

UNIVERSITATEA POLITEHNICA DIN BUCUREȘTI



Școala doctorală de Ingineria si Aplicațiile Laserilor și Acceleratorilor

Decizie nr. din

REZUMAT TEZĂ DE DOCTORAT

Alexandru-Nicolae STATE

TRANSPORTUL ȘI EXTRACȚIA IONILOR FOLOSIND CURGERI DE GAZ ÎN SISTEME DE CAPTURĂ A IONILOR DE ULTIMĂ GENERAȚIE

ION TRANSPORT AND EXTRACTION WITH GAS FLOWS IN NEXT GENERATION ION CATCHERS

COMISIA DE DOCTORAT

CS1 Dr. Ing. Călin A. Ur IFIN-HH/ELI-NP	Președinte
Prof. Dr. Dimiter L. Balabanski IFIN-HH/ELI-NP	Conducător de doctorat
CS2 Dr. Nikolay Djourelov IFIN-HH/ELI-NP	Referent
Prof. Dr. Christoph Scheidenberger Universitatea din Giessen/GSI	Referent
Conf. Univ. Dr. Alexandru Nicolin Universitatea din București	Referent

BUCUREȘTI 2022

Mulţumiri

Aș dori să le mulțumesc tuturor persoanelor care m-au ajutat în acest demers. A fost o călătorie uimitoare. Dar ca toate călatoriile, aceasta trebuie să se încheie pentru ca altele să poată începe.

Aș dori să mulțumesc coordonatorului meu științific, Prof. Dr. Dimiter Balabanski, pentru sugestiile, sprijinul și ajutorul neprețuit pe parcursul ultimilor cinci ani. De asemenea, aș dori să îi mulțumesc domnului Dr. Paul Constantin pentru tot ajutorul și examinarea atentă a întregii lucrări. Fără îndrumarea dumneavoastră, această teză nu ar fi fost posibilă. Aș dori să îi mulțumesc domnului Dr. Horia Petrașcu pentru tot ajutorul și îndrumările primite în timpul lucrului la linia experimentală 4 a acceleratorului de 9 MV de la IFIN-HH. De asemenea, aș dori să îi mulțumesc domnului Dr. Dan Ghiță pentru tot ajutorul și îndrumarea pe parcursul ultimului deceniu, de la care am învățat enorm de mult.

Aș dori să mulțumesc în mod special întregului grup FRS Ion Catcher: Dr. Timo Dickel, Dr. Wolfgang Plass, Soenke Beck, Daler Amanbayev și tuturor celorlalți membri ai grupului, pentru oportunitățile de a lucra la o astfel de instalație experimentală extraordinară, acumulând în același timp experiență pentru anii următori. În plus, aș dori să îi mulțumesc domnului Dr. Holger Brand pentru toată răbdarea și ajutorul acordat în timpul învățării CS++.

Nu în ultimul rând, aș dori să le mulțumesc părinților mei, Daniela și Adrian și bunicii mele Maria pentru sprijinul de-o viață, soției mele Dana și fiului nostru Tudor. Apreciez tot ceea ce s-a făcut. Vă mulțumesc!

Cuprins

1 Introducere **1**

2 Fascicule de ioni radioactivi. Prezentare generală a metodelor de producție. **6**

2.1 Metode de producere și separare a fasciculelor de ioni radioactivi 7

2.1.1 ISOL și IGISOL 8

2.1.2 Metoda de separare în zbor (in-flight) 9

2.1.3 Sisteme de separare în zbor cuplate cu celule de stopare 10

2.2 Posibilități de producere a fasciculelor de ioni radioactivi in reacții foto-nucleare 11

2.2.1 Principiul de funcționare al HADO-CSC 12

3 Principii de modelare în dinamica computațională a fluidului **15**

3.1 Dinamica computațională a fluidului - Principii de modelare 15

3.2 Prezentare generală a simulărilor CFD pentru HADO-CSC 16

3.3 Regim de curgere izentropică 16

3.4 Simulări CFD ale unei duze Laval 17

3.4.1 Șocuri normale in duza Laval 19

3.4.2 Influența adaosului de căldură 20

3.4.3 Influența frecării 20

3.5 Unitate demonstrativă care utilizează duze Laval: Simulări CFD 20

3.6 Extracția ionilor din celule de gaz cu jeturi supersonice formate în duze Laval 23

3.7 Rezumat capitol 3 24

4 HADO-CSC - Proiectare sistem de gaz **25**

4.1 Helium Recovery Unit - Prezentare generală 25

4.2 Specificațiile sistemului 25

4.3 Sistemul de alimentare cu gaz 26

4.4 Sistem de vacuum la intrarea in HRU 26

4.5 Compresor și vase tampon 27

4.6 Sistem de pompare pentru vacuum și evacuare a gazului. 27

4.7 Sistem de purificare 28

4.8 Sistem de control 28
4.9 Proiectare mecanică 29
4.10 Rezumat capitol 4 30

5 Unitate de testare supersonică - caracterizare experimentală a jeturilor de gaz 31
5.1 Prezentare Generală 31
5.1.1 Proiectare Mecanică 31
5.1.2 Sistem de gaz 32
5.1.3 Sistem de control 32
5.2 Metode de măsurare 33
5.2.1 Fluorescență cu jet de gaz 33
5.2.2 Metodologie 33
5.2.3 Efecte ale presiunii 33
5.2.4 Unde de șoc 34
5.2.5 Măsurători cu tub Pitot 34
5.2.6 Imagistică Schlieren 35
5.3 Simulări CFD 35
5.4 Măsurători de curgere de gaz 36
5.5 Rezumat Capitol 5 36

6 Sisteme de control în LabVIEW folosite pentru fizică nucleară 37
6.1 Introducere 37
6.2 Sistem de control bazat pe QMH în LabVIEW - automatizarea celei de-a 4-a linii experimentale la Acceleratorul Tandem de 9 MV din IFIN-HH . 37
6.2.1 Ansamblu experimental 37
6.2.2 Aplicația LabVIEW 38
6.2.3 Măsurători și performanța sistemului 39
6.3 Sistem de control bazat pe Actor Framework și CS++ în LabVIEW - sistemul de control al FRS Ion Catcher de la GSI 39
6.3.1 Ansamblul experimental FRS-IC 39
6.3.2 Cerințe Sistem de Control 40
6.3.3 Sistem de control ce utilizează Arhitectura Actor și CS++ . . . 40
6.3.4 Interfețe grafice 41
6.3.5 Măsurători și performața sistemului 41
6.4 Rezumat Capitol 6 43

7 Concluzii și perspective pentru dezvoltări ulterioare 44

Bibliografie 56

Capitolul 1

Introducere

Setea noastră de cunoaștere a dus la descoperirea a mii de nuclizi instabili sau radioactivi și mulți alții vor rămâne de descoperit odată cu trecerea timpului. Nucleele exotice au fost/sunt caracterizate de mulți ani. Ele sunt exotice prin particularitățile lor: timpi de înjumătățire scurți și radioactive, două argumente care sporesc complexitatea și dificultatea generală atunci când se încearcă studierea lor. Cu toate acestea, aceste studii contribuie la testarea limitelor modelelor nucleare actuale și a validității lor. Înainte de a detalia de ce sunt importante nucleele exotice, vor fi prezentate în continuare câteva concepte de bază.

Un concept important în fizica nucleară este reprezentat de valea de stabilitate. După cum îi spune și numele, este o formă de caracterizare a stabilității nuclizilor pe baza energiei de legătură a acestora. Aceasta din urmă poate fi scrisă sub forma:

$$B(N,Z) = NM_n + ZM_p - M(N,Z) \tag{1.1}$$

unde $M(N,Z)$ reprezintă masa și $M_{n,p}$ reprezintă masele nucleonilor.

Bineînțeles, această vale de stabilitate are un profil specific. Acesta este definit de nucleele stabile. Partea cea mai joasă a acestei văi este cea în care se află nucleele cele mai stabile. Dacă ar fi să trasăm o linie prin centrul văii, am obține linia de stabilitate β. Orice combinație de protoni și neutroni nu duce la un nucleu stabil. Adăugând câte un nucleon pe rând, deplasându-se în sus (adăugând protoni) și/sau în dreapta (adăugând neutroni) de-a lungul tabelului nuclizilor, la un moment dat nucleul nou format se va dezintegra rapid cu emiterea unui proton sau a unui neutron. Neoficial vorbind, se spune că nucleonul s-a scurs din nucleu, de unde a apărut termenul de "dripline". Acestea definesc limitele de existență ale nucleelor legate.

În ceea ce privește nucleele exotice, deși acestea nu se găsesc în mod natural pe Pământ, ele joacă un rol important în viața și moartea stelelor. Așa cum am mai spus, nucleele stabile reprezintă o mică parte din toate configurațiile posibile ale nucleonilor din nuclee. Cele mai multe dintre ele au fost studiate, iar proprietățile lor globale sunt bine cunoscute (masă, paritate etc.), precum și metoda lor de creare. Se știe că elementele

ușoare, precum hidrogenul, heliul, litiul, beriliul și borul, au fost produse imediat după Big Bang, iar până la fier sunt create în interiorul fierbinte al stelelor, cu etape foarte bine definite de ardere nucleară. Pentru o mulțime de nuclizi mai sunt încă multe de realizat, în special la energii de excitație ridicate, pentru a le defini structura complexă, cum ar fi stările excitate, spinii, paritățile etc.

Studiul menționat mai sus reprezintă puzzle-ul complex al astrofizicii nucleare. Scopul acestui puzzle este de a răspunde la întrebările cum, unde și când au fost create elementele din univers și de a explica abundența lor. Stelele suferă o evoluție continuă, pe măsură ce constituenții elementari care formează steaua încep să se schimbe prin arderea hidrogenului (stea din secvența principală), arderea heliului (stea gigantică roșie) și așa mai departe (arderea elementelor superioare). În funcție de masa lor, stelele cu masă mică își vor ejecta încet atmosfera (vânt stelar), formând astfel o nebuloasă planetară, în timp ce o stea cu masă mare își va ejecta masa printr-o explozie puternică și luminoasă numită supernovă. Pentru elementele superioare fierului, au fost determinate procesele $r-$, $s-$ (captarea rapidă sau lentă a neutronilor), $rp-$, $p-$ (captarea rapidă a protonilor sau captarea protonilor). Ca atare, studiile și măsurătorile acestor procese au aplicații importante în astrofizica nucleară și în înțelegerea structurii nucleare.

Domeniul de cercetare al nucleelor exotice este, astfel, complex, având de-a face cu timpul de înjumătățire foarte scurt și cu provocările legate de producerea lor artificială prin diverse tehnici. O altă problemă cu care trebuie să se confrunte fizicienii din domeniul acceleratoarelor este aceea de a se asigura că există o cantitate suficientă de astfel de nuclee pentru a crea fascicule accelerate în vederea studierii interacțiunii acestora cu alte nuclee. Faptul că sunt instabile și au o durată de viață scurtă (mai exotic înseamnă o durată de viață mai scurtă) face dificilă capturarea acestor nuclee exotice, având în vedere, de asemenea, secțiunile transversale de producție scăzute. Analiza acestora devine dificilă având în vedere că, de cele mai multe ori, nucleele comune sunt produse în același timp, cu ordine de mărime mai mari.

Metodele actuale și cele mai importante de producere și separare a nucleelor exotice sunt Isotope separation on-line (ISOL), urmată de metode de post-accelerare și de separare în zbor (In-Flight), care vor fi tratate mai detaliat în următorul capitol al acestui rezumat. Tehnica ISOL utilizează un fascicul primar intens de particule luminoase, de obicei produs cu ajutorul unui accelerator de particule sau al unui reactor nuclear, pentru a lovi o țintă groasă și fierbinte. Această interacțiune va forma mai multe nuclee stabile și instabile. Deoarece ne interesează în principal natura instabilă și exotică a nucleelor produse, după ce acestea sunt produse, ele difuzează într-o sursă de ioni unde sunt ionizate și extrase. Există multe instalații de producere a fasciculelor radioactive (RIB - Radioactive Ion Beams) în întreaga lume care utilizează metoda ISOL, cum ar fi cele de la ISOLDE (CERN), ALTO (IPN Orsay), TRIUMF (Vancouver) etc. Aceste instalații sunt utilizate pentru selectarea masei și a izobarilor cu spectrometre de masă, cu fascicule primare care au proprietăți optice bune, deoarece se bazează doar pe sursa

de ioni. Limitele tehnicii ISOL sunt atinse atunci când extracția și ionizarea nu sunt suficiente pentru a distinge nucleele de interes, din cauza chimiei elementelor produse. Un exemplu de astfel de limită este studiul elementelor refractare care au o temperatură de evaporare de peste 1500 K.

În timp ce metoda ISOL este dependentă de chimia elementelor produse, metoda In-Flight este independentă, dar are ca dezavantaj calitatea optică, care nu este atât de mare, ceea ce duce la cerința de separatoare de masă cu o acceptanță mai mare. Această tehnică se bazează pe interacțiunea unui fascicul de ioni grei cu o țintă subțire, ceea ce duce la o fragmentare care transferă impulsul acestora către produsele de reacție care au energii comparabile cu fasciculul incident. Există mai multe instalații de fragmentare în întreaga lume, și anume NSCL (SUA), separatorul de fragmente ETNA de la LNS (Italia), separatorul COMBAS și ACCULINA de la JINR (Rusia), separatorul de fragmente FRS de la GSI (Germania), RIBF de la RIKEN (Japonia), GANIL (Franța) etc.

În anii 1980, metoda Ion-Guided Isotope Separation On-Line (IGISOL) a început să apară la Jyvaskyla (Finlanda), folosind o celulă de stopare umplută cu gaz. Nucleele exotice, după ce au fost produse prin fisiune cu un fascicul de protoni pe o țintă de uraniu plasată în interiorul celulei de gaz, au fost încetinite, de unde și termenul de stopare, până la energii cinetice de eV, termalizate și livrate la experimente de mare precizie pentru spectrometrie de masă sau spectroscopie cu laser. La utilizarea celulelor cu gaz, de mare importanță este densitatea, care afectează puterea de oprire și gradul de curățenie. Aceasta din urmă are un impact important asupra stării de sarcină a produșilor și pentru a evita neutralizarea, este de preferat un gaz ultrapur.

În 2022, la GSI (Germania), ansamblul experimental Ion Catcher utilizează o celulă de stopare criogenică (CSC) pentru a încetini și a termaliza fragmentele produse de separatorul de fragmente FRS (Fragment Separator). Aceste fragmente sunt produse fie prin fragmentare cu proiectile, fie prin fisiune la energii relativiste, separate cu ajutorul unei metode în zbor și încetinite în CSC. Un spectrometru de timp de zbor cu reflexie multiplă este utilizat pentru măsurători de masă și pentru a furniza un fascicul in care izobarii sunt filtrați, pentru experimente ulterioare, cum ar fi spectroscopia de masă sau de dezintegrare. Diferite aspecte ale acestei configurații vor fi discutate în cadrul mai multor capitole ale rezumatului și în teza. În plus, această configurație și această generație de celulă de stopare criogenică cu extracție longitudinală au reprezentat un prototip timpuriu pentru viitorul CSC cu extracție ortogonală care va fi construit și utilizat pe ramura de joasă energie a viitorului SuperFRS. Deoarece acesta este un proiect extrem de așteptat și unic, pornind de la proiectul prezentat pentru prima dată în [1], multe institute de cercetare din întreaga lume (ELI-NP - România, GSI și Universitatea Giessen - Germania, Soreq și Universitatea Tel Aviv - Israel, JYFL - Finlanda) au decis să sprijine proiectul HADO-CSC (High Area Density Orthogonal Extraction Cryogenic Stopping Cell).

De-a lungul timpului s-au înregistrat progrese științifice și un interes extraordinar în încercarea de a explica necunoscutul, deoarece toate instalațiile menționate mai sus încearcă să acopere noi părți ale tabelului nuclizilor. Cercetarea și dezvoltarea în domeniul nuclear au condus întotdeauna la progrese tehnologice în diverse alte domenii. Urmând această idee, Extreme Light Infrastructure - Nuclear Physics (ELI-NP) este una dintre infrastructurile de cercetare din lume axată pe fizica fotonucleară. Proiectul cuprinde două echipamente importante: sistemul de lasere de mare putere cu două lasere cu impulsuri ultra scurte de 10 PW și un sistem de fascicule de raze gamma extrem de intense, cu energii de până la 19,5 MeV. Acesta din urmă va oferi un nou instrument de cercetare de mare importanță, în care energiile fasciculului gamma vor acoperi GDR (rezonanța dipolară gigantică) a izotopilor de uraniu și toriu, ceea ce îl va face ideal pentru experimentele de foto-fisiune.

Fiind unul dintre cele două echipamente importante de la ELI-NP, fasciculul gamma de înaltă intensitate este mai mult decât capabil să producă și să ajute la studiul fragmentelor de fisiune formate cu acesta. Astfel, pe baza experienței acumulate cu prototipul CSC Ion Catcher, la ELI-NP a luat naștere un program experimental sub forma proiectului ELISOL, în cadrul căruia unul dintre cele mai importante subiecte este dezvoltarea unui nou CSC cu o geometrie diferită. Este vorba de o celulă cu gaz cu două camere cu o extracție ortogonală care ar trebui să asigure un timp de extracție de ordinul zecilor de milisecunde, care va fi utilizat pentru a încetini și a termaliza produsele de fisiune care se formează după interacțiunea fasciculului gamma cu țintele de actinide plasate în interiorul primei camere, numită camera de stopare.

În plus, acest program experimental are ca scop producerea de fascicule exotice de ioni radioactivi bogate în neutroni pentru investigarea elementelor refractare din regiunea Zr-Rh cu mase ≈ 100 și din regiunea pământurilor rare cu mase ≈ 140. Pentru a realiza acest lucru, se utilizează tehnica IGISOL. Valoarea estimată de $5 \cdot 10^{10}\gamma$/s a fasciculului primar cu energii cuprinse între 10.2 - 19.5 MeV [2] va lovi ținte subțiri de actinide, ceea ce va duce la o reacție de foto-fisiune în care produsele de fisiune vor fi colectate și livrate sub forma unui fascicul de ioni. Acest lucru se realizează prin utilizarea de câmpuri electrice, de radiofrecvență și jeturi supersonice.

Teza este structurată în șase capitole insoțite de concluzii. Primele două capitole cuprind o scurtă introducere a tezei și descriu cercetările actuale cu nuclee exotice din întreaga lume. În același timp, capitolul doi pune accentul pe proiectarea conceptuală a celulei de oprire criogenică care va fi utilizată la ELI-NP. Capitolele trei și patru acoperă principiile de modelare pentru dinamica computationala a fluidului, cu accent pe duzele Laval și pe modul în care sunt formate și utilizate jeturile supersonice în noua celulă de stopare. De asemenea, va fi prezentată proiectarea unității de recuperare a heliului, un sistem de recirculare a gazelor pentru HADO-CSC. Capitolul cinci se referă la proiectarea mecanică, construcția, simularea și testarea unei unități de testare care va fi utilizată pentru aplicarea diferitelor tehnici invazive și neinvazive pentru caracterizarea

jeturilor supersonice, cu rezultate aplicabile la HADO-CSC. Capitolul șase se referă la sistemele de control lente (slow control system) utilizate pentru fizica nucleară în LabVIEW. Accentul va fi pus pe două sisteme de control distincte, implementate în LabVIEW, dar cu un model de proiectare diferit. Primul model de proiectare (Queued Message Handler - QMH) a fost utilizat pentru a automatiza camera de împrăștiere de pe linia experimentală nr. 4 a acceleratorului Tandem de 9 MV al IFIN-HH. Arhitectura Actor cu CS++ a fost utilizat pentru dezvoltarea controlului instalației FRS Ion Catcher de la GSI (Germania).

Capitolul 2

Fascicule de ioni radioactivi. Prezentare generală a metodelor de producție.

Accentul este pus pe metoda IGISOL și pe modul în care aceasta este utilizată la ELI-NP în cadrul instalației de fascicule de ioni radioactivi (RIB). Ca atare, acest capitol acoperă formarea și separarea nucleelor exotice și modul în care acestea sunt utilizate ca RIB pentru studii ulterioare. În plus, în rezumatul de față sunt descrise pe scurt elementele de bază ale metodologiilor utilizate în instalațiile de ultimă generație din întreaga lume în care sunt produse și utilizate fascicule radioactive în diferite configurații experimentale.

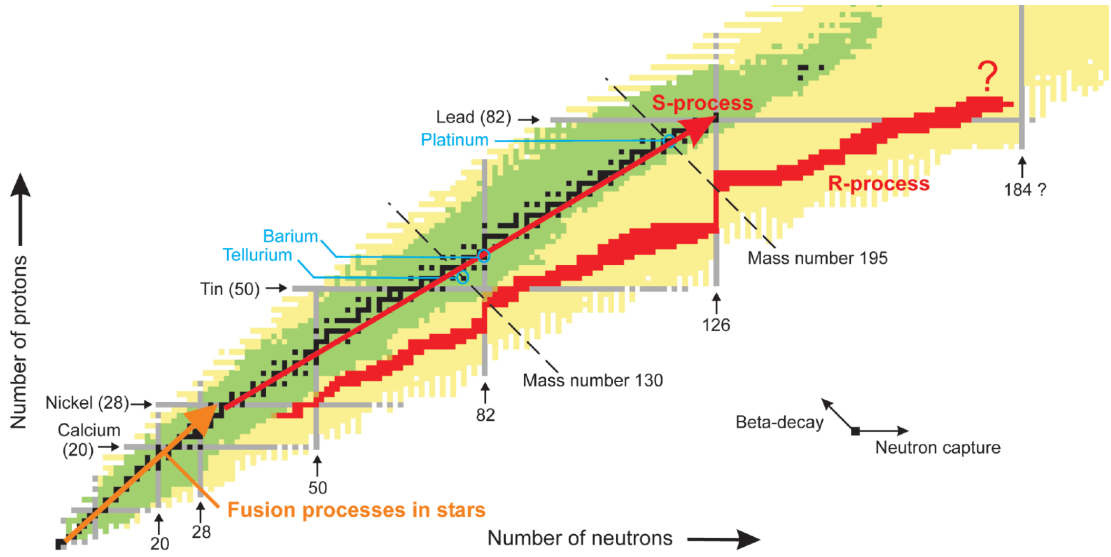


Figura 2.1 Tabelul nuclizilor prezintă nucleele stabile cu negru solid, regiunea nucleelor descoperite se află în regiunea verde, cu o aproximare a nucleelor necunoscute și nedescoperite în regiunea galbenă. Săgeata roșie din apropierea nucleelor stabile reprezintă procesul s (captarea lentă a neutronilor). Procesul r (proces rapid de captare a neutronilor) este reprezentat de banda roșie care trece prin regiunea nucleelor bogate în neutroni nedescoperite evidențiată în galben. [3]

Fig. 2.1 afișează tabelul nuclizilor, o reprezentare bidimensională a tuturor izotopilor cunoscuți. O axă reprezintă numărul de neutroni (N), în timp ce cealaltă reprezintă

numărul de protoni (Z). Fiecare punct de pe acest grafic, caracterizat prin coordonatele (N,Z) reprezintă un anumit nuclid al unui element chimic. Simbolurile negre indică nuclee stabile. Această vale de stabilitate, în care se află nucleele stabile, permite să se facă ușor distincția între diferitele zone în care are loc dezintegrarea alfa, β^+ (emisie de pozitroni), β^- (emisie de electroni). Nucleele instabile tind să urmeze o cale de dezintegrare, care se produce ulterior până când ajung la un nucleu stabil.

Pentru o imagine și o înțelegere completă a tabelului nuclizilor și a proceselor r-, s-(captarea neutronilor), reprezentate în Fig. 2.1, trebuie introduse câteva idei fundamentale. Elementele chimice sunt create în interiorul stelelor prin combinarea protonilor și neutronilor din elemente mai ușoare. Acest proces se numește nucleosinteză. Există trei tipuri principale: Big Bang, nucleosinteză stelară și nucleosinteză supernovelor. Toate trei sunt legate de formarea și evoluția Universului, așa cum îl cunoaștem noi. Aceste faze au fost descrise pe scurt în teză.

2.1 Metode de producere și separare a fasciculelor de ioni radioactivi

Pe măsură ce ne îndepărtăm de valea de stabilitate beta, producerea de nuclee exotice devine din ce în ce mai dificil de realizat. Studiile asupra izotopilor cu rapoarte protoni/neutroni foarte diferite, în comparație cu izotopii stabili, sunt destul de problematice. Provocările pe care diferitele metode de producție trebuie să le depășească sunt timpul de înjumătățire scurt al nucleelor de interes, secțiunile eficace de producție scăzute și faptul că în timpul unei reacții nucleare sunt produse mai multe alte specii.

În ultimele decenii au fost dezvoltate și perfecționate două metode complementare de producere a fasciculelor de ioni radioactivi, și anume, tehnicile de separare izotopică online (ISOL) și tehnicile de separare în zbor(in-flight). Ambele încearcă să îndeplinească cerințe diferite pentru experimente specifice care acoperă diferite părți ale tabelului nuclizilor. Nu există nicio metodă care să acopere totul și fiecare dintre metode vine cu avantajele și dezavantajele sale. Cele mai importante proprietăți atunci când se discută despre metodele de producere a nucleelor exotice sunt [4]:

- **Rată de producție bună** Acest lucru necesită o optimizare foarte bună a fasciculului primar din punct de vedere al intensității.
- **Eficiență.** Sistemul de producție trebuie să fie cât mai aproape de unitate.
- **Selectivitate.** Izotopii de interes, în acest caz instabili și cu durată de viață scurtă, trebuie să fie separați în mod eficient din toți produșii rezultați în urma interacției nucleare.

- **Rapiditate.** Nucleele exotice cu timpi de viață scurți se dezintegrează foarte repede. Ca atare, timpul dintre momentul producerii și sosirea la detector trebuie să fie cât mai scurt.

Figura 2.2 prezintă schematic cele două metode de producere a fasciculelor de ioni radioactivi. Metoda în zbor, reprezentată în partea de sus, și metoda ISOL, în partea de jos.

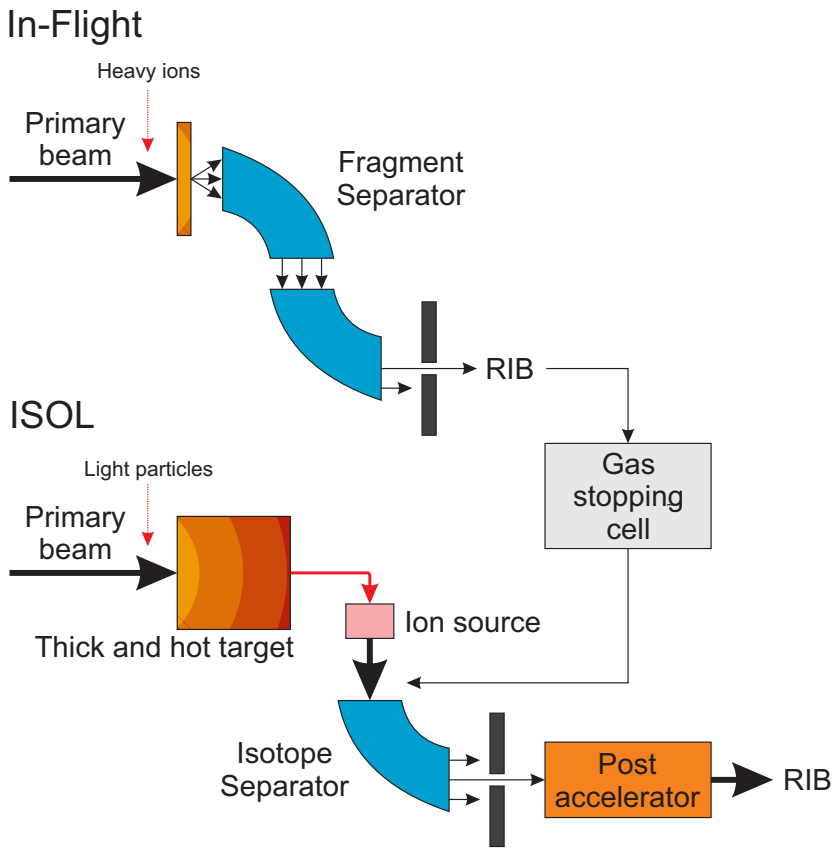


Figura 2.2 Reprezentări schematice ale tehnicilor In-flight și ISOL. În plus, este prezentată și metoda in-flight care utilizează un sistem de captură a ionilor.

2.1.1 ISOL și IGISOL

Metoda ISOL (Isotope Separation On-Line) este utilizată în mai multe instalații din lume pentru a produce nuclee exotice. Acestea din urmă sunt produse prin interacțiuni nucleare ale particulelor ușoare care se ciocnesc pe ținte alcătuite din materiale cu număr atomic ridicat (Z).

De regulă, se folosește o țintă groasă pentru a opri produșii de reacție. Odată opriți, aceștia sunt neutralizați în țintă și ulterior vor difuza datorită temperaturilor ridicate la care este încălzită ținta. Spre deosebire de tehnica IGISOL (Ion-Guided Isotope Separation On-Line), în care produșii de reacție de interes "supraviețuiesc" neutralizării, iar câmpurile electtrice pot fi folosite pentru a-i ghida, în metoda ISOL este necesară

o sursă de ioni. Aceasta se asigură că ionizează, accelerează și separă în continuare produșii de interes [5].

Țintele groase (2-10 cm) utilizate în tehnica ISOL vor asigura rate de producție ridicate, dar o eliberare lentă prin difuzie termică. Încălzirea la $\approx$ 2000 grade C face din celula de producție un cuptor în care extracția folosind câmpuri electrice este imposibilă, ceea ce duce la un timp de extracție lent din celulă. Tehnica IGISOL, în care se utilizează ținte subțiri (2-10 μm), duce la rate de producție mici, dar la o eliberare rapidă prin recul cinematic. Celula în care sunt plasate țintele poate fi umplută cu gaz pentru stopare, iar pentru extracție se pot utiliza câmpuri electrice. Acest lucru duce la un timp de extracție relativ rapid.

În plus, deoarece sunt necesare temperaturi ridicate, de ordinul miilor de grade C, pentru ca atomii de interes să difuzeze din masa țintei spre suprafață și spre sursa de ioni, unele elemente sunt foarte greu de produs. De exemplu, elementele refractare care au o temperatură de evaporare ridicată. Acesta este avantajul sistemului de fascicul gamma cuplat cu celula de stopare criogenică de la ELI-NP, care va permite producerea de fragmente de fisiune exotice bogate în neutroni, cu două regiuni principale importante: elementele refractare din regiunea ușoară a Zr-Mo-Rh și regiunea grea a pământurilor rare din jurul Ce.

2.1.2 Metoda de separare în zbor (in-flight)

Metoda de separare în zbor (in-flight) a fost dezvoltată pentru prima dată la Lawrence Berkeley Laboratory (LBNL) în anii 1970 la acceleratorul Bevalac [6] și îmbunătățită ulterior la separatorul LISE de la GANIL prin adoptarea și utilizarea de degraders. Metoda în zbor completează tehnica ISOL care, după cum s-a menționat anterior, acoperă diferite regiuni ale tebelului nuclizilor. Acest lucru este posibil prin utilizarea unui fascicul de ioni grei care, în general, lovește o țintă subțire. Fragmentele incidente sunt separate în funcție de masă sau sunt folosite în continuare pentru a induce alte reacții. Produșii de reacție, cu energie cinetică ridicată, sunt capabili să traverseze ținta subțire, să continue spre elementele optice ionice și, ulterior, să fie separați prin câmpuri magnetice sau electrice.

După cum s-a spus mai sus, fiecare metodă vine cu avantajele și dezavantajele sale, ceea ce reprezintă principala dilemă a unui fizician experimentalist de multe ori în primele etape ale unui experiment. Metoda în zbor este independentă de chimie, dar, din cauza interacțiunii fragmentelor primare cu țintele subțiri, trebuie proiectate și utilizate separatoare de masă cu acceptanță mare. În plus, intensitatea fasciluului produs prin această tehnică este, în general, mai mică decât cea a fasciculului primar ISOL, ceea ce duce la un randament mai scăzut pentru unele fragmente exotice [7].

2.1.3 Sisteme de separare în zbor cuplate cu celule de stopare

În tehnica de separare în zbor, trebuie să se țină seama de faptul că nucleele de interes vor avea o viteză mare, deci o energie cinetică ridicată și vor acoperi un spațiu de fază mare.

În ceea ce privește manipularea ionilor pentru spectroscopia nucleelor exotice, există anumite măsurători care sunt utilizate, și anume măsurători de masă, spectroscopie cu laser și măsurători de masă de timp de zbor (ToF - Time of flight). Toate acestea sunt aplicabile la fascicule secundare de zeci de eV. Ca atare, fasciculul primar, de energie cinetică mare, trebuie să fie modelat astfel încât emitanța sa să fie mică, să poată fi pulsat și energia sa să fie redusă, astfel încât nucleele să fie oprite într-un mediu gazos controlat. Acesta din urmă reprezintă un sistem de captură a ionilor.

O reprezentare schematică a unui sistem de captură de ioni, bazată pe principiul de funcționare al celui care poate fi găsit la FRS Ion Catcher, la GSI, este reprezentată în Fig. 2.3.

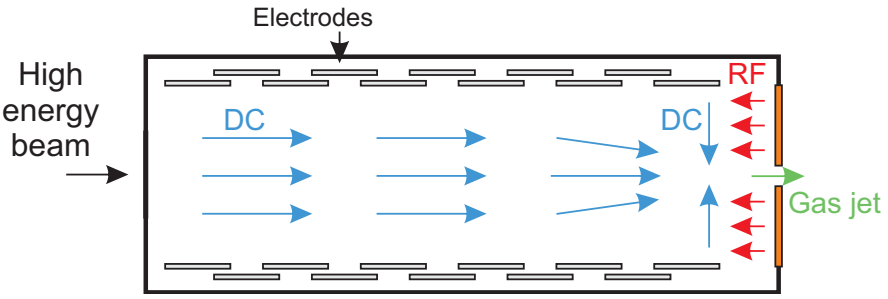


Figura 2.3 Reprezentare schematică a forțelor implicate într-un sistem de captură a ionilor. Electrozii care formează o cușcă DC asigură un câmp electric care împinge particulele încărcate spre o structură de tip RF. În acest caz particular, a fost luat în considerare un covor RF care furnizează un câmp electric radial pentru a împinge ionii spre centru și o componentă RF care respinge ionii de suprafata covorului RF. În mijlocul covorului RF există o duză cilindrică și, datorită diferenței de presiune, un jet de gaz va fi utilizat ca mecanism de ghidare pentru a împinge ionii spre un separator de masă.

Deși sistemul de captură a ionilor reprezentat în Fig. 2.3 necesită utilizarea unui covor RF, ca și în cazul instalației FRS Ion Catcher, se poate găsi o generalitate în utilizarea unui gaz neutru de înaltă densitate, a unui câmp electric de împingere longitudinal și a unei structuri de tip RF pentru a împinge ionii în afara sistemului. Fiecare instalație va oferi metodologii sau geometrii diferite în funcție de interesele și posibilitățile specifice ale acestora. Astfel, se are în vedere fasciculul primar și modul de producție. De exemplu, sistemul de captură a ionilor de la CARIBU, destinat să livreze fragmente de fisiune bogate în neutroni la energii scăzute și apropiate de bariera Coulomb, prezintă o structură RF de formă conică. Aceasta este menită să oprească mișcarea radială a ionilor în timpul transportului, din cauza difuziei în gaz și a sarcinii spațiale create în volumul de gaz. [8].

În plus, în momentul în care un fascicul radioactiv monoenergetic intră în celula de gaz, nucleele exotice vor pierde energie prin interacțiunea cu gazul și vor fi termalizate. Procesul de termalizare este una dintre caracteristicile cheie care au condus la dezvoltarea tehnicii IGISOL, deoarece nucleele exotice "oprite" rămân într-o stare încărcată, astfel încât un câmp electric poate fi utilizat pentru a le împinge spre ieșire și spre separatorul de masă. În plus, heliul este utilizat de obicei în celulele de gaz pentru procesul de termalizare, datorită potențialului său ridicat de ionizare. În caz contrar, dacă se dorește neutralizarea nucleelor exotice, se poate utiliza un gaz precum argonul.

După termalizare, particulele de interes sunt transportate spre duza de ieșire, unde un covor de radiofrecvență (RF) (mai mulți electrozi concentrici care prezintă o duză, cu un diametru mai mic de 1 mm, în mijloc) va împinge particulele spre centru, iar câmpurile RF vor împiedica neutralizarea ionilor prin lovirea pereților. Atunci când ajung în zona duzei, forța exercitată de jetul de gaz va fi suficient de puternică pentru a ghida ionii spre restul liniei de fascicul. De regulă, după celula de gaz există o regiune de presiune scăzută. Această regiune este însoțită de RFQ-uri (cuadrupoli de radiofrecvență) sau de diferite elemente optice destinate să confineze ionii extrași.

2.2 Posibilități de producere a fasciculelor de ioni radioactivi in reacții foto-nucleare

Instalațiile ISOL din întreaga lume utilizează diferite materiale ca ținte: de la folii metalice la lichide și până la carburi de uraniu polifazice mixte [9]. Ceea ce au în comun este utilizarea unei ținte groase, încălzită la temperaturi de aproximativ 2000°C. Acest proces permite difuzarea în afara țintei a fragmentelor de fisiune care, ulterior, sunt reionizate. Fasciculul primar care duce la produșii de fisiune de interes poate fi, de exemplu, fie protoni foarte energetici, cum ar fi în cazul ISOLDE (CERN) [10], fie un fascicul de bremmstrahlung γ, cum ar fi în cazul instalației ALTO [11].

Metoda ISOL, deși oferă avantaje semnificative și furnizează un curent de particule semnificativ, nu este o tehnică perfect adecvată pentru a acoperi și a produce orice fascicul instabil. Mai precis, elementele refractare sunt foarte greu sau imposibil de produs, deoarece au temperaturi de evaporare ridicate, în unele cazuri peste 3500°C, iar procesul general de evaporare și difuzie este lent, de ordinul sutelor de milisecunde. Căutarea de noi izotopi caracterizați de un timp de viață scurt implică, de asemenea, noi modalități de formare a RIB și minimizarea timpului de extracție.

Evoluțiile viitoare ale proiectului ELI-NP îl vor aduce mai aproape de stadiul operațional, în care va fi utilizat un fascicul de raze gamma reglabil, produs prin retroîmprăștiere Compton, cu energii de până la 19,5 MeV. Această energie este suficientă pentru a acoperi rezonanța dipolară gigantică (GDR) a ^{238}U și ^{232}Th.

În mod similar cu celula cu gaz descrisă în 2.3, în care fragmentele foarte energetice sunt oprite într-o celulă cu gaz și modelate sub forma unui RIB, se poate utiliza un fascicul gamma ca fascicul primar, care va crea produsele de fisiune de interes prin procesul de foto-fisiune. Plasarea a numeroase ținte subțiri pe axa fasciculului gamma duce la producerea de produși de fisiune care sunt eliberați cu o energie cinetică ridicată și apoi sunt opriți într-o densitate controlată, cea a celulei de gaz utilizate.

Deși problema producerii elementelor refractare (care pot fi eliberate prin recul cinematic și nu prin difuzie termică) este rezolvată prin utilizarea metodei IGISOL, bazată pe ținte subțiri, trebuie să se investigheze posibilitățile de formare a RIB-urilor din izotopi cu durată de viață mai scurtă, în comparație cu limitele tehnice actuale.

Proiectul prezentat în 2.3 prezintă principiul de funcționare al actualului FRS Ion Catcher CSC. Această celulă de gaz asigură un timp de extracție de $\approx$ 25 ms (măsurare off-line cu ioni ^{219}Rn [12]). Se așteaptă ca proiectul HADO-CSC să extragă sub $\approx$ 10 ms cu o lungime dublă a CSC (ceea ce ar duce la un timp de extracție de 50 ms). Rezultă un factor mai mare de cinci, ceea ce va avea un impact mare, având în vedere dependența exponențială de timp.

2.2.1 Principiul de funcționare al HADO-CSC

HADO-CSC este una dintre instalațiile experimentale propuse care vor utiliza sistemul de fascicul gamma. Aceasta este o celulă de gaz cu două camere cu o extracție ortogonală, menită să asigure timpi de extracție scurți, de ordinul milisecundelor [13]. Un astfel de proiect a fost propus pentru prima dată pentru a fi utilizat cu Super-FRS la GSI [1], fiind o îmbunătățire a celui existent [14].

Designul conceptual al HADO-CSC este evidențiat în Figura 2.4. Într-o atmosferă gazoasă de heliu, produșii de fisiune sunt supuși unui proces de termalizare în care o mare parte din produșii de reacție ajung la o stare de sarcină 1+ [15]. Câmpurile puternice de curent continuu ($\approx$ 100V/cm) deplasează ionii într-o direcție ortogonală față de fasciculul incident de raze gamma. Acest lucru asigură o traiectorie de extracție mai rapidă decât o geometrie longitudinală, minimizând astfel timpul de extracție. Utilizarea câmpurilor electrice este extrem de importantă în etapa de proiectare a oricărei celule cu gaz, deoarece are un impact direct asupra timpului de transport al ionilor grei produși care plutesc în derivă în mișcare termică.

În plus, câmpul electric trebuie proiectat astfel încât să acopere întregul volum al celulei de gaz. Mai mulți electrozi metalici, care formează în mod obișnuit o cușcă, sunt conectați la un divizor de tensiune, pentru a forma un câmp electric simetric. Trebuie menționate câteva observații atunci când se utilizează câmpuri electrice cu celule de gaz. În primul rând, se preferă heliul gazos datorită potențialului său ridicat de ionizare care limitează neutralizarea produșilor de fisiune prin captarea electronilor. Gradul de curățenie al celulei de gaz este de mare importanță, deoarece impuritățile pot pierde cu

ușurință electroni și pot neutraliza ionii grei de interes. Gradul de curățenie se dorește a fi mai bun decât 1 ppb. Acest lucru se realizează prin recircularea continuă a gazului utilizat prin diferite filtre active și pasive. În plus, se dorește utilizarea criogeniei pentru ca impuritățile să înghețe pe pereți și să permită o putere de stopare mai mare datorită densității crescute. Metodologia de atingere a unui astfel de nivel ridicat de puritate va fi subliniată în Capitolul 4, unde este prezentată o unitate de recirculare a gazului. În al doilea rând, înainte de procesul de termalizare, produșii de fisiune foarte energetici sunt eliberați din țintele subțiri cu energii cinetice ridicate. În timpul acestui proces, atomii neutri de He se ionizează, ceea ce duce la formarea unei plasme de temperatură joasă. Acest efect de sarcină spațială se acumulează în timp și poate duce în cele din urmă la anularea câmpului electric. Acest efect este nedorit, deoarece extracția ionilor depinde de câmpul electric. Ceea ce este extrem de important în cazul unui astfel de design al celulei cu gaz este faptul că, la aceleași tensiuni aplicate pe electrozii cuștii de curent continuu, câmpurile electrice vor fi mai mari. Acest lucru permite funcționarea HADO-CSC cu o sarcină spațială cu 5 ordine de mărime mai mare decât cea a celulelor cu gaz cu extracție longitudinală actuale[1, 16].

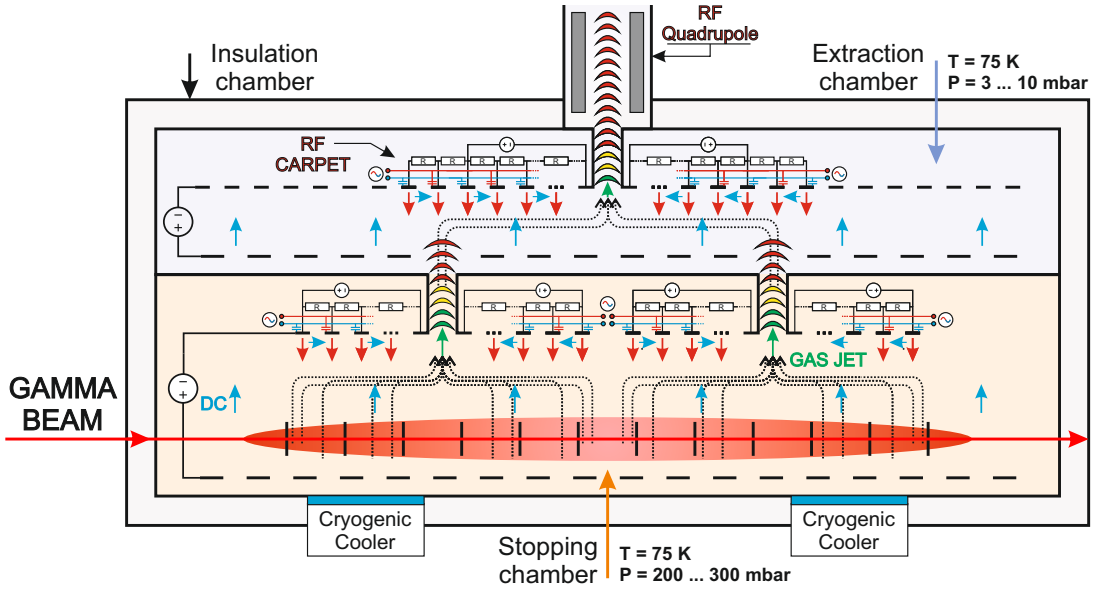


Figura 2.4 Design-ul conceptual al HADO-CSC: regiunea de foto-fisiune în roșu, traiectoriile ionilor în negru, câmpurile de curent continuu în albastru, câmpurile de radiofrecvență în roșu, jeturile de gaz în verde.

În plus, în apropierea peretelui camerei de stopare, se utilizează plăci de circuit cu cablaj imprimat multistrat (covoare RF) ca mecanism de ghidare pentru produșii de fisiune încărcați care se află în imediata apropiere. Se utilizează frecvențe de până la 8 MHz pentru a respinge ionii. Altfel ar lovi cablajul imprimat și ar fi neutralizați. Ec. 2.1 [17, 18] oferă forța medie de respingere a unui covor RF.

$$F_{avg} = m \cdot \left(\mu_0 \frac{\rho_0}{\rho} \right)^2 \cdot \frac{V_{RF}^2}{r_0^3} \tag{2.1}$$

unde: m - masa ionului, μ_0 - mobilitatea ionilor, ρ_0 - densitatea normala a gazului, ρ - densitatea gazului, V_{RF} - Amplitudine RF, r_0 - spatierea dintre electrozi.

Eq. 2.1 oferă mai multe criterii de proiectare care trebuie luate în considerare. O densitate crescută în celulă va duce la necesitatea unei amplitudini RF mai mari sau la o reducere a distanței dintre electrozi. Aceasta din urmă are un efect mai puternic decât atunci când se mărește amplitudinea RF datorită exponentului mai mare.

În mijlocul covorului RF, o gaură cilindrică de sub un milimetru va acționa ca un mecanism de ghidare a produșilor de fisiune. Aceștia vor fi ghidați de forța generată de un jet aproape hipersonic (nr. Mach > 5) format datorită diferenței de presiune dintre cele două camere ale celulei de stopare: (200-300 mbar) în camera de oprire inferioară și presiune scăzută (3-10 mbar) în camera de extracție superioară. În capitolele următoare se va pune accentul pe dinamica jeturilor de gaz în HADO-CSC.

Capitolul 3

Principii de modelare în dinamica computațională a fluidului

3.1 Dinamica computațională a fluidului - Principii de modelare

Acest capitol prezintă principalele considerente ale simulărilor de dinamică computațională a fluidelor. Acestea din urmă utilizează algoritmi care se bazează pe aproximări numerice pentru a găsi o soluție la un fenomen fizic de curgere a fluidelor. Ele iau în considerare viteza, temperatura, presiunea, efectele termice, vâscozitatea etc. Utilizările comune ale simulărilor CFD se regăsesc în aerodinamică și inginerie aerospațială, în ingineria mediului și în industria auto etc.

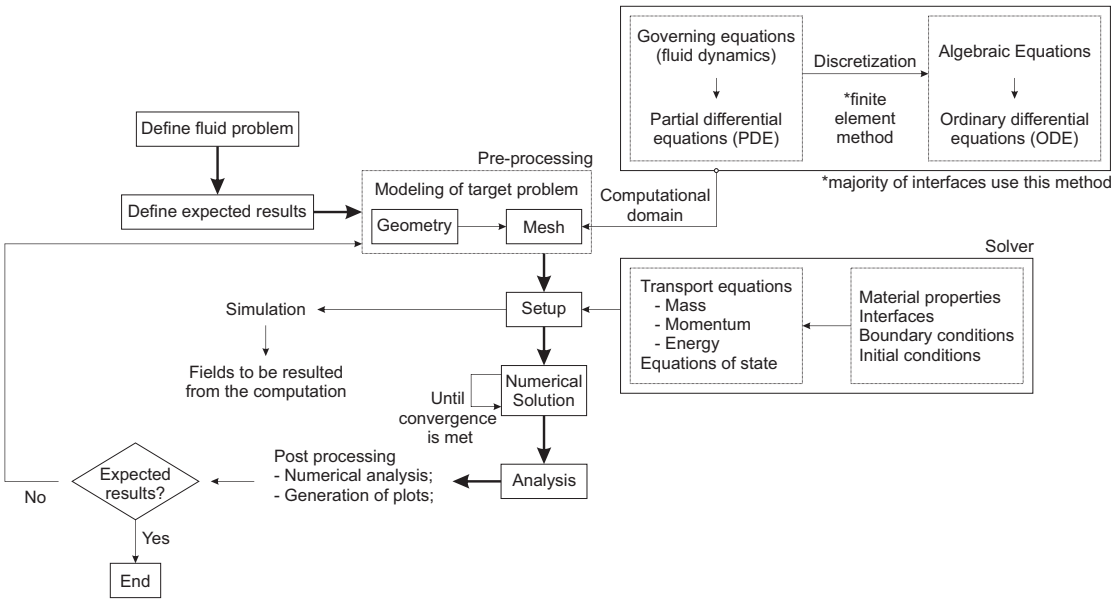


Figura 3.1 Un flux de lucru CFD tipic pentru calcule.

Pentru a descrie proprietățile fizice, trebuie să se utilizeze ecuații matematice. Baza tuturor simulărilor CFD este reprezentată de ecuațiile Navier-Stokes. Aceste ecuații definesc cele trei legi de conservare și afirmă că într-un sistem închis: masa, impulsul și energia se conservă.

Fig. 3.1 prezintă un flux de lucru CFD tipic. Partea de preprocesare implică realizarea proiectării ansamblului cu ajutorul unui program de proiectare asistata de calculator (CAD - Computer Aided-Design) din care se poate realiza un mesh necesar pentru calcule. Ecuațiile în forma lor analitică trec printr-un proces de discretizare din care se obțin ecuațiile algebrice. Acestea din urmă pot fi apoi utilizate de un cod de calculator pentru a rezolva problema de curgere a fluidelor.

3.2 Prezentare generală a simulărilor CFD pentru HADO-CSC

Un prim pas în rezolvarea problemei de curgere a fluidului în HADO-CSC a fost validarea soluțiilor de simulare în raport cu soluțiile analitice disponibile în cazul unei curgeri cvasi-unidimensională. În cazul acesteia din urmă, modificarea suprafeței este cauza variației proprietăților curgerii în funcție de coordonata x de-a lungul duzei, așa cum se vede în Fig. 3.2.

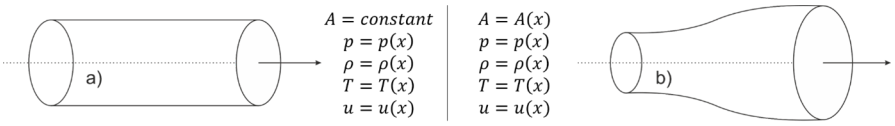


Figura 3.2 Variabilele într-o duză cilindrică dreaptă (a) și într-o duză convergentă-divergentă (b).

Proprietățile de curgere considerate a fi uniforme în orice secțiune transversală de suprafață A, cu valorile dictate de linia centrală.

3.3 Regim de curgere izentropică

Dacă curgerea printr-o duză este comprimată treptat (secțiunea transversală scade) și apoi extinsă treptat (secțiunea transversală crește), condițiile de curgere revin la valorile inițiale. Un astfel de proces este reversibil. Dintr-o analiză a celei de-a doua legi a termodinamicii, un flux reversibil duce la o valoare constantă a entropiei. Acest tip de curgere este unul izentropic, care apare atunci când modificarea variabilelor de curgere este mică și treptată, cum ar fi curgerea ideală prin duză.

O curgere este considerată supersonică atunci când numărul Mach (raportul dintre viteza curgerii fluidului și viteza sunetului în mediul respectiv) este mai mare ca unu.

Duzele convergente-divergente, cunoscute și sub numele de duze Laval, au fost considerate în primul rând ca fiind mecanismul de transport al ionilor creați, deoarece acest tip de duze este utilizat în principal pentru accelerarea gazelor în jeturi supersonice.

Caracteristicile tranziției de la un regim de curgere subsonică la un regim de curgere supersonică într-o duză Laval pot fi descrise într-o simetrie cvasi-unidimensională, modificarea vitezei fiind exprimată în funcție de numărul Mach M prin relația de corespondență dintre secțiunea transversală și viteză:

$$\frac{dA}{A} = (M^2 - 1)\frac{dv}{v} \tag{3.1}$$

unde v reprezintă viteza gazului și A secțiunea transversală a structurii.

Ecuația 3.1, în ipoteza unui gaz ideal din punct de vedere caloric, poate fi rezolvată în mod explicit pentru a obține ecuația de corespondență dintre secțiunea transversală și numarul Mach:

$$\left(\frac{A}{A_t}\right)^2 = \frac{1}{M^2}\left[\frac{2}{\gamma+1}\left(1+\frac{\gamma-1}{2}M^2\right)\right]^{\frac{\gamma+1}{\gamma-1}} \tag{3.2}$$

unde A_t este secțiunea transversală a gâtului duzei care trebuie să fie mai mică decât A pentru a avea o semnificație fizică, iar $\gamma = c_p/c_v$. Pentru orice valoare a lui A, mai mare decât aria gâtului A_t, două soluții reale îndeplinesc ecuația 3.2, corespunzând unei valori subsonice și unei valori supersonice, așa cum se observă în cele două diagrame din Fig. 3.3.

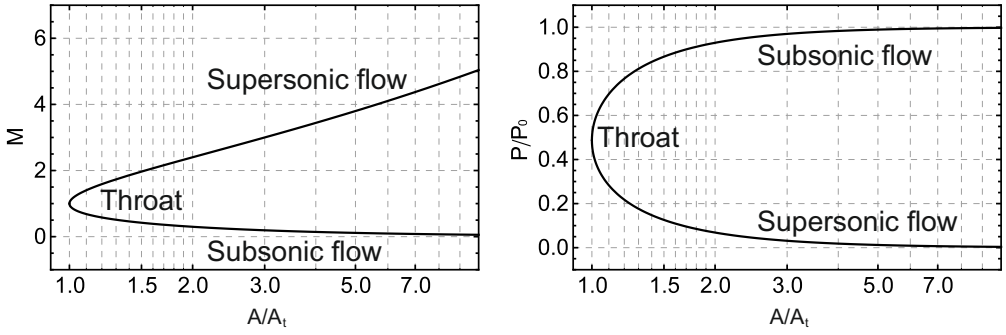


Figura 3.3 Gas Mach number transitioning from a subsonic to a supersonic state as a function of the area ratio (left); Pressure ratio as a function of area ratio in the transition from a subsonic to a supersonic flow (right).

3.4 Simulări CFD ale unei duze Laval

Celula cu gaz actuală este destinată să folosească heliu gazos la 70-80 K și 200-300 mbar, care poate fi considerat, cu o foarte bună aproximație, un gaz ideal din punct de vedere caloric. Deși există surse de căldură semnificative, reprezentate de câmpurile de radiofrecvență ale HADO-CSC, acestea pot fi neglijate în regiunile din interiorul și din

jurul duzelor, unde se efectuează simulările CFD. Prin urmare, curgerea în interiorul jeturilor de gaz este adiabatică.

Simulările de dinamica fluidelor au fost efectuate cu ajutorul COMSOL Multiphysics©, în special al modulului High Mach Number Flow [19].

Duza Laval a fost mai întâi simulată prin definirea limitelor de presiune de intrare și de ieșire de 300 mbar pentru intrare și de 3 mbar pentru ieșire, care corespund celor două presiuni ale HADO-CSC. Rezultatele sunt evidențiate în Fig. 3.4. Rezultatele simulării sunt prezentate în Fig. 3.5 și au fost determinate prin luarea în considerare a valorilor de-a lungul liniei centrale a duzei. Într-adevăr, jetul de gaz atinge valorile izentropice așteptate la gât, și anume $M = 1$, $P/P_0 = 0,49$, $T/T_0 = 0,75$.

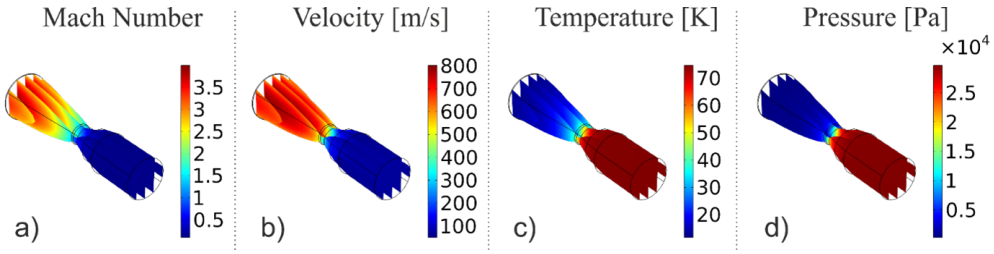


Figura 3.4 Număr Mach (a), viteză (b), temperatură (c), presiune (d)

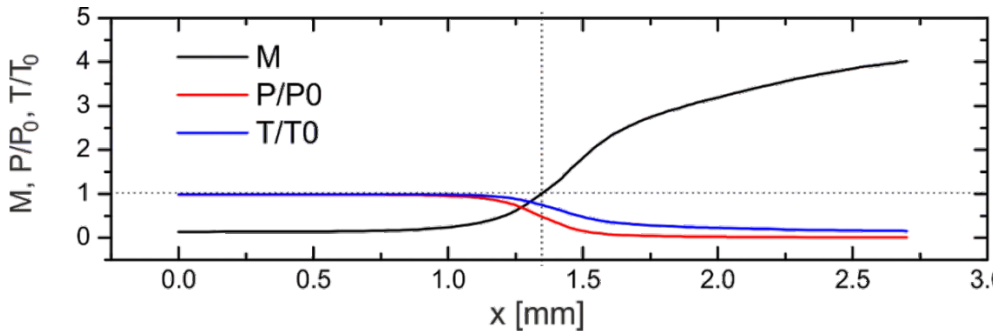


Figura 3.5 Dependența numărului Mach de distanța x de-a lungul axei duzei, în funcție de numărul Mach, rapoartele de presiune și temperatură (total/static). Linia discontinuă arată locația gâtului.

La ieșire, se obține un număr Mach de $M_{out} = 4,03$, care se situează la 0,25% din valoarea analitică. Această valoare este o combinație a accelerației până la $u_{out} = 805$ m/s cu o scădere a temperaturii până la $T_{out} = 11,5$ K.

Pentru $M_{out} = 4,03$ și $P_0 = 300$ mbar, este nevoie de o presiune de ieșire de $P_{out} = 3$ mbar pentru a obține o curgere izentropică. O valoare mai mare a raportului de presiune va duce la formarea unui șoc în regiunea divergentă. Fig. 3.6 prezintă cazul de 3 mbar discutat mai sus și unul în care presiunea de ieșire a fost modificată drastic (200 mbar).

Deoarece presiunea în aval de duză este guvernată independent, diferențele de presiune duc la formarea de șocuri, fie la ieșirea din duză, fie la un șoc normal undeva

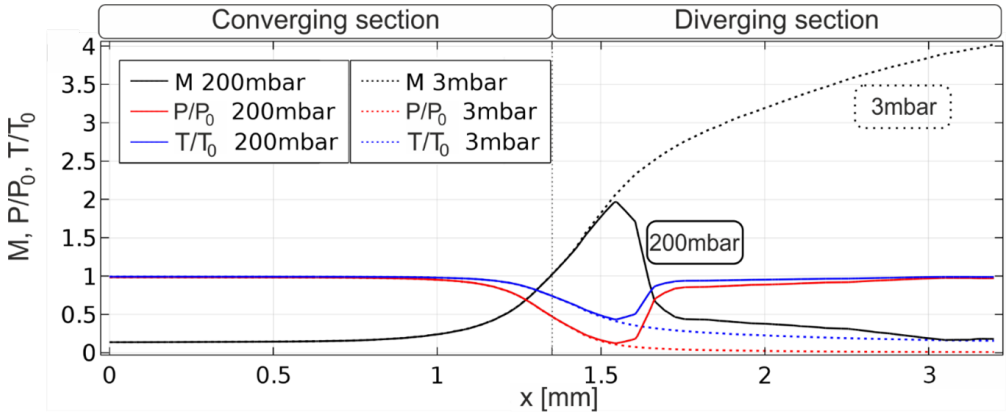


Figura 3.6 Dependența în funcție de distanța x, pentru o presiune de intrare de 300 mbar, de-a lungul axei duzei, a numărului Mach și a rapoartelor total/static pentru presiune și temperatură; 200 mbar la ieșire (linii continue) și 3 mbar la ieșire (linii punctate).

în secțiunea divergentă. Acestea conduc la o scădere rapidă a numărului Mach și la o creștere mare a valorilor P/P_0 și T/T_0.

În cazul în care presiunea în aval este prea mare, se formează șocuri normale în partea divergentă a duzei. Acest tip de șocuri reprezintă o potențială problemă deoarece pot genera vibrații în peretele celulei iar aceste discontinuități de curgere pe care le generează pot afecta transportul ionilor grei.

3.4.1 Șocuri normale in duza Laval

Atunci când un obiect se deplasează mai repede decât viteza sunetului și există o scădere bruscă a secțiunii transversale prin care curge fluidul, procesul de curgere este considerat ireversibil, ceea ce duce la o creștere a entropiei și sunt generate unde de șoc [20]. Efectele care conduc la această creștere sunt vâscozitatea și conducția termică. Aceste unde de șoc sunt regiuni foarte mici din gaz în care proprietățile se modifică considerabil. De-a lungul acestei unde de șoc, presiunea totală, temperatura și densitatea gazului cresc aproape instantaneu. În plus, dacă unda de șoc este perpendiculară pe direcția de curgere, se numește șoc normal. Acest tip de șoc apare în secțiunea divergentă a duzei.

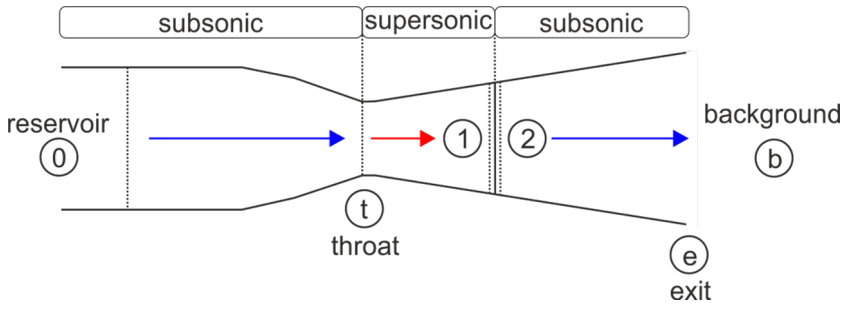


Figura 3.7 Reprezentare schematică a presiunii într-o duză Laval cu un șoc normal în secțiunea divergentă. A_t = aria gâtului duzei, A_{NS} = aria șocului normal, A_1^* = aria sonică în amonte de unda de șoc, A_2^* = aria sonică în aval de unda de șoc.

A fost scris și utilizat un cod MATLAB pentru a obține direct locația undei de șoc normală pe baza unei metode iterative, și anume metoda bisecției. Rezultatele sunt rezumate în tabelul 3.1 și sunt comparate cu rezultatele obținute din simulări. Raportul dintre ieșire și gât a fost calculat prin interpolarea datelor din Fig. 3.3 folosind locația șocului.

Tabel 3.1 Comparație între rezultatele teoretice și cele obținute din simulări pentru o cădere de presiune de 300 - 200 mbar.

Parametru	**Teoretic**	**Simulare**	**Eroare [%]**
$\left(\frac{A_e}{A_t}\right)_{NS}$	1.7691	1.6881	4.79
M_{NS}	2.22	1.9696	12.7
Locație [mm]	1.5701	1.548	1.42

După cum se poate observa, locația simulată este apropiată de cea teoretică. În cazul numărului Mach există o anumită discrepanță care provine din diferența mică de locație.

3.4.2 Influența adaosului de căldură

În teză este descrisă pe scurt influența adaosului de căldură.

3.4.3 Influența frecării

Influența frecării este descrisă pe scurt. Tabelul inclus în teză prezintă influența căldurii și a frecării asupra curgerilor de heliu.

3.5 Unitate demonstrativă care utilizează duze Laval: Simulări CFD

Până acum, simulările de jeturi în duzele Laval au demonstrat că modelul de fluid se încadrează în parametri acceptați în raport cu soluțiile izentropice teoretice. Mai mult, după cum se exemplifică în Fig. 3.6, un raport de presiune diferit de condiția izentropică duce la formarea de unde de șoc.

Aplicația reală a duzei Laval este de a ajuta produșii de fisiune să treacă din camera de oprire în camera de extracție, acționând astfel ca un ghid de ioni. Particulele sunt transportate la intrarea în duză prin covoare RF (electrozi concentrici pe care se aplică câmpuri RF și câmpuri radiale de curent continuu) care ghidează ionii spre intrarea în duză și câmpuri electrice aplicate pe electrozii camerei pentru a ajuta și mai mult traiectoriile particulelor. Deoarece covoarele RF nu fac obiectul lucrării actuale, acestea au fost proiectate pur și simplu prin cilindri mari, cu duza Laval prezentată anterior, în mijloc.

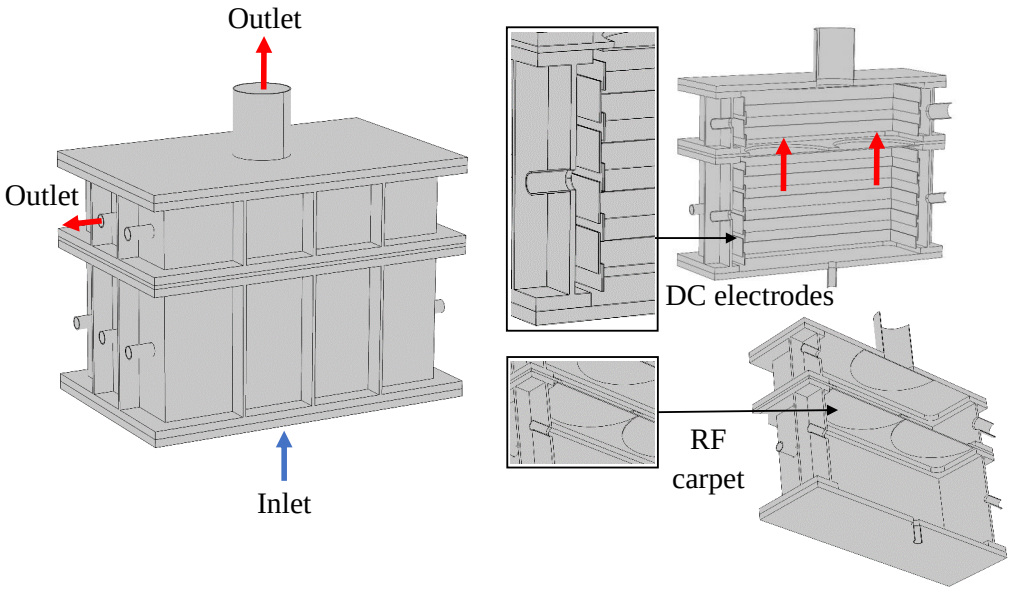


Figura 3.8 Prototipul HADO-CSC (Demo-CSC) utilizat pentru testarea inițială (stânga); secțiune pentru a vedea covoarele RF și electrozii DC (dreapta).

Proiectul prezentat în Fig. 3.8 reprezintă o unitate demonstrativă, un HADO-CSC mai mic, cu doar două duze luate în considerare. Simulările CFD necesită o mare putere de calcul, prin urmare, geometria luată în considerare a fost o secțiune a camerei complete pe care s-a folosit o operație de simetrie pentru postprocesarea ulterioară a jetului din cameră.

Deoarece electrozii din interiorul camerei nu influențează foarte mult jeturile și curgerea fluidului, aceștia au fost îndepărtați și au fost lăsate doar covoarele de radiofrecvență care formează duzele propriu-zise. De asemenea, volumul interior care formează volumul de fluid în care se aplică fizica a fost construit cu COMSOL Multiphysics.

Materialul utilizat a fost, de asemenea, heliu cu aceleași proprietăți ca și în cazul duzei Laval.

Jeturile de gaz supersonice formate cu duzele Laval atunci când acestea sunt utilizate ca ghid de ioni în interiorul celulei de gaz sunt prezentate în Fig. 3.9, unde duza este plasată între camera de stopare și camera de extracție. Înălțimea camerei de extracție este de 10 cm.

Fig. 3.10 prezintă distribuțiile de viteză, temperatură și presiune de-a lungul duzei și, de asemenea, cu 2 mm înainte și după aceasta. Programul de simulare ia în considerare turbulențele, efectele de compresie și de expansiune. Deoarece jetul este ușor subexpandat la ieșire, undele de expansiune sunt încă posibile, ceea ce duce la un al doilea vârf Mach, așa cum se vede în Fig. 3.10. Această subexpansiune duce la scăderea numărului Mach la ieșire cu 5% în comparație cu soluția izentropică. Viteza fluxului de ieșire este de 792 m/s, ceea ce corespunde cu M = 3,81 la o temperatură de 12,45 K și o presiune de 3,01 mbar.

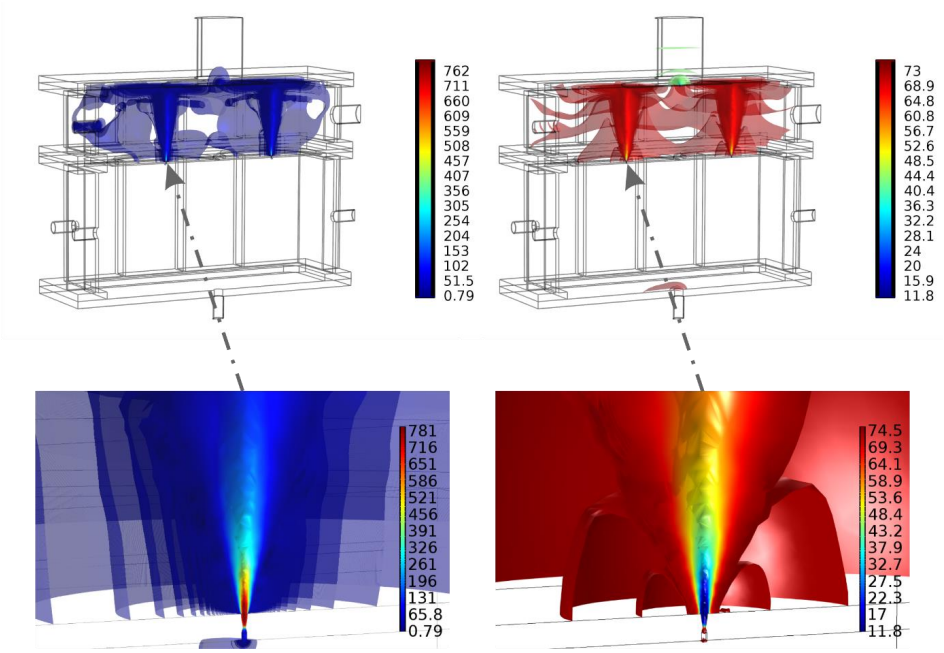


Figura 3.9 Izosuprafața de viteză (stânga) și izosuprafața de temperatură (dreapta) a jetului supersonic format în celula de gaz cu două duze Laval, cu legendele de culoare corespunzătoare.

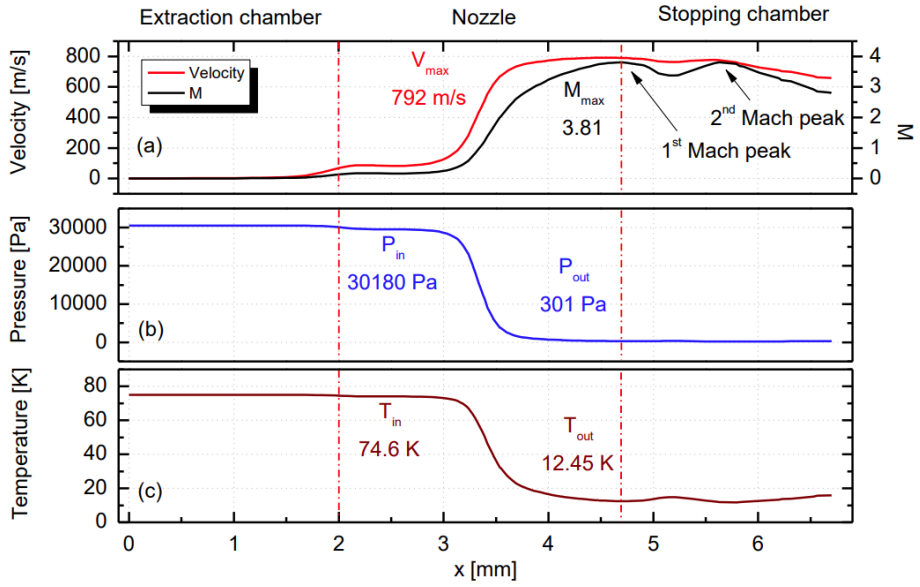


Figura 3.10 Distribuții ale a) Viteză, număr Mach, b) Temperatură și c) presiune care acoperă duza si 2 mm înainte și după aceasta. Liniile punctate indică intrarea și ieșirea duzei Laval.

Conservarea masei între intrarea și ieșirea din CSC este validată cu o eroare relativă de 0.7%. Masa a fost calculată cu ajutorul ecuației. 3.3

$$\dot{m} = \iint_A \rho \cdot v \, dA \tag{3.3}$$

unde m - debit masic, v - viteza fluidului, A - suprafața considerată, ρ - densitatea fluidului.

Același studiu, ca și cel efectuat anterior pentru Fig. 3.5, a fost repetat aici. Numărul Mach la 2 mm înainte și după duză, precum și distribuțiile T/T_0, P/P_0 sunt prezentate în Fig. 3.10.

Tabelul 3.2 prezintă valorile teoretice și simulate pentru $M, P/P_0, T/T_0$ la gâtul duzei și pentru M la ieșirea din duză.

Tabel 3.2 Comparație între valorile teoretice și cele simulate pentru duza convergent-divergentă din Demo-CSC.

Parametru	**Teoretic**	**Simulare**	**Eroare relativă** [%]
M_{throat}	1	1.02	1.96
$P/P_{0-throat}$	0.487	0.474	2.74
$T/T_{0-throat}$	0.75	0.7425	1.01
$M_{outlet-supersonic}$	4.035	3.802	6.13

3.6 Extracția ionilor din celule de gaz cu jeturi supersonice formate în duze Laval

A fost efectuat un studiu ce acoperă 2 ms cu un pas de timp de 0.1 ms. Au fost luați în considerare izotopi reprezentativi pentru cele două regiuni de mai sus, și anume ^{89}Rb și ^{145}Ce. Fig. 3.11 prezintă comportamentul particulelor în duză. În 20 µs toți izotopii ajung la ieșirea din duză și tind să atingă viteza maximă de 792 m/s.

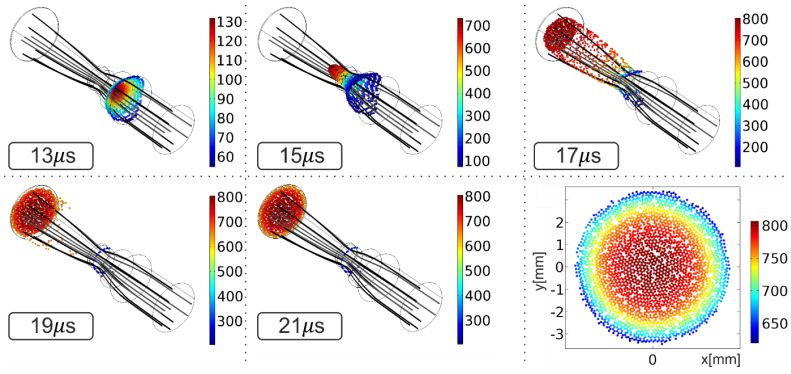


Figura 3.11 Distribuțiile vitezei în [m/s] pentru o mie de ioni ^{145}Ce la diferite etape de timp și portretul de fază care descrie pozițiile particulelor la ieșire, codificate în culori în funcție de viteza lor.

Ionii urmează liniile de curgere a gazului care converg spre gât. Viteza maximă este întâlnită în centrul duzei și scade spre limite. Acest lucru poate fi observat în portretul de fază din partea dreaptă jos a figurii 3.11.

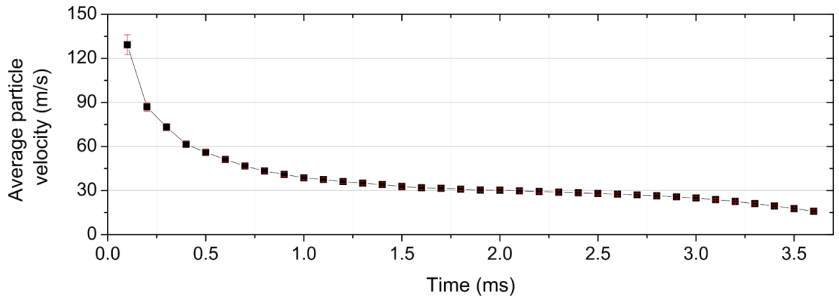


Figura 3.12 Viteza medie a particulelor pentru ^{145}Ce în Demo-CSC în funcție de timp.

Viteza medie a particulelor în funcție de timp pentru ^{145}Ce a fost reprezentată în Fig. 3.12 acoperind cei 10 cm ai camerei de extracție. Ionii ajung la covorul RF de pe peretele superior al camerei de extracție în 1,9 ms la o viteză medie de 10.2 m/s. Timpii de transport pot fi scăzuți cu un ordin de mărime cu ajutorul câmpurilor electrice.

3.7 Rezumat capitol 3

O scurtă prezentare generală și un rezumat al capitolului sunt oferite în teză. Aceasta subliniază, de asemenea, contribuțiile originale ale autorului.

Capitolul 4

HADO-CSC - Proiectare sistem de gaz

4.1 Helium Recovery Unit - Prezentare generală

Acest design al celulei de gaz cu extracție ortogonală ia în considerare două camere (Fig. 2.4). Aceasta depinde în mare măsură de jeturile de gaz pentru a ghida produșii de fisiune. Aceste jeturi prezintă comportamente diferite atunci când se confruntă cu modificări ale condițiilor de presiune în ambele camere. Sistemul menit să se ocupe de funcționarea cu gaz a HADO-CSC este unitatea de recuperare a heliului (HRU). Acesta este un sistem rentabil, destinat să fie utilizat pentru recircularea heliului gazos, utilizat împreună cu HADO-CSC.

Gradul de curățenie în HADO-CSC este foarte important, deoarece impuritățile pot neutraliza produșii de fisiune. Ca atare, este necesar să se utilizeze componente de vid ultra-înalt (UHV). În plus, toate flanșele asigură conexiuni CF-F și VCR. Cantitatea necesară de gaz pe care sistemul este capabil să o recomprime este considerată a fi de 2 m^3/h. Sistemul include două vase tampon: un vas de suprapresiune (aproximativ 4 bar, 250 l) și un vas de subpresiune sau vid (aproximativ 0,8 bar, 150 l).

HRU este descris pe scurt în rezumatul actual și urmează aceeași structură ca și în teză.

4.2 Specificațiile sistemului

Specificațiile generale ale HRU și performanțele sale sunt direct legate de parametrii HADO-CSC, detaliați în teză.

O valoare a debitului de $\approx$ 2.9 l/min (măsurători STU - capitolul 5) la temperatura camerei pentru o cădere de presiune de 300 - 10 mbar, folosind o duză cu o lungime de 1,1 mm, conduce, pentru 8 covoare RF, la o valoare aproximativă de 23.2 l/min, ceea ce este puțin sub cei 2 m^3/h care sunt luați în considerare pentru sistem. Rata de scurgeri a tuturor componentelor din HRU a fost aleasă pentru a oferi o valoare mai mică de 10^{-5} mbar·l/s. La proiectarea sistemului, procentul total de heliu recuperat de puritate 6.0

a fost considerat a fi de aproximativ 98%. Puritatea gazului va fi îmbunătățită și prin utilizarea de purificatoare de-a lungul conductelor de gaz. Sistemul HRU este alcătuit din mai multe părți sau module. Părțile mai mici sunt destinate a fi asamblate și apoi integrate în cadrul mai mare al HRU. Toate componentele sunt discutate în detaliu în teză.

4.3 Sistemul de alimentare cu gaz

Sistemele de gaz folosite în experimentele de fizică nucleară folosesc de obicei butelii presurizate umplute cu gazul respectiv la sute de bari. Uzual, se folosesc butelii de gaz de 50 l, 200 Bar. Acesta este, de asemenea, cazul HRU. Un regulator de presiune, plasat pe butelia de heliu, va limita presiunea de intrare a HRU la o presiune cuprinsă între 4 și 10 Bar. Această presiune va fi aleasă în funcție de valvă de control utilizată la intrarea în HRU pentru a regla cu precizie presiunea din prima cameră de interes.

Alimentarea cu heliu proaspăt este reglată de un controlor de debit masic (MFC - mass flow controller) montat la intrarea în HRU. Acest MFC furnizează 50 slm/min și are două funcții importante: acționează ca o valvă de control care compensează fin pierderile din sistem și poate monitoriza debitul real, putând astfel să se facă o estimare a pierderilor din sistem.

4.4 Sistem de vacuum la intrarea in HRU

Sistemul de pompare ce acoperă ieșirea din camera de extracție (intrarea în HRU) constă într-un ansamblu de două pompe: o Adixen A100L care este echipată cu încă o pompă, tip Pfeifer OKTA 250M.

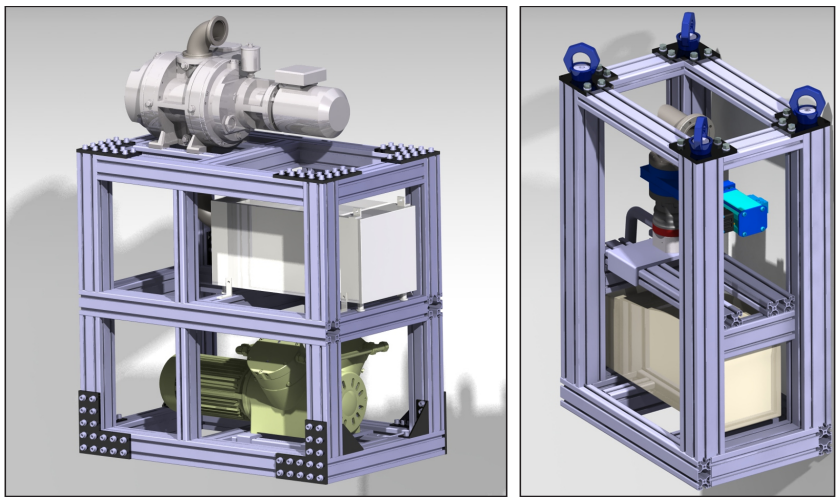


Figura 4.1 Stânga - Reprezentări 3D ale subansamblului Pfeifer OKTA 250M (sus), ADIXEN A100L (mijloc), compresor KNF1400 (jos). Dreapta - Reprezentări 3D ale subansamblului de evacuare.

Fig. 4.1 (stanga) prezintă subansamblul pentru cele trei pompe considerate care formează subansamblul de vid. Acest lucru reprezintă un avantaj atunci când se construiește instalația completă, deoarece secțiuni mai mici ale HRU pot fi asamblate și ulterior demontate cu ajutorul unei macarale. Acest lucru reduce timpul de instalare și eventualele proceduri de mentenanță.

4.5 Compresor și vase tampon

Compresorul cu membrană este utilizat pentru represurizarea heliului gazos deja presurizat prin configurația Adixen A100L - OKTA 250M. Se bazează pe un compresor KNF N1400 cu un motor care este adecvat pentru funcționarea cu convertizor de frecvență și o rată de scurgere mai mică de $1 \cdot 10^{-6}$ mbar l/s.

Compresorul este echipat cu vase tampon, montate înainte (vas de vid) și după compresor (vas de presiune), acționând astfel ca un tampon între compresor și presiunea fluctuantă. Cele două recipiente asigură stabilitatea sistemului și minimizează ciclurile de încărcare și descărcare ale compresorului, care depind în mare măsură de fluctuațiile generate de HRU.

O butelie obișnuită de 50 de litri de heliu la o presiune de 200 de bar are un volum de gaz la presiune atmosferică de 10000 de litri de heliu, ceea ce înseamnă aproximativ 1,78 kg de heliu.

O astfel de butelie de heliu va putea umple HADO-CSC și componentele HRU de aproximativ 5 ori. Mai mult, la o pierdere de 33 mg/min (rata de scurgeri a celorlalte componente este considerată mai mică de $1 \cdot 10^{-5}$ mbar l/s și, prin urmare, neglijabilă), sistemul va putea funcționa continuu timp de peste o lună (37 de zile la cea mai mare presiune) înainte de a fi nevoie să se schimbe butelia de heliu. În plus, cele două recipiente vor fi, de asemenea, conectate la portul catre instalația de vacuum pentru o procedură rapidă de aerisire cu două supape manuale, cu un diametru de DN25. Acestea sunt manuale, deoarece această procedură va fi efectuată doar la pornirea sistemului.

4.6 Sistem de pompare pentru vacuum și evacuare a gazului.

Sistemul de vid este alcătuit dintr-o pompă turbomoleculară HiPace 80 cu un conector superior DN 63 CF-F care oferă un debit maxim de gaz de 2.7 mbar l/s pentru He.

Această secțiune a HRU este menită să permită o pompare rapidă a sistemului și a tubulaturii aferente înainte de începerea procedurii de umplere. Înainte de a începe umplerea cu gaz, trebuie să se atingă o presiune mai mică de 10^-5 mbar, pentru a asigura o cantitate neglijabilă de contaminare a gazului.

Figura 4.1 (dreapta) arată cadrul utilizat pentru a susține cele două pompe, care vor fi montate și ulterior fixate cu macaraua în cadrul HRU.

4.7 Sistem de purificare

Există purificatoare active și pasive care vor fi instalate în HRU pentru a crește calitatea heliului folosit. Se poate selecta între purificatorul activ și cel pasiv alegând calea corectă prin închiderea și deschiderea valvelor corecte. Deoarece aceste purificatoare nu sunt prevăzute cu valve controlate de la distanță, înainte și după valvele manuale pentru fiecare purificator, se vor folosi valve solenoide.

În plus, după cele două purificatoare, în HRU există un altul mai mic utilizat pentru introducerea controlată de impurități sub forma de gaz (curățate ulterior de micul purificator pasiv), în gazul de stopare pentru a controla starea de sarcină a ionilor extrași. Această operațiune se realizează cu ajutorul unei valve de reglare integral metalice Pfeiffer UDV146 (controlată de un controler RVG050) cu un debit cuprins între 0 și 1 ln/min. Fig. 4.2 (dreapta) prezintă panoul de gaz al HRU pe care sunt amplasate toate conexiunile de intrare și ieșire.

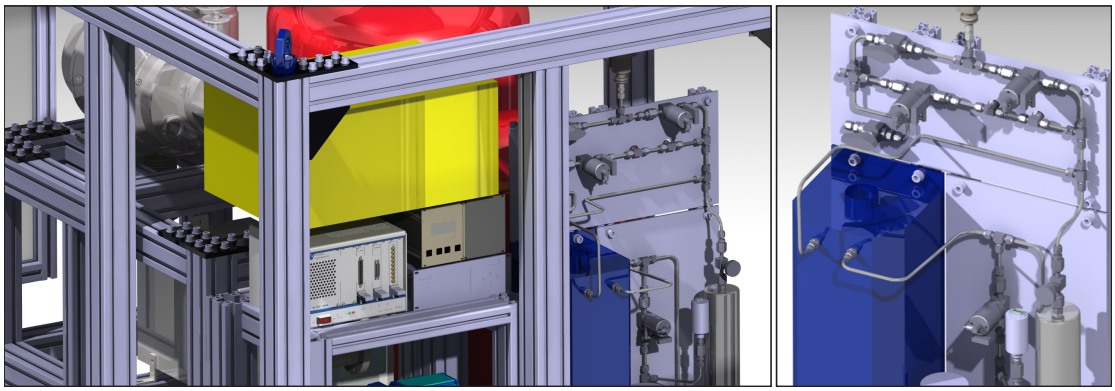


Figura 4.2 (**Stânga**)Amplasarea calculatorului PXI 1073 (stânga). DCU110, RVC300, MKS946 (dreapta). Cutia galbenă (250 x 350 x 520 mm) reprezintă spațiul necesar pentru conexiunile electrice, cablajul, șinele DIN, blocurile terminale și de distribuție și toate accesoriile PXI. (**Dreapta**) Panou de gaz HRU cu conexiuni de intrare și ieșire. Purificatorul activ este reprezentat cu albastru, iar cel pasiv cu gri.

Toate componentele de gaz sunt fixate pe cele două plăci de 5 mm, adică teurile, crucile și electrovalvele necesare. Legătura dintre purificator și componentele fixe se realizează cu ajutorul unor tuburi flexibile din oțel inoxidabil 316L de 1/4'.

4.8 Sistem de control

Sistemul de control al întregului HRU este format din două subsisteme: hardware (denumit în continuare sistem de comandă sau CS) și software (denumit în continuare

consolă de comandă sau CC). În plus, acesta reprezintă un sistem de control în buclă închisă. Luând în considerare CSC-ul actual de la FRS Ion Catcher de la GSI, pentru care sistemul de control s-a dovedit a funcționa deosebit de bine cu LabVIEW, programarea dorită se va face cu ajutorul acestuia. Pentru aceasta se va utiliza Actor Framework cu bibliotecile și utilitățile actuale CSPP (Control System++). Capitolul 6 tratează în detaliu arhitectura CSPP și implementarea actuală a sistemului de control al FRS Ion Catcher.

Sistemul de comandă este o parte integrantă a HRU care poate monitoriza toți parametrii echipamentelor și, cu ajutorul consolei de comandă, poate controla automat diferitele subsisteme pe baza unui algoritm preprogramat.

Sistemul de comandă se bazează pe un șasiu NI-PXI, conceput special pentru a funcționa în astfel de aplicații. Șasiul ales, și anume NI PXIe-1073, poate găzdui module PXI cu 5 sloturi: 3 sloturi hibride și 2 sloturi PXI Express, cu o lățime de bandă de 250 MB/s și un modul de comandă.

Consola de comandă se bazează pe LabVIEW ca limbaj de programare. Acesta s-a dovedit a fi deosebit de performant la actualul sistem de control al FRS Ion Catcher și este o soluție utilizată la nivel mondial. Arhitectura aleasă se va baza pe Actor Framework, care utilizează instrumentele și utilitățile CSPP dezvoltate la GSI. Principalul avantaj al acestei arhitecturi este utilizarea variabilelor partajate în rețea și facilitează implementarea ei în viitorul sistem de control CSC. Diagrama logică de lucru completă poate fi consultată în anexa 2 din teză.

4.9 Proiectare mecanică

Cadrul exterior al HRU, în care vor fi montate toate subansamblele, este evidențiat în Fig. 4.3. Rezistența mecanică este asigurată de colțarele în formă de "L" din aluminiu cu lățimea de 15 mm și de colțarele de îmbinare. Fiecare roată poate susține 1 tonă. În partea superioară există patru piulițe pivotante, de tip RSC2016, fiecare având o sarcină maximă de 1,5 tone. Cadrul necesită aproximativ 30 m de profile de Al (150 kg) și duce la o greutate totală a cadrului de aproximativ 200 kg cu toate panourile montate. În plus, greutatea totală a întregului sistem HRU este mai mică de 1.2 tone.

Pentru a crește rigiditatea tuturor ansamblurilor, se vor utiliza conectori automați. Se vor folosi șuruburi cu cap hexagonal în loc de șuruburi cu cap cilindric pentru a se evita orice timp mort care ar putea apărea din cauza capetelor rotunjite. În plus, cadrul exterior va fi construit din profile pline, iar subansamblele vor fi construite cu profile goale. În acest din urmă caz, în cazul ansamblurilor mai mici, acest lucru este posibil deoarece greutatea nu depășește 300 kg.

Asamblarea HRU poate începe fie prin construirea doar a bazei cadrului exterior, instalarea subansamblurilor și apoi adăugarea celorlalte componente ale cadrului exterior, fie prin construirea întregului cadru exterior și coborârea cu macaraua a tuturor



Figura 4.3 Cadrul exterior al HRU pe care sunt montate subansamblele.

subansamblelor din partea superioară a HRU. Proiectarea mecanică completă a întregii HRU este evidențiată în Fig. 4.3.

Cadrul HRU va fi închis cu o pereche de panouri pe fiecare parte. Acestea sunt construite din rame de aluminiu de 40 x 40 mm cu panouri din plexiglas sau foi de metal. Producția de căldură estimată în sistemul închis este de câțiva kW, datorată în principal căldurii disipate de motoarele pompelor. Pentru 4.5 kW a fost calculat un debit de aer necesar de 48.3 m^3, pentru o diferență de temperatură de 5°C.

4.10 Rezumat capitol 4

Acest capitol tratează în detaliu etapa de proiectare a unității de recuperare a heliului. O astfel de instalație este extrem de importantă atunci când este cuplată cu HADO-CSC, deoarece reduce costurile de utilizare, în primul rând a gazului folosit, și minimizează timpul total de întreținere datorită designului său modular.

Contribuția originală este evidențiată prin conceptualizarea sistemului, proiectarea mecanică, diagramele de funcționare a gazelor și diagramele logice. Ea se bazează pe raportul intern prezentat grupului FRS-IC intitulat: *Helium Recovery Unit for the LEB CSC*, A.State and T. Dickel.

Capitolul 5

Unitate de testare supersonică - caracterizare experimentală a jeturilor de gaz

5.1 Prezentare Generală

Un dispozitiv de caracterizare, și anume, unitatea de testare supersonică (STU), care utilizează aceleași valori de presiune ca și HADO-CSC, a fost proiectat și construit pentru realizarea mai multor studii la temperatura camerei. Au fost avute în vedere diferite tehnici de caracterizare, atât măsurători optice, cât și măsurători directe, de exemplu, imagistica Schlieren, fluorescența jetului de gaz, măsurători cu tub Pitot.

5.1.1 Proiectare Mecanică

Unitatea de testare supersonică (Supersonic Test Unit - STU) a fost proiectată, construită și utilizată pentru a servi drept prototip pentru metodele de caracterizare a jeturilor supersonice. Designul său modular o face potrivită pentru o gamă largă de măsurători la temperatura camerei. Proiectarea și construcția au fost realizate având în vedere modularitatea, astfel încât trecerea de la o metodă la alta se face cu un efort minim. În figura 5.1 sunt evidențiate reprezentări 3D ale ansamblului experimental. Datorită construcției transparente a camerei, pot fi utilizate și metode optice. Astfel, a fost testată metoda optică Schlieren, care se bazează pe modificările indicelui de refracție al unui fascicul de lumină care trece printr-un gradient de densitate (indus de jet). Au fost utilizate atât un LED alb cu luminozitate variabilă, cât și un laser HeNe. Acestea oferă rezultate bune în cazul gradienților de densitate ridicată, dar metoda nu este suficient de sensibilă pentru a surprinde orice modificări de densitate rezultate din jeturile STU.

O metodă optică neinvazivă de vizualizare a jetului care apare în cea de-a doua cameră, care imită condițiile camerei de extracție din CSC, presupune vizualizarea fluorescenței jetului de gaz. Prin utilizarea unui singur electrod subțire plasat înainte de

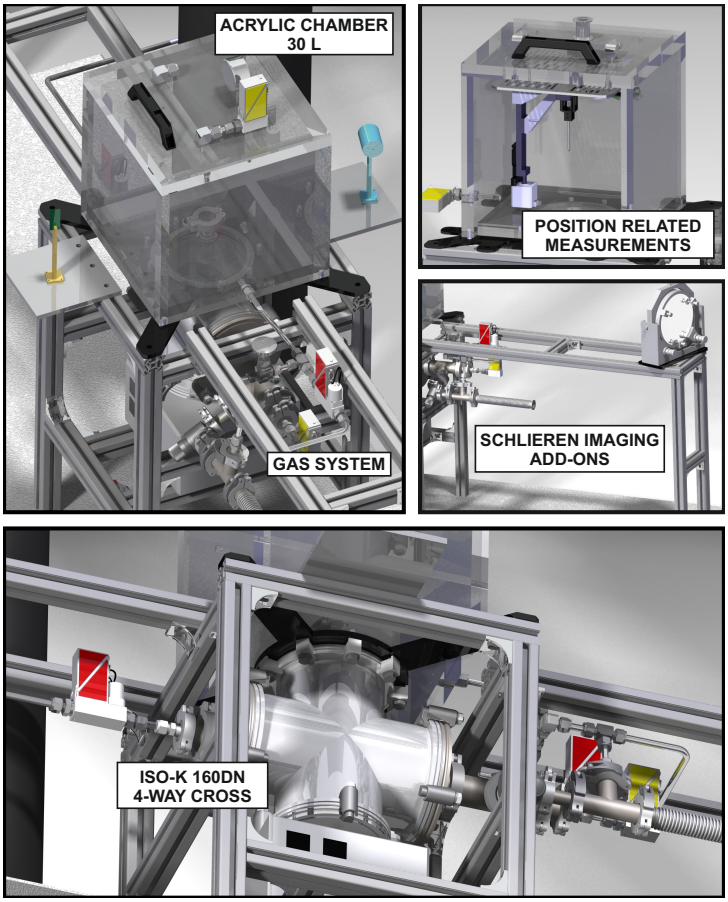


Figura 5.1 Reprezentări 3D ale întregului proiect mecanic al STU. Pot fi observate diferite accesorii pentru diferite metode de măsurare, de exemplu, măsurători legate de poziție sau pentru imagistica Schlieren.

ieșirea din duză, conectat la o sursă de alimentare de înaltă tensiune (CAEN 8 kV), gazul emergent prezintă o strălucire vizibilă. La intrare a fost utilizată o rezistență de 1 MΩ pentru a limita curentul. La aproximativ 300 - 400 V se inițiază o descărcare. În prezența unei curgeri de gaz, jetul de gaz rezultat, care se extinde în camera acrilică, prezintă o strălucire corespunzătoare relaxării spre starea fundamentală a atomilor constituenți care formează gazul. Reprezentarea schematică a montajului utilizat este descrisă în Fig. 5.2.

5.1.2 Sistem de gaz

Sistemul de gaz al STU precum și toate componentele sale care pot imita presiunea HADO-CSC la temperatura camerei sunt descrise in detaliu în cadrul tezei.

5.1.3 Sistem de control

Sistemul de control a fost dezvoltat în LabVIEW utilizând o arhitectura ce folosește o mașină cu număr finit de stări.

5.2 Metode de măsurare

Au fost luate în considerare diferite abordări și metode de caracterizare a jeturilor: Fluorescența cu jet de gaz, măsurători cu tub Pitot, imagistica Schlieren.

5.2.1 Fluorescență cu jet de gaz

5.2.2 Metodologie

Tehnica de fluorescență a jeturilor de gaz a fost utilizată cu succes pentru a descrie comportamentul jeturilor atunci când se modifică cele două presiuni importante din celula de gaz. În timpul utilizării acestei metode, au fost analizate diferite diametre de duză. Acestea au indicat că, în toate cazurile, jeturile urmează un scenariu puternic subexpansionat cu un model repetat de unde de șoc. Rezultatele obținute în urma simulărilor sunt în acord cu debitele masice măsurate cu STU și cu formarea primului șoc normal. Dimensiunea celulelor folosite in cadrul simularilor va fi analizată pentru a obține o corelație și mai bună cu jeturile reale.

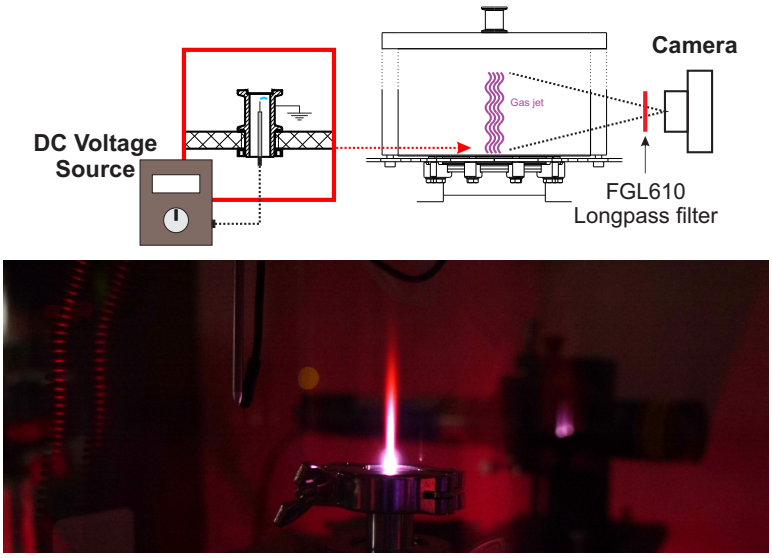


Figura 5.2 (Sus) Reprezentare schematică a instalației utilizate pentru experimentul de fluorescență. (Jos) Imagine a gazului care iese dintr-o duză de 0,7 mm la o diferență de presiune de 200 - 10 mbar. Imagine realizată fără filtrul de culoare atașat la cameră. Au fost utilizate: o sensibilitate ISO-1600, un timp de expunere de 3.2 sec. și o apertură f/2.8 pe o cameră SONY alpha a7s ILCE7SM2/B de 12.2 MP pe care a fost montat obiectivul SEL2470GM FE 24-70 mm F2.8 G Master Full Frame Zoom.

5.2.3 Efecte ale presiunii

Trei duze cilindrice, 0.5 mm, 0.7 mm și 0.9 mm cu o lungime de 1.1 mm au fost utilizate. Doi parametri importanți pentru orice celulă de gaz care utilizează jeturi ca mecanism de

ghidare, sunt cele două presiuni care formează jetul. Ca atare, comportamentul în cazul modificării fiecare dintre cele două presiuni a fost investigat.

5.2.4 Unde de șoc

Modelul repetitiv al undei de șoc a jeturilor subexpansionate a fost comparat cu simulările realizate. Locația primei unde de șoc este în concordanță cu simulările CFD.

5.2.5 Măsurători cu tub Pitot

O a doua măsurătoare care a fost efectuată a implicat utilizarea unui tub Pitot. Acesta din urmă reprezintă un dispozitiv de măsurare a debitului cu ajutorul căruia se pot măsura presiunile totală și statică de-a lungul axei jetului. Astfel, se pot realiza profile de presiune de-a lungul axei jetului și, în anumite ipoteze, viteza poate fi aproximată cu ajutorul ecuației lui Bernoulli. Aceasta din urmă necesită ipoteza unui fluid incompresibil, iar prin cunoașterea diferenței dintre cele două presiuni și a densității fluidului la vârful tubului Pitot se poate aproxima viteza. Pentru a obține măsurători repetitive și precise, a fost construit un sistem de mișcare. Acesta se bazează pe două etaje liniare de înaltă precizie care au fost echipate cu motoare pas cu pas. Motoarele sunt acționate de mici drivere plasate pe o placă de dezvoltare care este controlată prin LabVIEW.

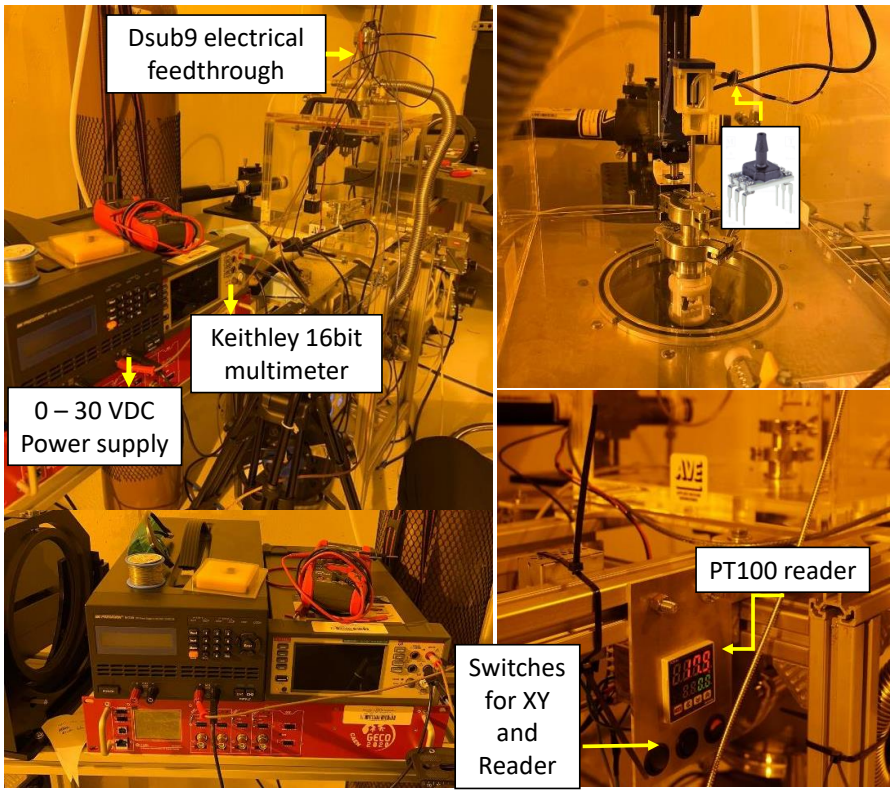


Figura 5.3 Imagini ale STU și ale echipamentelor utilizate pentru realizarea profilelor de presiune de-a lungul axei jetului.

Două moduri de funcționare sunt posibile pentru a fi utilizate cu actuala configurație. Un mod XY care poate fi utilizat pentru mapare și un mod XZ care poate fi utilizat pentru efectuarea de măsurători axiale. Restricțiile de spațiu din interiorul camerei duc la o acoperire a presiunii de-a lungul axei jetului de numai 6.2 cm. Ca atare, a fost utilizată o duză de 0.5 mm. Acest diametru al duzei a fost selectat deoarece diametrele mai mari conduc la viteze mai mari. Această afirmație este dedusă pe baza măsurătorilor de fluorescență a jetului de gaz, care indică o intensitate mai mare a jetului în regiunile apropiate de poziția tubului Pitot pe măsură ce crește diametrul duzei. În plus, duza de 0.5 mm nu prezintă un șoc normal curbat care să se formeze la vârful tubului Pitot. Acest comportament ar fi un indicator al faptului că jetul are un număr Mach ridicat și presiunea totală măsurată de tubul Pitot nu este cea dorită, iar presiunea măsurată în spatele unui șoc normal ar indica o valoare mai mică a presiunii. O diferență de presiune $P_{tot} - P_{st}$ de 0.2 mbar care se găsește la 6.2 cm s-ar traduce printr-o viteză de $\approx$ 150 m/s la o densitate a gazului de 0.00215 kg/m^3. Această densitate consideră valorile din baza de date NIST a proprietăților termodinamice ale heliului la 12.2 mbar și 18°C. Temperatura a fost măsurată cu ajutorul unui PT100 plasat în interiorul camerei chiar la vârful tubului Pitot. Senzorii de presiune absolută utilizați sunt predispuși la erori foarte mari din cauza preciziei acestora de $\pm$2.5 mbar. De asemenea, o variație de 0.25 mbar duce la o variație a vitezei de 75 m/s. Presiunea statică nu are o variație puternică, ducând la o variație de doar 1 mbar de la ieșirea din duză până la punctul maxim la care poate fi utilizată instalația. Ca atare, doar presiunea totală este cea care trebuie cunoscută. Pe baza presiunii măsurate de-a lungul celor 6.2 cm și prin extrapolare, după $\approx$ 1 cm, presiunea totală ar corespunde presiunii statice. Acest lucru indică o diferență mică de presiune care, la rândul său, duce la o viteză mică, așa cum se observă în rezultatele simulărilor.

5.2.6 Imagistică Schlieren

Una dintre metodele propuse pentru configurația experimentală actuală a fost tehnica de imagistică Schlieren. Această metodă se bazează pe faptul că razele de lumină, atunci când trec printr-un mediu caracterizat de un gradient de densitate sunt distorsionate din cauza variațiilor indicelui de refrație.

5.3 Simulări CFD

S-au efectuat simulări CFD pentru diferite diametre de duză la diferențe diferite de presiune.

5.4 Măsurători de curgere de gaz

Debitul masic necesar prin sistem pentru fiecare diametru al duzei, pentru a menține diferite diferențe de presiune a fost măsurat cu ajutorul STU.

5.5 Rezumat Capitol 5

Această secțiune prezintă rezumatul capitolului și măsurătorile viitoare cu STU.

Rezultatele descrise în detaliu în cadrul tezei sunt în pregătire avansată pentru a fi trimise la o revistă de specialitate cu următorul titlu: *Methods of characterization of supersonic helium jets in cylindrical nozzles used for ion beam transport*, A. N. State, D. L. Balabanski, P. Constantin, M. Cuciuc, P. Ghenuche, D. Nichita, A. Rotaru, A. Spataru.

Capitolul 6

Sisteme de control în LabVIEW folosite pentru fizică nucleară

6.1 Introducere

Capitolul 6 este axat pe două sisteme de control, programate în LabVIEW, cu abordări de proiectare diferite, utilizate în fizica nucleară.

6.2 Sistem de control bazat pe QMH în LabVIEW - automatizarea celei de-a 4-a linii experimentale la Acceleratorul Tandem de 9 MV din IFIN-HH

6.2.1 Ansamblu experimental

Primul sistem de control prezentat în această secțiune este camera de împrăștiere de pe linia experimentală 4 a acceleratorului tandem de 9 MV de la IFIN-HH, care poate fi văzută în Fig. 6.1.

Acesta reprezintă o modernizare în care au fost dezvoltate și utilizate mai multe sisteme noi, și anume sistemul de mișcare, sistemul de control al gazelor și sistemul de achiziție. Noul sistem a fost pus în funcțiune în timpul unui experiment HI-ERDA în care s-a utilizat un fascicul de ^{63}Cu la 80 MeV cu două ținte subțiri. Sistemul de mișcare pentru configurația prezentată a funcționat în modul microstep cu pas nominal 1/2. De asemenea, pentru a mari precizia se poate folosi un pas nominal divizat 1/256. Sistemul de gaz a funcționat în limitele așteptate, stabilizarea presiunii necesitând între două și patru minute. Testul folosind cele două ținte care au fost luate în considerare, Si+ZrO_2 și SiC, a oferit rezultatele așteptate, putând vedea C, O_2 și Si, precum și proiectilele de Cu împrăștiate pe Zr-ul mai greu.

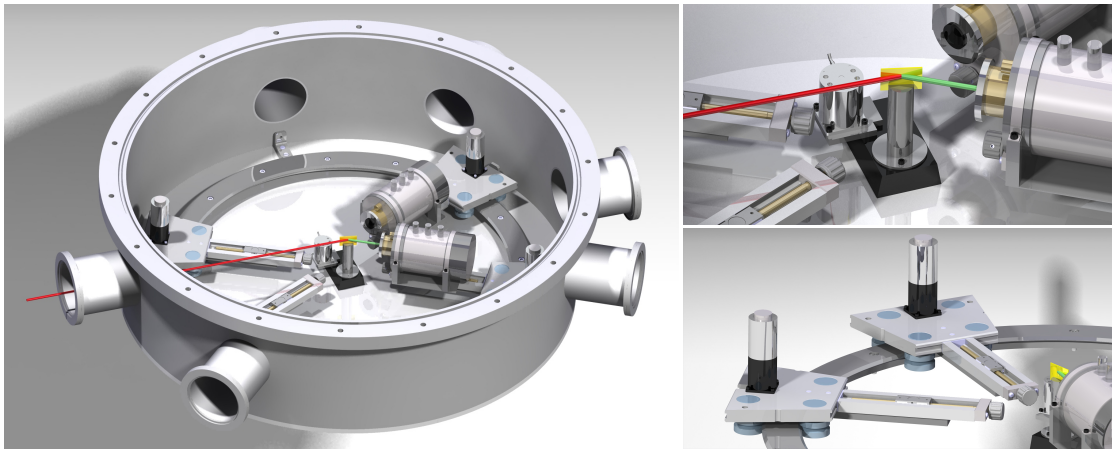


Figura 6.1 (Stânga) Reprezentare 3D a camerei de împrăștiere cu sistemul de mișcare și telescoapele instalate; (dreapta sus) suportul țintei (roșu - fasciculul incident, verde - ioni împrăștiați în telescopul, galben - țința); (dreapta jos) zoom-in pe cele două sisteme de ghidare.

6.2.2 Aplicația LabVIEW

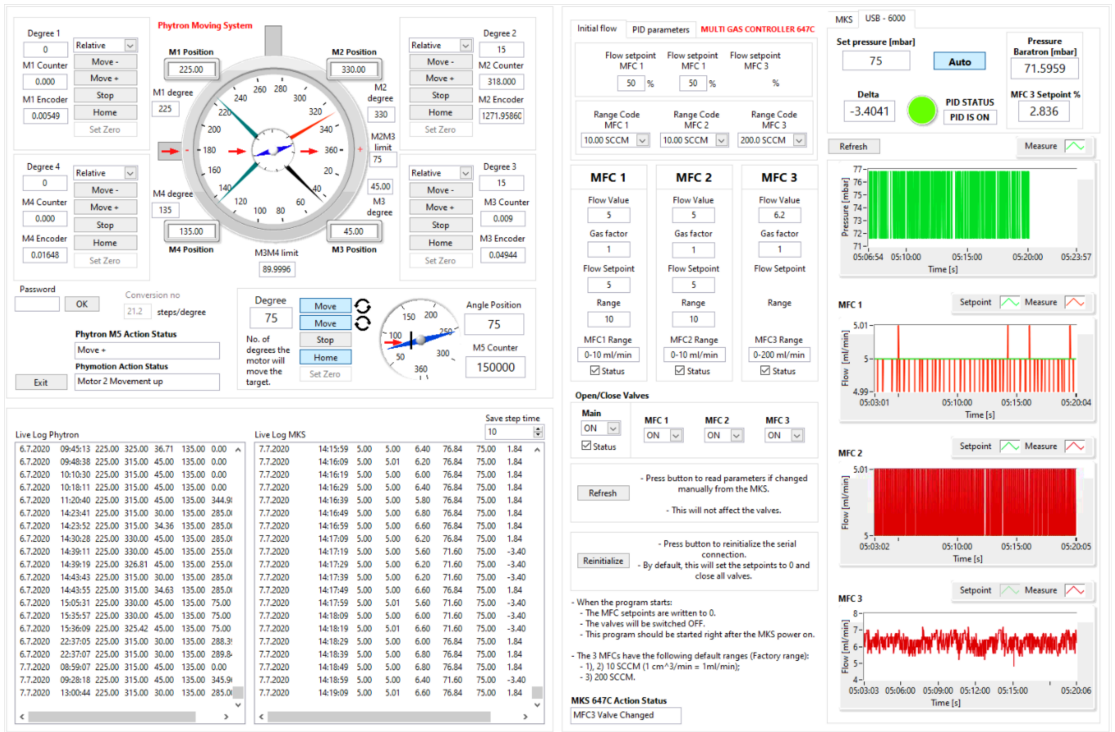


Figura 6.2 Interfața LabVIEW pentru sistemul de control. (stânga) controlul mișcării celor 4 brațe și a țintei. (dreapta) controlul complet al sistemului de gaz.

Interfața grafică, după cum se poate vedea în Fig. 6.2, a fost proiectată pentru a se potrivi unui ecran de 19" și pentru a avea toate setările, diagramele de măsurare și înregistrarea datelor atât pentru sistemul de gaz, cât și pentru sistemul de mișcare pe aceeași interfață. Sistemul de mișcare este reprezentat de un goniometru cu patru indicatori, fiecare reprezentând cele patru cadrane ale camerei de împrăștiere. Fiecare

motor are limite implementate în software pentru a evita o posibilă coliziune. Acestea pot fi modificate cu ușurință în cazul în care se dorește schimbarea detectorilor. Fiecare braț este acționat de un motor pas cu pas capabil de mișcare relativă și absolută. Deși contorul mecanic și-a dovedit eficiența, neproducând citiri eronate, fiecare motor oferă, de asemenea, o citire a unui encoder ca martor al poziției reale. Fiecare motor poate fi oprit în orice moment, chiar dacă brațul este în mișcare, poate fi reglat, iar poziția sa "zero" poate fi ajustată numai dacă utilizatorul introduce parola pentru această operațiune. Această din urmă procedură, adică "setarea zero", se face de fiecare dată când se efectuează procedura de aliniere.

6.2.3 Măsurători și performanța sistemului

Acest sistem de control precum și măsurătorile realizate au fost prezentate în detaliu în [21], care reprezintă contribuția originală a acestui capitol.

- Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms, entitled: "Experimental set-up for high precision nuclear physics measurements at the IFIN-HH 9MV tandem accelerator", A.N.State, H.Petrascu, D.G.Ghita, Volume 499, 15 July 2021, Pages 53-60. https://doi.org/10.1016/j.nimb.2021.05.002

6.3 Sistem de control bazat pe Actor Framework și CS++ în LabVIEW - sistemul de control al FRS Ion Catcher de la GSI

6.3.1 Ansamblul experimental FRS-IC

A doua parte a capitolului 6 pune accentul pe munca depusă pentru a implementa sistemul de control al FRS Ion Catcher utilizând arhitectura Actor și clasele CS++ dezvoltate pentru LabVIEW. FRS Ion Catcher (FRS-IC) [12] utilizează fragmentele produse de FRS (Fragment Separator) pentru a efectua experimente pe nuclee exotice la energii joase. Acesta este format dintr-o celulă de oprire criogenică (CSC) pentru a termaliza nucleele exotice [22], o linie de fascicul de radiofrecvență (RFQ) pentru selectarea masei și transport [23] și un spectrometru de masă cu reflexie multiplă (MR-TOF-MS). Spectrometrul include un sistem de captură RF și un analizor electrostatic pentru măsurători de masă [24, 25]. Fig. 6.3 descrie CSC și o parte din linia de fascicul RFQ (DU1 — Diagnostics Unit 1) și prezintă dispozitivele utilizate pentru a testa stabilitatea noului sistem cu noua sa funcționalitate. În tot sistemul, heliu de înaltă puritate este utilizat ca gaz tampon. Datorită potențialului ridicat de ionizare al He, ionii rămân încărcați după termalizarea în CSC. Aceștia sunt transportați cu ajutorul unor câmpuri

electrice, create de o serie de electrozi inelari, din CSC către o structură RF (covor RF). Acolo, cu ajutorul câmpurilor combinate de curent continuu și de radiofrecvență, ionii sunt ghidați spre duza de extracție [26]. Lungimea volumului de oprire a CSC este definită de lungimea cuștii de curent continuu, care poate fi adaptată mecanic pentru fiecare experiment în parte. În mod ideal, se utilizează lungimea maximă, adică 1 m, dar, de exemplu, pentru nucleele cu durată de viață scurtă sunt favorabile intensități mai mari ale câmpului de extracție și, prin urmare, o cușcă de curent continuu mai scurtă duce la câmpuri de curent continuu mai mari și, astfel, la o extracție mai rapidă.

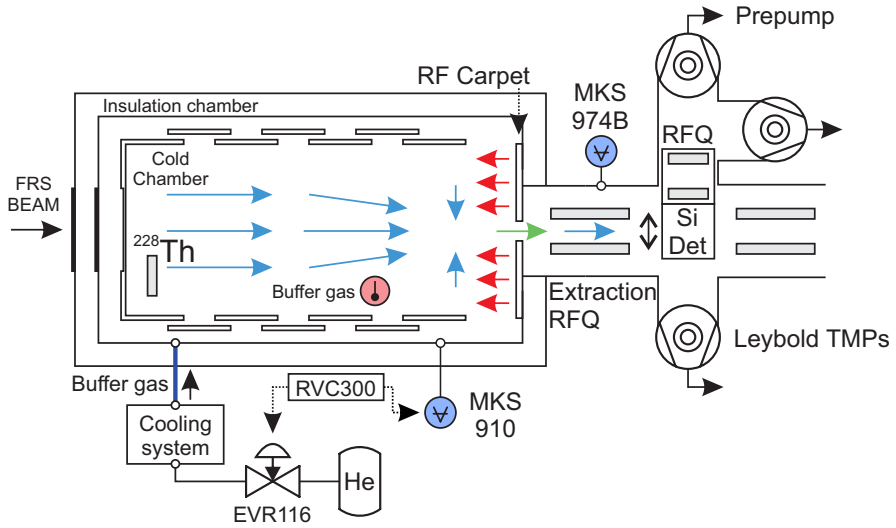


Figura 6.3 Schema simplificată a CSC și a primei părți a liniei de fascicul RFQ, inclusiv o unitate de diagnosticare (DU1) a instalației FRS-IC. Pentru punerea în funcțiune a sistemului de control a fost utilizat un detector de siliciu. Săgețile albastre reprezintă câmpurile electrice, săgețile roșii reprezintă câmpuri RF repulsive, iar săgeata verde reprezintă forța generată de curgerea gazului. Detectorul de Si poate fi înlocuit cu un RFQ pentru continuarea transportului spre linia de fascicul rămasă și spre MR-TOF-MS. Ferestrele de fascicul sunt afișate în stânga.

6.3.2 Cerințe Sistem de Control

Această secțiune se referă la cerințele sistemului de control nou dezvoltat.

6.3.3 Sistem de control ce utilizează Arhitectura Actor și CS++

Arhitectură

Arhitectura utilizată cu CS++ în LabVIEW este decrisă în detaliu.

Implementare

Sistemul de control al FRS-IC a fost implementat utilizând o arhitectură distribuită de tip client-server. Această secțiune descrie în detaliu etapele de implementare și actorii de control dezvoltați.

6.3.4 Interfețe grafice

Sunt descrise interfețele grafice ale sistemului de control și funcționalitatea acestora. În Fig. 6.4 se prezintă MainGUI, adică GUI-ul client. Pe această interfață, operatorul, poate vedea toate valorile de interes, și să controleze direct parametrii dispozitivului sau să lanseze GUI-uri pentru control automat.

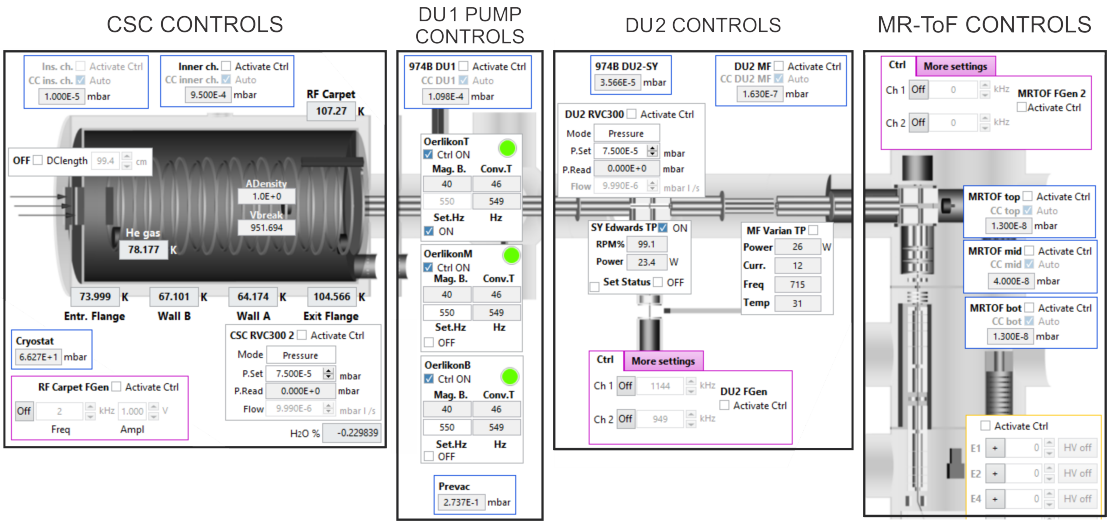


Figura 6.4 Principalele părți ale interfeței grafice ale programului principal, care este interfața principală la pornirea aplicației client. Părțile principale ale sistemului cu comenzile lor sunt delimitate pe secțiunile ansamblului experimental.

6.3.5 Măsurători și performața sistemului

A fost efectuat un test off-line folosind o sursă de ioni ^{228}Th α-recoil cu covorul RF setat la 16 Vpp și 6.485 MHz. Acest lucru a contribuit la temperatura generală a sistemului prin căldura adăugată. În timpul acestui test, celula a fost încălzită de la aproximativ 85 K la 120 K. Pentru a exprima ratele de extracție s-a folosit un detector de siliciu. În regiunea de extracție,un sistem mecanic automat poate schimba între un segment RFQ și un detector de Si (Fig. 6.3). S-a utilizat o densitate de 0.9 mg/cm^2 în celulă și o presiune de extracție de 10^{-3} mbar (Fig. 6.5). Având în vedere activitatea totală a sursei de ^{228}Th utilizată de 7 kBq, unghiurile solide ale suportului sursei și detectorului Si de 38% și 14%, cu o eficiență de supraviețuire de 50%, rata măsurată estimată pe detectorul Si pentru ^{220}Rn este de 0.121 kBq. Ionii sunt transportați la 1.5 m de la sursă la detector, primul produs de dezintegrare nefiind observat, deoarece are un timp de înjumătățire foarte lung (^{224}Ra - 3,62 zile). Această măsurătoare acoperă 6 ore de funcționare continuă, în care densitatea din celulă și presiunea din regiunea de extracție au fost menținute în limitele de $\pm 2\%$ în comparație cu valorile lor de referință. Valorile RMS sunt de 0.8986 mg/cm^2 pentru densitatea și 0.001 mbar pentru presiunea în DU1. Aceasta se încadrează în variația prevăzută pentru instalație.

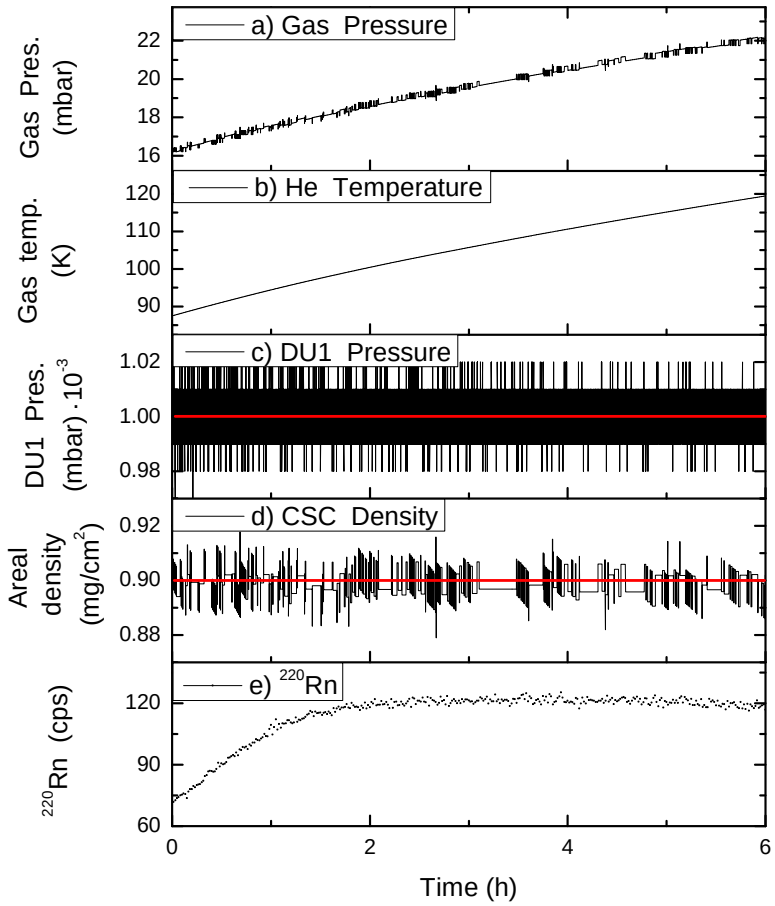


Figura 6.5 a) Presiunea He în celula de gaz. b) Temperatura He în celula de gaz. c) Presiunea în regiunea de extracție. d) Densitatea în celulă. e) Rata ^{220}Rn în detectorul Si pe parcursul a 6 ore. Liniile roșii indică valoarea dorită.

Rata de extracție a ^{220}Rn (al 2-lea izotop fiică al ^{228}Th) este afișată în Fig. 6.5e). Prin minimizarea fluctuațiilor de densitate a gazului în celula de stopare și a fluctuațiilor de presiune în regiunea de extracție, cu ajutorul sistemului de control, se obține o funcționare stabilă ce conduce la o rată de extracție constantă. În plus, sistemul poate fi utilizat acum pentru experimente de dezintegrare rare care utilizează ansamblul experimental și care se așteaptă să dureze, în unele cazuri, mai multe luni continue. Noua implementare a sistemului de control cu actorii săi de control asigură condiții stabile și controlate atât în ceea ce privește densitatea în celula de stopare criogenică, cât și presiunea în regiunea de extracție. Acestea conduc la o eficiență de extracție stabilă în CSC și la o rată de extracție constantă pe perioade lungi de timp, reducând în același timp la minimum intervenția umană necesară.

Testele de stabilitate pe termen lung, în ceea ce privește presiunea cât și densitatea, atunci când au fost create perturbații, au demonstrat că sistemul funcționează în parametrii așteptați. Sistemul de control, implementat cu arhitectura Actor împreună cu clasele și utilitățile CS++, va putea fi extinsă foarte eficient de-a lungul anilor, în timp ce i se vor adăuga mai multe echipamente. În ceea ce privește utilizarea memoriei și

solicitarea CPU, versiunea actuală a SCS ocupă aproximativ 500 MB de memorie RAM cu o solicitare a CPU mai mică de 10% dintr-un procesor Intel Xeon W-2123, având peste 1000 de variabile de proces. Astfel, sistemul poate ajunge cu ușurință la un factor de 2 până la 3 în plus în ceea ce privește numărul de echipamente și procese. Noile caracteristici oferite de SCS, cum ar fi reglarea presiunii, reglarea densității, calculatorul tensiunii de străpungere, salvarea datelor, precum și ușurința de a construi programe simple care utilizează variabilele partajate în rețea îmbunătățesc experiența utilizatorului și, de asemenea, extind posibilitatea unor experimente viitoare care necesită o bună stabilitate. Această lucrare se bazează pe mai multe stagii de cercetare la GSI, Germania, precum și pe lucrarea originală publicată în [27]:

- Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, entitled: "The slow control system of the FRS Ion Catcher", A.N.State, S.Beck, D.Amanbayev et al, Volume 1034, 1 July 2022, 166772. https://doi.org/10.1016/j.nima.2022.166772

6.4 Rezumat Capitol 6

O scurtă prezentare generală și un rezumat al capitolului sunt oferite în teză. De asemenea, aceasta evidențiază munca originală a autorului.

Capitolul 7

Concluzii și perspective pentru dezvoltări ulterioare

Nucleele exotice reprezintă provocarea generației noastre. Acestea ar putea răspunde la multe întrebări care sunt încă problematice. Dintre numeroasele aspecte, astrofizica este unul dintre cele care beneficiază foarte mult de pe urma cercetărilor asupra nucleelor exotice bogate în neutroni, oferind piesele care lipsesc din puzzle-ul nucleosintezei. În goana noastră după cunoaștere, noi tehnologii și metode sunt dezvoltate în mod constant pentru a avea acces la perioade de viață din ce în ce mai scurte. Acestea au un mare impact și asupra societății noastre, poate nu pe termen scurt, dar pe termen lung, vor duce la progres.

Două metode de producție și separare sunt utilizate în prezent sub diferite forme: în zbor și separarea izotopică on-line (ISOL). O prezentare generală a acestor metode a fost realizată în al 2-lea capitol al tezei. Diverse echipamente cu abordări diferite sunt utilizate la diferite facilități cu scopul comun de a căuta și investiga nuclee exotice bogate în neutroni, încă necunoscute. Această căutare se face cu eforturi mari ce durează mulți ani înainte ca un dispozitiv experimental real să ajungă la un nivel suficient de maturitate pentru a furniza fascicule de ioni radioactivi formate din nuclee noi și nedescoperite. O astfel de instalație experimentală este HADO-CSC.

Aceasta oferă o extracție ortogonală, care duce la un timp de extracție rapid (aproximativ 10 ms) și funcționează la temperaturi criogenice pentru o densitate și o puritate sporită a gazului folosit. Produșii de fisiune, formați după interacțiunea fasciculului gamma ELI-NP cu țintele subțiri de actinide plasate în interiorul celulei de gaz, sunt prinși în gazul tampon și sunt supuși unui proces de termalizare. Acest proces este foarte favorabil, deoarece produșii de fisiune rămân într-o stare de sarcină pozitivă datorită potențialului ridicat de ionizare al heliului. Deoarece jeturile supersonice sunt menite să fie utilizate ca și mecanism de ghidare cu HADO-CSC, au fost necesare mai multe studii diferite pentru a înțelege mai bine fizica din spatele formării lor.

Capitolul 3 evidențiază activitatea realizată utilizând programul de simulare CFD Comsol Multiphysics cu modulul de curgere cu număr Mach mare (*high mach number*

flow module). Acesta din urmă este special conceput pentru jeturi la numere mach ridicate și rezolvă ecuațiile Navier-Stokes compresibile. Înainte de a efectua simulări ale duzelor cilindrice, care vor fi utilizate pentru HADO-CSC, au fost simulate duze Laval pentru a testa programul de simulare. S-a utilizat o duză convergent-divergentă, care are avantajul de a fi descrisă analitic prin relația de corespondență intre secțiunea transversală și numărul Mach. Considerând o curgere izentropică prin duză, rezultatele obținute în urma simulărilor sunt în concordanță cu valorile analitice, cu diferențe mai mici de 2% la liniile sonice și de ieșire, ceea ce dovedește că programul de simulare funcționează conform așteptărilor. În plus, lucrarea originală a implicat și un cod MATLAB care se bazează pe ecuațiile undelor de șoc normale și pe metoda bisecției. Au fost exemplificate, atât în rezumat cât și în teză, două cazuri pentru presiunea de ieșire a duzei: 3 mbar, care este presiunea de ieșire pentru o curgere izentropică prin duză și 200 mbar, care reprezintă o schimbare drastică a presiunii de ieșire. Pozițiile în secțiunea divergentă a duzei în care se formează un șoc normal atât în cazul analitic cât și în cazul simulărilor au fost comparate. Rezultatele sunt în concordanță, cu o eroare în poziția șocului normal mai mică de 2%.

De asemenea, pentru a realiza un studiu complet al unei geometrii în care condițiile sunt plasate la orificiile de intrare și de ieșire ale camerei și nu la orificiile de intrare și de ieșire ale duzei, a fost proiectată o geometrie la scară mai mică. Aceasta are același raport între volumul camerei de stopare și cel al camerei de extracție de 1:4 și utilizează doar două duze. În acest fel, memoria necesară pentru simulare este redusă. Pentru a investiga în continuare comportamentul jeturilor, a fost utilizată aceeași duză Laval. Presiunea ușor mai mare la ieșirea duzei a limitat valoarea numărului Mach la 3.81, indicând, de asemenea, un jet sub-expansionat. O mie de ioni ^{145}Ce au fost eliberați în mod uniform de la intrarea în duză. Acești ioni au fost selectați deoarece instalația ELI-NP IGISOL se va concentra pe regiunea respectivă. Utilizând forța generată de jeturile supersonice, ionii urmăresc liniile de curgere ale gazului, parcurgând o distanță de 10 cm și ajungând la covorul de radiofrecvență la o viteză medie de 10.2 m/s. Această viteză este foarte importantă, deoarece modelele actuale de covoare RF admit doar o viteză de ≈50 m/s pentru a capta ionii. Debitul masic prin sistem este de mare importanță deoarece dictează componentele sistemului de gaz utilizate pentru celula de gaz. În ipoteza unui sistem închis, în care se neglijează eventualele scurgeri, debitul masic poate fi considerat ca fiind $n \cdot \dot{m}_{nozzle}$, unde n - numărul de duze și $\dot{m}_{nozzle}$ este debitul masic printr-o duză. Pentru duza laval considerată este necesar un debit masic de ≈0.22 g/min pentru o cădere de presiune de 300-3 mbar. Toate lucrările originale care sunt evidențiate în capitolul 3 au fost publicate în [28].

Capitolul 4 este axat pe proiectarea conceptuală a unității de recirculare a heliului. Acesta este un sistem de gaz eficient din punct de vedere al costurilor care menține o funcționare stabilă în ceea ce privește presiunea în cele două camere ale HADO-CSC. În același timp, oferă un sistem de recirculare pentru a reduce costul operațional al gazului

pe care îl utilizează celula. Din punct de vedere mecanic, acesta oferă un design modular care poate fi asamblat și, ulterior, transportat cu macaraua până la locația sa specifică. Cântărește aproximativ 1.2 tone. Toate componentele, care se găsesc în diferitele module ale HRU, sunt distribuite în mod uniform. HRU este un sistem închis, cu un filtru de praf montat lângă sursele principale de căldură și o serie de ventilatoare, conectate la sistemul de control. Acestea vor menține o temperatură constantă în interior. Luând în considerare sarcina de putere totală de ≈4,5 kW, a fost calculat un debit de 48 m^3/h pentru a menține o diferență de 5°C. S-a luat în considerare plasarea a două vase tampon între compresor și presiunea fluctuantă. În acest fel, durata de viață a compresorului este mult îmbunătățită și, de asemenea, crește stabilitatea. Acest lucru se realizează prin minimizarea ciclurilor de încărcare și descărcare ale compresorului. O butelie standard de He 6.0 de 50 de litri, 200 Bar, conține o cantitate de He de aproximativ 1.78 kg. Luând în considerare toate masele și debitele necesare pentru a menține condițiile HADO-CSC (vasul de presiune - 167 g, vasul de vid - 17 g, camera de stopare - 161 g, camera de extracție - 0.27 g (2 mbar), 1.37 g (10 mbar), debitul masic dintre camere ≈ 4.12 g/min) cu o pierdere de 0.16% prin RFQ), HRU este capabil să atingă 37 de zile de funcționare continuă înainte de a schimba butelia de He. Sistemul de comandă se bazează pe un șasiu PXI care are un design modular și este programat cu LabVIEW. Fiecare modul corespunzător îndeplinește o sarcină diferită legată de HRU. Mai precis, un modul releu va fi utilizat pentru a aborda controlul general al tuturor electrovalvelor din sistem, iar pentru martori se utilizează un modul DI/DO. Diferite module seriale (RS232, RS485) răspund cerinței de control și monitorizare serială a tuturor echipamentelor aferente din HRU, cum ar fi manometrele de vid și presiune, regulatorul compresorului, valvele de control etc. În plus, HRU va fi programat în LabVIEW utilizând CS++. Acesta din urmă a fost dezvoltat la GSI și extinde implementarea NI a arhitecturii Actor. Toate lucrările originale, și anume conceptualizarea sistemului, proiectarea mecanică, diagramele de lucru și logice ale gazului, sunt cuprinse în Raportul intern de proiectare intitulat: "Helium Recovery Unit for the LEB CSC", A. State și T. Dickel.

Capitolul 5 se concentrează pe proiectarea, construcția și implementarea STU (Supersonic Test Unit). Acest ansamblu experimental reprezintă munca originală a autorului pentru a compara rezultatele simulărilor cu date empirice reale obținute în condiții de temperatură ambiantă (RT). Acest ansamblu este capabil să reproducă căderile de presiune ale HADO-CSC la RT fiind utilizată cu mai multe metode diferite de caracterizare: Imagistica Schlieren, fluorescența jetului de gaz, măsurători utilizând un tub Pitot. Este format din două camere: o cameră de vid acrilică cu un volum de 30 L și o cruce ISO-K DN160 cu 4 căi care sunt fixate împreună pe o placă adaptoare. Rata de scurgeri obținută a fost de 10^{-4} mbar·l/s, astfel încât eventualele scurgeri din sistem au putut fi neglijate. Pentru a îmbunătăți și mai mult ușurința în ceea ce privește înlocuirea duzelor, acestea din urmă au fost realizate în flanșe oarbe DN16. Au fost utilizate mai multe diametre diferite. A fost proiectat și construit un sistem de gaz pentru STU. Acesta se bazează pe

două regulatoare de presiune: un regulator de presiune în aval care menține presiunea în crucea cu 4 căi la o valoare stabilită de utilizator și un regulator de presiune în amonte pentru camera acrilică. Aceste regulatoare sunt realizate prin controlul valvei de control din interiorul regulatoarelor de debit masic utilizate ca valve de control. O remarcă poate fi făcută cu privire la MFC-ul de intrare utilizat, care este cu efect Coriolis, utilizat pentru a măsura și controla debitul masic. Acest tip de MFC prezintă un interes deosebit, deoarece poate furniza o măsurare directă a debitului masic prin sistem, în timp ce celălalt MFC este cu efect termic, cu o precizie mai mică în măsurare. Sistemul de control construit se bazează pe LabVIEW și are la bază o arhitectură cu număr finit de stări. Acesta asigură controlul și monitorizarea tuturor echipamentelor implicate în măsurători, cum ar fi comenzile sistemului de gaz, controlul sistemului de mișcare, controlul luminozității pentru sursa de lumină Schlieren, senzorii de presiune absolută utilizați pentru tubul Pitot, înregistrarea datelor, informații despre sistem, cum ar fi CPU, RAM, spațiu HDD etc.

Au fost prevăzute mai multe măsurători diferite care să fie utilizate cu STU. Prima metodă se bazează pe imagistica Schlieren, în care razele de lumină sunt distorsionate atunci când trec printr-un gradient de densitate, indus de jet. Această modificare a traiectoriei poate fi apoi utilizată pentru a vedea semnele plus și minus ale gradientului de densitate. Acest lucru se realizează prin poziționarea unei muchii foarte ascuțite la punctul focal de dinaintea camerei. Modulele ce pot fi adaugate pe STU și fixate pe cadrul acestuia. Modulul necesar pentru imagistica Schlieren presupune montarea a doua cadre opuse ansamblului ce oferă două oglinzi parabolice de 8". Aceste oglinzi sunt montate la randul lor in sisteme de precizie in 3 axe. Unghiul acestora este calculat in prealabil in etapa de proiectare. Oglinzile au o distanță focală de 48" și o reflectivitate medie de peste 95% în intervalul 450 - 650 nm. Împreună cu STU, ele formează o instalație Schlieren cu două oglinzi sau Z-Schlieren. Sistemul a fost atent aliniat, pentru a minimiza posibilele aberații care ar putea apărea. Astigmatismul nu poate fi eliminat complet și duce la formarea a două puncte focale sau puncte de imagine. S-au testat mai multe surse de lumină, cum ar fi diferite LED-uri cu lungimi de undă și luminozități diferite și un laser HeNe, dar se poate concluziona că metoda nu este deloc sensibilă la gradienți de densitate scăzută. Deși este utilizată pe scară largă ca metodă standard de caracterizare a țintelor de gaz în experimente cu laser, limitele până la care această metodă este aplicabilă la jeturile de He nu sunt clar precizate în literatura de specialitate. Cu actuala instalație, aerul comprimat, cu o densitate de 3000 de ori mai mare decât cea de interes, poate fi clar observat și caracterizat. Formula Gladstone-Dale, care leagă indicele de refracție de densitatea mediului, conduce la o valoare a indicelui de refracție de 1.0003215 la o densitate pentru heliu de 0.00164 kg/m^3, ceea ce implică o sensibilitate foarte bună, care nu poate fi realizată cu instalația actuală. Un studiu viitor în care se vor folosi mai multe gaze diferite va aborda limitele fizice la care se poate aplica o astfel de metodă optică și, de asemenea, va fi extinsă la alte metode optice neinvazive.

O a doua măsurătoare care a fost efectuată a implicat utilizarea unui tub Pitot. Acesta din urmă reprezintă un dispozitiv de măsurare a debitului cu ajutorul căruia se pot măsura presiunile totală și statică de-a lungul axei jetului. Astfel, se pot realiza profile de presiune de-a lungul axei jetului și, în anumite ipoteze, viteza poate fi aproximată cu ajutorul ecuației lui Bernoulli. Aceasta din urmă necesită ipoteza unei curgeri incompresibile, iar prin cunoașterea diferenței dintre cele două presiuni și a densității gazului din vârful tubului Pitot se poate aproxima viteza. Pentru a obține măsurători repetitive și precise, a fost construit un sistem de mișcare. Acesta se bazează pe două etaje liniare de înaltă precizie care au fost echipate cu motoare pas cu pas. Motoarele sunt utilizate în modul microstep cu pas nominal 1/1, fiind acționate de drivere plasate pe o mică placă de dezvoltare care este controlată prin LabVIEW. Se intenționează să se utilizeze două moduri de funcționare cu configurația actuală. Un mod XY care poate fi utilizat pentru mapare și un mod XZ care poate fi utilizat pentru efectuarea de măsurători axiale. Restricțiile de spațiu din interiorul camerei conduc la o acoperire a presiunii de-a lungul axei jetului de numai 6,2 cm. Ca atare, a fost utilizată o duză de 0.5 mm. Acest diametru al duzei a fost selectat deoarece diametrele mai mari conduc la viteze mai mari. Această afirmație este dedusă pe baza măsurătorilor de fluorescență ale jetului de gaz, care indică o intensitate mai mare a jetului în regiunile apropiate de poziția tubului Pitot pe măsură ce crește diametrul duzei. În plus, duza de 0.5 mm nu prezintă un șoc normal curbat care să se formeze la vârful tubului Pitot. Acest comportament ar fi un indicator al faptului că jetul are un număr Mach ridicat și că presiunea totală măsurată de tubul Pitot nu este cea dorită, iar presiunea măsurată în spatele unui șoc normal ar indica o valoare mai mică a presiunii. O diferență de presiune $P_{tot} - P_{st}$ de 0.2 mbar care se găsește la 6.2 cm s-ar traduce printr-o viteză de $\approx$ 150 m/s la o densitate a gazului de 0.00215 kg/m^3. Această din urmă densitate este considerată din baza de date NIST a proprietăților termodinamice ale heliului la 12.2 mbar și 18°C. Temperatura a fost măsurată cu ajutorul unui PT100 plasat în interiorul camerei chiar la vârful tubului Pitot. Senzorii de presiune absolută utilizați sunt predispuși la erori foarte mari din cauza preciziei acestora. În plus, o variație de 0.25 mbar duce la o variație a vitezei de 75 m/s. Presiunea statică nu are o variație puternică, conducând la o variație de doar 1 mbar de la ieșirea din duză până la punctul maxim la care poate fi utilizată instalația. Ca atare, doar presiunea totală este cea care trebuie cunoscută. Pe baza presiunii măsurate de-a lungul celor 6.2 cm și prin extrapolare, după $\approx$ 1 cm, presiunea totală ar corespunde presiunii statice. Acest lucru indică o diferență mică de presiune care, la rândul său, conduce la o viteză mică, așa cum se observă în rezultatele obținute din simulări.

Fluorescența cu jet de gaz a fost utilizată cu STU. Deși rezultatele obținute cu această metodă sunt mai mult calitative, rezultatele sale pot fi utilizate pentru a cuantifica mai bine comportamentul presiunii asupra jeturilor. Un singur electrod cu vârf ascuțit este plasat chiar înaintea ieșirii duzei pe care se aplică o tensiune înaltă de la o sursă de alimentare externă. După 450 V, jetul emergent prezintă o strălucire vizibilă care

corespunde stărilor excitate ale heliului. Prin utilizarea unui spectrometru cu gamă largă conectat la o fibră optică plasată în fața jetului se pot observa eventualele impurități care apar în cameră. Liniile de azot, care apar în spectrul de emisie optic, sunt filtrate cu ajutorul unui filtru colorat, care va tăia toate lungimile de undă mai mici de 600 nm. În acest fel, doar lungimile de undă emise de heliu sunt utilizate în post-procesarea imaginilor jetului. Au fost folosite duze cu diametre diferite: 0.5, 0.7, 0.9 mm. În funcție de regiunea de interes, se utilizează timpi de expunere diferiți. Presupunând caracteristicile fizice ale jetului, cum ar fi forma și dimensiunea, ca fiind proporționale cu viteza gazului induse de căderea de presiune, se pot exprima câteva reguli empirice în ceea ce privește comportamentul jetului. La creșterea presiunii de sprijin, fiecare 25 mbar duce la o creștere a intensității de 100%. Acest comportament este întâlnit pentru toate duzele. Când se compară intensitățile maxime între diferitele diametre, se poate observa o diferență de zece ori între duzele de 0.5 mm și 0.7 mm și o diferență de trei ori între cele de 0.7 mm și 0.9 mm. Mai mult, o duză de 0.5 mm va furniza informații din tehnica de fluorescență, în regiunea luată în considerare (10 cm), doar începând cu o cădere de presiune de 250 - 10 mbar. Cea de 0.9 mm se saturează la aceeași intensitate maximă din cauza atingerii capetelor imaginii. Se poate concluziona că, menținând aceeași presiune statică, modificarea presiunii din prima cameră a STU duce la un jet mai lung, corespunzător unei viteze mai mari. Fluorescența jetului de gaz oferă, de asemenea, informații despre comportamentul jetului atunci când se modifică presiunea din camera de acrilic. În timp ce se menținea o presiune constantă de 300 mbar, presiunea din camera de acrilic a fost modificată cu câte un mbar pe rând. Se poate concluziona că, odată cu creșterea presiunii, crește și lărgimea la semi-înălțime (FWHM). Înălțimea distribuției de intensitate crește cu aproximativ 10% pentru fiecare mbar adăugat, în timp ce FWHM crește cu aproximativ 5%. Aceste studii pot fi încheiate cu următoarele observații. Presiunea din camera de stopare crește lungimea jetului, menținând în același timp o FWHM similară, astfel că la 10 cm se va întâlni o viteză mai mare a jetului. Modificarea presiunii din camera de extracție are ca rezultat două efecte asupra jetului: o presiune mai mare are ca rezultat o FWHM mai mică și o viteză mai mică a jetului.

Jeturile din HADO-CSC vor fi toate subexpansionate, ceea ce va duce la un model repetitiv de celule de șoc cu un șoc normal prezent în fiecarea dintre acestea. Pe baza formulei empirice ce prezice locația acestui șoc normal, poziția sa este calculată și comparată atât cu simularea, cât și cu locația observată din fluorescența jetului. Rezultatele sunt în concordanță cu locația așteptată. În plus, din poziția șocului normal se poate calcula și presiunea din camera de extracție, care se încadrează între 8 și 12 mbar. Această incertitudine este dată de incertitudinea în selectarea șocului normal din imaginile realizate. Pe baza tuturor studiilor, o duză de 0.4 - 0.5 mm va duce la vitezele așteptate la 10 cm, acolo unde este amplasat covorul RF. Un diametru mai mare al duzei va necesita fie o presiune mai mică în regiunea de extracție, fie o înălțime mai mare pentru camera de extracție.

STU va fi utilizat în viitorul apropiat cu plăci de circuite imprimate (PCB) reale care reprezintă covoarele RF, deoarece duzele vor fi cele rezultate în întregul proces de depunere și frezare. Deoarece covorul RF este multistrat, se va face o comparație directă cu cele prezentate în lucrarea actuală, frezate în aluminiu, și cele din covoarele RF rezultate. În plus, măsurarea directă a presiunii va fi repetată cu sonda Pitot plasată în mijlocul unui covor RF, reproducând și mai mult aplicația. Un alt experiment planificat cu STU este reprezentat de utilizarea unei surse de particule, mai explicit ^{223}Th în tandem cu un detector Si. Acesta din urmă va fi plasat pe sistemul mobil XY cu o folie de Al în fața sa, sursa fiind plasată în spatele duzei. Acest lucru va oferi o măsurare directă a eficienței transportului. De asemenea, rezultatele descrise în detaliu în cadrul tezei sunt în pregătire avansată pentru a fi trimise la o revistă de specialitate cu următorul titlu: *Methods of characterization of supersonic helium jets in cylindrical nozzles used for ion beam transport*.

Capitolul 6 a tratat în detaliu două sisteme de control originale, utilizate în experimente de fizică nucleară, care se bazează pe două modele de proiectare diferite, dezvoltate în LabVIEW. Primul reprezintă sistemul de control al camerei de împrăștiere de la linia experimentală 4 a acceleratorului tandem de 9 MV aflat în IFIN-HH. Acesta se bazează pe un model intitulat Queued Message Handler ce oferă o modalitate de a rula cod în paralel, de a trimite date între diferitele bucle și de a comunica prin mesaje. Acest concept reprezintă o combinație între arhitecturile de tip producător-consumator și cele de tip "event handler", în care prima buclă producătoare se numește "Event Handler Loop" (EHL) și reacționează la evenimentele declanșate de utilizator prin interacțiunea cu comenzile panoului frontal, trimițând mesaje către bucla consumatoare, denumită "Message Handler Loop" (MHL), ce va executa mesajele primite. Acest sistem de control, care oferă o modalitate de control și monitorizare a diferitelor echipamente, cum ar fi manometre, sistem de gaz, sistem de vid, sistem de mișcare, a fost testat și pus în funcțiune cu succes în timpul unui experiment HI-ERDA în care a fost utilizat un fascicul de ^{63}Cu la 80 MeV cu două ținte subțiri: SiC și Si+ZrO_2. Acest experiment a dovedit fiabilitatea, reproductibilitatea și precizia noului sistem dezvoltat. Acest sistem de control a fost prezentat în detaliu în [21], care reprezintă contribuția originală a acestui capitol.

Un al doilea sistem de control a fost tratat în detaliu, și anume, cel al ansamblului experimental FRS Ion Catcher. Acesta din urmă reprezintă o instalație care încetinește nucleele exotice produse cu ajutorul separatorului de fragmente (FRS) de la GSI și este capabil să efectueze măsurători de precizie. Principalul obiectiv al noului sistem de control bazat pe CS++ și Actor Framework în LabVIEW a fost îmbunătățirea stabilității operaționale generale a camerei criogenice de stopare (CSC), oferind în același timp și alte caracteristici: cum ar fi înregistrarea automată a datelor, interfețe grafice interactive, operare fără întreruperi pe o gamă largă de calculatoare din rețeaua locală. De asemenea, oferă posibilitatea de a crea procese automate, de exemplu, bucle de feedback pentru

controlul presiunii și monitorizarea alarmelor ori de câte ori apare o defecțiune. Sistemul este menit să citească, să proceseze și să arhiveze câteva mii de variabile de procese partajate în rețea. Acest lucru este realizat prin utilizarea infrastructurii de rețea deja construite, în care toate dispozitivele sunt conectate la serverele de rețea. În plus, o astfel de îmbunătățire a fost necesară din cauza necesității unei funcționări stabile, cu intervenție umană limitată, pe perioade lungi de timp, deoarece sunt dezvoltate noi programe experimentale cu o durată de funcționare prevăzută de câteva luni.

Au fost dezvoltați doi actori de control pentru a menține stabile densitatea în interiorul celulei și presiunea în regiunea de extracție. Sistemul de control a fost pus comisionat în cadrul unui experiment off-line în care a fost utilizată o sursă de ioni ^{228}Th α cu recul. Covorul RF a fost operată la 16 Vpp și 6.485 MHz. Pentru a testa stabilitatea sistemului de control, temperatura gazului a fost încălzită de la $\approx$85 K la 120 K. Pentru a exprima ratele de extracție a fost utilizat un detector de Si, plasat la 1.5 m de poziția sursei, în prima unitate de diagnosticare. O măsurare a ^{220}Rn pe parcursul a șase ore în detectorul Si, în care densitatea din celulă și presiunea din regiunea de extracție au fost menținute în limitele de $\pm$2% față de valoarea lor de referință, a furnizat o rată de extracție stabilă și constantă. Sistemul poate fi astfel utilizat pentru experimente de dezintegrare rare care se așteaptă să dureze, în unele cazuri, timp de mai multe luni continue. Această lucrare se bazează pe lucrarea originală publicată în [27]:

Lista publicații

- **Characterization of X3 Silicon Detectors for the ELISSA Array at ELI-NP**, S. Chesnevskaya, D.L. Balabanski, D. Choudhury, M. La Cognata, P. Constantin, D.M. Filipescu, D.G. Ghita, G.L. Guardo, D. Lattuada, C. Matei, A. Rotaru, C. Spitaleri, **A. State**, Y. Xu. EPJ Web Conf., (**2017**).

- **Performance studies of X3 silicon detectors for the future ELISSA array at ELI-NP**, S. Chesnevskaya, D.L. Balabanski, D. Choudhury, P. Constantin, D.M. Filipescu, D.G. Ghita, G.L. Guardo, D. Lattuada, C. Matei, A. Rotaru, **A. State**, J. Instrum. 13 (**2018**).

- **Ion beam optic simulations at the 1MV Tandetron from IFIN-HH Bucharest**, D. Pacesila, D. Ghita, T. Sava, M. Straticiuc, V. Mosu, A. Rotaru, **A. State**, O. Gaza, G. Cata-Danil. Romanian Reports in Physics, 71, 204 (**2019**).

- **Simulation of circular radio-frequency carpets for ion extraction from cryogenic stopping cells**, A. Rotaru, G. Căta-Danil, P. Constantin, D.L. Balabanski, T. Sava, **A. State**, A. Spătaru, D. Nichita. UPB Sci. Bull. Ser. A Appl. Math. Phys. 81 (**2019**).

- **Status of ELI-NP and opportunities for hyperfine research**, D.L. Balabanski, P. Constantin, A. Rotaru, **A. State**, Hyperfine Interactions, 240 (**2019**).

- **The cryogenic stopping cell of the IGISOL facility at ELI-NP**, P. Constantin, A. Rotaru, **A. State**, D. Nichita, A. Spataru, D.L. Balabanski, T. Sava, M. Merisanu, T. Roman, C. Scheidenberger, T. Dickel, W.R. Plass. Nuovo Cim. Della Soc. Ital. Di Fis. C. 42 (**2019**).

- **The ELI-NP IGISOL radioactive ion beam facility**, P. Constantin, D.L. Balabanski, **A. State**, A. Rotaru, D. Nichita, A. Spataru, T. Dickel, W.R. Plaß, C. Scheidenberger, Nucl. Instruments Methods Phys. Res. Sect. B Beam Interact. with Mater. Atoms. 461 (**2019**).

- **Applications at the 3 MV TandetronTM from IFIN-HH**, I. Burducea, A. Mitu, A. Rotaru, A. Rugină, **A. State**, A. Vasiliu, B. Savu, D. V. Moşu, D. Iancu, D. A. Mirea, D. Păceşilă, P. Mereuţă, R. F. Andrei, T. B. Sava, and M. Straticiuc, AIP Conference Proceedings 2076, 050001 **(2019)**.

- **Ion extraction from gas cells with supersonic jets formed in laval nozzles**, **A. State**, M. Merisanu, D.L. Balabanski, P. Constantin, T. Sava, A. Rotaru, T. Roman, D. Nichita, A. Spătaru, W.R. Plaß. UPB Sci. Bull. Ser. A Appl. Math. Phys. 82 (**2020**).

- **Multi-nucleon transfer reactions in 238U + 64Ni using grazing model**, A. Spătaru, T. Dickel, W.R. Plaß, J.S. Winfield, P. Constantin, D.L. Balabanski, D. Nichita, A. Rotaru, **A. State**, UPB Sci. Bull. Ser. A Appl. Math. Phys. 82 (**2020**).

- **Optimization of photo-fission fragment production in the Elisol setup at ELI-NP**, D. Nichita, P. Constantin, D.L. Balabanski, B. Mei, A. Rotaru, T. Sava, A. Spătaru, **A. State**, T. Dickel, B. Kindler, B. Lommel. UPB Sci. Bull. Ser. A Appl. Math. Phys. 82 (**2020**).

- **Preliminary results on the measurement of plutonium isotopic ratios at the 1mv Ams facility in IFIN-HH**, D.G. Pacesila, A.R. Petre, E. Chamizo Calvo, A.I. Rotaru, **A. N. State**, V.D. Mosu, M. Virgolici, G. Căta-Danil. UPB Sci. Bull. Ser. A Appl. Math. Phys. 82 (**2020**).

- **Production of exotic nuclei via MNT reactions using gas cells**, A. Spătaru, D.L. Balabanski, O. Beliuskina, P. Constantin, T. Dickel, C. Hornung, A. Kankainen, A.V. Karpov, D. Nichita, W. Plass, S. Purushothaman, A. Rotaru, V.V. Saiko, **A. Stat**e, J.S. Winfield, A. Zadvornaya. Acta Phys. Pol. B. 51 (**2020**).

- **The IGISOL Facility at ELI-NP**, Dimiter L. BALABANSKI, Adrian ROTARU, **Alexandru STATE**, Mihai MERISANU, Le Tuan ANH, Tiberiu SAVA, Dan GHITA, Christoph SCHEIDENBERGER, Timo DICKEL, Wolfgang R. PLASS, Proceedings of 10th International Conference on Nuclear Physics at Storage Rings (STORI'17)

- **Mass measurements of As, Se and Br nuclei and their implication on the proton-neutron interaction strength towards the N=Z line**, I. Mardor, S. Ayet San Andrés, T. Dickel, D. Amanbayev, S. Beck, J. Bergmann, H. Geissel, L. Gröf, E. Haettner, C. Hornung, N. Kalantar-Nayestanaki, G. Kripko-Koncz, I. Miskun, A. Mollaebrahimi, W. R. Plaß, C. Scheidenberger, H. Weick, Soumya Bagchi, D. L. Balabanski, A. A. Bezbakh, Z. Brencic, O. Charviakova, V. Chudoba, Paul Constantin, M. Dehghan, A. S. Fomichev, L. V. Grigorenko, O. Hall, M. N. Harakeh, J.-P. Hucka, A. Kankainen, O. Kiselev, R. Knöbel, D. A. Kostyleva, S. A. Krupko, N. Kurkova, N. Kuzminchuk, I. Mukha, I. A. Muzalevskii, D. Nichita, C. Nociforo, Z. Patyk, M. Pfützner, S. Pietri, S. Purushothaman, M. P. Reiter, H. Roesch, F. Schirru, P. G. Sharov, A. Spătaru, G. Stanic, **A. State**, Y. K. Tanaka, M. Vencelj, M. I. Yavor and J. Zhao, Phys. Rev. C 103 (**2021**)

- **Experimental set-up for high precision nuclear physics measurements at the IFIN-HH 9MV tandem accelerator**, **A. State**, M. Petrașcu and D. Ghiță, Nucl. Instruments Methods Phys. Res. Sect. B Beam Interact. with Mater. Atoms. 499 (**2021**).

- **INCREASE: An in-cell reaction system for multi-nucleon transfer and spontaneous fission at the FRS ion catcher**, Adrian Rotaru, Daler Amanbayev, Dimiter L.Balabanski, David Benyamin, Paul Constantin, Timo Dickel, Lizzy Gröf, Israel Mardor, Ivan Miskun, Dragos Nichita, Wolfgang R. Plaß, Christoph Scheidenberger, Anamaria Spătaru, **Alexandru State**, Nucl. Instruments Methods Phys. Res. Sect. B Beam Interact. with Mater. Atoms. 512 (**2022**).

- **ELIGANT-GN — ELI Gamma Above Neutron Threshold: The Gamma-Neutron setup**, P.-A. Söderström, E. Açıksöz, D.L. Balabanski, F. Camera, L. Capponi, Gh. Ciocan, M. Cuciuc, M. Filipescu, I. Gheorghe, T. Glodariu, J. Kaur, M. Krzysiek, C. Matei, T. Roman, A. Rotaru, A.B. Şerban, **A.State**, H. Utsunomiya, V. Vasilca, Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. Sect. A-Accel. Spectrom. Dect. Assoc. Equip., 1027 (**2022**).

- **The slow control of the FRS Ion Catcher**, **A. N. State**, S. Beck, D.Amanbayev, D. L. Balabanski, H.Brand, P.Constantin, T. Dickel, C. Hornung, D. Nichita, W. R. Plaß, H. Roesch, A. Rotaru, C. Scheidenberger, J. Siebring, A. Spataru, N. Tortorelli, J. Zhao, Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. Sect. A-Accel. Spectrom. Dect. Assoc. Equip., 1034 (**2022**).

- **Spiral RF carpet for ion mass spectrometry with radioactive isotope beams**, A. Rotaru, P. Constantin, D.L.Balabanski, D. Nichita, A. Spătaru, **A.N. State**, Int. J. Mass Spectrom., 478 (**2022**).

Listă participare școli internaționale și conferințe:

- Young Researcher & Young Engineer Days - ELI-NP 2021 Edition: "Characterization of gas jets using the Supersonic Test Unit at ELI-NP", 1st Prize, **Prezentare orală**.

- Carpathian Summer School of Physics 2021 (18.08.2021 - 27.08.2021) - "RIB formation with supersonic jets at ELI-NP" - **Prezentare orală**:

- EURORIB 2018 (27/05/2018 – 01/06/2018) - "Gas flow simulations in the cryogenic stopping cell for the IGISOL facility at ELI-NP" - **Poster**:

- Developments and solutions for the cryogenic stopping cells at LEB/FAIR and ELI-NP 26.04.2018, CFD simulations and gas system design for the HADO-CSC - **Prezentare orală**.

- ChETEC Training School in Nuclear Astrophysics Using Direct Methods (10.04.2018 - 21.04.2018).

- 15th Russbach School on Nuclear Astrophysics (18.03.2018 - 23.03.2018).

Listă stagii de pregătire:

- 01.10.2018 – 30.11.2018 – GSI Helmholtz Centre for Heavy Ion Research GmbH, FRS Ion Catcher.
- 20.01.2020 – 31.01.2020 – GSI Helmholtz Centre for Heavy Ion Research GmbH, FRS Ion Catcher.
- 01.11.2020 – 21.12.2020 – GSI Helmholtz Centre for Heavy Ion Research GmbH, FRS Ion Catcher.

Bibliografie

[1] T. Dickel et al. Conceptional design of a novel next-generation cryogenic stopping cell for the Low-Energy Branch of the Super-FRS. Nucl Instrum Methods Phys Res B 376 (2016) 216-220.

[2] D. L. Balabanski, F. Ibrahim, and et al. Photofission experiments at ELI-NP. Rom. Rep. Phys., 68, S621-S698, (2016).

[3] Hendrik Schatz and Klaus Balum. Nuclear masses and the origin of the elements. *Europhysics News*, 37(5):16–21, 2006.

[4] Y Blumenfeld, T Nilsson, and P Van Duppen. Facilities and methods for radioactive ion beam production. *Physica Scripta*, 2013(T152), 2013.

[5] M. Lindroos. Review of ISOL-type radioactive beam facilities. EPAC 2004, Lucerne, Switzerland.

[6] Symons T. J. M. et al. Observation of New Neutron-Rich Isotopes by Fragmentation of 205-MeV/Nucleon 40Ar Ions. Phys. Rev. Lett. 42, 40.

[7] John C. Cornell. Radioactive ion beam facilities in Europe: Current status and future development. GANIL, BP 55027, Caen 14076 cedex 5, France.

[8] Savard G. and Levand A.F. et al. The CARIBU gas catcher. Nucl Instrum Methods Phys Res B 376 (2016) 246-250.

[9] Gottberg A. Target materials for exotic ISOL beams. Nucl Instrum Methods Phys Res B 376 (2016) 8-15.

[10] Borge M.J.G. Highlights of the ISOLDE facility and the HIE-ISOLDE project. Nucl Instrum Methods Phys Res B 376 (2013) 408-412.

[11] Essabaa S. and Barre-Boscher N. et al. The radioactive beam facility ALTO. Nucl Instrum Methods Phys Res B 317 (2013) 212-222.

[12] W.R. Plaß, T. Dickel, and S. Purushothaman et al. The frs ion catcher – a facility for high-precision experiments with stopped projectile and fission fragments. Nucl Instrum Methods Phys Res B 317 (2013) 457–462.

[13] Constantin P. Design of the gas cell for the IGISOL facility at ELI-NP. Nucl Instrum Methods Phys Res B 397 (2017) 1-10.

[14] Purushothaman S. and et al. First experimental results of a cryogenic stopping cell with short-lived, heavy uranium fragments produced at 1000 MeV/u. Eur. Phys. Lett. 104 (2013) 42001.

[15] Aysto J. and et al. Development and applications of the IGISOL technique. Nucl Instrum Methods Phys Res A 693 (2001) 477-494.

[16] Nichita. D et al. Radioactive ion beam production at the Gamma Factory. Annalen der Physik (2021).

[17] Wada M. et al. Slow RI-beams from projectile fragment separators. Nucl Instrum Methods Phys Res B 204 (2003) 570-581.

[18] Ranjan M. New stopping cell capabilities: RF carpet performance at high gas density and cryogenic operation. EPL 96 (2011) 52001.

[19] COMSOL Multiphysics Reference Manual, version 5.1.

[20] J. D. Anderson. Modern Compressible Flow: With Historical Perspective, vol. 3, McGraw-Hill Professional, New York, 2002.

[21] A. N. State, H. Petrascu, and D. G. Ghita. Experimental set-up for high precision nuclear physics measurements at the IFIN-HH 9 MV Tandem Accelerator. Nucl. Inst. Meth. B, 499, 53-60 (2021).

[22] S. Purushothaman, M. P. Reiter, and E. Haettner et al. First experimental results of a cryogenic stopping cell with short-lived, heavy uranium fragments produced at 1000 MeV/u. EPL 104 (42001) (2013).

[23] Emma Haettner, Wolfgang R. Plaß, and Ulrich Czok et al. A versatile triple radiofrequency quadrupole system for cooling, mass separation and bunching of exotic nuclei. Nucl Instrum Methods Phys Rev B 880 (2018) 138–151.

[24] T. Dickel, W.R. Plaß, and A. Becker et al. A high-performance multiple-reflection time-of-flight mass spectrometer and isobar separator for the research with exotic nuclei. Nucl Instrum Methods Phys Res B 777 (2015) 172–188.

[25] Wolfgang R. Plaß, Timo Dickel, and Ulrich Czok et al. Isobar separation by time-of-flight mass spectrometry for low-energy radioactive ion beam facilities. Nucl Instrum Methods Phys Res B 226 (2008) 4560–4564.

[26] M. Ranjan, S. Purushothaman, and T. Dickel et al. New stopping cell capabilities: RF carpet performance at high gas density and cryogenic operation. EPL 96 (52001) (2011).

[27] A. N. State, S. Beck, and D. Amanbayev et al. The slow control system of the FRS Ion Catcher. Nucl. Inst. Meth. A, 1034, (2022).

[28] A. State, M. Merisanu, and D.L. Balabanski et al. Ion extraction from gas cells with supersonic jets formed in laval nozzles. UPB Sci. Bull. Ser. A Appl. Math. Phys. 82 (2020).