

## НЕЙТРОНЫ ҮЙЛЧЛЭЛЭЭР АЛЬФА БӨӨМ ЦӨМӨӨС ГАРАХ УРВАЛЫН ОГТЛОЛ

Ж.Бадамсамбуу, Г.Хүүхэнхүү, Ч.Лхагважав  
МУИС, Цөмийн судалгааны төв

**Түлхүүр үг:** Нейтрон, цөмийн урвал, альфа бөөм, урвалын огтлол, систематик анализ

**Товч утга:** Хурдан нейтроны үйлчлэлээр цөмөөс цэнэгтэй бөөм гарах урвалын огтлолын ерөнхий томъёоноос (n, $\alpha$ ) урвалын огтлолын томъёог гаргав. Уг томъёог ашиглан 14.5 МэВ энергитэй нейтроноор явагдах (n, $\alpha$ ) урвалын огтлолын туршлагаар хэмжигдсэн утгуудад систематик анализ хийв.

### 1. ОРШИЛ

Анх В.Н.Левковский 14.5 МэВ энергитэй нейтроны үйлчлэлээр цөмөөс цэнэгтэй бөөм гарах урвалын огтлол тодорхой зүй тогтолтой болохыг ажиглажээ [1,2]. Ийм зүй тогтол зөвхөн 14.5 МэВ энергитэй нейтроны хувьд төдийгүй нейтроны энергийн өргөн мужид хүчинтэй болохыг [3,4] ажилд харуулсан. Эдгээрийг тайлбарлах онолын үндэслэл зүй ёсоор шаардагдсан учир цөмийн урвалын статистик загварт тулгуурлан нейтроны үйлчлэлээр цөмөөс цэнэгтэй бөөм гарах урвалын огтлолын ерөнхий томъёог гаргаж түүнээс (n,p) урвалын огтлолын хялбар илэрхийллийг гаргасан [5].

Энэ ажилд нейтроны үйлчлэлээр цөмөөс цэнэгтэй бөөм гарах урвалын огтлолын ерөнхий томъёоноос (n, $\alpha$ ) урвалын огтлолыг бодох илэрхийллүүдийг гаргаж, түүнийгээ ашиглан 14.5 МэВ энергитэй нейтроноор

явагдах  $(n, \alpha)$  урвалын огтлолын туршлагаар хэмжигдсэн утгуудад анализ хийсэн тухай өгүүлнэ.

## 2. $(n, \alpha)$ УРВАЛЫН ОГТЛОЛЫН ТОМЪЁО

Нейтроны үйлчлэлээр цөмөөс цэнэгтэй  $x$ -бөөм гарах  $(n, x)$  урвалын огтлолын ерөнхий томъёог статистик загварт тулгуурлан дараах хэлбэртэйгээр бичиж болно [5]:

$$\sigma(n, x) = \sigma_c(n) \frac{(2S_x + 1) M_x e^{-\frac{B_x - \delta_x + V_x}{\Theta}} \left\{ 1 - \frac{E_n + Q_{nx} - V_x}{\Theta} e^{-\frac{E_n + Q_{nx} - V_x}{\Theta}} - e^{-\frac{E_n + Q_{nx} - V_x}{\Theta}} \right\}}{\sum_i (2S_i + 1) M_i e^{-\frac{B_i - \delta_i + V_i}{\Theta}} \left\{ 1 - \frac{E_n + Q_{ni} - V_i}{\Theta} e^{-\frac{E_n + Q_{ni} - V_i}{\Theta}} - e^{-\frac{E_n + Q_{ni} - V_i}{\Theta}} \right\}} \quad (1)$$

Энд  $\sigma_c(n)$  - нейтроны үйлчлэлээр компаунд цөм үүсэх огтлол,  $S$  - тухайн бөөмийн спин,  $M$  - тухайн бөөмийн масс,  $Q_{nx}$ -урвалын энерги,  $V$ -гарч байгаа бөөмд үүссэн цөмийн зүгээс учруулах потенциал саад,  $\Theta$  - цөмийн термодинамик температур,  $E_n$ -нейтроны энерги,  $\delta$ -цөмийн тэгш сондгойгоос хамаарсан параметр. Хурдан нейтроноор явагдах урвалын гаралтын бүх суваг  $(E_n + Q_{ni} - V_i) \gg \Theta$  ба  $\Gamma \approx \Gamma_n$  гэвэл (1) томъёог  $(n, \alpha)$  урвалын хувьд дараах хэлбэртэй бичиж болно.

$$\sigma(n, \alpha) = \sigma_c(n) \frac{(2S_\alpha + 1) M_\alpha e^{-\frac{Q_\alpha - V_\alpha}{\Theta}}}{(2S_n + 1) M_n} \quad (2)$$

Нейтроны энергийн өргөн мужид компаунд цөм үүсэх огтлолыг  $\sigma_c(n) = \pi(R + \lambda)^2$  гэж авдаг [5], Энд  $\lambda$ -нейтроны долгионы уртыг  $2\pi$ -д хуваасан утга.  $S_\alpha = 0$ ,  $S_n = 1/2$ ,  $M_\alpha \approx 4M_{\text{нук}} \approx 4M_n$  ( $M_{\text{нук}}$  - нэг нуклоны масс) гэвэл (2) томъёо

$$\sigma(n, \alpha) = 2\pi(R + \lambda)^2 e^{\frac{Q_{n\alpha} - V_c}{\theta}} \quad (3)$$

болно.

Энерги хадгалагдах хууль ёсоор урвалын энерги дараах байдлаар бичигдэнэ.

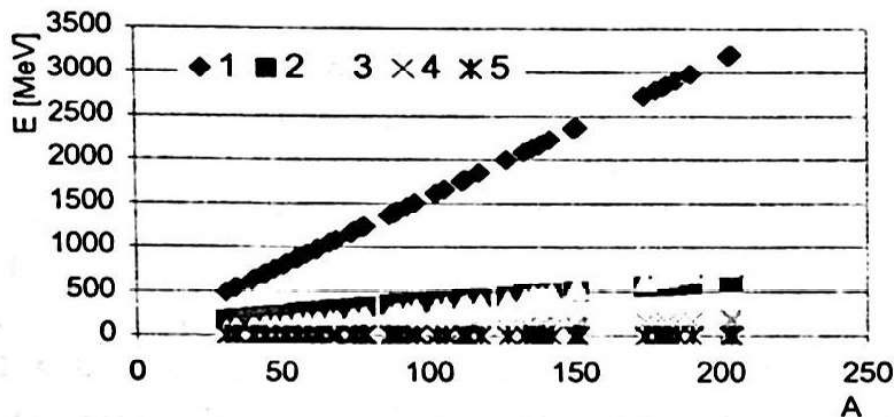
$$Q_{n\alpha} = E_\gamma - E_\beta + \varepsilon_\alpha \quad (4)$$

Энд:  $E_\gamma$ -үүссэн цөмийн холбоос энерги,  $E_\beta$ -бай цөмийн холбоос энерги,  $\varepsilon_\alpha$ -альфа бөөмийн холбоос энерги.

Цөмийн холбоос энергийг Вайцзеккерийн томъёогоор тооцвол

$$E_\beta = \alpha A - \beta A^{2/3} - \gamma \frac{Z^2}{A^{1/3}} - \xi \frac{(A - 2Z)^2}{A} - \frac{\delta_\beta}{A^{3/4}} \quad (5)$$

болно.



Зураг.1 Вайцзеккерийн томъёоны гишүүдийн хувь нэмэр.

Энд 1, 2, 3, 4, 5-Вайцзеккерийн томъёоны гишүүдийн дугаарыг харгалзан заана.

Нэгдүгээр зургаас харвал ( $Z \geq 15$ ) цөмүүдийн хувьд Вайцзеккерийн томъёонд байгаа сүүлийн гишүүн бусадтайгаа харьцангуй маш бага учраас бай-цөмийн холбоос энергийг

$$E_\beta = \alpha A - \beta A^{2/3} - \gamma \frac{Z^2}{A^{1/3}} - \xi \frac{(A - 2Z)^2}{A} \quad (6)$$

үүссэн цөмийн холбоос энергийг

$$E_\gamma = \alpha(A-3) - \beta(A-3)^{2/3} - \gamma \frac{(Z-2)^2}{(A-3)^{1/3}} - \xi \frac{(A-3-2(Z-2))^2}{A-3} \quad (7)$$

хэлбэртэйгээр бичиж болно.

Энд:  $\alpha=15.7$  МэВ,  $\beta=17.8$  МэВ,  $\gamma=0.71$  МэВ,  $\xi=23.7$  МэВ байдаг. (4), (6), (7)-оос

$$Q_{\alpha} = -3\alpha + \beta(A^{2/3} - (A-3)^{2/3}) + \gamma \left( \frac{Z^2}{A^{1/3}} - \frac{(Z-2)^2}{(A-3)^{1/3}} \right) + \xi \left( \frac{(N-Z+1)^2}{A-3} - \frac{(N-Z)^2}{A} \right) + \epsilon_\alpha \quad (8)$$

болно. (8)-г (3)-д орлуулбал хурдан нейтроны үйлчлэлээр цөмөөс альфа бөөм гарах ( $n, \alpha$ ) урвалын огтлол дараах байдлаар илэрхийлэгдэнэ:

$$\sigma(n, \alpha) = 2\pi(R + \lambda)^2 e^{-\frac{1}{\theta} \left\{ -3\alpha + \beta(A^{2/3} - (A-3)^{2/3}) + \gamma \left( \frac{Z^2}{A^{1/3}} - \frac{(Z-2)^2}{(A-3)^{1/3}} \right) + \xi \left( \frac{(N-Z+1)^2}{A-3} - \frac{(N-Z)^2}{A} \right) + \epsilon_\alpha - V_\alpha \right\}} \quad (9)$$

Альфа бөөмд үүссэн цөмийн зүгээс учруулах потенциал саадыг

$$V_\alpha = 2.058 \frac{Z-2}{(A-3)^{1/3} + 4^{1/3}} \quad (10)$$

гэж бичиж болно [6].

Энд (9)-г хялбарчлахын тулд

$$C = 2 \exp \frac{1}{\theta} \left\{ -3\alpha + \beta(A^{2/3} - (A-3)^{2/3}) + \gamma \left( \frac{Z^2}{A^{1/3}} - \frac{(Z-2)^2}{(A-3)^{1/3}} \right) + \epsilon_\alpha - V_\alpha \right\} \quad (11)$$

$$K = \frac{\xi}{\theta} \quad (12)$$

тэмдэглэгээ хийвэл

$$\sigma_{n, \alpha} = C \pi (R + \lambda)^2 e^{-K \frac{3(N-Z)^2 + 2A(N-Z+0.5)}{A(A-3)}} \quad (13)$$

гэж хурдан нейтроны үйлчлэлээр цөмөөс альфа бөөм гарах ( $n, \alpha$ ) урвалын огтлолын томъёо гарч байна.

Одоо (13) илэрхийлэлд анализ хийе.

1. Хэрэв (13) томъёонд

$$A-3 \approx A, \quad 3(N-Z)^2 \ll 2A(N-Z+0.5)$$

гэж ойролцоолоод

$$C_1 = 2 \exp \frac{1}{\Theta} \left\{ \gamma \frac{4(Z-1)}{A^{1/3}} + \varepsilon_\alpha - V_\alpha \right\} \quad (14)$$

$$K_1 = \frac{2\xi}{\Theta} \quad (15)$$

гэсэн тэмдэглэгээ хийвэл

$$\sigma_1 = C_1 \pi (R + \lambda)^2 e^{-K_1 \frac{N-Z+0.5}{A}} \quad (16)$$

гэж Gul-ийн [10] томъёотой төстэй илэрхийлэл гарав.

2. Хэрэв (13) томъёонд

$$\sqrt{(A-3)^{2\beta}} = A^{2\beta} \left(1 - \frac{3}{A}\right)^{2\beta} \approx A^{2\beta} \left(1 - \frac{2\beta \cdot 3}{3A}\right) \approx A^{2\beta} \left(1 - \frac{2}{A}\right) = A^{2\beta} - 2A^{2\beta-1}$$

$$(A-3)^{\beta} \approx A^{\beta} - A^{2\beta-1}$$

гэсэн математик ойролцоолол ашиглаад

$$C_2 = 2 \exp \frac{1}{\Theta} \left\{ -3\alpha + 3\beta \frac{1}{A^{1/3}} + \gamma \frac{7(Z-1)-1}{2A^{1/3}} + \varepsilon_\alpha - V_\alpha \right\} \quad (18)$$

гэсэн тэмдэглэгээ хийж (15)-г тооцвол

$$\sigma_2(\eta, \alpha) = C_2 \pi (R + \lambda)^2 e^{-K_1 \frac{N-Z+0.5}{A}} \quad (19)$$

болно.

3. (13) томъёоны экспонентийн зэргийг эмхэтгэвэл

$$\sigma(\eta, \alpha) = C \pi (R + \lambda)^2 e^{-K \frac{5A^2 - 16ZA + A + 12Z^2}{A(A-3)}} \quad (20)$$

хэлбэрт орно. (20)-д  $A \approx 2Z$  гэж үзээд.

$$K_3 = \frac{5\xi}{\Theta} \quad (21)$$

гэсэн тэмдэглэгээ хийвэл

$$\sigma_3 = C\pi(R + \lambda)^2 e^{-K_3 \frac{N-Z}{A-3}} \quad (22)$$

болно.

4. Хэрэв  $A \gg 3$  гэвэл (11)-ийг

$$C_4 = 2 \exp \frac{1}{\Theta} \left\{ -3\alpha + \gamma \frac{4(Z-1)}{A^{1/3}} + \epsilon_\alpha - V_\alpha \right\} \quad (23)$$

гэж болох ба (21)-г тооцвол (22) томъёо

$$\sigma_4 = C_4 \pi (R + \lambda)^2 e^{-K_3 \frac{N-Z}{A}} \quad (24)$$

гэж [4] ажилд гаргасан томъёотой ижил илэрхийлэл гарав. Ийнхүү бидний гаргасан (13) томъёоноос дөрвөн янзын илэрхийлэл тухайн тохиолдол болон гарч байна. Эдгээр илэрхийллүүдийг бусад эрдэмтэдийн гаргасан томъёонуудтай Хүснэгт.1-д жишиж харуулав.

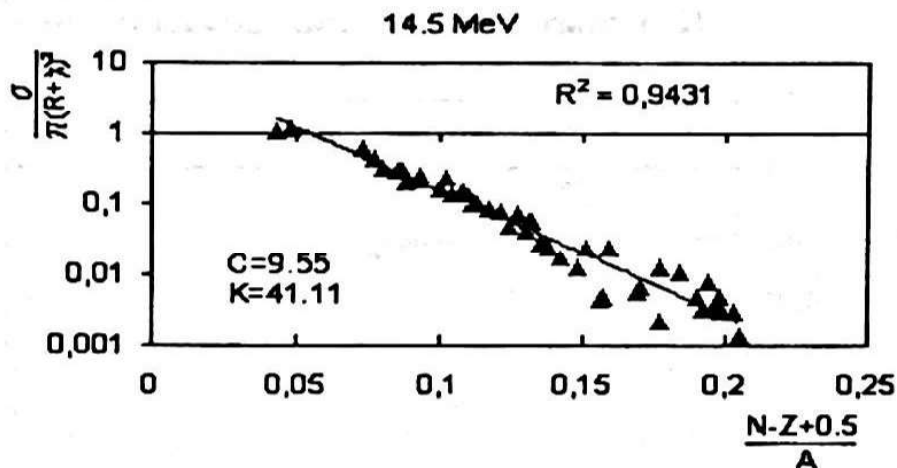
Бидний гаргасан дээрх дөрвөн янзын илэрхийллүүдийн  $\sigma_1$  ба  $\sigma_2$  нь Gul-ийн [10] томъёотой төстэй,  $\sigma_4$  нь Levkovskii [2], Forrest [7], Kumabe-Fukuda[8] нарийн томъёотой төстэй, харин  $\sigma_3$  нь бусад эрдэмтэдийн гаргасан томъёонуудаас арай өөр хэлбэртэй болох нь Хүснэгт.1-ээс харагдаж байна.

Хүснэгт.1

Зохиолч	Томъёо	Ишлэл	Массын муж
Levkovskii	$\sigma = 28.14(A^{1/3} + 1)^2 \exp\left(-38.44 \frac{N-Z}{A}\right)$	[2]	$31 \leq A \leq 202$
Forrest	$\sigma = \begin{cases} 22.08(A^{1/3} + 1)^2 \exp\left(-14.01 \frac{N-Z}{A} - 70.48\left(\frac{N-Z}{A}\right)^2 - 0.0196 A\right) \\ 23.24(A^{1/3} + 1)^2 \exp\left(-2.79 \frac{N-Z}{A} - 0.0408 A\right) \end{cases}$	[7]	$20 \leq Z \leq 50$ $50 \leq A \leq 82$
Kumabe & Fukuda	$\sigma = \begin{cases} 63.73 A^{1/2} \exp\left(-32.2 \frac{N-Z}{A}\right) \\ 66.48 A^{1/2} \exp\left(-35.9 \frac{N-Z}{A}\right) \\ 0.0000299 A^3 \exp\left(-20.2 \frac{N-Z}{A}\right) \end{cases}$	[8]	$30 \leq A \leq 60$ $61 \leq A \leq 105$ $106 \leq A \leq 140$
Ait-Tahar	$\sigma = 74.91(A^{1/3} + 1) \exp\left(-42.1 \frac{N-Z+1}{A}\right)$	[9]	$40 \leq A \leq 188$
Gul	$\sigma = (A^{1/3} + 1)^2 \exp\left(a_0 + a_1 \frac{Z-1.5}{TA^{1/3}} + a_2 \frac{N-Z+0.5}{TA} + a_3 \frac{Z-2}{E_1 A^{1/3}}\right)$ T – цөмийн температур, E <sub>1</sub> – компаунд цөмийн өдөөлтийн энерги	[10]	$Z \geq 20$

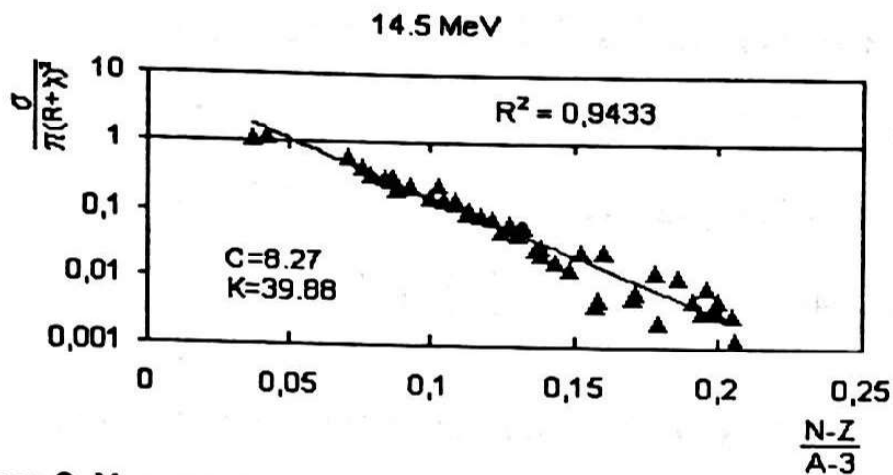
Энэ ажилд	$\sigma_1 = 2\pi(1.4A^{1/3} + \lambda)^2 \exp \frac{1}{\Theta} \left( 4\gamma \frac{Z-1}{A^{1/3}} - 2\xi \frac{N-Z+0.5}{A} + \epsilon_\alpha - V_\alpha \right)$ $\sigma_2 = 2\pi(1.4A^{1/3} + \lambda)^2 \exp \frac{1}{\Theta} \left( -3\alpha + 3\beta \frac{1}{A^{1/3}} + 3.5\gamma \frac{Z-1}{A^{1/3}} - 2\xi \frac{N-Z+0.5}{A} + \epsilon_\alpha - V_\alpha \right)$ $\sigma_3 = 2\pi(1.4A^{1/3} + \lambda)^2 \exp \frac{1}{\Theta} \left( -3\alpha + \beta(A^{2/3} - (A-3)^{2/3}) + \gamma \left( \frac{Z^2}{A^{1/3}} - \frac{(Z-2)^2}{(A^{1/3}-3)^2} \right) - 5\xi \frac{N-Z}{A-3} + \epsilon_\alpha - V_\alpha \right)$ $\sigma_4 = 2\pi(1.4A^{1/3} + \lambda)^2 \exp \frac{1}{\Theta} \left( 4\gamma \frac{Z-1}{A^{1/3}} - 5\xi \frac{N-Z}{A} + \epsilon_\alpha - V_\alpha \right)$	A ≥ 30
-----------	---	--------

### 3. 14.5 МэВ ЭНЕРГИТЭЙ НЕЙТРОНООР ЯВАГДАХ (n,α) УРВАЛЫН ОГТЛОЛЫН АНАЛИЗ

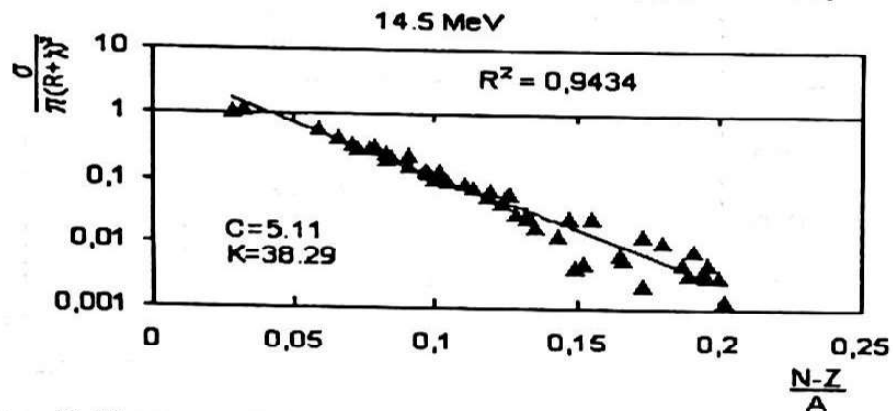


Зураг 1. Урвалын огтлолын туршлагаар хэмжсэн утгыг (15) томъёогоор боловсруулсан дүн





Зураг 2. Урвалын огтлолын туршлагаар хэмжсэн утгыг (21) томъёогоор боловсруулсан дүн



Зураг 3. Урвалын огтлолын туршлагаар хэмжсэн утгыг (23) томъёогоор боловсруулсан дүн

Урвалын огтлолын туршлагаар хэмжсэн утгыг бидний гаргасан томъёонуудаар боловсруулан анализ хийхэд хоорондоо онцын ялгаагүй ( $R^2$  нь бараг ижил) бөгөөд ерөнхий зүй тогтолтой болох нь харагдаж байна.

#### 4. ДҮГНЭЛТ

1. Хурдан нейтроны үйлчлэлээр цөмөөс цэнэгтэй бөөм гарах урвалын огтлолын ерөнхий томъёоноос ( $n, \alpha$ ) урвалын огтлолд систематик анализ хийх огтлолын томъёонуудыг гаргав.
2. Олсон томъёонуудаа ашиглан 14.5 МэВ энергитэй нейтроноор явагдах ( $n, \alpha$ ) урвалын огтлолын туршлагын утгуудад систематик

анализ хийхэд эдгээр томъёонууд хоорондоо онцын ялгаагүй болох нь харагдав.

3. Бидний ашигласан  $(n,x)$  урвалын огтлолын ерөнхий томъёоны гаргалгаа нь цөмийн урвалын компаунд механизмд тулгуурласан боловч  $E_n=14.5$  МэВ үед  $(n,\alpha)$  урвалын огтлолын туршлагын утгуудад системчилсэн анализ хийхэд муугүй тохирч байна. Цаашид нарийвчилсан анализ хийхдээ хагас шууд ба шууд урвалын механизмыг тооцох шаардлагатай.

## THE NEUTRON INDUCED ALPHA PARTICLE EMISSION REACTION CROSS-SECTIONS

J.Badamsambuu, G.Khuukhenkhuu, Ch.Lhagvajav  
NUM, Nuclear research center

### Abstract

From the general formula of the fast neutron induced charged particle emission reaction cross sections are deduced simple formulae of the  $(n,\alpha)$  reaction cross sections. Using the simple formulae is carried out systematical analysis of the known experimental  $(n,\alpha)$  cross sections.

### АШИГЛАСАН НОМ ХЭВЛЭЛ

1. В.Н.Левковский. *ЖЭТФ*, Т.45, №2(8), 1963, с.305-311.
2. В.Н.Левковский. *Ядерная физика*, т.18, №4, 1973, с.705-709.
3. G.Khuukhenkhuu et al, *JINR Communication*, E3-93-466, 1993, Dubna.
4. G.Khuukhenkhuu et al, *JINR Communication*, E3-94-316, 1994, Dubna.
5. Г.Хүүхэнхүү, Г.Үнэнбат МУИС, *Эрдэм шинжилгээний бичиг* №7(159), 2000, х.72, УБ.
6. D.G.Gardner, Yu-Wen Yu *Nuclear Physics*. №1(60), 1964, p49-64.
7. R.A.Forrest, AERE-R 1249, Harwell Laboratory, (December, 1986).
8. I.Kumabe, K.Fukuda, NEANDC(J) 65/U 45, 1978.
9. S.Ait-Tahar, *Journal Physics. G:Nuclear Physics*. 13L121, 1987.
10. K.Gul, INDC(PAK)-009 (July,1995), IAEA, Vienn