

## UNIVERSITATEA POLITEHNICA DIN BUCUREȘTI

SCOALA DE DOCTORAT. STIINTE APLICATE

Decizia nr. ..... din .....

## **REZUMAT TEZĂ DE DOCTORAT**

Dezvoltarea de tehnici pentru analiza fasciculelor de ioni și manipularea ionilor

Autor : Rotaru Ionuț Adrian

Coordonator : Prof. Univ. Dr. Gheorghe CĂTA-DANIL

### COMISIA DE DOCTORAT

Președinte	Prof. Dr. Daniela BUZATU	din	UPB
Conducător de doctorat	Prof. Dr. Gheorghe CĂTA-DANIL	din	UPB
Referent	CS1 Dr. Dimiter BALABANSKI	din	IFIN-HH
Referent	Prof. Dr. Mircea Iacob GIURGIU	din	UTCB
Referent Prof. Univ. Emil PETRESCU		din	UPB

BUCUREȘTI 2020

## Cuprins

Introducere	4
Capitolul 1: Tehnologia fasciculelor accelerate de ioni și manipularea acestora	5
1.1. Context	5
1.2. Principiile de bază ale unui accelerator de particule	5
1.3. Surse de ioni	6
1.3.1 . Sursa de ioni cu pulverizare de cesiu	6
1.4. Sisteme de accelerare electrostatică	7
1.5. Manipularea fasciculului de ioni	
Concluzii	9
Capitolul 2 : Fascicul de ioni extern	10
2.1. Context	10
2.2. Analiza materialelor la Acceleratorul Tandetron de 3 MV de la IFIN-HH	10
2. 3 . Considerații fizice ale analizei emisiilor stimulate de raze X induse de particule l HH	a IFIN- 12
2.5. Reglarea fină a cuadrupolului electrostatic pentru micro-focalizare	12
2.6. Proiectarea și construcția instalației de extracție a fasciculului în aer	14
2.7. Testarea sistemului și comisionarea	15
Concluzii	
Capitolul 3 : Experimentul INCREASE	
3.1. Context	
3.2. Cerințe de proiectare experimentală	
3.3. Proiectarea și asamblarea sistemului INCREASE	
3.5. Simulări pentru suprimarea acumulării de sarcină spațială	
Concluzii	
Capitolul 4: Covoare de radio-frecvență (RF)	
4.1. Context	
4.2. Facilitatea ELISOL de la ELI-NP	30
4.3. Simularea covoarelor de RF	
4.4. Calculele timpului de extracție	
4.5. Construirea unui covor de RF	
4.6. Covor RF spiralat	37
4.6.1. Construcția unui covor RF spiralat	39

Concluzii	
Capitolul 5 : Unitatea de testare a covoarelor RF	
5.1. Context	
5. 2 . Proiectarea unui sistem de testare a covoarelor RF cu extracție axială	41
5. 3 . Proiectarea unui sistem de testare a covoarelor RF cu extracție ortogonală.	
Concluzii	44
C1: Concluzii generale	
C2: Contribuții originale	46
C3: Perspective pentru dezvoltări viitoare	47
Referințe	

### Introducere

Tehnologia fasciculelor de ioni este un domeniu de tehnici utilizate pentru crearea diferitelor tipuri de particule încărcate, manipulându-le prin câmpuri electrice și magnetice și analizându-le pentru a investiga proprietățile materiei.

Gama completă de subiecte de cercetare, atât fundamentale, cât și aplicate, este vastă și nu poate fi acoperită într-o singură lucrare. Cu toate acestea, principiile de bază pentru toate aceste aplicații împărtășesc câteva procese simple. Și anume, înțelegerea interacțiunii particulelor încărcate cu câmpuri electromagnetice prin Forța Lorentz, procesele de ionizare ionice care permit crearea unor astfel de fascicule încărcate și principiile de detectare a particulelor încărcate.

Această teză va prezenta o parte din munca mea în domeniul fizicii experimentale și este centrată în jurul a trei instalații experimentale. Lucrarea începe la acceleratorul Tandetron de 3 MV din IFIN-HH, unde am fost implicat în mai multe programe de dezvoltare. O astfel de lucrare de dezvoltare, desi simplă, s-a dovedit a avea cel mai semnificativ impact în ceea ce priveste cererea de fascicul, așa că am ales să abordez acest subiect în prima parte. În a doua parte vor fi acoperite lucrările de dezvoltare către realizarea unui nou sistem experimental pentru laboratorul Fragment Separator (FRS) de la GSI. În acest laborator funcționează o instalație care produce fascicule de ioni radioactivi pentru analize de masă folosind metoda fragmentării în zbor. Munca de dezvoltare care a fost făcută împreună cu colegii mei va permite folosirea unei noi metode de producție de ioni radioactivi folosind transfer multi-nucleon între un proiectil greu și o țintă bogată în neutroni. În această teză voi acoperi contribuțiile mele la acest proiect. În cele din urmă, pe măsură ce mi-am îndreptat munca către ELI-NP și m-am angajat spre viitorul experiment ELISOL, care va furniza fascicule de ioni radioactivi prin interacțiuni foto-nucleare, voi prezenta progresul meu până acum în dezvoltarea unui sistem experimental la scară redusă care ar putea să fie utilizat ca prototip în scopuri de testare înainte de a începe munca la experimentul propriu-zis. Covoarele de radio-frecvență sunt dispozitive relativ noi, utilizate pentru captarea și extragerea fasciculelor de ioni și sunt prezentate investigațiile mele privind utilizarea unui astfel de dispozitiv pentru experimentul ELISOL. În timpul acestui studiu, a fost dezvoltat un nou concept de covor de radiofrecventă (RF) care oferă perspective promitătoare. În cele din urmă, munca mea pentru proiectarea unei unități de testare pentru covoare RF este prezentată în ultima parte.

Fizica experimentală se ocupă cu proiectarea de noi sisteme experimentale, construcție și testare. Principalele abilități utilizate pentru astfel de lucrări sunt proiectarea și execuția mecanică, proiectarea sistemelor electrice și electronice, simulări de optică-ionică și proiectarea sistemelor de vid. Prin aceste abilități îmi voi prezenta lucrările în paginile următoare.

# Capitolul 1: Tehnologia fasciculelor accelerate de ioni și manipularea acestora

#### 1.1. Context

Fasciculele accelerate de ioni sunt utilizate pe scară largă pentru o varietate de aplicații, atât în cercetare cât și în industrie. În cercetare putem distinge două mari categorii: fizica fundamentală și fizica aplicată. Pentru industrie, cea mai comună aplicație este implantarea de ioni cu dopanți.

În fizica aplicată, sunt folosite fascicule de ioni accelerați la energii de ordinul keV și MeV (de exemplu 3 MeV pentru IBA, 1 MeV pentru datare cu carbon 14) pentru a permite analiza și modificarea diferitelor tipuri de materiale. Unele dintre aceste aplicații includ frezarea cu fascicul de ioni, imagistica cu fascicul de ioni etc.

#### 1.2. Principiile de bază ale unui accelerator de particule

În forma sa cea mai simplă, un sistem de accelerare a particulelor trebuie să facă trei lucruri. În primul rând, trebuie să formeze un fascicul de ioni (ioni moleculari, ioni atomici , particule fundamentale sau nuclee) folosind o sursă de ioni. Cele mai importante proprietăți ale unui astfel de fascicul sunt puritatea ( pentru un fascicul de ioni, fasciculul trebuie să fie compus în cea mai mare parte din speciile de ioni care ne interesează), energia fasciculului , fluxul de particule (de obicei măsurat în curentul fasciculului ) și forma fasciculului (diametrul său, secțiunea transversală etc).

În al doilea rând, sistemul trebuie să accelereze acest fascicul la energia necesară experimentului cu o eficiență rezonabilă. Energiile obișnuite pentru acceleratorii mici sunt în ordinul de la keV până la MeV. Acceleratorii mai mari de tipul sincrotron, utilizați pentru experimentele de coliziune cu ioni grei, pot accelera până la GeV și peste. Sistemul de accelerație trebuie să ofere o rezoluție energetică cât mai bună, exprimată ca fiind dE / E (care este o indicație a dispersiei în energie) și este de obicei mai mică de 1E-2 pentru acceleratorii mici de cercetare (de exemplu, la o energie de 1 MeV rezoluția este +/- 10 keV pentru un accelerator Tandetron). Astfel, cele mai importante proprietăți ale acestui sistem sunt energia maximă la car epoate accelera fascicule de ioni, rezoluția energetică și factorul de transmisie, adică raportul dintre curentul fasciculului accelerat și curentul fasciculului injectat (o indicație a câtor ioni sunt pierduți prin sistemul de accelerare).

În al treilea rând, fasciculul accelerat trebuie să fie direcționat către secțiile unei camere de reacție ( unde particulele accelerate – proiectile - vor interacționa cu o țintă staționară ) și acest proces implică ghidarea fasciculului utilizând diferite sisteme electro-optice și diagnosticarea fasciculului pentru a îndeplini condițiile necesare pentru nevoile experimentale. Expresia "a duce fascicul pe țintă" este utilizată în mod popular pentru a descrie procesul prin care fasciculul este direcționat de la sursa de ioni către sistemul de accelerare, prin instrumente de manipulare electro-optică și sisteme de corecție și până la țintă unde reacțiile au loc.

#### 1.3. Surse de ioni

Sursa de ioni are rolul de a forma un fascicul de ioni, fie dintr-un gaz, fie dintr-un compus de extracție solid. De-a lungul anilor, mai multe tehnici au fost dezvoltate pentru a obține fasciculule de ioni prin diferite tehnici și pentru fiecare tehnică există mai multe variante de surse de ioni. Pe baza modului de funcționare, sursele de ioni pot fi împărțite în trei principale categorii: surse de ioni ce ionizează prin bombardare cu electroni sau alți ioni, surse de ioni de radio-frecvență și surse cu descărcare electrică.

#### 1.3.1. Sursa de ioni cu pulverizare de cesiu

Sursa ionică cu pulverizare de cesiu este un ansamblu de două surse de ioni: una este o sursă de ioni de evaporare termică de ioni de cesiu și cealaltă o sursă de ioni de bombardare cu ioni de cesiu. Aceasta este utilizată în principal pentru a obține ioni negativi dintr-un compus solid de extracție. Un rezervor de cesiu este încălzit la aproximativ 80-100 °C sub presiune scăzută și cesiul se va evapora și difuza prin camera de ionizare, condensându-se pe pereții săi. În interiorul camerei de ionizare, o placă încălzită de aproximativ 1000 °C este utilizată ca ionizor. Când vaporii de cesiu intră în contact cu această placă încălzită, vor forma ioni de cesiu pozitivi și aceștia vor fi accelerați către catodul care conține compusul de extracție. Acest catod este încărcat negativ prin comparație cu placa ionizorului, care este încărcat pozitiv prin comparație. Sub bombardamentul cu cesiu, compusul de extracție va pulveriza fragmente (în principiu ioni atomici și ioni moleculari). Fig. 1 ilustrează principiul de bază de lucru al acestui tip de sursă de ioni.



Figura 1 : Ilustrația unei surse de ioni cu pulverizare de cesiu

Pentru a optimiza eficiența sursei de ioni de tip pulverizare de cesiu utilizată la acceleratorul Tandetron de 1 MV din IFIN-HH, întregul sistem de accelerare, împreună cu sursa de ioni, au fost modelate 3D și au fost efectuate simulări de optică ionică pe aceste modele. Acest lucru a permis deducerea unor parametrii optimi de lucru și a îmbunătăți înțelegerea și comportarea întregului sistemul. Rezultatul simulării sursei de cesiu este prezentat în Fig. 2.



Figura 2 : Simulare 2D a sursei de ioni de cesium și a primului obiectiv electrostatic utilizat pentru focalizarea fasciculului

#### 1.4. Sisteme de accelerare electrostatică

După formarea unui fascicul de ioni, acesta este injectat într-un sistem de accelerare care are rolul de a crește energia cinetică. În teorie, cel mai simplu tip de accelerator electrostatic constă din două plăci metalice, între care se aplică o cădere de potențial. Aceste plăci paralele trebuie să conțină un orificiu în centru, astfel încât, printr-o placă să poată fi injectat un fascicul de ioni și prin cealaltă, să poată fi extras fasciculul de ioni. În practică, un astfel de sistem este complicat de conceput.

Pentru a asigura o accelerație constantă pe tot parcursul sistemului de accelerație, câmpul electro-static trebuie menținut cât mai stabil posibil. Din acest motiv, un sistem de accelerare folosește mai mulți electrozi metalici conectați printr-un lanț de rezistențe. Căderea de tensiune se aplică între electrozii pe la capetele coloanei de accelerație și electrozii interiori devin electrozi intermediari. Echipotențiale trebuiesc formate între fiecare pereche de doi electrozi. Prin utilizarea acestei tehnici, fluctuațiile de câmp sunt reduse la minimum, iar câștigul de energie cinetică devine controlabil. Cel mai important parametru de luat în considerare este rezoluția energetică, care este direct proporțională cu fluctuațiile câmpului. O structură simplă de coloană de accelerație este prezentată în figura 3.



Figura 3 : Ilustrația unui sistem de accelerare utilizând un lanț divizor de tensiune

#### 1.5. Manipularea fasciculului de ioni

După ce un fascicul de ioni este generat de o sursă de ioni și accelerat printr-o structură de accelerare, acesta poate fi direcționat către o cameră de reacție și poate fi utilizat pentru diferitele experimente. De exemplu, poate fi folosit pentru a forma o reacție sau poate fi direcționat către un detector pentru analiză (în cazul aplicațiilor de spectrometrie de masă accelerată). Pentru a asigura calitatea fasciculului de ioni, acesta trebuie să fie monitorizat și filtrat în mai multe puncte.

Proprietățile importante ale unui fascicul de ioni sunt energia, curentul fasciculului, puritatea și geometria. Energia cinetică este reglată folosind tensiunea acceleratorului și rezoluția depinde de stabilitatea generatorului de înaltă tensiune. Curentul fasciculului este controlat din sursa de ioni și este limitat la curentul maxim pe care generatorul de înaltă tensiune îl poate furniza fără a compromite stabilitatea.

Puritatea fasciculului nu poate fi controlată din sursa de ioni. Prin puritatea fasciculului, înțelegem raportul dintre numărul de ioni din speciile de interes și toți ceilalți ioni, inclusiv ioni moleculari. De exemplu, folosind sursa ionică de pulverizare cu cesiu, dacă dorim să obținem un fascicul de hidrogen, putem folosi TiH<sub>2</sub>ca compus de extracție. Procedând astfel, am obține un fascicul de hidrogen amestecat cu ioni de titan și alte elemente minoritare, cum ar fi cupru, fier, oxigen etc. În principiu, puritatea fasciculului ar trebui să fie cât mai mare posibil și valorile mai mari de 99% sunt dorit.

În cele din urmă, fasciculul trebuie să interacționeze cu ținta, iar pe parcursul său spre acea țintă trebuie să fie deviat atât orizontal, cât și vertical, pentru a obține controlul alinierii fasciculului. Zona de interacțiune poate fi reglată prin focalizarea fasciculului cu lentile electrooptice, de la o dimensiune de fascicul de zeci de cm<sup>2</sup> până la câțiva um<sup>2</sup>. În cele din urmă, profilul fasciculului trebuie corectat. Toate aceste ajustări trebuie efectuate până când fasciculul îndeplinește cerințele necesare experimentului. Pe baza rezultatelor discutate în subcapitolul 1.3.1 un articol a fost publicat în Romanian Reports in Physics.

#### Concluzii

Acest capitol a introdus conceptele de bază ale manipulării ionilor care vor fi explorate pe parcursul acestei teze. Simularea fasciculului de ioni prezentată în subcapitolul 1.3.2. a făcut parte dintr-un efort mai mare de modelare a întregului accelerator Tandetron de 1 MV de la IFIN-HH și rezultatele au produs mai multe articole și o teză de doctorat. Datorită participării mele la aceste simulări, a fost publicată o lucrare ca autor corespunzător. Aș dori să-i mulțumesc colegului meu Doru Pacesila pentru o colaborare fructuoasă în timp ce lucram la simulări împreună.

În capitolul 2, va fi explorată funcționarea acceleratorului Tandetron de 3MV de tipul Cockcroft-Walton din IFIN-HH. Acest accelerator a fost modernizat cu un sistem pentru a permite extragerea fasciculului de ioni, ceea ce a permis efectuarea de analize de tip IBA (Ion Beam Analysis) cu fascicul scos în aer. Tot aici sunt prezentate contribuțiile mele la realizarea acestui sistem.

Capitolul 3 prezintă parcursul meu către proiectarea și construirea sistemului INCREASE ce va permite producerea fasciculelor de ioni radioactivi utilizând metoda transferului multinucleon la FRS, GSI.

În capitolul 4, metodele de captare a ionilor sunt explorate în continuare și sunt prezentate contribuțiile mele la proiectarea unei astfel de capcane de ioni care va fi folosită pentru a produce fascicule de ioni radioactivi prin metoda foto-fisiunii.

Capitolul 5 prezintă lucrările de proiectare a două sisteme experimentale utilizate ca prototip pentru testarea covoarelor de radio-frecvență (RF), fiind capcane de ioni și vor servi ca demonstrator tehnologic în vederea realizării experimentului ELISOL, o instalație experimentală mare planificată pentru a produce și studia fasciculele de ioni radioactivi la ELI-NP.

### Capitolul 2 : Fascicul de ioni extern

#### 2.1. Context

Fasciculele externe de ioni sunt obținute prin extracția ionilor accelerați în aer printr-o fereastră subțire. Aceasta trebuie să afecteze fasciculul cât mai puțin posibil. Astfel de fascicule externe oferă multe avantaje; ele furnizează analize nedistructive și non-invazive direct în aer, iar probele țintă sunt mai ușor de analizat la presiunea atmosferică decât în vid. Din această cauză, multe laboratoare din întreaga lume au dezvoltat fascicule externe dedicate pentru a fi utilizate pentru analize în aer.

În ultima perioadă au fost dezvoltate tehnici sofisticate de analiză folosind fascicule de ioni extrași în aer, tehnici care erau în mod tradițional rezervate doar pentru măsurători în vid. Unele dintre cele mai importante utilizate astăzi sunt stimularea emisiilor de raze X induse de particule (PIXE) [1], retro-imprastierea ionilor în aer (RBS)[2], analiza prin detecția reculului (ERDA) [3], microscopia ionică de transmisie prin scanare[4] etc. Aceste tehnici sunt ilustrate în Fig. 4.

În ciuda concurenței cu alte facilități (surse de lumină de tipul sincrotron, reactoare nucleare pentru fascicule de neutroni, microscoape de electroni, fluorescență de raze X) tehnicile de analiză cu fascicule de ioni extrase în aer rămân foarte competitive datorită capacității sale de a oferi mai multe tipuri de măsurători complementare (emisii de raze X stimulate, detecție elastică a reculului pentru profilarea hidrogenului dintr-o țintă analizată, retro-imprastierea pentru profilarea adâncimii). Aceste tehnici sunt aplicate simultan și pot fi configurate în funcție de necesitățile experimentale.



Figura 4 : Metode de analiză cu fascicule de ioni

#### 2.2. Analiza materialelor la Acceleratorul Tandetron de 3 MV de la IFIN-HH

Infrastructura experimentală de la IFIN-HH a fost consolidată în anul 2012 cu punerea în funcțiune a trei noi acceleratoare, alături de Acceleratorul de 9 MV existent și anume instalarea a două acceleratoare Tandetron și un ciclotron pentru producția de izotopi medicali. Cele două acceleratoare Tandetron sunt mașini electrostatice cu generatoare de înaltă tensiune Cockcroft-Walton și au o stabilitate a fasciculului deosebit de bună, făcându-le foarte eficiente pentru științele aplicate. Una dintre acestea este o mașină de 1 MV utilizată pentru datarea radioizotopilor și a doua este un Tandetron de 3 MV, special conceput pentru analiză cu fascicule de ioni [5], de exemplu analize de materiale, implantarea de dopanți și măsurarea secțiunii de reacție pentru studii de astrofizică nucleară. Schița tehnică pentru această mașină este prezentată în Figura 5.



Figura 5 : Schița tehnică a Tandetronului de 3 MV la IFIN-HH

În prezent, acceleratorul Tandetron de 3 MV este utilizat într-o mare varietate de experimente PIXE (stimularea emisiilor de raze X induse de particule). Această metodă de analiză oferă câteva avantaje importante, cum ar fi:

• *Sensibilitate ridicată* : în experimentele de rutină, limitele de detecție sunt în jur de 0,1 - 1 ppm; pot varia în funcție de natura materialului analizat;

• *Versatilitate și posibilitatea analizei directe* : actualmente, aproape orice obiect solid poate fi iradiat pentru experimentele PIXE; pentru analiza obiectelor mai grele și mai mari, fasciculul de ioni trebuie extras în afara camerei de reacție pentru o analiză adecvată.

• *Posibilitatea de a analiza ținte lichide* : Prin utilizarea unui dispozitivului experimental pentru analiza reziduului lichid aplicat pe o folie subțire de Mylar; mai multe ținte pot fi pregătite și analizate secvențial folosind un carusel de ținte; acesta a fost prima îmbunătățire tehnică pentru acest accelerator; ansamblul a folosit parțial construit din componente imprimate 3D și este ilustrat în Fig. 6;



Figura 6 : Roată țintă dezvoltată pentru analiza reziduurilor lichide

• *Rezoluție spațială bună* : fasciculul de ioni poate fi focalizat într-un fascicul îngust, permițând astfel poziționarea fasciculului cu precizie ridicată ;

• *Analiză nedistructivă* : tehnica a permis analiza obiectelor delicate, țintelor de natură organică sau foarte fragile fără a risca să le distrugă ;

• *Analiză multi-elementară* : Folosind tehnica PIXE împreună cu acceleratorul Tandetron de 3 MV, putem identifica elemente chimice între Z = 13 (aluminiu) și Z = 92 (uraniu).

## 2. 3 . Considerații fizice ale analizei emisiilor stimulate de raze X induse de particule la IFIN-HH

Emisiile caracteristice de raze X sunt rezultatul interacțiunilor ion-atom la energii ridicate, care au loc la suprafața țintei, între ionii cu incidente energetice mari (1 - 3 MeV) și atomii ce alcătuiesc ținta. Acest fascicul de ioni incident poate crea excitații atomice sau poate scoate electroni din paturile lor atomice interioare. Când se întâmplă acest lucru, un orbital vacant este creat și un electron care ocupă o stare de energie superioară va ocupa acest orbital vacant. În timpul acestei de-excitații, atomii emit fotoni cu energii cuprinse între 1 și 30 keV. Deoarece fiecare atom are o configurație electronică unică, un material poate fi analizat chimic prin măsurarea energiei fotonilor X emiși . În unele cazuri, prin utilizarea unui fascicul micro-focalizat, distribuțiile atomice pot fi topografiate pe suprafața materialului. Acest proces de interacție dintre ionii incidenți și atomii țintă este rezumat în diagrama prezentată în Fig. 7.



Figura 7 : Schema fizică a emisiilor stimulate de fotoni X induse de ioni

#### 2.5. Reglarea fină a cuadrupolului electrostatic pentru micro-focalizare

Cuadrupolul electrostatic, situat înaintea camerei IBA, poate fi utilizat pentru a focaliza cu precizie un micro fascicul pe ținta din interiorul camerei și acest lucru poate îmbunătăți semnificativ rezultatele măsurătorilor, cel puțin în unele cazuri.

În timp ce acest sistem a fost conceput pentru focalizarea fasciculului în interiorul camerei de reacție, acesta poate fi folosit pentru a focaliza fasciculul chiar înainte de a fi extras în aer, astfel încât aria fasciculului să fie redusă, făcând posibilă măsurători de tipul micro-PIXE în aer. Pentru a realiza acest lucru, întregul sistem cuadrupolar a fost simulat folosind software-ul de optică

ionică SimIon 8.1[6]. Geometria a fost proiectată într-un software CAD și a fost importată ca fișier .STP.

La intrarea în cuadrupol, fasciculul simulat este colimat cu colimatori ce dispun de o deschidere de 2 mm în diametru. Un plan de monitorizare a profilului de fascicul este plasat pe fereastra de extracție și distribuția normală a fasciculului este calculată pentru fiecare potențial de tensiune aplicat pe cuadrupol. Distribuția fasciculului pe fereastra de extracție este reprezentată grafic în Fig. 8 atât pentru componentele X, cât și pentru Y. Efectele cuadrupolului asupra fasciculului sunt clar demonstrate. Focalizarea pe planul X este mai pronunțată decât pe planul Y la potențiale mai mici. Odată cu creșterea potențialelor, aceste fenomene se inversează. Acest lucru se întâmplă deoarece planul X este primul care este focalizat.



Figura 8 : Distribuția laterală a fasciculului pe fereastra de extracție pentru diferite potențiale de tensiune

Contribuția cuadrupolului electrostatic este văzută în mod clar și poate fi utilizată ca un instrument important pentru sondarea în zone mici, de exemplu în defecte mici sau fisuri. Din distribuția normală a fiecărei configurații, FWHM pentru ambele componente X și Y au fost calculate și sunt prezentate în Fig. 9, precum și aria totală a fasciculului în funcție de tensiunea aplicată pe cuadrupol.



Figura 9 : Rezultate simulate pentru profilul fasciculului lateral; stânga: FWHM și zona fasciculului în funcție de tensiunea cvadrupolică

Folosind aceste informații, potențialele pot fi optimizate pentru a produce cele mai mici valori ale FWHM. Deoarece fasciculul nu are același profil în ambele direcții X și Y, sunt definite trei cazuri specifice care pot fi utilizate pentru diverse aplicații. În primul rând, putem optimiza fasciculul în direcția X pentru FWHM minim care va produce o linie îngustă, în al doilea rând acest lucru se poate face pentru direcția Y și, în al treilea rând, putem optimiza pentru un fasciculului circular. Aceste valori au fost calculate mai jos:

	U	FWHM X	FWHM Y	Aria
				fasciculului
Profil X minim	1872 V	1,8 µ m	158 μ m	483 µ m 2
Profil Y minim	1999 V	148 µ m	2,3 μ m	578 µ m 2
Profil circular	1935V	73 μ m	73 μ m	0,01 mm <sup>2</sup>

Potențial optim pentru cuadrupol electrostatic - diferiți parametri de fascicul

#### 2.6. Proiectarea și construcția instalației de extracție a fasciculului în aer

Un fascicul de ioni poate fi extras în aer folosind o fereastră de extracție. Aceasta este construită dintr-un material special care trebuie să fie suficient de puternic pentru a rezista forțelor create de diferența de presiune care acționează pe laturile sale, care sunt semnificative. Ca un exemplu, camera de interacție IBA este menținut la o presiune scăzută de aproximativ  $10^{-6}$ mbar și presiunea mediului ambiant exterior este de aproximativ 1.013 bari, rezultând o forță netă de aproximativ 10 kg / cm<sup>2</sup> sau 100g / mm<sup>2</sup>. Din această cauză, suprafața de extracție trebuie să fie mică, în jur de câțiva mm pătrați. În al doilea rând, ferestrele de extracție trebuie să afecteze aria fasciculului cât mai puțin posibil. În timp ce fasciculul trece prin fereastră, acesta va experimenta o forță de frânare și fasciculul se va dispersa, astfel încât ferestrele de extracție trebuie, de asemenea, să fie foarte subțiri.

Pentru a monitoriza curentul fasciculului, putem utiliza o cupă Faraday externă. Luând măsurători înainte de iradierea țintei și folosind presupunerea stabilității în timp a curentului, se poate calcul curentul de ioni care iradiază proba. O altă configurație a sistemului este de a plasa un detector de raze X pentru a urmări razele X caracteristică emise de fereastră în timp ce fasciculul de ioni tranzitează prin aceasta pentru a măsura indirect curentul. O cupă Faraday este necesară pentru a corela curentul fasciculului și rata caracteristică de numărare a razelor X.

Această metodă are avantajul unei măsurători continue și exacte. Pentru acestă metodă am ales un detector Si-PIN de la Ametek, modelul X-123[7] cu rezoluție de aproximativ 145 eV la 6 keV, care se pretează nevoilor acestei aplicații. Detectorul este foarte compact, are un factor de formă mică și are incluse toate componentele electronice necesare. Detectorul are suport LabView și a fost încorporat cu ușurință în mediul nostru de control.

Detectorul a fost poziționat la 45° în raport cu direcția fasciculului incident și vârful este plasat în vid, langă fereastra de extracție. Un cadru mecanic pentru adăpostirea detectorului este atașat la fereastra Si3N4 utilizând un adeziv special pentru vid. Proiectarea CAD și ansamblul final sunt prezentate în Fig. 10. Totul este fabricat din oțel inoxidabil nemagnetic.



Figura 10 : Ansamblul exterimental pentru extracția fasciculelor de ioni în aer; stânga: model CAD, dreapta: ansamblu construit

#### 2.7. Testarea sistemului și comisionarea

Pentru a evalua calitatea fasciculului extras, am efectuat o serie de teste diferite. În primul rând, un film radio cromic a fost plasat în aer, la ieșirea din fereastra de extracție și a fost iradiat folosind un fascicul extras de protoni cu energie de 3 MeV. Acest film este prezentat în Fig. 11. Filmele radio cromice sunt un tip de filme cu auto-developare, care sunt utilizate pentru testarea și caracterizarea diferitelor tipuri de generatoare de radiații și instalații cu fascicul de ioni. Filmul își schimbă culoarea atunci când este expus la radiații ionizante, contrastul culorii developate fiind proporțional cu cantitatea de energie absorbită, astfel încât cantitatea de expunere poate fi înregistrată. De asemenea, au o rezoluție spațială foarte bună și profilul geometric al fasciculului este ușor de distins. Aceste filme sunt insensibile la lumina vizibilă și ca atare sunt ușor de utilizat în aer.[8]



Figura 11 : Film radio cromic cu expuneri diferite utilizate pentru a testa calitatea fasciculului de protoni extern

Pentru a analiza în continuare distribuția fasciculului pe filmul radio-cromic, a fost utilizată o cameră microscopică electronică. Acest lucru ne permite să trasăm gradientul de intensitate al culorii și să transformăm expunerea imaginii la doza de radiație absorbită.



Figura 12 : Analiza microscopului electronic a punctului fasciculului circular defocalizat

În cele din urmă, sistemul a fost testat efectuând o măsurare PIXE în aer pe un material de referință standard (SRM) [9]. Aceste materiale sunt folosite ca etaloane și conțin valori certificate ale fracțiilor de masă. Pentru acest experiment, am folosit standardul 611 SRM care conține valori certificate pentru 15 elemente care pot fi referențiate cu propria noastră măsurare. Aceste materiale de referință standard sunt valabile pe termen nelimitat și pot fi utilizate pentru testarea periodică a calității sistemului.

Următorul spectru PIXE a fost obținut utilizând un fascicul de protoni 3 MeV cu un timp de expunere de 5 minute.



Figura 13 : Măsurarea PIXE în aer pe SRM 611

Majoritatea elementelor chimice din materialul de referință sunt văzute în mod clar în spectru ca distrubiții foarte distincte. Spectrul a fost procesat cu software-ul Gupix și majoritatea liniilor sunt ușor de rezolvat. Deși o tehnică de tipul PIXE efectuată în aer nu poate produce aceeași putere de rezolvare ca o măsurătoare efectuată în vid, calitatea spectrelor obținute este deosebit de bună și în perfectă concordanță cu fracțiile de masă de referință furnizate [9].

## Pe baza rezultatelor discutate în acest capitol, un articol este în curs de pregătire avansată și urmează să fie trimis către Romanian Reports in Physics.

#### Concluzii

O nouă instalație experimentală pentru PIXE în aer a fost dezvoltată la acceleratorul Tandetron de 3 MV din IFIN-HH. Întregul sistem a fost testat și funcționează corespunzător. Astfel, infrastructura experimentală a fost actualizată cu o tehnică foarte practică, care va fi orientată în cea mai mare parte către investigațiile obiectelor din patrimoniul cultural, dar va fi folosită și pentru o varietate de alte aplicații.

Fasciculul extern a fost testat folosind filme radio cromice pentru a vizualiza aria de iradiere al fasciculului. În cele din urmă, a fost efectuată o analiză PIXE în aer pe un material de referință standard pentru a valida că totul funcționează corect. O fotografie cu expunere îndelungată a unui fascicul de protoni extras în aer poate fi văzută în Fig. 14. Strălucirea albastră a atomilor de azot ionizat arată caracteristica dispersivă a fasciculului, precum și parcursul total al protonilor în aer.



Figura 14 : Imagine cu expunere lungă a fasciculului de protoni din aer

### **Capitolul 3 : Experimentul INCREASE**

#### 3.1. Context

Majoritatea izotopilor ce se găsesc în natură sunt creați în stele în timp ce acestea evoluează, schimbându-și compoziția. Stelele "ard" progresiv prin păturile lor de hidrogen, urmată de arderea păturii de heliu și continuă să ardă prin elementele superioare. Pe măsură ce se apropie de sfârșitul vieții acestora, o stea va trece prin diferite procese în funcție de masa sa originală. Stelele cu masă mică prin comparație cu Soarele nostru își vor expulza compoziția ca vânturi stelare și vor forma nebuloase planetare, în timp ce stelele cu masă superioară Soarelui nostru își vor expulza compoziția brusc printr-un eveniment numit supernova. Acest fenomen este declanșat de un colaps gravitațional care este îndreptat spre centrul stelei și va produce suficientă presiune și temperatură în nucleul acesteia pentru a declanșa arderea carbonului, a oxigenului și a siliciului. Elementele mai grele, până la fier-56, sunt create în timpul propagării undei de compresie cauzată de prăbușirea gravitațională, aceasta crescând brusc temperatura. Acesta este sfârșitul nucleosintezei stelare și are ca rezultat crearea unora dintre cei mai abundenți izotopi din univers în intervalul de masa până la 56 u.a.m..

Izotopii cu o greutate mai mare de 56 u.a.m. sunt creați în principal de unul dintre cele trei procese de captare, captarea lentă a neutronilor, captarea rapidă a neutronilor sau captarea protonilor. Procesele prin care sunt create elementele ce se găsesc în natură, împreună cu abundențele lor relative sunt prezentate în Fig. 15.



Figura 15 : Epoci distincte ale proceselor nucleare

Prin studiul reacțiilor nucleare și a ratelor prin care acestea sunt create în mediul cosmic, astrofizica nucleară este un puzzle complex care încearcă să determine originea izotopilor și să descrie evoluția cosmică, explicând abundențele elementelor. În ultimele decenii, studiul izotopilor bogați în neutroni, care sunt aproape de "neutron drip line", a devenit unul dintre obiectivele principale pentru instalațiile moderne de producție de fascicule radioactive, izotopi RIB, din întreaga lume. Studiul izotopilor exotici necesită crearea lor în cantități suficiente în laboratoare specializate și captarea lor în capcane pentru a fi studiați. Două abordări diferite sunt

folosite astăzi pentru crearea RIB-urilor: metoda on-line a sursei de ioni (ISOL) și metoda fragmentării în zbor [10].

Metoda ISOL necesită un fascicul primar de curent mare. Aceste particule primare sunt utilizate pentru iradierea unei ținte groase la temperatură înaltă din care izotopii rezultați vor difuza într-o sursă de ioni, formând un fascicul de ioni radioactivi prin ionizare secundară. Metoda este mai lentă în comparație cu fragmentarea în zbor, dar produce RIB-uri cu o calitate optică deosebit de bună, deoarece optica acestora depinde doar de sursa de ioni.

Metoda fragmentării în zbor necesită fascicul primar de particule grele (de exemplu uraniu) care este utilizat pentru iradierea unei ținte subțiri, rezultând fragmentarea fasciculului primar. Fragmentele rezultate sunt capturate cu ajutorul unei capcane de ioni și separate. Această metodă produce RIB-uri în cantități mai mici din cauza dificultății inerente în accelerarea curenților mari de ioni grei, totuși este capabilă de timpi de extracție mult mai scurți în comparație cu metodele ISOL. Aceasta este o proprietate importantă de considerat, deoarece izotopii radioactivi sunt instabili și cu cât sunt mai exotici , cu atât durata lor de viață este mai scurtă. FRS Fragment Separator de la GSI din Germania, este un bun exemplu de tehnica utilizată pentru producția RIB-urilor prin fragmentare în timpul zborului (fig. 16) [11].



Figura 16 : Configurarea experimentală a FRS Ion Catcher la GSI

Actualmente de interes sunt regiunile de la lantanidele bogate în neutroni la actinidele bogate în neutroni. Se crede că nucleosinteza în aceste regiuni are loc prin intermediul proceselor R în locații cosmice, cum ar fi fuziunile de stele neutronice. Din păcate, metodele utilizate în mod obișnuit la această instalație, cum ar fi fragmentarea, fisiunea sau fuziunea, nu pot crea izotopi din aceste regiuni și pot studia reacțiile doar în regiunea mai ușoară (A <160). Din această cauză, reacțiile de transfer multi-nucleon (MNT) sunt considerate pentru a studia aceste regiuni în mare parte neexplorate ale nucleilor exotici grei.

Transferul multi-nucleon este un tip de coliziune nucleară care are loc între un proiectil accelerat și o țintă staționară, la energii ușor deasupra barierei Coulomb și la parametri de impact mici. Este o coliziune inelastică profundă, în care mai mulți nucleoni sunt transferați între proiectil și țintă în timp ce formează un sistem semi-legat. Din cauza conservării impulsului proiectilului, sistemul semi-legat creat se va roti rapid. Datorită forțelor centrifuge, sistemul semi-legat se va rupe și ceea ce apare este un fragment de tip proiectil (PLF) și un fragment de tip țintă (TLF). Acestea sunt proiectilele și țintele inițiale care au schimbat nucleoni și astfel, prin acest proces este posibilă crearea de noi izotopi. Metoda este totuși complexă și nu este înțeleasă complet, chiar dacă a fost studiată de câteva decenii.

În comparație cu celelalte metode utilizate la instalațiile ce produc RIB-uri prin fragmentare, se observă că MNT produce izotopi bogați în neutroni cu o secțiune transversală crescută, chiar de un ordin de mărime, de exemplu în regiunile cuprinse între <sup>136</sup>Xe și <sup>198</sup>Pt [12]. Din acest motiv, există un interes crescut în experimentarea cu reacții de tip MNT pentru a produce nuclee exotice către calea procesului R, care ar putea ajuta la înțelegerea diferiților factori nucleari, cum ar fi nivelurile de energie ale păturilor acestora sau deformările lor. Acest lucru ar putea începe prin utilizarea atât a unor proiectile, cât și a unor ținte care sunt cât mai bogate în neutroni.

S-a propus stabilirea și dezvoltarea unei noi direcții de cercetare la FRS Ion Catcher pentru studierea izotopilor grei, bogați în neutroni, prin metoda reacției multi-nucleon. Acest lucru se va face folosind un fascicul primar stabil de <sup>238</sup>U cu energie de aproximativ 10MeV / u pe ținte bogate în neutroni, cum ar fi <sup>64</sup>Ni, <sup>209</sup>Bi, <sup>164</sup>Dy, <sup>198</sup>Pt și se vor măsura secțiunile transversale de producție ale ambelor fragmente, cum ar fi proiectilele și țintele simultan. Acest lucru va permite, de asemenea, măsurarea masei izomerilor cu durată lungă de viață (meta-stări cu perioade de înjumătățire mai mari de câteva ms) și a raporturilor lor energie dintre izomer și starea fundamentală. Astfel, noi izomeri pot fi descoperiți în reacțiile MNT.

#### 3.2. Cerințe de proiectare experimentală

FRS Ion Catcher este principalul experiment utilizat la GSI pentru captarea și analiza produselor de fragmentare care sunt create folosind un fascicul primar de <sup>238</sup>U accelerat prin sincronul SIS18, cu fascicul primar direcționat către ținte ușoare. Odată produse, fragmentele sunt capturate folosind o cameră gazoasă și extrase într-un fascicul de ioni radioactivi printr-un sistem de transport al fasciculului de radio-frecvență, iar apoi fragmentele rezultate sunt măsurate cu ajutorul unui separator de masă. Întreg ansamblul experimental se compune din trei subsisteme principale.

Celula de oprire criogenică (CSC) prezentată în Fig. 17 este un sistem de camere umplute cu heliu de înaltă puritate, care este răcit la 70K și recirculat. Camera interioară conține gazul de heliu și acționează ca un opritor pentru fragmentele care trebuie termalizate. Odată oprite în volumul acestei camere, fragmentele direcționate către o apertură de extracție cu ajutorul unor câmpuri electrice de ghidare. Atât câmpuri DC cât și câmpuri RF sunt folosite pentru direcționarea fragmentelor. Camera exterioară este utilizată pentru izolare, pentru a menține temperatura părții interioare constante. În interiorul celulei de oprire, o structură de electrozi este folosit pentru generarea componentei DC a câmpului pentru ghidarea ionilor termalizați către extracție. Aici, un covor de radio-frecvență [13] captează fragmentele și le ghidează spre o apertură de extracție.

Odată extrași, o linia de transport de fascicule, formată dintr-un cuadrupol de radio-frecvență (RFQ), stații de comutare de radio-frecvență și instrumente de diagnosticare a fasciculului, cum ar fi detector de siliciu, detector channeltron, sursă de ioni termici cu cesiu etc este folosităî pentru transportarea fragmentelor către sistemele de măsurare ale acestora. La capătul acestei linii de transport, un spectrometru de masă ce analizează timpul de zbor prin metoda multi-reflexiei (MR-TOF-MS) este folosit ca instrument principal pentru analizarea maselor și are o putere de rezolvare a masei mai mare de 10  $5m/\Delta m$ . Întregul sistem FRS Ion Catcher, conținând

celula de stopare criogenică (CSC), liniile de transport pentru fascicule de ioni (RFQ Beamline) și analizorul de masă (MR-TOF-MS) este prezentată în Fig. 17.



Figura 17 : Figura schematică a setării FRS Ion Catcher [11]

Pentru a studia reacțiile de transfer multi-nucleon cu FRS Ion Catcher, a fost proiectat și construit sistemul INCREASE. Acesta a fost instalat în interiorul celulei de oprire criogenică.

Sistemul INCREASE trebuie să îndeplinească mai multe cerințe. Ansamblul experimental necesită un carusel de ținte care să poată ține până la 6 ținte subțiri și care pot fi schimbate secvențial, aliniind fiecare țintă în parte direct în calea fasciculului primar. Acestea vor fi țintele de MNT cu ajutorul cărora se va realiza reacția. Ansamblul necesită un carusel de ținte secundar care poate găzdui fie instrumente, cum ar fi un opritor de fascicul pentru blocarea fasciculului primar sau un detector de siliciu pentru măsurarea fasciculului. Acesta poate însă fi utilizat și ca suport de ținte secundare pentru ținte subțiri. Ansamblul necesită un suport detașabil pentru o sursă de ioni, ce poate fi folosită pentru calibrare sau pentru experimente de sine stătătoare, fără a fi necesară utilizarea unui fascicul primar accelerat. Ansamblul necesită două colimatoare plasate la unghiuri diferite pentru a controla unghiul larg de emisie al sursei de ioni. În cele din urmă, ansamblul necesită o cameră internă care este protejată corespunzător, astfel încât, atunci când sursa de ioni este montată, ionii vor scăpa doar prin deschiderea colimată.

Sistemul INCREASE a fost proiectat la ELI-NP, România [14] și a fost fabricat la SOREQ, Israel [15]. Asamblarea finală a avut loc la Universitatea Giessen, Germania [16], iar sistemul va fi comisionat la GSI într-un experiment viitor.

#### 3.3. Proiectarea și asamblarea sistemului INCREASE

Partea principală a sistemului este caruselul principal, prezentat în Fig. 18. Acesta conține șase poziții, dintre care trei sunt dedicate montării țintelor subțiri pentru reacțiile MNT, două poziții sunt colimare de 15° și 60° care pot fi utilizate pentru a colima emisiile dintr-o sursă de fisiune spontană de <sup>252</sup>Cf (pentru calibrare și testare offline) iar una este o poziție deschisă pentru a permite fasciculului principal să treacă nealterat.



Figura 18 : Sistemul INCREASE, caruselul principal și motorul de acționare al acestuia. 1: deschideri pentru ținte MNT, 2: cale liberă, 3: colimator de 60°, 4: colimator de 150

Pentru a efectua măsurări off-line cu sursa de fisiune <sup>252</sup>Cf, prezentată în Fig. 19, un suport special a fost proiectat în carcasa sistemului INCREASE în care sursa poate fi montată pe un port filetat.



Figura 19 : Carcasa sursei de fisiune 252Cf și tija de siguranță pentru montare și demontare

Componenta secundară a sistemului INCREASE este caruselul secundar, care este ilustrat în Fig. 20. Aceasta este o structură mult mai mică, conectată la partea din spate a sistemului.



Figura 20 : Vedere izometrică a caruselului secundar

Când fasciculul de uraniu incident va iradia țintele subțiri de MNT, o parte semnificativă din fasciculul primar va penetra aceste ținte și va continua parcursul în interiorul camerei de stopare criogenică. Acest lucra va provoca ionizarea heliului în interiorul camerei de oprire. Pentru a suprima acumularea de sarcină spațială de ioni de heliu, este necesar un opritor de fascicul (beam dump), poziționat la o distanță mică față de ținte.

Deoarece în reacțiile MNT, atât fragmentele de tip proiectil, cât și fragmentele de tip țintă sunt emise la diferite unghiuri și nu păstrează unghiul incident al fasciculului de uraniu primar, aceste fragmente MNT vor fi emise pe lângă opritorul de fascicul și vor putea fi termalizate în volumul camerei și extrase. Odată cu producția acestor fragmente, fasciculul primar de uraniu va crea ionizări în gazul de heliu, între țintă și opritorul de fascicul. Pentru suprimarea acestui heliu ce formează sarcină spațială, pe caruselul primar sunt montate cuști DC de dimensiune mică, care protejează regiunea de încărcare a spațiului dintre ținta MNT și opritorul de fascicul. De asemenea, aceste mini cuști DC suprimă scurgerea ionilor de heliu în volumul camerei de stopare.

Un sistem de angrenaje de transfer pentru este folosit pentru a transfera cuplul de la utilizator la caruselul secundar. Sistemul complet de transfer este prezentat în Fig. 21.



Figura 21 : Vedere izometrică a sistemului INCREASE cu angrenaje de transfer

O cerință importantă de siguranță împotriva radiațiilor a sistemului este de a avea o cameră interioară încapsulată. Acest lucru se datorează activității ridicate de aproximativ 10 MBq a sursei de fisiune de <sup>252</sup>Cf pentru când va fi utilizată pentru testarea off-line.



Figura 22 : Sistem țintă criogenică asamblat pentru studii de reacție MNT

Ansamblul general construit este prezentat în Fig. 23.



Figura 23 : Sistemul INCREASE construit

După modificările finale și după ce a fost testat pentru a funcționa corect, sistemul INCREASE a fost montat pe grila de electrozi din interiorul camerei criogenice de stopare. Un software de control pentru motorul pas cu pas criogenic a fost proiectat în mediul de dezvoltare LabView și întregul sistem este pregătit pentru testarea criogenică prin imersie în azot lichid. Dacă va avea succes va fi montat în celula de oprire criogenică pentru viitoarele experimente de reacție MNT planificate să fie efectuate la GSI.



Figura 24 : De la proiectarea CAD la sistemul funcțional

#### 3.5. Simulări pentru suprimarea acumulării de sarcină spațială

Configurație caruselelor de țintă pentru reacții de tipul MNT este ilustrată în Fig. 25 . Pentru aceasta, intrarea în sistem este liberă, astfel încât să se utilizeze ioni incident de uraniu, caruselul primar este fie în pozițiile a patra, a cincea sau a șasea (poziții de țintă MNT), iar caruselul secundar este în poziția de opritor al fasciculului. Cuștile DC pentru suprimarea încărcării spațiale sunt montate între caruselul primar și cel secundar. Fragmentele MNT vor fi produse la diferite unghiuri în raport cu direcția incidentă a fasciculului și vor ocoli opritorul, continuând spre volumul interior al camerei de stopare.



Figura 25 : Sistemul INCREASE în configurația MNT

Eficiența diferitelor cuști DC a fost studiată pentru a optimiza designul acestora. Când un puls incident de aprox. 10<sup>7</sup> ioni de <sup>238</sup>U pătrund în camera de stopare și interacționează cu ținta MNT, în jur de 85% din ionii de uraniu incidenți vor penetra prin această țintă și opritorul de fascicul este utilizat pentru a le împiedica parcursul către volumul interior al celulei de stopare. Indiferent, energia cinetică ridicată a acestor ioni va ioniza heliul dintre ținta MNT și opritorul de fascicul și poate crea o încărcare spațială semnificativă. Cantitatea de încărcare spațială produsă pentru un puls de fasciculului de 10<sup>7</sup>ioni a fost simulată în Fig. 26 folosind Geant4.



Figura 26 : Încărcarea spațială produsă între ținta MNT și opritorul de fascicul

Sarcina de spațiu produsă a fost calculată pentru fiecare mm cub din interiorul acestui volum de oprire. Scopul cuștii DC este de a captura ionii de heliu astfel încât să nu se scurgă în volumul celulei de oprire. Aceste mini cuști DC pot realiza acest lucru prin două moduri. În primul rând, pot servi ca un electrod negativ (în comparație cu sarcina spațială în sine) pentru a oferi o cale de ghidare pentru ionii de heliu spre acesta și, în al doilea rând, căderile de tensiune pot fi utilizate pentru a crea câmpuri suplimentare care pot ghida ionii de heliu către opritorul de fascicul sau către alt electrod folosit pentru neutralizare. Au fost studiate patru geometrii, prezentate în Fig. 27. Trei geometrii folosesc mini cuști DC iar a patra folosește doar o cădere de potențial generată între sistemul INCREASE și opritorul de fascicul.



Figura 27 : Diverse modele pentru suprimarea încărcării spațiului folosind mini cuști DC

Eficiența de suprimare a sarcinii spațiale a fost studiată pentru fiecare geometrie la diferite încărcări de sarcină spațială, pe baza distribuției acestei sarcinii. Rezultate sunt prezentate în Fig. 28.



Figura 28 : Eficiențe de suprimare a încărcăturii spațiale pentru diferite variante ale cuștii DC cu aplicarea unei tensiune de -300V

## În baza rezultatelor discutate în acest capitol, un articol este în curs de pregătire avansată și urmează să fie trimis către Nuclear Instruments and Methods, secțiunea B.

#### Concluzii

Acest experiment este o colaborare între trei institute de cercetare și Universitatea Giessen. Soluția prezentată, împreună cu proiectarea CAD a sistemului mecanic și desenele tehnice de execuție au fost furnizate de ELI-NP, România, eu însumi fiind investigatorul principal. Fabricarea componentelor fizice a fost executată la Soreq Nuclear Institute, Israel. Depanarea și asamblarea finală s-au făcut la Universitatea Giessen, Germania, împreună cu achizițiile finale de componente mai mici, precum șuruburi, arc de compresie, magnet etc. Experimentele MNT vor fi efectuate la GSI. Inginerii mecanici de la Soreq au făcut o treabă excelentă la fabricarea tuturor componentelor, iar laboratorul de la Universitatea Giessen a fost bine echipat pentru a efectua depanarea necesară. Întregul demers este în cele din urmă un efort de echipă și principalul rezultat obținut este un sistem care funcționează și o colaborare fructuoasă între cele patru echipe respective. Mi-ar plăcea în special să mulțumesc lui Daler-Amanbayev și Lizzy Gröf de la Universitatea Giessen, precum și lui David Benyamin de la Soreq Nuclear Institute pentru ajutorul acordat în finalizarea acestei lucrări.

## Capitolul 4: Covoare de radio-frecvență (RF)

#### 4.1. Context

Elementele electro-optice sunt utilizate pentru transportul și analiza diferitelor tipuri de fascicule de ioni în scopuri diferite. Astfel de dispozitive pot varia de la spectrometre de masă simple, utilizate pentru a defini tipul fasciculului, până la acceleratoare de particule complexe. La nivel fundamental, elementele electro-optice sunt utilizate în trei tipuri principale de aplicații. Ele pot fi utilizate pentru a genera diferite tipuri de fascicule de ioni, de exemplu surse de ioni, pot fi utilizate pentru transportul și manipularea diferitelor tipuri de fascicule dintr-o locație în alta cu eficiență diferită și pot fi folosite și pentru procesarea și analiza aceste fascicule de ioni. Fasciculele de ioni pot fi caracterizate prin speciile lor, distribuția lor de masă, distribuția energiei, distribuția sarcinii, anvelopa și emisia etc.

O problemă fundamentală în manipularea fasciculelor de ioni este că orice fel de element optic are o proprietate numită acceptanță care reprezintă emitența maximă pe care o poate transmite un sistem de transport al fasciculului [17]. Orice fel de sursă de ioni trebuie să îndeplinească două sarcini importante, și anume generarea de ioni și extracția de ioni. De obicei, o sursă de ioni este cuplată cu o lentilă Einzel pentru a păstra forma fasciculului de ioni, împiedicând astfel emitanța acestuia să explodeze. Cu toate acestea, într-o sursă de ioni în care ionii sunt generați cu un impuls larg răspândit, de exemplu într-o sursă de ioni de re-ionizare, este necesară o acceptanță largă de către sistemul de transport al fasciculului pentru a putea extrage și produce un fascicul de ioni utilizabil. Aceasta este aplicația principală pentru covoare de radiofrecvență (RF). [17]

Aceste elemente optice pot accepta ca intrare o populație de ioni cu o distribuție largă de inpuls și energie și pot emite un fascicul cu emitanță scăzută. La nivel de bază, un covor RF este un aranjament în plan al mai multor benzi metalice cu tensiuni diferite aplicate pe ele. Aceste benzi pot fi aranjate într-o matrice circulară sau liniară pentru a se potrivi diferitelor geometrii.

Există trei componente principale într-un covor RF. În primul rând, există un câmp de ghidare DC care ghidează ionii spre covorul RF. În al doilea rând, există un câmp de repulsie RF care acționează la mică distanță de suprafața acestuia și captează ionii deasupra suprafeței sale. În al treilea rând, există un câmp de direcționare care concentrează ionii spre o apertură de extracție. De obicei, un covor RF este plasat într-o cameră cu gaz de o anumită presiune. Prin coliziuni cu particule de gaz neutru, ionii care intră în această cameră vor fi termalizați, astfel gazul acționează ca un limitator de viteză. Dacă linii de câmp electrice sunt prezente în volum, acești ioni termalizați vor urma liniile de câmp cu precizie. Astfel, este posibil să se extragă ioni cu o distribuție largă de impuls și energie folosind un covor RF plasat în interiorul unei camere gazoase. Acest lucru prezintă un interes semnificativ pentru producerea fasciculelor de ioni secundari prin reacții nucleare, deoarece acești ioni secundari sunt de obicei generați cu o largă răspândire a impulsului, sarcină mare, energie cinetică mare etc.

La ELI-NP va fi construită o linie de fascicul radioactiv cu fascicule de ioni radioactivi (RIB) în cadrul viitorului proiect de extindere a clădirii experimentale către reactorul nuclear IFIN-HH, care a fost dezafectat recent. Această facilitate va utiliza fasciculul gamma de intensitate ridicată, a cărei energii acoperă regiunea de rezonanță a dipolului gigant de <sup>238</sup>U (~ 10-18 MeV), pentru a genera fragmente de foto-fisiune într-un teanc de foițe subțiri de <sup>238</sup>U plasate în centrul unei celule de gaz [18]. După termalizarea în gaz, acești ioni grei sunt transportați printr-o combinație de mai multe tipuri de câmpuri electrice și jeturi de gaze supersonice către ieșirea din celulă. Elementul central al acestui experiment este captarea și extragerea acestor ioni grei folosind un covor RF. Ioni extrași sunt preluați de un cuadrupol de radio-frecvență (RFQ) [19] pentru formarea fasciculului și un analizor de masă puternic (m /  $\Delta m > 5 \cdot 10^5$ ) de tipul Multiple Timeof-Flight Reflection Spectrometer care selecteaza speciile exotice produse.

Pentru acest program experimental este necesară dezvoltarea și producerea unei soluții personalizate de covoare RF pentru a fi utilizate pentru extragerea și formarea fasciculului de ioni radioactivi. Din această cauză, au fost proiectate și investigate diverse concepte de covoare RF.

#### 4.2. Facilitatea ELISOL de la ELI-NP

Instalația ELI-NP poate furniza fascicule gamma de înaltă intensitate, ceea ce ne va oferi un nou instrument pentru cercetarea nucleară [21]. Deoarece energiile acestor raze gamma vor acoperi domeniul rezonanței gigante de dipol, ar putea fi potrivite pentru producerea și cercetarea fragmentelor de fisiune prin reacții de foto-fisiune.

Pentru a studia elementele refractare din domeniul Zr-Rh (A ~ 100) și elementele pământurilor rare (A ~ 140), a fost propus un procedeu experimental pentru generarea fasciculului de ioni radioactivi (RIB) bogat în neutroni [20]. În acest scop, tehnologia de ghidare on-line a izotopilor (IGISOL) va fi utilizată, folosind ca fascicul primar sursa gama de luminozitate ridicată.

În ELI-NP HADO-CSC (cameră criogenică de stopare cu extracție ortogonală), razele gamma principale vor iradia mai multe ținte subțiri de <sup>238</sup>U, declanșând mecanismul de rezonanță gigantică de dipol și va provoca eliberarea fragmentelor de foto-fisiune. Odată ce nucleul de <sup>238</sup>U fisionează, fragmentele de foto-fisiune pot avea o energie cinetică de 20-100 MeV (în funcție de masă) și un impuls foarte larg răspândit [22]. În Figura 29 este prezentat demonstratorul ELI-NP. Foto-fisiunea are loc în camera inferioară notată cu chamber 1.

Camera este umplută cu heliu la 300 mbar și are o temperatură de 70 K. Puterea de oprire a mediului gazos va termaliza toate fragmentele într-un interval de aprox. 10 cm [18]. Fiind un gaz inert, heliu este o alegere excelentă, deoarece acesta are un mare potențial de ionizare. Sarcina fragmentelor nu ar trebui neutralizată prin schimbul de sarcină cu impurități reziduale de gaz, făcând astfel extracția câmpului electric ineficientă. Prin urmare, camera trebuie umplută cu gaz ultra-pur de heliu și menținută la o temperatură scăzută pentru a îngheța majoritatea impurităților pe pereți acesteia.

Prin ciocnirea cu particule de gaz neutru, fragmentele de fisiune sunt termalizate, iar gazul impune o limită de viteză datorită puterii de oprire. Dacă există linii de câmp electric în volum, orice ion va urma liniile de câmp electric cu precizie. Prin urmare, fragmente cu o distribuție foarte largă a parametrilor cinematici pot fi extrase dacă păstrează cel puțin o stare de sarcină de 1<sup>+</sup>. Prin această metodă de extracție, covorul RF acționează ca un colector de ioni lenți.

Odată ce fragmentele sunt termalizate, se folosește un câmp de ghidare DC pentru a le direcționa către partea de extracție a camerei. Aceste linii de câmp ocupă întreaga cameră și vor avea o putere de aproximativ 100 V / cm. Partea de extracție a camerei este echipată cu covoare RF. Acestea sunt utilizate în două scopuri. În primul rând, covorul RF va capta fragmentele de

foto-fisiune pe suprafața sa, aplicând o forță de respingere RF care acționează la o distanță mică de suprafața acestuia. Fragmentele vor intra într-un echilibru între câmpul de repulsie RF al covorului și câmpul de ghidare DC, care le apasă înspre covor.



Figura 29 : Ilustrarea celulei de oprire criogenică folosită pentru a crea fascicule de ioni radioactivi folosind reacția ( $\gamma$ , f). În această ilustrație, linia galbenă reprezintă fasciculul gamma primar și direcția acestuia, iar liniile punctate albastre și roșii reprezintă calea fragmentelor de fisiune în timpul celor trei faze de zbor (termalizare, ghidare prin gaz și extracție pe suprafața covorului RF)

#### 4.3. Simularea covoarelor de RF

Cei doi importanti care trebuiesc luati în considerare parametri pentru extractia fragmentelor de foto-fisiune prin utilizarea de covoare RF sunt eficienta acestei extractii si timpul de extractie. Prin urmare, covorul RF trebuie simulat cât mai exact posibil pentru a determina o geometrie bună și pentru a estima parametrii de extracție. SimIon 8.1 [23] este un software excelent pentru simulare electro-optică. În acest program de simulare pot fi introduse geometrii complexe, precum și modele fizice folosind programare în limbajul Lua. Acest lucru permite simularea comportamentelor fizice complexe, cum ar fi modelarea coliziunilor iongaz.

Pentru a simula acest lucru, s-au generat ioni la capătul covorului RF și s-a generat o cădere de potențial între o grilă de repulsie poziționată în partea de jos și covorul RF, poziționat în partea de sus. Acesta va forma câmpul DC care va ghida ionii către covorul RF. Această geometrie este prezentată în figura 30.



Figura 30: Geometria simulată pentru a determina parametrii covorului RF

În continuare, s-a aplicat o cădere de potențial între electrodul cel mai exterior folosit ca anod și electrodul cel mai interior folosit ca catod. Acesta va fi câmpul folosit pentru extracție pe suprafața covorului, care va ghida ionii către apertura de extracție. Câmpul este împărțit în mod egal între electrozii rămași pentru a forma echipotențiale. Peste acest câmp se aplică un câmp de radio-frecvență cu polaritate opusă fiecărui electrod adiacent, astfel: pe primul electrod se aplică un semnal pozitiv, pe al doilea negativ. Acesta este câmpul de repulsie, folosit pentru captarea ionilor în plan 2D deasupra suprafeței covorului RF. Sunt înregistrați timpii de zbor și se calculează vitezele de deplasare a ionilor pentru diferite intensități ale câmpului DC de extracție. Aceste rezultate sunt prezentate în Figura 31. Pentru aceste simulări, s-au folosit o frecvență RF de 6 MHz și o amplitudine RF de 130 V.



Figura 31 : Viteza medie a ionilor peste covorul RF și timpul mediu de așteptare pe electrod pentru diferite tensiuni ale câmpului de tracțiune

Un factor limitativ în performanța celulei de oprire criogenică este capacitatea covorului RF de a captura ioni de diferite viteze. În prima simulare care investighează capacitatea covorului RF de a captura ioni deasupra acestuia, ionii au intrat cu o viteză medie de aproximativ 17 m / s. Această simulare a fost repetată pentru mai multe viteze ale ionilor.



Figura 32 : Amplitudini de tensiune RF ale covorului necesare pentru captarea ionilor la diferite viteze de intrare

#### 4.4. Calculele timpului de extracție

Simulările efectuate până în acest moment au permis precizarea parametrilor de lucru pentru extragerea fragmentelor folosind un covor de RF folosind metoda căderii de potențial pe suprafața acestuia. O a doua metodă este investigată, metoda undelor călătoare. În această metodă, căderea de tensiune de pe suprafața electrozilor covorului RF este înlocuită cu propagarea unei unde dinspre exteriorul covorului, către interiorul acestuia. Ionii vor fi extrași către apertura centrală călătorind pe acestă unde, similar cu accelerația ionilor într-un accelerator de tipul tuburi de drift. Pentru simplitate, vom lua în considerare cazul unui covor RF cu diametrul de 25 cm și cu 500 de electrozi (4 electrozi / mm) așezați într-o celulă de oprire cu geometrie cilindrică și o înălțime de 200 mm.

Se consideră o țintă subțire de 238U plasată în centrul acestui volum cilindric. Iradiată cu un fascicul gama primar de 5x10 11y / s și energie gama între 12-18 MeV, se vor produce aprox. 2x106 fragmente de fisiune / sec. Aceste fragmente vor fi emise spate-în-spate în direcții aleatorii [20] . Energia inițială a fragmentelor de foto-fisiune va fi în jur de 20-100 MeV, iar starea de sarcină va fi între 10-20q. Întregul volum este umplut cu heliu la o presiune de 300 mbar și o tempeeratură de 70 K. Prin coliziuni elastice , fragmentele se termizează foarte repede, în aproximativ 50 ns și vor avea o energie cinetică ~ 1-2 keV, precum și o stare de sarcină de q = + 1. După termizare , fragmentele vor fi străbătut o distanță de aproximativ 100 mm față de ținta 238U într- o direcție aleatorie. Definim covorul RF ca fiind în poziția superioară și un câmp de repulsie provenit de la electrozi pozitivi din regiunea inferioară. Geometria este ilustrată în Fig. 33.



Figura 33 : Geometrie utilizată pentru simulări cu electrozi de repulsie în partea de jos, țintă 238U în centru și covor RF în partea de sus

Cel mai simplu mod de a calcula timpul mediu de extracție folosind aceste viteze de deplasare este de a calcula timpul de deplasare pe baza lungimii de deplasare pentru fiecare unghi de emisie. Ca o bună aproximare, toți ionii vor fi termalizați pe o lungime de deplasare de 100 mm în gaz. Timpul de extracție este calculate pentru fiecare unghi la care are loc emisia.



Figura 34 : Timpul de extracție a fragmentelor calculat în funcție de unghiul de emisie; fiecare punct de date reprezintă un grup de ioni emiși la un anumit unghi și timpul necesar pentru extragerea lor

Figura 34 prezintă relația dintre timpul total de extracție și fiecare unghi de emisie. S-a calculat timpul necesar pentru ca acești ioni să ajungă la apertura de extracție. Aceste calcule se fac atât pentru metodele de extracție folosind cădere de potențial DC pe suprafața covorului RF,

cât și pentru metoda undelor călătoare. Timpul total de extracție este dat de timpul de termalizare, timpul de zbor prin gaz și timpul de extracție deasupra covorului RF.

În continuarea acestui studiu, a fost simulată o cameră mai mică decât HADO-CSC planificată pentru ELI-NP. Această cameră este formată din două camere gazoase, așezate una peste alta, conectate prin două aperturi mici cu diametrul de 0,6 mm. Se compune din trei covoare RF pentru extracția ionilor, două în camera inferioară și unul în partea superioară. Motivul utilizării unei camere de extracție ortogonală este scăderea timpului de extracție. Spre deosebire de camera de oprire cilindrică în care ionii sunt introduși de la un capăt, călătorind axial de-a lungul camerei și extrași pe la celălalt capăt, într-o cameră ortogonală, ionii intră paralel cu plasarea covoarelor RF și de îndată ce se termizează, aceștia sunt îndrumați înspre ei și extrași. Sistemul este construit ca o scară, prima cameră termalizează și extrage ioni la o presiune mai mare în a doua cameră unde presiunea este redusă, astfel încât mobilitatea este îmbunătățită.

Sistemul demonstrativ este format din două camere, fiecare cameră având o geometrie dreptunghiulară cu dimensiuni interne de L x l x h = 500 x 250 x 250 mm. Ambele camere au o geometrie identică, așa cum se arată în partea stângă a Fig. 35. Transportul simulat de ioni prin acest sistem este prezentat în partea dreaptă a Fig. 35.



Figura 35 : Stânga: proiectare 3D CAD a CSC Demo; Dreapta: simularea transportului de ioni prin sistem

În baza acestor simulări, au fost găsiți următorii parametri de lucru pentru a putea extrage fascicul din camera de stopare ortogonală:

- Camera este umplută cu gaz de heliu la 70 K
- Câmpul de respingere este de 10 V / mm și fragmentele se deplasează prin gaz cu aprox. 17 m / s
- Covorul RF are electrozi cu pas de 0,25 mm, funcționează la 6 MHz și 130  $V_{RF}$ ; la aceste valori, poate captura ioni cu viteze de intrare de până la 32 m / s
- Dacă folosim o cădere de potențial de 3,6 V / mm pentru extracție, se atinge o viteză de fragment de 2,38 m / s pe suprafața covorului
- Dacă folosim metoda undelor călătoare la 8 kHz și 3V amplitudine, se atinge o viteză de fragment de 7,81 m / s pe suprafața covorului

#### 4.5. Construirea unui covor de RF

Covoarele RF sunt construite folosind tehnologia utilizată pentru a produce circuite imprimate (PBC) [24]. Această tehnologie folosește un material izolant cu diferite proprietăți, de obicei un material FR4 [25], Rogers 4000 sau I-Tera [25] și pe deasupra acestui material izolant se aplica un strat electric din cupru de diferite grosimi. Folosind fie gravarea, fie litografia, stratul de cupru poate fi modelat sub diferite forme geometrice. Un PCB tipic este compus din două straturi, ceea ce înseamnă că are un strat conductor superior și inferior și un dielectric între ele. Mai multe straturi pot fi construite prin laminare, de exemplu 4 straturi având încă două straturi ascunse, în interiorul materialului.



Figura 36 : Straturile unui covor RF. 1: strat superior, 3: inele DC ascunse interioare, 5: masă ascunsă interioară, 7: strat de conectare inferior, 8: componente electronice, 2,4,6: izolator

Pentru a crea electrozii unui covor RF, stratul superior de cupru este dispus într-o serie de cercuri geometrice. În principiu, cu cât se pot construi mai mulți electrozi pe mm, cu atât este mai mare forța estimată de repulsie RF și se poate realiza o eficiență globală de extracție mai mare. O imagine microscopică a urmelor de cupru de pe suprafață pe un covor RF este prezentată în Fig. 37.



Figura 37 : Imagine de microscop 2.5D a stratului de suprafață al unui covor RF

#### 4.6. Covor RF spiralat

Utilizarea metodei de extracție cu unde călătoare poate fi benefică din două motive. În primul rând, poate permite un transport de ioni mai rapid, ducând la timpi de extracție mai scurți. În al doilea rând, elimină necesitatea de a utiliza componente electronice pe covorul RF. Aceasta este o chestiune foarte practică, deoarece simplifică construcția covorului și elimină un potențial punct de eșec. Un covor RF trebuie să funcționeze într-un mediu criogenic și componentele electronice discrete se pot defecta. Într-un covor RF de dimensiune mare cu sute de componente mici aranjate într-o geometrie strânsă, depanarea este o provocare. Aceste componente electronice sunt, de asemenea, o sursă de căldură, mai ales dacă funcționează defectuos. Folosind doar șase semnale modulate pentru a conduce la captarea și extragerea ionilor, covorul RF în sine este simplificat.

O altă chestiune practică trebuie considerată. În mod ideal, prin creșterea densității electrozilor de pe suprafată, câmpul de repulsie poate fi mărit, ceea ce poate duce la o eficientă mai bună de extracție. Sub un aspect diferit, tensiunile de acționare pot fi reduse, ceea ce poate duce la emisii de căldură mai mici, ceea ce este esențial important pentru menținerea temperaturii scăzute în interiorul celulei de oprire criogenice. Principalul factor de limitare în creșterea densității electrozilor este unul practic, și anume canalele ce conectează două suprafețe de cupru prin stratul izolator (denumite vias) sunt întotdeauna mai mari decât lățimea minimă a electrozilor de cupru. O posibilă solutie pentru a depăsi această problemă este de a elimina canalele vias complet. Acest lucru este posibil prin aranjarea electrozilor stratului superior într-o geometrie spiralată, înlocuind în esentă mai multi electrozi cu o spirală lungă. Pentru realizarea acestei idei, trebuiesc luați în considerare mai mulți factori cheie. În primul rând, dacă luăm în considerare doar câmpul de repulsie RF, două semnale alternative cu un offset de 180° (opus în directie) trebuiesc aplicate pe toți electrozii secvențial, ceea ce înseamnă că primul semnal RF se aplică tuturor electrozilor cu număr impar și al doilea semnal RF pe toți electrozii cu număr par. Electrozii circulari sunt dispuși concentric la un pas fix, de exemplu un electrod la fiecare pas de 0,5 mm. Putem înlocui toți electrozii pe care se aplică semnalul RF 1 cu un singur electrod spiralat

lung. Această spirală va avea un punct de origine la marginea zonei active si se va termina undeva suficient de aproape de apertura de extracție. Spirala va avea un pas care este de două ori mai mare decât cel al covorului, de exemplu 1 mm. Adăugăm o altă spirală pentru electrozii semnalului RF 2, dar punctul de origine este rotit simetric la 180° astfel încât cele două spirale sunt acum complementare. Pentru ca sistemul să funcționeze, în orice punct al zonei active, distanța dintre marginile primei spirale și celei de-a doua spirale trebuie să rămână aceeași. Această geometrie funcționează deoarece la nivel microscopic, ionii nu simt nicio diferență între o geometrie spirală și una circulară. Acest lucru se datorează faptului căci, curbura spiralei este nesemnificativă din punctul de vedere al ionilor călători. Cu toate că numai două spirale ar putea fi utilizate numai pentru captarea ionilor, doar două spirale nu ar permite și extracția lor către apertura centrală. Utilizarea unui câmp de ghidare DC va fi imposibilă, deoarece nu putem aplica o cădere de tensiune pe un electrod continuu. Cu toate acestea, geometria se pretează ca fiind foarte practică pentru extracția cu metoda undelor călătoare. Cerința minimă este de a avea patru spirale îmbinate împreună, fiecare compensată cu 90<sup>0</sup> față de originea covorului. Un semnal de undă călătorie este aplicat pe aceste patru spirale, iar unda se deplasează spre interior de la marginile zonei active către apertura de extracție centrală.

Geometria spiralată a fost simulată în SimIon 8.1 și rezultatele sunt foarte promițătoare. Sistemul funcționează în ansamblu cu aceiași parametri ca un covor circular cu electrozi concentrici. Din aceste simulări s-a dedus că aria regimului operațional crește direct proporțional cu creșterea presiunii, dar scade proporțional cu câmpul de împingere aplicat și amplitudinea undei călătoare. Covorul RF spiralat se comportă ca un covor RF cu electrod circular din punctul de vedere al acestor parametri operaționali și al capacității sale de a captura ioni. Pe baza rezultatelor discutate mai sus, a fost aleasă o frecvență RF de 3 MHz la o amplitudine RF de 60V, deoarece aceasta oferă cea mai mare zonă operațională. Folosind aceste valori și o presiune de 30 mbar și un câmp de împingere de 1 V / mm, timpii de extracție pentru un covor cu diametrul de 250 mm sunt calculați pentru diferite frecvențe și amplitudini ale undelor călătoare. Aceste rezultate sunt prezentate în Fig. 38 .



Figura 38 : Timp de extracție a ionilor pentru un covor spiralat RF cu extracție a undelor călătoare la diferite frecvențe și amplitudini

#### 4.6.1. Construcția unui covor RF spiralat

Covorul prezentat în Fig. 39 are geometrie spiralată cu 4 spirale, un strat superior de repulsie și colectare și un strat inferior împământat. De asemenea, are cinci conexiuni electrice. Fiecare spirală are propria conexiune electrică, care nu este partajată, iar apertura de extracție are o conexiune separată. Spiralele produc aproximativ 0,49 nF de capacitanță între ele și fiecare are aproximativ 21,5 ohmi de rezistență (măsurată între punctul de aplicare al semnalului și capătul lor).



Figura 39 : Testarea electrică a covorului spiralat RF

O imagine microscopică 2.5D a aperturii centrale de extracție și a capetelor a patru spirale este prezentată în Fig. 4 0. Deși spiralele sunt electrozi lungi, rezistența rămâne neglijabilă și nu creează probleme electrice. Există totuși alte probleme practice care ar putea apărea, din cauza lungimii acestor electrozi, defectele mici de fabricație sau manipularea necorespunzătoare ar putea crea defecte.



Figura 40 : Imagine la microscop 2.5D a duzei de extracție a unui covor spiralat RF

Acest covor spiralat RF este un prototip folosit pentru a investiga modul în care această geometrie se comportă experimental. Geometria spiralată ar putea fi utilizată pentru a produce covoare RF cu densități de electrozi ridicate, deoarece poate elimina necesitatea canalelor de tipul vias și simplifica construcția generală.

#### Pe baza rezultatelor discutate în acest capitol, un articol a fost publicat în Buletinul Științific al Politehnicii din București, secțiunea Matematică și Fizică și un al doilea articol este în curs de pregătire avansată și urmează să fie trimis la Journal of Mass Spectroscopy.

#### Concluzii

Covoarele RF sunt concepte relativ noi care au potențialul de a înlocui elementele clasice de extracție optică. Acestea sunt dispozitive sofisticate și utilizate pentru captarea și extragerea ionilor și au potențial în multe aplicații diferite, cum ar fi spectrometre de masă, detectoare de ioni și extractoare de ioni. Funcționarea unui covor circular RF a fost investigată folosind simulări de optică ionică la diferiți parametrii, pentru a fi utilizate pentru viitoarea instalație ELISOL. În timpul acestor investigații, a fost propus un nou concept de covor RF, covorul spiralat RF, iar simulările de optică ionică au testat noua geometrie ca fiind viabilă. Dacă va avea succes, va oferi mai multe avantaje în comparație cu geometria clasică a electrodului circular, cea mai importantă fiind posibilitatea de a conduce la creșterea densității de energie. Un covor spiralat RF a fost construit în scopuri de testare și va fi utilizat în viitorul sistem de testare a covoarelor RF, prezentat în capitolul următor.

## Capitolul 5 : Unitatea de testare a covoarelor RF

#### 5.1. Context

Studiul structurii nucleare pentru nucleele exotice prezintă un interes la nivel mondial, demonstrat de construcția de noi instalații cu fascicule de ioni radioactivi, de exemplu Facility for Rare Isotopes (FRIB) de la Universitatea de Stat din Michigan [26] și modernizarea instalațiilor existente, de exemplu Super Fragment Separator la FAIR, GSI [27]. Metoda de fragmentare în zbor are potențialul de a produce o mare varietate de nuclee noi și exotice. Cu toate acestea, acești nuclei vor avea un impuls ridicat și necesită o modalitate de a le colecta și de a forma un fascicul bine definit, cu emitanță și energie redusă [28]. Acest lucru este necesar pentru a permite măsurarea masei cu înaltă precizie și va permite investigații ale structurii nucleare ale acestor nuclee. Cel mai eficient mod de a produce, colecta și extrage aceste nuclee exotice este prin utilizarea unei celule de oprire. Aceste camere sunt umplute cu diverse gaze la diferite presiuni și temperaturi. Acestea pot avea structuri diferite cu o extracție unică sau multicameră, axială sau ortogonală, dar toate folosesc covoare RF ca mijloc de colectare și extragere a acestor nuclee exotice către o apertură de extracție unde curgerea de gaz preia transportul și ionii sunt transportați în exteriorul celulei de oprire.

#### 5.2. Proiectarea unui sistem de testare a covoarelor RF cu extracție axială

Conceptul pentru acest sistem a fost realizat în jurul echipamentelor deja existente în institutul IFIN-HH și a unor componente care erau deja disponibile la ELI-NP. Din punct de vedere al construcției, vom explora în continuare cele mai importante componente ale acestui sistem.



Figura 41 : Prezentarea generală camerei de testare pentru covoare RF cu extracție axială

Pentru a utiliza acest set experimental, este necesară o serie aparature electronice. Trei generatoare de forme de undă cu două canale fiecare sunt utilizate pentru a furniza șase ieșiri de semnal RF independente, patru pentru covorul RF și două pentru cuadrupolul de extracție. O altă abordare este de a împărți un singur semnal în două semnale cu polarități opuse, folosind transformatoare.

Pentru a furniza suficientă putere pentru a conduce electronica, sunt utilizate amplificatoare RF în bandă largă. Sunt necesare mai multe surse de tensiune continuă pentru a furniza câmpurile de ghidare și accelerație necesare. Un controler de temperatură este utilizat pentru a monitoriza întregul experiment cu ajutorul a trei senzori PT1000 [29]. Un detector de tipul Channeltron este utilizat pentru detectarea semnalelor slabe de ioni extrase și pentru acesta se utilizează o sursă de alimentare de înaltă tensiune și un lanț de detecție. O diagramă a sistemelor electronice este prezentată în Fig. 42.



Figura 42 : Diagrama schematică a sistemelor de acționare, atât electrice, cât și fizice (vid și termic)

În cele din urmă, o cutie de joncțiune electrică care distribuie puterea și asigură protecție la supracurent și la supratensiune este utilizată pentru a asigura siguranța echipamentelor electronice. Întregul ansamblu experimental cu toate dependențele, așa cum sa propus pentru testarea covoarelor RF, este prezentat în Fig. 43.



Figura 43 : Vedere izometrică a întregului ansamblu al setului experimental pentru testarea covoarelor RF

#### 5.3. Proiectarea unui sistem de testare a covoarelor RF cu extracție ortogonală

A fost conceput un al doilea ansamblu de testare format din trei camere care prezintă extracție ortogonală și care ar putea fi utilizat în viitor pentru a simula un experiment ELISOL la scară redusă, pentru a dobândi cunoștințe importante de lucru în direcția construirii setului experimental real. Componentele necesare testării sistemului de captare și transport al ionilor sunt într-un fel similare cu cele dezvoltate în cap. 5.3, însă acestea diferă în ansamblul rețelei de electrozi DC folosiți pentru ghidarea ionilor prin gaz, care acum trebuiesc construiți ortogonal și nu axial. De asemenea, deoarece există două camere utilizate pentru oprirea și evacuarea ionilor către cuadrupolul de extracție, vor fi necesare două perechi de astfel de electrozi. Camera va folosi trei covoare RF.

Designul CAD produs pentru acest experiment este prezentat în Fig. 44. Acest ansamblu experimental a fost construit și are un sistem de vid cu pompă preliminară și pompă turbomoleculară, vane și joje de măsurare a vidului folosind 3 indicatoare. Această cameră folosește, de asemenea, unele componente suplimentare, cum ar fi: un sistem de reglare a gazului, un sistem de alimentarea cu gaz He 5.0 și un mediu de control LabView pentru menținerea presiunilor în interiorul fiecăreia dintre cele trei camere.



Figura 44 : Vedere izometrică a celulei de oprire ortogonale; Stânga: vedere de sus, dreapta: vedere de jos

Celula de oprire cu extracție ortogonale, împreună cu controlerele de presiune, sunt prezentate în Fig. 45 .



Figura 45 : Celulă de oprire ortogonală cu componente de vid montate

#### Concluzii

Două unități de testare a covoarelor RF, una cu extracție axială și cealaltă cu extracție ortogonală au fost propuse pentru a servi ca o piatră de temelie către viitoarea instalație ELISOL. Ambele sisteme au fost proiectate pe parcursul ultimilor doi ani, sistemul de testare a extracției ortogonale fiind fabricat la comandă, iar sistemul de extracție axială fiind asamblat din componente standard de vid. Sistemul axial este menit să funcționeze ca o unitate de testare dedicată pentru covoare RF și pentru diferitele componente electronice utilizate pentru manipularea, captarea și extragerea ionilor.

## C1: Concluzii generale

Munca de dezvoltare prezentată în această teză acoperă un interval de timp de cinci ani, timp în care am lucrat și am colaborat cu echipe de cercetare de la IFIN-HH, ELI-NP și GSI. Teza a fost structurată în jurul a trei sisteme importante. La IFIN-HH sistemul de extracție al fasciculului de ioni în aer continuă să funcționeze corect și până în prezent au existat numeroase cereri de timpi de fascicul pentru a utiliza această capacitate. La GSI, sistemul INCREASE a fost construit și va fi utilizat într-un experiment viitor care vizează crearea fasciculelor de ioni radioactivi prin reacții de transfer de tipul multi-nucleon. Acest experiment este programat să aibă loc anul viitor. Celula de oprire cu extracție ortogonale, folosită ca demonstrator este în prezent la IFIN-HH. Componentele de vid și gaz au fost montate și capacitatea camerelor de a menține presiunea controlată și fluxurile de gaz au fost dovedite. Primul prototip pentru un covor spiralat RF este în prezent la ELI-NP și așteaptă testarea. Proiectarea, fabricarea unor piese personalizate și achiziționarea de componente electrice pentru sistemul de testare a covoarelor RF a fost finalizată, iar unitatea de testare este în prezent asamblată. Odată complet funcțională, va fi testată fie folosind fascicule de ioni accelerate la IFIN-HH, fie cu o sursă de toriu la ELI-NP.

## C2: Contribuții originale

În capitolul 1, simulările optice-ionice prezentate pentru sursa ionică de pulverizare cu cesiu au fost realizate împreună cu Dr. Doru Pacesila pentru acceleratorul Tandetron de 1 MV la IFIN-HH.

În capitolul 2, proiectarea mecanică pentru suportul de analize pe reziduuri lichide este un concept original, iar proiectarea mecanică a sistemului de extracție al fasciculului, deși inspirată din instalații similare, este un design propriu care a fost dezvoltat împreună cu Victor Runceanu. De asemenea, simulările de optimizare a opticii ionice pentru cuadrupolul electrostatic nuclear au fost originale, pentru a focaliza în mod corespunzător fasciculul pe fereastra de extracție.

În capitolul 3, proiectarea mecanică a sistemului INCREASE este un concept original. De asemenea, am fost responsabil pentru furnizarea fișierelor de fabricație și am participat la asamblarea sistemului fabricat. Am fost, de asemenea, responsabil pentru a concepe și simula, în scopul de a construi, sistemul utilizat pentru a suprima încărcarea de sarcină spațială.

În capitolul 4, simulările de optică ionică ale covorului circular RF au fost făcute pentru a investiga principiile și capacitățile de lucru. Conceptul de covor spiralat RF este o idee originală, iar simulările de optică ionică realizate cu această geometrie sunt, de asemenea, originale. În urma acestor investigații, o cerere de patentare a covorului RF de tip spirală a fost publicată și acceptată.

În capitolul 5, atât unitatea de testare a covorului RF cu extracție axială, cât și unitatea demonstrativă de extracție ortogonală au fost concepute original, cât și proiectate mecanic. Unitatea demonstrativă a fost construită pe baza proiectului mecanic realizat.

## C3: Perspective pentru dezvoltări viitoare

Cea mai importantă dezvoltare viitoare este continuarea asamblării unității de testare a covorului RF. La fel ca în toate lucrările de dezvoltare, vor apărea dificultăți, deoarece sistemul în sine este complex și implică utilizarea de presiune scăzută, temperaturi criogenice, tensiuni electrice ridicate și detecție de ioni cu precizie, toate închise într-un volum foarte mic.

Când va fi finalizat, sistemul va fi utilizat pentru testarea covoarelor RF la ELI-NP și, odată demonstrat și calibrat corespunzător, va fi folosit ca un instrument important pentru a investiga viitoarele modele de covoare RF. Experiența dobândită din acest sistem se va dovedi foarte valoroasă în realizarea viitorului experiment ELISOL, deoarece cele două sisteme sunt similare în principiile lor de lucru de bază, dar foarte diferite în ceea ce privește dimensiunea și domeniul de aplicare.

## Referințe

[1] Benamar M., "Spectroscopie de emisie cu raze X indusă de particule (PIXE)", nr. 10.13140 / RG.2.2.10199.83366 / 1, 2020.

[2] Rauhala E. și colab., "O metodă a fasciculului extern pentru retrodifuzarea ionilor", vol. Secțiunea B: Interacțiunile fasciculului cu materiale și atomi., Nr. 6. 543-546. 10.1016 / 0168-583X (85) 90015-1, 1985.

[3] Suzuki K. și colab., "Analiza elementelor ușoare a ceramicii folosind ERDA în aer și TOF-ERDA", vol. Secțiunea B: Interacțiunile fasciculului cu materiale și atomi, nr. 478. 169-173. 10.1016 / j.nimb., 2020.

[4] Breese Mark și colab., "Aplicații ale microscopiei ionice de transmisie prin scanare", vol. Secțiunea de cercetare B: interacțiunile fasciculului cu materiale și atomi., Nr. 505-511. 10.1016 / 0168-583X (92) 95524-U., 1992.

[5] BV, High Voltage Engineering Europa, "High Voltage Engineering Europa BV," [Interactiv]. Disponibil: http://www.highvolteng.com.

[6] Servicii de instrumente științifice (SIS) de Adaptas Solutions, LLC, 2003-2020. [Interactiv]. Disponibil: https://simion.com.

[7] Amptek, "Spectrometru complet cu raze X X-123 cu detector Si-PIN", [Interactiv]. Disponibil: https://www.amptek.com/products/si-pin-x-ray-detectors-for-xrf/x-123-complete-x-ray-spectrometer-with-si-pin-detector.

[8] Jones, Deric P., Senzori biomedici (prima ediție), New York: Momentum Press, p. 177, 2010.

[9] NIST, "Institutul Național de Standarde și Tehnologie", [Interactiv]. Disponibil: https://www-s.nist.gov/srmors/certificates/611.pdf.

[10] Blumenfeld Y., "Facilități radioactive de fascicule ionice în Europa.", Vol. Secțiunea B: Interacțiuni cu grinzi cu materiale și atomi, 2008.

[11] Plaß W et al, "FRS Ion Catcher: Setup, Status and Perspectives", 2011.

[12] YX Watanabe și colab., "Calea pentru producția de izotopi bogați în neutroni în jurul anului", 2015.

[13] Adrian Rotaru și colab., "SIMULAREA RADIO-FRECVENȚEI CIRCULARE", vol. 81, nr. 3, 2019.

[14] Constantin Paul et al, "The ELI-NP IGISOL radioactive ion beam installation.," Vol. Secțiunea B: interacțiunile fasciculului cu materiale și atomi., 2019.

[15] "Centrul de cercetare nucleară Soreq", [Interactiv]. Disponibil: http://soreq.gov.il/mmg/eng/Pages/Home.aspx.

[16] "Universitatea Giessen", [Interactiv]. Disponibil: https://www.uni-giessen.de/welcome.

[17] Rotaru A. și colab., "SIMULAREA Covoarelor CIRCULARE DE RADIO-FRECVENȚĂ PENTRU EXTRACȚIA IONULUI DIN CELULE DE OPRIRE CRIOGENICE.", Vol. Seria A: Matematică și fizică aplicată, 2019.

[18] P. Constantin și colab., "Proiectarea celulei de gaz pentru instalația IGISOL la ELI-NP",2017.

[19] de Hoffmann Edmond și colab., Spectrometrie de masă: principii și aplicații (ediția a doua)., 2003.

[20] DL Balabanski și colab., "Photo-fission Experiments at ELI-NP", 2016.

[21] Constantin Paul et al, "The ELI-NP IGISOL radioactive ion beam installation.," Vol. Secțiunea B: interacțiunile cu materialele și atomii, 2019.

[22] P. Constantin și colab., 20165.

[23] Dahl D. și colab., 2000.

[24] Placă, circuit imprimat, "Placă cu circuit imprimat", [Interactiv]. Disponibil: https://en.wikipedia.org/wiki/Printed\_circuit\_board.

[25] Eurocircuite, "Eurocircuits PCB materials", [Interactiv]. Disponibil: https://www.eurocircuits.com.

[26] Wrede, C., "The Facility for Rare Isotope Beams", 2015.

[27] Geissel, H. și colab., "Proiectul Super-FRS la GSI.", Vol. Secțiunea B: Interacțiuni cu grinzi cu materiale și atomi, 2003.

[28] B. Harss şi colab., "Producerea fasciculelor de ioni radioactivi folosind tehnica în zbor",2000.

[29] VM Miklyaev și colab., Aplicarea senzorilor de temperatură cu film subțire Pt1000 C420 la supraconductori și alte tipuri de facilități, Springer.

[30] Corregidor V. și colab., "The External Ion Beam Facility in Portugal for Studying Cultural Heritage", revista e-conservation, pp. 22. 40-52., 2011.

[31] Lehnert J. și colab., "Analiza încărcării induse de fasciculul ionic al diodelor diamantate", vol. Secțiunea B: Interacțiunile fasciculului cu materiale și atomi, nr. 404. 10.1016 / j.nimb.2017.01.021., 2017.