

# Саатлын гамма цацрагаар өдөөгдсөн $^{196m}\text{Au}$ – ийн изомер харьцаа

Ч.Сайханбаяр<sup>1\*</sup>, Г.Хүүхэнхүү<sup>1</sup>, М.Одсүрэн<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Цөмийн Физикийн Судалгааны Төв, Монгол Улсын Их Сургууль, Улаанбаатар, Монгол Улс  
<sup>2</sup>Хэрэглээний Шинжлэх Ухаан Инженерчлэлийн Сургууль, Монгол Улсын Их Сургууль, Улаанбаатар, Монгол Улс

Цөмийн Физикийн Судалгааны Төвийн Микротрон МТ-22 электроны хурдасгуурын нил спектртэй саатлын гамма цацрагаар алтны цөмийг өдөөж, изомер харьцааг тодорхойлов.

Түлхүүр үг: Электроны цикл хурдасгуур, саатлын гамма цацраг, идэвхжүүлэх арга, цэвэр германий детектор, гамма спектрометр, цөмийн фото-урвал, урвалын гаралт, изомер төлөв.

## I. ОРШИЛ

Харьцангуй урт настай цөмийн өдөөгдсөн төлвийг изомер төлөв гэдэг. Цөмийн өдөөгдсөн төлвийн орших хугацаа дунджаар  $\tau \approx 10^{-13} - 10^{-12}$  с байдаг бол цөмийн изомер төлвийн орших хугацаа  $\tau \approx 10^9$  с буюу үүнээс урт байдаг.

Янз бүрийн бөөм ба цацрагаар явагдах урвалаас үүсэх цөмийг судалснаар өдөөлтийн магадлал, энерги, спин, альфа-, бета-задрал, гамма цацралын характеристик, урвалын механизм зэрэг цөмийн бүтэц, урвалтай холбоотой олон төрлийн мэдээлэл авах боломжтой. Ийм судалгааны нэг чиглэл нь изомер харьцааг тодорхойлох юм. Изомер харьцаа нь цөмийн изомер төлөв үүсэх ба үндсэн төлөв үүсэх урвалын огтлолуудын харьцаа  $IR = \sigma_m / \sigma_g$  - гаар тодорхойлогддог [1]. Изомер төлөв нь нейтрон, цэнэгт бөөм, гамма цацрагийн алинаар ч явагдах урвалаар үүсэх боломжтой.

Бид энэ ажлаар МУИС-ийн ЦФСТ-ийн электроны цикл хурдасгуур Микротрон МТ-22-ын нил спектртэй саатлын гамма цацрагаар өдөөгдсөн цөмийн изомер төлвийг судлах туршлагын аргазүйг боловсруулж, эзэмших, түүнийгээ шалгах үүднээс өөрсдийн боломжиндоо тулгуурлан алтыг судлах объект болгон сонгов. Түүнээс гадна алтны  $^{196m}\text{Au}$  изомер төлвийг 22 МэВ энергитэй саатлын гамма цацраг ашиглан судалсан ажил ховор учир бидний гарган авсан үр дүн цөмийн өгөгдлийн санд тодорхой нэмэлт мэдээлэл болно.

## II. СУДАЛГААНЫ АРГАЗҮЙ

### A. Онолын хэсэг

Судлах дээжийг моно-энергитэй гамма цацрагаар шарж буй тохиолдолд изомер харьцаа нь урвалын огтлолуудын харьцаагаар

тодорхойлогддог. Харин цөмийг нил спектртэй саатлын гамма цацрагаар өдөөж байгаа тохиолдолд изомер харьцаа нь тухайн цөм изомер ба үндсэн төлөвтөө үүсэх урвалын гаралтын харьцаагаар тодорхойлогдоно [2-3]:

$$IR = \frac{Y_m}{Y_g} \quad (1)$$

Энэ үед урвалын гаралт нь:

$$Y_{m,g} = N_0 \int_{E_{th}^{m,g}}^{E_{max}} \sigma_{m,g}(E) \phi(E, E_{max}) dE, \quad (2)$$

байна.

Энд:  $N_0$  – бай цөмийн тоо;  $\sigma_{m,g}(E)$  – изомер ба үндсэн төлөвтөө үүсэх урвалын огтлол;  $\phi(E, E_{max})$  – саатлын гамма цацрагийн урсгал;  $E_{th}^{m,g}$  – урвалын босго энерги;  $E_{max}$  – саатлын гамма цацрагийн максимум энерги.

Саатлын гамма цацрагаар дээжийг шарахад нэгж хугацаанд үүсэх цацраг идэвхт цөмийн тооны өөрчлөлт дараах тэгшитгэлээр илэрхийлэгдэнэ:

$$\frac{dN_m}{dt} = Y_m - \lambda_m N_m, \quad (3)$$

$$\frac{dN_g}{dt} = Y_g - \lambda_g N_g + P \lambda_m N_m. \quad (4)$$

Энд:  $N_m, N_g$  – изомер ба үндсэн төлөвтөө үүсч байгаа цацраг идэвхт цөмийн тоо;  $\lambda_m, \lambda_g$  – тэдгээрийн задралын тогтмол;  $P$  – изомер шилжилтийн коэффициент (изомер төлвөөс үндсэн төлөврүү шилжих магадлал).

Шарах ( $t_1$ ), хөргөх ( $t_2$ ), хэмжих хугацаа ( $t_3$ ), детекторын бүртгэмж ( $\epsilon_{m,g}$ ), гамма шугамын эрчим ( $I_{m,g}$ ) зэргийг оролцуулан тооцож (3) ба (4) тэгшитгэлийн шийдийг олоод изомер харьцааг дараах байдлаар тодорхойлж болно:

\*ch.saikhanbayar@num.edu.mn

$$IR = \frac{Y_m}{Y_g} = \frac{\Lambda_2^g \Lambda_5^g \Lambda_8^g}{\frac{S_g \epsilon_m I_m}{S_m \epsilon_g I_g} \Lambda_3^m \Lambda_6^m \Lambda_9^m - \Lambda_1^{m,g} \Lambda_5^g \Lambda_8^g - \Lambda_3^m \Lambda_4^{m,g} \Lambda_8^g - \Lambda_3^m \Lambda_6^m \Lambda_7^{m,g}} \quad (5)$$

Энд:  $S_{m,g}$  – детекторт бүртгэгдсэн тухайн гамма шугамын талбай; бусад тэмдэглэгээг дараах илэрхийллүүдээр олно:

$$\Lambda_1^{m,g} = \frac{P}{\lambda_g} \left[ 1 - \frac{\lambda_m \lambda_g}{\lambda_m - \lambda_g} \left( \frac{e^{-\lambda_g t_1}}{\lambda_g} - \frac{e^{-\lambda_m t_1}}{\lambda_m} \right) \right];$$

$$\Lambda_2^g = \frac{1}{\lambda_g} (1 - e^{-\lambda_g t_1}); \quad \Lambda_3^m = \frac{1}{\lambda_m} (1 - e^{-\lambda_m t_1});$$

$$\Lambda_4^{m,g} = P \frac{\lambda_m}{\lambda_m - \lambda_g} (e^{-\lambda_g t_2} - e^{-\lambda_m t_2});$$

$$\Lambda_5^g = e^{-\lambda_g t_2}; \quad \Lambda_6^m = e^{-\lambda_m t_2};$$

$$\Lambda_7^{m,g} = P \left[ 1 - \frac{\lambda_m \lambda_g}{\lambda_m - \lambda_g} \left( \frac{e^{-\lambda_g t_3}}{\lambda_g} - \frac{e^{-\lambda_m t_3}}{\lambda_m} \right) \right];$$

$$\Lambda_8^g = 1 - e^{-\lambda_g t_3}; \quad \Lambda_9^m = 1 - e^{-\lambda_m t_3}.$$

(5) томъёоны  $\Lambda_i$  харьцаануудыг хооронд нь үржүүлэн, зохих үйлдлүүдийг гүйцэтгэн хялбарчлахад:

$$IR = \frac{Y_m}{Y_g} = \left[ \frac{\lambda_g F_m}{\lambda_m F_g} \left( \frac{S_g \epsilon_m I_m}{S_m \epsilon_g I_g} - \frac{P \lambda_g}{\lambda_g - \lambda_m} \right) + \frac{P \lambda_m}{\lambda_g - \lambda_m} \right]^{-1} \quad (6)$$

болов.

$$\text{Энд: } F_{m,g} = (1 - e^{-\lambda_{m,g} t_1}) e^{-\lambda_{m,g} t_2} (1 - e^{-\lambda_{m,g} t_3}).$$

Тран Дус Their нарын [4] ажилд байгаа (5)-тай төстэй томъёонд хуваарь дахь 3-р гишүүн  $\Lambda_3 \Lambda_4 \Lambda_8$ -ийг  $\Lambda_3 \Lambda_5 \Lambda_8$  гэж алдаатай бичсэн байв. Бидний гаргасан (6) томъёо нь [5-6] ажлуудад байгаа изомер харьцааны томъёотой таарч байгаа бөгөөд түүнийг энэ ажилд ашиглав.

### В. Туршлагын хэсэг

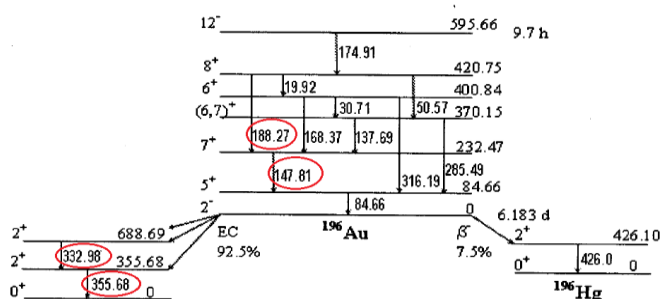
Энэ ажилд бид идэвхжүүлэх аргыг ашиглав. Энэ арга нь идэвхжүүлэх, үүссэн цөмийн задралыг судлах гэсэн үндсэн 2 үе шаттай. Идэвхжүүлэх шатанд судлах гэж буй дээжийг цацрагаар шарж урвал явуулан цацраг идэвхт цөм үүсгэнэ. Задралыг судлах шатанд дээжид үүссэн цацраг идэвхт цөмөөс гарах цацрагийн спектрийг хэмжинэ. Дээжийг шарах гамма цацрагийн үүсгүүр болгон МУИС-ийн ЦФСТ-ийн электроны цикл хурдасгуур Микротрон МТ-22-ыг ашиглав.

Дээжид үүссэн цацраг идэвхт цөмөөс гарах гамма цацрагийг бүртгэхэд ЦФСТ-д ашиглагдаж буй цэвэр Ge детектортой гамма спектрометрийг ашиглав.

Au1, Au2, Au3, Au4 гэж дугаарласан, тус бүр 0.0373 г, 0.0476 г, 0.1442 г ба 0.3409 г масстай, ойролцоогоор 1 см орчим диаметртэй, 0.2 мм зузаантай алтны 4 дээжийг бэлдэж ашиглав. <sup>197</sup>Au(γ,n)<sup>196m,g</sup>Au урвалын өгөгдлийг 1-р хүснэгтэд, <sup>196m,g</sup>Au цөмийн задралын схемийг 1-р зурагт тус тус харуулав.

1-р хүснэгт. <sup>197</sup>Au(γ,n)<sup>196m,g</sup>Au урвалын өгөгдөл

Бай цөм	Үүссэн цөм	Спин J <sup>π</sup>	T <sub>1/2</sub>	E <sub>th</sub> , МэВ	E <sub>γ</sub> , кэВ (гаралт, %)	P, %
	<sup>196m</sup> Au	12 <sup>-</sup>	9.7 цаг	8.68	148 (43.5)	
					188 (37.4)	
<sup>197</sup> Au (100%)	<sup>196g</sup> Au	2 <sup>-</sup>	6.2 хоног	8.09	333 (22.9)	100
					356 (87)	
					426 (7.2)	

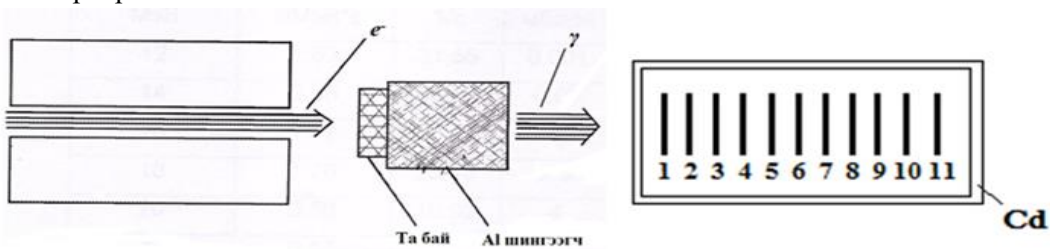


1-р зураг. <sup>196m,g</sup>Au задралын схем

Микротрон МТ-22 хурдасгуурт 22 МэВ энергитэй болтол хурдассан электроныг 2мм зузаантай Тантал (Ta)-байд тусган саатлын гамма цацрагийг үүсгэдэг. Нимгэн Та-бай дээр тусч буй зарим электрон нэвтрэн өнгөрдөг учраас тэдгээрийг шингээхийн тулд 25мм зузаантай хөнгөн цагаан (Al)-ыг Та-байны ар талд байрлуулсан байдаг. Энэ нь гамма цацрагийн гаралт ба эрчимд бараг нөлөөлөхгүй. Микротрон МТ-22 дээр 2 удаа шаралт хийсэн бөгөөд 1-р шаралтанд Au1, Au2 дээжийг зэс (Cu) монитор ба Индий (In) дээжтэй хамт 2 цаг, 2-р шаралтанд Au3, Au4 дээжийг Cu монитор ба In дээжтэй хамт 2 цаг 10 мин тус тус гамма

цацрагаар шарав. Дээрх 2 шаралтын үед Микротрон МТ-22-ын электроны дундаж гүйдэл 3мкА байв. Микротрон МТ-22-ын саатлын

гамма цацрагийн сувагт дээж ба мониторыг 2-р зурагт харуулсан схемийн дагуу байрлуулав.



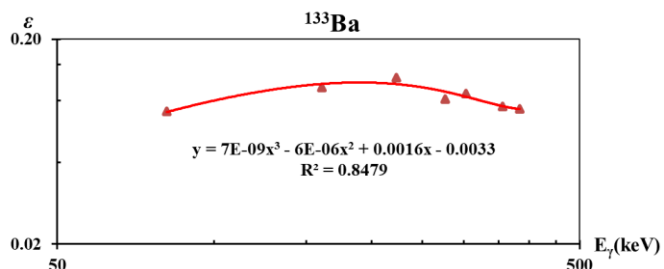
2-р зураг. Микротроны гамма суваг дахь дээжийн байрлал

Энд: 1,3,5,7,9,11 – Cu монитор; 2,4 - Au дээж; 6,8,10 – In дээж.

Энэ ажлаар зөвхөн алтны дээжүүд дээр боловсруулалт хийсэн үр дүнг харуулах бөгөөд In дээжийг цаашид судлах зорилготойгоор хамт шарсан болно.

Микротроны гамма цацрагийн суваг нь гадуураа хар тугалгаар хамгаалагдсан байдаг тул түүнтэй гамма цацраг харилцан үйлчилснээр ( $\gamma, n$ ), ( $\gamma, 2n$ ) зэрэг фото-урвалууд явагдах боломжтой. Эндээс үүсч буй фото-нейтроноос дээжийг хамгаалах зориулалтаар металл кадмий (Cd)-гаар дээжүүдээ боож шарсан. 2 шаралтанд дээжүүдийн байрлал, шаралтын геометр зэрэг бүх үзүүлэлтүүд нь ижил байв.

Гамма цацрагийг хэмжсэн цэвэр Ge-детекторын энергийн ялгах чадамж нь  $^{60}\text{Co}$ -ын 1333 кэВ энергитэй гамма шугам дээр  $\sim 2$  кэВ байв.  $^{133}\text{Ba}$  үүсгүүр ашиглан гамма спектрометрийн бүртгэмжийн муруйг байгуулсныг 3-р зурагт харуулав.



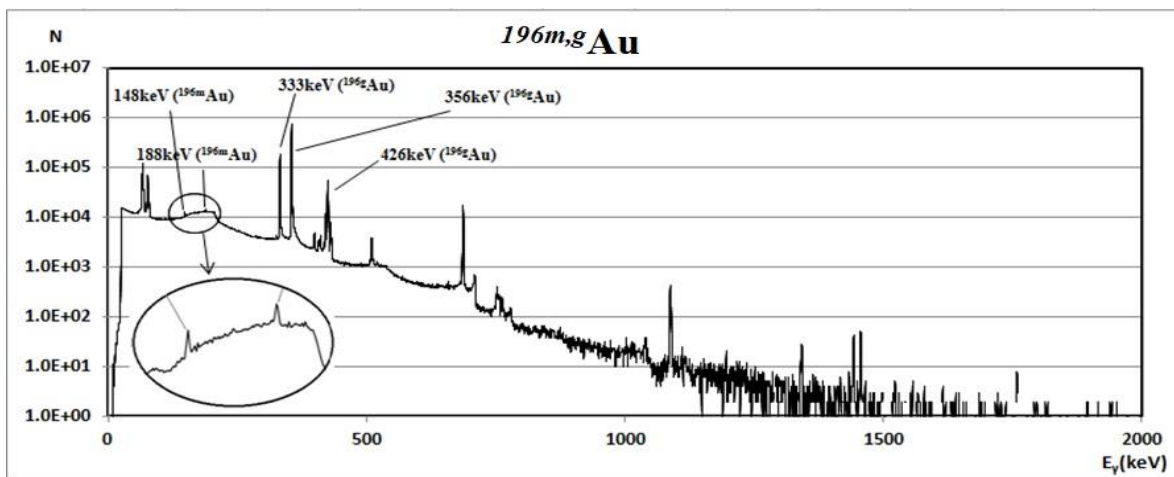
3-р зураг. Гамма спектрометрийн бүртгэмжийн муруй

Эндээс тухайн гамма шугамд харгалзах бүртгэмж  $\epsilon$ -ыг шууд тодорхойлж болно.

2-р хүснэгт. Гамма шугамд харгалзах спектрометрийн бүртгэмж

$E_\gamma$ , кэВ	148	188	333	356
$\epsilon$	0.125	0.132	0.123	0.122

Гамма цацрагаар шарагдсан алтны дээжийн гамма спектрийг 4-р зурагт харуулав. Энд илэрсэн алтны изомер шилжилтэд харгалзах 148 кэВ ба 188 кэВ энергитэй шугамууд ба үндсэн төлвийн задралаас үүссэн 333 кэВ, 356 кэВ, 426 кэВ энергитэй шугамуудын талбайг тодорхойлж үр дүнгийн боловсруулалт хийв.



4-р зураг. AuI дээжийг 22МэВ энергитэй саатлын гамма квантаар 120мин шарж, 256мин хүлээсний дараа 10мин хэмжсэн спектр

### Ш. ҮР ДҮН БА ХЭЛЭЛЦҮҮЛЭГ

Изомер харьцааг тодорхойлоход шаардагдах дээжүүдийн туршилтийн болон хэмжилтийн өгөгдлийг 3-р хүснэгтэд өгөв.

3-р хүснэгт. Au1,2,3,4 дээжийн хэмжилтийн болон туршлагын өгөгдлүүд

Дээж	$S_{m,g} \pm \Delta S\%$				$t_1$	$t_2$	$t_3$
	148 кэВ	188 кэВ	333 кэВ	356 кэВ	(мин.)	(мин.)	(мин.)
Au1	2753±10	3862±10	400687±0.3	1737286±0.1	120	256	10
Au2	3366±10	5103±9	508688±0.3	2185659±0.1		269	
Au3	6338±8	8846±8	1004572±0.2	4402407±0.1	130	214	
Au4	2086±21	3268±15	357120±0.3	1675496±0.2		200	

Дээж тус бүрт алтны изомер харьцааг (6) томъёогоор бодож, жинлэсэн дундаж утгыг  $\overline{IR} = (4.0 \pm 0.5) \cdot 10^{-4}$  гэж олов (4-р хүснэгт).

4-р хүснэгт. Алтны изомер харьцааг тодорхойлсон үр дүн

Дээж	Харьцуулж буй $\gamma$ шугам		$IR$ ( $10^{-4}$ )	$\langle IR_{Au_i} \rangle$ ( $10^{-4}$ )	$\overline{IR}_{Au}$ ( $10^{-4}$ )
	m, (кэВ)	g, (кэВ)			
Au1	148	333	3.3	4.0±1.0	4.0±0.5
		356	2.9		
	188	333	5.2		
		356	4.5		
Au2	148	333	4.2	4.6±1.1	
		356	3.8		
	188	333	5.5		
		356	4.9		
Au3	148	333	3.7	4.1±1.0	
		356	3.1		
	188	333	5.2		
		356	4.4		
Au4	148	333	2.8	3.5±0.8	
		356	2.3		
	188	333	4.9		
		356	3.9		

Энэ утгаа бусад судлаачдын тодорхойлсон үр дүнтэй харьцуулсныг 5-р хүснэгтэд харуулав.

5-р хүснэгт. Саатлын гамма цацрагийн энергийг хамаарсан  $^{196m,g}\text{Au}$ -ийн изомер харьцаа

$E_{\gamma}^{\max}$ (МэВ)	$^{197}\text{Au}(\gamma,n)^{196m,g}\text{Au}$		
	$IR = Y_m/Y_g$	Бусад ажилд ( $10^{-4}$ )	Эшлэл
Энэ ажилд ( $10^{-4}$ )			
15		1.28	[5]
18		2.94	[5]
21.5		3.78	[5]
22	(4.0±0.5)	(6.0±0.40)	[7]
23.5		4.03	[5]
25		(5.4±0.30)	[8]
30		(5.5±0.40)	[8]
50		(4.95±0.51)	[2]
60		(5.72±0.72)	[2]

1,2 ба 3-р хүснэгт дэх өгөгдлүүдийг ашиглан  $^{196m,g}\text{Au}$ -ийн изомер харьцааг (6) томъёогоор тодорхойлов.

Зөвхөн [7] ажилд  $E^{\max} = 22$  МэВ үед  $^{196m,g}\text{Au}$  цөмийн изомер харьцааг тодорхойлсон. Бидний энэ ажлаар тодорхойлсон утга [7] ажилд тодорхойлсон утгаас  $\sim 1.5$  дахин бага байна. Саатлын гамма цацрагийн максимум энерги 22 МэВ үед  $^{196m,g}\text{Au}$  цөмийн изомер харьцааг тодорхойлсон өөр ажил байхгүй учраас яагаад зөрүүтэй байгаа талаар одоогоор тодорхой тайлбар өгөхөд хүндрэлтэй байна. Гэхдээ изомер харьцаа өдөөж буй саатлын гамма цацрагийн максимум энергиас хамаарч буй байдлаас харахад, [7] ажил дахь утга бусдаасаа ялгарч харьцангуй өндөр байна. Харин бидний тодорхойлсон изомер харьцаа бусад судлаачдын үр дүнгийн ерөнхий хандлагатай сайн тохирч байгааг тэмдэглэх хэрэгтэй.

### IV. ДҮГНЭЛТ

- Изомер харьцааг тодорхойлоход ашиглагддаг томъёонуудын гаргалгааг хийж бусад судлаачдын гаргасан томъёотой харьцуулав.
- Саатлын гамма цацрагаар өдөөгдсөн цөмийн изомер төлвийг судлах туршлагын арга зүйг эзэмшиж, Микротрон МТ-22 хурдасгуурын нил спектртэй гамма цацрагаар ( $E^{\max} = 22$  МэВ) өдөөгдсөн  $^{196m,g}\text{Au}$ -ын изомер харьцааг  $\overline{IR} = (4.0 \pm 0.5) \cdot 10^{-4}$  гэж тодорхойлов.
- Бидний тодорхойлсон утга Ю.П.Гангрский нарын гарган авсан үр дүнгээс  $\sim 1.5$  дахин бага гарав.
- Саатлын гамма цацрагийн энергийн өөр мужид бусад судлаачдын гарган авсан үр дүнгүүдтэй харьцуулахад Ю.П.Гангрский нарын тодорхойлсон утга харьцангуй өндөр байгаа бөгөөд харин бидний үр дүн  $^{196m,g}\text{Au}$ -ийн изомер харьцааны ерөнхий хамаарал буюу хандлагатай сайн тохирч байна.

**НОМ ЗҮЙ**

- [1] H.Bartsch *et al.*, *Nucl. Phys. A*, 256, 1976, pp. 243-252.
- [2] Md.S.Rahman *et al.*, *J. Radional. Nucl. Chem.* 283, 2010, pp. 519-525.
- [3] M.Tatari *et al.*, *J. Radional. Nucl. Chem.* 300, 2014, pp. 269-275.
- [4] Tranc Duc Theip *et al.*, *Письма в ЭЧАЯ*, Т.3, №4(133), 2006, pp. 7-16.
- [5] A.P.Tonchev *et al.*, *Phys. Rev. C*, 58 (5), 1998, pp. 2851-2857.
- [6] Pham Duc Khue *et al.*, *Communications in Physics*, 22 (1), 2012, pp. 75-81.
- [7] Yu.P.Gangrsky *et al.*, *Physics of Atomic Nuclei*, 67 (7), 2004, pp. 1227-1232.
- [8] S.R.Palvanov *et al.*, *Atomic Energy*, 87 (1), 1999, pp. 533-536.