detaliu al spectrului gama, obținut cu unul dintre detectorii de germaniu în cazul măsurătorii cu protoni incidenti având o energie de 10 MeV, cu regiunea din vecinătatea picului gama din ^{12}C și a picului lui de simplă scăpare. Se poate observa, din păcate, cât de mare este această contribuție poluantă în picul gama al tranziției de 3903 keV de interes. Pe parcursul analizei de date a trebuit să corectăm această contribuție poluantă. Cu aceasta în minte, am avut grija să măsoară, la o energie incidentă de 8 MeV, și cu fasciculul trecând prin camera de reacție dar *fără* ținta de CaF_2 . Procedura detaliată pentru aceste corecții este explicată mai jos în cadrul Activității 2.2. Probabilitatea de împrăștiere inelastică a protonilor pe ^{40}Ca are valori rezonabile, în jur de 150 mb, mai ales pentru producerea primei tranziții de 3736 keV. Deci, timpul de măsură necesar per punct de secțiune eficace a fost relativ scurt (10-20 minute), permitând acumularea unei statistici rezonabile (incertitudine sub 5-15%) chiar și cu ținta subțire. Experimentul a decurs în condiții foarte bune, cu fascicol stabil chiar și la energii incidente foarte mari. Am încercat să păstrăm fasciculul la intensități relativ mici (2-5 pA), mai ales la energii incidente peste energia de prag a altor canale non-elastice, pentru a măsoară la rate de numărare cât mai mici. Am măsurat întregul interval de energii incidente de la 5-16.5 MeV: cu pași de 25-30 keV între 5-9 MeV (ținta subțire) și cu pași de 500 keV în întregul interval 5-16.5 MeV (ținta groasă). În total, au fost extrase mai mult de 270 de puncte de secțiune eficace.

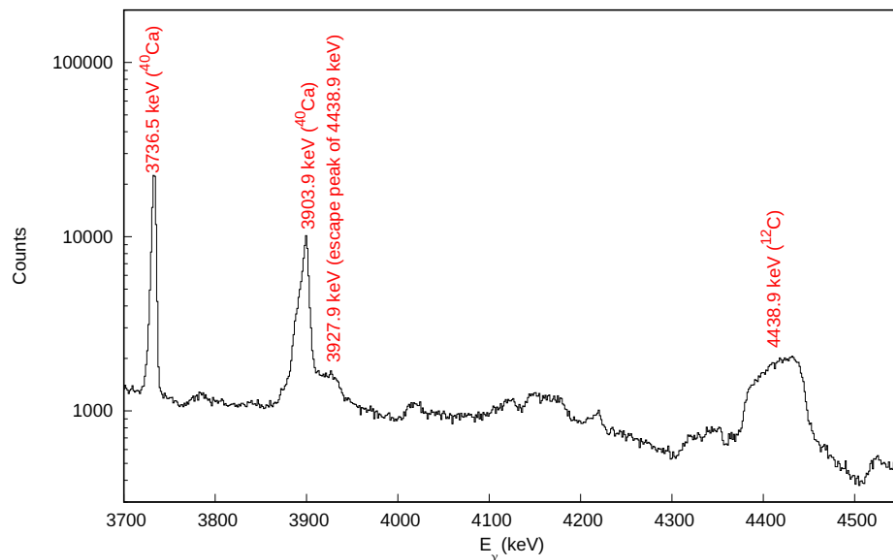


Figura 3: Spectru gama evidentind regiunea celor doua tranzitii de interes din ^{40}Ca dar și tranzitia de 4438 keV din ^{12}C foarte largita Doppler. Se poate observa de asemenea cât de intens este picul gama de simpla scapare de la 3927 keV de sub gama de interes din ^{40}Ca (3903 keV).

Activitatea 2.2: Analiza de date

Aceasta secțiune prezintă analiza de date și rezultatele extrase în experimentul $^{40}\text{Ca}(p,p'g)^{40}\text{Ca}$ efectuat la Acceleratorul Tandem de 9 MV al IFIN-HH folosind doi detectori cu germaniu hiper pur. Fișierele inițiale, cu timpul și amplitudinea fiecărui eveniment, date de achiziția digitală au fost folosite pentru a genera fișiere secundare pentru amplitudine (spectre gama) și pentru rata de numărare. Folosind informația temporală foarte precisă dată de digitizer, am construit de asemenea și curba exponențială specifică intervalului de timp dintre fiecare două evenimente succesive care ne-au intrat în achiziție (bine-cunoscutul TID-Time Interval Distribution). Fișierele de rata de numărare și TID-urile au fost apoi folosite, pentru fiecare run în parte, la determinarea factorului de corecții de timp mort, d [vezi formula (3) de mai jos]. Procedura detaliată asociată acestui tip de corecții pentru experimente de spectroscopie gama în fascicol este descrisă în [15]. O altă mărime crucială ce trebuie extrasă în analiza de date este numărul de protoni incidenti, N_p , folosind curentul colectat de integratorul de sarcină [vezi formula (3) de mai jos]. Spectrele gama au fost mai întâi calibrate în energie și apoi folosite pentru a identifica și integra numărul de evenimente din picul gama asociat tranzițiilor de interes din canalul inelastic al ^{40}Ca . În acest experiment, am reușit să detectăm cu statistica rezonabilă doar primele două cele mai intense tranziții: 3736 și 3903 keV. Așa cum am menționat deja, tranziția de 3903 keV a fost poluată de picul de simpla scăpare al gamei de 4438 keV din ^{12}C . Contribuția este foarte mare, fiind dominantă la multe energii incidente (în special sub 6-7 MeV unde secțiunea eficace inelastică pe ^{40}Ca este încă relativ mică), și a trebuit să imaginăm o procedură de scădere a acestui poluant. Astfel, am efectuat o măsurătoare fără țintă de CaF_2 la 8 MeV pentru a avea și spectre gama în care nu

vedem decât picul de 4438 keV și simpla lui scăpare de la 3927 keV. Din acest run fără ținta am reușit să determinăm, pentru fiecare detector în parte, raportul dintre aria picurilor 4438 și 3927 keV, aflând astfel ce procent este dat de simpla scăpare. Fiind o gama de energie foarte mare, probabilitatea de simpla scăpare rezultată din analiza noastră este una destul de mare: 43% (detectorul 1) și 42% (detectorul 2). În consecință, la fiecare run/energie incidentă, am integrat toată regiunea corespunzătoare picului de 3903 keV (i.e., inclusiv picul de simpla scăpare din ^{12}C) și am considerat apoi ca 43% respectiv 42% din numărul de evenimente extras provine de fapt de la poluantul asociat carbonului. Pentru calibrarea în eficiența a detectorilor ne-am folosit de o sursă de ^{152}Eu cu o activitate în 4p foarte bine cunoscută (incertitudine 1.5% în 1s) și o tehnică descrisă mai sus pentru experimentul de la GELINA. În final, având valorile tuturor acestor mărimi fizice, am putut determina secțiunile eficace diferențiale – la 110 și 150 de grade – ca funcție de energia incidentă pentru tranzițiile de 3736 și 3903 keV din ^{40}Ca folosind următoarea expresie:

$$\frac{d\sigma_j}{d\Omega}(\theta_i, E_p) = \frac{1}{4\pi} \frac{N_\gamma(\theta_i, E_p) A_s}{N_p(E_p) \varepsilon_j(E_\gamma) \rho_s} d, \quad (3)$$

unde mărimile importante sunt numărul de game detectate (N_g) și de protoni colectați de către cupa Faraday (N_p) precum și eficiența detectorilor, ε_j , și densitatea areală a țintei, r_s . În formula se poate observa și factorul de corecție de timp mort, d , menționat mai sus. Având valorile secțiunilor diferențiale date de expresia (3), acestea pot fi inserate în formula (2) de mai sus și putem astfel calcula valori integrate unghiular. Rezultatele noastre pentru primele două cele mai intense tranziții din ^{40}Ca sunt arătate în Figurile 4 și 5 unde le comparăm cu alte date experimentale și cu predicții teoretice. În primul rând trebuie observat că pentru ambele tranziții acordul dintre rezultatele noastre extrase cu ținta subțire versus groasă este excelent: punctele negre mediază sistematic rezonanțele de nucleu compus puse în evidență de către datele extrase cu ținta subțire (cu roșu). De asemenea, poziția rezonanțelor raportate de Mittag et al. pare a fi, în mare, confirmată de experimentul nostru (chiar dacă valorile absolute ale punctelor de secțiune arătate în verde sunt mai mari; aceasta se datorează, pe lângă neglijarea anizotropiei menționată la Figura 4, de faptul că Mittag et al. au folosit pași în energia incidentă mai mici cuplați cu o ținta mai subțire ca cea folosită în prezentul proiect). Este interesant că predicția teoretică (folosind parametrii standard de potențial optic al protoniilor pe nucleul țintă ^{40}Ca) este destul de departe de experiment pentru cea de a doua tranziție.

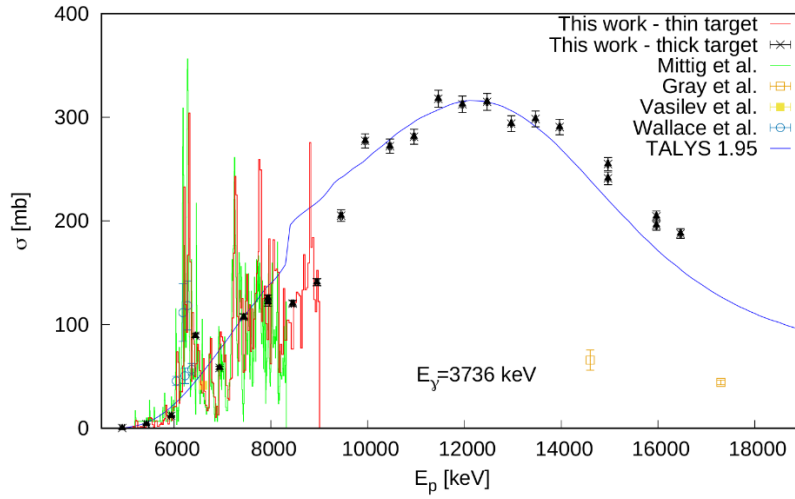


Figura 4: Datele pentru secțiunea de producere a primei tranziții gama (3736 keV) din ^{40}Ca obținută în cadrul experimentului $^{40}\text{Ca}(p,p'g)^{40}\text{Ca}$. Datele noastre sunt comparate cu alte date experimentale disponibile în baza EXFOR [16] și cu calcule teoretice efectuate cu codul de calcul TALYS 2.0. Menționăm că nu există alte date integrate unghiular pentru această tranziție. Deci, valorile din literatura arătate aici sunt secțiuni eficace diferențiale (măsurate la 125° și 90°) pe care pur și simplu le-am înmulțit cu un factor 4π pentru a le integra unghiular. Totuși, considerăm instructivă această comparație pentru că cel puțin dependența în energia incidentă (i.e., poziția rezonanțelor de nucleu compus clar vizibile în datele noastre versus cele raportate de Mittig et al.) nu depinde de această aproximație.

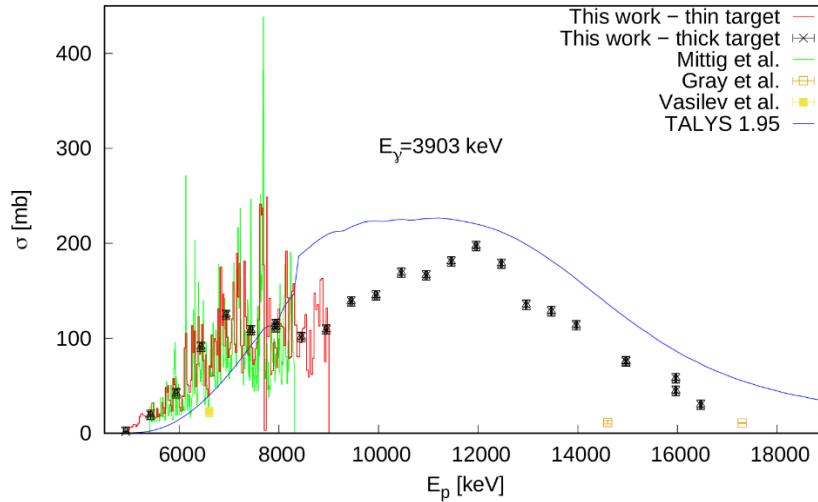


Figura 5: Datele preliminare pentru secțiunea de producere a celei de-a doua tranziții gama (3903 keV) din ^{40}Ca obținută în cadrul experimentului $^{40}\text{Ca}(p,p'g)^{40}\text{Ca}$. Datele noastre sunt comparate cu alte date experimentale disponibile în baza EXFOR [16] și cu calcule teoretice efectuate cu codul de calcul TALYS 1.95. Menționăm că aceleași observații ca cele de la figura 4 se aplică și aici.

Activitatea 3: Studiul teoretic care isi propune sa gaseasca o legatura intre canalele de reactie (n,n') si (p,p')

Activitatea 3.1: Comparatii intre sectiunile eficace asociate reactiilor $^{40}\text{Ca}(n,n')^{40}\text{Ca}$ si $^{40}\text{Ca}(p,p')^{40}\text{Ca}$

Aceasta sectiune prezinta modelarea datelor și interpretarea rezultatelor obtinute în urma celor doua experimente descrise mai sus. Scopul mai larg, și mai exploratoriu, al acestui proiect de cercetare consta în studiul comparativ al celor doua reactii nucleare în încercarea de a le corela (i.e., deducerea sectiunilor eficace inelastice neutronice din cele protonice, ultimele fiind mai ușor de masurat din mai multe motive). În prima faza am încercat sa modelam ceea ce am masurat folosindu-ne de codul de reactii nucleare TALYS 2.0 [1], care are implementata o modelistica de ultima generatie si, pentru inceput, am folosit ingrediente de reacție *standard* (default) pentru a vedea cât de bine reușim sa descriem valorile experimentale fără modificari ale modelisticii asociata acestei regiuni de masa. Figurile 1, 2, 4 si 5 arata rezultatele acestor prime calcule pentru tranzitiile de 3736 și 3903 keV din ^{40}Ca . Distributia unghiulara a particulelor emise după reacție (de exemplu, neutronii emisi din nucleul compus ^{41}Ca după reacția inelastica populand diverse stari excitate din nucleul rezidual ^{40}Ca) este destul greu de modelat corect deoarece aceasta este determinata (în primul rând) de mecanismul de reacție: emisie cuasi-izotropa pentru mecanismul de nucleu compus, emisie predominant la unghiuri în fata pentru reactii directe, etc. De asemenea, aceasta distributie unghiulara depinde, dintr-o multitudine de motive, și de particula emisa din nucleul compus (de exemplu, proton versus neutron) și acest gen de diferente în modelare trebuie înțelese și luate în calcul în tentativa noastră de a găsi o legătura între canalele inelastice neutronic și protonic. Observam ca modelistica da rezultate mai bune pentru cazul neutronilor fata de cel al protonilor, poate exceptand cazul primei tranzitii de 3736 keV unde și în cazul protoniilor acordul experiment-teorie este destul de bun (vezi figurile mentionate). Curba teoretica supraestimeaza regiunea din apropierea energiei de prag pentru aceea tranzitie (primii câțiva MeV imediat ce tranzitia se deschide). În cazul nucleului ținta ^{58}Ni (ultimul caz fizic studiat de grupul nostru cu rezultate publicate în [17]) în special descrierea acestei ultime regiuni asociata datelor induse de neutroni a fost îmbunătățită de către predictia teoretica obtinuta plecând de la datele protonice. Interesant, același lucru nu este valabil și pentru ^{40}Ca decât pentru tranzitia de 3903 keV (vezi mai jos). Din figurile mentionate se poate vedea foarte clar impactul existenței barierei coulombiene în cazul protonilor (de acest aspect este ținut cont prin adaugarea unui termen coulombian în potențialul optic proton- ^{40}Ca): deși la energii incidente mari (peste 12 MeV unde efectele electromagnetice din canalul de intrare devin foarte mici) cele doua sectiuni eficace devin chiar proportionale, la energii mici ale protonilor incidenti aceștia „simt” bariera și, deci, probabilitatea ca proiectilul să fie absorbit și un nucleu compus să fie format este diminuata în raport cu cazul neutronic. Acest efect, deci, reduce probabilitatea ca reacția inelastica, care ne genereaza gama respectiva, sa aibă loc. În opozitie cu acest comportament, pentru ca neutronii nu au termeni coulombieni în potențialul optic, imediat ce energia incienta atinge energia de prag pentru ca nivelul de pe care provine gama de interes sa poată fi excitat, sectiunea ei eficace urca foarte abrupt în primii câțiva MeV. Aceste efecte electromagnetice (atât în canalul de intrare cât și la emisia

protonului din nucleul compus) trebuie înțelese, și modelate, foarte bine deoarece acestea sunt principala cauza care generează diferențele observate experimental dintre secțiunile eficace inelastice neutronice și protonice. Alte cauze pentru diferențele observate au legătura cu structura nucleară (cele două reacții trec prin nuclee compuse diferite: ^{41}Ca versus ^{41}Sc) și cu, foarte mica, asimetrie de izospin dintre neutron și proton (ne referim aici la mici diferențe non-electromagnetice dintre cei doi nucleoni). Acest gen de probleme sunt minimizate în abordarea noastră prin alegerea unui nucleu țintă $N=Z$ (pentru a avea nuclee compuse care sunt nuclee oglinda date fiind bine-cunoscutele similitudini structurale dintre aceste nuclee) și prin folosirea de potențiale optice dependente de izospin (asa-numitele potențiale Lane [18, 19]) construite explicit ca să țină cont de asimetria de izospin proton-neutron și de impactul acesteia asupra observabilelor extrase din asemenea reacții nucleare.

Pentru început, ca să înțelegem mai bine impactul foarte mare al efectelor electromagnetice asupra secțiunilor eficace inelastice măsurate de noi, comparăm în Figurile 6, 7 și 8 calcule efectuate cu trei proiectile diferite: un neutron și un proton „uzuali” și un proton din al cărui potențial optic *am înlocuit termenul coulombian*. Pentru ca acest ultim proiectil nu „simte” nici o barieră coulombiană, ar trebuie să aibă, cel puțin la nivelul calculului de potențial optic (i.e., prima etapă din modelarea acestei reacții), un comportament foarte similar cu cel al neutronului. În urma calculului de model optic sunt determinate mărimi foarte importante, necesare în următoarele etape ale calculului, asociate reacției modelate precum: secțiunea eficace de împrăștiere elastică pe sfera rigidă (fluxul incident reflectat) și secțiunea eficace de reacție (fluxul absorbit) și, prin însumarea celor două, și secțiunea eficace totală. Aceste 3 mărimi sunt, de obicei, mult mai bine descrise de către teoria de reacții față de observabile specifice de structura nucleară din cauza, în esență, a două mari motive: i) în primul rând, pentru că modelul optic este un model foarte fenomenologic (i.e., sute de parametri care pot fi modificați pentru a îmbunătăți acordul teorie-experiment în acea regiune de masă), puterea descriptivă a acestuia este destul de bună, ii) al doilea motiv este mai subtil, dar mai relevant pentru obiectivul acestui proiect de cercetare, și anume, potențialul optic este în mod intenționat construit să fie relativ *insensibil la detalii de structura nucleară*. De impactul structurii nucleare asupra observabilelor de reacție este desigur ținut cont, dar nu în primul rând la nivelul calculului de model optic ci ulterior (un exemplu tipic fiind modelarea formării și dezintegrării nucleului compus via formalismul Hauser-Feshbach [1]). Abordarea noastră este sensibilă *în primul rând la diferențe structurale dintre cele două nuclee compuse* formate în reacția neutronică versus protonică. Deci, ne așteptăm ca la nivel de model optic cele două reacții să aibă observabile foarte similare dar apoi, pe măsura ce calculul de reacție progresa și structura nucleară devină tot mai relevantă, să observăm tot mai multe diferențe între secțiunile eficace generate de cele două proiectile (în particular și pentru canalul inelastic). Aceasta interpretare este confirmată de calculele arătate în Figurile 6, 7 și 8. De exemplu, fluxul absorbit (reaction cross section) este folosit la formarea unui nucleu compus și este caracterizat de mărimi fizice ca observabilele populate în nucleul compus (Figura 7) precum și coeficienții de transmisie (Figura 6). Aceste mărimi sunt folosite în etapele ulterioare ale calculului: formarea și mai ales modelarea dezintegrării nucleului compus (via modele statistice ca cel Hauser-Feshbach) sau, mai ales la energii incidente/de

excitație mari unde și alte canale de reacție sunt deschise, emisia multiplă de particule via reacții de pre-echilibru și/sau directe.

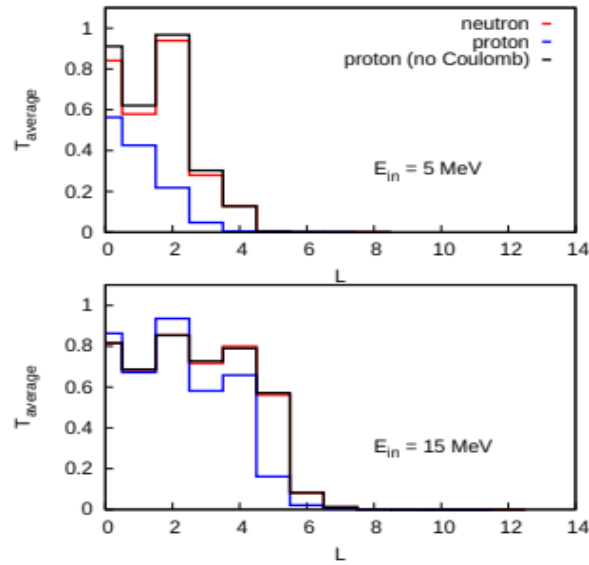


Figura 6: Coeficientii de transmisie medii $T_{average}$ în nucleul compus ca funcție de momentul cinetic L (definit de impulsul proiectilului) asociați fluxului incident pe ^{40}Ca dat de trei proiectile: un neutron și un proton „uzuali” și un proton fără termen coulombian (vezi text pentru detalii). Calculele sunt făcute la doua energii reprezentative pentru canalul inelastic: 5 și 15 MeV.

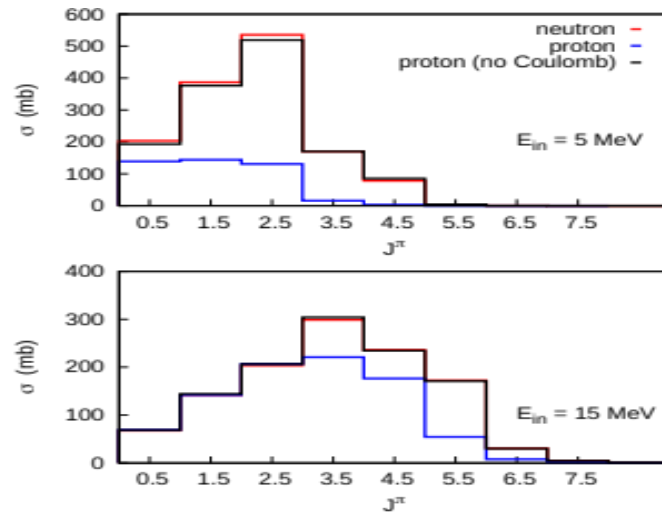


Figura 7: Momentul cinetic total populat în nucleul compus (dat în mb) de către trei proiectile incidente pe ^{40}Ca : un neutron și un proton „uzuali” și un proton fără termen coulombian (vezi text pentru detalii). Calculele sunt făcute la doua energii reprezentative pentru canalul inelastic: 5 și 15 MeV.

Mentionam si ca, deoarece ^{40}Ca are o serie de stari excitate destul de colective (în special vibrationale) și deci relativ deformate, pentru determinarea contribuției mecanismului direct, pe lângă un calcul uzual de tip DWBA (Distorted Wave Born Approximation) ce este realist a fi folosit doar pentru nucleele cu un nivel fundamental sferic, am efectuat și un calcul de canale cuplate cu parametrii de deformare si coeficienti de cuplaj importanti (nenuli) doar pentru nivelurile 2 (3736 keV), 3 (3904 keV) și 4 (4491 keV) din ^{40}Ca . Mentionam de asemenea și ca, în primii câțiva MeV, exista și o contribuție la secțiunea eficace *elastica* provenita, nu de la împrăștierea pe sfere rigide (care e data direct de potențialul optic așa cum explicam mai sus), ci de la mecanismul de nucleu compus (aceasta contribuție este aratăta și ea în Figura 8). Pentru ca trece prin formarea unui nucleu compus, aceasta contribuție este puternic dependentă de efecte de structura nucleară din ^{41}Ca versus ^{41}Sc ceea ce o face relevanta pentru discuția din prezentul proiect. Toate procesele mentionate mai sus duc la disiparea energiei de excitatie a nucleului compus și în final, după eventuala emisie de particule, populeaza diverse stari excitate din nucleul rezidual (^{40}Ca dacă a avut loc a reacție inelastica). Desigur, apoi și modelarea dezintegrării rezidualului, de exemplu via emisie gama, trebuie tratata și ea astfel ca la sfarsit să poată fi calculate probabilitățile de producere a acestor game (mărimi care, în sfarsit, pot fi comparate direct cu ceea ce noi masuram experimental). Este interesant ca, dacă înlaturam efectele coulombiene suferite de protonul „uzual” din canalul de intrare, acesta sfârșește prin a popula practic coeficienti de transmisie și momente cinetice (și paritati) identice cu cele ale neutronului (vezi Figurile 6 și 7). Aceasta observație este valabilă, deși într-o mai mica măsură, și pentru cazul protonului „uzual” (în special la energii incidente mari). Aceasta concluzie este sustinuta și de faptul ca secțiunea eficace de reacție precum și partea de reacții directe, și ele destul de insensibile la structura nucleară și direct dependente de modelul optic, sunt foarte similare în cazul neutronic versus protonic (vezi Figura 8). Toate acestea indica faptul ca cele doua proiectile pleacă, practic, de la observabile extrem de similare populate în nucleul compus. Însă, pentru ca aceste observabile sunt populate în nuclee compuse (și deci pe stari excitate) diferite – din ^{41}Ca versus ^{41}Sc – dinamica de reacție începe din acest punct să fie destul de diferita în cele doua cazuri (vezi Figura 8) ceea ce induce, în final, și probabilitati diferite de producere a gamelor de interes. Aceste diferente, ca de exemplu cele dintre contributiile mecanismului de pre-echilibru (vezi Figura 8), trebuie clarificate pentru a putea imbunatatii precizia cu care deducem secțiuni eficace neutronice din cele protonice. În propunerea de proiect (și în ultimele doua articolele ale directorului de proiect dedicate nucleelor ținta ^{16}O , ^{28}Si [20] și ^{58}Ni [17]) sunt detaliate etapele definitorii, atât experimentale cât și teoretice, ale abordării noastre menite sa găsească o legătura între canalele inelastice protonic și neutronic. Nu le vom repeta aici ci vom trece direct la rezultate. Figura 9 arata progresul făcut pana acum cu aceasta abordare pentru ^{40}Ca . În aceasta figura importante sunt curbele teoretice verzi și negre. Primele, pentru fiecare tranzitie gama în parte, au fost obtinute încercând sa imbunatatim predictia teoretica standard (default) data de modelistica actuala (curbele albastre). După cum se poate observa din Figura 9, am reușit într-o buna măsură sa descriem destul de bine punctele de secțiune protonice masurate de noi la energii incidente mari, peste 10-12 MeV, însă regiunea energiei de prag a tranzitiei încă necesita perfectionari importante. Chiar și așa, observam ca acolo unde modelistica protonica descrie bine experimentul, și curba teoretica (în negru în Figura 9) asociata neutronilor - *dedusa din ceea ce am învățat la protoni* - descrie și

ea destul de bine valorile experimentale induse de neutroni masurate de noi la GELINA (defapt, peste 10 MeV, le descrie la fel sau mai bine decât modelistica standard data de curba roșie din Figura 9, mai ales în cazul tranziției de 3736 keV). Aceasta este o frumoasă manifestare a simetriei de izospin atât în cadrul modelisticii în sine cât mai ales în lumea reală a celor două experimente (pentru că acordul foarte bun între curba neagră și experimentul neutronic de la GELINA peste 10 MeV are loc numai după ce reușim să descriem mai bine datele experimentale protonice: adică când trecem de la curba albastră, cea standard, la cea verde). Este onest și important de notat că nu ne este clar ce se întâmplă la energii incidente mici pentru prima tranziție, este posibil că niște efecte provenite de la contribuția de nucleu compus elastică din acea regiune să se manifeste în acest caz (vezi Figura 8 și 9). Mai mult, în Figura 8 se observă diferențe mari între contribuțiile mecanismelor de pre-echilibru și nucleu compus chiar și pentru protonul fără barieră coulombiană în comparație cu cazul neutronic (ceea ce indică efecte structurale mai degrabă decât electromagnetice). Același comportament a fost observat și pentru ^{58}Ni [17]. Nici motivele pentru acest comportament nu ne sunt clare. Interesant este faptul că, pentru ^{58}Ni , exact regiunea primilor câțiva MeV după ce tranziția se deschidea era descrisă foarte bine de curba neagră [17] ceea ce nu este cazul pentru ^{40}Ca . În articolul dedicat rezultatelor acestui proiect [21] vom încerca lamurirea, macar parțială, a acestor întrebări deschise.

În final, ținem să evidențiem avantajul cel mai mare al abordării noastre: curba neagră din Figura 9 (capabilă să ne genereze date neutronice pentru canalul inelastic cu precizie foarte bună, cel puțin, peste 8 MeV) a fost obținută în mod *complet independent* de datele experimentale neutronice (acestea sunt arătate numai cu scopul validării procedurii noastre): singurele date experimentale de care avem nevoie pentru a ghida teoria sunt cele induse de protoni. Dacă aplicăm, deci, abordarea noastră la nuclee țintă pentru care, din diverse motive, nu există date experimentale inelastice neutronice, aceasta ne-ar permite extragerea acestor mărimi fizice fără necesitatea efectuării unui experiment cu fascicol de neutroni. Până atunci însă, tehnica noastră de calcul are nenumărate neajunsuri și o serie de lucruri nu ne sunt clare (discutate pe larg și în [17], [20]) dar care trebuie lămurite dacă vrem să sperăm la o procedură generală - valabilă pe o regiune extinsă de masă - menită să deducă secțiuni eficace inelastice neutronice din cele induse de protoni. Toate acestea plus idei de îmbunătățire a rezultatelor arătate în Figura 9 vor fi discutate mai detaliat (și mai riguros) în articolul nostru aflat în pregătire [21].

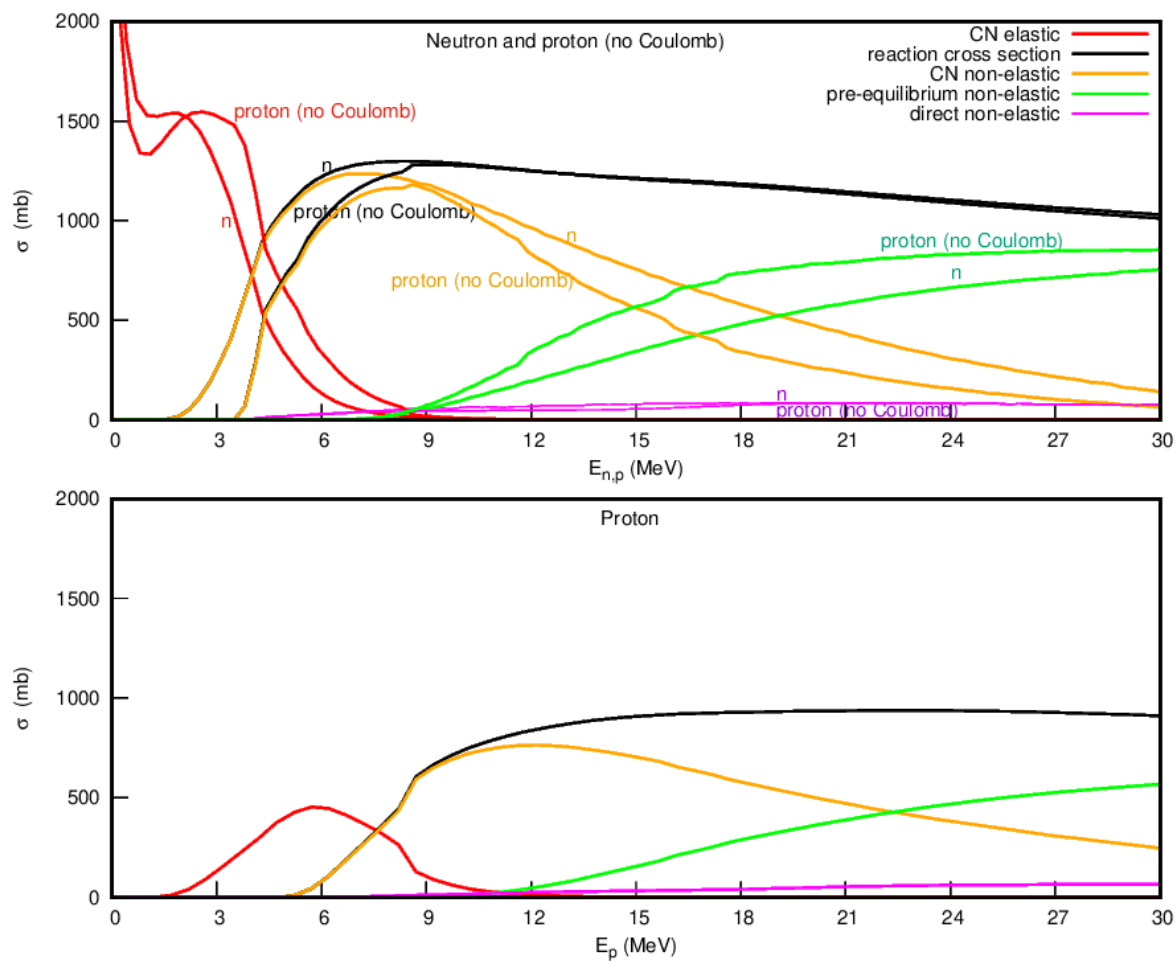


Figura 8: Contributia principalelor mecanisme de reacție, plus cea de elastic prin nucleu compus, pentru întregul interval de energii incidente relevant pentru canalul inelastic pe ^{40}Ca . Figura arata și principalele mărimi extrase din calculul initial de model optic (de exemplu, secțiunea eficace de reacție). Calculele sunt asociate celor trei proiectile discutate în textul principal: un proton (p) și neutron (n) „uzuali” și un proton al carui termen coulombian a fost șters din potențialul optic proton- ^{40}Ca [proton (no Coulomb)]. Partea de sus a figurii păstrează același cod de culori per mecanism de reacție pentru a indica asemanarile dintre neutron și protonul fără bariera coulombiana. De exemplu, dacă inlaturam termenul coulombian, partea de elastic prin nucleul compus, partea directa și secțiunea eficace de reacție (toate canalele non-elastice adunate) devin foarte similare (a se compara cu cazul protonului „uzual” arătat în partea de jos a figurii).

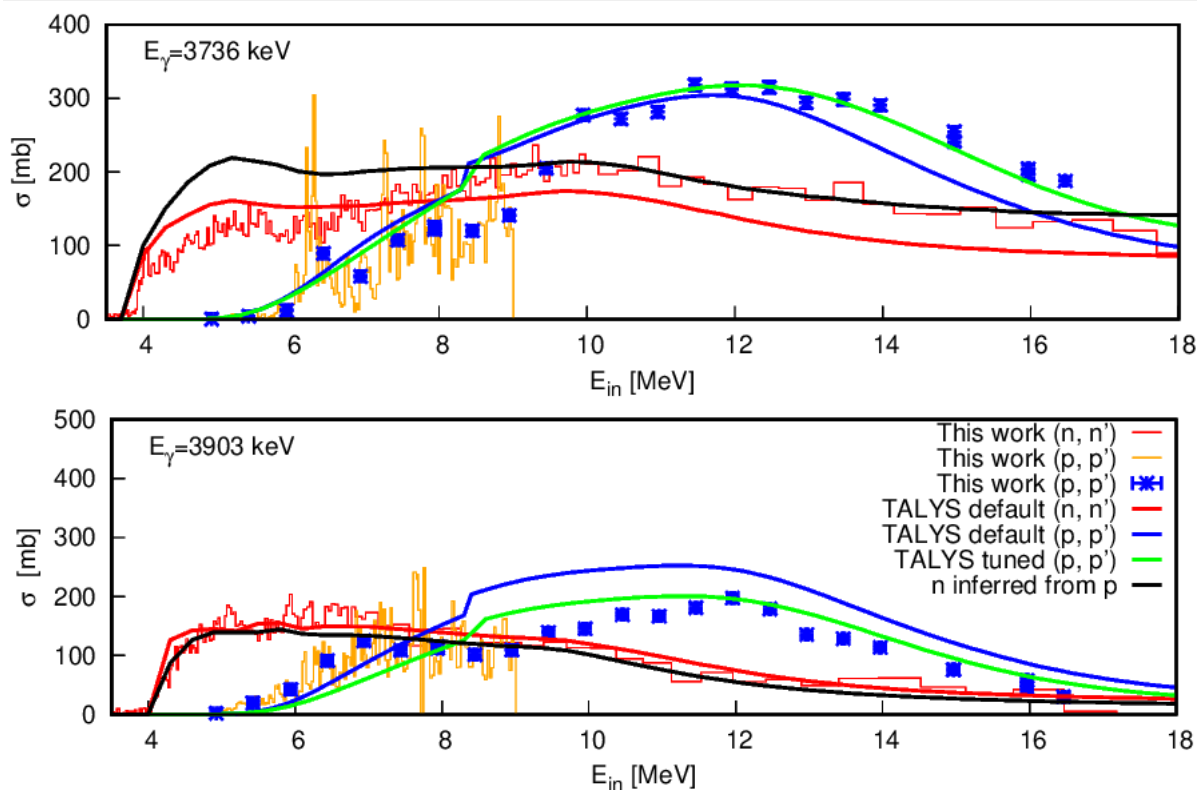


Figura 9: Rezultatele abordării noastre care deduce secțiuni eficace inelastice neutronice (curba neagră) din cele protonice (curba verde) pentru nucleul ținta ^{40}Ca . Curba verde este un calcul ghidat/constrans de datele experimentale masurate de noi pentru canalul inelastic protonic (aratate în figura cu puncte albastre – ținta groasa – și histogramat în portocaliu – ținta subțire). Curba roșie reprezintă modelistica de reacție cea mai buna la ora actuala și implementata în coduri ca TALYS 2.0 [1], modelistica menita sa descrie canalul inelastic neutronic (masurat de noi la GELINA și arătat histogramat tot în roșu) pe acest nucleu tinta.

Activitatea 3.2: Diseminarea rezultatelor obtinute

Aceasta secțiune prezinta pe scurt activitățile de diseminare a rezultatelor obtinute în prezentul proiect de cercetare, descriind atât diseminarea deja efectuată pe parcursul proiectului cât și activități viitoare. Grupul nostru participa de obicei la o singura conferința internațională: „Nuclear Data for Science and Technology”. Aceasta este cea mai mare conferința din domeniul de activitate al prezentului proiect (date nucleare) având loc doar odată la 3 ani. La editia din anul 2022 (ND2022), care a avut loc între 24-29 iulie în Sacramento, SUA, directorul de proiect a prezentat rezultate pentru care a fost susținut financiar și de prezentul proiect de cercetare. Aceste rezultate sunt descrise în articolul de tip „conference proceedings” asociat prezentării orale de 15 minute oferita la conferința mentionata mai sus [22]. Pe lângă aceasta conferința, unde participa întreaga comunitate de

specialisti în date nucleare, grupul nostru participa regulat și la un workshop internațional intitulat „Workshop on Elastic and Inelastic Neutron Scattering” (WINS). Acest workshop este mult mai restrâns și este foarte tehnic la el participând numai specialiști, experimențiști și teoreticieni, în date nucleare induse de neutroni în mare parte din Europa și SUA. Scopul este diseminarea rezultatelor noastre dar mai ales discutarea problemelor deschise comune și imaginarea de eforturi coordonate pentru a le depăși, în cadrul reacțiilor nucleare induse de neutroni. În acest context, directorul de proiect împreună cu mentorul au participat la editia din anul 2023 a acestui workshop (WINS2023) care a avut loc la Rensselaer Polytechnic Institute (RPI) între 10-12 octombrie 2023 în orașul Troy, SUA [23]. Directorul de proiect a susținut o prezentare orală de 40 de minute în care a discutat, printre altele, și rezultatele obținute în acest proiect de cercetare pentru nucleul țintă ^{40}Ca (în special dificultățile legate de compararea canalelor inelastice neutronice și protonice pe acest nucleu țintă, cum descriem mai sus, dar și valorile experimentale obținute). Menționăm și că măsurătoarea $^{40}\text{Ca}(p,p'\text{g})^{40}\text{Ca}$ a fost făcută alături de colaboratorii noștri francezi de la IPHC Strasbourg și cei de la GELINA (colaborarea IFIN-HH - IPHC Strasbourg - EC-JRC-GELINA este menționată în propunerea de proiect). Pentru participarea la acest experiment în România, aceștia au fost susținuți financiar de proiectul european ARIEL [24]. ARIEL este un proiect care oferă acces trans-național cercetătorilor europeni care doresc participarea la experimente efectuate la diverse facilități europene relevante pentru domeniul datelor nucleare. La finalizarea acestui proiect (în februarie 2024) a avut loc workshopul ARIEL, unde au fost prezentate/diseminate comunității europene participante la acest proiect și rezultatele experimentului nostru $^{40}\text{Ca}(p,p'\text{g})^{40}\text{Ca}$ efectuat la acceleratorul de 9 MV al IFIN-HH, Magurele, România. Ca **activități viitoare de diseminare** menționăm articolul dedicat proiectului, articol aflat în pregătire [21], și apoi prezentarea rezultatelor acestuia la următoarea ediție a „Nuclear Data for Science and Technology” (ND2025) ce va avea loc la Madrid, Spania în anul 2025. Partea experimentală a acestui articol este deja finalizată (ea descrie rezultatele celor două experimente discutate deja mai sus) urmând ca în următoarele 2 luni să finalizăm și discuția teoretică asociată interpretării acestor rezultate experimentale (discuție teoretică deja începută și ale cărei rezultate sunt descrise mai sus, în Activitatea 3.1, dar care, credem că, poate fi îmbunătățită). După publicarea articolului, de obicei grupul nostru împărtășește comunității rezultatele experimentale extrase prin trimiterea lor la baza de date nucleare EXFOR [16]. În acest mod, orice alt specialist interesat poate avea acces la ele. Menționăm, deci, că vom proceda la fel și cu valorile experimentale asociate canalului inelastic indus de neutroni și protoni pe ^{40}Ca măsurate pe parcursul prezentului proiect de cercetare.

REZUMAT EXECUTIV AL PROIECTULUI

Pe parcursul anului 2022 a fost pregătit și realizat experimentul care studiaza canalul inelastic indus de neutroni pe nucleul tinta ^{40}Ca la sursa de neutroni GELINA a EC-JRC. De asemenea, au fost analizate și datele colectate în acest experiment reușind să determinăm mărimea fizică de interes: secțiunea eficace de producere a principalelor tranziții gama din ^{40}Ca în urma împrăstierii inelastice a neutronilor. Mai exact, după o scurtă perioadă de pregătire a experimentului (obținerea tinte de CaF_2 , optimizarea detectorilor și a electronicii de achiziție, etc.) am început colectarea datelor. Experimentul a durat aproximativ 6 luni de zile desfășurându-se în condiții relativ stabile. Odată finalizat, am trecut la analiza acestor date experimentale folosind coduri de analiză dedicate și o procedură de calcul descrisă pe larg în propunerea de proiect. O etapă importantă a analizei de date a fost data de multiplele corectii asociate secțiunilor eficace extrase inițial: corectii pentru eficacitatea detectorilor și a camerei de fisiune, pentru atenuarea radiației game în interiorul tinte relativ groasă, etc. În final, după toate aceste corectii, am reușit să extragem secțiunea eficace (funcția de excitație) inelastică de producere a celor mai intense tranziții din ^{40}Ca : 3736 și 3903 keV. În concluzie, toate livrabilele menționate în planul de lucru pe anul 2022 au fost realizate. Pe parcursul anului 2023 am pregătit și realizat măsuratoarea $^{40}\text{Ca}(p,p'\gamma)^{40}\text{Ca}$ la Acceleratorul Tandem de 9 MV al IFIN-HH. Ulterior colectării datelor experimentale, a fost efectuată și analiza acestora extragând funcții de excitație inelastice induse de protoni. Pregătirea propriu-zisă a experimentului s-a făcut cu câteva zile înaintea măsurătorii prin montarea detectorilor și a electronicii de achiziție pe linia 5 a acceleratorului, prin producerea tintelor de CaF_2 în laboratorul de ținte al IFIN-HH, prin testarea și optimizarea semnalelor electronice citite de la detectori, etc. Experimentul în sine a durat mai puțin de 10 zile, incluzând și măsurătoriile necesare calibrării în eficiența a detectorilor. Odată finalizat, am început sortarea preliminară a datelor colectate și analiza acestora folosind software specific dezvoltat de grupul nostru. O etapă dificilă a analizei de date a fost imaginarea unei proceduri de scădere a poluantului, provenit din ^{12}C , asociat celei de-a doua tranziții de 3903 keV din ^{40}Ca . Pașii de analiză sunt detaliați mai sus în Activitatea 2.2. În final, am reușit să măsurăm secțiunea eficace inelastică protonică de producere a primelor două game din ^{40}Ca : 3736 și 3903 keV. Concluzionând, considerăm că toate obiectivele proiectului asociate anului 2023 au fost realizate. În ultima etapă a proiectului, ianuarie-martie 2024, ne-am ocupat de modelarea teoretică și interpretarea datelor experimentale extrase în cele două măsurători precum și de diseminarea (parțială) a rezultatelor extrase. Aceasta discuție, pe lângă modelarea rezultatelor experimentale primare, este făcută în contextul studiului exploratoriu menit să găsească o legătură între canalele inelastice neutronice și protonice: o asemenea legătură ne-ar permite să deducem, ideal cu incertitudini cât mai mici și pe un interval de energii incidente cât mai extins, funcții de excitație neutronice pentru ^{40}Ca din cele protonice. În ce măsură este aceasta posibil pentru acest nucleu țintă precum și neajunsurile calculului nostru teoretic, la înțelegerea noastră actuală a acestei problematice, este discutat pe larg mai sus în cadrul Activității 3.1. Principalul rezultat este sintetizat în Figura 9: cel puțin peste 8 MeV energie incidentă, și chiar în întregul interval relevant canalului inelastic pentru tranziția de 3903 keV, am reușit să deducem secțiuni eficace inelastice neutronice din cele protonice cu o bună precizie. Totuși, o

serie de intrebari deschise inca raman si planuim sa incercam sa le clarificam cu noi masuratori, de exemplu $^{12}\text{C}(n,n'g)^{12}\text{C}$ versus $^{12}\text{C}(p,p'g)^{12}\text{C}$.

INDICATORI DE REZULTAT AI PROIECTULUI

În final, ca **indicatori de rezultat** ai proiectului, am obținut, cu incertitudini si rezolutie in energia incidenta foarte bune, functiile de excitatie inelastice induse de protoni si neutroni pentru doua tranzitii, cele mai intense, din nucleul ținta studiat: 3736 și 3903 keV din ^{40}Ca . Alt **indicator de rezultat** sunt rezultatele aratate mai sus în Figura 9: pentru ambele tranzitii din ^{40}Ca (care preiau cea mai mare parte din taria canalului inelastic), cel puțin peste 8 MeV dar chiar pentru intregul interval relevant pentru canalul inelastic pentru tranzitia de 3903 keV, putem deduce sectiunea inelastica neutronica din cea protonica cu o buna precizie. Pe partea de diseminare, un alt **indicator de rezultat** este faptul ca (parte din) rezultatele noastre au fost diseminate printr-o prezentare orala la WINS2023 (Workshop on elastic and Inelastic Neutron Scattering) ce a avut loc între 10-12 octombrie 2023 la Rensselaer Polytechnic Institute (RPI) în orașul Troy, SUA. Tot în contextul diseminarii, mentionam ca pe parcursul proiectului grupul nostru a participat la cea mai importanta conferința internațională din domeniul datelor nucleare: 15th International Conference on Nuclear Data for Science and Technology (ND2022) organizata de Lawrence-Livermore National Laboratory (LLNL) între 24-29 iulie 2022 în Sacramento, SUA. Cu toate acestea, este onest sa consideram ca diseminarea rezultatelor proiectului nu va fi complet îndeplinită decat *după publicarea articolului* dedicat acestuia [21] și prezentarea acestor rezultate la conferinta ND2025 ce va avea loc la Madrid, Spania în anul 2025. De asemenea, o alta etapa importanta de diseminare, ce va fi făcută imediat ce articolul este publicat, este trimiterea rezultatelor noastre experimentale pentru canalul inelastic pe ^{40}Ca la baza de date EXFOR astfel încât întreaga comunitate sa le poată folosi.

OBIECTIVE / LIVRABILE PROPUSE versus REALIZATE

Conform propunerii de proiect initiale, acest proiect și-a propus, în esenta, doua obiective importante, impartite in textul de mai sus intr-o serie de livrabile: I) pe partea experimentală, sa caracterizeze canalul inelastic neutronic și protonic pe ^{40}Ca via spectroscopie gama (în contextul datelor nucleare), II) pe partea teoretică, sa găsească o legătura între cele doua canale inelastice și apoi, exploatand aceasta legătura, sa discute în ce măsura sectiunile eficace neutronice pe ^{40}Ca pot fi deduse din cele protonice folosind o combinatie între un experiment cu fascicol de protoni și calcule teoretice. Activitatiile pe anii 2022 și 2023 descrise mai sus au prezentat rezultatele pentru partea experimentală a proiectului: am reușit sa masuram canalului inelastic atât indus de neutroni (la sursa de neutroni GELINA) cât și cel indus de protoni (la acceleratorul de 9 MV al IFIN-HH). Activitatiile 3.1 si 3.2 descrise mai sus vin în completarea primei parti a proiectului: utilizand aceste informații experimentale, și folosind o componenta teoretica importanta, reusim sa deducem sectiuni eficace neutronice din cele protonice (vezi Figura 9 de mai sus). Tehnica noastră de calcul menita sa deduca date nucleare neutronice funcționează decent pentru energii incidente peste 8-10 MeV dar, din păcate, la energii mici și doar pentru tranzitia de 3736 keV, rămânem încă foarte departe de valorile experimentale masurate la GELINA și nu ne este clar de ce se întâmpla aceasta (vezi

Figura 9). Ce generează acest comportament pentru ^{40}Ca rămâne o întrebare deschisă a prezentului proiect. **Concluzionand, din motivele prezentate în această secțiune, putem afirma ca toate livrabilele proiectului au fost în buna masura indeplinite respectand planul de lucru gandit initial.**

IMPACTUL PROIECTULUI

Probabil ca **impactul cel mai mare** al rezultatelor acestui proiect este dat de *valorile experimentale* masurate pentru canalul inelastic, în special cel neutronic: secțiuni eficace cu rezoluție în energia incidenta foarte buna și incertitudini mici. Aceste date nucleare sunt relevante atât pentru cercetare fundamentală – înțelegerea mai buna a potențialului nuclear în această regiune de masă – cât și pentru aplicațiile nucleare care au nevoie de o cunoaștere cât mai precisă a canalului inelastic pe ^{40}Ca . Un exemplu foarte bun este dat de către reactorii nucleari rapizi de Generația a IV-a, comunitatea explorând în prezent o serie de variante/prototipuri, unele dintre ele având calciu ca parte a fluidului de răcire și/sau a combustibilului nuclear în sine. Înțelegerea cât mai precisă a tuturor reacțiilor induse de neutroni specifice mediului reactorului, în particular cele inelastice pentru ca prin asemenea reacții neutronii pierd foarte multă energie (i.e., prima stare excitată din ^{40}Ca este la peste 3 MeV), este în mod evident de mare ajutor. Odată ajunse în baza de date EXFOR, comunitatea poate folosi rezultatele noastre experimentale pentru o îmbunătățire (în termeni de design, siguranță, deseuri nucleare, eficiență, etc.) a tehnologiei nucleare actuale ducând la obținerea de energie electrică mai sigur și mai ieftin (lucru relevant mai ales în contextul crizei energetice actuale, în special în Europa). **Un alt impact al proiectului** este dat de faptul că am demonstrat că, cel puțin peste 8-10 MeV energie incidenta, putem deduce canalul inelastic neutronic pe ^{40}Ca din cel protonic. Acest lucru are marele avantaj de a putea evita efectuarea unui experiment cu fascicul de neutroni cu tehnica de timp de zbor (experiment mult dificil ca cel protonic dintr-o serie de motive).

Link pagina web a proiectului: <https://www.nipne.ro/proiecte/pn3/63-proiecte.html>

Lista de referințe

- [1] A. Koning et al., „TALYS: modeling of nuclear reactions”, Eur. Phys. J. A 59:131 (2023)
- [2] L.C. Mihailescu, L. Olah, C. Borcea și A. J. M. Plompen, Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. A531, 375 (2004)
- [3] D. Deleanu *et al.*, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A, 624 (2010) 130
- [4] A. Negret, C. Borcea, Ph. Dessagne, M. Kerveno, A. Olacel, A.J.M. Plompen și M. Stanoiu, Phys. Rev. C90, 034602 (2014)
- [5] A. Negret, M. Sin, C. Borcea, R. Capote, Ph. Dessagne, M. Kerveno, N. Nankov, A. Olacel, A.J.M. Plompen și C. Rouki, Phys. Rev. C 96, 024620 (2017)

- [6] A. Olacel, “Neutron cross section measurements and Monte Carlo simulations of gamma spectroscopy setups”, PhD thesis, University of Bucharest, 2016
- [7] <http://laws.lanl.gov/vhosts/mcnp.lanl.gov>, X-6 Monte Carlo Team, MCNP - A general N-particle transport code, version 6, Volume I: overview and theory, Los Alamos National Laboratory
- [8] K. Atkinson, “An introduction to numerical analysis”, John Wiley and Sons, New York, 1989, 712 pages
- [9] C. Mihailescu, “Neutron (n, xn γ) cross section measurements for ^{52}Cr , ^{209}Bi and $^{206,207,208}\text{Pb}$ from threshold up to 20 MeV”, PhD thesis, European Commission Joint Research Center, Geel, Belgium
- [10] R. Bass *et al.*, Prog: Report for Euratom countries + Euratom to EANDC, No. 57U, p. 1 (1965), France
- [11] R. Bass *et al.*, Prog: Report for Euratom countries + Euratom to EANDC, No. 66U, p. 64 (1966), France
- [12] <http://faster.in2p3.fr>
- [13] <http://www.srim.org>
- [14] M. Boromiza *et al.*, Phys. Rev. C 101, 024604 (2020)
- [15] M. Boromiza *et al.*, Dead time corrections for inbeam γ -spectroscopy measurements, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A, 863 (2017) 15-19
- [16] <https://www-nds.iaea.org/exfor/>
- [17] A. Olacel, M. Boromiza* (autor corespondent) *et al.*, Phys. Rev. C 106, 024609 (2022)
- [18] A. Lane, Nucl. Phys. 35, 676 (1962)
- [19] A. Lane, Phys. Rev. Lett. 8, 171 (1962)
- [20] M. Boromiza *et al.*, Phys. Rev. C 101, 024604 (2020)
- [21] Articol în pregătire: urmeaza a fi trimis spre publicare la Physcial Review C sau European Physical Journal A (2024)
- [22] M. Boromiza *et al.*, EPJ Web of Conf., volume 284, 01010 4 (2023)
- [23] <https://indico.cern.ch/event/1201892/>
- [24] <https://www.ariel-h2020.eu/index.php/en/>

Director Proiect: Dr. Marian Boromiza

