

Микротроны уран ба хар тугалган байны фотонейтроны энергийн спектрийн харьцуулсан судалгаа

Н.Норов, М.Алтангэрэл, Ө.Сайнзаяа

Монгол улсын их сургууль, Цолмийн судалгааны тов

Товч утга: Микротрон МТ-22 электроны цикл хурдасгуурын уран, хар тугалган байнаас үүсэх фотонейтроны гаралт, энергийн спектрийг босгот детектор ашиглан судлав. Эдгээр байны фотонейтроны гаралт, энергийн спектрийг харьцуулав.

Түлхүүр үг: Микротрон, фотонейтрон, босгот детектор, уран ба хар тугалган бай

ОРШИЛ

МУИС-ийн ЦСТ-ийн микротрон МТ-22 нь электроныг 22 МэВ хүртэл хурдасгадаг бөгөөд түүнд фотонейтроны конвертор болгон U байг ашиглаж байна. 22 МэВ энергитэй электроны хурдасгуурын уран байн фотонейтроны энергийн спектрийг судалсан ажил ховор байдаг болон бидний цаашдын нейтроны урвал, ураны хуваагдал, нейтрон идэвхжилийн анализийн судалгаанд тус микротроны уран байнаас гарах хурдан нейтроны спектрийг тогтоох шаардлагатай юм.

Энэ ажлаар микротроны U ба Pb байнаас үүсэх байгаа фотонейтроны гаралт, энергийн спектрийг босгот детектор ашиглан харьцуулж судлах зорилго тавьсан юм.

Босгот детектороор энергийн спектрийг байгуулах нь нилээд төвөгтэй. Учир нь босгот детекторын идэвхжих огтлол фотонейтроны энергис хамаардаг. U ба Pb байнаас гарах фотонейтроны энергийн спектр нь хоорондоо ялгаатай. Иймээс босгот детекторуудын эффектив огтлол, эффектив босго энерги гэсэн хэмжигдэхүүнийг тооцоноор энергийн спектрийг байгуулах боломжтой.

I. ОНОЛ

Хэдэн МэВ-ээс хэдэн арван МэВ энергитэй болтлоо хурдассан электрон Ta, W зэрэг хүнд металл байд тусахад тормозын гамма цацраг үүсэх ба энэ нь U, Pb байд туссанаар янз бүрийн фото урвал явагдаж үүний дүнд фотонейтрон гарна [1].

Дунд зэргийн масс тоотой цөмийн хувьд фотонейтроны гаралт бага байдаг бол хүнд цөмүүдийн хувьд нейтроны холбоос энерги бага учраас нейтрон гарах магадлал их болно. Иймээс ихэвчлэн Pb, Ta, W зэрэг хүнд элементүүдийг фотонейтрон үүсгэх бай болгон ашиглана. Харин U, Th гэх мэт хуваагдах элемент-байд фотоурвалаас гадна фотохуваагдлаар илүү олон нейтрон гарах боломжтой байдаг. Фотохуваагдлын нейтроны

гаралт нь, электроны энергис бараг хамаардаггүй байхад фотоурвалаар үүсэх нейтроны гаралт нь электроны болон тормозын цацрагийн урсгал, энерги, урвалын огтлол, байн нимгэн зузаан, хийц зэргээс ихээхэн хамаарна.

Гамма квант атомын цөмтэй харилцан үйлчлэхэд үүсэх фотонейтроны энергийн спектр нь гурван хэсгээс бүрэлдэнэ. Бүрэлдэхүүн хэсэг бүр урвалын онцлог механизмаар нөхцөлдөнө. Үүнд:

1. Статистик тэнцвэрийн байдалд орших компаунд цөмөөс гарах ууршилтын нейтрон;
2. Тэнцвэр тогтох процессын үед цөмөөс гарах нейтрон;
3. Цөмийг бүрдүүлэх нуклонуудын аль нэгтэй гамма квант шууд харилцан үйлчлэх процессын дүнд цөмөөс гарах нейтрон зэрэг болно

Нейтроны ууршилт гэдэг нь өдөөгдсөн төлөвт байгаа компаунд цөмийг ханасан төлөвт байгаа шингэнтэй адилтгавал уг шингэнээс молекулууд ууршдаг шиг цөмөөс нуклонууд сугаран гарахыг хэлнэ. Ийм таамаглалыг АНУ-ын физикч Вайскофф дэвшүүлсэн бөгөөд үүнийг ууршилтын загвар гэдэг.

Шууд механизмын үед гамма квант цөмийн аль нэг нуклонтой шууд харилцан үйлчилж цөмийн бүрэлдхүүнээс түүнийг сугалан гаргана. Энэ механизмыг Уилкинсоний боловсруулсан цөмийн бүрхүүлэн загвараар тайлбарладаг ба үүссэн фотонейтрон нь Максвеллийн түгэлтээр түгэх буюу ихэнх хэсэг нь 90° -аас бага өнцгөөр гарах бөгөөд анизотроп байдаг. Мөн шууд механизмаар харьцангуй их энергитэй нейтрон гарахыг тооцох боломжтой.

Тэгвэл фотоурвалаар үүсэх фотонейтроны энергийн спектрийг дээрх хоёр механизмаар үүсэх нейтроны спектрийн нийлбэр хэлбэрээр бичиж болно.

$$N(E) = N_U(E) + N_W(E) \quad (1)$$

Энд: $N_y(E)$ -ууршилтын механизмаар үүсэх нейтроны спектр,

$N_w(E)$ -шууд механизмаар үүсэх нейтроны спектр.

Шууд урвалаар үүсэх фотонейтроны гаралт нь маш бага буюу ойролцоогоор 0.1% байна [2]. Энэ нь фотоурвалын явцад нейтроноос гадна протон өдөөгддөгтэй холбоотой. Тэгвэл фотонейтроны энергийн спектр нь шууд урвалаас бараг хамаарахгүй зөвхөн компаунд цөмийн ууршилтын механизмаар тодорхойлогдоно. Энэ механизмаар фотонейтроны энергийн спектр нь ерөнхийдөө доорх хамааралтай байна.

$$N_y(E) \sim E \exp(-E/\bar{T}_c) \quad (2)$$

Үүнд: E -нейтроны энерги,

\bar{T}_c -цөмийн эффектив температур

Иймд Pb байнаас гарах фотонейтроны энергийн спектрийг доорх хэлбэртэй бичиж болно.

$$N_y(E) = \alpha(E/T_{эф}) \exp(-E/T_{эф}) \quad (3)$$

Энд: $T_{эф} = 0.33 \pm 0.03$ МэВ

$\alpha = 0.49 \pm 0.01$ МэВ (тогтмол)

Хуваагдагч байнаас зөвхөн фото хуваагдлаар гарах нейтроны энергийн спектр

$N_x(E) = (1-\alpha)(1/\sqrt{\pi\omega T_1}) \exp(-E/T_1) \text{sh}(\sqrt{\omega E}/T_1)$ (4) хэлбэртэй байна [2].

Энд: $T_1 = 1.05 \pm 0.04$ МэВ (хуваагдлын спектрт харгалзах цөмийн температур)

$\alpha = 0.5$ МэВ (хуваагдлын хэлтэрхийн нэг нуклоны дундаж кинетик энерги)

Тэгвэл U байнаас гарах фотонейтроны энергийн спектр нь фотоурвалын ууршилтын механизм ба фотохуваагдлын дүнд гарах нейтроны нийлбэр байна.

II. БОСГОТ ДЕТЕКТОРЫН ЭФФЕКТИВ ОГТЛОЛ

Босгот детектор ашиглан идэвхжилийн аргаар хурдан нейтроны урсгалын нягтыг тооцоход харилцан үйлчлэлийн огтлол нь тусч буй нейтроны энергээс хамаардаг, мөн нейтроны энергийн утгуудад нейтроны урсгал нь өөр өөр байдаг нь гол бэрхшээл болдог.

Дээрх бэрхшээлээс гарахын тулд эффектив огтлол гэсэн ойлголтыг оруулж ирдэг. Эффектив огтлол гэдэг нь урвалын огтлолыг нийт нейтроны энергиэр дундчилсан тогтмол утгатай хэмжигдэхүүн юм.

Эффектив огтлолыг дараах томъёог ашиглан тооцдог [3].

$$\sigma^{эфф} = \frac{\int_0^{E_{max}} N(E)\sigma(E)dE}{\int_0^{E_{max}} N(E)dE} = \frac{\sigma_0 \int_0^{E_{max}} N(E)dE}{\int_0^{E_{эфф}} N(E)dE} \quad (5)$$

Үүнд: $N(E)$ - хуваагдагч байнаас гарах фотонейтроны энергийн спектр
 E - фотонейтроны энерги, МэВ
 $\sigma_0 - \sigma = \sigma(E)$ хамаарлын тогтворжсон хэсэг буюу максимум утгад харгалзах урвалын огтлол

E_{max} - фотонейтроны максимум

энерги, $E_{max} = 22$ МэВ

$E_0^{эфф}$ - фотоурвалын босгын эффектив утга

Босгот детекторын хурдан нейтроноор идэвхжих огтлол ба нейтроны энергийн хоорондох хамаарал нь нилээд төвөгтэй[3,4,5] бөгөөд үүнийг нэгэн утгатай функцээр илэрхийлэх боломжгүй байдгаас бид дээрх (5) томъёог дараах хэлбэрт шилжүүлж болно.

$$\sigma^{эфф} = \frac{\sum N_i \cdot \Delta E \cdot \sigma_i}{\sum N_i \cdot \Delta E} \quad (6)$$

Үүнд:

ΔE -сонгон авсан энергийн завсар, МэВ

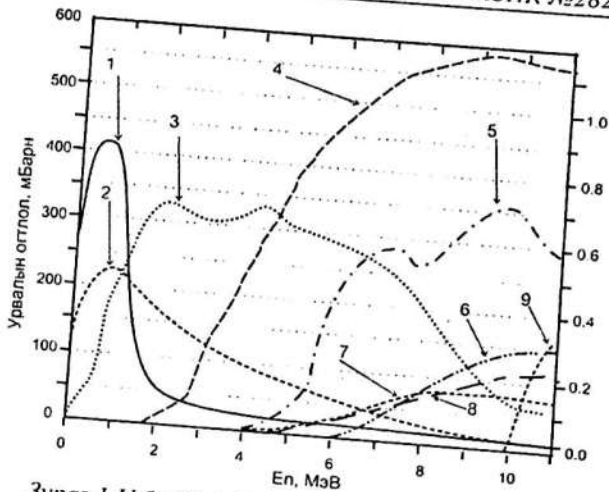
N_i -тухайн завсар дахь фотонейтроны дундаж гаралт

σ_i -уг энергийн завсарт харгалзах урвалын дундаж огтлол, мбарн

Дээрх (6) томъёог ашиглан босгот детекторуудын эффектив огтлолыг тооцоход ашиглагдах хэмжигдэхүүнүүдийг 1-р зургаас сонгон авна [4,7,8].

Микротроны U болон Pb байнаас гарах фотонейтроны энергийн спектр нь ялгаатай (1-р зураг) учраас босгот детекторын идэвхжих эффектив огтлол болон түүнд харгалзах эффектив босго энергийн утга өөр өөр байна.

U ба Pb байнуудын хувьд босгот детекторын эффектив огтлол, эффектив босго энергийн утгыг тооцсон дүнг доорх хүснэгтээр үзүүүлэв.



Зураг.1. U ба Pb байнаас гарах фотонейтроны энергийн спектр болон босгот детекторуудын идэвхжих огтлол ба нейтроны энергийн хамаарал

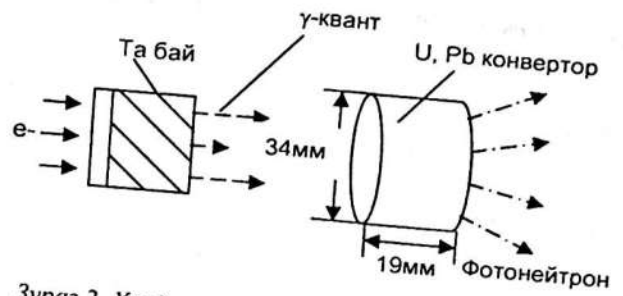
1. Хурдсан электроны энерги 45 МэВ байхад U байнаас гарах фото нейтроны энергийн спектр
2. Хурдсан электроны энерги 45 МэВ байхад Pb байнаас гарах фотонейтроны энергийн спектр
3. $^{115}\text{In}(n,n')^{115\text{m}}\text{In}$
4. $^{54}\text{Fe}(n,p)^{54}\text{Mn}$
5. $^{27}\text{Al}(n,p)^{27}\text{Mg}$
6. $^{27}\text{Al}(n,\alpha)^{24}\text{Na}$
7. $^{54}\text{Ni}(n,p)^{54}\text{Co}$
8. $^{56}\text{Fe}(n,p)^{56}\text{Mn}$
9. $^{65}\text{Cu}(n,2n)^{64}\text{Cu}$

Хүснэгт.1 U ба Pb байн хувьд босгот детекторуудын эффе́ктив огтлол, эффе́ктив босго энергийн утгыг тооцсон дүн

№	Детектор	U		Pb	
		$E_{\text{эфф}}$, МэВ	$\sigma_{\text{эфф}}$, мБарн	$E_{\text{эфф}}$, МэВ	$\sigma_{\text{эфф}}$, мБарн
1	$^{115}\text{In}(n,n')^{115\text{m}}\text{In}$	0.7	53.3	1.2	124
2	$^{54}\text{Fe}(n,p)^{54}\text{Mn}$	1.8	189	1.7	27.9
3	$^{27}\text{Al}(n,p)^{27}\text{Mg}$	4.7	32.6	4.6	25.8
4	$^{54}\text{Ni}(n,p)^{54}\text{Co}$	-	286	4.7	3.04
5	$^{56}\text{Fe}(n,p)^{56}\text{Mn}$	7.3	32.1	5.67	5.13
6	$^{27}\text{Al}(n,\alpha)^{24}\text{Na}$	8.3	50.7	6.2	5.10
7	$^{24}\text{Mg}(n,p)^{24}\text{Na}$	-	-	-	-
8	$^{65}\text{Cu}(n,2n)^{64}\text{Cu}$	11.9	511.3	10.6	155.5

III. ТУРШИЛТ

Микротрон МТ-22-ын хурдсан электроны замд Та байг байрлуулахад электроны хурд саарч 0-22МэВ хүртэл тасралтгүй спектртэй тормозын гамма цацраг гарна. Ийм энергитэй гамма цацрагийг U болон Pb байд тусгахад фотоурвалаар хурдан нейтрон гарна (2-р зураг). Фотонейтроны энерги мөн 0-22МэВ хүртэл тасралтгүй утгатай байна.



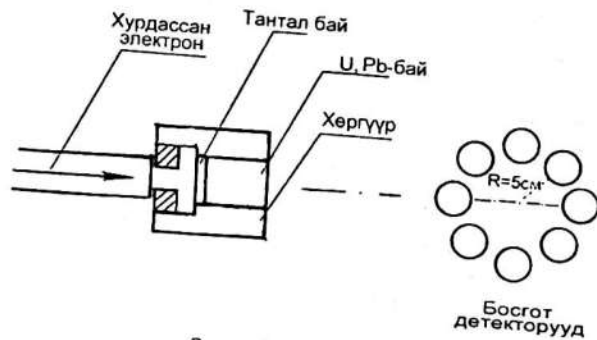
Зураг.2. Хурдсан электроноор фотонейтрон гарган авах бүүдүүвч

U ба Pb байнаас гарах фотонейтроны энергийн спектр, гаралтыг харьцуулан судлахын тулд уран ба хар тугалган байн геометр хэмжээг ижил авав (2-р хүснэгт).

Хүснэгт.2.

Бай	Диаметр, мм	Зузаан, мм	Масс, г
U	34	19	330.0
Pb	34	19	195.1

Эдгээр байнаас гарах фотонейтроны спектрийг байгуулахын тулд 1-р хүснэгтэд үзүүлсэн босгот детекторуудыг U болон Pb байнаас 25 см зайд хурдсан электроны чиглэлд перпендикуляр хавтгайд 5 см-ийн радиустай тойрогт шаралтын геометр ижил байхаар байрлуулж шарав[6]. Шаралтын геометрыг 3-р зурагт үзүүлэв.

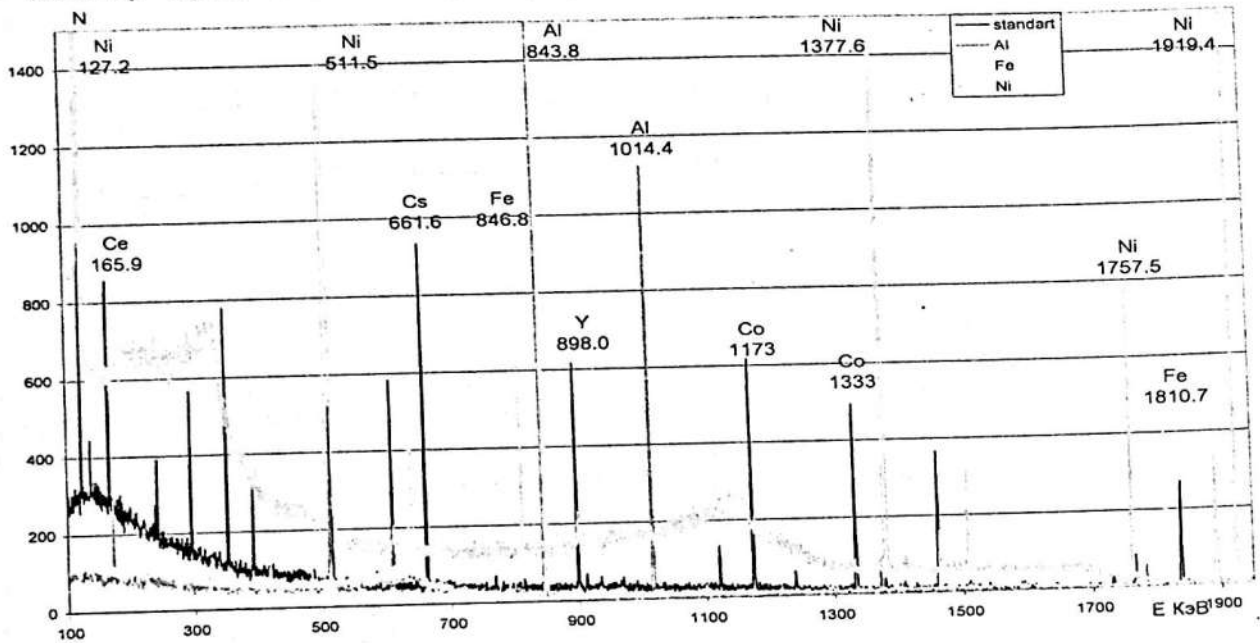


Зураг.3. Шаралтын геометр

U байнаас гарах фотонейтроны энергийн спектрийг судлах зорилгоор микротроны хурдсан электроны дундаж гүйдэл 13 мкА байх горимд босгот детекторуудыг 1 цаг шарав. Харин Pb байн хувьд босгот детекторуудыг 1 цаг шарахад хурдсан электроны дундаж гүйдэл 12.5 мкА байв.

Босгот детекторуудын хагас задралын үеэс хамааруулан хүлээх болон хэмжих хугацааг сонгож детектор бүрийг 3-4 удаа цэвэр

Ge детектор бүхий гамма спектрометрээр хэмжив.

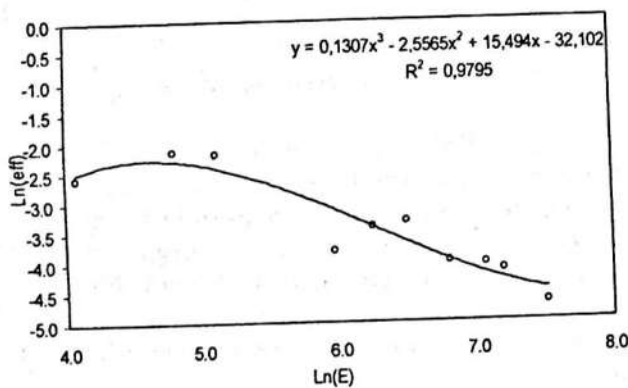


Зураг.4. Идэвхжсэн босгот детекторуудын гамма спектр

Хурдан нейтроноор идэвхжисэн босгот детекторуудын гамма спектрийг 4-р зурагт үзүүлээ.

Хэмжилтийн тухайн байрлалд цэвэр германи детекторын бүртгэх чадварыг Английн "Amersham" фирмийн Цацраг идэвхийн тохируулгын лабораторид бэлтгэсэн QCY-48 маркын янз бүрийн энергитэй гамма квант цацруулах 10 изотопыг өөртөө уусгасан шингэн стандарт үүсгүүрийг ашиглан тодорхойлов. Стандарт шингэн уусмалаас 8,2234 гр-ийг авч гамма спектрометрээр 2 цаг хэмжив.

Гамма квантуудын бүрэн шингээлтийн пикийн талбайг ашиглан цэвэр германи детекторын бүртгэх чадварын муруйг тухайн геометрт байгуулсаныг 5-р зурагт үзүүлэв.



Зураг.5. Цэвэр герман детекторын бүртгэх чадварын муруй

Фотонейтроноор идэвхжисэн босгот детектороос гарах гамма квантын бүрэн шингээлтийн пикийн талбай, хэмжилтийн тухайн геометрт тодорхойлсон цэвэр германи детекторын үнэмлэхүй бүртгэх чадвар болон U, Pb байн хувьд тооцсон эффертив огтлолын утгаар фотонейтроны урсгалын нягтыг идэвхжилийн анализийн томъёог ашиглан олов.

$$\Phi = \frac{S_{\gamma}(E_{\gamma}) \cdot \lambda_A \cdot A \cdot e^{\lambda_A t_2}}{\sigma \cdot N_a \cdot \vartheta \cdot \epsilon_{\gamma}(E_{\gamma}) \cdot K_{\gamma} \cdot m \cdot (1 - e^{-\lambda_A t_1}) (1 - e^{-\lambda_A t_3})} \quad (7)$$

Үүнд: $S_{\gamma}(E_{\gamma})$ - E_{γ} энергитэй γ квантын бүрэн шингээлтийн пикийн талбай
 $\epsilon_{\gamma}(E_{\gamma})$ - E_{γ} энергитэй γ квантыг бүртгэх чадвар
 K_{γ} - E_{γ} энергитэй гамма квантын гаралт
 λ_A - A цөмийн задралын тогтмол
 Φ - фотонейтроны урсгал нягт
 c - урвалын огтлол
 ϑ - изотопын байгалийн тархалт
 N_a - Авогадрын тоо
 A - цөмийн масс тоо
 m - детекторын масс
 t_1, t_2, t_3 - шарсан, хүлээсэн, хэмжсэн хугацаа

Босгот детекторын эффертив энергиэс их энергитэй фотонейтроны гаралтыг дараах харьцааг ашиглан тооцоно.

$$P = 4\pi R^2 \cdot \Phi \quad (8)$$

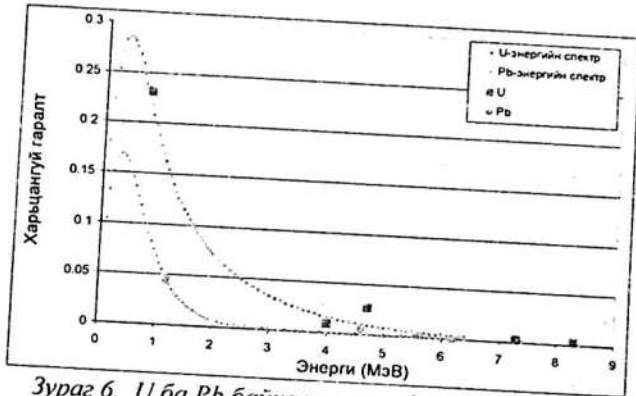
Үүнд: $4\pi R^2$ - фотонейтроны үүсгүүрээс R- радиустай бөмбөрцгийн гадаргын талбай

U ба Pb байнаас гарах фотонейтроны урсгалын нягт, гаралтын утгуудыг 3-р хүснэгтэнд харьцуулж үзүүлэв.

Хүснэгт 3. U ба Pb байнаас гарах фотонейтроны урсгалын нягт ба гаралт

Босгот детектор	Фотонейтроны урсгалын нягтын дундаж утга, $n/cm^2 \cdot c$		Фото нейтроны гаралт, n/c	
	U	Pb	U	Pb
$^{115}In(n,n')$	$2.6E+07$	$2.0E+07$	$2.1E+12$	$1.6E+11$
$^{54}Fe(n,p)$	$8.3E+06$	-	$6.5E+10$	-
$^{27}Al(n,p)$	$3.0E+07$	$6.3E+05$	$2.4E+09$	$4.9E+09$
$^{58}Ni(n,p)$	$1.0E+07$	-	$8.2E+10$	-
$^{27}Al(n,\alpha)$	$3.2E+06$	$2.2E+03$	$2.5E+09$	$1.7E+07$
$^{24}Mg(n,p)$	-	$1.8E+04$	-	$1.4E+08$
$^{56}Fe(n,p)$	$3.2E+06$	$1.6E+05$	$2.5E+08$	$1.27E+09$

U, Pb байнаас гарах фотонейтроны энергийн спектрийг 6-р зурагт харуулав



Зураг 6. U ба Pb байнаас гарах фотонейтроны энергийн спектр

Туршлагын дүнгээс 0-2 МэВ энергийн мужид эффектив босго энергитэй босгот детекторуудыг нэмж ашиглавал фотонейтроны энергийн спектрийг илүү олон цэгээр нарийвчилан байгуулах шаардлагатай болох нь харагдаж байна.

ДУГНЭЛТ

- $^{115}In(n,n)^{115m}In$, $^{58}Ni(n,p)^{59}Co$, $^{27}Al(n,p)^{27}Mg$, $^{27}Al(n,\alpha)^{24}Na$, $^{24}Mg(n,p)^{24}Na$, $Fe^{54}(n,p)Mn^{54}$, $Fe^{56}(n,p)Mn^{56}$, $^{65}Cu(n,2n)^{64}Cu$, $^{63}Cu(n,2n)^{62}Cu$ зэрэг босгот урвалуудыг ашиглан идэвхжлийн үнэмлэхүй аргаар U ба Pb байнаас гарах фотонейтроны энергийн спектрийг байгуулах туршилт хийв.
- Дээрх босгот детекторын эффектив огтлол, эффектив босго энергийн утга нь U ба Pb байн хувьд өөр өөр байна. Np, Rh, Hg зэрэг үнэтэй босгот детекторуудыг олж

ашиглавал бага энергийн мужид нейтроны спектрийг илүү олон цэгээр байгуулах боломжтой.

- Микротроны хурдассан электроны дундаж гүйдэл 13 мкА байхад 34 мм диаметртэй, 19 мм зузаантай уран байна. 25.5 см зайд 0.335 МэВ-ээс их энергитэй фотонейтроны гаралт $(1.07 \pm 0.03) \cdot 10^{12}$ н/с байна. Харин 1.9 МэВ ба 4 МэВ-ээс их энергитэй фотонейтроны гаралт харгалзан $(1.6 \pm 0.4) \cdot 10^{10}$ н/с, $(2.54 \pm 0.55) \cdot 10^9$ н/с байгааг тогтоов.
- Адил хэлбэр хэмжээтэй хар тугалган байн хувьд, хурдассан электроны дундаж гүйдэл 12.5 мкА байхад 0.335, 1.9 ба 4 МэВ-ээс их энергитэй фотонейтроны гаралтыг харгалзан $(1.62 \pm 0.002) \cdot 10^{11}$ н/с $(6.51 \pm 0.4) \cdot 10^9$ н/с, $(1.43 \pm 0.55) \cdot 10^8$ н/с гэж олов. Энэ нь адил хэмжээтэй уран байны фотонейтроны гаралтаас харгалзан 7.1, 3.4, 1.5 дахин бага байна.

АШИГЛАСАН ХЭВЛЭЛ:

- Б.С.Ишханов и И.М.Капитанов. Взаимодействие электромагнитного излучение с атомными ядрами, М.: 1979.
- В.П.Ковалев. Вторичные излучения ускорителей электронов, М.: Атомиздат, 1973.
- К.Бекурц и К.Виртц. Нейтронная физика, М.: Атомиздат, 1968.
- С.С.Ломакин. Ядерно физические методы диагностики и контроля активных зон реакторов АЭС, М.: Энергоатомиздат, 1986.
- Ю.И.Брегадзе, Э.К.Степанов, В.П.Ярына. Прикладная метрология ионизирующих излучений, М.: Энергоатомиздат, 1990.
- M.Altangerel, N.Norov, G.Khuukhenkhuu and S.Odmaa. Photo-neutron Yield and Energy Spectrum in Uranium Target, Proceedings of International school on contemporary physics-III, pp37-45
- В.М.Бычков и др. Сечения пороговых реакций, вызываемых нейтронами. Справочник, М.: Энергоиздат, 1982.
- IAEA-TECDOC-1285. Reference Neutron Activation Library, Vienna, 2002.