

**ДРУШТВО ЗА ЗАШТИТУ ОД ЗРАЧЕЊА
СРБИЈЕ И ЦРНЕ ГОРЕ**



**ЗБОРНИК
РАДОВА**

**XXIX СИМПОЗИЈУМ ДЗЗСЦГ
Сребрно језеро
27- 29. септембар 2017. године**

**Београд
2017. године**

**SOCIETY FOR RADIATION PROTECTION OF
SERBIA AND MONTENEGRO**



PROCEEDINGS

**XXIX SYMPOSIUM DZZSCG
Srebrno jezero
27- 29. September 2017**

**Belgrade
2017**

ЗБОРНИК РАДОВА

XXIX СИМПОЗИЈУМ ДЗЗСЦГ
27-29.09.2017.

Издавачи:

Институт за нуклеарне науке „Винча“
Друштво за заштиту од зрачења Србије и Црне Горе

За извршног издавача:

Др Борислав Грубор

Уредници:

Др Јелена Станковић Петровић
Др Гордана Пантелић

ISBN 978-86-7306-144-3

© Institut za nuklearne nauke „Vinča“

Техничка обрада:

Јелена Станковић Петровић, Гордана Пантелић

Штампа:

Институт за нуклеарне науке ”Винча”, Мике Петровића Аласа 12-14, 11351
Винча, Београд, Србија

Тираж:

150 примерака

Година издања:

Септембар 2017.

ODREĐIVANJE ENERGETSKOG SPEKTRA NEUTRONA PRISUTNOG U GAMA SPEKTROMETRIJSKIM MERENJIMA SA GERMANIJUMSKIM DETEKTORIMA

Nikola JOVANČEVIĆ¹, David KNEŽEVIĆ^{1,2}, Miodrag KRMAR¹, Jovana NIKOLOV¹, Nataša TODOROVIĆ¹, Jovana PETROVIĆ¹

1) *Univerzitet u Novom Sadu, Prirodno-matematički fakultet, Departman za fiziku, Novi Sad, Republika Srbija, nikola.jovancevic@df.uns.ac.rs*

2) *Institut za fiziku, Univerzitet u Beogradu, Republika Srbija*

SADRŽAJ

Određivanje prisustva neutrona tokom niskofonskih gama spektrometrijskih merenja je od posebne važnosti. Zbog toga je u ovom radu analiziran način određivanja energetskog spektra neutrona prisutnog u merenjima sa HPGe detektorima. Ovaj metod se zasniva na korišćenju metoda dekonvolucije. Za to je neophodno poznavati gama aktivnost indukovanu neutronske reakcijama sa različitim izotopima germanijuma kao i efikasne preseke za date neutronske reakcije. Ovaj pristup je testiran merenjima sa fisionim izvorom neutrona ²⁵²Cf koji je bio postavljen u blizini HPGe detektora. Dobijeni rezultati pokazuju da ovaj metod može pružiti pouzdane podatke o obliku energetskog spektra neutrona tokom gama spektrometrijskih merenja.

1. UVOD

Neutronske reakcije sa Ge-detektorom i okolnim materijalima mogu da proizvedu merljivu gama aktivnost putem reakcija zahvata i rasejanja [1]. Kako su neutroni jedan od primarnih izvora fona u gama spektrometriji, analiziranje neutronske prisustva je od velikog značaja u niskofonskim eksperimentima, kao i u različitim promptnim neutronske aktivacionim eksperimentima [2]. Analiza neutronske interakcije, shodno tome, je bila predmet mnogih istraživanja [1-10]. Međutim, i dalje ostaje problem određivanja neutronske spektra u Ge-detektoru tokom gama spektrometrijskih merenja [11-13]. U prethodnim istraživanjima koristili smo proceduru dekonvolucije za procenu neutronske spektra koji potiče od kosmičkog zračenja u germanijumskom detektoru [14]. Ova procedura polazi od početnog (pretpostavljenog) spektra, koji se određuje na osnovu eksperimentalno ili teorijski određenih dostupnih podataka. Postupak dekonvolucije modifikuje početni spektar tako da se dobije najbolje slaganje između izmerenih vrednosti gama aktivnosti (u našem slučaju germanijumskih izotopa nakon interakcije sa neutronima) i izračunatih vrednosti gama aktivnosti korišćenjem dekonvolucijom dobijenog neutronske spektra i dostupnih podataka za efikasne preseke za nuklearne reakcije koje su od interesa. Ovaj metod bi trebao da bude univerzalan i primenjiv u svim merenjima kada su u okruženju germanijumskih detektora prisutni neutroni, kao na primer u slučaju promptnih neutronske aktivacionih merenja. U ovom radu smo uporedili izmerene aktivnosti germanijumskih izotopa i uporedili ih sa vrednostima dobijenim računom, pri čemu je kao izvor neutrona korišćen ²⁵²Cf.

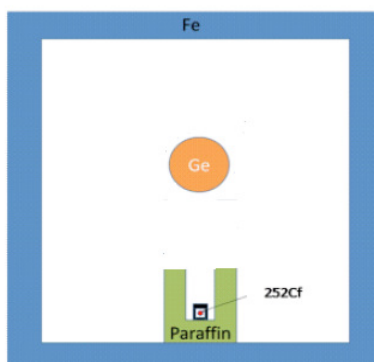
Poređenje ovih vrednosti je neophodno da bi se dobio preliminarni rezultat koji će se koristiti u postupku dekonvolucije za dobijanje neutronske spektra prilikom merenja sa fisionim izvorom neutrona ²⁵²Cf [15, 16]. Poređenjem izračunatih i izmerenih vrednosti

gama aktivnosti moguće je doći do informacija koje će poboljšati početni spektar koji se onda može koristiti za procedure dekonvolucije.

2. EKSPERIMENTALNA POSTAVKA

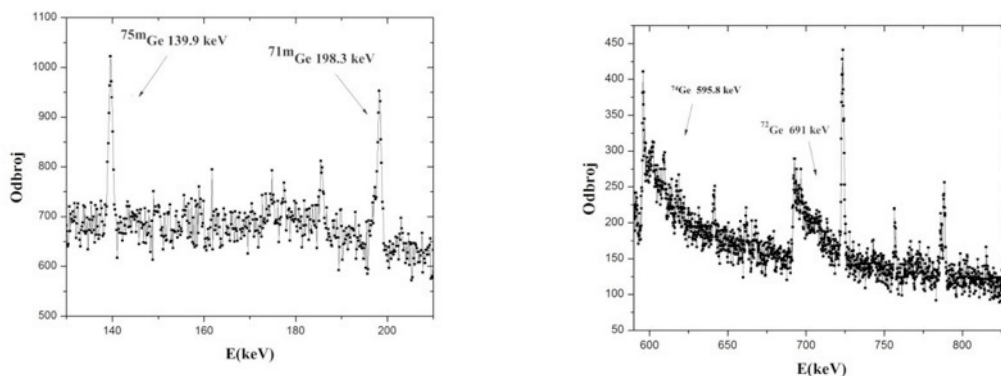
Merenje je izvršeno u Laboratoriji za gama spektroskopiju, Katedre za nuklearnu fiziku, u okviru Departmana za fiziku, Prirodno-matematičkog fakulteta u Novom Sadu. Za merenje gama aktivnosti indukovane neutronima, korišćen je HPGe detektor proizvođača Canberra, serijskog broja G.C.2520-7600. Detektor je n-tipa, relativne efikasnosti 22.3% i aktivne zapremine 119 cm³. Detektor se tokom merenja nalazio unutar gvozdene zaštite zapremine 1 m³ sa zidovima debljine 25 cm i mase oko 20 t.

Izvor neutrona u ovom eksperimentu je bio, kao što je ranije pomenuto, ²⁵²Cf aktivnosti 4,5 · 10³ n/s u 4π sr. ²⁵²Cf ima dva moguća kanala raspada: alfa raspad (96,9%) i spontanu fisiju (3,2%). Period poluraspada za spontanu fisiju je T_{1/2}=2,645 godina i prilikom svake spontane fisije emituje se u proseku 3,77 neutrona.



Slika 1. Šematski prikaz eksperimenta

²⁵²Cf se nalazio u Marineli posudi obloženoj parafinom sa svih strane osim sa strane koja je usmerena ka HPGe detektoru, kao što je prikazano na slici 1. Kako bi se apsorbovalo gama zračenje koje potiče od raspada fisionih potomaka nakupljenih u ²⁵²Cf, izvor je prekriven gvozdenom pločicom debljine 8 mm. Merenje je trajalo 151367 s, što je omogućilo zadovoljavajuću statistiku detektovanih gama kvanata nastalih prilikom interakcije neutrona sa jezgrima germanijuma.



Slika 2. Delovi spektra sa detektovanim neutronima indukovanim gama pikovima koji potiču od (n,γ) reakcija (leva slika) i (n,n') reakcija (desno)

3. REZULTATI

3.1. DETEKTOVANE AKTIVNOSTI

Na slici 2 prikazani su delovi spektra sa karakterističnim gama pikovima koji potiču od neutronske interakcije sa izotopima germanijuma [9, 17]. Identifikovane gama linije, njihovo poreklo i intenziteti su prikazani u tabeli 1. Od svih detektovanih linija izabrane su one sa najboljom statistikom [9]. Za intenzitete standardnih spektroskopskih pikova Gausovskog oblika (139 keV $^{74}\text{Ge}(n,\gamma)^{75\text{m}}\text{Ge}$ i 198 keV $^{70}\text{Ge}(n,\gamma)^{71\text{m}}\text{Ge}$) korišćen je programski paket GENIE2000. Intenzitet asimetričnih (n,n') gama pikova (691,0 keV $^{72}\text{Ge}(n,n')^{72}\text{Ge}$ i 595,8 keV $^{74}\text{Ge}(n,n')^{74}\text{Ge}$), određen je korišćenjem funkcije za fitovanje [4,17]:

$$C(E) = a_0 \text{ERFC} \left[-\frac{E-E_0}{\sigma_0} \right] \cdot \text{Exp} \left[-\frac{E-E_0}{\Delta} \right] + \sum_{i=1}^n a_i \cdot \text{Exp} \left[-\frac{1}{2\sigma_i^2} (E-E_i)^2 \right] + F \quad (1)$$

Tabela 1. Opšte informacije o detektovanim gama linijama i odgovarajućim vrednostima intenziteta

Energija [keV]	Nuklid	Reakcije	Intenzitet [s ⁻¹]
139,9	$^{75\text{m}}\text{Ge}$	$^{74}\text{Ge}(n,\gamma)^{75\text{m}}\text{Ge}$ $^{76}\text{Ge}(n,2n)^{75\text{m}}\text{Ge}$	0,0136(8)
198,3	$^{71\text{m}}\text{Ge}$	$^{70}\text{Ge}(n,\gamma)^{71\text{m}}\text{Ge}$ $^{72}\text{Ge}(n,2n)^{71\text{m}}\text{Ge}$	0,0159(8)
595,8	^{74}Ge	$^{74}\text{Ge}(n,n')^{74}\text{Ge}$	0,0559(27)
691,3	^{72}Ge	$^{72}\text{Ge}(n,n')^{72}\text{Ge}$	0,068(5)

U jednačini (1), prvi član opisuje oblik Ge(n,n') gama pika. U drugom članu, izraz unutar sume je Gausova funkcija koja odgovara simetričnim gama linijama u regionu koji se fituje. Ove linije mogu biti Ge(n,γ) gama linije ili bilo koje druge linije koje pripadaju fonu. Parametar F označava fonski kontinuum za koji se prilikom fitovanja pretpostavlja da je linearna funkcija. Parametri fita su a_0 , a_i , E_0 , E_i , σ_0 , σ_i i Δ . U ovom slučaju E_0 i E_i predstavljaju energije detektovanih gama linija; a_0 i a_i su maksimalne amplitude ovih linija. Parametri σ_0 i σ_i su određeni širinom linije na polovini maksimuma i odgovaraju energetske rezoluciji detektora. Parametar Δ određuje karakteristike eksponencijalnog repa Ge(n,n') linija. Varijacijom parametara fita linija i fona, kao i varijacijom energetskog opsega unutar kojeg je izvršeno fitovanje dobijeni su optimalni rezultati [4]. Za fitovanje je korišćen ROOT softver za analizu podataka [18]. Pomoću ovog fita obrađen je i intenzitet gama pika germanijuma energije od 595,8 keV-a koji nastaje i usled (n,γ) i (n,n') reakcija, tj. interakcijama i sporih i brzih neutrona. Ovo je omogućilo razdvajanje ove linije za potrebe analize na simetričnu gama liniju koja potiče od zahvata i asimetričnu gama liniju koja potiče od neelastičnog rasejanja [19]. Nakon određivanja intenziteta gama linija od interesa, saturacione aktivnosti određenih germanijumskih izotopa po atomu prirodnog germanijuma su izračunate kao [9, 12]:

$$A_k = \frac{C \cdot M}{t \cdot p \cdot (\epsilon + \alpha) \cdot m \cdot N_a} \quad (2)$$

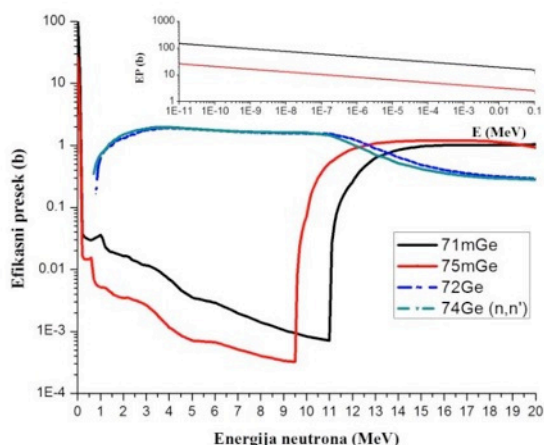
gde C predstavlja detektovani odbroj gama linije, t je vreme merenja, p je verovatnoća emisije gama linije, α je konverzioni koeficijent, ε je efikasnost u piku pune absorpcije (izračunata pomoću GEANT4 softverskog paketa), M je molarna masa germanijuma, m je masa germanijumskog kristala i N_a Avogadrova konstanta. Aktivnosti dobijene korišćenjem jednačine (2), A_k , su prikazane u tabeli 2.

3.2. RAČUNATE AKTIVNOSTI

Metod za računanje aktivnosti germanijumskih izotopa se zasniva na činjenici da je neutronima indukovana aktivnost za aktivirani radionuklid, k , proporcionalna proizvodu efikasnog preseka za proizvodnju određenog radionuklida i neutronskog fluksa [20]:

$$A_k = \sum_i \sigma_{ik} \Phi_i ; i = 1, 2, 3 \dots c; \quad k = 1, 2, 3 \dots m \quad (3)$$

gde su σ_{ik} odgovarajuće funkcije efikasnog preseka, a Φ_i je neutronski fluks za energijski prozor E_i . Indeks k prolazi kroz brojeve korišćenih radionuklida, a m predstavlja ukupan broj radionuklida. Maksimalna vrednost indeksa i , c , označava broj energijskih prozora u neutronskom spektru i funkciji efikasnog preseka. Iz jednačine (3), moguće je proceniti očekivane vrednosti za aktivnosti germanijumskih izotopa. U ovom radu, aktivnosti od interesa, A_k , predstavljaju aktivnosti izotopa germanijuma koje su indukovane različitim neutronskim reakcijama. Vrednosti σ_{ik} za reakcije od interesa su preuzete iz ENDF baze podataka za efikasne preseke, preciznije iz ENDF/B-VII.1 biblioteke [21], kao što je prikazano na slici 3.



Slika 3. Funkcije efikasnih preseka za proizvodnju Ge izotopa putem neutronskih reakcija (sa uvećanim niskoenergetskim delom)

Za neutronski spektar je korišćen spektar ^{252}Cf čiji je oblik dobro poznat, bez ikakvih modifikacija njegovog oblika, iako je realno za očekivati da je u našoj eksperimentalnoj postavci spektar neutrona u detektoru drugačiji od spektra koji emituje izvor. Ovo je urađeno upravo iz razloga da bi se poređenjem merenih i izračunatih vrednosti aktivnosti izotopa germanijuma moglo zaključiti kakve modifikacije treba izvršiti nad spektrom ^{252}Cf tako da on realnije opisuje spektar neutrona unutar samog detektora. Vrednosti ovako dobijenih aktivnosti su prikazani u tabeli 2. Treba napomenuti da je prilikom

izračunavanja aktivnosti izotopa germanijuma korišćen faktor normiranja koji treba da omogući poređenje izmerenih i izračunatih vrednosti jer je prilikom računanja ukupan fluks neutrona normiran na jediničnu vrednost.

4. DISKUSIJA I ZAKLJUČAK

U tabeli 2 prikazane su izmerene i izračunate aktivnosti, kao i njihovi odnosi. Uočava se da se za izotope germanijuma ^{71m}Ge i ^{72}Ge izračunate vrednosti relativno dobro slažu sa izmerenim vrednostima, dok su kod ^{74}Ge i ^{75m}Ge izmerene vrednosti veće oko 2,5 i 4 puta od izračunatih, respektivno. Odstupanja računatih i izmerenih vrednosti za izotop ^{75m}Ge upućuju na mogućnost značajnijeg uticaja interakcija brzih neutrona na intenzitet gama pika od 139,9 keV, što je i bio predmet naše prethodne studije [19]. Neslaganje izmerenih i računatih vrednosti za ^{74}Ge može biti objašnjeno značajnijim doprinosom $^{73}\text{Ge}(n,\gamma)^{74}\text{Ge}$ detektovanom odbroju gama pika energije od 595,8 keV. Ova odstupanja postavljaju i pitanje validnosti dostupnih efikasnih preseka za korišćene neutronske reakcije.

Ovde prikazani rezultati upućuju na to da promptni fisioni neutronske spektr ^{252}Cf ne može na najbolji način objasniti prisutan spektar neutrona tokom izvršenog merenja. To može biti posledica usporavanja i termalizacije neutrona u materijalima prisutnim u okruženju detektora. Takođe, za dalju analizu neophodno je u račun uključiti i druge neutronske reakcije sa izotopima germanijuma i izvršiti proveru validnosti dostupnih podataka za efikasne preseke za interakciju neutrona sa jezgrima germanijuma.

Tabela 2. Intenziteti, izmerene i računate aktivnosti za reakcije od interesa, kao i odnosi izmerenih i računatih vrednosti

Izotop	Izmerena aktivnost [10^{-26} Bq]	Računata aktivnost [10^{-26} Bq]	Odnos aktivnosti (I/R)
^{71m}Ge	0,506(27)	0,63	0,80
^{72}Ge	1,31(9)	1,57	0,83
^{74}Ge	7,1(3)	1,74	4,08
^{75m}Ge	0,288(16)	0,112	2,57

5. LITERATURA

- [1] G. Heusser, Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A 369 (1996) 539.
- [2] A. Dragić, et al., Phys. Procedia 59 (2014) 125.
- [3] R. Wordel, et al., Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A 369 (1996) 557.
- [4] E. Gete, et al., Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A 388 (1997) 212.
- [5] N. Jovančević, M. Krmar, Phys. Procedia 31 (2012) 93–98.
- [6] Y. Feige, et al., J. Geophys. Res. 73 (1968) 3135–3142.
- [7] G.P. Škoro, et al., Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A 316 (1992) 333.
- [8] N. Jovančević, M. Krmar, Appl. Rad. Isot. 69 (2011) 629–635.
- [9] N. Jovančević, et al., Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A 612 (2009) 303–308.
- [10] G. Heusser, Background in ionizing radiation detection, in: M. Garcia-Leon, R. Gracia-Tenorio (Eds.), Low-Level Measurements of Radioactivity in the Environment, Word Scientific, Singapore, 1994, pp. 69–112.

- [11] C. Chund, Y.R. Chen, Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A 301 (1991) 328–336.
- [12] J.E. Naye, Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A 368 (1996) 832–846.
- [13] G. Fehrenbacher, et al., Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A 372 (1996) 239.
- [14] D. Knežević, N. Jovančević, M. Krmar, J. Petrović, Modeling of neutron spectrum in the gamma spectroscopy measurements with Ge-detectors, Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A, 833 (2016), p. 23-26.
- [15] C.W. Reich, W. Mannhart, T. England, IAEA Technical Report INDC(NDS)220/L, p.305, IAEA, Vienna (1989).
- [16] International Reactor Dosimetry and Fusion File, IAEA Data, <https://www-nds.iaea.org/IRDF>.
- [17] T. Siiskonen, H. Toivonen, Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A 540 (2005) 403.
- [18] ROOT cern, (<https://root.cern.ch>).
- [19] B. Anđelić, D. Knežević, N. Jovančević, M. Krmar, J. Petrović, A. Toth, Ž. Medić, J. Hansman, Presence of neutrons in the low-level background environment estimated by the analysis of the 595.8 keV gamma peak, Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A, 852 (2017), p. 80–84.
- [20] A. Trkov, V. Radulović, J. Radioanal. Nucl. Chem. 304 (2015) 763–778.
- [21] The ENDF, Evaluated Nuclear Data File, (<https://www-nds.iaea.org/exfor/endl.htm>).

DETERMINATION OF NEUTRON ENERGY SPECTRA PRESENCE IN GAMMA SPECTROSCOPIC MEASUREMENTS USING GE-DETECTORS

**Nikola JOVANČEVIĆ¹, David KNEŽEVIĆ^{1,2}, Miodrag KRMAR¹, Jovana
NIKOLOV¹, Nataša TODOROVIĆ¹, Jovana PETROVIĆ¹**

1) *University of Novi Sad, Faculty of Sciences, Department of Physics, Novi Sad, Serbia, nikola.jovancevic@df.uns.ac.rs*

2) *Institute of Physics, Pregrevica 118, University of Belgrade, Belgrade, Serbia*

ABSTRACT

Determination of neutron spectra in the Ge-detector during low-level gamma spectroscopy measurements is of great importance. Thus, in this paper we analyzed the method for the determination of neutron energy spectra present during measurements with HPGe detectors. This method is based on using the deconvolution procedure. It requires the knowledge of neutron induced gamma activities of Ge isotopes and the cross section data for the neutron reactions of interest. This approach was tested with measurements that used the fission neutron source ²⁵²Cf placed in proximity of the HPGe detector. Results show that this method can provide reliable data about the shape of neutron energy spectrum during gamma spectroscopy measurements.