

1. Introducere

Spectroscopie de raze gamma in-fascicul. Reactii de captura radiativa de protoni si particule alpha

Masuratorile directe in Astrofizica Nucleara sunt foarte dificil de realizat datorita sectiunilor eficace mici implicate si necesita facilitati dedicate: acceleratoare de protoni sau particule alpha de intensitati foarte mari la energii joase si, daca este posibil, fond redus si sisteme speciale de detectie. Folosirea metodelor indirecte in Astrofizica Nucleara este motivata de doua probleme majore care apar in masuratorile directe: 1) multe reactii implica nuclee instabile, de viata scurta, greu sau imposibil de utilizat ca tinte sau fascicule si 2) sectiuni eficace foarte mici, in special atunci cand sunt implicate particule incarcate, datorita energiilor joase din stele si respingerii Coulomb dintre partenerii de reactie.

Reactiile de captura radiativa de protoni $X(p,\gamma)Y$ sunt o categorie speciala a reactiilor importante in productia de energie si nucleosinteza in stele. Deoarece implica particule incarcate, sectiunile eficace sunt foarte mici, si in cele mai multe dintre situatii sunt implicate nuclee instabile, deoarece acestea au loc in medii explozive. Ele sunt numite reactii de ardere a hidrogenului. În multe astfel de reactii de ardere a 1H , in special cele care au loc in nove clasice sau in X-Ray Bursts (XRB), cele mai importante contributii la ratele de reactie la temperaturi astrofizice sunt cele de captura rezonanta.

Activitatea experimentală desfasurata in mai multe laboratoare cu privire la reactii de captura directa (CD) a demonstrat ca acestea se/nu se potrivesc cu previziunile modelului teoretic de CD si ca acest tip de reactii nucleare poate fi un instrument spectroscopic bun [1], dar are nevoie de studiu suplimentar. In ultimii ani, colaborarea LUNA [2,3], un grup de la Institutul Weizmann, Israel [4] si un altul de la Institutul ATOMKI, Ungaria [5] au dovedit ca reactiile CD pot fi masurate pentru a obtine informatii de importanta majora pentru Astrofizica Nucleara, desi valorile absolute pentru sectiunile experimentale transversale masurate sunt inca o problema . In particular, putem folosi datele experimentale pentru a determina factorul astrofizic S si rata de reactie pentru captura radiativa a protonilor si a particulelor alfa, $X(\alpha/p,\gamma)Y$, la temperaturi stelare.

Grupul de Astrofizica Nucleara din IFIN-HH pregateste experimente de tip „masuratori directe de reactii de captura radiativa alfa $X(\alpha,\gamma)Y$ ” prin masuratori de raze gama prompte (in fascicul) si/sau de activare la energii accesibile la tandemronul de 3 MV. Vom incepe cu două reactii, una foarte bine studiata, dar inca nerezolvata la nivelul de precizie solicitat (3-5 %), importanta pentru ciclul ppII din Soare si una de importanta astrofizica datorita rolului pe care il joaca in etapa de ardere a Si in stele :

- 1) $^3He(^4He,\gamma)^7Be$
- 2) $^{45}Sc(p,\gamma)^{46}Ti$

Masuratorile de activitate remanenta se vor face in situ sau in salina Unirea, Slanic, Prahova. O instalatie mobila de masura va fi construita si instalata in salina. Vom colabora cu grupurile din institutele Weizmann, Israel, si ATOMKI Debrecen, Ungaria.

Programul de masuratori la acceleratorul de 3 MV din IFIN-HH va demara, in prima faza, cu testarea posibilitatilor tehnice ale instalatiei experimentale. Prin urmare, obiectivele acestei prime faze a proiectului sunt:

1. Teste de intensitate, stabilitate si rezolutie a fasciculelor de ${}^3\text{He}$ si ${}^4\text{He}$ la acceleratorul tandemron de 3 MV
2. Masuratori ${}^{16}\text{O} + {}^{12}\text{C}$ cu acceleratorul tandem de 9 MV pentru metoda THM (Trojan Horse Method)[6-8].

2. Instalatia experimentala - acceleratorul electrostatic HVEE Tandemron 3 MV

Tandemronul de 3 MV instalat recent la IFIN-HH este dedicat tehniciilor de analiza ce utilizeaza fascicule de ioni accelerati (Ion Beam Analysis – IBA): spectrometrie de retroimprastiere Rutherford (RBS), emisia de radiatii X indusa de particule incarcate (PIXE), reactii nucleare de rezonanta (NRA), etc. Principalele aplicatii ale metodelor mentionate anterior vizeaza caracterizarea diferitor tipuri de materiale folosite in domenii cum ar fi: optoelectronica, medicina, aplicatii aerospatiale, industria constructoare de masini, etc. Caracterizarea materialelor reprezinta, in cazul folosirii IBA: determinarea componozitiei elementale, a stoichiometriei, a grosimii straturilor subtiri (ordinul nm - sute de nm), etc. Fasciculele de ioni pot fi de asemenea utilizate pentru testarea rezistentei la radiatii a materialelor sau pentru implantari [9-11].

In Figura 1 se pot observa principalele componente ale acceleratorului tandem de 3 MV:

- injectorul “multi-functional” cu doua surse de ioni negativi: 1. sursa duoplasmatron (pentru tinte gazoase) identificata ca 358 in interfata acceleratorului si 2. sursa de tip “sputtering” (pentru tinte solide) identificata prin indicativul 860 [12-16]. Descrierea fenomenului de “sputter-are”, care in cazul sursei 860 se face cu fascicule de Cs, poate fi gasita in Ref.[17];
- sisteme de focalizare si dirijare a fasciculului: lentile Einzel [18], cuadrupoli electrostatici [19,20], steerer-i electrostatici [21];
- sisteme de monitorizare si masurare a curentului electric al fasciculului de ioni: Beam Profile Monitors (BPM) si cupe Faraday [22];
- magnet bipolar analizor (spectrometru de masa) din zona de energie joasa;
- generator de inalta tensiune (3 MV) de tip Cockcroft-Walton [23];
- mediu de “strippare” solid (foite subtiri de C) sau gazos (Ar);
- magnet bipolar comutator in zona de energie inalta;
- 3 linii de fascicul dedicate pentru: IBA (analiza cu ioni accelerati), IIB (implantari cu fascicule de ioni) si CSM (masuratori de sectiuni eficace).

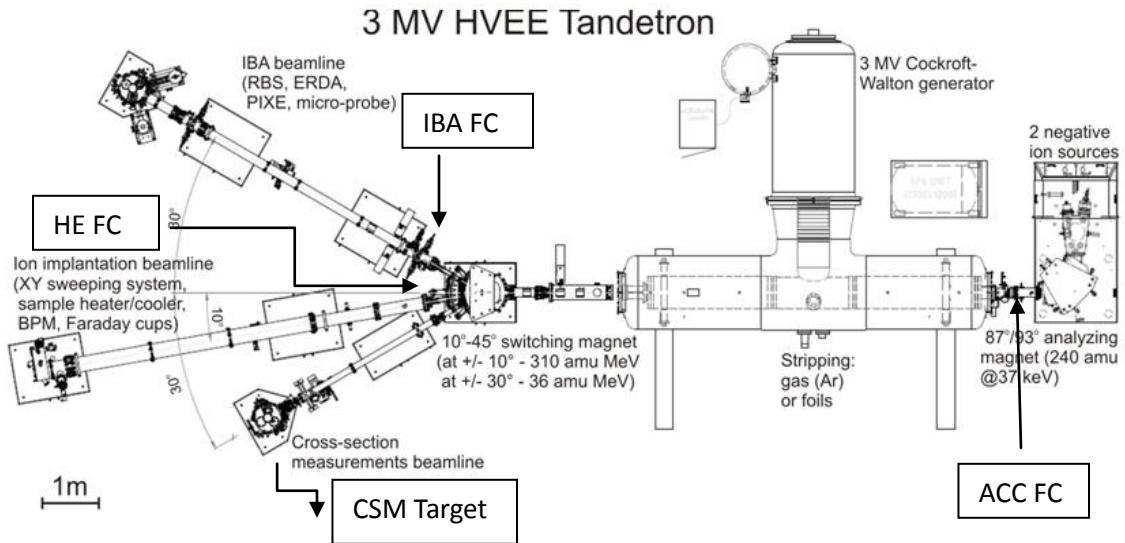


Fig. 1 Prezentare schematica a acceleratorului Tandetron de 3MV



Fig.2 Zona experimentala a acceleratorului Tandetron de 3MV

3. Rezultate experimentale preliminare

In urma masuratorilor la acceleratorul tandemron de 3 MV au fost efectuate studii privind intensitatea, stabilitatea si rezolutia fasciculelor de protoni, ^4He si carbon. Instalatia a fost preluata in stand-by, cu sistemul de vidare in functiune. S-a lucrat pe linia dedicata masuratorilor de sectiune eficace iar valorile de vid, monitorizate si inregistrate in sistemul de control al acceleratorului, sunt prezentate in Fig. 3.

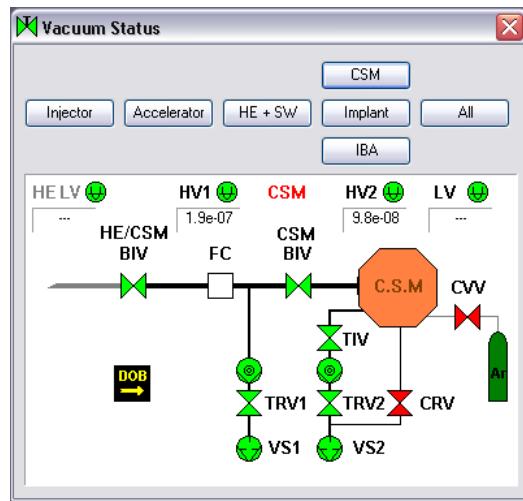


Fig. 3 Valorile nivelului de vid în sectorul HE (energie înalta) pentru linia de CSM

Prezentam valorile vidului inregistrate în zona de înaltă energie pe linia CSM :

- pentru HV1 (High Vacuum 1 - joja de vid inalt): $1,9 \cdot 10^{-7}$ mbar;
- pentru HV2 (High Vacuum 2- joja de vid inalt): $9,8 \cdot 10^{-8}$ mbar;

In cadrul procedurii de lucru, in etapa urmatoare s-a verificat calitatea hexaflorurii de sulf (SF_6) din interiorul tancului prin masurarea punctului de roua. Punctul de roua masurat este de -55°C , corespunzator cu o calitate foarte buna de izolare electrica a gazului din interiorul acceleratorului tandem.

Pentru ridicarea tensiunii de accelerare s-a pornit apoi in pasi de 50 kV/min pana la valoarea de 2,5 MV, s-a ridicat in pasi de 20 kV/min pina la valoarea de 2,9 MV, apoi s-a ridicat in pasi de 5 kV/min pana la valoarea de 3 MV.

In continuare s-a testat stabilitatea tensiunii maxime de 3MV pe terminal timp de 4 ore de functionare, iar din monitorizarea acesteia s-a determinat o valoare egala cu $\sim 10^{-4} \cdot \text{UT}$, unde UT reprezinta tensiunea electrica aplicata pe terminalul acceleratorului. Din Fig 4 se poate observa ca la valoarea maxima a tensiunii electrice pe terminal, aceasta este stabila avand fluctuatii in timp de ordinul sutelor de volti.

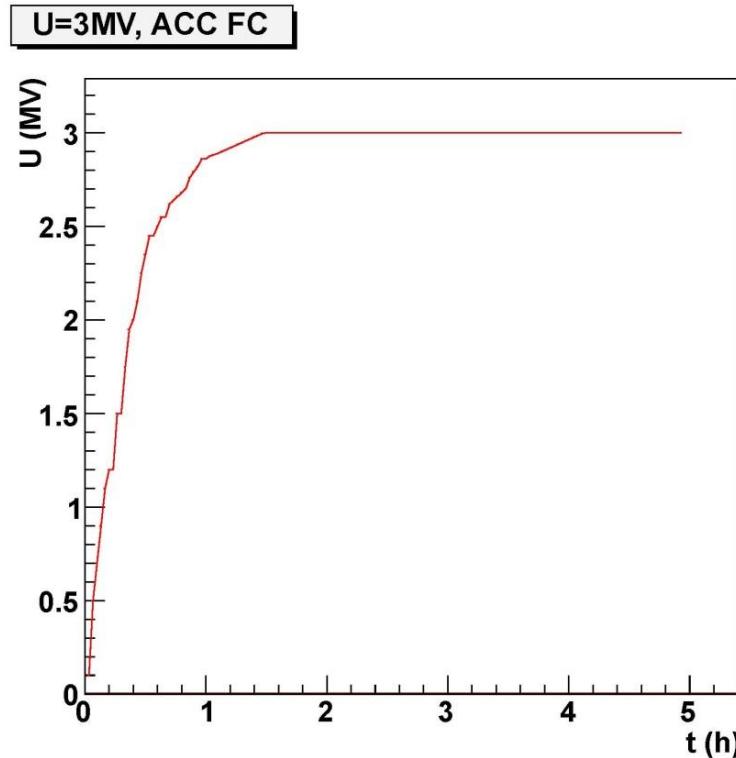


Fig. 4 Stabilitatea in timp a tensiunii pe terminal la valoarea maxima de 3 MV

In tabelul 1 sunt prezentate valori ale curentului de fascicul pe diversele cupe de masura obtinute in conditii normale de operare pentru fiecare specie de ioni accelerati (He, p, C).

Intensitatea curentului electric a fost masurata in urmatoarele cupe Faraday ale acceleratorului de 3 MV dispuse ca in Fig. 1:

-HE FC (High Energy Faraday Cup) = cupa Faraday pentru zona de energie inalta a acceleratorului

-ACC FC (Accelerator Faraday Cup) = cupa Faraday pentru zona de energie joasa

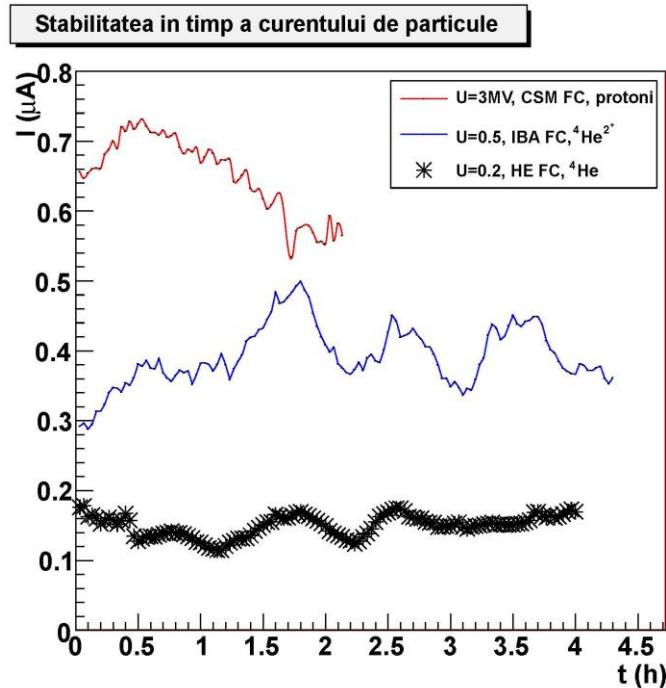
-CSM Target (Cross Section Measurements Target) = curentul masurat pe suportul de tinte din interiorul camerei de reactie de pe linia dedicata masuratorilor de sectiuni eficace

-IBA FC (Ion Beam Analysis Faraday Cup) = cupa Faraday de pe linia dedicata metodelor de analiza cu fascicule de ionii

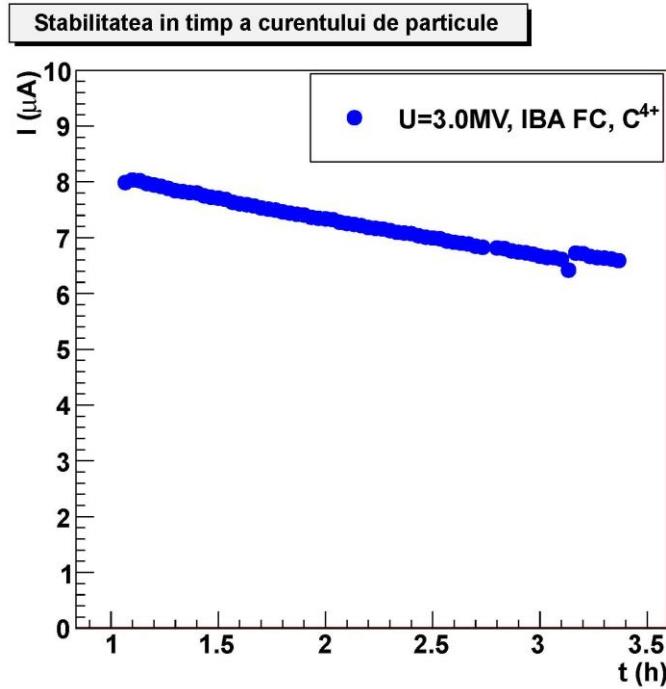
Curentii de fascicul pe cupele Faraday (nA)			
	ACC FC	HE FC (toate starile de sarcina)	CSM Target
(358)-He ²⁺ E=2.6 MeV	930	1040	1010
(358)-He ²⁺ E=4.5 MeV	1050	1300	978
(358)-He ²⁺ E=9 MeV	332	413	230
(860)-protoni E=3 MeV	950	630	650
(860)-protoni E=6 MeV	750	501	435
(860)-C ⁺⁴ E=10 MeV	65300	136000	34800
(860)-C ⁺⁴ E=15 MeV	16500	14800	7280

Tab 1. Curentii de fascicul masurati in cupele Faraday din sectorul de energie inalta si de pe linia dedicata masuratorilor de sectiune eficace

Procedura experimentala a continuat cu realizarea testelor de intensitate si stabilitate pentru fascicule de protoni, heliu si carbon la diverse valori ale tensiunii pe terminal. Pentru fasciculul de protoni s-a determinat intensitatea curentului de particule masurata pe suportul de tinte de pe linia CSM la o valoare de 3 MV a tensiunii pe terminal si s-a urmarit evolutia acesteia in timp si stabilitatea valorii tensiunii aplicate pe terminal. In Fig. 5 a) prezentam variatia intensitatii curentului de protoni intr-un interval de 2 ore de functionare a acceleratorului (linia rosie).



a)



b)

Fig 5. Intensitatea curentului de particule masurat in cupele Faraday ca functie de timp

In conditiile in care s-a masurat curentul de particule provenit din sursa ca avand valoarea $I_{ACC_FC} = 911$ nA la o tensiune pe terminal $U=3$ MV, iar din Fig. 5 a) se poate determina un maxim al curentului $I_{CSM_FC}=732$ nA, se poate calcula transmisia facand raportul celor doua valori ale curentului de protoni, tinand cont ca starea de sarcina a protonilor nu poate fi decat $q=+1$,determinandu-se o valoare de 80%.

In cazul fasciculului de 4He masuratorile s-au realizat pe de o parte, masurand intensitatea de particule in zona de energie inalta pentru toate starile de sarcina la o tensiune pe terminal $U=0.2$ MV, iar rezultatele sunt prezentate in Fig. 5 a) (punctele negre), iar pe de alta parte intensitatea de particule a fost masurata in cupa Faraday de pe linia IBA la o tensiune pe terminal de $U=0.5$ MV si pentru o stare de sarcina $q=2^+$ (linia albastra). Pentru fascicul de 4He , la o valoare a curentului din tinta $I_{ACC_FC} = 813$ nA se obtine o valoare a transmisiei pe portiunea de tensiune inalta de 22%.

O alta specie de ioni accelerati a fost reprezentata de ionii de C accelerati la o tensiune electrica pe terminal de 3.0 MV, pentru care s-a masurat intensitatea curentului de particule in cupa Faraday de pe linia dedicata metodelor de analiza cu fascicule de ioni (Fig. 5 b)). S-a calculate si s-a determinat transmisia pentru fiecare stare de sarcina, rezultate prezentate in tabelul 2. Variatia intensitatii curentului de particule pentru fiecare stare de sarcina in raport cu presiunea gazului de stripare din coloana de accelerare este prezentata in Tabelul 3 si in Fig. 6. Din Fig. 6 se observa ca pentru starea de sarcina 2^+ variatia intensitatii curentului de fascicul este descrescatoare in raport cu presiunea gazului de stripare. Acest lucru se explica prin faptul ca la valori mici ale presiunii se obtin valori mari ale curentului de fascicul.

Curentii de fascicul pe starile de sarcina ale ^{12}C			
$I_{ACC_FC}=9.6[\mu A]$			
Starea de sarcina	P_{Ar} [mbar]	IBA FC [μA]	Transmisia [%]
$^{12}C^{2+}$	8.9×10^{-3}	4.5	23.4
$^{12}C^{3+}$	2.8×10^{-2}	9.6	50
$^{12}C^{4+}$	5×10^{-2}	8.2	42.7
$^{12}C^{5+}$	6.3×10^{-2}	0.285	1.5
$^{12}C^{6+}$	6.2×10^{-2}	0.03	0.1

Tab 2. Curentii de fascicul masurati in cupa Faraday din sectorul IBA FC si transmisia pentru diverse stari de sarcina ale ^{12}C

P_{Ar} [mbar]	I_{IBA_FC} [μA]				
	$^{12}C^{2+}$	$^{12}C^{3+}$	$^{12}C^{4+}$	$^{12}C^{5+}$	$^{12}C^{6+}$
8.9×10^{-3}	3.27	3.2	1.05	0.005	0
2.8×10^{-2}	1.49	7	5.45	0.026	0.005
5×10^{-2}	0.96	6.21	6.58	0.042	0.013
6.2×10^{-2}	0.81	5.64	5.63	0.054	0.012

Tab 3. Currentii de fascicul masurati in cupa Faraday din sectorul IBA FC si presiunea gazului de stripare din coloana de accelerare pentru diverse stari de sarcina ale ^{12}C

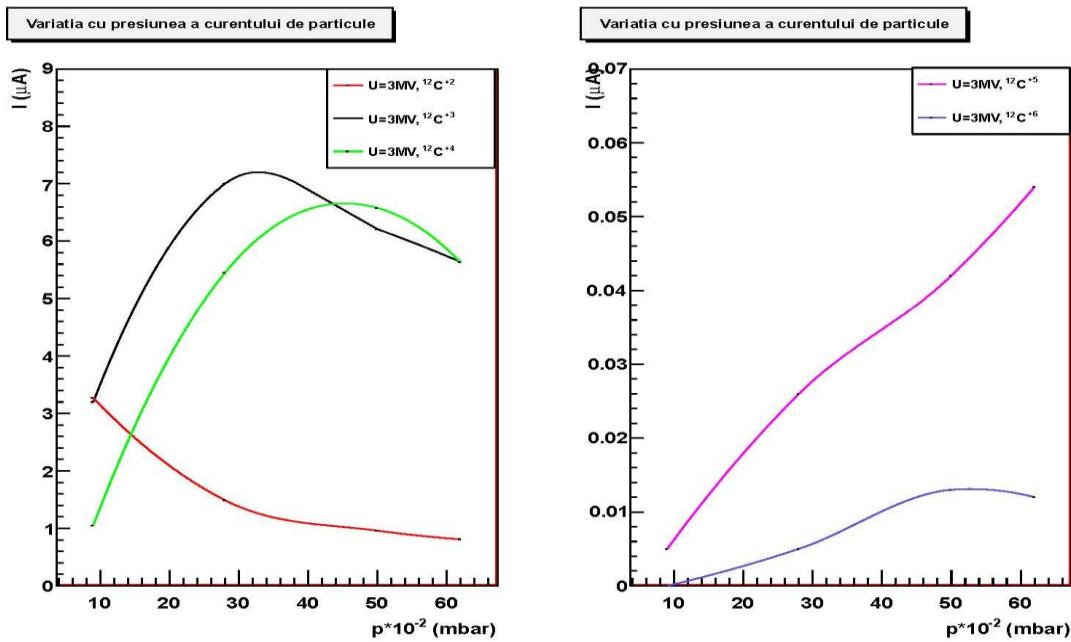


Fig. 6 Currentii de fascicul ca functie de presiunea gazului de stripare pentru diverse stari de sarcina ale ^{12}C

4. Concluzii

In urma analizei datelor experimentale obtinute cu acceleratorul tandemron de 3 MV se poate concluziona ca acesta se dovedeste a avea caracteristicile necesare pentru masuratori de Astrofizica Nucleara, si anume:

- permite tensiuni pe terminal intre 0.1-3.0 MV stabile in timp, care asigura o stabilitate a energiei incidente a fasciculelor folosite
- curentii furnizati sunt stabili in timp, ceea ce permite masuratori precise de activare pe perioada lunga
- intensitatile furnizate de accelerator sunt foarte bune pentru acest tip de masuratori

In particular, intensitatatile de ordinul a $10\text{ p}\mu\text{A}$ obtinute pentru $^{12}\text{C}^{4+}$, adica un ordin de marime mai mari decat cele obtinute la acceleratorul de la University of Notre Dame,SUA fac posibila realizarea experimentelor propuse in colaborare cu grupul de acolo.

In aceasta etapa de testare a posibilitatilor tehnice ale acceleratorului, masuratorile de stabilitate nu au fost facute la valori maxime ale intensitatii curentului electric care poate fi obtinut din sursa acceleratorului pentru a conserva integritatea gazului si a tuburilor de accelerare.

In legatura cu cel de-al doilea obiectiv al acestei faze de proiect, in cadrul colaborarii cu grupul din Catania condus de profesorul Claudio Spitaleri a fost depusa o propunere experimentalala la ultima intrunire a Comitetului PAC (Program Advisory Committee) al IFIN-HH. Propunerea a fost acceptata si vizeaza studiul reactiilor $^{12}\text{C}(^{12}\text{C},\alpha)^{20}\text{Ne}$ si $^{12}\text{C}(^{12}\text{C},\text{p})^{23}\text{Na}$ prin intermediul metodei indirecte a calului troian (THM) aplicata la $^{12}\text{C}(^{14}\text{N}, \alpha)^{20}\text{Ne}^2\text{H}$ si $^{12}\text{C}(^{14}\text{N}, \text{p}^{23}\text{Na})^2\text{H}$, procese de trei-corpuri in regim cinematic cvasi-free (QF), unde ^2H din nucleul TH, ^{14}N , este spectator la procesul de doua corpuri $^{12}\text{C} + ^{12}\text{C}$. THM este o metoda indirecta de a determina sectiunea reactiilor nucleare la energii mici, care adesea nu sunt accesibile in experimente directe. Grupul din Catania va veni sa realizeze masuratori experimentale in fascicul la acceleratorul de 9 MV din IFIN-HH in anul 2014 deoarece in aceasta etapa nu au putut dispune de un sistem goniometric care sa permita masurarea cu precizie inalta a unghiurilor si determinarea distributiilor unghiulare. In cadrul institutului se lucreaza la modificarea unei camere de reactie existente in care va fi montat acest sistem goniometric iar experimentul va avea loc in primavara anului 2014 cand este programat si timpul de fascicul.

BIBLIOGRAFIE

- [1] Parker, P. D., and Kavanagh, R. W., Phys. Rev. 131 (1963) 2578.
- [2] LUNA Collaboration, Phys. Rev. Lett. 97 (2006) 1225020.
- [3] LUNA Collaboration, Phys. Rev. C 75 (2007) 065803.
- [4] Nara Sing, B.S. et all., Phys. Rev. Lett. 93 (2004) 262503.
- [5] Brown, T. A. D. et all, Phys. Rev. C 76 (2007) 055801.
- [6] C. Spitaleri et al., Phys. Rev. C60, 055802 (1999).
- [7] M. La Cognata et al., Phys. Rev. C72, 065802 (2005) and references therein.

- [8] A. Tumino et al., Eur. Phys. J. A (2006) DOI : 10.1140/epja/i2006-08-038-1.
- [9] http://tandem.nipne.ro/~agata/grup/technical_specifications_3MV_Tandem.PDF
- [10] <http://www.aip.org/tip/INPHFA/vol-9/iss-3/p12.html>
- [11] <https://sites.google.com/a/lbl.gov/rbs-lab/ion-beam-analysis>
- [12] http://www.highvolteng.com/media/Leaflets/model_358__duoplasmatron_ion_source.pdf
- [13] <http://www.cmam.uam.es/en/facilities/accelerator/94>
- [14] <http://www.phy.duke.edu/courses/217/MottScatteringReport/node11.html>
- [15] http://www.highvolteng.com/media/Leaflets/model_860__negative_sputter_ion_source.pdf
- [16] http://isnap.nd.edu/html/research_SNICS.html
- [17] <http://pprco.tripod.com/SIMS/Theory.htm>
- [18] <http://simion.com/examples/einzel.html>
- [19] <http://www.pelletron.com/escomp.htm>
- [20] http://www.sbfisica.org.br/bjp/files/v34_1598.pdf
- [21] http://www.nuclear.lu.se/fileadmin/nuclear/beamtransport2011_02.pdf
- [22] http://en.wikipedia.org/wiki/Faraday_cup
- [23] http://en.wikipedia.org/wiki/Cockcroft%20%93Walton_generator

Consideram ca obiectivele acestei faze au fost integral indeplinite.

Responsabil Proiect

Dr. Livius Trache

Responsabil Etapa

Dr. Daniela Chesneanu