



IFIN-HH



UPB



ELI-NP

UNIVERSITATEA POLITEHNICA din BUCUREȘTI

Școala Doctorală de Ingineria și Aplicațiile Laserilor și Acceleratorilor

Teză de doctorat

Rezumat

Tehnici nedistructive de inspecție a materialelor
cu ajutorul fasciculelor gama cvasi-monoenergetice

Coordonator

CS1 Dr. Calin A. Ur

Autor

Gabriel V. Turturică

București 2020

Mulțumiri

Vreau să-mi exprim recunoștința pentru cei care m-au ajutat la obținerea rezultatelor incluse în această teză.

În primul rând, îi mulțumesc conducătorului de doctorat Dr. Călin A. Ur, care mi-a oferit oportunitatea de a face parte din acest program de doctorat. Sub îndrumarea sa, au fost puse bazele acestei teze. Îi mulțumesc coordonatoarei mele Dr. Violeta Iancu, care a avut o contribuție esențială în dezvoltarea mea ca student doctoral. Ea mi-a oferit întotdeauna sfaturi bune pe care uneori le-am trecut cu vederea și cu care de obicei nu eram de acord, așa cum este în natura studentului. Rezultatele numeroaselor noastre discuții sunt prezente în toate subiectele incluse în această lucrare.

Vreau să mulțumesc colegilor din RA2 și RA4 pentru ajutorul și asistența lor în diferitele probleme întâmpinate pe parcursul doctoratului. În special, aș dori să îi mulțumesc dlui. Dr. Cătălin Matei pentru coordonarea analizei datelor obținute la HIGS și dlui. Alfio Pappalardo pentru sprijinul său legat de părțile experimentale ale tezei.

Vreau să le mulțumesc membrilor comitetului de îndrumare, Dr. Călin A. Ur, Prof. G. Cata-Danil, Dr. D. Balabanski și Dr. N. Marginean, pentru sfaturile acordate în timpul examenelor și rapoartelor științifice de activitate.

Rezultatele incluse în aceasta teză au fost obținute în cadrul proiectului Extreme Light Infrastructure Nuclear Physics (ELI-NP) faza I și II, proiect cofinanțat de Guvernul României și Uniunea Europeană prin Fondul European de Dezvoltare Regională.

Cuprins

Introducere	7
1 Interacția radiației electromagnetice cu materia	9
1.1 Coeficientul de atenuare al fotonilor	9
1.2 Atenuare nerezonantă	10
1.3 Atenuare rezonantă	10
2 Tehnici nedistructive pentru inspecția materialelor	11
2.1 Metode bazate pe atenuarea nerezonantă	11
2.1.1 Radiografia bazată pe atenuarea fotonilor pentru inspecția containerelor	11
2.1.2 Evaluarea numărului atomic efectiv folosind metoda atenuării cu două energii	12
2.2 Analiza izotopică bazată pe fluorescența de rezonanță nucleară	13
2.2.1 Configurația în împrăștiere	14
2.2.2 Configurația în transmisie	14
3 Dezvoltări Geant4 în suportul experimentelor de interogare activă a materialelor	15
3.1 Implementarea împrăștierii elastice	15
3.1.1 Implementarea Geant4 a împrăștierii elastice a fotonilor	16
3.1.2 Procedura de validare	16
3.2 Implementarea analizei temporale	17
3.2.1 Suprapunerea semnalelor în electronica digitală	18
3.2.2 Implementarea și validarea metodei	19
4 Evaluarea numărului atomic efectiv cu ajutorul radiației gama mono-energetice	21
4.1 Analiza mono-pixel	21

4.1.1	Producția de raze gama și ansamblul experimental	21
4.1.2	Simulări Geant4	22
4.1.3	Procesarea datelor	22
4.1.4	Rezultate și discuții	23
4.2	Analiza 2D	24
4.2.1	Simulări Geant4	24
4.2.2	Procesarea datelor	25
4.2.3	Rezultate și discuții	25
5	Interogarea activă a materialelor utilizând fluorescența de rezonanță nucleară	27
5.1	Sistemul de detecție	27
5.1.1	Sistemul de detecție a fotonilor bazat pe detectorii de tip clover segmentat - ELIADE	27
5.1.2	Performanța sistemului ELIADE pentru măsurători de interogare activă	28
5.2	Inspecția materialelor utilizând analiza izotopică NRF	30
5.2.1	Imagistică 2D bazată pe NRF	30
5.2.2	Densitatea areală	31
5.3	Măsurarea intensității unui fascicul gama	32
5.3.1	Măsurători ale energiei și intensității unui fasciculul gama	33
5.3.2	Ansamblul experimental propus pentru ELI-NP	36
	Concluzii	37

Introducere

Tehnicile nedistructive bazate pe atenuarea fotonilor în materie au devenit proceduri standard de inspecție a materialelor. Standarde înalte de securitate au impus cerințe ridicate în ceea ce privește capacitatea de discriminare a materialelor la nivelul specificității izotopice. O tehnică emergentă capabilă să îndeplinească aceste cerințe este fluorescența de rezonanță nucleară (NRF). Îmbunătățirile semnificative ale caracteristicilor fasciculelor de radiație gama obținute cu sisteme bazate pe împrăștierea Compton (LCS) pot oferi o soluție pentru aceste cerințe. Un astfel de sistem este în curs de implementare în cadrul institutului Extreme Light Infrastructure - Nuclear Physics (ELI-NP) din România. Sistemul cu raze gama de energie variabilă (VEGA) [1] va genera fascicule de raze gama cvasi-monocromatice cu parametri excepționali: lățime spectrală relativă mică ($\leq 0.5\%$), densitate spectrală mare (≥ 500 fotoni/s/eV) și un grad ridicat de polarizare liniară ($\geq 95\%$). Fasciculele gama generate de sistemul VEGA vor fi utilizate pentru aplicații de fizică nucleară fundamentală, cum ar fi NRF și experimente cu reacții foto-neutronice, precum și pentru aplicații practice [2–4]. Această lucrare prezintă studiul potențialelor avantaje și dezavantaje ale utilizării fasciculelor gama cvasi-monocromatice LCS pentru inspecția nedistructivă a materialelor.

Primele două capitole prezintă elementele de bază necesare pentru înțelegerea analizei izotopice NRF, pornind de la interacția fotonilor cu materia, urmată de o scurtă descriere a tehnicilor nedistructive pentru inspecția materialelor. Următoarele trei capitole oferă informații despre diverse aspecte conceptuale și tehnice ale analizelor izotopice bazate pe NRF.

Al treilea capitol detaliază implementarea în cadrul Geant4 a două componente cu influență considerabilă asupra zgomotului de fond pentru măsurătorile de tip NRF. Prima parte cuprinde implementarea Geant4 a împrăstierii elastice a fotonilor. Această implementare a fost realizată folosind o descriere teoretică completă

pentru a include efectele de interferență dintre procesele care contribuie la secțiunea eficace de împrăștiere. A doua parte a capitolului își propune să reducă diferența dintre datele experimentale și cele simulate prin includerea constrângerilor suplimentare asociate analizei temporale a semnalelor.

Al patrulea capitol conține informații despre tehnici de selecție a regiunilor de interes, menite să rezolve limitările practice datorate timpilor de măsurare relativ lungi ai analizelor izotopice bazate pe NRF. În cadrul acestui capitol este propusă o nouă metodă de discriminare a materialelor bazată pe rețele neuronale artificiale pentru analiza datelor de atenuare cu două energii. Prima parte a capitolului vizează metode de analiză a datelor de atenuare cu două energii pentru un detector de tip mono-pixel. Scopul acestei părți este de a demonstra avantajul metodelor bazate pe rețele neuronale în comparație cu o metodă clasică bazată pe raportul a două energii distincte. În cea de-a doua parte a capitolului analiza este extinsă pentru imagini 2D obținute cu ajutorul simulărilor Monte Carlo. Această secțiune prezintă comparația dintre o analiză directă a imaginii prin utilizarea unei rețele neuronale convoluționale cu o abordare pixel-cu-pixel pentru metoda clasică.

Capitolul final tratează particularitățile de ordin spectral cât și cele practice ale unei analize izotopice bazate pe NRF. Analiza este efectuată utilizând un sistem de detecție bazat pe detectori de germaniu hiper-pur, și un fascicul LCS cvasi-monocromatic. În prima parte a analizei a fost efectuată o evaluare a performanței sistemului de detecție pentru o țintă de ^{238}U într-o configurație experimentală de tip împrăștiere. A doua parte a capitolului prezintă rezultatele unei analize izotopice 2D, ce vizează detecția și evaluarea conținutului de ^{238}U încorporat într-o regiune selectată pe baza măsurărilor de număr atomic efectiv (Z_{eff}) a unei scene. În cadrul acestei analize au fost vizate două elemente: calitatea imaginii obținute, cuantificată folosind raportul contrast/zgomot și capacitatea de a evalua cantitatea de ^{238}U . Partea finală descrie metodele și instrumentele necesare pentru măsurarea energiei și intensității fasciculului, cerințe esențiale pentru o evaluare absolută a cantității izotopice.

Chapter 1

Interacția radiației electromagnetice cu materia

Pentru a înțelege și proiecta ansambluri experimentale ce vizează analizele nedistructive pentru inspecția materialelor este necesară cunoașterea și înțelegerea proceselor implicate în interacțiunea foton-materie. Acest capitol descrie mecanismele ce stau la baza atenuării fotonilor în materie.

1.1 Coeficientul de atenuare al fotonilor

Legea fundamentală a atenuării radiațiilor electromagnetice în materie are următoarea formă:

$$I = I_0 e^{-\mu x}, \quad (1.1)$$

unde I_0 și I sunt intensitatea incidentă și transmisă, μ este coeficientul de atenuare masică, iar x este definit ca $x = \rho L$, unde ρ este densitatea și L grosimea atenuatorului. Coeficientul de atenuare poate fi descris în funcție de energia fotonului incident (E), a numărului atomic (Z) și a densității materialului (ρ). Coeficienții de atenuare, pentru fiecare element și energii de până la 100 GeV, pot fi obținuți din baza de date XCOM: Photon Cross Sections Database [5]. Coeficientul de atenuare masică poate fi de asemenea exprimat în funcție de secțiunea eficace de interacțiune:

$$\mu = \frac{N_0 \sigma}{A}, \quad (1.2)$$

unde N_0 este numărul lui Avogadro, σ este secțiunea eficace de interacțiune, și A este masa atomică. Secțiunile eficace de

1. Interacția radiației electromagnetice cu materia

interacțiune pot fi exprimate ca suma contribuțiilor individuale ale diferitelor procese de atenuare:

$$\sigma = \sigma_{pe} + \sigma_{pair} + \sigma_{Comp} + \sigma_{coh} + \sigma_{incoh} + \sigma_{NRF} + \dots \quad (1.3)$$

În funcție de mecanismul de interacție al fotonilor cu materia, componentele individuale ale secțiunii eficace pot fi împărțite în două clase: interacțiuni nerezonante și rezonante.

1.2 Atenuare nerezonantă

Componentele atenuării nerezonante pot fi împărțite în două tipuri: absorbția fotonilor și împrăștierea fotonilor. Procesele de absorbție sunt definite drept procesele în care fotonul inițial nu mai există după ce interacțiunea are loc și sunt emise particule secundare în proces, de ex. efectul fotoelectric sau producția de perechi. Procesul de împrăștiere a fotonilor poate fi înțeles ca o interacțiune din care fotonul incident suferă o schimbare în direcția de propagare sau a energiei cinetice, de ex. împrăștierea Compton și împrăștierea elastică.

1.3 Atenuare rezonantă

Dezexcitarea gama a unui nucleu este procesul, specific fiecărui izotop, definit de emisia fotonilor gama ca urmare a etapelor de stabilizare nucleară. Procesul invers al emisiei este absorbția, proces ce duce nucleul pe o stare excitată. Procesul de absorbție nucleară urmat de emisia unui foton este cunoscut sub numele de fluorescență de rezonanță nucleară.

Chapter 2

Tehnici nedistructive pentru inspecția materialelor

În ultimul secol, metodele bazate pe atenuarea radiației au devenit proceduri standard pentru studiul și caracterizarea materialelor. Dezvoltările tehnologice în producerea și detecția radiațiilor au permis utilizarea acestor metode pentru o gamă largă de aplicații. Acest capitol descrie metodele bazate pe atenuarea fotonilor: metode nerezonante, precum și metode rezonante. Prima secțiune este dedicată radiografiei nerezonante, și vizează avantajele și dezavantajele radiografiei bazată pe atenuarea fotonilor și îmbunătățirile ce pot fi obținute prin utilizarea metodelor de atenuare cu două energii. A doua parte a capitolului cuprinde metodele bazate pe radiografia isotopică NRF, cu accent pe configurațiile experimentale și domeniile de utilizare propuse pentru această metodă.

2.1 Metode bazate pe atenuarea nerezonată

2.1.1 Radiografia bazată pe atenuarea fotonilor pentru inspecția containerelor

Radiografia bazată pe atenuarea fotonilor este o metodă excelentă pentru a studia structura internă a unui obiect. Metoda prezintă performanțe robuste pentru o gamă extinsă de numere atomice și valori ale densității areale. În ceea ce privește numărul atomic, metoda prezintă deficiențe pentru materialele complexe, în care obiecte cu valori ridicate ale Z ecranează obiecte cu valori Z

scăzute. Din punctul de vedere al densității areale, există limitări evidente pentru obiectele ce atenuază complet fasciculul incident.

2.1.2 Evaluarea numărului atomic efectiv folosind metoda atenuării cu două energii

O posibilă soluție pentru rezolvarea incertitudinii dintre numărului atomic și densitatea areală a unei probe este utilizarea metodelor bazate pe măsurarea atenuării cu două energii. Această măsurătoare poate oferi informații suplimentare ce pot fi utilizate pentru o discriminare mai eficientă a materialelor.

Metoda dual-R

Cea mai comună metodă folosită pentru evaluarea Z_{eff} se bazează pe raportul datelor de atenuare la două energii [6]. Metoda necesită o procedură de măsurare bazată pe două etape; în prima etapă este efectuată o măsurătoare de referință în care nu se plasează niciun obiect între sursa de raze gama și detector, în cea de-a doua etapă are loc măsurarea propriu-zisă a probelor. În prima fază a analizei se calculează raportul dintre semnalul de referință și probă utilizând

$$R_c(E_i) = \ln\left(\frac{V_0(E_i)}{V(E_i)}\right), \quad (2.1)$$

unde V_0 este semnalul de referință (fără obiect), și V este semnalul măsurat pentru o probă. Rezultatele obținute folosind formula (2.1) sunt apoi utilizate pentru a calcula raportul atenuării celor două energii ca

$$R = \frac{R_c(E_1)}{R_c(E_2)}, \quad (2.2)$$

unde E_1 și E_2 sunt două energii incidente distincte. Dependența numărului atomic efectiv de raportul R poate fi descrisă folosind o ecuație ca

$$Z_R = \left(\frac{a \cdot R + b}{c \cdot R + d} \right)^e, \quad (2.3)$$

unde a , b , c , d , și e sunt parametri liberi ce pot fi obținuți din măsurarea unor probe bine caracterizate.

Metoda bazată pe rețele neuronale artificiale

Una dintre cele mai simple configurații pentru rețelele neuronale artificiale este rețeaua de tip feed-forward. Trei tipuri de elemente definesc structura unei astfel de rețele: sloturi de intrare/ieșire, neuroni, și conexiunile acestora. Sloturile de intrare/ieșire sunt necesare pentru a transmite informațiile către/din rețea. Conexiunile sunt elementele care unesc toate structurile sistemului, de ex. slot de intrare la neuron sau neuron la neuron. Fiecare conexiune are o variabilă asociată, cunoscută sub denumirea de pondere, care definește importanța conexiunii între două structuri. Ca o primă operație, neuronul însumează produsele datelor transmise de către stratul anterior cu ponderile corespunzătoare, rezultat la care se adaugă o variabilă suplimentară cunoscută ca bias. Ulterior, neuronul trece valoarea obținută în prima etapă printr-o funcție de activare. Valoarea obținută după funcția de activare este transmisă următorului strat. Optimizarea ponderilor și a variabilelor bias se face în faza de antrenare cunoscută sub numele de back-propagation.

2.2 Analiza izotopică bazată pe fluorescența de rezonanță nucleară

Fluorescența de rezonanță nucleară a fost propusă ca o tehnică de analiză nedistructivă ce poate fi utilizată la caracterizarea izotopică a materialelor [7]. Metoda se bazează pe detecția fotonilor rezonanți produși în interacțiunea unui fascicul incident cu un material. Două configurații sunt utilizate pentru măsurători de tip NRF: configurația în împrăștiere și configurația în transmisie.

2. Tehnici nedistructive pentru inspecția materialelor

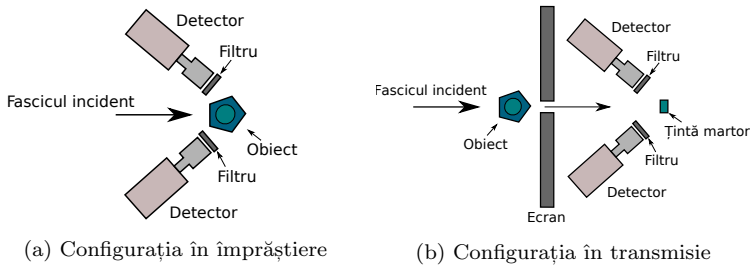


Figura 2.1: Configurații experimentale propuse pentru analiza izotopică cu NRF.

2.2.1 Configurația în împrăștiere

O reprezentare schematică a configurației în împrăștiere este prezentată în Figura 2.1a. În această configurație, detectorii sunt poziționați în jurul obiectului și detectează fotonii NRF generați în interacțiunea fascicul-probă. Reducerea zgomotului de fond poate fi obținută prin poziționarea detectorilor la unghiuri înapoi pentru a reduce contribuția împrăștierii nerezonante.

2.2.2 Configurația în transmisie

Configurația în transmisie, prezentată în Figura 2.1b, a fost propusă pentru a rezolva unele dintre limitările configurației în împrăștiere [7]. În această configurație, fasciculul este transmis prin probă și interacționează cu o țintă maritor ce conține izotopul de interes. Sistemul de detecție este poziționat în jurul țintei maritor, fiind astfel ecranat de fondul generat în interacțiunea fascicul-probă. Unul dintre avantajele configurației în transmisie este îmbunătățirea raportului semnal-zgomot datorită separării obiectului de sistemul de detecție.

Chapter 3

Dezvoltări Geant4 în suportul experimentelor de interogare activă a materialelor

Designul unei configurații experimentale are un rol esențial în rezultatul așteptat al unei măsurători. În prezent, două metode sunt folosite pentru estimarea rezultatelor unei măsurători experimentale: calcule analitice și simulări de tip Monte Carlo. După cum este de așteptat, niciuna dintre aceste metode nu este ideală, ambele prezentând atât avantaje cât și dezavantaje. Complexitatea măsurătorilor de tip NRF indică faptul că cele mai bune rezultate pentru problema estimării rezultatelor pot fi obținute prin utilizarea simulărilor Monte Carlo. Acest capitol prezintă implementările Geant4 realizate pentru obținerea unor estimări precise a măsurătorile de tip NRF.

3.1 Implementarea împrăștierei elastice

Implementările procesului de împrăștiere elastică disponibile în cadrul codurilor de transport al radiației, cum ar fi GEANT4 [8] sau MCNP [9], sunt limitate la împrăștierea de tip Rayleigh. Această aproximare este potrivită pentru fotonii de energie scăzută, dar produce diferențe considerabile între simulare și experiment pentru fotonii de energii de peste 1 MeV. În cadrul acestui capitol descriem îmbunătățirile implementării Geant4 pentru împrăștierea elastică a fotonilor pentru energii până la 20 MeV, pentru a include domeniul energetic al viitoarei surse LCS din cadrul ELI-NP. Pentru a descrie complet împrăștierea elastică a fotonilor, au fost

luate în considerare următoarele procese: Rayleigh, Thomson de tip nuclear, Delbrück și împrăștierea de tip rezonanță dipol gigant.

3.1.1 Implementarea Geant4 a împrăstierii elastice a fotonilor

Amplitudinile de împrăștiere pentru procesul Thomson au fost calculate pe baza formulelor analitice. Amplitudinile de împrăștiere Rayleigh au fost calculate prin metoda matricei S până la 6 MeV și folosind factori de formă modificați pentru intervalul 6–20 MeV [10]. Amplitudinile Delbrück au fost luate din tabulările lui Falkenberg [11], acestea fiind calculate în aproximarea ordinului întâi. Parametrii rezonanței dipol gigant (GDR), necesari pentru calculul amplitudinilor pentru împrăștierea asociată rezonanței nucleare, au fost extrași din baza de date RIPL-3 [12], iar pragurile de separare a neutronilor au fost obținute din baza de date NUDAT [13].

3.1.2 Procedura de validare

Îmbunătățirea modelării împrăstierii elastice a fotonilor obținută cu implementarea curentă comparativ cu implementarea standard din cadrul GEANT4 poate fi observată în Figura 3.1. Acest grafic prezintă o comparație între datele simulate și cele experimentale pentru împrăștierea fotonilor pe ^{238}U la 120 de grade pentru intervalul energetic 0.2–12 MeV. Punctele simulate au fost obținute în două configurații distincte. Cercurile pline (negru) reprezintă rezultate simulate folosind implementarea de împrăștiere elastică prezentată în această lucrare. Pătratele albastre prezintă date simulate obținute prin utilizarea implementării standard a împrăstierii elastice a fotonilor, o implementare care conține doar împrăștierea Rayleigh (G4PenelopeRayleigh). După cum era de așteptat, partea de joasă energie a graficului este reprodusă bine de ambele implementări. Cu toate acestea, diferențele dintre cele două implementări încep să apară la energii de peste 1 MeV și devin semnificative la energii mari.

Pe baza acestor rezultate, un articol a fost publicat în

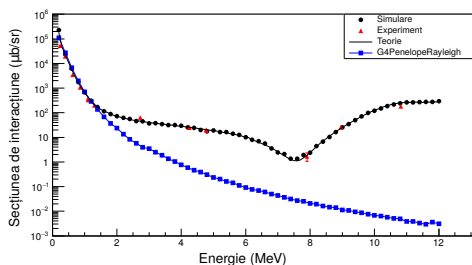


Figura 3.1: Secțiunea eficace diferențială de interacțiune ($\mu\text{b}/\text{sr}$) în funcție de energia fotonilor (MeV) pentru împrăștierea pe ^{238}U la un unghi de 120 de grade. Cercurile pline (negru) sunt puncte simulate obținute din implementarea curentă. Linia continuă (negru) reprezintă datele teoretice utilizate pentru implementarea curentă. Pătratele albastre sunt puncte simulate obținute folosind G4PenelopeRayleigh. Triunghiurile roșii sunt puncte experimentale obținute din Schumacher et al. [14].

cadru Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms [15].

3.2 Implementarea analizei temporale

Analiza temporală a semnalelor are un rol esențial în spectroscopia nucleară. Suprapunerea temporală a semnalelor va afecta măsurătorile experimentale, indiferent de tipul experimentului, măsurători cu sursă de calibrare sau măsurători cu fascicul. Efectele suprapunerii temporale a semnalelor sunt scăderea eficienței de detecție și apariția unor evenimente incorecte în spectru.

3.2.1 Suprapunerea semnalelor în electronica digitală

Sistemul de achiziție utilizat în această lucrare se bazează pe digitizoare CAEN 725/730. Digitizoarele utilizează algoritmi de prelucrare a impulsurilor (DPP) pentru extragerea informațiilor de energie și timp din semnalul digital. Algoritmul de respingere a pulsurilor suprapuse ce este implementat în cadrul firmware-ului poate fi împărțit în patru cazuri de interes, așa cum se poate observa în Figura 3.2.

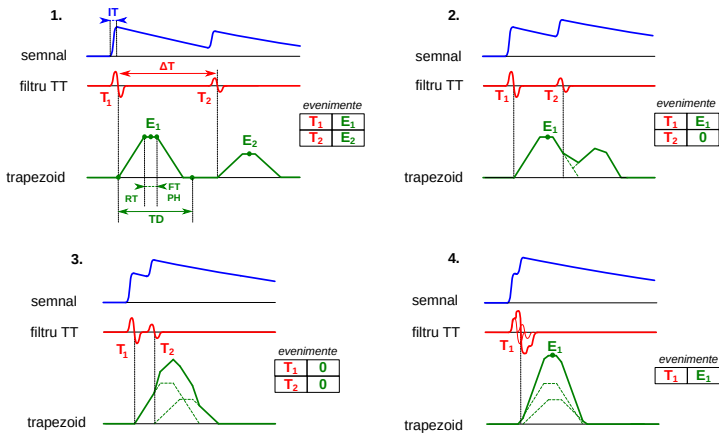


Figura 3.2: Algoritm de respingere a pulsurilor suprapuse CAEN DPP-PHA [16].

Într-o situație ideală, toți fotonii se vor încadra în prima categorie, scenariu în care spectrele înregistrate vor oferi o reprezentare exactă, din punct de vedere energetic și al numărului de fotoni detectați. Pentru restul cazurilor, efectele asupra spectrelor înregistrate vor fi observate ca o scădere considerabilă a eficienței de detecție pe măsură ce frecvența cazurilor de suprapunere crește. Scenariul care prezintă cel mai semnificativ dezavantaj este al patrulea caz. În acest caz, pe lângă scăderea eficienței de detecție,

spectrul va conține evenimente cu energii incorecte ce nu pot fi separate de evenimentele corespunzătoare.

3.2.2 Implementarea și validarea metodei

Pentru cuantificarea efectele suprapunerii semnalelor în spectrele simulate, un model al algoritmului de respingere a semnalelor suprapuse a fost implementat în Geant4. Testarea și validarea algoritmului s-a făcut cu ajutorul unui detector HPGe cu eficiență relativă de 150% cuplat la un digitizor de tipul CAEN DT5730. Datele experimentale au fost obținute cu o sursă de calibrare standard ^{60}Co pentru multiple distanțe sursă-detector. Rata de peak a fost metrica aleasă pentru evaluarea implementării algoritmului de respingere a pulsurilor suprapuse. Cele mai reprezentative peak-uri pentru validare au fost considerate peak-urile obținute din însumarea evenimentelor necorelate, adică peak-urile de la 2.35 și 2.67 MeV. Figura 3.3 arată rezultatele validării pentru ratele de numărare din peak-urile de la 2.35 și 2.67 MeV funcție de frontul crescător al semnalului.

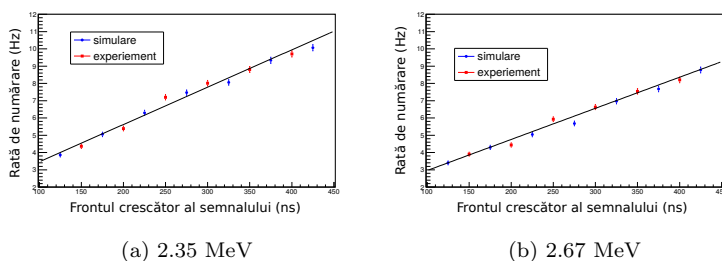


Figura 3.3: Rata de peak în funcție de frontul crescător al semnalului pentru cele două peak-uri sumă. Măsurătorile au fost efectuate cu o sursa de ^{60}Co , la o distanță sursă-detector de 1 cm.

Chapter 4

Evaluarea numărului atomic efectiv cu ajutorul radiației gama mono-energetice

Algoritmii pentru analiza datelor de atenuare cu două energii au fost detaliați în Secțiunea 2.1. În cadrul acestui capitol, sunt prezentate cele două metode de analiză și evidențiate beneficiile rețelelor neuronale față de metoda bazată pe raportul atenuării la două energii.

4.1 Analiza mono-pixel

Evaluarea metodei bazată pe rețele neuronale artificiale, a fost efectuată prin comparația cu metoda dual-R. Pentru aceasta, au fost utilizate două seturi de date, un set de date experimentale ce a fost obținut prin utilizarea radiației gama produse din reacții de captura cu protoni și un set de date simulat, generat cu ajutorul platformei Geant4. Setul de date simulat a fost generat în condiții similare cu măsurătorile experimentale pentru a evalua robustețea metodelor în prezența incertitudinile experimentale.

4.1.1 Producția de raze gama și ansamblul experimental

Generarea razelor gama în intervalul 1.7–12.3 MeV a fost realizată prin utilizarea a două reacții de captură a protonilor, enumerate în Tabelul 4.1. Măsurătorile au fost efectuate la acceleratorul Tandem de 3MV din cadrul IFIN-HH [17].

În vederea evaluării capacității de discriminare a metodelor, au fost efectuate măsurători pentru șase materiale: polietilenă, Al, Cu, aliaj Sn-Pb, W și uraniu sărăcit. Pentru a imita un scenariu mai

4. Evaluarea numărului atomic efectiv cu ajutorul radiației gama mono-energetice

Reacție	$E_{\gamma 1}$	$E_{\gamma 2}$	$E_{\gamma 3}$ MeV	Energie - Q
$^{27}\text{Al}(p,\gamma)^{28}\text{Si}$	1.78	10.76	12.33	11.59
$^{19}\text{F}(p,\alpha\gamma)^{16}\text{O}$	6.13	6.92	7.12	8.12

Tabel 4.1: Reacțiile de captură de protoni selectate pentru producția radiației gama. Tabelul conține energiile pentru tranzițiile de interes.

realist, fiecare probă a fost testată în trei configurații diferite: fără ecranare, ecranate de oțel inoxidabil SAE 304 (SS) sau ecranate cu plumb. Toate materialele măsurate au avut densitate areală de aproximativ 28.9 g/cm^2 , cu excepția probei de uraniu care a avut o densitate areală de aproximativ 50 g/cm^2 .

4.1.2 Simulări Geant4

Scopul simulărilor Geant4 a fost de a genera un set de date ce acoperă o gamă extinsă de valori ale numărului atomic Z în condiții similare cu măsurătorile experimentale. Au fost obținute un număr total de 378 de puncte ce conțin 42 de valori distincte ale lui Z cu densități areale de 10, 20, și 30 g/cm^2 în trei configurații diferite: fără ecranare, cu ecranare de SS și cu ecranare de plumb.

4.1.3 Procesarea datelor

Analiza a fost realizată pe baza evenimentelor extrase din patru regiuni de interes: 1.78, 6.13, 10.76, și 12.33 MeV. Numărul de evenimente a fost extras cu o procedură de fitare utilizând o funcție obținută ca suma dintre un polinom de gradul întâi și o funcție Gauss. Setul de date a fost împărțit în 70–30%, intervale utilizate pentru configurarea modelului și evaluarea performanței. Un număr de 2000 de etape de validare Monte Carlo au fost efectuate pentru a reduce erorile asociate setului de testare.

Metoda dual-R

Datele pentru configurarea modelului au fost utilizate pentru a genera rapoartele dintre cele două energii pentru diferitele combinații posibile ale celor patru zone de interes. Rapoartele obținute au fost utilizate în procedura de fitare a modelului utilizând ecuația (2.3), modelul astfel obținut a fost folosit pentru evaluarea erorilor de discriminare pe baza datelor de test.

Metoda bazată pe rețele neuronale artificiale

Prelucrarea datelor mono-pixel a fost efectuată utilizând o rețea neuronală artificială cu o configurație de tip feed-forward. Rețeaua a fost antrenată pentru a modela corelația dintre datele de atenuare pentru cele două energii și Z_{eff} . Rețelele au fost construite folosind librăriile Keras [18] și TensorFlow [19]. Optimizarea hiperparametrilor a fost făcută folosind o strategie de optimizare aleatorie, utilizând librăria Talos [20]. Au fost selectate două funcții de activare pentru model, unități liniare rectificate (ReLU) [21] pentru straturile ascunse și sigmoid pentru stratul de ieșire.

4.1.4 Rezultate și discuții

Performanțele celor două modele în ceea ce privește capacitățile de evaluare a Z_{eff} , pentru perechea de energii 1.78 și 12.33 MeV, sunt prezentate în Tabelul 4.2. Față de modelul Dual-R, modelul bazat pe rețele neuronale arată o îmbunătățire de 48% din punct de vedere al RMSE pentru setul de date simulat și o îmbunătățire de 24% pentru setul de date experimentale. Simplitatea modelului Dual-R, împreună cu aproximările fizice, limitează precizia acestei metode. Abordarea independentă de model și complexitatea ridicată oferă avantaj modelului bazat pe rețele artificiale neuronale.

4. Evaluarea numărului atomic efectiv cu ajutorul radiației gama mono-energetice

Model	simulat		experimental	
	medie	dev. std.	medie	dev. std.
Dual-R	0.050	0.004	0.055	0.013
ANN	0.026	0.006	0.042	0.010

Tabel 4.2: RMSE și abaterea standard obținută din evaluarea celor două metode, pentru perechea de energii 1.78 și 12.33 MeV, calculată pentru seturile de date experimentale și simulate.

4.2 Analiza 2D

În urma evaluării celor două modele pe datele de atenuare mono-pixel, analiza este extinsă la radiografia de transmisie 2D. Performanța modelelor este evaluată pe baza rezultatelor obținute din datele de transmisie simulate cu ajutorului platformei Geant4. Capacitățile de evaluare a Z_{eff} pentru cele două metode au fost testate utilizând 500 de puncte de test, ce conțin imagini de atenuare pentru perechea 1.7 și 10.7 MeV.

4.2.1 Simulări Geant4

Pentru analiza de transmisie 2D, multiple scene alcătuite din obiecte de formă cilindrică sau cuboidă au fost construite. Obiectele au fost poziționate pe două straturi paralele, pentru a permite suprapunerea obiectelor în transmisie. Parametrii geometrici ai obiectelor au fost selectați în mod arbitrar, grosimea a fost restricționată pentru a limita densitatea areală între 5 și 30 g/cm² pentru fiecare strat. Numărul atomic al obiectelor a fost alocat aleatoriu din 42 de valori ce acoperă întreaga gamă a tabelului periodic.

4.2.2 Procesarea datelor

Metoda Dual-R

Procesarea 2D pentru metoda dual-R s-a făcut folosind o implementare pixel-cu-pixel. Curba de calibrare a fost obținută folosind un set de date ce conține 1500 de puncte de transmisie simulate într-o configurație mono-pixel. Procedura de evaluare a pixelilor s-a făcut urmând procedura descrisă în Secțiunea 4.1 pentru o imagine de 64×64 pixeli obținută din sub-eșantionarea unei imaginii inițiale de 256×256 .

Metoda bazată pe rețele neuronale artificiale

Procesarea 2D s-a făcut utilizând o rețea neuronală convoluțională cu șase straturi. Funcția ReLU a fost selectată ca funcție de activare pentru straturile intermediare, urmată de straturi de normalizare [22] și straturi de tip dropout. Numărul de filtre utilizat pentru straturile convoluționale a fost 50, folosindu-se un kernel de 3×3 cu un pas de $(1,1)$. Datele de intrare și ieșire au fost structurate ca o imagine cu două canale cu dimensiunea de 64×64 pixeli. Imaginile de intrare conțin raportul dintre probă și semnalul de referință pentru măsurătorile la cele două energii. Imaginile obiectiv au fost construite folosind Z_{eff} normalizat și valori ale densității areale a obiectelor măsurate. Optimizarea parametrilor rețelei s-a făcut cu algoritmul SGD pentru o eroare medie pătratică.

4.2.3 Rezultate și discuții

Un exemplu pentru procedura de analiză 2D este prezentat în Figura 4.1. Panourile din primul rând conțin rezultatele obținute pentru procedura de evaluare Z_{eff} . O diferență considerabilă poate fi observată în calitatea imaginii obținute cu ajutorul ANN în raport cu imaginea dual-R, în special în zgomotul celor două imagini. Graficul din Figura 4.1 conține valorile Z_{eff} funcție de indexul zonelor din imaginea obiectiv, pentru cuantificarea capacităților de evaluare a celor două metode. Poate fi punctat ca incertitudinile

4. Evaluarea numărului atomic efectiv cu ajutorul radiației gama mono-energetice

semnificative asociate cu metoda dual-R scad puterea de discriminare pentru materialele cu un număr atomic efectiv ridicat. În schimb, metoda bazată pe ANN oferă imagini de înaltă calitate, cu incertitudini și putere mai bună de discriminare.

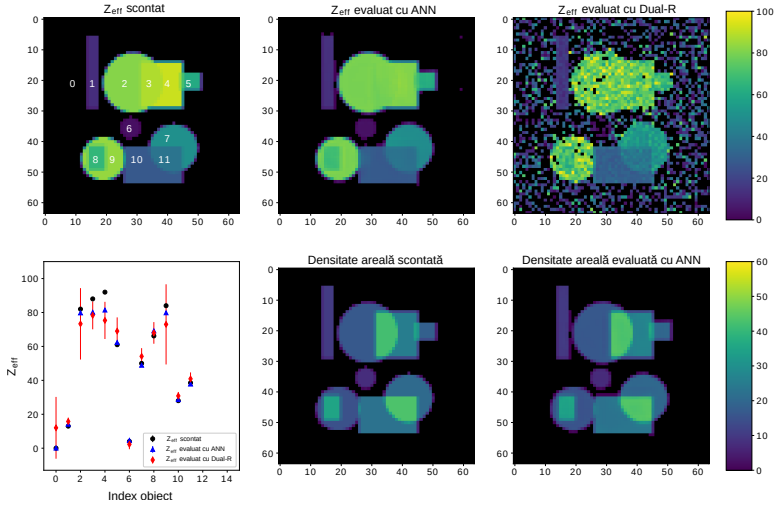


Figura 4.1: Rezultatele analizei pentru procesarea 2D pentru un exemplu din setul de validare. Panourile din primul rând conțin imaginea obiectiv și rezultatele procedurii de evaluare Z_{eff} pentru metoda bazată pe rețele neuronale și Dual-R. Al doilea rând conține un grafic, care cuantifică capacitățile de evaluare Z_{eff} ale metodelor pentru zonele din imaginea obiectiv. Ultimele două panouri conțin imaginea obiectiv și imaginea obținută cu ajutorul metodei bazate pe rețele neuronale artificiale pentru evaluarea densității areale.

Pe baza acestor rezultate, un articol a fost publicat în *The European Physical Journal Plus* [23].

Chapter 5

Interogarea activă a materialelor utilizând fluorescența de rezonanță nucleară

Acest capitol descrie avantajele și dezavantajele analizei izotopice bazate pe NRF efectuate cu ajutorul fasciculelor LCS și un sistem de detecție bazat pe detectori HPGe.

5.1 Sistemul de detecție

Detectorii de germaniu sunt esențiali în măsurătorile spectroscopice cu radiații gama. Rezoluția energetică excelentă, eficiența de detecție și rata de numărare relativ ridicată fac ca aceștia să fie detectorii cei mai utilizați în detecția fotonilor în intervalul de energie keV–MeV. Un sistem de detecție bazat pe detectorii gama este în curs de dezvoltare la ELI-NP, ca parte a instrumentației propuse pentru reacții foto-nucleare, și urmează a fi utilizat pentru detecția de raze gama cvasi-monocromatice în intervalul energetic 0.2–20 MeV.

5.1.1 Sistemul de detecție a fotonilor bazat pe detectorii de tip clover segmentat - ELIADE

Sistemul de detecție ELI-NP Array of DETectors (ELIADE) este compus din opt detectorii HPGe de tip clover, și patru detectori scintilatori de tip CeBr₃. Detectorii de tip clover sunt compuși din patru cristale ce sunt împărțite la rândul lor în câte opt segmente. Detectorii, parte a sistemului ELIADE, au fost caracterizați din punct de vedere al eficienței de detecție. Măsurătorile tipice de

5. Interogarea activă a materialelor utilizând fluorescența de rezonanță nucleară

determinare a eficienței absolute de detecție utilizează surse de calibrare standardizate, de ex. ^{60}Co sau ^{152}Eu , și pot fi utilizate pentru caracterizarea detectorului până la energii de 1.4 MeV. Pentru cazurile în care este necesară o caracterizare la energii mai mari de 1.4 MeV, pot fi utilizate surse cu timp de viață scurt, ^{56}Co sau ^{66}Ga sau reacții de captură (n,γ) sau (p,γ). Rezultatele procedurilor de caracterizare a eficienței de detecție pentru unul dintre cristalele detectorului de tip clover, pentru intervalul 0.5–11.6 MeV, sunt prezentate în Figura 5.1. Datele simulate reproduc datele experimentale cu o precizie bună, cu excepția unei supraestimări pentru punctele de energie ridicată, ce poate fi atribuită inexactităților în modelarea cristalelor și a erorilor asociate măsurătorilor experimentale.

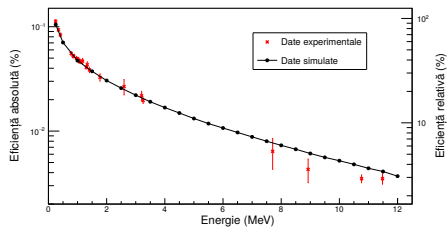


Figura 5.1: Eficiența de detecție absolută și relativă a unui cristal parte a unui detector HPGe de tip clover. Marcajele roșii și negre reprezintă datele experimentale și simulate pentru intervalul de energie de 0.5–11.6 MeV. Măsurătorile au fost efectuate la o distanță sursă-detector de 25 cm.

5.1.2 Performanța sistemului ELIADE pentru măsurători de tip NRF

Spectrul NRF, așa cum este înregistrat de cristalele detectorilor din întregul sistem, pentru rezonanța de 2.176 MeV din ^{238}U , este prezentat în Figura 5.2. Algoritmii responsabili pentru suprapunere temporală a semnalelor nu este activ pentru a limita com-

plexitatea spectrului. Comparația dintre zona de interes, în jurul peak-ului 2.176 MeV, și restul spectrului arată că acest tip de măsurătoare prezintă un raport semnal-zgomot scăzut. Cea mai mare parte a zgomotului de fond este asociată cu fenomenul de producere de perechi și fotonii de împrăștiere Compton, generați în interacțiunea fascicul-probă. Fotonii produși în anihilarea pozitronilor au o contribuție substanțială la rata totală de numărare; cu toate acestea, nu pot contribui la zona de interes în absența suprapunerii semnalelor. Contribuția spectrală a fotonilor Compton împrăștiați în zona de interes este prevenită prin plasarea detectorilor la unghiuri înapoi.

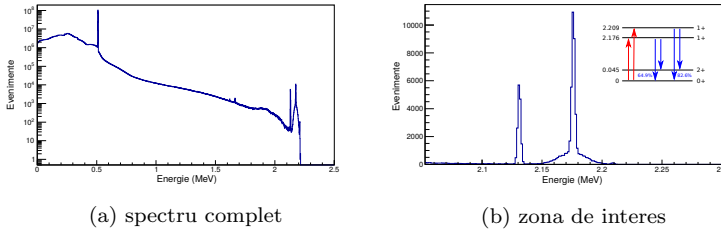


Figura 5.2: Spectru NRF simulat pentru ^{238}U pentru configurația în împrăștiere. Imaginea din partea dreaptă detaliază spectrul și schema de nivel pentru intervalul 2–2.3 MeV. Analiza temporală a semnalelor a fost inactivă pentru această simulare.

Singurul proces care poate contribui semnificativ ca zgomot la nivel spectral pentru peak-ul NRF este împrăștierea elastică a fascicului incident. Acest efect poate fi observat în Figura 5.2b, figură ce detaliază intervalul 2–2.3 MeV al Figurii 5.2a. Contribuția fenomenului de împrăștiere elastică prezintă caracteristicile spectrale ale fascicului incident și poate fi observată la baza peak-ului aferent tranziției de 2.176 MeV, peak ce corespunde tranziției pe nivelul fundamental.

Activarea algoritmului responsabil de suprapunerea temporală produce diferențe considerabile în spectrul simulat. Spectrul alternativ ce conține suprapunere temporală a Figurii 5.2 este prezentat în Figura 5.3. Distincția dintre cele două spectre constă în faptul

5. Interogarea activă a materialelor utilizând fluorescența de rezonanță nucleară

că fotonii generați în producția de perechi sau prin împrăștierea Compton pot contribui acum cu evenimente în întregul spectru, datorită efectului de suprapunere a semnalelor.

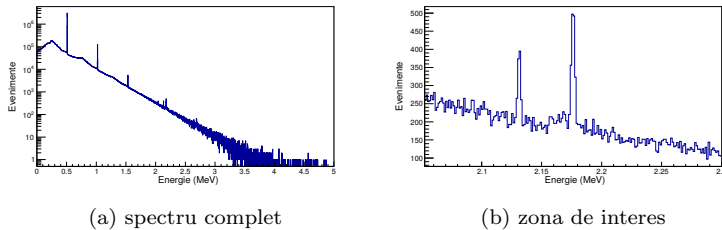


Figura 5.3: Spectru NRF simulat pentru ^{238}U pentru configurația în împrăștiere. Analiza temporală a semnalelor a fost activă pentru această simulare. Aproximativ 17% din numărul evenimentelor sunt asociate cu o depunere energetică aferentă unui singur foton.

5.2 Inspecția materialelor utilizând analiza izotopică NRF

Constrângerile tehnologice actuale, în ceea ce privește calitatea fasciculului și detecția fotonilor, restricționează analiza izotopică NRF la un raport semnal-zgomot scăzut. Acest efect are o influență directă asupra timpului de măsurare, a limitei de detecție și a incertitudinii asociate. În configurația actuală, metoda prezintă dificultăți practice pentru cazurile în care este necesară scanarea unor regiuni mari. O posibilă rezolvare a acestor probleme, necesită cuplarea analizei izotopice NRF cu alte metode complementare ce prezintă un randament de măsurare ridicat, capabile să limiteze zona de scanare necesară.

5.2.1 Imagistică 2D bazată pe NRF

Regiunea ce conține obiectele 1, 2, 3, 4, și 5, evidențiate în Figura 4.1, a fost selectată pentru scanarea izotopică în vederea

determinării conținutului de ^{238}U . Această analiză vizează izolarea obiectelor 3 și 4, obiecte ce conțin izotopul de interes, de toate celelalte obiecte din scenă. Regiunea de interes a fost măsurată utilizând un fascicul tip creion pentru o scenă cu 19×13 pixeli de 0.4 cm pentru o suprafață totală de 7.6×5.2 cm². Datorită limitărilor impuse de puterea de calcul disponibilă, pixelii de imaginea 2D au fost simulați utilizând o lățime de bandă de 0.005%, o scădere cu două ordine de mărime față de lățimea de bandă așteptată pentru instalația VEGA. Ratele de numărare obținute prin utilizarea lățimii de bandă îmbunătățite au fost corectate pentru a ține cont de diferența în lățimea de bandă înainte de a construi imaginile 2D. Calitatea imaginilor generate a fost evaluată folosind raportul contrast-zgomot (CNR).

Procedura tipică pentru evidențierea regiunii ce conține ^{238}U cu ajutorul ratelor măsurate necesită calcularea raportului pixel-cu-pixel între o imagine proporțională cu intensitatea și imaginea NRF. Rezultatele raportului dintre imagini, pentru valori crescătoare ale timpilor de măsurare sunt prezentate în Figura 5.4. În urma raportului, imaginile generate includ numai obiectele ce conțin izotopul de interes. Timpii de măsurare au fost selectați pentru a atinge valori CNR în intervalul 1-3.

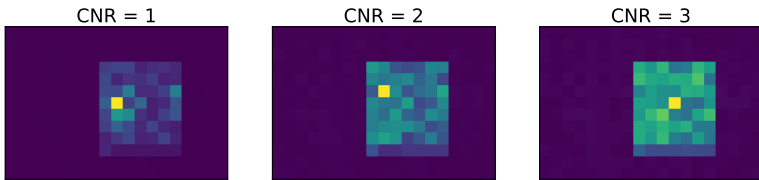


Figura 5.4: Raportul dintre rata de peak pentru energia de 0.511 MeV și rata NRF pentru valori crescătoare ale timpului de măsurare.

5.2.2 Densitatea areală

În funcție de aplicație, poate fi necesară și o evaluare a densității areale pentru izotopul de interes. O abordare bazată pe o curbă de

5. Interogarea activă a materialelor utilizând fluorescența de rezonanță nucleară

calibrare generată cu ajutorul simulărilor Monte Carlo este prezentată în Figura 5.5. Figura conține variația densității areale față de \mathbb{A} , parametru ce este obținut din analiza datelor spectrale, calculat astfel [24]:

$$\mathbb{A} = \frac{R_{obj}^{NRF}}{R_{no\ obj}^{NRF}} \times \frac{R_{no\ obj}^{pair}}{R_{obj}^{pair}}, \quad (5.1)$$

unde R^{NRF} și R^{pair} sunt ratele de numărare pentru peak-urile de NRF și de 0.511 MeV pentru măsurători cu și fără obiect. Factorul de normare obținut din raportul ratelor de numărare aferente peak-ului de 0.511 MeV este necesar pentru corecția atenuării nerezonante și fluctuațiile intensității fasciculului. Pentru cazurile în care eroarea de normalizare depășește acuratețea dorită, sunt necesare măsurători precise a intensității fasciculului, acesta fiind subiectul secțiunii 5.3.

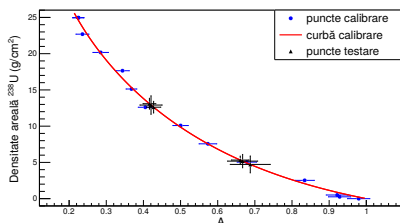


Figura 5.5: Curba de evaluare a densității areale bazată pe simulări Monte Carlo pentru ^{238}U . \mathbb{A} este raportul normalizat între ratele de numărare NRF cu și fără obiect, calculate folosind ecuația (5.1).

5.3 Măsurarea intensității unui fascicul gama

Măsurarea caracteristicilor spectrale ale fasciculelor de tip gama este un proces ce poate contribui semnificativ la erorile asociate

măsurătorilor experimentale. În această secțiune, este prezentat studiul utilizării împrăștierei Compton pentru măsurarea continuă a intensității și a energiei unui fascicul gama utilizând date experimentale obținute cu ajutorul instalației HI γ S.

5.3.1 Măsurători ale energiei și intensității unui fasciculul gama

Dificultățile asociate evaluării exacte a intensității au dus la dezvoltarea mai multor metode absolute cat și relative. Această secțiune detaliază o abordare bazată pe împrăștierea Compton ce utilizează un algoritm bazat pe comparația între histograme experimentale și simulate. Pentru a valida această metodă, am analizat datele experimentale obținute la HIGS, pentru intervalul 4.5–10 MeV, și am comparat rezultatele cu măsurării relative obținute cu un detector de tip paddel și cu măsurători absolute de activare pe ^{197}Au .

Metoda de analiză bazată pe împrăștierea Compton

Secțiunea de interacțiune diferențială pentru împrăștierea Compton poate fi calculată folosind expresia Klein-Nishina [25]. Dacă caracteristicile geometrice ale configurației și parametrii țintei de împrăștiere sunt cunoscute, expresia Klein-Nishina poate fi utilizată pentru a calcula intensitatea fasciculului incident din numărul de fotoni împrăștiați. Această metodă necesită plasarea unei ținte de împrăștiere din care fotonii incidenti vor fi împrăștiați într-un detector plasat la un unghi predefinit față de axa fasciculului.

Ansamblul experimental

Un detector HPGe coaxial cu eficiență relativă de 120% [26] a fost utilizat pentru a măsura energia, lățimea spectrală și intensitatea fasciculului. Un sistem motorizat a fost utilizat pentru a muta detectorul din configurația pentru măsurarea energiei (0°) în configurația pentru măsurarea intensității fasciculului (10°). Un colimator de cupru (lungime de 11.43 cm, rază exterioară de 5.08

5. Interogarea activă a materialelor utilizând fluorescența de rezonanță nucleară

cm și rază interioară de 0.953 cm) a fost poziționat în fața detectorului pentru a defini unghiul de împrăștiere și a reduce zgomotul de fond.

Simularea Geant4 a ansamblului

Reproducerea detectorului a fost efectuată pe baza desenelor tehnice ale detectorului, furnizate de producător. Unul dintre parametrii importanți ai configurației experimentale ce nu a putut fi dedus cu exactitate din experiment a fost poziția fascicului pe fața detectorului. Cea mai bună reproducere a datelor experimentale este obținută atunci când fasciculul cade pe fața detectorului la 2.7 cm de centrul detectorului, poziție pentru care datele simulate sunt în concordanță cu experimentul pentru toate cazurile de energie disponibile pentru această analiză. Caracteristicile spațiale ale fascicului au fost extrase din imagini obținute cu ajutorul unei camere CCD.

Măsurarea energiei unui fascicul gama

Parametrii energetici ai fascicului au fost determinați pentru mai multe energii discrete în intervalul 4.5–10 MeV. În cadrul analizei a fost aplicată o procedură în două etape pentru obținerea parametrilor fascicului gama. În prima etapă, a fost efectuată o operațiune de fitare a peak-ului de absorbție totală bazată pe o distribuție normală pentru determinarea unui set inițial de valori pentru parametrii energetici. În a doua etapă, am simulat răspunsul detectorului pentru un fascicul cu parametrii energetici obținuți în prima etapă. Parametrii fascicului au fost ajustați în vederea obținerii celui mai bun acord între simulare și experiment. Rezultatele procedurii de analiză pentru intervalul 4.5–10 MeV sunt prezentate în Figura 5.6a. Graficul prezintă o dependență liniară între energiile calculate și cele așteptate, obținute din parametrii acceleratorului.

Măsurarea intensității folosind împrăștierea Compton

Pentru a determina intensitatea fascicului gamma, detectorul a fost mutat în configurația pentru măsurarea intensității. În fața detectorului a fost adăugat un colimator pentru a limita distribuția unghiulară a fotonilor împrăștiați. Spectrele simulate în configurația de împrăștiere Compton au fost obținute folosind parametrii energetici calculați în Secțiunea 5.3.1. După obținerea unui acord bun între spectrele simulate și cele experimentale, intensitatea fascicului poate fi calculată folosind numărul de fotoni care au fost necesari pentru a genera spectrul simulat și timpul de achiziție al măsurării. Rezultatele acestei analize sunt prezentate în Figura 5.6b împreună cu valorile de intensitate ale fascicului obținute cu un detector de tip paddel [27] și cu măsurători de activare pe ^{197}Au .

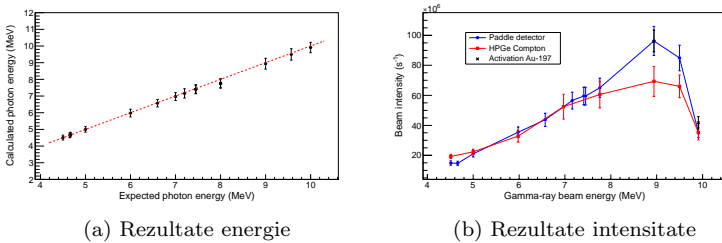


Figura 5.6: Rezultatele măsurătorilor energiei și intensității fascicului gamma pentru intervalul 4.5–10 MeV. Valoarea FWHM a energiei fascicului este inclusă ca incertitudine a datele calculate. Intensitatea fascicului a fost măsurată în trei configurații: cu metoda bazată pe împrăștierea Compton, cu un detector de tip paddel, și măsurători de activare cu ^{197}Au .

Un bun acord poate fi observat între valorile intensității fascicului obținute prin utilizarea împrăștierii Compton și a detectorului de tip paddel, cu excepția punctelor de la 9 și 9.57 MeV. O posibilă explicație pentru aceste erori poate fi timpulul mort din sistemul de achiziție a datelor, care pentru cele două măsurători a avut valori ridicate.

5.3.2 Ansamblul experimental propus pentru ELI-NP

O configurație similară pentru măsurători de intensitate și energie a fost propusă la ELI-NP. Sistemul este compus dintr-un ansamblu de detecție ce conține un detector HPGe cu eficiență relativă de 150% cuplat la un scut anti-Compton, un sistem de poziționare care permite rotirea și translația în raport cu ținta de împrăștiere și structura de susținere a ansamblului.

Pentru a caracteriza și optimiza instrumentul propus, a fost realizată o reproducere exactă a configurației în cadrul platformei de simulare Geant4. Pentru a extinde măsurătorile de eficiență până la 11.6 MeV, au fost efectuate măsurători cu reacții de captură de protoni pe ^{23}Na și ^{27}Al și cu surse de calibrare standard, ^{60}Co , ^{56}Co și ^{152}Eu . Figura 5.7 prezintă eficiența de detecție măsurată pentru detectorul HPGe împreună cu eficiența simulată.

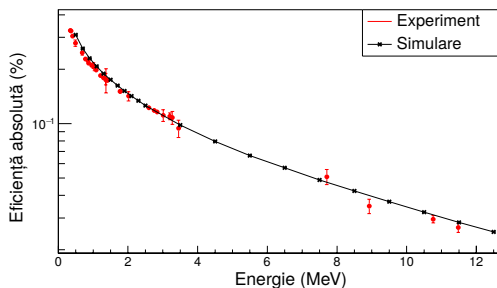


Figura 5.7: Eficiența absolută a unui detector de HPGe cu eficiență relativă de 150%. Punctele roșii și negre reprezintă datele experimentale și cele simulate pentru intervalul 1–12 MeV.

Pe baza acestor rezultate, un articol a fost publicat în *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment* [28].

Concluzii

În cadrul acestei teze au fost prezentate potențialele avantaje și dezavantaje ale caracterizării izotopice bazate pe NRF utilizând fascicule cu raze gama cvasi-monocromatice. Analiza a fost realizată utilizând o platformă construită în jurul funcționalităților de bază ale Geant4 pentru a oferi estimări mai exacte pentru măsurătorile de tip NRF. Pe parcursul acestei lucrări au fost vizate mai multe subiecte, de la evaluarea rezultatelor măsurătorilor NRF la aspecte asociate, precum selecția zonelor de interes pe baza numărului atomic efectiv și măsurători ale intensității fasciculului incident. Subiectele au fost abordate utilizând metode de tip Monte Carlo, validate în majoritatea cazurilor folosind date teoretice sau experimentale. Unul dintre obiectivele acestei lucrări a fost construirea unei platforme necesare pentru a genera estimări exacte ce pot fi utilizate ca puncte de plecare pentru proiectarea și optimizarea ansamblurilor experimentale.

Prima parte a acestei lucrări prezintă implementarea Geant4 a împrăștierii elastice a fotonilor, implementarea acoperă intervalul energetic între 0.3–20 MeV pentru toate numerele atomice. Implementarea a fost obținută utilizând un cadru teoretic complet pentru a ține cont de efectele de interferență dintre procesele implicate în secțiunea de împrăștiere. Utilizând formalismul matricei S , au fost calculate noi amplitudini de împrăștiere pentru împrăștierea Rayleigh. Procedura de validare a arătat un bun acord între datele simulate, experimentale și teoretice. Modelul actual reproduce cel mai bine datele experimentale pentru unghiurile de împrăștiere de peste 90 de grade, interval de interes pentru detecția fotonilor NRF pentru fizica nucleară fundamentală, precum și pentru aplicațiile bazate pe NRF.

O componentă suplimentară cu o influență considerabilă a zgomotului de fond pentru măsurătorile NRF este suprapunerea temporală a semnalelor. Implementarea algoritmului a fost necesară pentru a evalua efectul suprapunerii semnalelor asupra spectru-

lui măsurat și pentru a genera estimări exacte pentru ratele de numărare preconizate. Pentru a cuantifica modificările spectrale asociate cu acest efect, lanțul digital de achiziție propus pentru sistemul de detecție ELIADE a fost modelat și implementat ca parte a codului de simulare. Rezultatele procedurii de validare bazate pe ratele de numărare a peak-urilor au arătat un bun acord între datele simulate și cele experimentale.

Mai departe, au fost tratate tehnici de selecție a unei zone de interes, bazate pe date de atenuare la două energii, acestea fiind necesare pentru a gestiona limitările practice ale analizelor izotopice bazate pe NRF. A fost propusă o nouă procedură de analiză a datelor de atenuare la două energii bazată pe rețele neuronale artificiale. Modelul bazat pe rețele neuronale a fost comparat cu metoda dual-R pentru seturi de date simulate și experimentale. Pentru această comparație, un set de date experimentale mono-pixel pentru fotoni în intervalul 1.7–12.3 MeV, obținut cu ajutorul reacțiilor de captură de protoni pe ținte compuse, a fost completat cu un set de date simulat obținut cu ajutorul platformei Geant4. Un avantaj considerabil a fost demonstrat pentru metodă bazată pe rețele neuronale artificiale, cu îmbunătățiri de aproximativ 48% și 24% pentru datele simulate și experimentale a valorilor RMSE. Analiza a fost extinsă la procesarea imaginilor radiografice de transmisie pentru două energii. Un număr mare de scene 2D, care conțin obiecte în formă cilindrică și cuboidală, au fost generate pentru a fi utilizate ca set de date de optimizare și validare a celor două modele. Pentru scenele 2D, o analiză directă a imaginii, utilizând un model bazat pe rețele neuronale convoluționale, a fost comparată cu abordarea pixel-cu-pixel pentru metoda raportului la două energii. Procedura de evaluare a arătat un avantaj considerabil pentru abordarea bazată pe rețele neuronale în ceea ce privește calitatea imaginii, eroarea de evaluare și incertitudinea asociată.

În partea finală a tezei, analiza s-a concentrat pe particularitățile interogării active bazată pe NRF. Aici au fost evidențiate avantajele și dezavantajele utilizării unui fascicul LCS cuplat cu un sistem de detecție bazat pe detectori HPGe pentru detecția ^{238}U . Detectorii HPGe, parte a sistemului ELIADE, au fost modelați în cadrul platformei Geant4, implementare validată din punct de

vedere al eficienței de detecție și analizei temporale. În ceea ce privește eficiența de detecție, cristalele detectorilor au fost validate cu ajutorul datelor experimentale pentru energii de până la 12 MeV, obținute cu reacții de captură a protonilor. Procedurile de validare au arătat un bun acord între datele experimentale și implementarea detectorului. În urma implementării, au fost studiate caracteristicile spectrale, zgomotul de fond din zona de interes și efectele suprapunerii semnalelor. Această analiză a generat o valoare optimă pentru grosimea stratului de plumb necesar pentru ecranarea zgomotului de fond. În următorul pas al analizei au fost studiate rezultatele unei proceduri de scanare de tip raster, ce a vizat evidențierea obiectelor ce conțin ^{238}U . În ceea ce privește calitatea imaginii, rezultatele arată că valoarea recomandată a raportului contrast-zgomot teoretic poate fi atinsă numai pentru concentrații mari de ^{238}U . Cu toate acestea, o valoare a raportului contrast-zgomot de 1, ce este asociată cu un obiect discernabil, poate fi obținută pentru concentrații de ^{238}U până la 1%.

O abordare bazată pe curbe de calibrare Monte Carlo a fost luată în considerare pentru procedura de evaluare a densității areale. Capacitățile acestei metode au fost evaluate pe baza datelor simulate obținute pentru mai multe cazuri de test, care au arătat un acord bun în comparația cu valorile așteptate. Evaluarea densității areale a fost făcută sub presupunerea ca intensitatea fasciculului este fixă. Cu toate acestea, pentru un scenariu experimental real, cunoașterea intensității fasciculului este esențială, acesta fiind punctul central al ultimei părți a capitolului. Secțiunea finală investighează posibilitatea de a măsura energia și intensitatea unui fascicul de raze gama utilizând un detector HPGe. În scopul dezvoltării și validării metodei, au fost măsurate date experimentale ce conțin măsurători efectuate cu un detector HPGe la HIGS pentru energii ale fotonilor în intervalul 4.5–10 MeV. Analiza datelor a fost efectuată cu o abordare bazată pe compararea histogramelor, fiind comparate spectrele experimentale și cele simulate pentru extragerea parametrilor fasciculului. În ceea ce privește energia fasciculului, metoda a arătat rezultate excelente în comparație cu valorile așteptate pentru intervalul de energie selectat. În ceea ce privește intensitatea fasciculului, rezultatele metodei bazate pe

împrăștierea Compton au fost comparate cu masuratori de activare pe ^{197}Au și măsurători cu un detector de tip paddel. A fost obținută o concordanță bună între rezultatele așteptate și cele calculate, cu excepția punctelor de la 9 și 9.57 MeV pentru care metoda subestimează valorile reale. Erorile au fost atribuite timpului mort din în lanțul de achiziție.

La nivelul actual, analiza izotopică bazată pe NRF oferă capacitatea de a identifica cantități mici izotopice în obiecte cu Z_{eff} mare. Cu toate acestea, metoda prezintă limitări practice semnificative datorită timpului de măsurare relativ lung. În timp ce îmbunătățiri semnificative în ceea ce privește eficiența de detecție, reducerea nivelului de zgomot și analiza datelor pot fi încă obținute, îmbunătățirea lățimii spectrale a fasciculului ar putea fi corelată cel mai bine cu scăderea timpului de măsurare. Reducerea lățimii spectrale cu până la două ordine de mărime ar permite ca metoda să fie practică pentru scene mari sau măsurători 3D.

Lucrarea prezentată oferă mai multe posibilități de cercetare ulterioară. În ceea ce privește analiza datelor, mai mulți algoritmi au potențialul de a simplifica sau extinde procedura de analiză a datelor. Metode bazate pe rețele neuronale artificiale au arătat rezultate promițătoare pentru analiza spectrală automată și procesarea imaginilor. Pe lângă acestea, alte tehnici de procesare a semnalelor care vizează reducerea timpului de achiziție a datelor, cum ar fi compressed sensing, nu au fost încă investigate în contextul analizelor izotopice NRF. Pe partea de optimizare a ansamblului experimental, o analiză suplimentară bazată pe detectorii standard pentru aplicații precum NaI, CsI, și PVT, detectori cu costuri reduse de întreținere, poate genera estimări orientate către implementări practice. O astfel de optimizare ar putea fi utilizată pentru a genera un set minim de parametri necesari pentru fascicul de tip LCS ce ar permite utilizarea analizelor izotopice NRF pentru sisteme de scanare cu randament ridicat.

Bibliografie

- [1] www.eli-np.ro, 2019.
- [2] C. A. Ur *et al.*, Rom. Rep. Phys. **68**, S483 (2016).
- [3] F. Camera *et al.*, Rom. Rep. in Phys. **68**, S539 (2016).
- [4] G. Suliman *et al.*, Rom. Rep. Phys. **68**, S799 (2016).
- [5] M. J. Berger *et al.*, XCOM: Photon cross section database, 2010.
- [6] S. V. Naydenov, V. D. Ryzhikov, and C. F. Smith, Nucl. Instr. Meth. A **537**, 462 (2005).
- [7] W. Bertozzi and R. J. Ledoux, Nucl. Instr. and Meth. B **241**, 820 (2005).
- [8] S. Agostinelli *et al.*, Nucl. Instr. and Meth. A **506**, 250 (2003).
- [9] X-5 Monte-Carlo Team, MCNP - A General N-Particle Transport Code - LA-UR-03-1987, 2003.
- [10] L. Kissel, Rad. Phys. Chem. **59**, 185 (2000).
- [11] H. Falkenberg *et al.*, Atom. Data Nucl. Data **50**, 1 (1992).
- [12] R. Capote *et al.*, Nucl. Data Sheets **110**, 3107 (2009).
- [13] R. Kinsey *et al.*, The NUDAT/PCNUDAT Program for Nuclear Data, paper submitted to the 9th International Symposium of Capture Gamma-ray Spectroscopy and Related Topics, 1996.
- [14] M. Schumacher, P. Rullhusen, F. Smend, W. Mückenheim, and H. G. Börner, Nucl. Phys. A **346**, 418 (1980).

- [15] G. V. Turturica, V. Iancu, G. Suliman, and C. A. Ur, Nucl. Instr. and Meth. B **436**, 68 (2018).
- [16] CAEN, MC2Analyser User Manual rev. 5, 2017.
- [17] D. G. Ghita *et al.*, Proc. of HIAT , TUB02 (2012).
- [18] F. Chollet *et al.*, Keras, 2015.
- [19] M. Abadi *et al.*, TensorFlow: Large-scale machine learning on heterogeneous systems, 2015, Software available from tensorflow.org.
- [20] M. Kotila, Talos, 2018.
- [21] A. F. Agarap, Deep Learning using Rectified Linear Units (ReLU), 2018, arXiv:1803.08375.
- [22] S. Ioffe and C. Szegedy, ICML'15 Proceedings of the 32nd International Conference on Machine Learning **37**, 448 (2015).
- [23] G. V. Turturica *et al.*, EPJ Plus **135**, 140 (2020).
- [24] B. J. Quiter, B. A. Ludewigt, V. V. Mozin, C. Wilson, and S. Korbly, Nucl. Instr. and Meth. B **269**, 1130–1139 (2011).
- [25] O. Klein and T. Nishina, Z. Phys. **52**, 853 (1929).
- [26] M. Blackston, Ph.D. thesis, Duke University (unpublished), 2007.
- [27] R. E. Pywell, O. Mavrichi, W. A. Wurtz, and R. Wilson, Nucl. Instr. and Meth. A **606**, 517 (2009).
- [28] G. V. Turturica *et al.*, Nucl. Instr. and Meth. A **921**, 27 (2019).