

Цэвэр германий (HPGe) детектор бүхий гамма-спектрометрийн

гол үзүүлэлтүүдийн судалгаа

Т.Мөнх-Эрдэнэ^{1*}, Н.Батцож¹, Ч.Сайханбаяр¹, Ж.Батмягмар¹, Б.Өсөхбаяр¹, Д.Баатархүү¹,
М.Одсүрэн², Г.Хүүхэнхүү¹

¹ Монгол Улс, Улаанбаатар, Монгол Улсын Их Сургууль, Цөмийн Физикийн Судалгааны Төв

² Монгол Улс, Улаанбаатар, Монгол Улсын Их Сургууль, Инженер технологийн сургууль

Цэвэр германий (HPGe) детектор бүхий гамма-спектрометрийн энергийн тохируулга (energy calibration) болон бүртгэмж (efficiency)-ийг ^{60}Co , ^{137}Cs , ^{152}Eu гамма үүсгүүрүүдийг ашиглан гүйцэтгэв. Мөн энергийн ялгамж (resolution)-ийг ^{60}Co -ийн 1332.5 кэВ ба ^{137}Cs -ийн 661.7 кэВ энергитэй гамма шугамуудын хувьд тодорхойлов. Хэмжилтээр тодорхойлсон үр дүнгүүд уг спектрометрийг үйлдвэрлэсэн компанийн өгсөн үзүүлэлтүүдтэй тохирч байгаа бөгөөд дэлхийн лабораториудын орчин үеийн нарийвчилсан судалгаа шинжилгээнд ашиглагддаг төстэй төхөөрөмжийн өгөгдлүүдийн түвшинд байна.

Түлхүүр үгс: Цэвэр Ge-детектор, гамма-спектрометр, энергийн тохируулга, энергийн ялгамж, бүртгэмж

1.ОРШИЛ

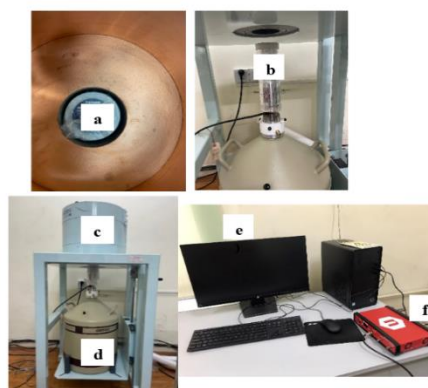
Хагас дамжуулагч германий (Ge) ба цахиур (Si) детекторыг 1960-аад оноос цөмийн физикийн судалгаанд ашиглаж эхэлжээ [1-6]. Эхний үед литий (Li)-г тодорхой зузаантай Ge ба Si-д диффузлэх замаар гаргаж авсан Ge(Li), Si(Li) детекторуудыг хэрэглэж байв. Эдгээр детекторын гол дутагдал нь үргэлж шингэн азотын температурт (-195.75°C) хөргөхгүй бол Li диффузлэх процесс цааш үргэлжлэн Ge буюу Si-ийн гүн рүү тарж үзүүлэлт нь эрс мууддаг [6]. Харин 1970-аад оноос цэвэр Ge (HPGe) гарган авах технологи боловсруулагдсанаар үргэлж хөргөхгүй, зөвхөн хэмжилт хийх үед хөргөдөг детекторыг хэрэглэх болжээ [4-8]. Ge-детектор нь цахиур (Si)-ийг бодвол атомын масс их, электрон нүхний хос үүсгэхэд шаардагдах дундаж энерги нь бага (2.9 эВ) учраас гамма цацрагийг бүртгэхэд илүү тохиромжтой байдаг. Ийм HPGe-детектор бүхий спектрометрийг Олон Улсын Атомын Энергийн Агентлаг (ОУАЭА)-ийн техникийн хамтын ажиллагааны төслөөр МУИС-ийн Цөмийн физикийн судалгааны төв (ЦФСТ)-д авч, ашиглалтанд оруулж байна.

Энэ ажилд уг гамма-спектрометрийн энергийн тохируулга (energy calibration), ялгамж (resolution), бүртгэмж (efficiency) зэрэг практик

хэрэглээ, туршилтанд зайлшгүй шаардлагатай үндсэн үзүүлэлтүүдийг тодорхойлсон тухай өгүүлнэ.

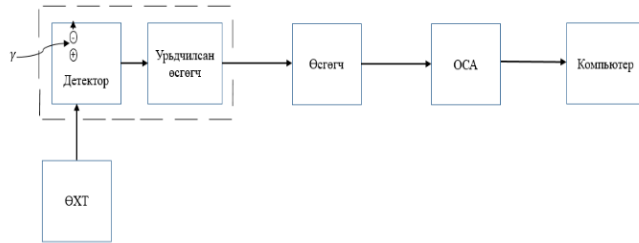
2.СУДАЛГААНЫ БАГАЖ ТӨХӨӨРӨМЖ, АРГАЗҮЙ

Энэхүү гамма-спектрометр нь АНУ-ын ORTEC компанид үйлдвэрлэгдсэн бөгөөд Зураг 1-д үзүүлснээр 0.5мм зузаантай бериллий (Be) цонхтой (a), 159 см^3 эзэлхүүнтэй цэвэр германий-HPGe детектор (b), зэсэн доторлогоотой хар тугалган хамгаалалт (a,c), шингэн азотоор хөргөх зориулалттай 30 литрийн багтаамжтай Дьюарын сав (d), компьютер (e) болон олон сувагт (32000 хүртэл) анализатор (ОСА) (f)-аас бүрэлдэнэ (Зураг1).



Зураг 1. HPGe-детектортой гамма-спектрометр

Уг спектрометрийн системийн ерөнхий схемийг Зураг 2-т үзүүлэв.



Зураг 2. HPGe бүхий гамма-спектрометрийн ерөнхий схем

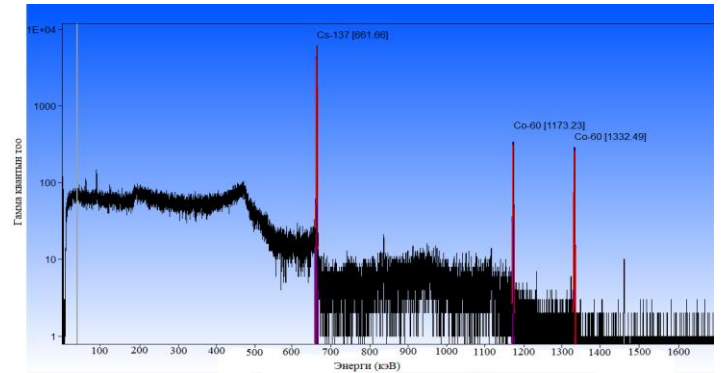
Детекторт туссан гамма-квант, Ge-н атомтай харилцан үйлчилж, электрон нүхний хос үүсгэх бөгөөд эдгээр цэнэг зөөгч нь өндөр хүчдэлийн тэжээлийн цахилгаан орны нөлөөгөөр хөдөлж, гүйдлийн импульс үүсгэж, өсгөгчөөр дамжин ОСА-т очсон сигнал нь компьютерээр боловсруулагдана.

3.ҮР ДҮН, ХЭЛЭЛЦҮҮЛЭГ

3.1 Энергийн тохируулга

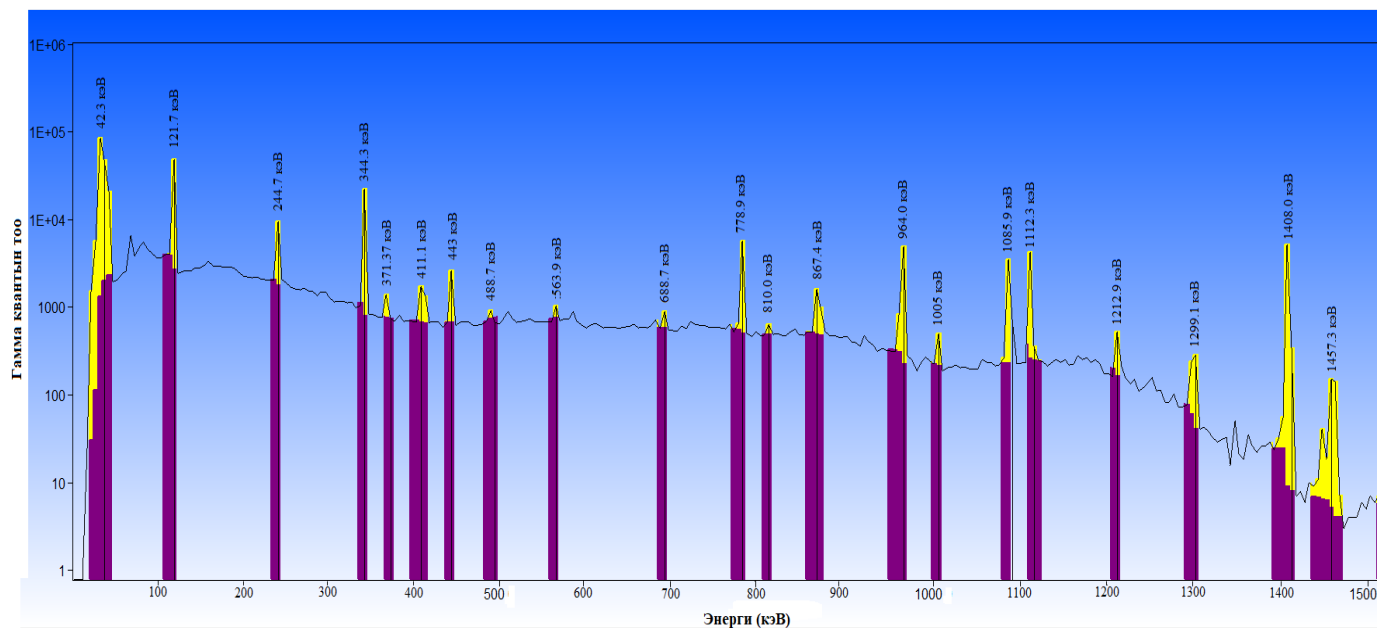
HPGe-детектортой гамма-спектрометрийн энергийн тохируулгыг ^{60}Co , ^{137}Cs , ^{152}Eu гурван

изотопон стандарт гамма-үүсгүүр ашиглан гүйцэтгэв. ^{60}Co , ^{137}Cs үүсгүүрүүдийг детекторын гадаргуугаас 15 см зайд хамт байрлуулж, 1000 с хэмжин гаргаж авсан энергийн спектрийг Зураг 3-т харуулав.



Зураг 3. HPGe-детектортой спектрометрээр хэмжсэн ^{60}Co , ^{137}Cs үүсгүүрийн гамма цацрагийн энергийн спектр

Зураг 3-аас харахад, ^{137}Cs -гийн 661.66 кэВ, ^{60}Co -ын 1173.23 кэВ ба 1332.49 кэВ энергитэй гурван гамма-шугам нь фон болон Комптон сарнилын пик (реак)-ээс тод ялгарсан байна. Дээрхтэй ижил нөхцөлд хэмжсэн ^{152}Eu стандарт үүсгүүрийн гамма-спектрийг Зураг 4-т харуулав.



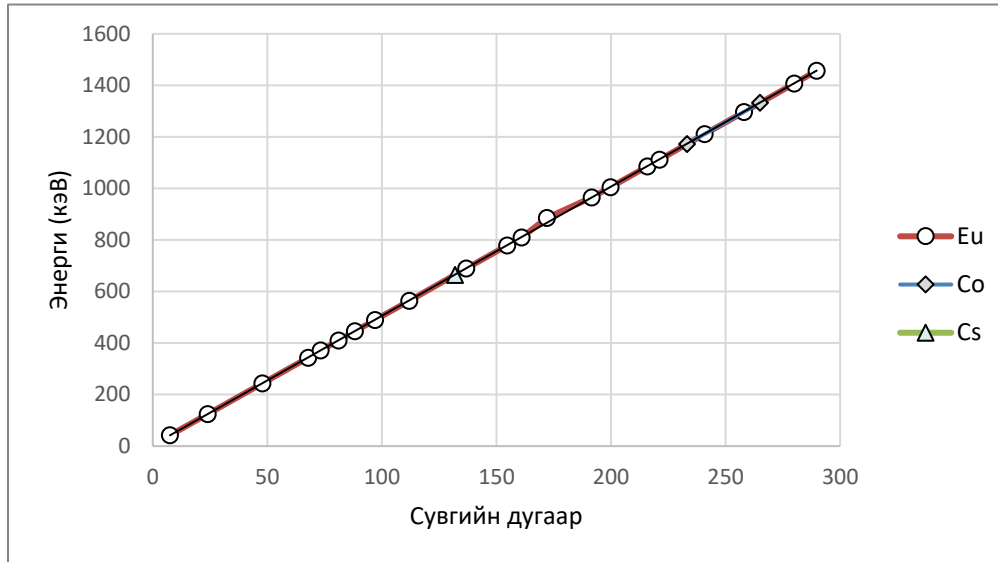
Зураг 4. ^{152}Eu үүсгүүрийн гамма-спектр

Зураг 4-өөс харахад ^{152}Eu -гийн 21 гамма-шугам фоноос ялгарч ажиглагдсан байна. Эдгээр гамма-шугамын болон ^{60}Co , ^{137}Cs үүсгүүрийн өгөгдлийг [9,10] Хүснэгт 1-д нэгтгэн жагсаав. Стандарт гамма-үүсгүүрүүдийн анхны идэвх (A_0)-ийг 2021 онд Чех Улсын хэмжилзүйн

хүрээлэнд хэмжсэн гэрчилгээнийх нь өгөгдлөөс авч, цацраг идэвхт задралын хуулийг ашиглан одоогийн идэвхийг олов. Энд байгаа ^{60}Co , ^{137}Cs ба ^{152}Eu -ийн нийт 24 гамма-шугамыг ашиглан энергийн тохируулга хийснийг Зураг 5-д харуулав.

Хүснэгт.1. HPGe-детектор бүхий гамма-спектрометрийн үндсэн үзүүлэлтүүдийг тодорхойлоход ашигласан үүсгүүрүүдийн өгөгдөл.

Үүсгүүр	Хагас задралын үе T1/2 (с)	Энерги E (кэВ) [9]	Гамма-квантын гаралт буюу Эрчим I (%) [9]	Анхны идэвх A_0 (Бк)	Одоогийн идэвх A(Бк)
^{137}Cs	9.48E+08	661.657	85.1	39960	37465
^{60}Co	1.66E+08	1173.228	99.85	42220	29234
		1332.492	99.98		
^{152}Eu	4.263E+08	42.31	-	39500	34227
		121.782	28.53		
		244.697	7.55		
		344.278	26.59		
		367.791	0.859		
		411.117	2.237		
		443.961	2.83		
		488.679	0.414		
		563.986	0.494		
		688.670	0.856		
		778.905	12.93		
		810.015	0.317		
		867.380	4.23		
		964.057	14.51		
		1005.270	0.659		
		1089.737	1.734		
		1112.076	13.67		
		1212.948	1.42		
		1299.142	1.633		
		1408.013	20.87		
		1457.643	0.497		



Зураг 5. HPGe-детекторын энергийн тохируулга

Зураг 5-д үзүүлснээр бүх 24 цэг нэг шулууны дагуу байгаа нь уг спектрометрийн энергийн тохируулга зөв хийгдсэнийг харуулахын зэрэгцээ шугамлаг (linearity) нь сайн байгааг баталж байна.

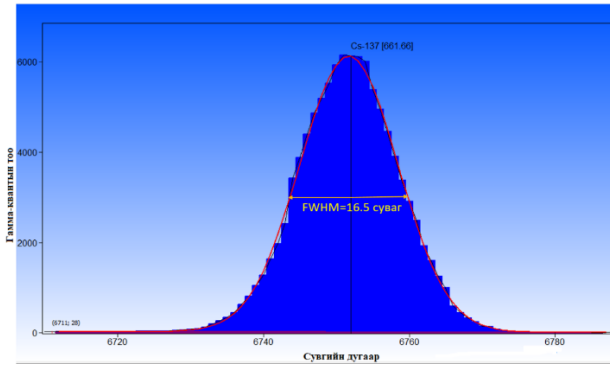
3.2 Энергийн ялгамж

Аливаа цөмийн цацрагийн детекторын энергийн ялгамжийг энергийн спектр дэх пикийн хагас өндөр дээрх бүрэн өргөнөөр (FWHM-full width at half maximum) тодорхойлдог бөгөөд энэ нь зэргэлдээ орших хоёр пик хэр зэрэг ялгарч байгааг харуулдаг, тухайн спектрометрийн нэг гол үзүүлэлт юм. Орчин үеийн автомат удирдлагатай, программчлагдсан спектрометрүүд ихэвчлэн өөрт суулгагдсан программаараа энергийн ялгамжийг олоод компьютерийн дэлгэц дээр шууд харуулдаг. Бидний ашиглалтад оруулж буй HPGe-детектор бүхий гамма-спектрометр нь ийм программ хангамжтай учраас түүнийг ашиглан энергийн ялгамжийг ^{137}Cs -гийн 661.66 кэВ ба ^{60}Co -ын 1332.49 кэВ шугамуудын хувьд хэмжилтээс шууд олсныг Хүснэгт 2-т өгөв.

Хүснэгт 2. HPGe-детектортой гамма-спектрометрийн энергийн ялгамж

Энерги (кэВ)	Үүсг үүр	FWHM (Автомат программ)		FWHM (Аналитик арга)	
		Сувгийн тоо	кэВ	Сувгийн тоо	кэВ
1332.49	^{60}Co	19.25	1.89	19.28	1.89
661.66	^{137}Cs	15.89	1.56	16.5	1.61

Ингэж олсон энергийн ялгамжийн утгыг шалгахын тулд бид аналитик аргаар бас тодорхойлов. Үүний тулд, тооцооны нарийвчлалыг сайжруулах зорилгоор ОСА-ын сувгийн тоог өсгөж 32000 болгон, анализ хийж буй тухайн пикэд нэлээд хэдэн суваг оногдож байхаар спектрийг сунгаж, хэмжилтийг 1000 секундэд гүйцэтгэв. Ийм аргаар гаргаж авсан ^{137}Cs -гийн 661.66 кэВ энергитэй пикийг спектрээс нь тастан авч Зураг 6-д харуулав.



Зураг 6. ^{137}Cs -гийн 661 кэВ энергитэй пик

Эндээс энергийн ялгамжийг олохын тулд эхлээд “хуваарийн үнэ” буюу нэг сувагт хэдэн кэВ энерги оногдож байгааг олно. Энергийн тохируулга (Зураг 5) шулуун гарсан учир аль пикийг сонгож авснаас хамаарахгүйгээр

$$\frac{\Delta E}{\Delta N_{ch}} = 0.098$$

гэж олдов. Энэ утгыг ашиглан Зураг 6-гаас ^{137}Cs -ийн 661.66 кэВ энергитэй пикийн хувьд энергийн ялгамж

$$FWHM = 0.098 \cdot \Delta E_{FWHM} = 0.098 \cdot 16.5 = 1.61 \text{ кэВ}$$

гэж олдов.

Үүнтэй яг ижил аргаар ^{60}Co -ын 1332.49 кэВ шугамд энергийн ялгамж $FWHM = 19.28 \cdot 0.098 = 1.89 \text{ кэВ}$ гарав. Энергийн ялгамжийн эдгээр утгуудыг Хүснэгт 2-т өгөв. Эндээс харахад тухайн хоёр пикийн энергийн ялгамжийг анализатор дахь программаар шууд олсон, бидний аналитик аргаар тодорхойлсон утгууд хоорондоо хэмжилтийн алдааны мужид тохирч байгаа нь уг спектрометрийн ажлын горим зөв байгааг баталж байна. Мөн ^{60}Co гамма-үүсгүүрийн 1332.5 кэВ энергийн шугам дээрх энергийн ялгамжийг 1.84 кэВ гэж тодорхойлсон тус детекторыг үйлдвэрлэсэн CAEN компанийн Test Report-ийн утгатай таарч байна [11].

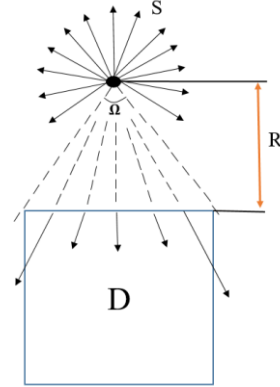
3.3. Бүртгэмж

Аливаа детекторын бүртгэмж (ε) нь тодорхой хугацаанд бүртгэгдсэн бөөмийн тоог (N_i)

үүсгүүрээс гарсан бөөмийн тоонд (N_s) харьцуулсан харьцаагаар

$$\varepsilon = \frac{N_i}{N_s} \quad (1)$$

гэж тодорхойлогддог хэмжигдэхүүн бөгөөд тухайн үүсгүүрээс гарсан бөөмийн хэдэн хувь нь бүртгэгдэж байгааг харуулдаг. Үүсгүүр, детектор хоёрын харилцан байршлын бүдүүвчийг Зураг 7-д харуулав.



Зураг 7. Үүсүүр детектор хоёрын харилцан байршлын бүдүүвч.

Эндээс харахад S-үүсгүүрээс зөвхөн Ω –биет өнцгөөр гарсан бөөмс детекторын гадаргууд тусахаар байна. Детекторын бүрэн бүртгэмж (ε) нь Ω –биет өнцгөөр тодорхойлогдох “геометр бүртгэмж” (ε_g) ба детекторт туссан бөөмсийн зарим нь бүртгэгдэлгүй нэвтэрдэгтэй холбоотой “физик бүртгэмж” хоёрын үржвэрээр илэрхийлэгдэнэ:

$$\varepsilon = \varepsilon_g \cdot \varepsilon_p \quad (2)$$

Детекторт бүртгэгдэлгүй нэвтэрсэн бөөмийн тоо нь тусч буй бөөмсийн энерги өсөхөд нэмэгддэг. Хэмжилт хийсэн хугацаа (t)-ны турш гамма-цацрагийн үүсгүүрээс гарсан нийт квантын тоо (N_s) нь үүсгүүрийн тухайн агшин дахь идэвх (A), гамма-квантын гаралт буюу эрчим (I)-ээр тодорхойлогдоно:

$$N_s = A \cdot I \cdot t \quad (3)$$

Бид ^{60}Co , ^{137}Cs , ^{152}Eu гамма-үүсгүүрүүдийг ашиглан детектор-үүсгүүрийн хоорондын зай $R=5, 10, 15 \text{ см}$ үед тус бүр $t=1000 \text{ с}$ турш хэмжилт хийв. Детекторын бүртгэмжийг (1) ба (3) томъёогоор тодорхойлоход шаардлагатай

өгөгдлийг Хүснэгт 1-ээс авав. Харин 42.31 кэВ энергитэй рентген цацрагийг тусгайлан авч үзэх шаардлага гарсан. Учир нь, 39.52 кэВ-ээс 46.65 кэВ энергийн мужид ^{152}Eu үүсгүүрээс 5 багц рентген цацраг гардаг (Хүснэгт 3) [9].

Хүснэгт 3. ^{152}Eu үүсгүүрийн рентген цацрагийн шугамууд

Энерги (кэВ)	Эрчим I (%)
40.117	37.80
39.522	20.87
45.291-46.705	14.85
46.564-46.586	3.05
45.291-45.754	11.81

Зураг 4-т үзүүлсэн ^{152}Eu -гийн гамма-спектрт эдгээр 5 шугам хоорондоо ялгарч салалгүйгээр 42.31 кэВ энергитэй нэг шугам шиг ажиглагдсан. Иймд $E_x = 39.522 - 46.564$ кэВ шугамд харгалзах эрчмийг Хүснэгт 3 дахь 5 шугамын эрчмийн нийлбэрээр

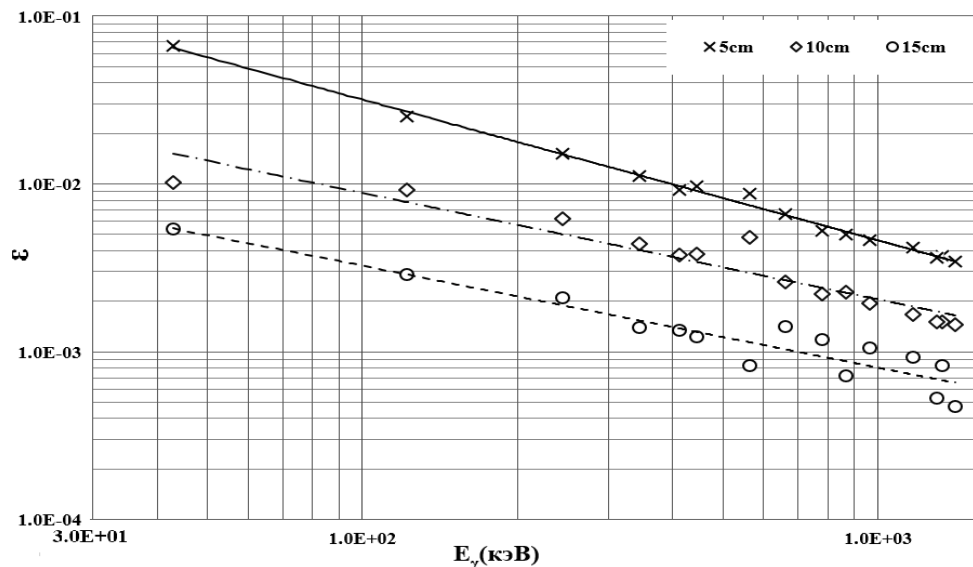
$$I_{42.31} = \sum_{i=1}^5 I_i = 88.38 \% \quad (4)$$

гэж тодорхойлов.

Харин бүртгэмжийг тодорхойлох тооцоонд ^{152}Eu -гийн хувьд статистик багатай, хэмжилтийн алдаа хэт их гарсан 9 шугамыг авч үзэлгүйгээр зөвхөн 12 шугамыг ашиглав. Ийнхүү ^{152}Eu -гийн 12, ^{137}Cs -гийн 1, ^{60}Co -ын 2 шугамын хувьд $R=5, 10, 15$ см зай тус бүрд тодорхойлсон бүртгэмжийн утгуудыг Хүснэгт 4 ба Зураг 8-д харуулав.

Хүснэгт 4. HPGe-детекторын бүртгэмж

Үүсгүүр	E(кэВ)	$\varepsilon (10^{-3})$ R=5cm	$\varepsilon (10^{-3})$ R=10cm	$\varepsilon (10^{-3})$ (R=15cm)
^{137}Cs	661.6	6.59	2.60	1.41
^{60}Co	1173.2	4.14	1.67	0.91
	1332.5	3.69	1.49	0.82
^{152}Eu	42.3	66.3	10.2	5.4
	121.8	25.2	9.16	2.87
	244.7	15.1	6.20	2.10
	344.3	11.1	4.40	1.40
	411.1	9.17	3.78	1.34
	443.9	9.72	3.84	1.22
	563.9	8.71	4.78	0.82
	778.9	5.27	2.21	1.18
	867.4	4.97	2.27	0.71
	964.0	4.63	1.94	1.06
	1299.1	3.63	1.50	0.53
1408.0	3.45	1.45	0.47	



Зураг 8. Детекторын бүртгэмж ба γ –квантын энергийн хамаарал

Хагас-дамжуулагч Ge-детекторыг хөргөх, гадны механик гэмтлээс хамгаалах зорилгоор металаар (голдуу хөнгөн цагааны хайлш) хийсэн, дотроо вакуум бүхий криостат хэмээх битүүмжилсэн саванд байрлуулдаг. Үүсгүүрээс гарсан бага энергитэй гамма-квант болон рентген цацраг криостатын таганд шингээгдсэнээс болоод детекторын бүртгэмж хоёрлосон логарифм хуваарь дээр яг шулуун биш, бага энергийн ($E_\gamma < 100$ кэВ) мужид голдуу доош муруйж гардаг [12,13]. Харин манай HPGe-детекторын криостатын таг маш нимгэн (0.5мм) бериллий (Be) цонхтой учраас 42.3 кэВ энергитэй рентген шугам бараг шингээгдэлгүй, бусад гамма-шугамуудтайгаа нэг шулууны дагуу байрлаж байгаа нь Зураг 8-аас харагдаж байна. Иймээс уг HPGe-детекторыг бага энергитэй гамма-квант буюу рентген цацрагийн судалгаанд ашиглах боломжтой.

Үүнээс гадна, детектортой харьцуулахад маш жижиг буюу цэгэн үүсгүүрийн хувьд геометр бүртгэмж үүсгүүр-детекторын хоорондох зайнаас

$$\varepsilon_g \sim 1/R^2 \quad (5)$$

гэсэн хуулиар хамаардаг. Зураг 8 дахь $R=5, 10, 15$ см зайд хэмжсэн үр дүнгээс харахад манай гамма-үүсгүүрүүд яг цэг биш учраас (5) хууль

нарийн биелэгдэхгүй ч зай өсөхөд бүртгэмж мэдэгдэхүйц буурч байна.

4. ДҮГНЭЛТ

Энэ ажлаар бид цэвэр германий HPGe-детектор бүхий гамма-спектрометрийг ашиглалтад оруулж, ^{60}Co , ^{137}Cs , ^{152}Eu үүсгүүрүүдийг ашиглан энергийн тохируулга хийж, энергийн ялгамж болон бүртгэмжийг тодорхойлов. Туршилтаар бидний толорхойлсон эдгээр гол үзүүлэлтүүд уг спектрометрийг үйлдвэрлэсэн компанийн өгөгдлүүдтэй тохирч байгаагаас гадна дэлхийн лабораториудын орчин үеийн нарийвчилсан судалгаа, шинжилгээнд ашиглагддаг төстэй төхөөрөмжийн түвшинд байна. Цаашид энэ спектрометрийг нейтрон физик, цөмийн урвалын суурь судалгаа болон нейтрон идэвхжлийн анализ, төрөл бүрийн сорьц дахь цацраг идэвхийн түвшний шинжилгээ зэрэгт ашиглах бүрэн боломжтой нь харагдав.

ТАЛАРХАЛ

Энэ ажлыг ШУТС-гийн санхүүжилтээр 2022-2024 онуудад хэрэгжиж буй, ШУТБИХХЗГ-2022/160 дугаартай, “Цөмийн кластержилт ба нейтрон-бодисын харилцан үйлчлэлийн

судалгаа” сэдэвт суурь судалгааны төслийн хүрээнд гүйцэтгэв.

НОМ ЗҮЙ

- [1] G.Dearnaley, Semiconductor nuclear radiation detectors, Journal of the British Institution of Radio Engineers, vol.24(2), p.p.153-170, (1962)
- [2] G.Dearnaley, D.C.Northrop, Semiconductor Counters for Nuclear Radiations, London, (1963)
Дж. Дирнли, Д.Нортроп, Полупроводниковые счетчики ядерных излучений, Перевод с английского, Мир, Москва, (1966)
- [3] Ю.К.Акимов, А.И.Калинин, В.Ф.Кушнирук, Х. Юнгклауссен, Полупроводниковые детекторы ядерных частиц и их применение, Атомиздат, Москва, (1967)
- [4] Ю.К.Акимов, О.В.Игнатъев, А.И.Калинин, В.Ф.Кушнирук, Полупроводниковые детекторы в экспериментальной физике, Энергоатомиздат, Москва, (1989)
- [5] J. Eberth, J.Simpson, From Ge(Li) Detectors to Gamma-ray Tracking Arrays—50 Years of Gamma Spectroscopy with Germanium Detectors, Progress in Particle and Nuclear Physics, vol.60(2), p.p.283–337, (2008)
- [6] Glenn F.Knoll, Radiation Detection and Measurement, 3th Edition, Wiley, ISBN 0-471-07338-5, (1999)
- [7] R.D.Baertsch, R.N.Hall, Gamma Ray Detectors Made From High Purity Germanium, IEEE Transactions on Nuclear Science, vol. 17, No. 3, pp. 235-240, (1970)
- [8] J. M. Marler, P. V. Hewka, Coaxial Detectors From High Purity Germanium, IEEE Transactions on Nuclear Science, vol. 21, No.1, pp. 287-295, (1974)
- [9] Isotope Browser, IAEA, Nuclear Data Section, Mobile App, Version 3.54.85, (Retrieved in 10 May 2024)
- [10] Richard B.Firestone, Table of Isotopes, 8th edition, John Wiley&Sons, New York, (1999)
- [11] HPGe Spectroscopy System- Laboratory Test Report, CAEN, 2021
- [12] Nurgül Hafizoglua, Efficiency and Energy Resolution of Gamma Spectrometry System with HPGe Detector Depending On Variable Source-To-Detector Distances, The European Physical Journal Plus, v.139, No.134, (2024)
- [13] Ц.Вылов, И.Н.Егошин, Е.Т.Кондрат и др, Спектрометрия излучений радиоактивных нуклидов с помощью полупроводниковых детекторов, В книге: Прикладная ядерная спектроскопия, Сборник статей, Вып.6, Атомиздат, Москва, стр.3-25, (1976)

The Study of Main Parameters of the Gamma-Spectrometer with High Purity Germanium (HPGe) Detector

T. Munkh-Erdene^{1*}, N. Battsooj¹, Ch. Saikhanbayar¹, J. Batmyagmar¹, B. Usukhbayar¹, D. Baatarkhuu¹, M. Odsuren², G. Khuukhenkhuu¹

¹ Nuclear Research Center, National University of Mongolia, Ulaanbaatar, Mongolia

² School of Engineering and Technology, National University of Mongolia, Ulaanbaatar, Mongolia

Energy calibration and efficiency of the gamma spectrometer with a high-purity germanium (HPGe) detector were performed using the ^{60}Co , ^{137}Cs , and ^{152}Eu gamma sources. Also, the energy resolution was determined for gamma lines of 1332.49 keV from ^{60}Co and 661.66 keV from ^{137}Cs . Our results are in good agreement with the data provided by the spectrometer manufacturer and are in consistent with the high quality similar spectrometers which are used at modern research laboratories.

Key words: High-Purity Germanium (HPGe) detector, gamma-spectrometer, energy calibration, energy resolution, efficiency