

Produkcija i detekcija neutrona

Romana Popočovski, F-3785

mentor: dr.sc Neven Soić, IRB, Zagreb

Fizički odsjek, PMF, Bijenička c. 32, 10 000 Zagreb.

20.1.2017.

Sažetak

Zbog električne neutralnosti, detekcija neutrona predstavlja izazov, a kako u nuklearnim reakcijama uz emisije samih neutrona dolazi i do emisije γ zraka potreban je pouzdan način diskriminacije doprinosa različitih čestica. Za produkciju neutrona je korišten linearni elektrostatski Cockcroft-Walton akcelerator u sklopu Laboratorija za nuklearnu fiziku, IRB. Produkti nuklearne reakcije ${}^3\text{H}(d, n){}^4\text{He}$, $Q = 17,59\text{MeV}$ detektirani su EJ-309 tekućim scintilatorom (neutroni) te silicijskim poluvodičkim detektorom sa površinskom barijerom (α čestice). Korištenjem MPD-8 jedinice za diskriminaciju čestica na temelju oblika signala uspješno je postignuta eliminacija doprinosa γ zračenja kod detekcije neutrona pri čemu udio krivoindentificiranog podrijetla signala iznosi $\approx 3\%$. U svrhu određivanja točne efikasnosti detektora neutrona još je potrebno izvršiti mjerenje koincidencije događaja istovremenim detektiranjem neutrona i odgovarajuće α čestice.

1 Uvod

Neutron je kompozitna čestica koja zajedno sa protonom čini izospinski dublet nukleona pri čemu se razlikuju po projekciji izospina T_3 , a samim time i po električnom naboju

$$q = T_3 + \frac{1}{2}(B + S) \quad (1)$$

gdje je barionski broj nukleona $B = +1$, $S = 0$ stranost nukleona te $T_3 = 1/2$ za protone, a $T_3 = -1/2$ za neutrone. Zbog elektroefekta neutralnosti, detekcija neutrona predstavlja izazov jer nema procesa ionizacije[1]. Dvije osnovne interakcije neutrona sa materijom su raspršenje na jezgrama atoma i apsorpcija u jezgri. Pri raspršenju, neutron dio svoje energije predaje jezgri, a ako je predana energija dovoljno velika, jezgra ionizira okolinu elektromagnetskom interakcijom. Apsorpcija neutrona u materiji rezultira nuklearnom reakcijom te se njihovi produkti (protoni, α čestice, γ zrake ili fizijski fragmenti) dalje detektiraju, a vrsta detektirane čestice ukazuje na to koja je točno nuklearna reakcija u pitanju.

S obzirom da uslijed sudara neutroni jednakih energija jezgrama mogu predati različite iznose energija, pomoću detektora se pouzdano može odrediti samo njihov broj te se gubi informacija o ukupnoj energiji pojedinog neutrona. Također, u nuklearnim reakcijama uz emisije samih neutrona dolazi i do emisije γ zraka, a njihov je doprinos u detektiranoj energiji rijetko zanemariv, ponekad čak i usporediv sa doprinosom neutrona.

Energija čestica određuje koja će vrsta interakcije sa materijom prevladavati stoga se neutroni dijele na hladne ($\leq 0,005\text{eV}$), termalne ($0,005 - 0,5\text{eV}$), spore ($0,5\text{eV} - 100\text{keV}$) i brze ($0,1 - 50\text{MeV}$). Sukladno navedenom, odabir vrste detektora (plinski, scintilacijski, fizijska komora) ovisi o energiji neutrona koji se žele detektirati kao i o osjetljivosti pojedinog detektora na prisutno γ zračenje.

2 Metode i materijali

2.1 Produkcija neutrona

Za produkciju neutrona korišten je linearni elektrostatski akcelerator koji se temelji na Cockcroft-Walton generatoru u sklopu Laboratorija za nuklearnu fiziku, IRB[3]. Riječ je o kaskadnom generatoru visokog DC napona (300keV) sa niskog AC napajanja (Slika 1.) [4] pri čemu je konačan napon terminala određen brojem stupnjeva kaskade te vrijedi

$$U = 2nU_0 - \Delta U \pm \delta U \quad (2)$$

gdje su pad napona ΔU i oscilacije δU posljedica ekstrakcije DC struje I te iznose

$$\Delta U = \frac{I}{fC} \left(\frac{2}{3}n^3 + \frac{3}{4}n^2 + \frac{1}{2}n \right) \quad (3)$$

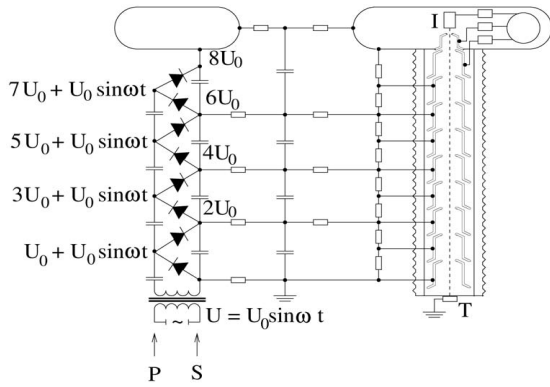
$$\delta U = \frac{I}{fC} \frac{n(n+1)}{2}. \quad (4)$$

Visoka frekvencija AC napajanja f i kapacitet kondenzatora C te ograničeni broj stupnjeva kaskade n rezultiraju manjim padom napona ΔU .

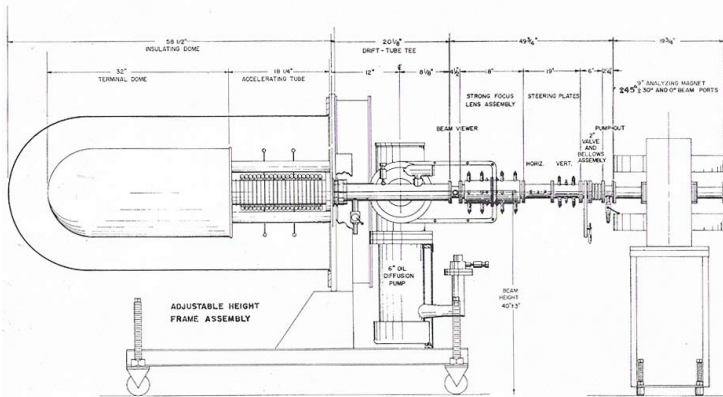
Sustav 22 elektrode između kojih je napon podijeljen na jednake segmente omogućava postepeno ubrzavanje snopa koje pak osigurava stabilizaciju napona i smanjenje efekta lokalnog električnog polja. Same elektrode su zaobljene i fino obrađene kako bi se minimalizirali električni izboji. Usmeravanje i fokusiranje snopa izvršava se pomoću kvadrupolnog dubleta, elektrostatskih deflektora i magnetskog dipolnog analizatora, a radni vakuum akceleratora ($\approx 1,5 \times 10^{-6}\text{mbar}$) postiže se sustavom uljne difuzijske i turbo molekularne pumpe.

Reakcija produkcije neutrona glasi





Slika 1: Skica Cockcroft-Waltonovog generatora. Preuzeto sa [4]



Slika 2: Shema Cockcroft-Waltonovog akceleratora, model 9501, IRB Preuzeto sa [3]

pri čemu se ioni tj. deuteroni dobivaju ionizacijom deuterija iz pyrex boce [5]. Tricijska meta sastoji se od bakrene podloge i sloja titanija u koji je deponiran tricij. S obzirom da je tricij β^- aktivan element sa vremenom poluživota $T_{(1/2)} = 3,89 \times 10^8 s \approx 12,33 god$ sama meta je ograničenog vijeka trajanja [6], a njena trenutna aktivnost procjenjuje se na $A \approx 0,26 Ci$. Naravno, uz spomenuti raspad, korištenjem mete dolazi do trošenja određene količine tricija kao posljedice odvijanja nuklearne reakcije na istoj. Zbog efekta Jouleovog zagrijavanja, metu je potrebno hladiti što je izvedeno sustavom za hlađenje držača mete pomoću protoka vode.

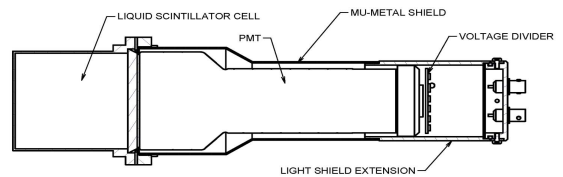
Shema dotičnog C-W akceleratora u sklopu IRB-a prikazana je na Slici 2.

2.2 Detekcija neutrona

Tekući scintilacijski detektori, zbog svoje visoke osjetljivosti na brze neutrone te mogućnosti detekcije u područjima viševrsnog zračenja primjenom tzv. metode diskriminacije na temelju oblika pulsa (pulse shape discrimination, PSD), postepeno zamjenjuju dosad korištene plinske detektore (3He , BF_3 , 4He , CH_4) čije je glavno ograničenje veličina i nemogućnost masovne proizvodnje u svrhu industrijske primjene. Speci-

fičnost scintilacijskog detektora EJ-309 [7] je što, za razliku od pretećih tekućih scintilatora, ima temperaturu zapaljenja iznad $26^\circ C$, točnije na $144^\circ C$ stoga je njegova upotreba pouzdanija i sigurnija za širu upotrebu.

Detektor se sastoji od cilindrične aluminijske ćelije (promjera $127mm$) ispunjene tekućim scintilatorom na koju je direktno spojen fotomultiplikator sa djeliteljem napona (Slika 3). Kućišta navedenih komponenti detektora, kao i njihovi međusobni spojevi, moraju biti izolirani od okolne svjetlosti (tzv. light-tight) čime se osigurava da izlazni signal detektora doista potječe od svjetlosnog bljeska kao posljedice ionizacije scintilacijskog materijala. Optimalan odziv korištenog detektora postiže se pri napajanju od 1500-1550V.



Slika 3: Shema EJ-309 detektora. Preuzeto sa [7]

Općenito, za što točniju analizu i interpretaciju prikupljenih eksperimentalnih podataka potrebno je znati efikasnost korištenih detektora. U svrhu određivanja efikasnosti te istovremene provjere tvorničkih specifikacija proizvođača, cilj je izmjeriti koincidenciju događaja na detektoru neutrona (EJ-309) i α detektoru (poluvodički Si detektor sa površinskom barijerom). Naime, efikasnost detekcije α čestica silicijskim detektorom sa površinskom barijerom je 100% pa se iz broja istovremeno detektiranih neutrona jednostavno izračuna efikasnost detektora neutrona.

Položaj detektora neutrona u odnosu na metu mora biti takav da se nalazi na putanji neutrona koji odgovaraju detektiranim α česticama i da pokriva prostorni kut u koji odlaze neutroni koji odgovaraju α česticama u silicijskom detektoru. Za nuklearnu reakciju $A(a, b)B$ u laboratorijskom sustavu sa fiksnom metom, zakoni očuvanja energije i impulsa vode do izraza:

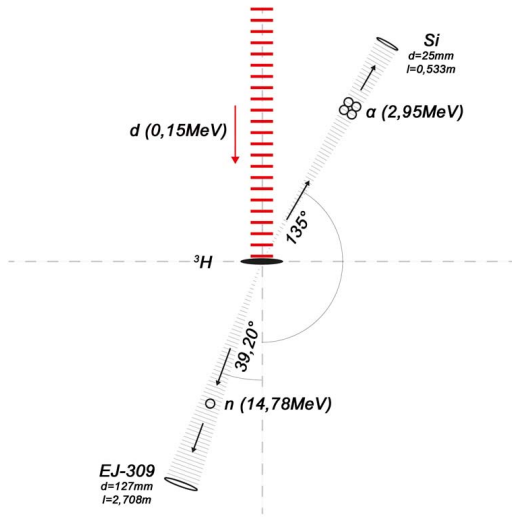
$$m_a c^2 + E_a + m_A c^2 = m_b c^2 + E_b + m_B c^2 + E_B \quad (5)$$

$$\sqrt{2m_a E_a} = \sqrt{2m_B E_B} \cos \phi + \sqrt{2m_b E_b} \cos \theta \quad (6)$$

$$0 = \sqrt{2m_B E_B} \sin \phi - \sqrt{2m_b E_b} \sin \theta \quad (7)$$

gdje su sa m označene odgovarajuće mase mirovanja, E kinetičke energije, impuls $p = \sqrt{2mE}$, a kutovi ϕ i θ odgovaraju odklonima teže i lakše čestice od smjera gibanja projektila [8]. Iznosi kuteva i energija podukata korištene nuklearne reakcije (${}^3H(d, n){}^4He$) izračunati su pomoću internog Fortran koda te su navedeni u skici eksperimentalnog postava (Slika 4).

Spomenuta metoda diskriminacije na temelju oblika impulsa (PSD) se temelji na različitim vremenima interakcije pojednina vrste zračenja sa scintilacijskim materijalom. Glavna komponenta svjetlosnog bljeska u scintilatoru je reda veličine nekoliko nanosekundi, no vrijeme eksponencijalnog pada signala, posljedica zakašnjele fluorescencije, ima trajanje od nekoliko



Slika 4: Skica eksperimentalnog postava sa odgovarajućim energijama čestica te kutovima i udaljenostima pojedinog detektora

stotina nanosekundi. Teže čestice imaju višu specifičnu ionizaciju stoga uzrokuju veće zakašnjenje fluorescencije. Upravo ta vremenska ovisnost omogućuje diskriminaciju signala ovisno o podrijetlu tj. vrsti detektiranog zračenja.

Korištena jedinica za diskriminaciju (MPD-8, [9]) koristi algoritam za diskriminaciju događaja koji potječu od detekcije neutrona i γ zraka metodom integracije naboja [10]. Amplituda svakog signala se integrira za dva vremenska intervala (kratki i dugi) te se računa tzv. PSD parametar:

$$P_S = 1 - \frac{Q_S}{Q_L} \quad (8)$$

gdje su Q_S i Q_L integrirani naboji odgovarajućeg kratkog i dugog intervala. Detekcije neutrona i γ zraka se pritom jasno razlikuju grupiranjem u dvije cjeline vidljive u grafičkom prikazu ovisnosti PSD amplitude o amplitudi signala [11].

Za akviziciju mjerenja korišten je Teledyne LeCroy WaveRunner 8000 osciloskop [12] koji ima 4 analogna i 16 digitalna kanala, raspon frekvencija $500\text{MHz} - 4\text{GHz}$ te minimalno detektabilno trajanje signala od 2ns .

3 Rezultati i diskusija

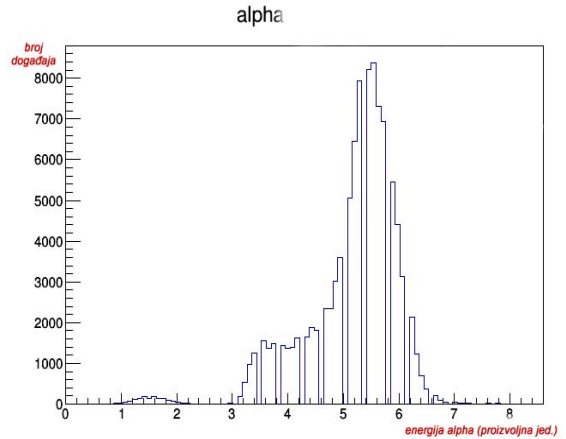
3.1 Detektor α čestica

β^- raspadom tricijske mete povećava se udio ^3He te kao posljedica navedenog, uz reakciju produkcije neutrona ($^3\text{H}(d,n)^4\text{He}$) dolazi i do reakcije produkcije protona



Dobiveni proton energije $\approx 15,4\text{MeV}$ prolaskom kroz metalnu stijenku držača mete elastičnim sudarima gubi dio svoje energije, a prolaskom kroz zrak dolazi do nuklearnih interakcija sa

atomima ^{12}C , ^{14}N i ^{16}O stoga je doseg protona manji od $1,5\text{m}$ [13] što osigurava da neće biti detektiran tekućim scintilatorom (udaljenost detektora neutrona je $2,7\text{m}$). No, α čestica koja potječe iz reakcije deuterona na ^3He doprinosi ukupnome signalu sa silicijskog detektora. Zbog sličnih masa atoma ^3He i ^3H te sličnih Q vrijednosti, razlika srednjih energija α čestica ovih dviju reakcija iznosi $\Delta E = 100\text{keV}$ što je usporedivo sa rezolucijom korištenog silicijskog detektora te otežava daljnju analizu mjerenja.



Slika 5: Ovisnost broja detektiranih događaja o amplitudi α čestica (run21)

Analizom signala sa silicijskog detektora nije moguće sa sigurnošću utvrditi doprinos signala koji potječe od detekcije α čestica iz reakcije na ^3He , $E_\alpha = 3,09\text{MeV}$ i onih na ^3H , $E_\alpha = 2,95\text{MeV}$ (Slika 5). Valja napomenuti da nije izvršena kalibracija samog silicijevog detektora pa su iznosi amplituda izraženi u proizvoljnom mjerilu.

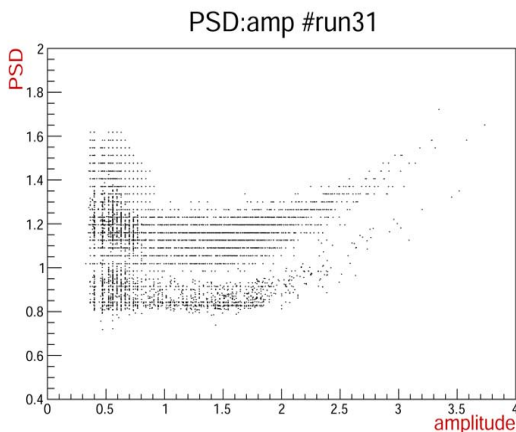
3.2 Detektor neutrona

Slika 6. prikazuje ovisnost PSD amplitude o amplitudi samog signala sa EJ-309 detektora. Uočljive su dvije grupacije detektiranih događaja pri čemu grupa sa nižim PSD amplitudama odgovara γ zračenju, a ona sa višim neutronima.

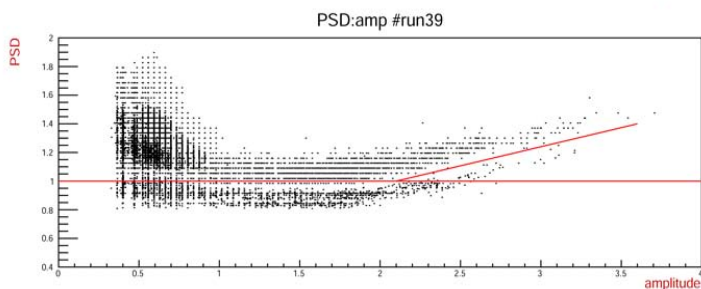
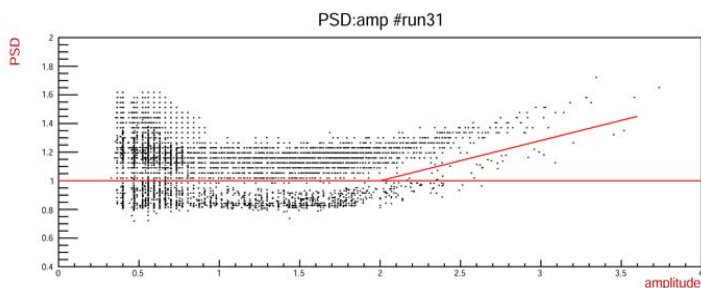
S obzirom da je jedinica za diskriminaciju široke namjene tj. mora biti primjenjiva za različite vrste i oblike kućišta tekućih scintilatora, kao i za različite fotomultiplikatorske cijevi, zahtijeva prilagođavanje postavki za pojedini eksperimentalni postav. Za to služe tri parametra (Ndis, Walk i Qwin) pomoću kojih se mijenja pozicija mjerenja u odnosu na konstantan diskriminacijski prag (rez) od 1V koji odvaja neutrone od γ zraka. Diskriminacijski prag se može predočiti horizontalnom linijom pri 1V , a mijenjanjem parametara nastoji se prilagoditi mjerenja tako da svi događaji koji se pripisuju γ zrakama budu ispod praga. "Ndis" vertikalno pomiče PSD izlaz, "Walk" smanjuje zakrivljenost pri niskim amplitudama, a "Qwin" se koristi za finu optimizaciju te ujedno utječe na "Walk" parametar.

Dva seta mjerenja sa različitim postavkama jedinice za diskriminaciju prikazani su na Slici 7. Iako se oba seta vizualno

čine identičnim (izuzev većeg broja događaja koji je posljedica duljeg perioda prikupljanja podataka), integracijom broja događaja koji su iznad diskriminacijskog praga, ali se pripisuju grupaciji γ zraka (područje omeđeno crvenim linijama) može se dobiti postotak krivoidentificiranih γ . Udio γ zraka koje PSD jedinica identificira kao neutrone za prvi set mjerenja (run 31, $walk = 85, ndis = 140, qwin = 100$) iznosi 4,2%, dok je taj udio promjenom parametara smanjen na 2,9% u drugom setu (run39, $walk = 88, ndis = 144, qwin = 105$).



Slika 6: Ovisnost PSD amplitude o amplitudi prikupljenih signala (run31)



Slika 7: Ovisnost PSD amplitude o amplitudi prikupljenih signala uz grafički rez koji razdvaja neutrone od γ zraka (run31 i run39)

Navedene postavke PSD jedinice mogle bi se još bolje optimizirati, no zbog nelinearne ovisnosti jednog od parametara o druga dva, taj proces je dugotrajan te je u planu nastavka rada.

4 Zaključak

Korištenjem MPD-8 jedinice za diskriminaciju čestica na temelju oblika signala uspješno je postignuta eliminacija doprinosa γ zračenja kod detekcije neutrona EJ-309 tekućim scintilatorom pri čemu udio krivoidentificiranog podrijetla signala iznosi 2,9%.

U nastavku rada potrebno je postići bolju različitost energija α čestica detektiranih silicijskim poluvodičkim detektorom što bi omogućilo mjerenje koincidencije događaja tj. istovremenu detekciju neutrona i odgovarajuće α čestice u svrhu određivanja efikasnosti samog detektora neutrona.

Literatura

- [1] D.Reilly et all: Passive Nondestructive Assay of Nuclear Materials, Los Alamos National Laboratory, 1991.
- [2] B.M.Javorski, A.A.Detlaf: Priručnik iz fizike, Golden marketing-Tehnička knjiga, Zagreb, 2008.
- [3] Laboratorij za nuklearnu fiziku, IRB <http://www.irb.hr/Istrazivanja/Kapitalna-oprema/Cockcroft-Walton-akcelerator-300-keV-neutronski-generator>
- [4] F. Hinterberger: Electrostatic accelerators, <https://cds.cern.ch/record/1005042/files/p95.pdf>
- [5] N. Angert: Ion sources, http://www.iaea.org/inis/collection/NCLCollectionStore/_Public/26/001/26001458.pdf
- [6] Nuclear Data Services, IAEA <https://www.nds.iaea.org/relnsd/vcharthtml/VChartHTML.html>
- [7] ELJEN Technology, EJ-309 <http://www.eljentechnology.com/products/liquid-scintillators/ej-301-ej-309>
- [8] C.Iliadis: Nuclear Physics of Stars, WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, 2007.
- [9] mesytec GmbH & Co. KG http://www.mesytec.com/product-list.html#constant_fraction
- [10] J.K.Polack, M.Flaska et all: An algorithm for charge-integration, pulse-shape discrimination and estimation of neutron/photon misclassification in organic scintillators, Nucl. Instr. Meth. Phys. Res. A, Vol.795, 2015
- [11] A.Tomanin et all: Characterization of acubic EJ-309 liquid scintillator detector, Nucl. Instr. Meth. Phys. Res. A, Vol.756, 2014
- [12] Teledyne LeCroy GmbH <http://teledyneleeroy.com/oscilloscope/oscilloscopeseries.aspx?mseries=511>
- [13] S. Braccini, A. Ereditato, K. P. Nesteruk: Study of the radioactivity induced in air by a 15-MeV proton beam, Radiat Prot Dosimetry, 2015 Feb;163(3)