



Universitatea Națională de
Știință și Tehnologie
POLITEHNICA BUCUREȘTI



Facultatea de
ȘTIINȚE APLICATE

Specializarea
INGINERIE FIZICĂ

Rezumat

APLICAȚII ALE FASCICULELOR DE RADIĂȚII
IONIZANTE LA IRADIERI ÎN ATMOSFERĂ

Doctorand
Alexandru ENCIU

Conducătorul Tezei
prof. dr. Gheorghe CĂȚA-DANIL

Coordonatorul științific
cs1 dr. Mihai IOVEA

București, Septembrie 2023



Universitatea Națională de
Știință și Tehnologie
POLITEHNICA BUCUREȘTI



Facultatea de
ȘTIINȚE APLICATE

Specializarea
INGINERIE FIZICĂ

Rezumat

APLICAȚII ALE FASCICULELOR DE RADIĂȚII IONIZANTE LA IRADIERI ÎN ATMOSFERĂ

Doctorand
Alexandru ENCIU

Comisia de evaluare

Președinte	Prof.dr. Cristina STAN	Universitatea Națională de Știință și Tehnologie Politehnica București, Facultatea de Științe Aplicate
Conducătorul Tezei	Prof. dr. Gheorghe CĂTA-DANIL	Universitatea Națională de Știință și Tehnologie Politehnica București, Facultatea de Științe Aplicate
Membru	Conf. dr. Gabriel SULIMAN	Universitatea Națională de Știință și Tehnologie Politehnica București, Facultatea de Științe Aplicate
Membru	Prof. dr. Mihaela SIN	Universitatea din București, Facultatea de Fizică
Membru	CSII. dr. Gihan VELIȘA	Institutul de Fizică și Inginerie Nucleară Horia Hulubei

Cuprins

1	Introducere	5
2	Radiații X și fascicule de protoni	7
3	Sistem de cartografiere elementală 2D/3D a probelor folosind XRF	13
4	Sistem de iradiere cu fascicul extern de protoni	17
5	Concluzii și perspective	35

Capitolul 1

Introducere

Teza de față a fost elaborată la acceleratorul de 3 MV al Institutului de Fizică și Inginerie Nucleară Horia Hulubei (IFIN-HH) în colaborare cu firma Sc. AccentPro2000 SRL. Aceasta se axează pe dezvoltarea de echipament și metodă pentru trei direcții de cercetare. Prima temă de cercetare se concentrează pe dezvoltarea unui sistem de cartografiere elementală, pentru probe geologice, ce se bazează pe procesul de fluorescență de radiații X (XRF). Acest sistem a fost dezvoltat pentru a fi folosit drept platformă de dezvoltare pentru pentru celelalte două teme abordate în lucrare. Cea de-a doua respectiv cea de-a treia temă se bazează pe dezvoltarea unui sistem de iradiere cu fascicul de protoni extras în aer ce a fost folosit pentru cartografierea elementală de probe folosit procesul de radiație X indusă de particule accelerate (PIXE) respectiv de iradierea, în regim pulsant, de probe biologice in vitro. Rezultatele obținute au fost subiectul a 3 publicații cotate AIS.

Manuscrisul tezei este structurat pe cinci capitole. Primul capitol este unul introductiv în domeniu și metodă. În cel de-al doilea capitol sunt prezentate considerațiile teoretice ale radiațiilor X respectiv a fasciculelor de protoni accelerați. Capitolele 3 și 4 tratează dezvoltarea de echipament și metodă pentru temele enumerate, urmând ca în capitolul 5 să fie relatate concluziile generale respectiv perspectivele asupra temelor prezentate.

În Capitolul 1, este prezentat un scurt istoric al aplicațiilor radiațiilor

ionizante, plecând de la descoperirea lor de către W. C. Roentgen și H. Becquerel, în 1895-1896, până la cele mai recente noutăți din domeniu. Tot aici sunt etalate pe scurt motivațiile temelor de cercetare alese.

Capitolul 2

Radiații X și fasciculele de protoni

În prima parte a capitolului 2 al tezei, au fost abordate considerațiile teoretice necesare pentru a înțelege fenomenele fizice ce apar în timpul interacției radiației X și a fasciculelor de protoni cu materia. În prima parte a capitolului este explicată producerea de raze X prin expunerea celor două mecanisme principale de producere: radiația X de frânare, provenită din decelerarea electronilor în câmpul electric al atomului, respectiv radiația X caracteristică ce provine din tranzițiile radiative ale electronilor între orbitalii atomului (Figura 2.1).

Tot în acest capitol a fost tratat modul de funcționare al generatoarelor de radiații X, deoarece acestea sunt principala sursă de radiație X folosită pentru aplicații. Pentru înțelegerea principiului de funcționare, a fost utilizat software-ul „SpeckCalc” pentru a simula spectrul de radiație X de emisie pentru diferiți parametri de operare (variația curentului de fascicul respectiv a tensiunii de accelerare), Figura 2.2b și 2.2a.

Deoarece două din temele de cercetare din teză se bazează pe spectroscopia cu radiații X. În secțiunea dedicată structurii păturilor electronice a fost tratată teoria necesară pentru a înțelege structura orbitalilor atomici respectiv mecanismele de tranziție ale electronilor între acestea conform regulilor impuse de mecanica cuantică (Figura 2.3).

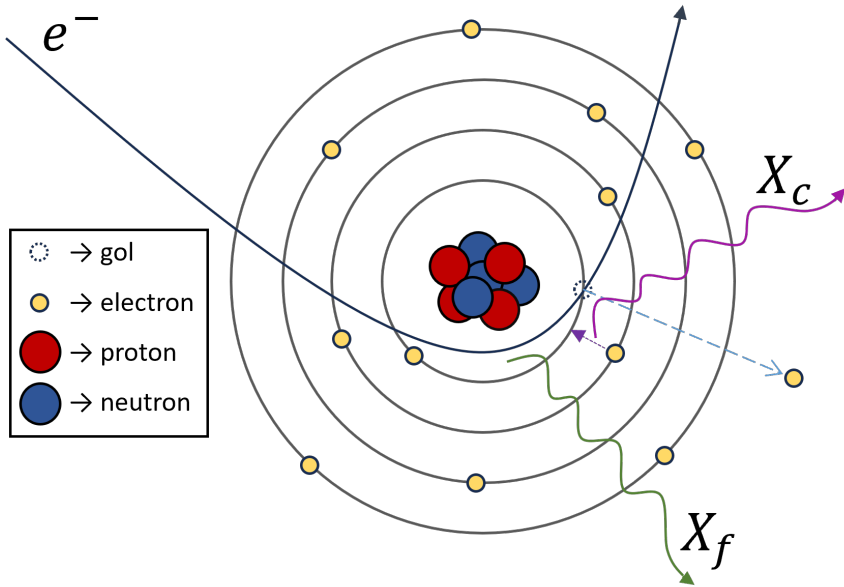


Figura 2.1: Reprezentarea grafică a celor două mecanisme de producere a radițiilor X în urma excitării atomului cu electroni accelerați, unde e^- este electronul incident, iar X_f și X_c sunt fotonii X de frânare respectiv caracteristici.

La sfârșitul secțiunii ce tratează producerea de radiții X, a fost descrisă interacția radițiilor X cu materia prin mecanismele reprezentate în Figura 2.4. Aceste fenomene contribuie la atenuarea fascicului primar cât și la atenuarea razelor X caracteristice ce sunt emise în urma analizelor elementale. Legea care descrie atenuarea este de tip exponențial și poartă numele de legea Beer-Lambert.

În a doua parte a Capitolului 2 este tratată producerea fasciculelor de protoni din ținte gazoase prin utilizarea surselor de ioni de tipul plasmatron respectiv din ținte solide utilizând surse de pulverizare și accelerarea acestora utilizând un accelerator Tandem.

Tot în această secțiune, este studiată interacția fasciculelor de protoni cu materia prin compararea a două simulări de pierdere de energie pe unitate de lungime, pentru un fascicul de protoni de 3 MeV respectiv un fascicul de radiții X de 15 keV, pentru a pune în evidență caracterul

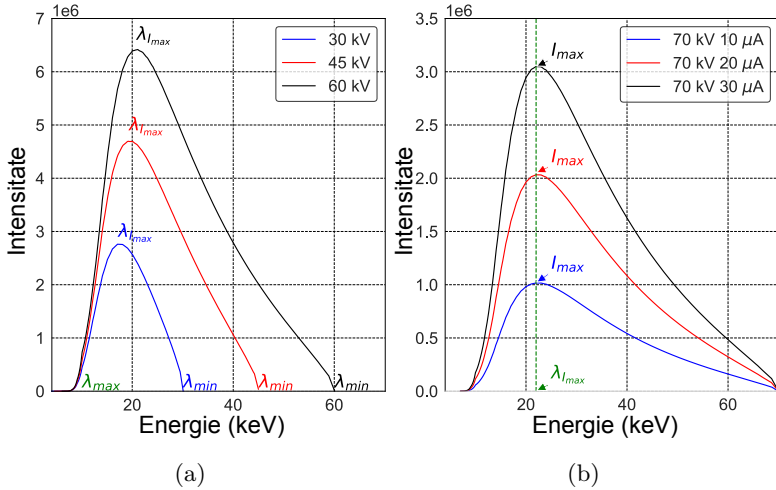


Figura 2.2: a. Simularea spectrului continuu, utilizând „SpekCalc”, pentru tensiunile de accelerare ale electronilor de 30, 45 și 60 kV pentru a pune în evidență variația lui $\lambda_{T_{max}}$ în funcție de energia incidentă a fascicului de electroni; b. Simularea spectrului continuu pentru tensiunea de accelerare de 70 kV și curenții de fascicul de 10, 20, 30 μA pentru a pune în evidență variația amplitudinii I_{max} în funcție de numărul de electroni ce interacționează cu ținta în unitate de timp.

exponențial al radiațiilor X în comparație cu curba Bragg a protonilor, în care se observă că cea mai mare pierdere de energie se află în regiunea peak-ului Bragg (Figura 2.5).

Două dintre temele de cercetare ale tezei sunt concentrate în jurul analizei elementale calitative respectiv cantitative. De aceea în ultima parte a Capitolului 2, a fost tratată analiza elementală cu raze X respectiv cu fascicule de protoni, punând în evidență dependența de tip linear dintre intensitatea radiațiilor X detectate respectiv fracția masică pentru probe subțiri, dar și caracterul nelinier în cazul probelor groase datorită efectelor de auto-atenuare a radiațiilor X în probă. Tot aici au fost expuse și influențele radiației X de emisie secundară în calcularea concentrațiilor elementale.

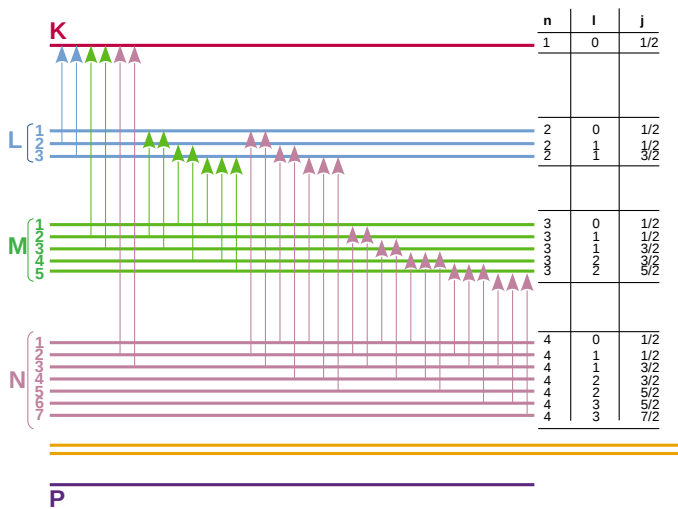


Figura 2.3: Tranzitiile electronilor permise între păturile K, L, M și N.

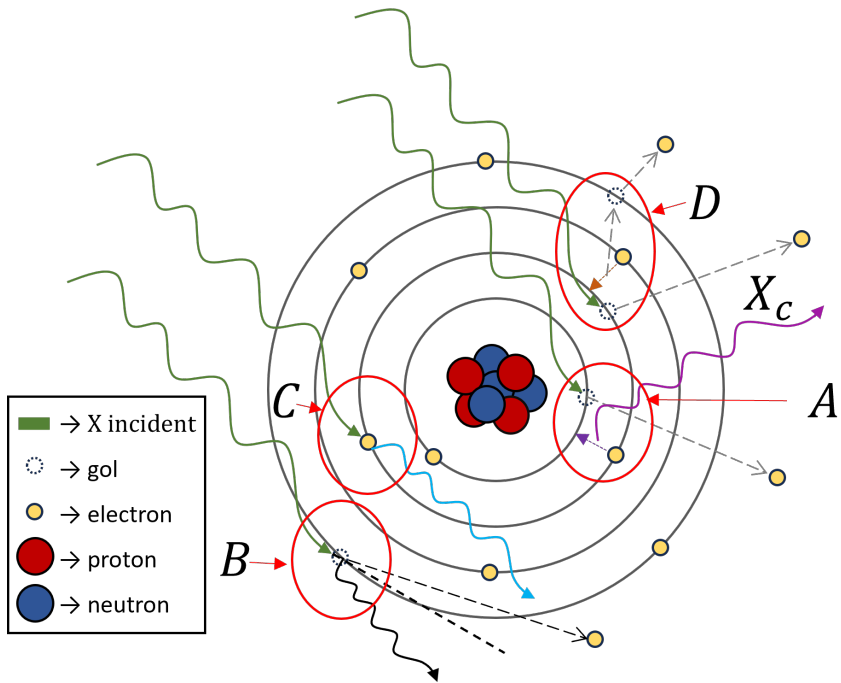


Figura 2.4: Reprezentarea grafică a: A. Efect fotoelectric; B. Efect Compton; C. Efect Rayleigh; D. Efect Auger.

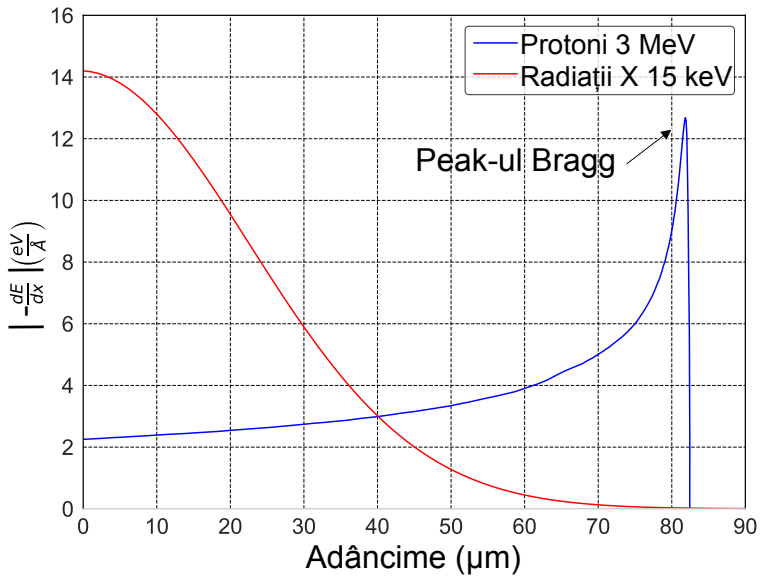


Figura 2.5: Comparație între energia depozitată de un fascicul de radiații X de 15 keV și un fascicul de protoni de 3 MeV, la trecerea printr-o țintă de Al.

Capitolul 3

Sistem de cartografiere elementală 2D/3D a probelor folosind XRF

În Capitolul 3 a fost tratată dezvoltarea de echipament și metodă pentru un ansamblu experimental capabil să realizeze cartografiere elementală 2D respectiv 3D. Inițial acest sistem a servit drept platformă de dezvoltare și testare pentru sistemul de iradiere cu fascicul de protoni în aer din Capitolul 4. Rezultatele obținute în timpul testelor au fost peste așteptări ceea ce a condus la perfecționarea sistemului și utilizarea lui la scanarea de carote geologice.

În momentul de față, există două tipuri de scanere pentru carote geologice: Scanere unidimensionale ca de exemplu scannerul ITRAX® , produs de compania Avaatech, care poate scana carota geologică doar pe lungime, generând o hartă de distribuție a concentrațiilor elementale, în funcție de lungimea probei. Principalul dezavantaj este reprezentat de prelucrările adiționale necesare înainte de scanare, ceea ce conduce la costuri adiționale. Cel de-al doilea tip de scanner utilizat larg în domeniul geologiei este M4Tornado® , produs de compania Bruker. Acesta poate să producă cartografiere elementală 2D, dar ca și în cazul scannerului ITRAX® , probele

sunt secționare pentru a expune o suprafață plană, iar suprafața scanată nu poate fi mai mult de câțiva centimetri pătrați datorită dimensiunilor mici ale dispozitivului.

În capitolul de față este descris un ansamblu experimental care este capabil să producă cartografiere elementală pe suprafața cilindrică a carotelor geologice, fără a fi necesare prelucrări adiționale, și reconstruirea hărților elementale în modurile de vizualizare 1D, 2D și 3D.

Ansamblul experimental (Figura 3.1) este realizat dintr-un manipulator de probe dedicat, ce permite deplasarea probei pe două axe de translație și una de rotație, un generator de radiații X pentru producerea procesului de fluorescență, și un detector de radiații X pentru măsurarea radiației X caracteristice emise de probă. Integrarea sistemului se realizează cu un software de comandă, dedicat, ce este scris cu ajutorul limbajului de programare vizuală LabVIEW. Acesta permite controlarea independentă a componentelor sistemului, dar și automatizarea întregului proces de scanare.

Reconstrucția de hărți elementale presupune extragerea precisă a valorii intensităților radiațiilor X măsurate pentru fiecare punct de măsură. Acestea pot fi extrase în urma realizării unui FIT respectiv corecții adiționale pentru eficacitate de detecție și probabilitate de producere a radiațiilor X.

Comisionarea întregului sistem s-a făcut cu o probă de brejie. Datele obținute fiind utilizate la dezvoltarea și perfecționarea algoritmilor de reconstrucție și vizualizare pentru modurile 1D (Figura 3.2), 2D (Figura 3.3) și 3D (Figura 3.4b). În modul 1D, spectrele măsurate dintr-un strat de măsură sunt sumate, iar valoarea intensității radiațiilor X pentru fiecare element prezent este reprezentată grafic în funcție de înălțime. În modul 2D, este reprezentată abundența relativă a elementelor chimice pe suprafața cilindrică desfășurată. Scala de culoare reprezintă cantitatea relativă a unui element chimic, pentru fiecare element în fiecare punct de măsură. Modul de reprezentare 3D, permite localizarea conglomeratelor de minerale pe suprafața cilindrică, într-un spațiu virtual 3D, unde culoarea fiecăruia element indică specia de atomi ce se localizează într-un punct de măsură.

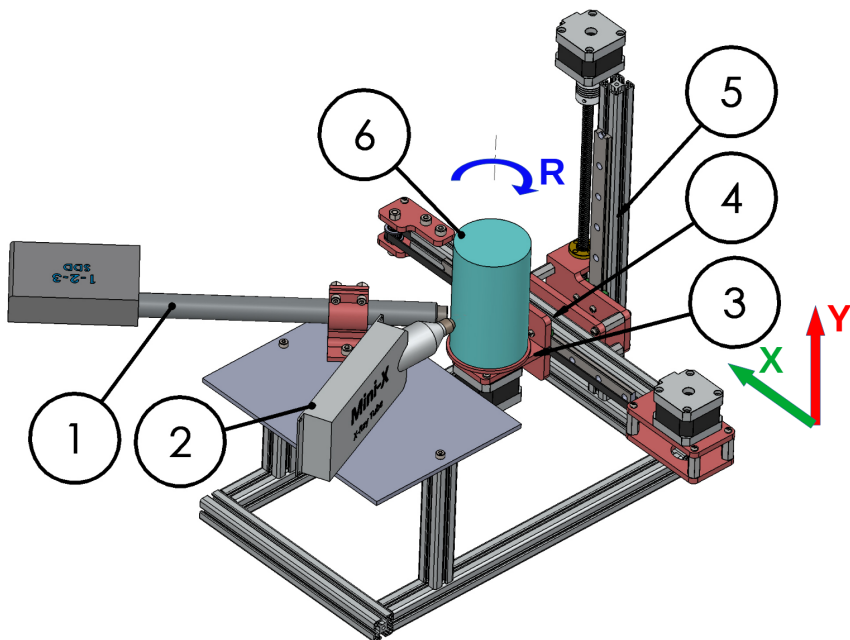


Figura 3.1: Proiectul CAD al ansamblului experimental: 1. Detector de radiații X; 2. Generator de radiații X; 3. Masă de rotație R; 4. Axa de translație X; 5. Axa de translație Y; 6. Proba analizată.

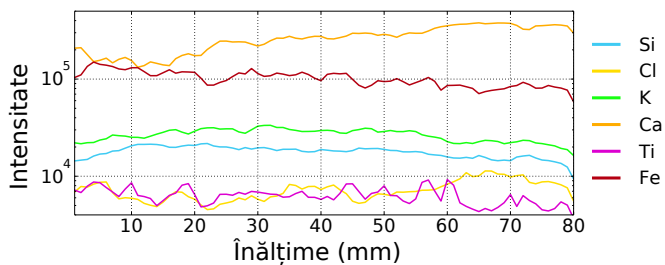


Figura 3.2: Reprezentare 1D: Abundența relativă a elementelor în funcție de înălțimea probei pentru mostra analizată.

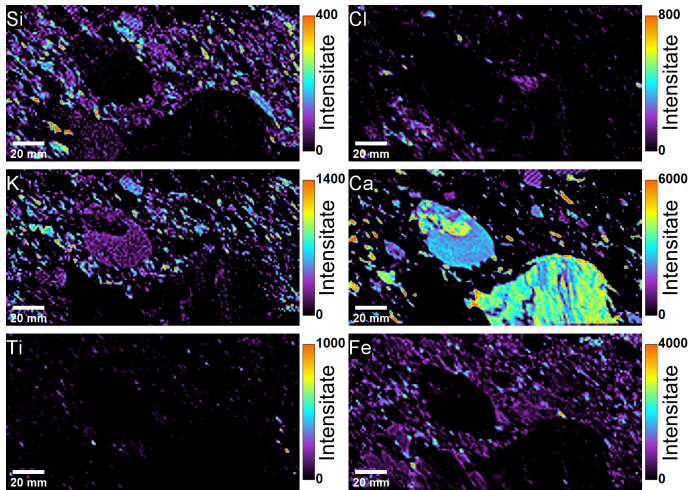


Figura 3.3: Reprezentare 2D: Hărți elementale reconstruite pentru Si, Cl, K, Ca, Ti și Fe.

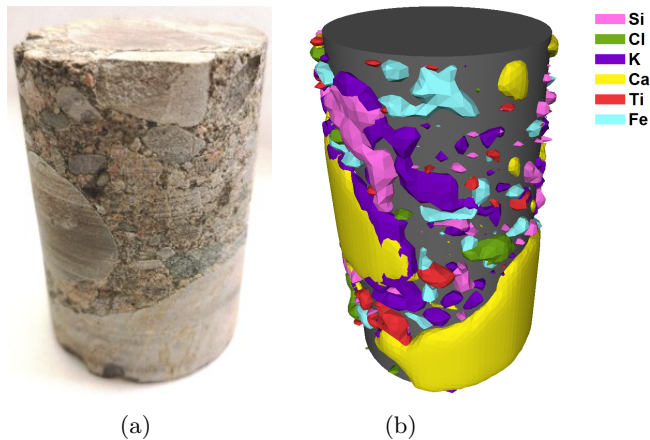


Figura 3.4: Reprezentare 3D: A. Proba folosită pentru comisionare, diametru 60 mm înălțime 80 mm; B. Reconstrucția 3D pentru elementele Si, Cl, K, Ca, Ti și Fe.

Capitolul 4

Sistem de iradiere cu fascicul extern de protoni

În Capitolul 4 al tezei este tratată dezvoltarea hardware, software și metoda de lucru pentru un sistem de iradiere, instalat pe linia IBA a acceleratorului de 3 MV IFIN-HH, ce folosește fascicul de protoni extras în aer. Aplicațiile principale ale sistemului de față vor fi iradierea de probe biologice in vitro, cu fascicul pulsant de protoni, determinarea concentrațiilor elementale respectiv cartografierea 2D de elemente chimice utilizând PIXE.

Pentru a putea asigura iradierea de probe biologice și analize PIXE în condiții optime, sistemul de iradiere poate fi folosit în două configurații ce au fost denumite „Configurație Iradiere” și „Configurație PIXE” (Figura 4.1). În configurația pentru iradiere de probe biologice (Figura 4.1), fasciculul de protoni este deflectat de un deflector electrostatic, ce este comandat de o unitate de pulsare, în unul dintre colimatorii acceleratorului. Fasciculul ajunge pe direcția de mers doar în timpul unui puls. Pentru a asigura uniformitatea fasciculului, o folie subțire de Au împrăștie elastic protonii, lărgind profilul Gauss al acestuia. Extragerea fasciculului în aer se realizează printr-o fereastră de nitrură de siliciu de $10 \times 10 \text{ mm}^2$ sau $15 \times 15 \text{ mm}^2$, în funcție de suprafața de iradiere dorită. Alinierea probei cu fasciculul de protoni este realizată cu ajutorul unei camere video și a doi

laseri de aliniere. Deplasarea probei este asigurată de un manipulator de probe pentru axele X, Y și Z ce este controlat de la distanță.

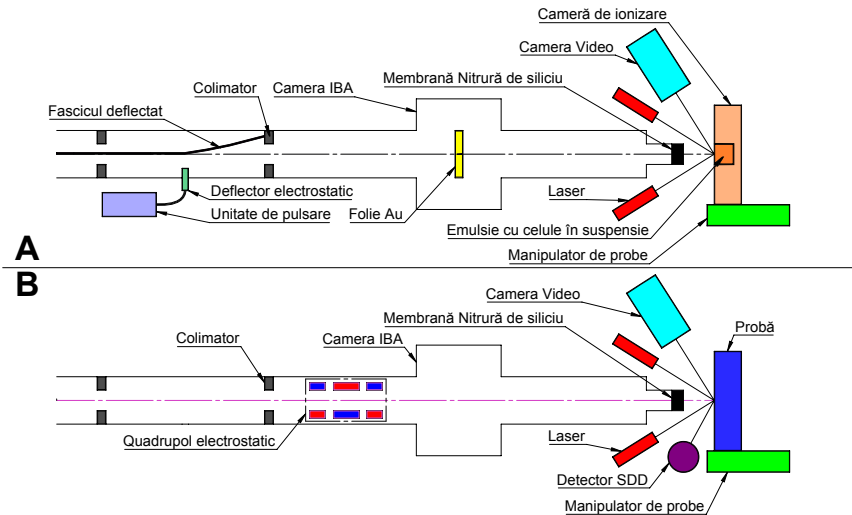


Figura 4.1: Schema bloc a celor două configurații de operare a sistemului de iradiere cu fascicul extern de protoni; A. Configurația utilizată pentru iradierea în regim pulsant a probelor biologice; B. Configurația utilizată pentru a face analize PIXE.

În configurația experimentală pentru analize elementale cu PIXE (Figura 4.1), fasciculul de protoni este focalizat cu ajutorul lentilei cuadrupole electrostatic, ce se localizează înaintea de camera de reacție IBA, direct pe proba în analiză printr-o fereastră de nitruură de siliciu de $3 \times 3 \text{ mm}^2$. La fel ca în cazul iradierilor de probe biologice, proba este aliniată cu ajutorul a doi laseri, o cameră video și un manipulator de probe. Pentru detectarea radiațiilor X, ce se emit în timpul PIXE, este utilizat un detector de siliciu, iar pentru reducerea intensității radiațiilor X în aer, în spațiul dintre probă și detector se injectează heliu la o viteză de curgere constantă.

Pulsarea fascicului de protoni pentru iradierea probelor biologice este realizată cu o unitate de pulsare, ce este comandată de un PC prin intermediul unui generator de semnal. Schema bloc de funcționare se poate fi vizualizată în Figura 4.2. În urma testelor (Figura 4.3) s-a observat că forma și durată pulsurilor de protoni sunt în concordanță cu valorile

setate. Pentru automatizarea și miniaturizarea întregului sistem de iradiere, a fost proiectat un circuit dedicat ce este comandat de software-ul de comandă dezvoltat în cadrul tezei.

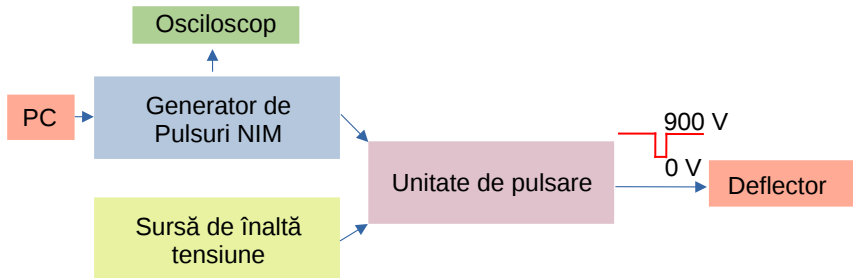


Figura 4.2: Schema logică sistemului care produce tensiunea înaltă pulsată pentru deflectorul electrostatic.

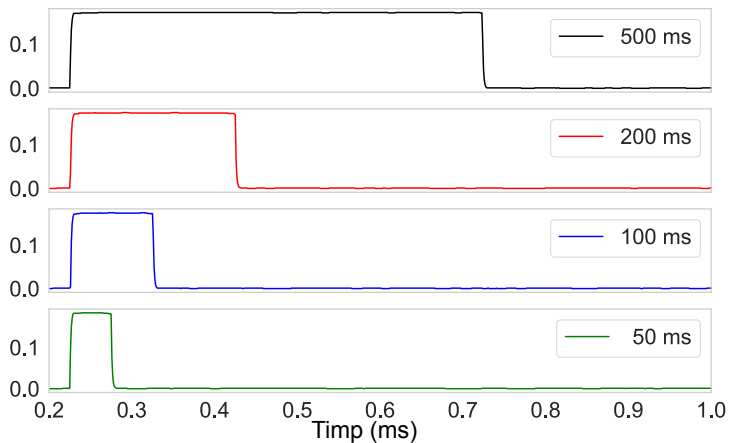


Figura 4.3: Testarea unității de pulsare cu fascicul de protoni, pulsuri cu o durată de 50, 100, 200, 500 ms

Extragerea fascicului de protoni în aer pentru cele două configurații de lucru se realizează prin utilizarea a trei ferestre de nitrură de siliciu, fiecare dintre ele fiind utilizată în funcție de suprafața iradiată dorită. În teza de față, pentru fereastra de $3 \times 3 \text{ mm}^2$ a fost dezvoltată o nouă proce-

dură de lipire pentru a mări longevitatea acestora (Figura 4.4). Procedura implică aplicarea unei folii dublu adeziv de carbon pe suprafața suportului de montare. Rolul acesteia este de a asigura un contact termic cât mai bun, respectiv disiparea uniformă tensiunilor mecanice. Etanșarea ferestrei la vid, se realizează prin aplicarea unei rășini epoxy dedicată, pe muchiile ferestrei.

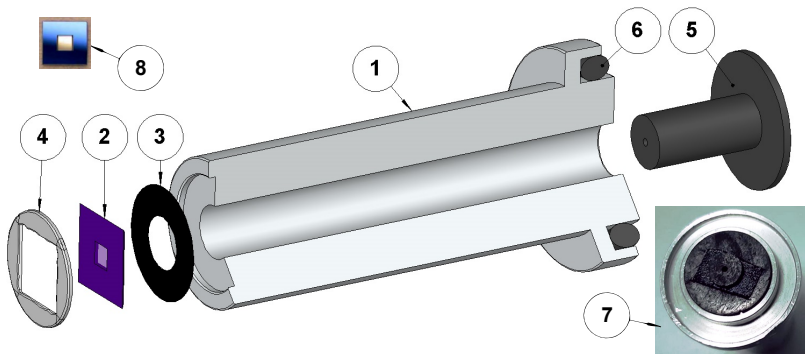


Figura 4.4: Desenul CAD al suportului pe care se montează membrana de Si₃N₄ de 3x3 mm: 1. Suport de aluminiu; 2. Fereastra de Si₃N₄; 3. Substrat de bandă dublu adezivă de carbon; 4. Rășină epoxy de tipul Loctite® EA 9492; 5. Colimator din grafit; 6. Garnitură de cauciuc pentru etanșare; 7. Imagine cu colimatorul de grafit; 8. Imagine cu fereastra de Si₃N₄ înainte de montaj;

În ceea ce privește fereastra de 15x15 mm², aceasta a fost dezvoltată și testată în cadrul tezei Figura 4.5. În Figura X se poate vedea desul CAD al acesteia. Ferestrele de dimensiuni mari sunt montate deja de fabricant pe un suport de aluminiu. Acesta este plasat într-un suport intermediar ce se înfiletează pe extensia coloanei de vid a acceleratorului. În urma testelor (Figura 4.6) cu fascicul de protoni pe un film radio-cromic, s-a observat că forma și uniformitatea fascicului de protoni sunt în concordanță cu așteptările.

Probele biologice ce trebuiesc iradiate sunt crescute direct pe o folie de mylar, care este plasată într-o cameră de iradiere ce asigură sterilitatea și hidratarea acestora. În teza de față s-au utilizat două versiuni de camere de

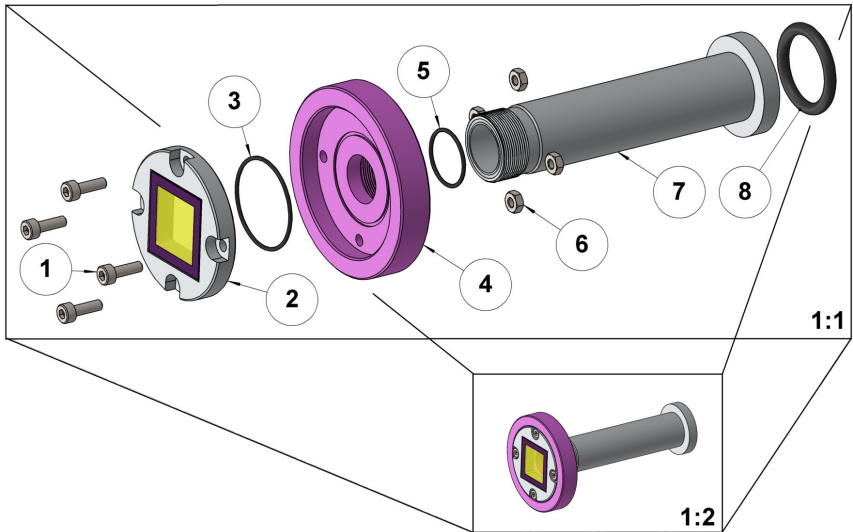


Figura 4.5: Desenul CAD al suportului pe care se montează fereastra de Si_3N_4 de 10x10 respectiv 15x15 mm: 1. Șuruburi M3; 2. Fereastra de Si_3N_4 montată pe o ramă de Al; 3. Garnitura care asigură etanșarea dintre rama ferestrei și suportul intermediar; 4. Suport intermediar; 5. Garnitura care asigură etanșarea dintre suportul intermediar și extensia de Al; 6. Piulițe M3; 7. Extensie de Al; 8. Garnitura care asigură etanșarea cu coloana de accelerare.

iradiere. Prima versiune a fost utilizată în combinație cu fereastra nitrură de siliciu de 10x10 mm². Această versiune a fost folosită exclusiv pentru iradieri manuale. A doua versiune de cameră de iradiere a fost utilizată în combinație cu fereastra de 15x15 mm². Aceasta fiind proiectată, executată și testată în lucrarea de față. În faza de proiectare au fost realizate simulări de pierdere de energie a fasciculelor de protoni de diferite energii prin materialele traversate (Figura 4.7) respectiv desenul CAD de execuție al acesteia (Figura 4.8). Momentan camera este încă perioada de testare și comisionare.

În timpul analizelor PIXE, radiațiile X caracteristice emise de probă suferă un efect de atenuare la traversarea aerului ce se află între detector și probă, de aceea în lucrarea de față, a fost dezvoltat un sistem ce suflă heliu în spațiul dintre detector și probă. În Figura 4.9, se poate vedea

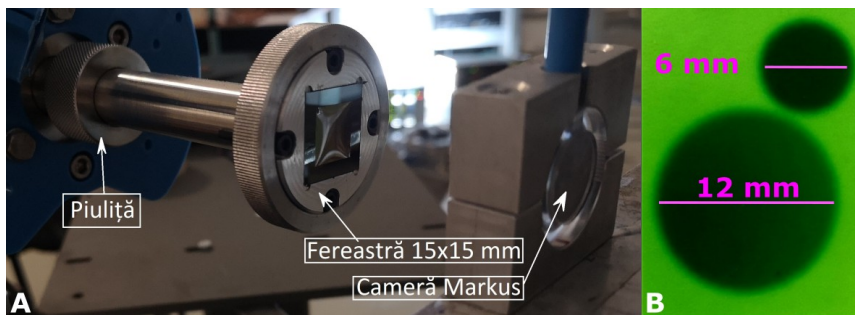


Figura 4.6: A. Testarea ferestrei de 15x15 mm la vid; B. Testarea ferestrelor de 10x10 respectiv 15x15 mm cu fascicul de protoni pe film radiocromic.

simularea transmisiei a unui fascicul de radiații X prin 1.5 cm aer respectiv heliu. Din grafic se poate observa că radiațiile X sub 2 keV sunt complet absorbite, în timp ce în cazul heliului pierderea este de doar 1.4 %. Duza prin care se suflă heliu (Figura 4.10), este realizată prin imprimare 3D, din plastic PLA. Simulările de curgere (Figura 4.11) de gaz efectuate pentru o duză au arătat că perna de heliu creată este instabilă, ceea ce conduce la o dislocare ineficientă a aerului din acea regiune. Pentru stabilizarea pernei de heliu, suflarea heliului trebuie să se facă din cel puțin două direcții. Pentru validarea simulărilor, a fost realizat un experiment în care materialul standard NIST 611 a fost măsurat cu PIXE pentru suflarea de heliu dintr-o direcție respectiv două direcții la o viteză de curgere totală de 3 l/min. În Figura 4.12 se pot observa spectrele de radiații X înregistrate. Deoarece perna de heliu este mult mai eficientă în cazul suflării heliului din două direcții, fondul de radiație este mai redus, iar elementele urmă sunt mult mai bine puse în evidență.

Integrarea hardware a componentelor sistemului s-a realizat prin montarea acestora pe suporturi imprimați 3D ceea ce a condus la un timp de proiectare respectiv costuri reduse. În Figura 4.13 se poate observa desenul CAD al sistemului ce este utilizat în configurația pentru PIXE. Suportul principal este montat pe fereastra de ieșire a acceleratorului. Detectorii de radiații X se află la un unghi de 35 de grade și la o distanță de 1.5 cm de probă. Laserii de aliniere se localizează sub detectorii de radiații X la un

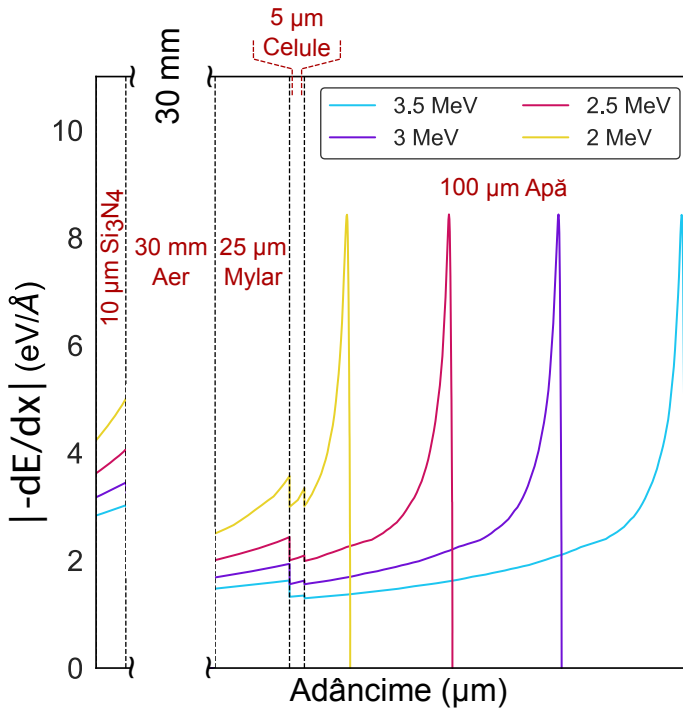


Figura 4.7: Simularea pierderii de energie a protonilor în camerele de iradiere folosind SRIM-2013.

unghi de 40 de grade. Localizarea camerei video se află imediat sub laserii de aliniere, aceasta este montată pe coloana de accelerare cu ajutorul unor suporturi imprimați 3D. Deoarece toți suportii utilizați sunt imprimați 3D, greutatea întregului sistem a fost redusă semnificativ, ceea ce conduce la stres mecanic redus asupra coloanei de vid a acceleratorului.

Integrarea software a sistemului de iradiere a fost realizată cu limbajul de programare LabVIEW. Software-ul dedicat este capabil să controleze individual totalitatea componentelor sistemului (detectori, laseri, manipulator de probe, deflector electrostatic), dar și să efectueze în mod automat operațiuni de iradiere în regim pulsant respectiv cartografiere elementală.

Comisionarea sistemului de iradiere cu fascicul extern de protoni pentru iradieri de probe biologice in vitro a fost realizată pe culturi de celule fibroblast a căror rată de supraviețuire a fost măsurată. Rezultatele au

fost în concordanță cu rezultate publicate de alte laboratoare, acestea fiind subiectul unui articol cu factor de impact AIS.

În ceea ce privește comisionarea sistemului pentru analize elementale, acesta a fost testat pe un număr de 40 de probe arheologice de bronz, pentru determinarea concentrațiilor elementale. Calibrarea sistemului a fost realizată cu standardele de bronz BCR-691 A-E (Figura 4.14), interpretarea rezultatelor va fi publicată de beneficiar.

Cartografierea elementală de probe a fost realizată conform schemei din Figura 4.15. Comisionarea sistemului a fost realizată pe un set de 3 probe, o probă arheologică și 2 probe geologice. Variația intensității fasciculului de protoni în timp a fost compensată utilizând o plăcuță martor. Efectul acestui tip de corecție poate fi observat în Figura 4.16. Rezultatele obținute în urma scanării au fost satisfăcătoare, reconstrucția hărților elementale poate fi vizualizată în Figurile 4.17, 4.18 și 4.19.

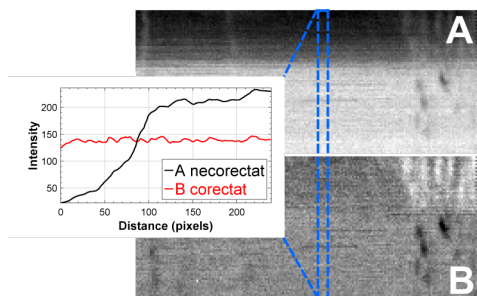


Figura 4.16: Hartă elementală înainte (A) respectiv după (B) aplicarea corecției de variație a fasciculului de protoni.

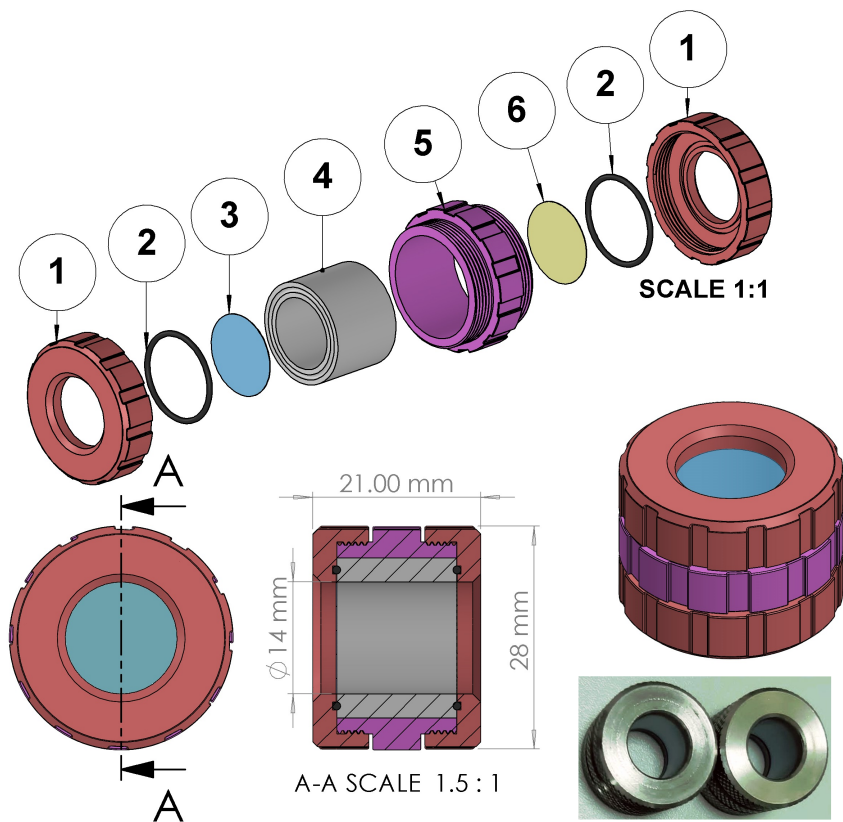


Figura 4.8: Desenul CAD al versiunii 2 de cameră de iradiere pentru probe biologice: 1. Capac cu filet; 2. Garnitură de etanșare; 3. Folie Mylar; 4. Insertie de teflon; 5. Carcasă; 6. Membrană sterilă ce asigură respirația celulelor.

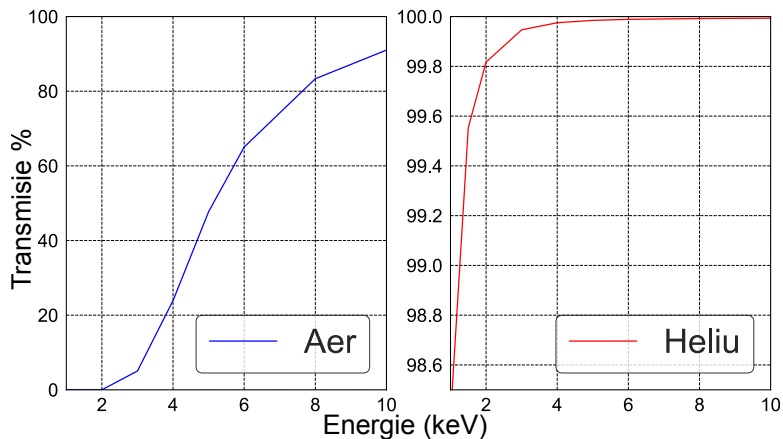


Figura 4.9: Comparație între transmisia radițiilor X prin aer și transmisia acestora prin He pe distanța de 1.5 cm.

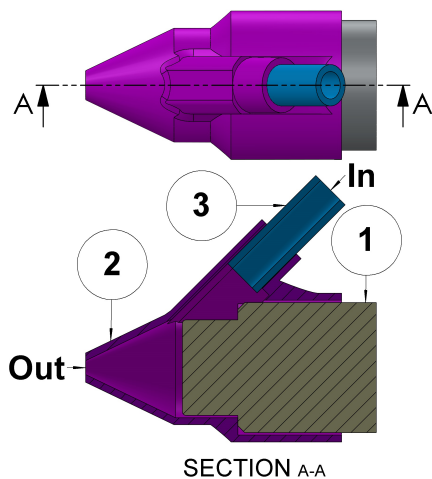


Figura 4.10: Schema CAD a duzei ce se aplică pe detectorul de radiații X, pentru a injecta He în spațiul dintre detector și probă. 1. Detectorul de radiații X; 2. Duza pentru He; 3. Furtunul care transportă He la duză.

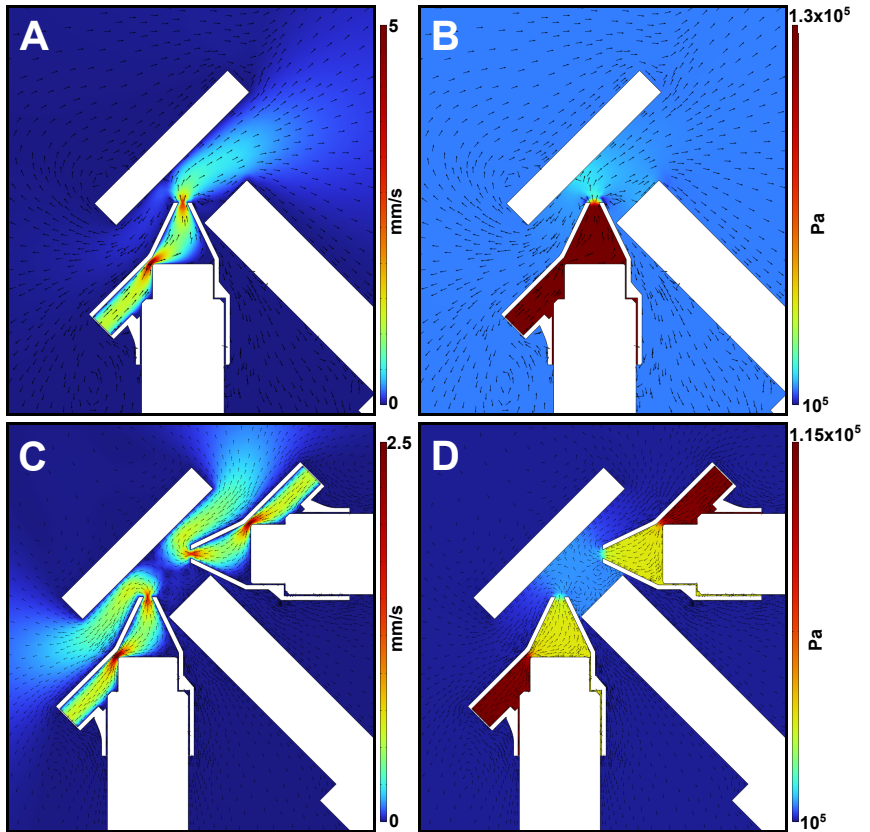


Figura 4.11: A,C. Simularea curgerii laminare a heliului în COMSOL Multiphysics pentru o duză respectiv două duze; B,D. Simularea în COMSOL Multiphysics a pernei de heliu create, pentru o duză respectiv două duze.

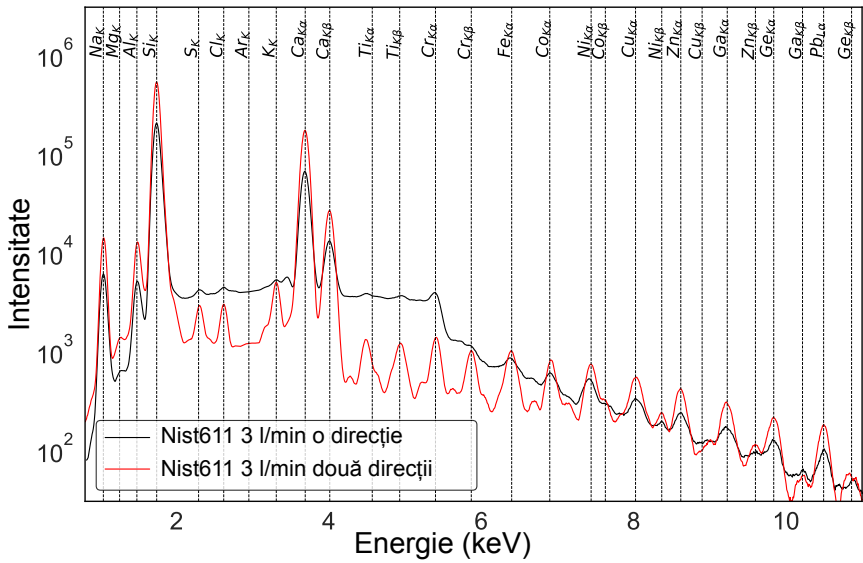


Figura 4.12: Comparație între spectrele materialului standard NIST-611 pentru suflarea He-ului dintr-o direcție respectiv două direcții la o viteză de 3 l/min de He

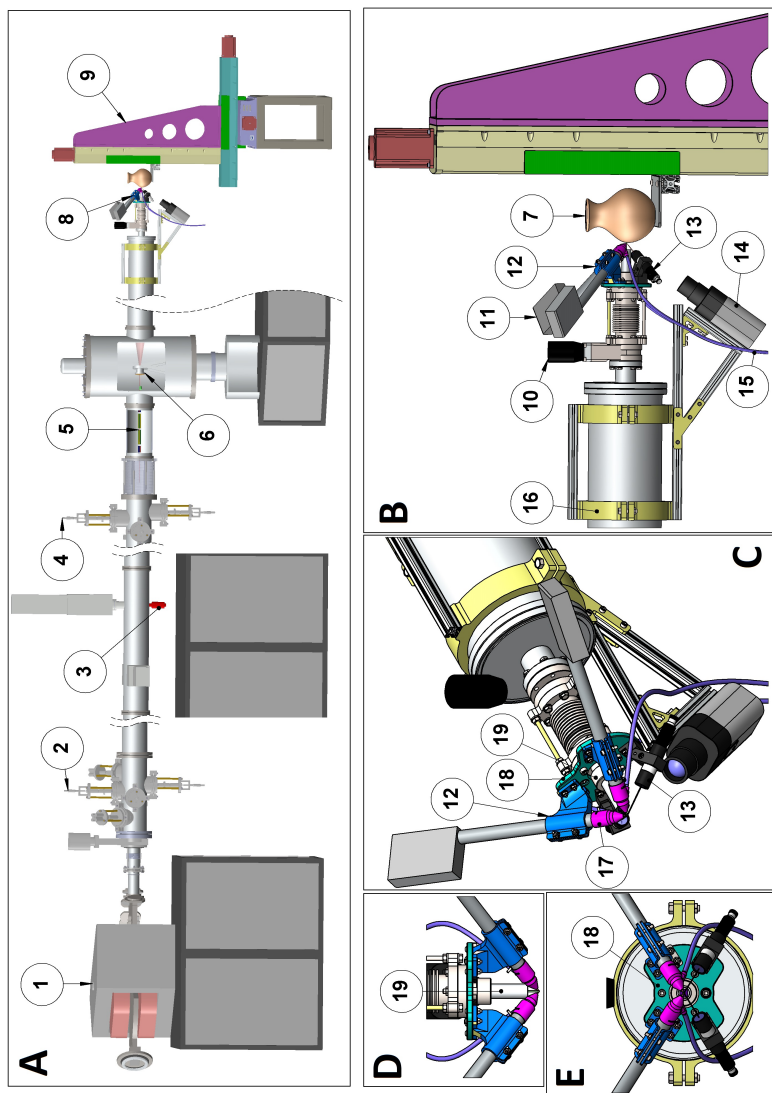


Figura 4.13: A. Linia IBA cu sistemul de iradiere în aer cu protoni; Sistemul de iradiere cu protoni; B. vedere laterală; C. vedere față-dreapta; D. vedere de sus; E. vedere față; 1. Magnet; 2,4. Colimatori; 3. Deflector electrostatic; 5. Q-pol electrostatic; 6. Folia de Au; 7. Probă; 8. Sistemul de iradiere în aer; 9. manipulator de probe; 10. Vană; 11. Detector SDD; 12. Suport detector; 13. Laser; 14. Camera video; 15. Furtun pentru He; 16. Inele de prindere pentru cameră; 17. Duza pentru heliu; 18. Suport de prindere; 19. Fereastră Si₃N₄.

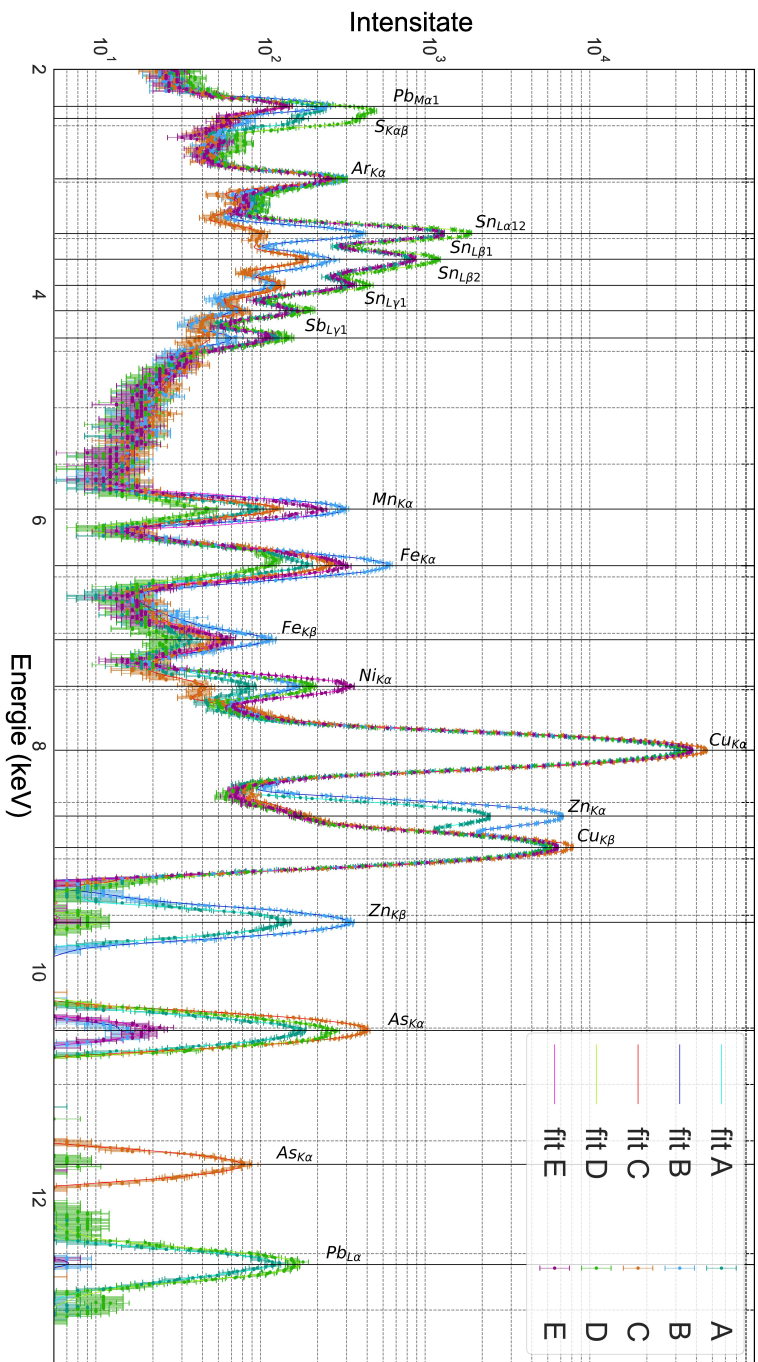


Figura 4.14: Spectrul de radiații X emis în urma PIXE, pentru standardele de bronz A, B, C, D și E ale BCR-691.

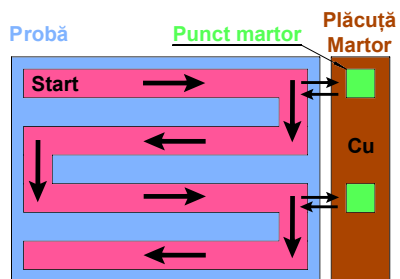


Figura 4.15: Reprezentarea grafică a procesului de cartografiere elementală folosind PIXE.

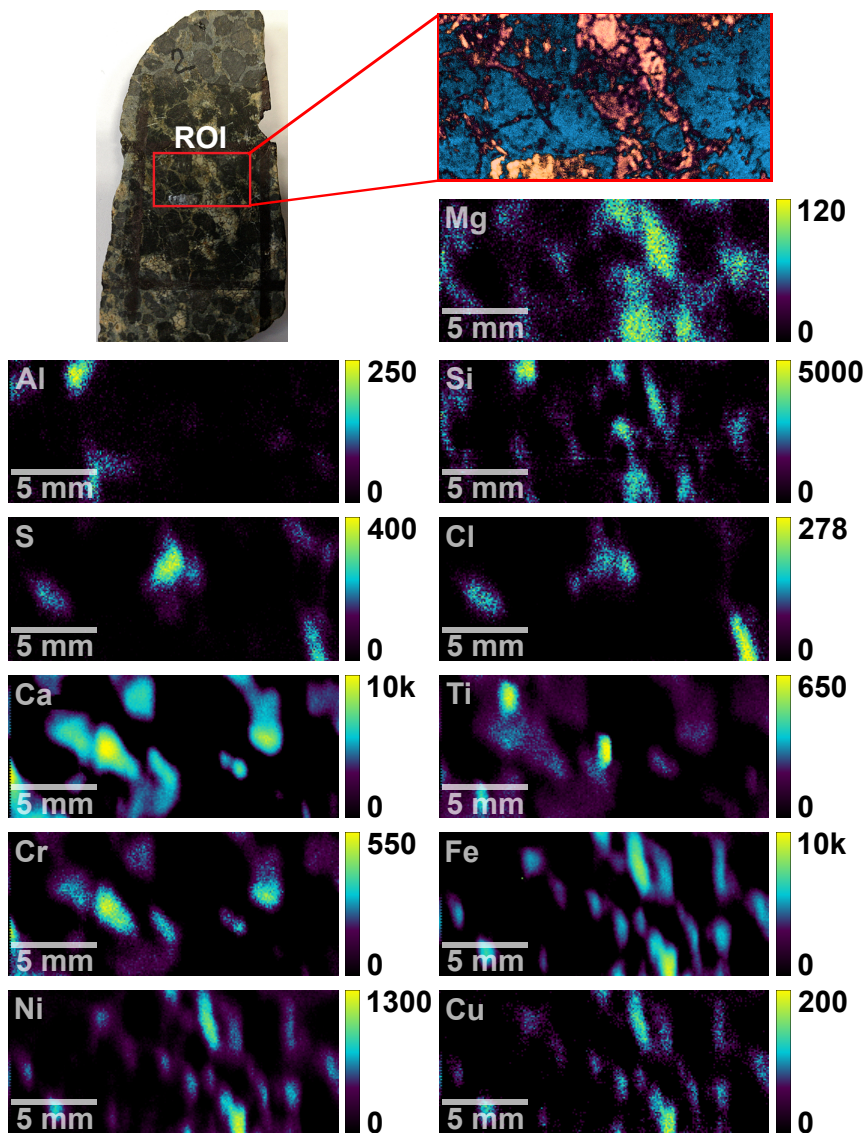


Figura 4.17: Reconstrucția hărților elementale pentru proba peridotit.

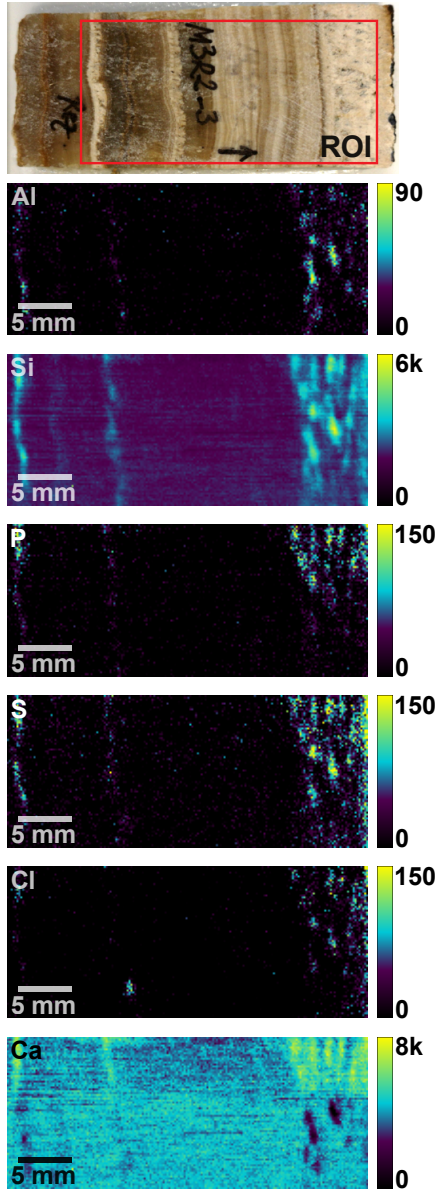


Figura 4.18: Reconstrucția hărților elementale pentru proba stalactită cu numărul de inventar M3R2-3.

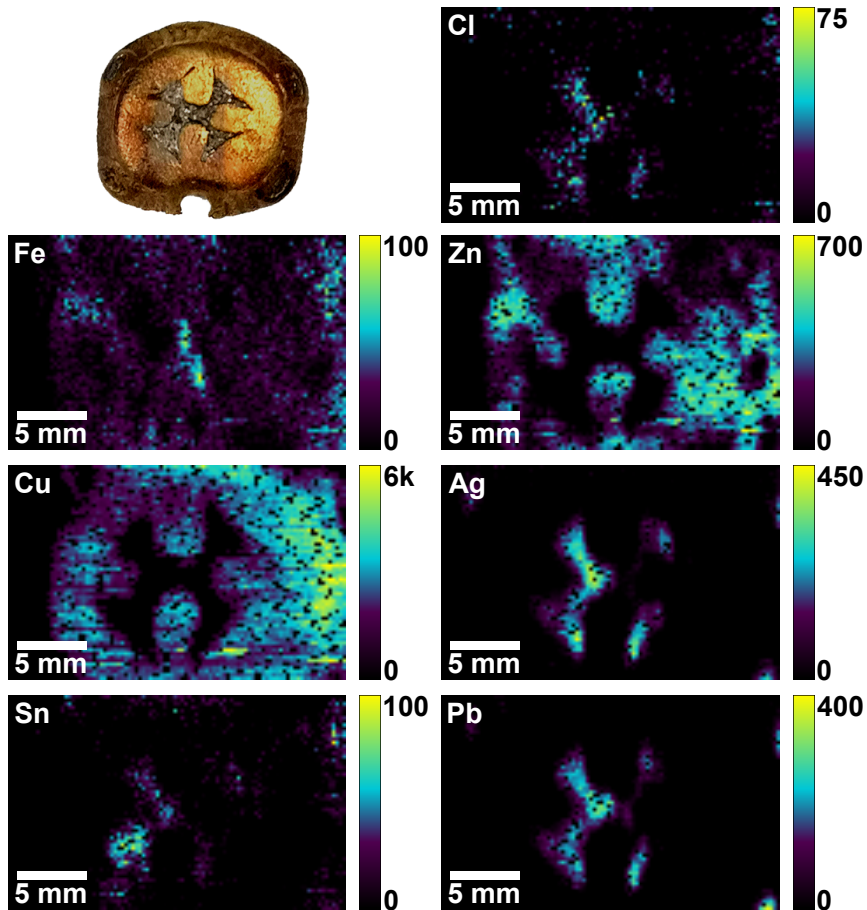


Figura 4.19: Reconstrucția hărților elementale pentru ornamentul de centura cu numărul de inventar INV41236.

Capitolul 5

Concluzii și perspective

În lucrarea de față s-au abordat trei aplicații ale fasciculelor de radiații în aer: Cartografiere elementală 2D/3D folosind XRF; Iradierii de probe biologice în regim pulsant cu fascicul de protoni în aer; Analiză elementală și cartografiere 2D de elemente chimice în probe, folosind PIXE.

În ceea ce privește sistemul de cartografiere 2D/3D folosind XRF, acesta a oferit imagini de înaltă rezoluție pentru viteze de scanare mari, pe probe geologice nepreparate. Metoda combină capacitățile de analiză a două scanare comerciale (ITRAX® și M4Tornado®) într-un singur dispozitiv prin scanarea probei în trei dimensiuni. Suprafața scanată este de trei ori mai mare decât cea scanată cu metoda standard, ceea ce conduce la o statistică mai bună atunci când reprezentarea 1D este folosită. În modurile de vizualizare 2D și 3D, conglomeratele de roci pot fi măsurate cu precizie mare datorită dimensiunii mici a pixelului de $0.5 \times 0.5 \text{ mm}^2$. De asemenea, dispozitivul de față a servit drept platformă de testare pentru algoritmi de reconstrucție 2D/3D respectiv cei de control hardware pentru sistemul de iradiere cu protoni din Capitolul 4.

Pe viitor, pentru sistemul de cartografiere 2D/3D ce folosește XRF, se dorește reconstruirea întregului sistem de mișcare astfel încât acesta să ofere o stabilitate ridicată și să permită scanarea probelor de dimensiuni mari cu 5-6 grade de libertate. În ceea ce privește sistemul de detecție, se dorește folosirea a 2-3 detectori pentru a îmbunătăți statistica respectiv

scăderea timpului total de scanare. Pentru a extrapola metoda de scanare 3D la corpuri cu formă neregulată, se dorește adăugarea unui sistem laser ce poate măsura profilul suprafețelor pentru a avea informații asupra formei obiectului și generarea traiectoriilor de scanare. Pentru a îmbunătăți rezoluția sistemului, se dorește folosirea unor lentile de tip poli-capilar pentru a focaliza fasciculul de radiații X la dimensiuni de 1-5 μm .

Sistemul de iradiere cu protoni pentru probe biologice, în regim pulsant, a fost testat în repetate rânduri pentru a stabili repetabilitatea dozelor de radiații oferite de la un experiment la altul. Măsurătorile cu camera Markus® au arătat că doza absorbită la diferite distanțe față de fereastra acceleratorului sunt în concordanță cu simulările efectuate în Geant4. Durata pulsurilor de protoni a fost măsurată cu precizie pe goniometrul camerei de reacție IBA. Valoarea duratei unui puls de protoni a prezentat diferențe de sub 0.5% față de valoarea setată în generatorul de semnal. În urma iradierilor celulelor fibro-blast la diferite debite de doză, s-a observat o rată de supraviețuire comparabilă cu rezultate similare ce au fost publicate în revistele de specialitate.

Analiza elementală cantitativă și calitativă, folosind PIXE, pentru determinarea concentrațiilor respectiv cartografierea elementelor chimice s-au dovedit a fi metode de analiză eficiente, care oferă rezultate de precizie. Determinarea concentrațiilor elementale, pentru elementele urmă, a fost îmbunătățită substanțial prin reproiectarea sistemului de purjare de heliu, în funcție de simulările de curgere laminară efectuate în COMSOL și îmbunătățirea unghiului solid al detectorului, prin proiectarea unui suport imprimat 3D care plasează detectorul la doar 1.5 cm de probă. Longevitatea ferestrelor de nitrură de siliciu a fost îmbunătățită prin dezvoltarea unei noi metode de fixare ce implică eliberarea stresului mecanic și termic prin plasarea unei benzi adezive de carbon și aplicarea unei cantități mici de rășină epoxy, pentru a etanșa marginile.

Cartografierea elementală folosind PIXE s-a dovedit a fi o metodă de analiză eficientă, pentru analiza probelor neomogene. Hărțile obținute au fost reconstruite la o rezoluție bună, cu o claritate acceptabilă, suficientă pentru a identifica forma structurilor prezente la nivel de probă. Corectarea variației intensității fasciculului de protoni, folosind un material

martor, s-a dovedit o metodă eficientă, ce permite obținerea unor hărți uniforme.

Pentru sistemul de iradiere cu fascicul de protoni în aer se dorește o separare între iradierea probelor biologice și analiza elementală, prin construirea unei linii dedicate iradierilor probelor biologice. În momentul de față, pentru a trece de la modul de iradiere al probelor biologice la modul de analiză elementală, sunt necesare modificări substanțiale ale sistemului, ceea ce implică realinierea componentelor implicate, care nu este trivială și necesită timp.

Eliminarea efectelor produse de variația fasciculului, fără a folosi metode de uniformizare numerice, se dorește implementarea unui sistem de baleiaj pentru acesta, pe axele X și Y la o frecvență mare asemenea celor din microscopia cu electroni. În același timp, timpul de scanare se va reduce substanțial, iar rezoluția hărților va crește. Trebuie menționat aici că pe axa Y, se poate folosi deflectorul electrostatic ce este folosit în pulsarea fasciculului, la iradierea probelor biologice, ceea ce reduce problema la montarea unui deflector identic pe axa X. În ceea ce privește electronica pentru baleierea fasciculului, trebuie construită o unitate de pulsare dedicată ce permite sincronizarea cu achiziția de date.