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 Etapa 2

1. Introducere

Acesta este al doilea raport stiintific pentru proiectul cu titlul si codul mai-sus mentionate si va include activitatile din perioada 1 Decembrie 2020 - 30 Noiembrie 2021, respectiv de la data primului raport si pana la data raportului prezent. Etapa 2 in planul de realizare al proiectului a fost denumita **“Studierea reactiilor de interes prin metoda activarii si spectroscopie gamma cu masurari la mina Slanic sau cu sistemul BEGA.”** si avut urmatoarele obiective listate in Anexa II:

(i) Conform timpului aprobat de Program Advisory Committee (PAC), efectuare de masuratori prompte in fascicul pentru reactiile $^{13}C+^{16}O$ si $^{13}C+^{19}F$.

(ii) Efectuare masuratori de dezactivare pentru reactiile $^{13}C+^{16}O$ si $^{13}C+^{19}F$ cu sistemul de detectie BEGA.

(iii) Propunere la sesiunea PAC pentru obtinerea de timp de fascicul pe anul 2022 pentru reactia $^{12,13}C+^{6,7}Li$.

Inainte de a intra in detaliu, trebuie mentionat pe scurt ca punctele (i) si (ii) au fost afectate in procent de 90% de pandemia curenta de COVID-19. In anul 2020 nu a mai avut loc sesiunea PAC pentru obtinerea de timp de fascicul pe anul 2021 (aceasta informatie se poate regasi si pe pagina tandemului https://tandem.nipne.ro/call_for_proposals.php). 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.

In acest document am sa raportez:

a) Analiza datelor de raze gamma prompte din experimentul din 2020.

b) Cu toata situatia creata de pandemie am obtinut un timp de fascicul de o saptamana (6 zile) in Octombrie 2021 unde am putut extinde masuratorile cu fascicul de ^{13}C pe tinte de CeO_2 pana la o energie a fasciculului de 8.2 MeV. Aceste masuratori au folosit metoda activarilor.

c) Punctul (iii) mai sus a putut fi implinit partial. Tot in Octombrie 2021 a avut loc sesiunea

de propuneri PAC pentru anul 2022, unde ca director al proiectului (PD) am sustinut o prezentare prin care am cerut timp de fascicul pentru reactiile $^{13}C+^{16}O$ si $^{13}C+^{19}F$. Propunerea a fost acceptata si au fost acordate 10 zile de fascicul impartite in 2 grupuri, unul pentru fiecare reactie. Din pacate, grupul 2 a fost programat in Septembrie 2022 (https://dfna.nipne.ro/calendar_tandetron.php), deci dupa finalizarea prezentului proiect.

Avand in vedere situatia descrisa, in sectiunea urmatoare vor fi prezentate rezultate obtinute in urma analizei (i) de spectroscopie gamma a spectrelor prompte obtinute in testele raportate la Faza 1, 2020 si vor fi prezentate preliminar parametrii si rezultatele preliminare ale metodei folosite in experimentul (ii) din Octombrie 2021.

2. Raport General al Activitatilor

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

Primul pas in investigarea reactiei de ^{13}C + ^{16}O a fost un studiu al materialelor ce pot fi folosite ca tinte si design-ul lor. Rezultatele acestuia au fost prezentate in Raportul Stiintific precedent si nu vor fi repetate in detaliu aici. Testele in fascicul au avut loc la Tandetronul de 3 MV de la IFIN-HH, pe linia numita „Cross-Section Measurement” (CSM) (Figura 1).

Figura 1. Tandetronul de 3 MV de la IFIN-HH [1].

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 ~1.5 cm in diametru si ~1 mm grosime lipita pe un backing de Aluminiu (Figura 2).

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

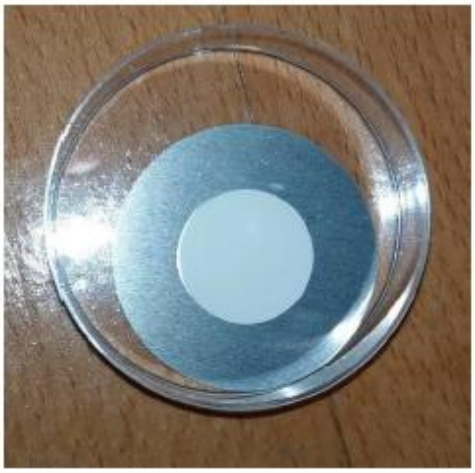

Figura 2. Pastila de CeO_2 lipita pe backing de Aluminiu.

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 3).

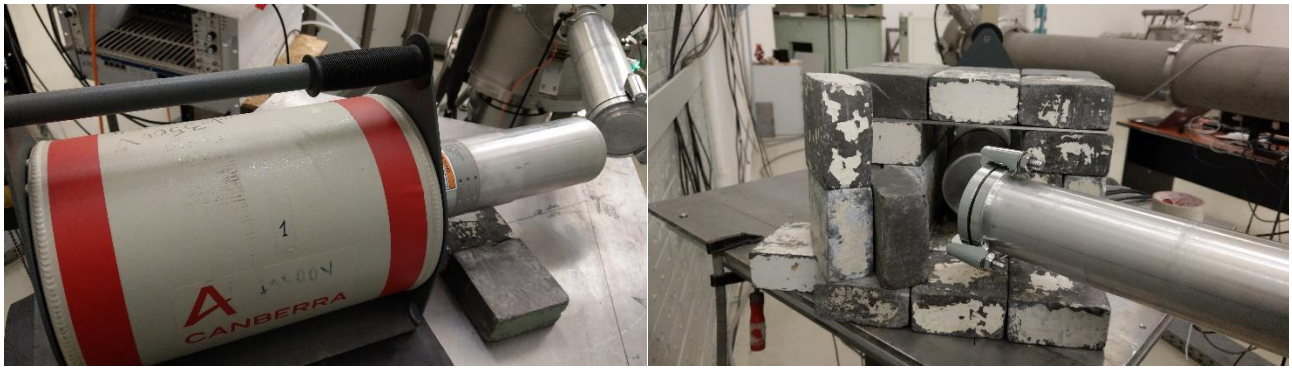

Figura 3. Detectorul HPGe plasat la capatul liniei CSM ne-ecranat (stanga) si cu castel din caramizi de plumb (dreapta).

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 [2]. 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 4.

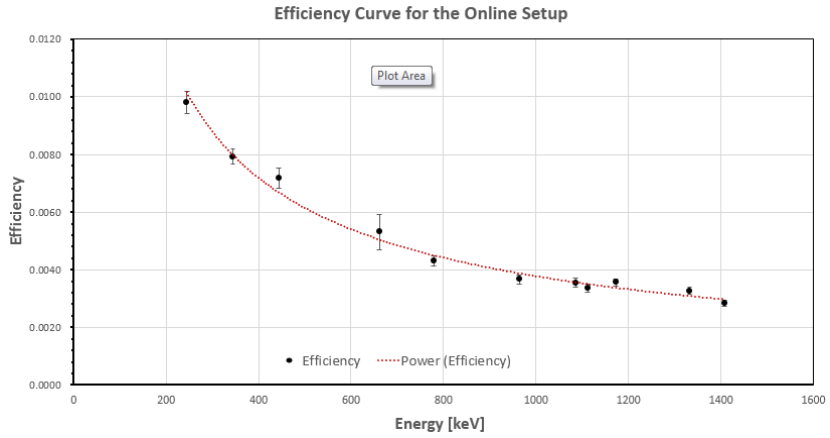

Figura 4. Curba de eficienta pentru detectorul de „online”.

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 5 arata un astfel de spectru obtinut la energia E_{LAB} = 15.6 MeV, cu cateva varfuri de interes marcate ca exemplu.

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

Reaction Products	Q-value (keV)	Threshold (keV)
^{29}Si+γ	20283.0859 *0.0006*	0 *0*
^{28}Si+n	11809.4847 *0.0007*	0 *0*
^{25}Mg+α	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+α	1825.344 *0.013*	0 *0*
^{27}Al+n+p	224.58 *0.05*	0 *0*
^{16}O+n+3α	0 *0*	0 *0*
^{26}Mg+^{3}He	-328.67 *0.03*	595.87 *0.05*
^{21}Ne+2α	-730.05 *0.04*	1323.57 *0.07*
^{27}Mg+2p	-1603.32 *0.05*	2906.80 *0.09*
^{24}Na+p+α	-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+2α	-7491.2103 *0.0017*	13581.454 *0.003*
^{23}Na+d+α	-7642.7774 *0.0018*	13856.243 *0.003*
^{26}Mg+n+2p	-8046.71 *0.03*	14588.57 *0.05*
^{17}O+3α	-8077.9758 *0.0007*	14645.2518 *0.0013*

Tabelul 2. Lista canalelor de reactie ce se deschid cand E_{LAB} = 15.6 MeV si valorile Q-value corespunzatoare.

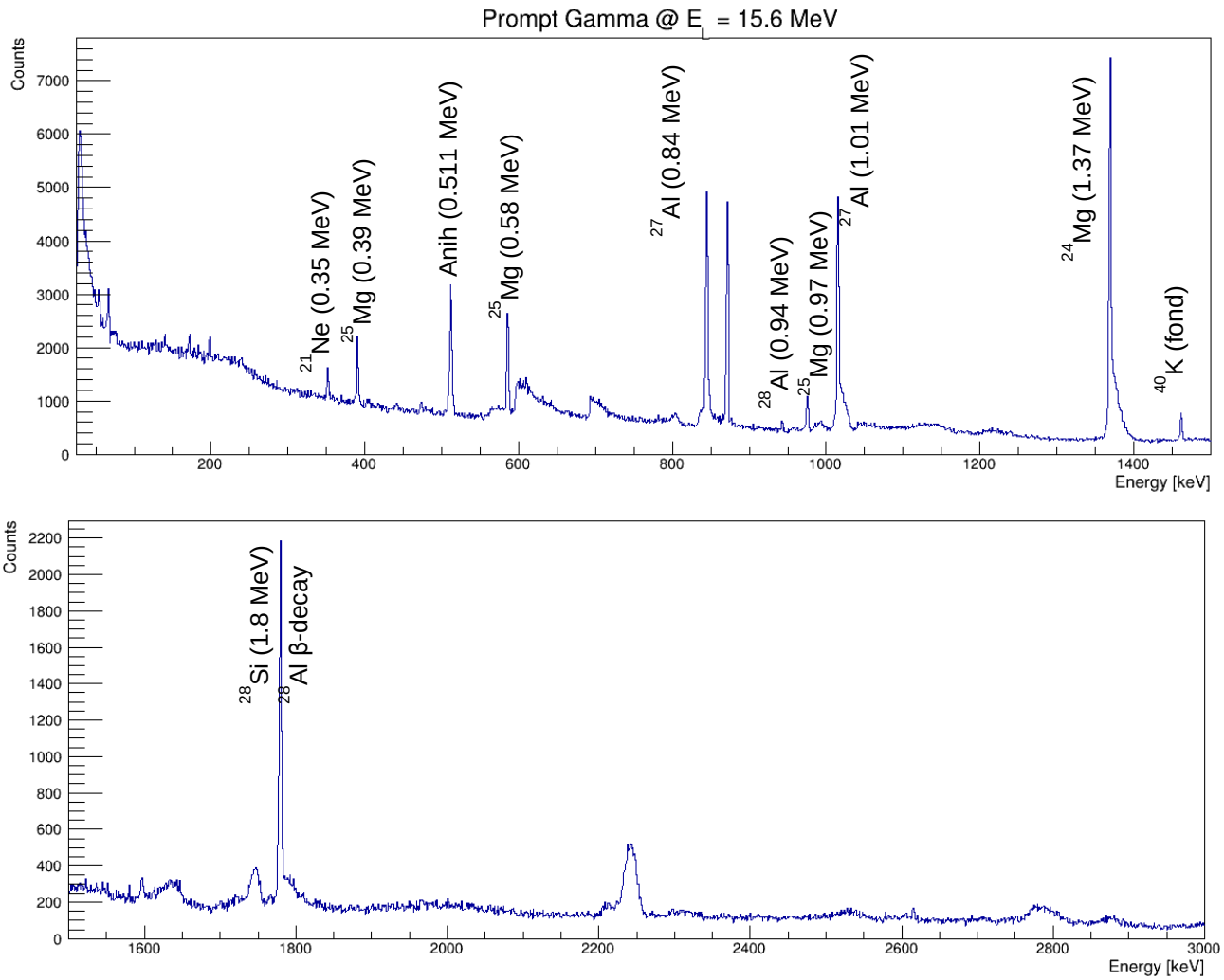

Figura 5. Spectru de gamma prompt produs in reactia ^{16}O + ^{13}C (E_{LAB} = 15.6 MeV).

Asa cum se poate vedea in spectru, pentru canalele de interes, sectiunile sunt foarte mici si varfurile corespunzatoare au statistica putina. Pentru masuratorile la energii mai mici de 12 MeV, aceste varfuri 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.

Rezultatele preliminare ale masuratorilor online sunt prezentate in Figura 6.

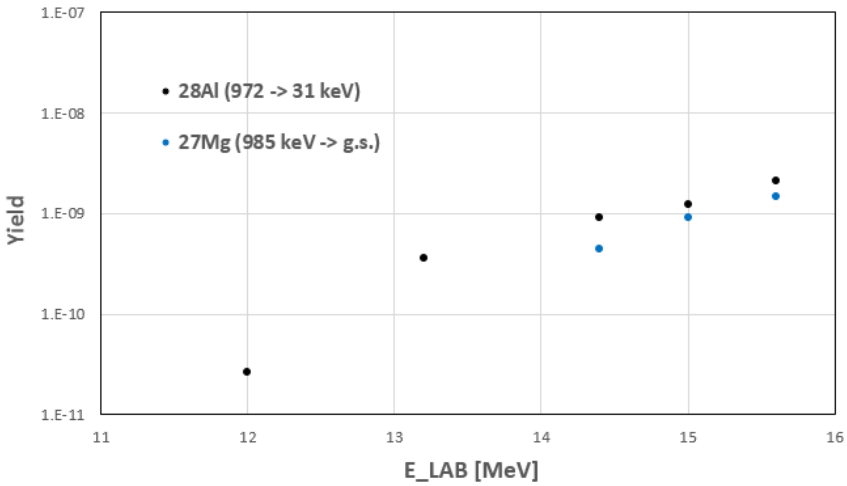

Figura 6. Grafic de yield-uri „online" in functie de energie pentru canalele $^{28}Al+p$ si $^{27}Mg+2p$

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

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, dedicat masuratorilor de dezactivare cu fond redus prin coincidente beta-gamma. Schema sistemului este prezentata in Figura 7.

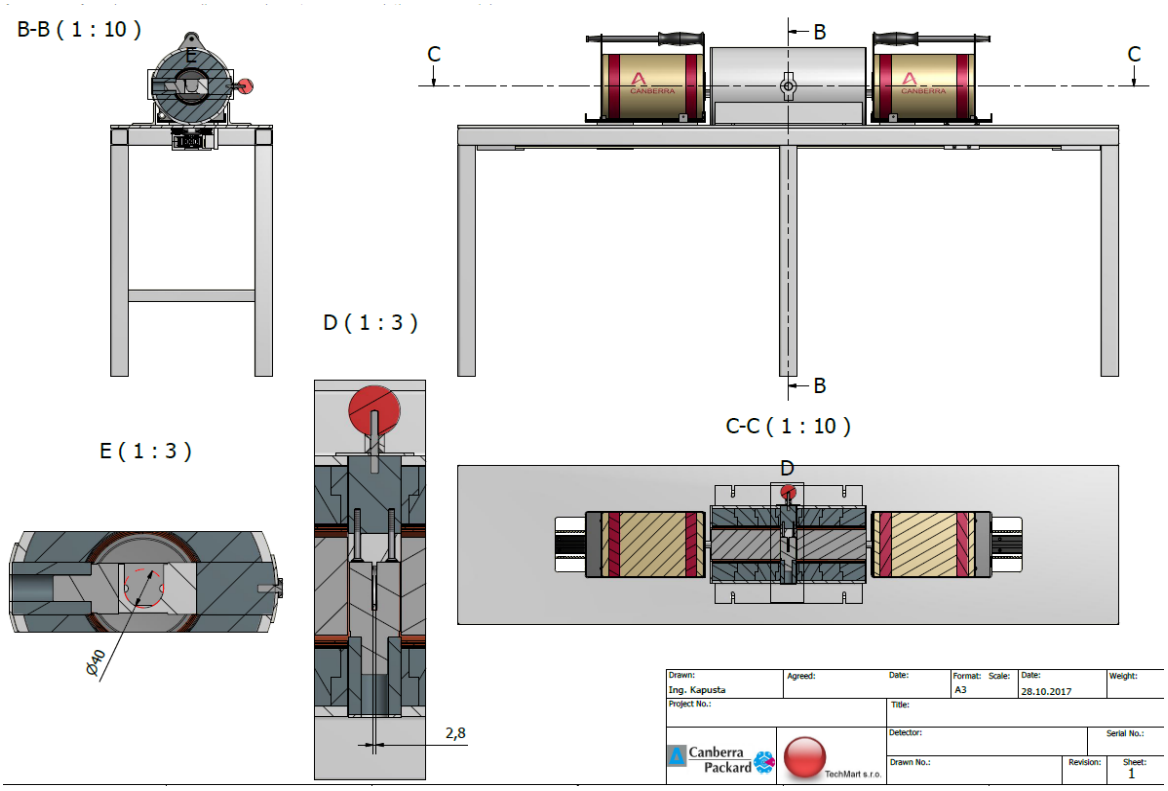

Figura 7. Schema de proiect a sistemului BEGA.

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. Caractristicile lui principale sunt raportate mai jos, nu si analiza completa a datelor experimentale obtinute, care necesita o prelucrare mai complexa. Semnalele de energie de la detectorii HPGe au fost prelucrate cu un lant standard de module electronice: pre-amplificator, amplificator si convertor analog-la-digital iar datele au fost inregistrate cu softul MAESTRO.

Schema electronica de coincidenta este prezentata in Figura 8 si a utilizat un modul tip TAC (Convertor Timp-la-Analog). Din pacate, poarta generata de TAC nu a putut fi potrivita in timp si pentru energia beta de la scintilator, doar pentru energia gamma de la HPGe. A fost cumparat anul acesta un modul amplificare intarzieri (Ortec 427A – Delay Amplifier, inclus in raportul financiar) pentru a rezolva aceasta problema.

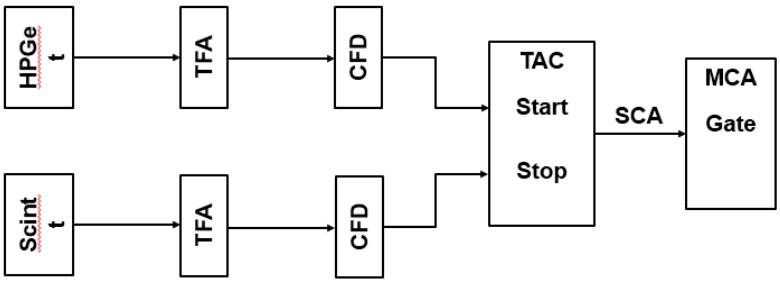

Figura 8. Schema electronica de coincidenta.

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 9.

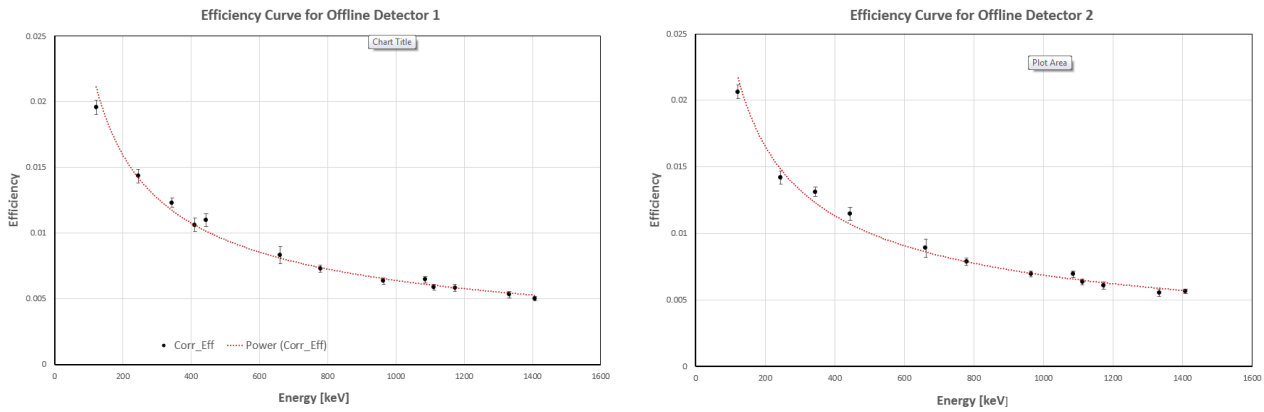

Figura 9. Curbe de eficienta pentru cei 2 detectori HPGe din BEGA („offline”).

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 astfel de spectru este prezentat in Figura 10, obtinut in urma iradierii de la E_{LAB} = 15.6 MeV. In Figura 11 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 12.

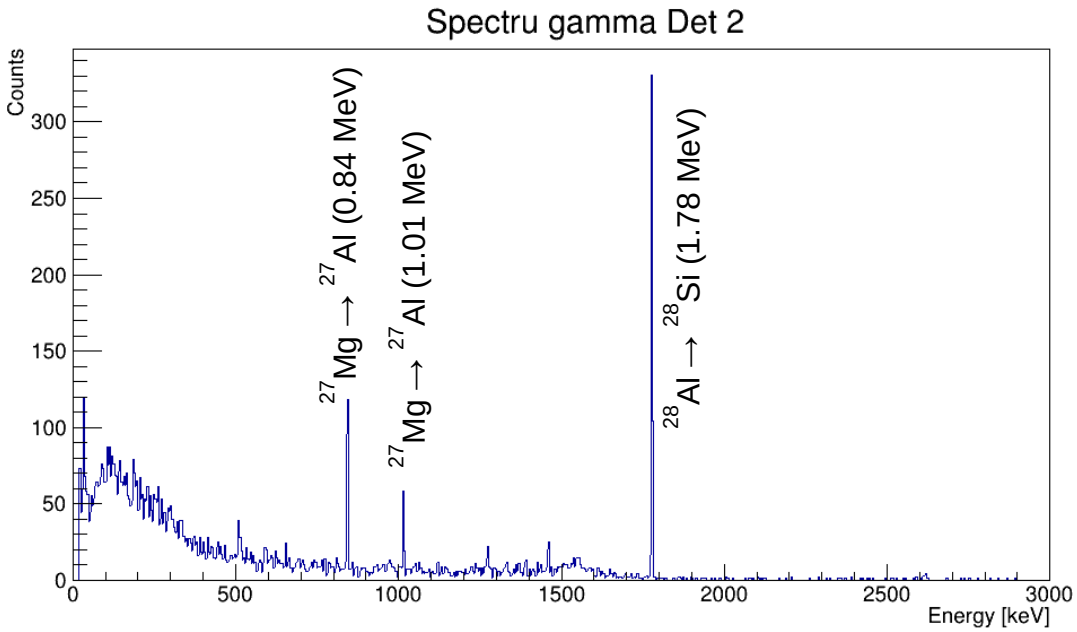

Figura 10. Spectru calibrat de dezintegrare gamma de la detectorul HPGe 2.

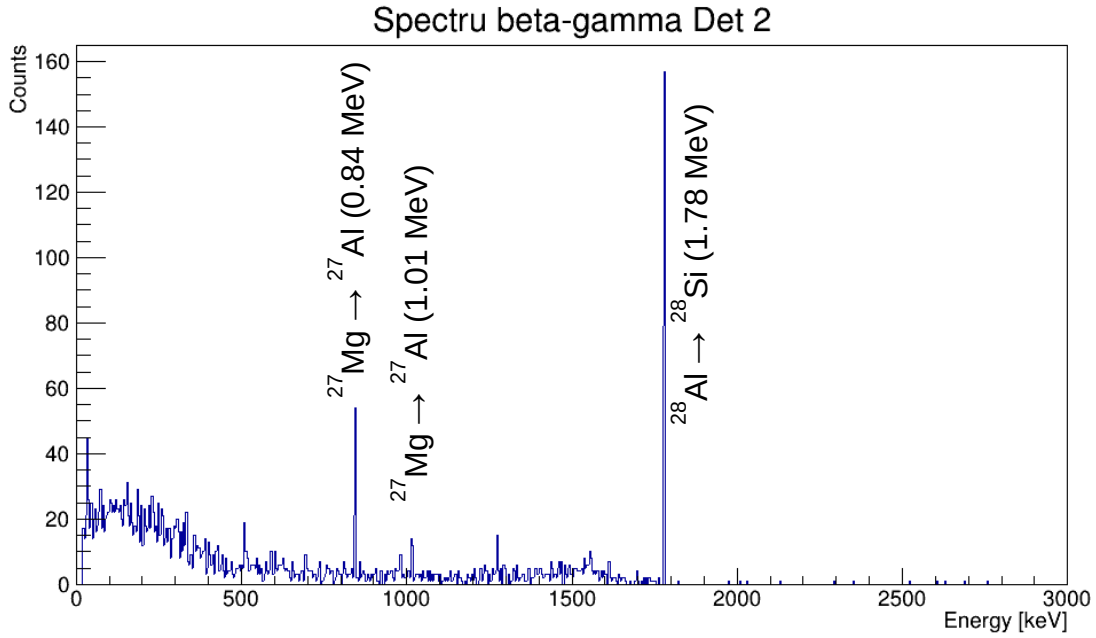

Figura 11. Spectru calibrat de dezintegrare gamma de la detectorul HPGe 2 cu conditie de coincidents beta-gamma.

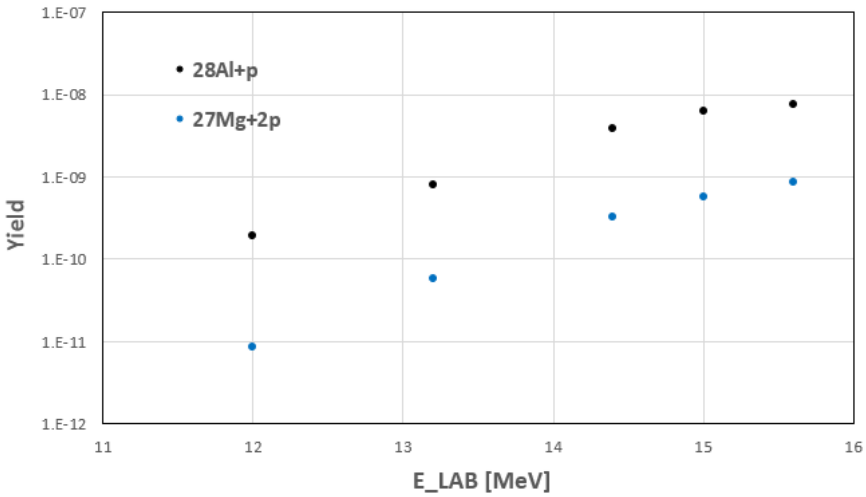

Figura 12. Grafic de yield-uri „offline" in functie de energie pentru canalele ^{28}Al+p si ^{27}Mg+2p

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.

Completarea acestor masuratori detaliate (in pasi de maxim 0.4 MeV) este obiectivul zilelor de experiment obtinute la PAC pentru anul 2022, asa cum a fost explicat in Introducere.

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" la 2 conferinte internationale: Key Reactions in Nuclear Astrophysics (KRINA), Virtual Workshop organizat la ECT* Trento in 22-23 Iunie 2021 (numai online) si la Carpathian Summer School of Physics 2020 (in 2021), Sinaia , Romania (August 2021). La prima dintre acestea prezentarea a avut caracter de lectie invitata.

Nu de mica importanta in anul care a trecut a fost sarcina mea de Secretar Stiintific al editiei a 29-a a Carpathian Summer School of Physics 2020, amanata pentru 2021 si desfasurata cu mare succes intre 18-27 August la Sinaia (https://www.nipne.ro/events/conferences/cssp20/) . Este 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 (cvasi-)unanime ale celor 81 de participanti, intre care multi tineri, si a sponsorului principal, proiectul european ENSAR2.

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

Referinte

[1] 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.

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

[3] Gy. Gyürky, Zs. Fülöp, F. Käppeler, G.G. Kiss and A. Wallner, *Eur. Phys. J. A* **55** (2019) 41

Director de Proiect

Dr. Alexandra Spiridon