

**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.

ОДРЕЂИВАЊЕ КОРЕКЦИОНИХ ФАКТОРА ЗА КОИНЦИДЕНТНО СУМИРАЊЕ У СЛУЧАЈУ ТАЧКАСТОГ ИЗВОРА ^{88}Y

Александар Јевремовић¹, Александар Кандић¹, Мирјана Ђурашевић¹, Ивана Вуканац¹, Бојан Шешлак¹, Зоран Милошевић¹ и Јован Пузовић²

1) *Универзитет у Београду, Институт за нуклеарне науке „Винча“,
Лабораторија за нуклеарну и плазма физику, Београд, Србија,*

ajejremovic@vinca.rs

2) *Универзитет у Београду, Физички факултет, Београд, Србија,*

jovan.puzovic@cern.ch

САДРЖАЈ

У гама спектрометрији се често сусрећемо са ефектом коинцидентног сумирања, а самим тим постоји потреба за одређивањем корекционих фактора. Циљ истраживања описаног у овом раду је поређење вредности корекционих фактора за тачкасти извор ^{88}Y добијених помоћу софтверског пакета GESPECOR (Монте Карло методом) и експериментално добијених вредности. Мерења су обављена помоћу полупроводничког HPGe спектрометра, при чему је тачкасти извор био позициониран на аксијалној оси детектора на девет различитих растојања од капе детектора. Формиран је систем једначина, који осим нуклеарних података, као улазне параметре користи и експериментално добијене вредности тоталног одброја у целом спектру, као и одброја испод фотопикова. На основу решавања система једначина одређени су корекциони фактори за коинцидентно сумирање. Упоредивањем резултата, утврђено је да се вредности корекционих фактора добијених помоћу ове две методе разликују до 3 %.

1. УВОД

Ефекат коинцидентног сумирања се дешава када се при распаду радионуклида, каскадно емитује два или више гама фотона у временском интервалу који је знатно мањи од времена разлагања детекторског система/спектрометра. Тада постоји вероватноћа да ће ови фотони бити детектовани као један догађај, чија ће енергија одговарати суми њихових појединачних енергија. Ефекат коинцидентног сумирања гама фотона на овај начин доводи до губитка одброја испод фотопикова, што има за последицу повећање одброја испод сумационог фотопика. Тада се мора извршити корекција ефикасности за појединачне фотопикове. Ефекат коинцидентног сумирања зависи од шеме распада, а такође зависи и од просторног угла под којим детектор види радиоактивни извор, па је за блиске геометрије, овај ефекат доминантнији, док његова вредност опада са повећањем растојања извор-детектор [1]. Одређивање корекција за ефекат коинцидентних сумација у гама спектрометрији је био тема многих значајних публикација [2, 3, 4, 5], с тим што је у протекле две деценије, решавање овог проблема добило нову димензију увођењем Монте-Карло метода [6, 7]. За потребе овог истраживања на полупроводничком HPGe спектрометру мерен је тачкасти извор ^{88}Y аксијално постављен на 9 различитих растојања у односу на детектор. На основу ових мерења добијене су

експерименталне вредности које су коришћене за израчунавање корекционих фактора. У овом раду је приказано поређење вредности корекционих фактора израчунатих Монте-Карло симулацијом помоћу софтверског пакета GESPECOR v4.2. (Germanium Spectrometry Correction Factors) и експериментално добијених вредности.

2. ОДРЕЂИВАЊЕ КОРЕКЦИОНИХ ФАКТОРА У СЛУЧАЈУ ^{88}Y

Радионуклид ^{88}Y има релативно једноставну шему распада. ^{88}Y се распада у побуђена стања ^{88}Sr на два начина: електронским захватом и позитронским распадом, који се може занемарити. При распаду се емитију три гама фотона енергија $E_1=898,047$ keV (93,7 %), $E_2=1836,09$ keV (99,346 %) и $E_3=2734,137$ keV (0,608 %) [8]. При емитовању гама фотона са енергијама E_1 и E_2 у каскади, може доћи до њиховог коинцидентног сумирања. У присуству овог ефекта доћи ће до губитка одброја испод фотопикова на енергијама 898,047 keV и 1836,09 keV, а до повећања одброја испод сумационог пика на енергији 2734,137 keV.

2.1. ТЕОРИЈСКИ ПРИСТУП ЕКСПЕРИМЕНТАЛНОМ ОДРЕЂИВАЊУ КОРЕКЦИОНИХ ФАКТОРА

Ради потребе израчунавања корекционих фактора формиран је следећи систем једначина:

$$N_1 = A \cdot p_1 \cdot \varepsilon_1 (1 - p_2 \cdot \varepsilon_{t2}), \quad (1)$$

$$N_2 = A \cdot p_2 \cdot \varepsilon_2 (1 - p_1 \cdot \varepsilon_{t1}), \quad (2)$$

$$N_3 = A(p_3 \cdot \varepsilon_3 + p_1 \cdot \varepsilon_1 \cdot p_2 \cdot \varepsilon_2), \quad (3)$$

$$T = A(p_1 \cdot \varepsilon_{t1} + p_2 \cdot \varepsilon_{t2} - p_1 \cdot p_2 \cdot \varepsilon_{t1} \cdot \varepsilon_{t2}), \quad (4)$$

где су:

N_1 , N_2 и N_3 - нето одброји испод фотопикова који одговарају енергијама E_1 , E_2 и E_3 ,
 T - тотални одброј целог спектра,

A - активност извора,

p_1 , p_2 и p_3 - приноси фотопикова који одговарају енергијама E_1 , E_2 и E_3 ,

ε_1 , ε_2 и ε_3 - ефикасности фотопикова које одговарају енергијама E_1 , E_2 и E_3 и

ε_{t1} , ε_{t2} и ε_{t3} - тоталне ефикасности које одговарају енергијама E_1 , E_2 и E_3 .

Једначина (3) се показала као нестабилна због велике статистичке мерне несигурности нето одброја N_3 . Због тога је систем формиран од једначина (1), (2) и (4), тако да је добијено три једначине са четири непознате. Решавање система једначина је урађено увођењем следеће апроксимације: $\frac{\varepsilon_{t1}}{\varepsilon_1} = \sqrt{k}E_1 + 1$ и $\frac{\varepsilon_{t2}}{\varepsilon_2} = \sqrt{k}E_2 + 1$, где је k однос тоталне ефикасности и ефикасности фотопика. За решавање овог система једначина коришћен је софтверски пакет Matematika v.5.0 (Wolfram Research Company). Решавањем система једначина добијене су кориговане ефикасности ε'_i , док су некориговане ефикасности израчунате по формули:

$$\varepsilon_i = \frac{N_i/t_m}{p_i \cdot A}, \quad i = 1, 2. \quad (5)$$

Корекциони фактори су добијени као количник ове две вредности:

$$K_i = \frac{\varepsilon_i'}{\varepsilon_i}, \quad i = 1, 2. \quad (6)$$

2.2. НУМЕРИЧКИ ПРИСТУП ОДРЕЂИВАЊУ КОРЕКЦИОНИХ ФАКТОРА ПОМОЋУ GESPECOR-A

GESPECOR је један од софтверских пакета који пружа могућност директног израчунавања корекционих фактора за ефекат коинцидентних сумација, користећи Монте-Карло симулациони метод [9]. Метод се заснива на симулацији проласка великог броја фотона кроз одређени медијум. У симулацију могу бити укључене интеракције фотона у узорку, детектору или неком другом релевантном слоју. Ради прорачуна корекционих фактора, у симулацији су дефинисани параметри детекторског система и радиоактивног извора ^{88}Y , који су се односили на њихову геометрију, тип детектора (HPGe) као и материјал од кога су направљени. Пре пуштања симулације у рад, улазни број фотона је подешен на 10^6 , а такође је подешен и параметар растојања извор-детектор. Корекциони фактори су прорачунати за енергије 898 keV и 1836 keV.

3. ЕКСПЕРИМЕНТАЛНА ПОСТАВКА И РЕЗУЛТАТИ

За детекцију гама зрачења је коришћен полупроводнички HPGe детектор, р-типа, GEM30-70, Ortec, са пратећом електроником. Детектор има релативну ефикасност од 35,5 % и резолуцију 1,66 keV на 1332 keV (^{60}Co). Детектор се налази у оловној заштити дебљине 10 cm, домаће производње.

Радиоактивни тачкасти стандард ^{88}Y произведен у Czech Metrology Institute (активност на референтни датум 31. 01. 2017. била је 8388 Bq), мерен је на централној оси детектора на девет различитих растојања од капе детектора, као што је приказано у табели 1. Обрада снимљених спектра обављена је коришћењем програма Genie2000, Canberra. Време мерења је ишло од 2000 s до 100000 s, у зависности од тога на којој позицији се налазио извор. У табели 1 су приказане вредности израчунатих корекционих фактора у случају ^{88}Y , за енергије од 898 keV и 1836 keV, добијених експериментално (K_{1E} и K_{2E}) и Монте-Карло симулацијом (K_{1G} и K_{2G}), као и одступања вредности корекционих фактора добијених експериментално од вредности добијених Монте-Карло симулацијом (ΔK_1 и ΔK_2).

Табела 1. Вредности корекционих фактора за ефекат коинцидентних сумација за ^{88}Y , добијених експериментално и помоћу GESPECOR-a

Растојање [cm]	K_{1E}	K_{1G}	ΔK_1 [%]	K_{2E}	K_{2G}	ΔK_2 [%]
0	1,23182	1,20156	2,52	1,22986	1,24006	-0,90
1,6	1,12558	1,10192	2,15	1,12215	1,11827	0,35
2,4	1,08669	1,06984	1,58	1,08350	1,08029	0,30
3,2	1,06516	1,05050	1,40	1,06195	1,05787	0,39
4	1,05050	1,03756	1,25	1,04774	1,04396	0,36
4,8	1,04020	1,02995	1,00	1,03776	1,03386	0,38
5,6	1,03254	1,02478	0,76	1,03039	1,02696	0,33
6,4	1,02741	1,02008	0,72	1,02543	1,02231	0,30
7,2	1,02366	1,01705	0,65	1,02189	1,01878	0,30

4. ДИСКУСИЈА И ЗАКЉУЧАК

Корекциони фактори добијени експериментално и Монте-Карло симулацијом, имају највеће вредности у контакт геометрији, с обзиром да је на овој позицији вредност просторног угла под којим детектор види извор највећа. Релативна мерна несигурност за Монте-Карло симулацију је добијена варирањем улазних параметара симулације и она за енергије 898 keV и 1836 keV износи мање од 0,7% и 0,8%, респективно, док релативна мерна несигурност за експериментално добијене корекционе факторе износи 1 % у оба случаја. Из табеле 1 се види је највећа разлика између вредности корекционих фактора у контакт геометрији. Експериментално одређени корекциони фактори су углавном већи од корекционих фактора добијених Монте-Карло симулацијом, што је вероватно последица непрецизно дефинисаних улазних параметара симулације који су се односили на геометрију детектора. На основу приказаних резултата за корекционе факторе, установљено је да се међусобно добијене вредности разликују до 3% из чега се може извести закључак да су вредности корекционих фактора добијених Монте-Карло симулацијом у доброј усаглашености са експериментално добијеним вредностима.

Значајност ових разлика проверена је и са статистичког становишта помоћу Студентовог t-теста разлике између аритметичких средина два мала независна узорка, постављањем нулте и алтернативне хипотезе и њиховим доказивањем. Тумачење добијене вредности t-теста се базира на Студентовом t-распореду са одређеним бројем степени слободе и Студентовим таблицама критичких вредности t-распореда. Нулта хипотеза H_0 и алтернативна хипотеза H_A гласе [10]:

H_0 : Не постоји значајна разлика између вредности корекционих фактора добијених експериментално и Монте-Карло симулацијом.

H_A : Постоји значајна разлика између вредности корекционих фактора добијених експериментално и Монте-Карло симулацијом.

За енергије од 898 keV и 1836 keV добијене су t вредности 0,485519 и 0,059238 које су у поређењу са табличном вредношћу $t=2,12$ (за 16 степени слободе и ниво поверења 0,05) мање, чиме се прихвата нулта хипотеза, а одбацује алтернативна. Што значи да и са статистичког становишта може да се изведе закључак да експериментална и Монте-Карло метода дају упоредиве резултате корекционих фактора.

5. ЗАХВАЛНИЦА

Овај рад је урађен у оквиру пројекта 171018 које финансира Министарство за науку Републике Србије.

6. ЛИТЕРАТУРА

- [1] K. Debertin, U. Shotzig; Coincidence summing corections in Ge(Li)-spectrometry at low source-to-detector distance; Nucl. Instrum. Methods 158 (1979) 471
- [2] D. S. Andreev, K. I. Erokhina, V. S. Zvonov, I. Kh. Lemberg; Consideration of cascade transitions in determining the absolute yield of gamma rays, (English translation); Prib. Tekh. Éksp. N°5, (1972), 63-65 - UDC 539-108
- [3] K. Debertin and R. G. Helmer; Gamma and X- ray spectrometry with Semiconductor detectors. North-Holland, Amsterdam; 1988

- [4] T.M. Semkow, G. Mehmood, P. Parekh, M. Virgil; Coincidence summing in gamma-ray spectroscopy, Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., Sect. A 290, (1990) 437- 444
- [5] G. Anil Kumar, I. Mazumdar, D.A. Gothe, Efficiency calibration and coincidence summing correction for large arrays of NaI(Tl) detectors in soccer-ball and castle geometries; Nucl. Instrum. Meth. A 611, (2009), 76-83.
- [6] O.Sima, D. Arnold; Accurate computation of coincidence summing corrections in low level gamma-ray spectrometry; Appl. Radiat. Isot. 53 (2000) 51-56
- [7] D. Arnold, O. Sima; Total versus effective total efficiency in the computation of coincidence summing corrections in gamma-ray spectrometry of volume sources; J. Radional. Nucl. Ch. 248 (2001) 365-370
- [8] Laboratoire National Henri Becquerel, Tables of evaluated data and comments on evaluation, www.nucleide.org/ddep_wg
- [9] Gespecor v.4.2-manual
- [10] www.bio.bg.ac.rs/materijali_predmeta/statistika-studentov-t.test.pdf

DETERMINATION OF COINCIDENCE SUMMING CORRECTION FACTORS FOR ^{88}Y POINT SOURCE

Александар Јевремовић¹, Александар Кандић¹, Мирјана Ђурашевић¹, Ивана Вуканац¹, Бојан Шешлак¹, Зоран Милошевић¹ и Јован Пузовић²

1) *Institute for nuclear sciences „Vinča“, Laboratory for nuclear and plasma physics, University of Belgrade, Belgrade, Serbia, ajevremovic@vinca.rs*

2) *Faculty of Physics, University of Belgrade, Belgrade, Serbia, jovan.puzovic@cern.ch*

ABSTRACT

In gamma ray spectrometry often deals with coincidence summing effect, and therefore calculation of correction factors is necessary. Coincidence summing effect play an important role in HPGe spectrometry at low source-detector distances, due to the large solid angle subtended by the detector at the source. The aim of research described in this paper was to compare values of correction factors for point source ^{88}Y obtained using the software package GESPECOR (Monte-Carlo method) and experimentally obtained values. Measurements were performed using a semiconductor HPGe spectrometer, wherein point source was axially located on detector at nine different distances. The system of equations was formed whereas net areas in full energy peaks as well as in entire spectrum were used as input data. The system was solved and correction factors for point source ^{88}Y were determined. By comparing the obtained values, it was found that correction factors obtained by these two methods have discrepancy less than 3 %.