RAPORTARE STIINTIFICA

Proiect: PN-III-P1-1.1-PD-2019-0234

Titlu Proiect: “Studiu al mecanismelor de fuziune in reactii ion-ion la energii sub bariera pentru astrofizica nucleara (I2FUMEC)”

Raport Final Septembrie 2020 - August 2022

(pagina web: https://www.nipne.ro/proiecte/pn3/proiecte.html)

Introducere

Acesta este raportul final al proiectului I2FUMEC ce a inceput in Septembrie 2020 si s-a incheiat in August 2022. Datorita perioadei in care s-a desfasurat, gradul de realizare a obiectivele proiectului a fost afectat puternic de pandemia de COVID-19, pe doua planuri principale.

(i) Participarea la conferinte si workshop-uri pentru prezentarea rezultatelor a fost limitata datorita restrictiilor de organizare si calatorie si ulterior datorita prezentei continue al unui risc ridicat de imbolnavire.

(ii) Accesul la timp de fascicul a fost limitat nu numai de pandemie, dar si de cerintele de functionare ale acceleratorului tandetron – instalatie mare care necesita personal specializat prezent pentru functionarea sa la parametrii optimi.

Datorita acestor factori, unele componente ale etapelor au fost finalizate cu activitati din etapa succesiva, iar unele obiective au fost partial reformulate. Totusi, niciun obiectiv nu a ramas nerealizat in esenta sa stiintifica. Proiectul prezent a extins si a ridicat la un alt nivel cercetari anterioare [1] folosind metode probate [2], dar mult extinse acum la nuclee de timpi de viata scurti. Raportul curent contine sectiuni din rapoartele precedente care au fost ajustate sa includa si rezultate experimentale analizate ulterior. La acestea a fost adaugat raportul pentru perioada ianuarie 2022 - august 2022.

Obiectivele prevazute/realizate

Proiectul I2FUMEC a avut ca obiective stiintifice generale:

- Investigarea si dezvoltarea de tinte potrivite cerintelor experimentelor de astrofizica nucleara.
- Studierea de reactii de interes prin metoda activarii si spectroscopie gamma cu masurari la mina Slanic sau cu sistemul BEGA.
- Caracterizarea si determinarea limitelor noului sistem de detectie BEGA in ceea ce priveste reactiile si nucleele ce pot fi studiate.

Ca atare in decursul completarii acestui proiect, au fost realizate urmatoarele:

a) Au fost investigate diferite tipuri de tinte (continand ^{13}C, ^{16}O, ^{19}F si ^{nat}Li) pentru utilizare in masurarea reactiilor de interes proiectului.
b) Au fost selectate variantele de tinta cu potentialul cel mai mare si au fost testate in fascicul. Au fost determinate astfel tintele potrivite pentru experimentele aferente proiectului. Mai mult de-atat, rezultatele acestui studiu vor fi folositoare si in alte experimente viitoare atat la IFIN-HH cat si de catre colaboratorii ce utilizeaza metode experimentale asemanatoare. Detalii despre rezultatele punctelor a) si b) se regasesc mai jos, in restul raportului.
c) Au fost inaintate propuneri de fascicul la Program Advisory Committee (PAC) si au fost obtinute zile de experiment in limitele disponibilitatii facilitatilor si in contextul pandemiei de Covid-19.
d) Cu restrictiile impuse si explicate mai sus, au fost realizate masuratori pentru reactiile de interes folosind metoda activarii si spectroscopie gamma cu sistemul de detectie BEGA. Curbele de productie au fost determinate si vor fi la randul lor preluate de catre teoreticieni pentru calcule de fuziune. Detalii tehnice si grafice sunt prezentate in restul raportului.
e) Nu in ultimul rand, a fost imbunatatit si caracterizat sistemul de detectie BEGA. Performanta lui in masuratorile de izotopi cu timp de viata scurt din acest proiect se compara bine cu rezultatele obtinute la salina. De aceea, BEGA poate fi considerat un instrument important complementar salinei si reprezinta cea mai importanta realizare din acest proiect. Detalii sunt incluse mai jos in sectiunea etapei 3.
f) Au fost demarate colaborari internationale pe aceasta tema, cu grupuri de cercetare recunoscute, astfel incat tema se justifica de interes in viitorul apropiat.

Indicatori de rezultate

Articole

- „BEGA: a detection system for measuring the deactivation of short-lived radioactive nuclei from reactions of importance in nuclear astrophysics" pregatit pentru publicare intr-o revista internationala de specialitate (Nuclear Instruments and Methods A).
- „Horizons: Nuclear Astrophysics in the 2020s and Beyond", H. Schatz et al, acceptat pentru publicare in Journal of Physics G. (articol adiacent proiectului – subiectul fiind mentionat ca una dintre tematicele importante de studiat pentru astrofizica nucleara – la care membrii proiectului sunt co-autori)

Conferinte

Trebuie mentionat ca rezultatele descrise mai sus au fost diseminate prin 2 prezentari cu titlul „Study of ion-ion fusion mechanisms at sub-barrier energies for nuclear astrophysics" tinute de PD la 2 conferinte internationale:

- Key Reactions in Nuclear Astrophysics (KRINA), Virtual Workshop organizat la ECT* Trento, Italia, in 22-23 Iunie 2021 (numai online) - acestea prezentarea a avut caracter de lectie invitata intr-o companie foarte selecta de lectori. ECT* Trento este

una dintre institutiile europene de mare prestigiu, unde evenimentele stiintifice sunt aprobate dupa o serioasa evaluare de catre un Scientific Board international.

- a 29-a Carpathian Summer School of Physics 2020 (in 2021), Sinaia , Romania (august 2021). Nu de mica importanta in anul trecut a fost sarcina mea de Secretar Stiintific al acestei editii CSSP (https://www.nipne.ro/events/conferences/cssp20/). A fost printre primele si una dintre putinele evenimente stiintifice internationale cu prezenta in-persoana dupa aproape 1.5 ani de intrerupere. Caracterizarea „cu mare succes" o imprumut din declaratiile unanime ale celor 81 de participanti, intre care multi tineri, si a sponsorului principal, proiectul european ENSAR2.

O a treia prezentare, cu titlul „Nuclear astrophysics studies at NIPNE" a fost tinuta de Mentor la conferinta internationala, incluzand rezultatele prezente:

- 11th European Summer School on Experimental Nuclear Astrophysics (ESSENA), Catania, Italia in 12-19 Iunie 2022.

Noi colaborări

- Colaborare **internațională** cu INFN-LNS, Catania, Italia.
  Rezultatele obtinute in acest proiect au avut un impact in comunitatea de astrofizica nucleara care ne-a permis sa extindem tema de baza a proiectului – studiul fuziunii ion-ion la energii sub- Coulombiene – printr-o **colaborare internationala in ChETEC-INFRA**, un proiect european de infrastructura de larga raspandere si prestigiu (https://www.chetec-infra.eu). Scopul este de organiza impreuna urmatoarele experimente pentru masurarea de reactii ion-ion. Un prim experiment a fost deja propus si acceptat in cadrul ChETEC-INFRA pentru luna octombrie 2022 si va fi finantat din acesta proiect European. Experimentul va avea loc la IFIN-HH si va utiliza acceleratorul de 3 MV si sistemul de detectie BEGA. Colaborarea include tot sub umbrela proiectului european ChETEC-INFRA si realizarea de tinte pentru experimente viitoare de astrofizica nucleara. Mai multe detalii pot fi gasite mai jos in sectiunea Etapei 3.
- Rezultatele noi au permis includerea grupului in „the white paper" (= planurile) unei largi colaborari internationale cu acoperire globala condusa de Joint Institute for Nuclear Astrophysics (JINA) din SUA (articolul citat, H. Schatz et al. JPG 2022).

Dezvoltare pe partea de instrumentație

- Imbunatatirea si caracterizarea sistemului de detectie BEGA (Beta-Gamma coincidence based system)

In ansamblu, obiectivele proiectului au fost indeplinite in esenta lor stiintifica, iar indicatorii de realizare asumați au fost realizați.

Rezultate detaliate

Etapa 1: Investigarea si dezvoltarea de tinte potrivite cerintelor experimentale.

a) $^{13}C + ^{16}O$

Au fost investigate 2 moduri de a produce reactia $^{13}C + ^{16}O$: (1) folosind fascicul de ^{13}C pe o tinta de ^{16}O sau invers, (2) folosind fascicul de ^{16}O pe o tinta de ^{13}C.

Pentru metoda (1), fasciculul de ^{13}C este un fascicul standard produs la Tandemul de 3 MV si a putut fi generat cu intensitati de pana la 1 pμA, in functie de energia ceruta. Pentru reactia de interes, la energii (in laborator) mai mari de ≈12 MeV intensitatea a fost limitata de tensiunea acceptata pe terminalul tandemului. In acest caz, unde sectiunea de reactie a fost mica si intensitatea nu a fost suficienta, au fost necesare cate 2 masuratori la aceeasi energie.

Datorita metodei de masurare prin activare-dezactivare, tinta de oxigen trebuia sa fie solida. Au fost investigati diferiti oxizi, luand in considerare cerintele experimentului. Elementul chimic cuplat cu oxigenul trebuie sa aiba masa indeajuns de mare pentru ca bariera Coulombiana sa previna o reactie cu carbonul din fascicul. La fel de importanta este si stoichiometria compusului, fiind preferabil ca oxidul sa contina cat mai multi atomi de oxigen. De-asemenea, este preferabil ca energiile razelor gama emise prompt in timpul reactiei sa nu se suprapuna cu energiile din reactia de interes. Datorita faptului ca acesti oxizi se gasesc predominant sub forma de pulbere au fost luati in considerare si factori de geometrie, in special grosimea si diametrul. Grosimea maxima permisa de sistemul de detectie BEGA este 2 mm. Diametrul minim necesar datorita intensitatii fasciculului este 1 cm (la energii mari, intensitatea este foarte mica si nu ne permitem sa o reducem si mai mult prin colimarea fasciculului).

Dintre materialele deja existente in laborator, a fost ales oxidul de ceriu, CeO_2. Ceriul are numarul de masa A=140 si Z=58, iar oxidul are 2 atomi de oxigen. Tintele au fost facute prin presare la 24 de tone, sub forma de pastile cu diametrul de 1.5-2 cm si grosimea de 1 mm (Figura 1.1). Datorita fragilitatii, fiecare pastila a fost de-asemenea lipita pe un suport (backing) de aluminiu (gros de 1 mm) pentru manevrare usoara si fara deteriorarea tintei.

O tinta a fost testata in fascicul la diferite energii si intensitati (Figura 1.2). S-a constatat ca la curenti de fascicul mai mari de 100 pnA, tinta emana particule in cantitati care previn mentinerea vidului pe linie (la nivelul de 10^{-6} mbar asa cum este necesar). Este clar ca aceasta problema va fi prezenta indiferent de pulberea de oxid folosita. De aceea s-a incercat metoda (2) mentionata mai sus.

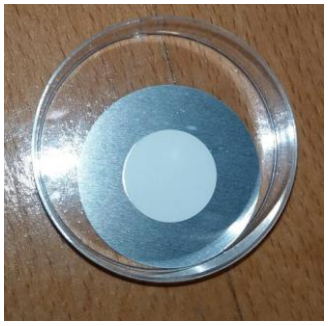


Figura 1.1. Pastila de CeO2 lipita pe backing de Aluminiu.

Figura 1.2. Tinta de CeO2 fixata pe flansa dupa testare in fascicul.

Fasciculul de ^{16}O este de-asemenea un fasciul standard la Tandemul de 3 MV si poate fi produs cu intensitati de pana la 3 pμA. Utilizarea unei tinte izotopice din ^{13}C implica anumite dificultati. Carbon-13 se gaseste de-asemenea sub forma de pulbere. Pastilele obtinute au aceeasi limita (explicata mai sus) ca si cele de CeO_2. Ca atare, s-a incercat obtinearea unei tinte prin depunere. Pentru metoda tintei groase este necesara o grosime de minim 7 μm (pentru ca fasciculul de oxigen sa fie oprit in tinta la oricare din energiile de interes), grosime greu de obtinut prin procesul de depunere. Din acest motiv, a fost schimbata metoda si a fost produsa o tinta subtire de ≈130 nm. Carbonul-13 a fost depus pe un backing de Tantal (Figura 1.3) pentru manevrare usoara, fara ca tinta sa se rupa in transportul la sistemul de detectie post-activare.

Tinta a fost testata in fascicul la diferite energii si intensitati. S-a constatat ca la curenti mai mari de 1 pμA, tinta se deformeaza si capata o culoare metalica (Figura 1.4). In urma studierii la microscop, a fost trasa concluzia ca materialul de Carbon-13 s-a evaporat datorita temperaturii ridicate a backingului de Tantal si in ciuda sistemului de racire montat in flansa.

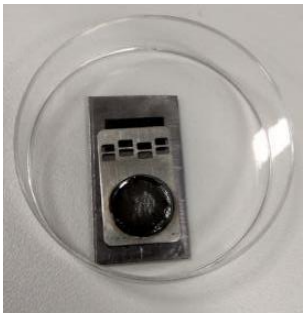


Figura 1.3. Tinta de ^{13}C depusa pe backing de Tantal.

Figura 1.4. Tinta de 13C dupa iradiere cu fascicul de ^{16}O la ≈1.1 pμA.

b) $^{13}C + {}^{19}F$

Pentru reactia $^{13}C + {}^{19}F$, au fost luate in considerare rezultatele prezentate in sectiunea precedenta si au fost testate numai tinte de Fluor. Au fost folosite 2 tipuri de pulberi: fluorura de litiu (LiF) si fluorura de bariu (BaF). Ulterior au fost de-asemenea achizitionate prin proiect si testate si tinte tip cristal de LiF.

Pulberea de LiF a fost presata la 10 tone in tinte tip pastila cu diametrul de 1.3 cm. In decursul acestei proceduri s-a constat ca pastile fara defecte sunt foarte dificil de realizat, fapt care este in defavoarea acestui tip de material. Testarea in fascicul s-a facut cu ^{13}C la o intensitate de maxim ~50 pnA. Ca si la CeO_2, degazarea este o problema semnificativa care afecteaza durata de iradiere si curentul maxim la care se poate ajunge. Figurile 1.5 si 1.6 arata o astfel de tinta de LiF dupa ce a fost iradiata.

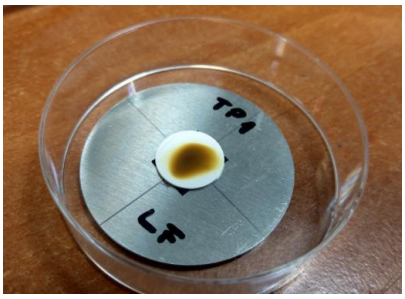


Figure 1.5. Pastila de LiF dupa iradiere la ~ 50 pnA timp de ~1.5 hrs.

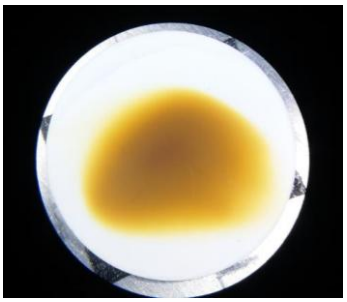


Figure 1.6. Aceeasi pastila ca in stanga, vazuta la microscop 8x.

Pentru a combate problema degazarii si a fragilitatii pastilelor, a fost incercata varianta de tip cristal de LiF. Prima problema aici a fost geometria disponibila la furnizor. Initial se putea alege un diametru de 1 cm pentru tinte. La momentul finalizarii comenzii nu a fost disponibil decat varianta cu diametrul de 0.5 cm. Pentru testare acestea au fost suficiente, dar pentru utilizare in experiment, aceasta geometrie este din pacate pre mica. Aceste cristale au fost testate cu fasicule de ^{13}C de intensitati de peste 1 pμA. Un exemplu de o astfel de tinta fotografiata la microscop dupa iradiere este aratat in Figura 1.7.

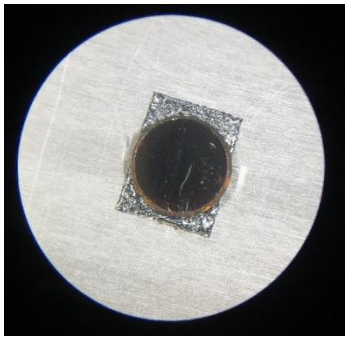


Figura 1.7. Cristal de LiF fotografiat la microscop 8x, dupa iradiaere.

In urma acestor masuratori s-a constatat ca, datorita componentei de Li, la iradieri cu intensitati asa mari (necesare pentru masuratori la energii joase) se produc activitati periculoase pentru manevrarea imediata de catre experimentator. Chiar si la activitati mai mici, apare problema de raze gamma care contamineaza regiunea energetica de interes si o rata de productie de neutroni periculoasa pentru detectorii de Germaniu.

Datorita acestor factori, a fost incercata si varianta de fluorura cu bariu, unde numarul de protoni al Ba creeaza o bariera Coulombiana indeajuns de mare ca sa reduca semnificativ contaminantii. Pulberea de BaF_2 a fost de-asemenea presata la 10 tone in pastile cu diametrul de 1.3 cm. Desi presarea s-a facut fara probleme si tintele produse au fost in aparenta fara defecte, la manevrare s-au deteriorat mult mai repede decat cele de LiF. Figura 1.8 arata un exemplu de tinta de BaF dupa iradiere cu ^{13}C la ~40 pnA.

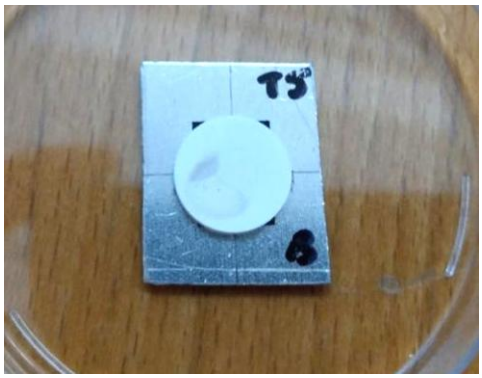


Figura 1.8. Tinta de BaF_2 iradiata la ~ 40 pnA timp de ~30 mins.

Pentru combatarea fragilitatii pastilelor, s-a incercat ulterior achizitia de cristale BaF_2 dar nu s-a putut realiza inainte de finalizarea proiectului, deoarece furnizorul a prelungit termenul de livrare cu 4 luni.

Concluzii

Au fost atinse obiectivele stiintifice propuse pentru Etapa 1, specificate mai sus. Au fost obtinute si testate materiale pentru reactiile de interes. In urma acestor teste, a fost decis ca pastilele de CeO_2 pot fi utilizate pentru masuratorile de sectiune ale reactiei $^{13}C + ^{16}O$. Pentru reactia $^{13}C + ^{19}F$, se poate folosi cu restrictii pulberea de BaF_2, dar cristalele ar fi preferabile.

Obiectivul al treilea – propunerea de proiect la PAC - nu s-a putut realiza in 2020 din motive obiective si a fost impins in anul viitor: datorita pandemiei de Covid-19, nu au fost primite aplicatii de propuneri de experimente pentru anul 2021 si nu s-a tinut sesiunea de prezentari in fata comitetului de acordare de timp de fascicul (PAC). El a fost atins in sesiunea urmatoare PAC (aceasta informatie se poate regasi si pe pagina tandemului https://tandem.nipne.ro/call_for_proposals.php).

Etapa 2: Studierea reactiilor de interes prin metoda activarii si spectroscopie gamma cu masurari la mina Slanic sau cu sistemul BEGA

Inainte de a intra in detaliu, trebuie mentionat pe scurt ca punctele (i) si (ii) au fost afectate in procent de 90% de pandemia de Covid-19. Asa cum a fost mentionat si la Etapa 1, in anul 2020 nu a mai avut loc sesiunea PAC pentru obtinerea de timp de fascicul pe anul 2021. Singurele experimente organizate in acest an au fost cele amanate in 2020 datorita pandemiei. Aceasta decalare a durat pana in Mai 2021, dupa care acceleratoarele au lucrat „in regim de avarie” pentru a limita riscul de infectare la locul de munca.

Concret, datorita acestei lipse de timp de fascicul nu s-a putut studia reactia $^{13}C+^{19}F$.

(i) ***Masuratori prompte in fascicul pentru reactia $^{13}C + ^{16}O$ („online”)***

Descrierea stiintifica si tehnica

Testarea tintelor discutate in Etapa precedenta si experimentele de investigare a reactiei de $^{13}C + ^{16}O$ au avut loc la Tandetronul de 3 MV de la IFIN-HH, pe linia numita „Cross-Section Measurement” (CSM) (Figura 2.1).

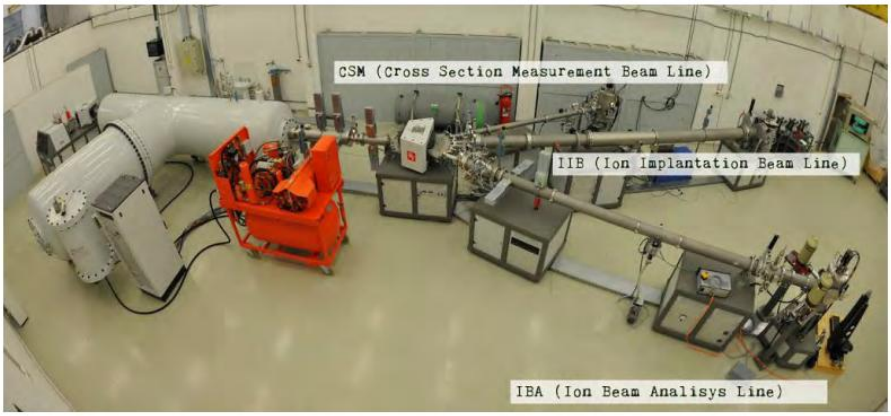


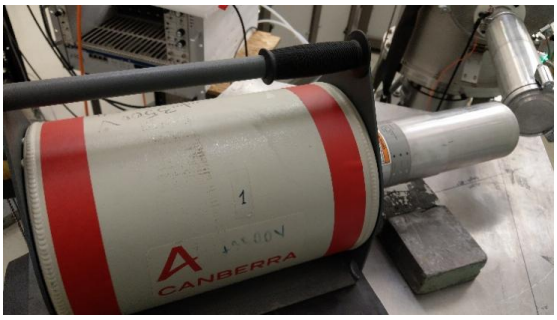
Figura 2.1. Tandetronul de 3 MV de la IFIN-HH [3].

Fasciculul produs a fost ^{13}C la energiile si intensitatile listate in Tabelul 1. Deoarece scopul experimentului a fost testarea tintei, s-a dorit un interval energetic mare si atunci pasii energetici intre masuratori au fost de-asemenea mari. Tinta folosita a fost CeO_2, sub forma de pulbere presata intr-o pastila de ~2 cm in diametru si ~1 mm grosime lipita pe un backing de Aluminiu (Figura 1.1).

Masuratoare	1	2	3	4	5	6	7	8
E_{LAB} [MeV]	15.6	15.0	14.4	13.2	12.0	10.8	9.6	9.0
E_{CM} [MeV]	8.61	8.28	7.94	7.28	6.62	5.96	5.30	4.97
I_{tinta} [nA]	60	50	50	25	400	500	600	800

Tabelul 2.1. Energiile fasciculului (in sistemele Laborator si Centru de Masa) si intensitățile folosite.

Spectrele de gamma prompte au fost obtinute cu un detector de tip High-Purity Germanium (HPGe) cu eficienta relativa de 65%. Acest detector a fost plasat la capatul liniei CSM, la un unghi de ~55° pentru a reduce efectele distributiilor unghiulare, si ecranat cu un castel din caramizi de plumb pentru a reduce radiatia de fond (Figura 2.2).



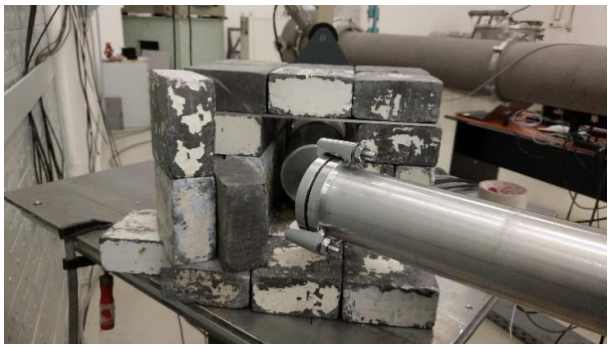


Figura 2.2. Detectorul HPGe plasat la capatul liniei CSM ne-ecranat (stanga) si cu castel din caramizi de plumb (dreapta).

Detectorul a fost folosit sub o tensiune de +3.5 kV, iar semnalele au fost prelucrate cu un lant standard de module electronice: pre-amplificator, amplificator si convertor analog-la-digital. Datele au fost inregistrate prin softul dedicat de spectroscopie gamma MAESTRO [4]. Calibrarea in energie si eficienta a fost facuta cu 3 surse etalonate: ^{137}Cs, ^{60}Co si ^{152}Eu, si se poate regasi in Figura 2.3.

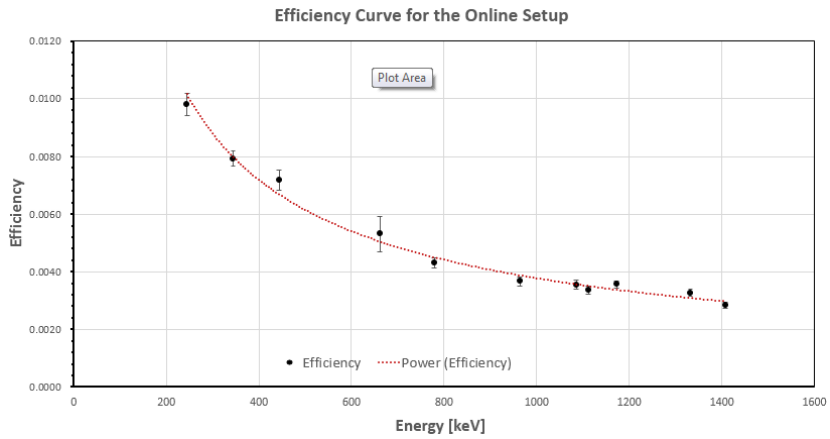


Figura 2.3. Curba de eficienta pentru detectorul de „online”.

Canalele de reactie care se deschid cand energia fasciculului este E_{LAB} = 15.6 MeV sunt listate in Tabelul 2. De interes pentru metoda de activare sunt cele care produc nuclee instabile: ^{24}Na ($T_{½}$ ≈ 15 h), ^{27}Mg ($T_{½}$ ≈ 9.5 m) si ^{28}Al ($T_{½}$ ≈ 2.2 m). Tintele de CeO_2 au fost irradiate 20-30 min, timp in care a fost inregistrat spectrul de gamma prompt.

Figura 2.4 arata un spectru de gamme prompte obtinut la energia E_{LAB} = 15.6 MeV, cu cateva varfuri de interes marcate ca exemplu.

Asa cum se poate vedea in spectru, pentru canalele de interes, sectiunile sunt foarte mici si liniile corespunzatoare au statistica putina. Pentru masuratorile la energii mai mici de 12 MeV, aceste linii nu au mai putut fi deosebite de fond. Pentru celelalte masuratori, au fost calculate yield-urile, Y(E), prin raportul dintre numarul de produsi de reactie, N_r, si numarul de proiectile, N_p.

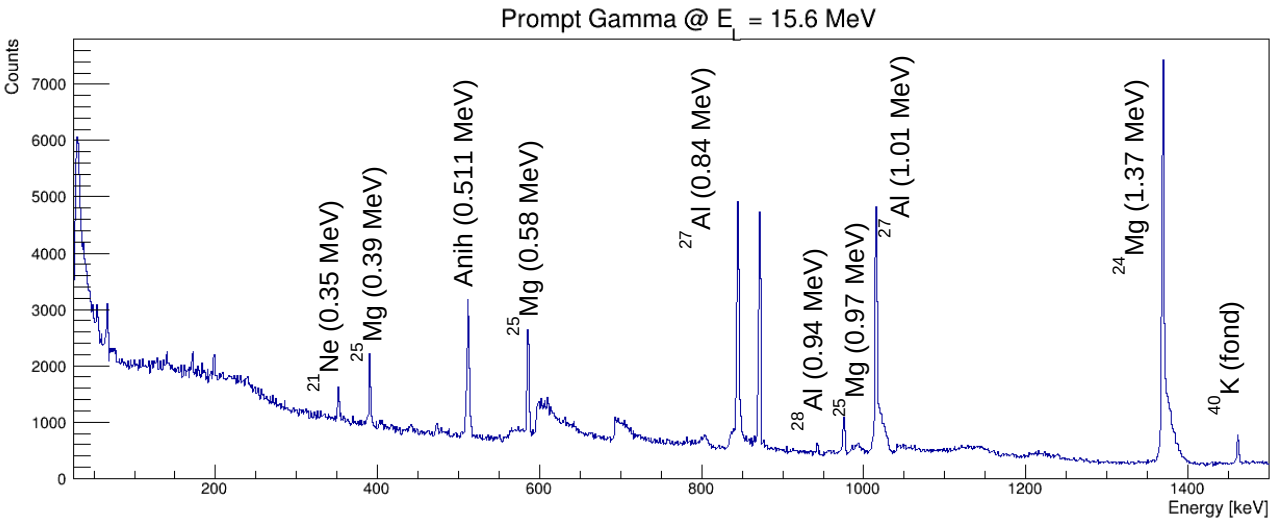
$$Y(E) = \frac{N_r}{N_p} = \frac{N_\gamma}{\varepsilon_\gamma * I_\gamma} \frac{e*q}{Q},$$

unde N_γ reprezinta numarul de gamme in varful de interes, ε_γ este eficienta detectorului la energia gammei, I_γ este intensitatea gammei, Q este intensitatea fasciculului (in C), e este sarcina electronului iar q este starea de sarcina a fasciculului.

Reaction Q-values for $^{16}O + ^{13}C$ (E_{lab}=15.6 MeV)

Reaction Products	Q-value (keV)	Threshold (keV)
$^{29}Si+\gamma$	20283.0859 *0.0006*	0 *0*
$^{28}Si+n$	11809.4847 *0.0007*	0 *0*
$^{25}Mg+\alpha$	9155.87 *0.05*	0 *0*
$^{28}Al+p$	7949.68 *0.08*	0 *0*
$^{27}Al+d$	2449.15 *0.05*	0 *0*
$^{24}Mg+n+\alpha$	1825.344 *0.013*	0 *0*
$^{27}Al+n+p$	224.58 *0.05*	0 *0*
$^{16}O+n+3\alpha$	0 *0*	0 *0*
$^{26}Mg+^{3}He$	-328.67 *0.03*	595.87 *0.05*
$^{21}Ne+2\alpha$	-730.05 *0.04*	1323.57 *0.07*
$^{27}Mg+2p$	-1603.32 *0.05*	2906.80 *0.09*
$^{24}Na+p+\alpha$	-2907.978 *0.017*	5272.12 *0.03*
$^{26}Al+t$	-4351.65 *0.07*	7889.48 *0.12*
$^{27}Si+2n$	-5370.12 *0.11*	9735.96 *0.19*
$^{26}Mg+p+d$	-5822.14 *0.03*	10555.46 *0.05*
$^{20}Ne+n+2\alpha$	-7491.2103 *0.0017*	13581.454 *0.003*
$^{23}Na+d+\alpha$	-7642.7774 *0.0018*	13856.243 *0.003*
$^{26}Mg+n+2p$	-8046.71 *0.03*	14588.57 *0.05*
$^{17}O+3\alpha$	-8077.9758 *0.0007*	14645.2518 *0.0013*

Tabelul 2.2. Lista canalelor de reactie ce se deschid cand E_{LAB} = 15.6 MeV si valorile Q-value corespunzatoare.



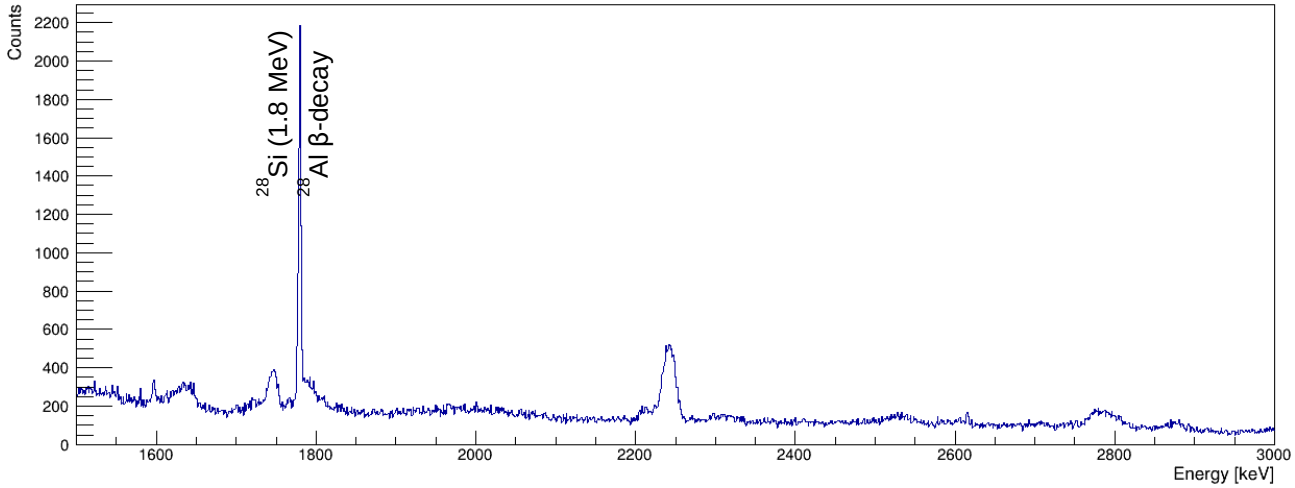


Figura 2.4. Spectru de gamma prompt produs in reactia ^{16}O + ^{13}C (E_{LAB} = 15.6 MeV).

Rezultatele preliminare ale masuratorilor online sunt prezentate in Figura 2.5.

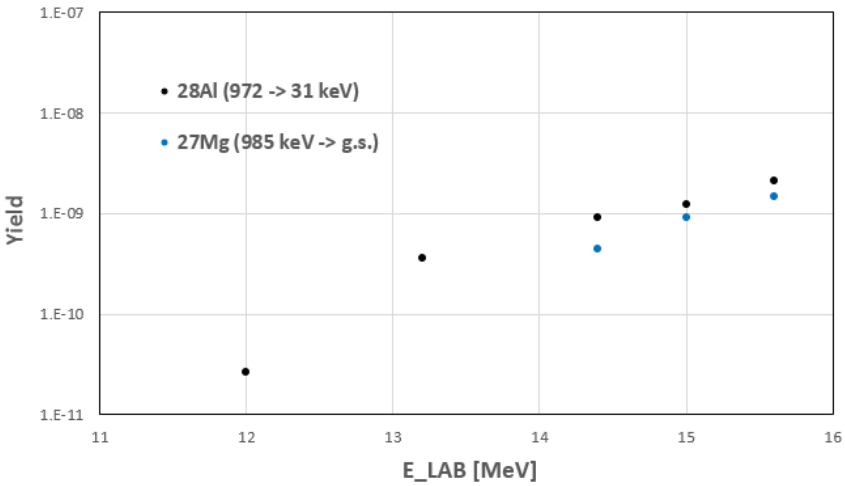


Figura 2.5. Grafic de yield-uri „online" in functie de energie pentru canalele ^{28}Al+p si ^{27}Mg+2p

(ii) ***Masuratori de dezactivare in fascicul pentru reactia ^{13}C + ^{16}O („offline")***

Descrierea stiintifica si tehnica

Tintele de CeO_2 iradiate cu fascicul de ^{13}C au fost deasemenea masurate „offline". Concret, la finalul iradierii fiecare tinta a fost scoasa din fascicul si mutata in sistemul de detectie BEGA pentru obtinerea spectrelor gamma de dezactivare. Sistemul BEGA (Beta-Gamma coincidence system) este un sistem proiectat si construit de grupul nostru in colaborare cu reprezentantul Canberra in Romania, si este dedicat masuratorilor de dezactivare cu fond redus prin coincidente beta-gamma. Schema sa este aratata in Figura 2.6.

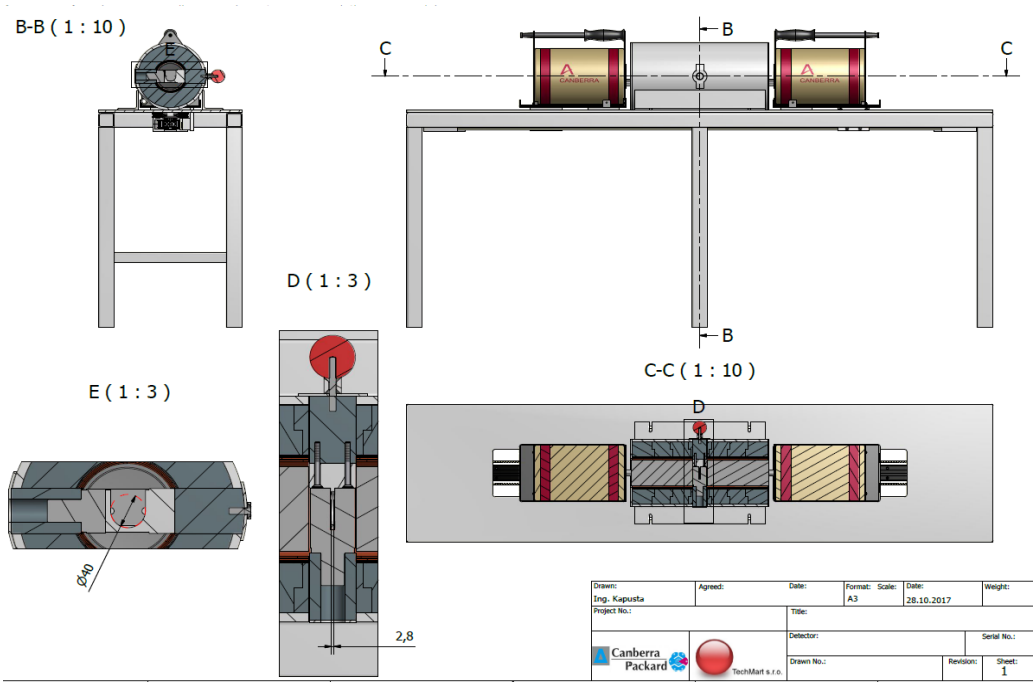


Figura 2.6. Schema de proiect a sistemului BEGA.

BEGA are un concept simplu:

- un scintillator de plastic (20 x 20 x 2 mm^3) cu un spatiu in mijloc unde tinta activata poate fi introdusa; forma cilindrica asigura o eficienta geometrica de ~4π;
- 2 detectori HPGe, unul de fiecare parte a tintei;
- ecran cilindric de plumb ce inconjoara toti detectorii;
- o masa dedicata cu sistem de miscare simultana a HPGe pentru o geometrie usor de reprodus si calibrari mai rapide.

Acest sistem a fost construit cu scopul de a fi folosit pentru masuratori de dezactivare a nucleelor cu timp de viata scurt ($T_{½}$ < 1 h), care nu pot fi transportate la mina Slanic. In lipsa ecranarii naturale cu sare, ca in salina, cu BEGA se reduce fondul prin *ecranul de plumb* special proiectat si construit si prin *coincidente beta-gamma*. Sistemul *BEGA a fost reglat si caracterizat* pentru prezentele masuratori, inainte de obtinerea timpului de fascicul. Caracteristicile lui principale sunt raportate mai jos, nu si analiza completa a datelor experimentale obtinute, care au necesitat o prelucrare mai complexa. Semnalele de energie de la detectorii HPGe au fost prelucrate cu acelasi lant standard de module electronice.

Schema electronica de coincidenta este prezentata in Figura 2.7 si a utilizat un modul tip TAC (Convertor Timp-la-Analog). Poarta generata de TAC a putut fi potrivita in timp pentru energia gamma de la HPGe. A fost cumparat prin proiect un modul amplificare intarzieri (Ortec 427A – Delay Amplifier, inclus in raportul financiar) pentru a pune porti pe ambele semnale.

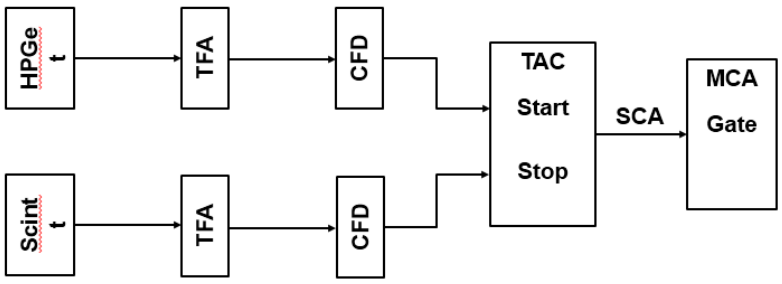


Figura 2.7. Schema electronica de coincidenta.

Inainte de experiment, detectorii HPGe au fost adusi la geometria „0” (~5 cm distanta intre tinta si cristalul de germaniu) si calibrati in energie si eficienta cu aceleasi surse etalonate, mentionate mai sus: ^{137}Cs, ^{60}Co si ^{152}Eu. Curbele de eficienta sunt prezentate in Figura 2.8.

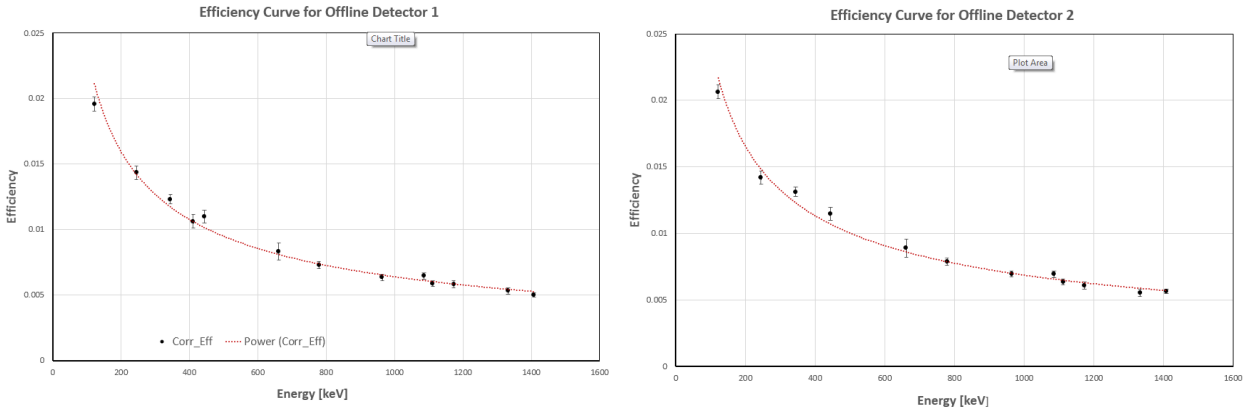


Figura 2.8. Curbe de eficienta pentru cei 2 detectori HPGe din BEGA („offline”).

Spectre de dezintegrare au fost inregistrate cu diferiti timpi de masurare: 5, 10 si 15 minute, pentru a lua in considerare timpii de injumatatire diferiti al celor doua nuclee de interes, ^{27}Mg si ^{28}Al.

Un spectru de dezintegrare este prezentat in Figura 2.9, obtinut in urma iradierii de la E_{LAB} = 15.6 MeV. In Figura 2.10 este prezentat un spectru de la acelasi detector, dar filtrat cu conditia de coincidenta beta-gamma.

Dupa cum se vede, fondul a fost redus semnificativ, iar eficienta de coincidenta obtinuta a fost ≈35%. In baza acestor spectre au fost calculate yield-urile de la cele 8 masuratori offline. *Rezultate preliminare* sunt prezentate in Figura 2.11.

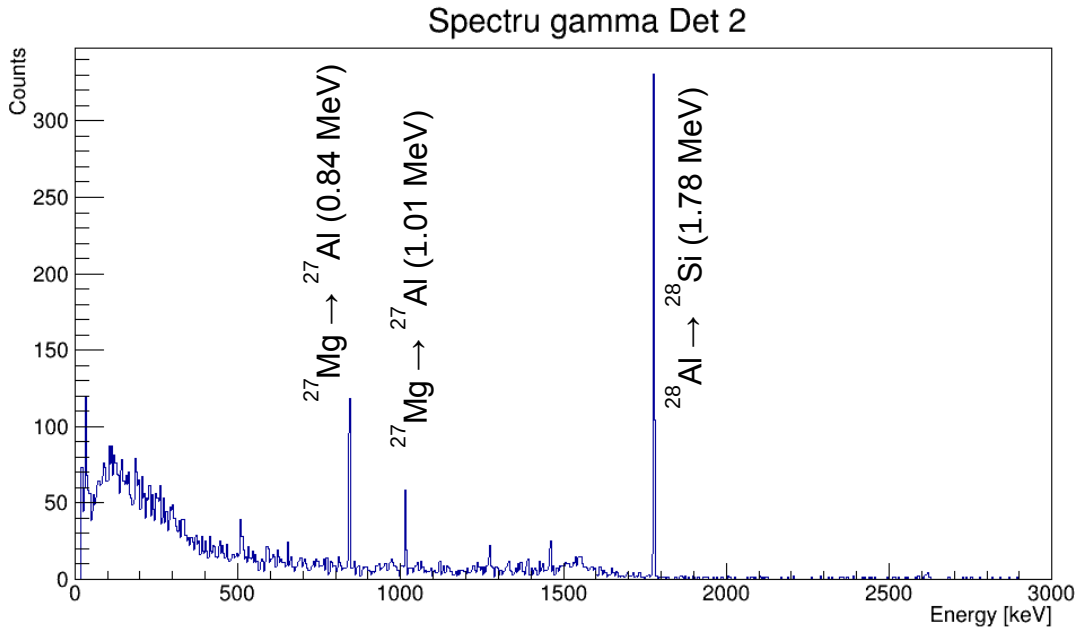


Figura 2.9. Spectru calibrat de dezintegrare gamma de la detectorul HPGe 2.

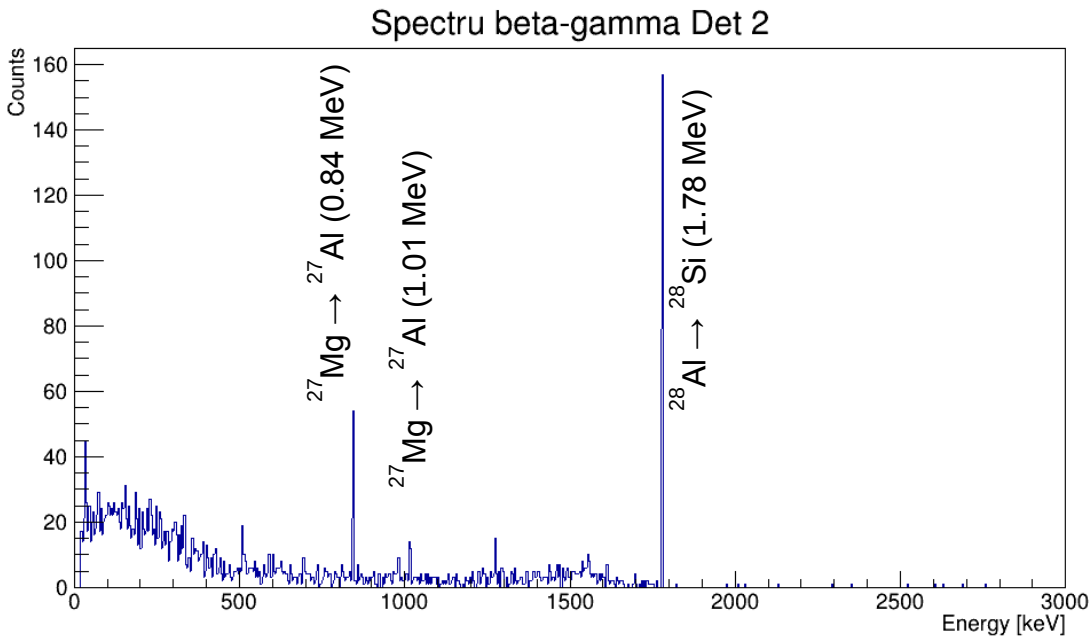


Figura 2.10. Spectru calibrat de dezintegrare gamma de la detectorul HPGe 2 cu conditie de coincidenta beta-gamma.

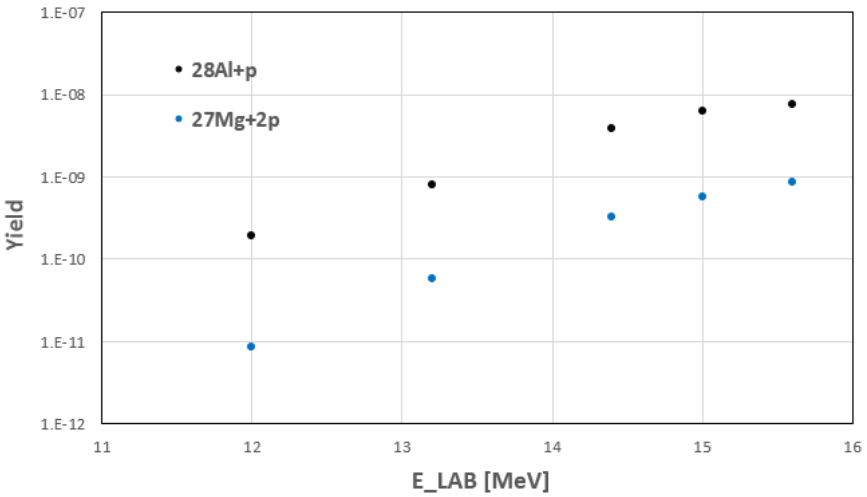


Figura 2.11. Grafic de yield-uri „offline" in functie de energie pentru canalele ^{28}Al+p si ^{27}Mg+2p

In concluzie:

- masuratorile prompte (online) pot fi folosite doar pentru energii de fascicul mai mari de 12 MeV datorita sectiunilor de reactie mici de la energiile mai joase si fondului ridicat de gamme. Insa aceste energii pot fi obtinute numai pe starea de sarcina 5+ a fasciculului, stare care produce intensitati foarte mici.

-metoda principala de obtinere a sectiunilor de interes va fi cea a măsurătorilor de activare, offline, descrisa la punctul (b).

- sistemul BEGA are o abilitate mult mai buna de a reduce contaminarile de fond, iar sectiunile obtinute sunt cele totale pe canal. Masuratorile din Octombrie 2021 ne-au aratat ca putem scadea foarte mult energiile de masura: deja am scazut de la 12 MeV la 8.2 MeV, apropiindu-ne de zona de interes pentru masuratorile de astrofizica nucleara. Completarea acestor masuratori detaliate (in pasi de maxim 0.4 MeV) a fost obiectivul zilelor de experiment obtinute la PAC pentru anul 2022, asa cum a fost explicat.

(iii) Propunere la sesiunea PAC pentru obtinerea de timp de fascicul pe anul 2022

In Octombrie 2021 a avut loc o sesiune a Program Advisory Committee (PAC) pentru noi propuneri de experimente pentru anul 2022.

Propunerea pe care am inaintat-o in calitate de director al proiectului (PD) a reflectat decalarile suferite in realizarea obiectivelor etapei datorita lipsei de timp suficient de fascicul in anul 2021. Ca atare, am solicitat timp pe anul 2022 pentru finalizarea studiului reactiei ^{13}C+^{16}O. Si deasemenea, am cerut timp pentru teste si posibile masuratori pentru reactia ^{13}C+^{19}F. Ambele propuneri au fost acceptate cu calificativ maxim si au fost acordate 10 zile de fascicul impartite in 2 perioade, una pentru fiecare reactie.

Concluzii

In conditiile permise de pandemie, obiectivele pentru aceasta faza au fost indeplinite cu limitarile mentionate. Finalizarea acestora va avea loc in Etapa 3.

Etapa 3 - Determinarea limitelor sistemului de detectie BEGA in ceea ce priveste reactiile si nucleele ce pot fi studiate

Asa cum a fost mentionat in sectiunile precedente ale acestui raport, absenta accesului la timp de fascicul pe o perioada de 10 luni a rezultat in decalarea completarii obiectivelor prezentate in Anexa 2 a proiectului. Acest obstacol este reflectat in modificarile suferite de activitatile aferente acestei Etape, care reprezinta in fapt o continuare a etapei precedente.

In aceasta sectiune am sa raportez urmatoarele:

a) Finalizarea masuratorilor pentru reactia $^{13}C + ^{16}O$, obtinute in Aprilie 2022 (timp acordat la PAC 2021). Raportarea rezultatelor cumulative din experimentele efectuate pe toata durata proiectului.

b) Testarea de posibile tinte de ^{19}F si efectuarea de masuratori preliminare pentru reactia $^{13}C + ^{19}F$.

c) Determinarea limitelor de detectie ale sistemului BEGA in ceea ce priveste reactiile studiate.

d) Realizarea unei cooperari cu grupul de astrofizica nucleara din Catania, Italia – la Laboratori Nazionali del Sud si Universita deli Studi di Catania – in vederea continuarii impreuna a studiilor incepute in prezentul proiect printr-un experiment comun deja acceptat de catre Users Selection Panel al proiectului european ChETEC-INFRA (https://www.chetec-infra.eu/) si planificat pentru luna octombrie 2022 la acceleratorul nostru, cu folosirea BEGA. Aceasta colaborare a fost apreciata in sesiunea de primavara 2022 ChETEC-INFRA si va fi finantata prin acesta.

a) Finalizarea masuratorilor prompte si de dezactivare pentru reactia $^{13}C + ^{16}O$, obtinute in Aprilie 2022 (timp acordat la PAC 2021). Raportarea rezultatelor cumulative din experimentele efectuate pe toata durata proiectului.

Descrierea stiintifica si tehnica

In Aprilie 2022 a avut loc al doilea experiment de masurare a reactiei $^{13}C + ^{16}O$ la Tandemul de 3 MV de la IFIN-HH. Procedura si setup-ul experimental au fost asemanatoare cu cele descrise in Etapa 2 si nu vor mai fi detaliate aici.

A fost folosit un fascicul de ^{13}C produs cu energii in intervalul E_{LAB} = 8.0 - 10.8 MeV (E_{CM} = 4.4 – 6 MeV) si masuratori in pasi de 0.4 MeV. Tintele folosite au fost cele de CeO_2, sub forma de pulbere presata in pastile cu grosimi de 0.8-1 g/cm^2, de tipul descris in Etapa 1, a) (Figura 3.1). Datorita sectiunilor de reactie mici, la aceste energii au fost obtinute numai spectre de dezactivare, inregistrate cu sistemul BEGA. Tot din acest motiv, timpul de iradiere pentru fiecare tinta a fost crescut la 1 hr, iar la energiile cele mai joase s-au facut masuratori repetate (minim 3) pentru obtinearea statisticii necesare.

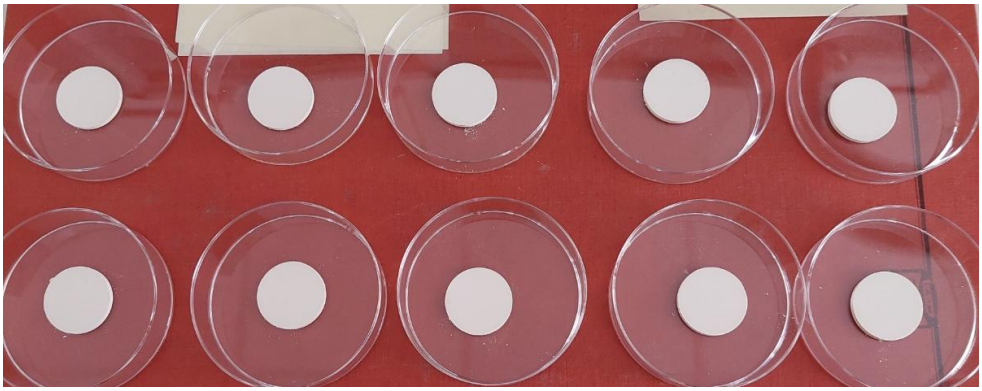


Figura 3.1. Pastile de CeO_2 folosite in experimentul din Aprilie 2022

De mentionat aici este ca abilitatea sistemului BEGA de a reduce fondul prin coincidente β-γ a fost esentiala in determinarea yield-urilor la energii sub 10 MeV. Figura 3.2 arata un exemplu de spectre de gamma-singles (cu albastru) si gamma cu coincidenta (cu rosu) din care se poate vedea (in zona indicata de cercul negru) ca linia de interes, 1779 keV, nu este vizibila in spectrul de singles dar se distinge usor in spectrul de gamma cu coincidenta. Se poate vedea de-asemenea ca liniile puternice de fond din spectrul albastru (1460 keV, 1764 keV si 2612 keV) nu se regasesc in spectrul rosu.

Eficienta de coincidenta a fost determinata la energii mai mari (Tabelul 3.1) pentru diferitele nuclee de interes si a fost utilizata in cazuri ca Figura 3.2 pentru a estima numarul de eveneminte de dezintegrare pentru fiecare nucleu activ.

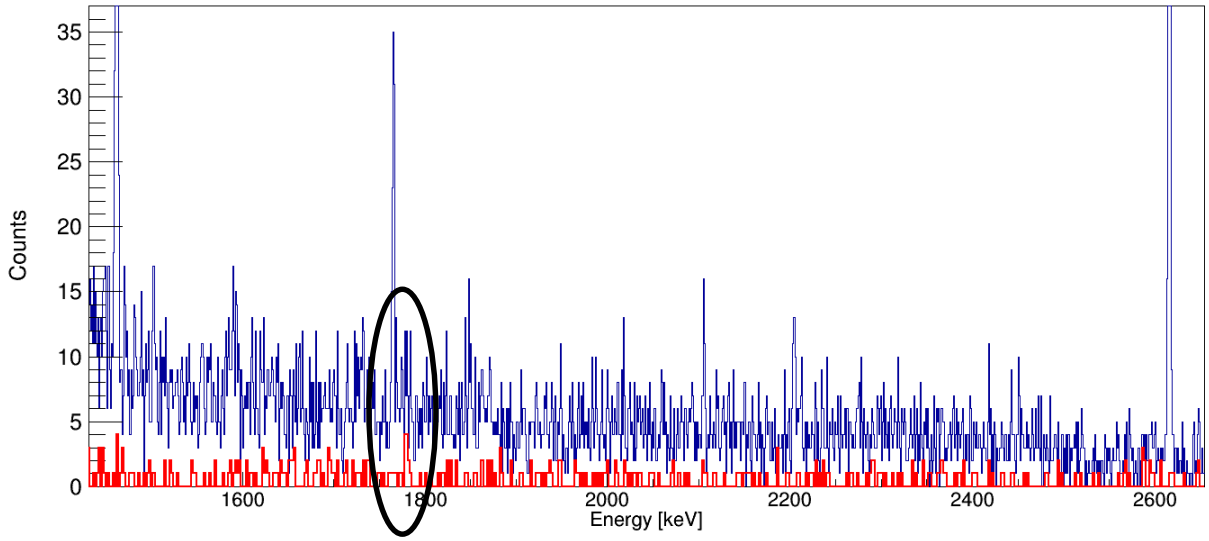


Figura 3.2. Spectre gamma masurate cu BEGA la energia in laborator de 8.4 MeV fara coincidenta (albastru) si cu coincidenta β-γ (rosu). Ambele spectre prezinta un interval energetic redus in jurul liniei de 1779 keV de la dezintegrarea lui ^{28}Al, pentru comparatie.

Rezultate cumulative

Determinarile de producere (yield) au fost efectuate pentru cele 2 canale de interes, 2p+^{27}Mg ($T_{½}$ ≈ 9.5 m) si p+^{28}Al ($T_{½}$ ≈ 2.2 m) si cumulate cu rezultatele din experimentele

precedente. Figura 3.3 arata curba de yield-uri pentru intervalul de energii masurat pe tot proiectul.

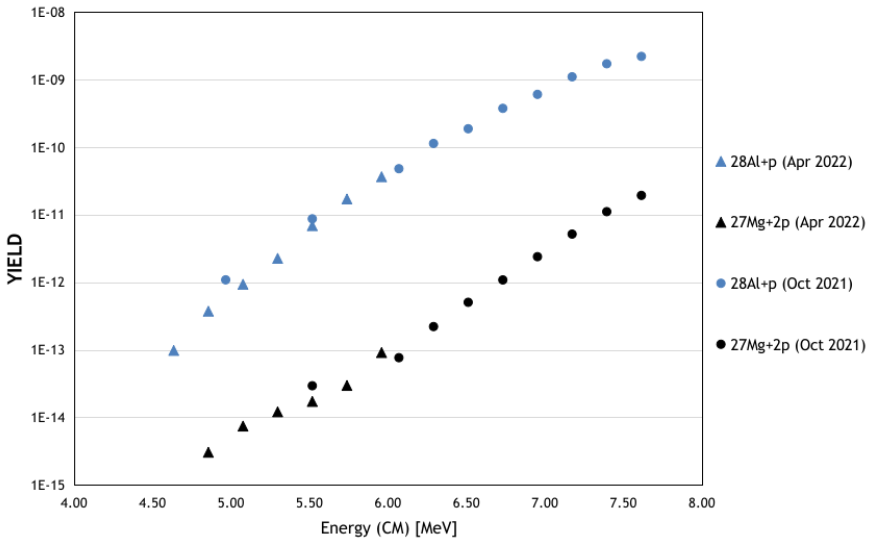


Figura 3.3. Curbele de yield-uri pentru canalele de reactie 2p+^{27}Mg si p+^{28}Al.

b) Testarea de posibile tinte de ^{19}F si efectuarea de masuratori preliminare pentru reactia ^{13}C + ^{19}F.

In Iunie 2022 a fost folosit al doilea set de zile de fascicul primite la PAC pentru testarea a diferite variante de tinte pe baza de ^{19}F. Rezultatele acestor teste au fost prezentate in sectiunea Etapei 1, subsectiunea b) impreuna cu celelalte teste. Din pacate, experimentul a trebuit sa fie oprit dupa 2 zile datorita infectarii cu Covid-19 a tuturor participantilor de experiment si nu s-au putut realiza toate masuratorile planificate.

In baza testelor efectuate, s-a conclus ca tinte de tip cristal din BaF_2 ar da rezultate mai bune pentru iradieri la energii joase. Din pacate astfel de tinte nu s-au putut achizitiona pentru utilizare pana la finalul proiectului.

c) Determinarea limitelor de detectie ale sistemului BEGA in ceea ce priveste reactiile studiate.

Pentru a obtine masuratorile la energii joase prezentate mai sus, a fost necesara – pe parcursul proiectului – imbunatatirea sistemului de detectie BEGA si caracterizarea lui. Rezultatele acestei activitati sunt rezumate mai jos in 3 categorii principale:

A. Reducerea de fond obtinuta cu BEGA este de ~1000 de ori, un factor comparabil cu performanta din mina de sare Slanic (Figura 3.4).

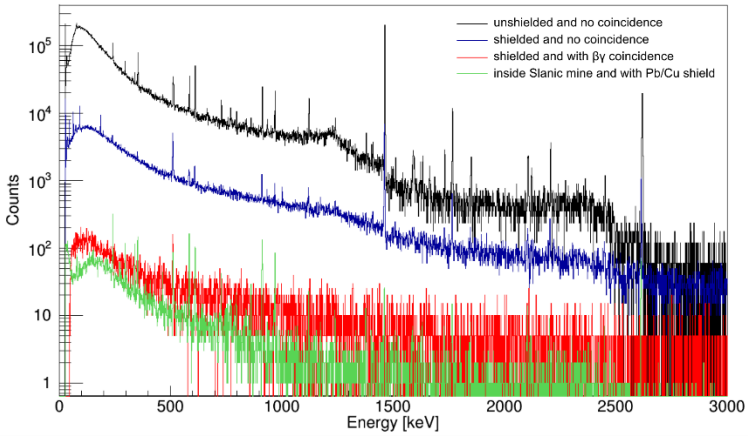


Figura 3.4. Spectre de fond detectate cu BEGA (neecranat – negru, ecran de Pb – albastru, ecran si coincidenta - rosu) comparate cu spectru in mina Slanic (verde)

B. Efficienta de coincidenta β-γ variaza in functie de nucleul care se dezintegreaza si distributia de particule beta a acestuia. In Tabelul 3.1 sunt prezentate rezultatele obtinute in experimentele descrise mai sus.

Nucleu	Efficienta de coincidenta
^{60}Co	~19%
^{24}Na	~30%
^{27}Mg	~55%
^{28}Al	~48%

Tabelul 3.1

De remarcat ca eficienta de coincidenta (subunitara) este data in totalitate de catre taierile din spectrul energetic continuu de beta induse de materialul cu care scintilatorul este infasurat. Aceste taieri sunt diferite pentru fiecare nuclid deoarece fiecare sursa beta are un spectru specific. Reducerea grosimii acestor materiale, sau eliminarea lor, este calea de urmat pentru a creste aceste eficiente si o vom urma. Subliniez ca daca eficienta de observare a liniilor gama de interes este subunitara, castigul obtinut prin reducerea fondului ramane factorul determinant in aceste masuratori.

C. Limita de detectie a fost determinata urmarind dezactivarea pe termen lung a nucleului ^{24}Na (produs prin reactia ^{13}C+^{12}C si studiat in detaliu intr-un studiu precedent la IFIN-HH). Activitatea cea mai mica ce a putut fi evaluata din spectrul de coincidenta detectat de BEGA a fost ~110 mBq (Figura 3.5), dupa aproximativ 10 timpi de injumatatire (sau ~150 ore, peste 6 zile) .

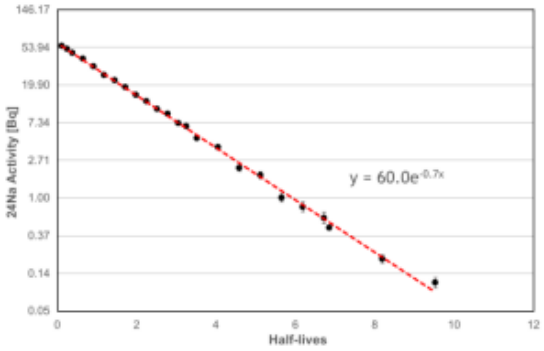


Figura 3.5 Activitate lui ^{24}Na evaluata pe o perioada de ~5 zile.

Aceasta activitate reflecta o rata de numarare in spectru de 0.15 evenimente/sec de fond total sau 0.006 ev/sec de fond in zona +/- 100 keV fata de linia de interes. Raportand aceste numere la nucleul ^{28}Al (ca exemplu), care are $T_{½} \approx 2.2$ min, se poate estima ca pentru un timp de masurare de 10 min, cea mai mica activitate detectabila deasupra fondului dintr-o singura masuratoare este ~6 Bq. Aceasta valoare ar rezulta intr-un yield de 10 ori mai mic decat ultima valoare masurata in cadrul acestui proiect, adica o crestere considerabila a domeniului de energii incidente spre energii mai mici, catre zona ferestrei Gamow importanta in astrofizica nucleara.

d) Realizarea unei colaborari cu grupul de astrofizica nucleara din Catania pentru continuarea acestui program de studii dupa incheierea I2FUMEC.

In urma prezentarii rezultatelor preliminare ale acestui proiect la cele trei conferinte mentionate mai jos, a fost posibila initierea unei colaborari cu grupul de astrofizica nucleara din Catania – la Laboratori Nazionali del Sud si Universita deli Studi di Catania – prin proiectul european ChETEC-INFRA. Aceast parteneriat are in vedere continuarea programului de studii de mecanisme de fuziune inceput in prezentul proiect.

Scopul este de organiza impreuna urmatoarele experimente pentru masurarea de reactii ion-ion. Un prim experiment a fost deja propus si acceptat in cadrul ChETEC-INFRA pentru luna octombrie 2022 si va fi finantat din acesta proiect European. Experimentul va avea loc la IFIN-HH si va utiliza acceleratorul de 3 MV si sistemul de detectie BEGA. Colaborarea include tot sub umbrela proiectului european ChETEC-INFRA si realizarea de tinte pentru experimente viitoare de astrofizica nucleara. Acest proiect aduna sub o umbrela majoritatea grupurilor europene de cercetare din astrofizica nucleara intr-o „emerging community" care asociaza pentru prima data fizicieni nuclearisti, astronomi si modelatori de dinamica stelara si de nucleosinteza. Grupul nostru NAG din IFIN-HH este parte din aceasta prestigioasa comunitate, nu numai prin experimente la accelerator si organizarea de scoli/conferinte specifice, dar si prin realizarea de tinte specifice pentru experimente de fizica nucleara pentru astrofizica.

Cu acelasi grup din Catania colaboram pentru studiul reactiilor ^{12}C+^{12}C si ^{12}C+^{16}O printr-o metoda complet diferita, metoda indirecta a calului troian (Trojan Horse Method) pentru care unele rezultate au fost deja obtinute si raportate [5].

In ansamblu, **obiectivele proiectului au fost indeplinite** in esenta lor stiintifica, cu limitarile introduse de pandemia Covid-19 si ceilalti factori mentionati in acest raport.

Referinte

[1] N. Zhang, D. Tudor et al, *Phys. Lett. B* 801, 135170 (2020).

[2] D. Tudor, L. Trache, A.I. Chilug, I.C. Stefanescu, A. Spiridon, M. Straticiuc, I. Burducea, A. Pantelica, R. Margineanu, D.G. Ghita, D.G. Pacesila, R.F. Andrei, C. Gomoiu, N.T. Zhang, X.D. Tang, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A* **953**, 162178 (2020).

[3] I. Burducea, M. Straticiuc, D.G. Ghita, D.V. Mosu, C.I. Calinescu, N.C. Podaru, D.J.W. Mous, I. Ursu, N.V. Zamfir, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B* **359**, 12-19, 2012.

[4] https://www.ortec-online.com/products/application-software/maestro-mca

[5] A. Tumino, ..., L. Trache et al, *Nature* **557**, 687 (2018) (https://doi.org/10.1038/s41586-018-0149-4); ibidem *Nuovo Cimento* **42 C**, 55 (2019).