

Нейтрон Цөмийн Харилцан Үйлчлэлийн Судалгааны Үүсэл Хөгжил

Г.Хүүхэнхүү, М.Одсүрэн
МУИС, Цөмийн Судалгааны Төв

Abstract

Origin and development in Mongolia of the study on interaction of neutrons with nuclei in cooperation with the Joint Institute for Nuclear Research are described. New results of the statistical model analysis for fast neutron induced (n,p) reaction cross sections are given.

PACS numbers: 24.10.Pa, 24.60.Dr

I. ОРШИЛ

Дэлхийн II дайн дууссаны дараа шинжлэх ухаан техникийн салбар бүр асар хурдацтай хөгжиж, шинэ нээлт ололтууд он дараалан олноор гарч байсан 1956 онд ОХУ-ын Дубна хотод ЦШНИ-ийг байгуулжээ. Тэр үеийн зарим онцлог үйл явдлаас сийрүүлвэл:

- 1953-ЗХУ-д анхны устөрөгчийн бөмбөг туршив.
- 1954-ЗХУ-ын Обнинск хотод анхны АЦС ажиллав.
- 1954-Г.Гамов гинетикийн кодыг нээв.
- 1955-Э.Сегре антипротоныг нээв.
- 1956-Антинейтрон нээгдэв.
- 1956-Ли, Янг нар тэгшлиг хадгалагдахгүй байх онолыг боловсруулав.
- 1957-ЗХУ-д анхны дэлхийн хиймэл дагуул хөөргөв.
- 1958-Мёссбауэрын эффект нээгдэв.

Хүйтэн дайны үе эхэлсэн түүхэн нөхцөл байдалтай уялдан ОХУ-д цөмийн зэвсэг, цөмийн эрчим хүчийг чухалд үзэж, дараах атомын хотуудыг байгуулсан билээ:

- Обнинск
- Дубна
- Арзамас-16
- Челябинск-40
- Красноярск-26
- Свердловск-45
- Томск-7
- Москва-400 (Семиплатинск-21)
- Дмитровград
- Железногорск
- Пенза-19
- Новосибирск

Москвагаас 130 км орчим зайд орших Дубна хотод 1947 оноос дээд зэргийн нууцлалтайгаар Гидротехникийн институт гэдэг нэртэй цөмийн судалгааны төвийг байгуулж улмаар Цөмийн

асуудлын институт болгон өөрчлөн нэрлэжээ. Энэ институтийг түшиглэн олон улсын ЦШНИ-ийг арван нэгэн гишүүн оронтойгоор байгуулсаны нэг нь Монгол улс байв.

Манай эрдэмтэд 1956 оноос Дубна хот дахь ЦШНИ-д очиж ажилласан бөгөөд тэдний судалгааны нэг гол чиглэл нь нейтрон физикийн асуудлууд байв. ЦШНИ-тэй идэвхтэй хамтран ажилласны үр дүнд 50 жилийн дотор манай улсад нейтрон физикийн бие даасан судалгааны чиглэл үүсэн буй болж, онол туршлагын чухал үр дүнд хүрсэн тухай энэ илтгэлд өгүүлнэ.

II. МАНАЙ ЭРДЭМТЭДИЙН НЕЙТРОН ФИЗИКИЙН АНХНЫ СУДАЛГАА

1956 онд ЦШНИ-ийг байгуулахад анх очиж ажилласан Монгол улсын гавъяат багш, академич Н.Содном Нейтрон физикийн лабораторид У-2 хурдасгуур дээр ^3He -ийн ионыг хурдасган ^3H байг бөмбөгдөхөд явагдах урвалуудын сувгийг өндөр нарийвчлалтай судалжээ [1, 2].

Эндээс гаргаж авсан үр дүнг халуун цөмийн урвалын судалгаа болон устөрөгчийн бөмбөгөнд ашиглах боломжтой байж болох юм.

1960-аад оны дундуур Х.Сиражет (одоо Казахстан улсын иргэн), Ж.Сэрээтэр нар ЦШНИ-ийн Нейтрон физикийн лабораторид томилогдон ажиллаж, нейтрон цөмийн харилцан үйлчлэлийн талаар суурь судалгаа явуулжээ. Ж.Сэрээтэр импульсэн реактор ИБР-ээс гарах хэдэн кэВ энергитэй нейтрон хар тугалганы цөм дээрээс саринах үзэгдлийг судлан нейтроны цахилгаан цэнэгийн туйлширлыг тодорхойлсон нь [3] олон жилийн турш шинжлэх ухааны ач холбогдлоо алдахгүй явж ирлээ.

Х.Сиражет импульсэн реактор ИБР дээр нейтроны нисэх хугацааны арга гэгчийг ашиглан масс тоо $A \sim 100$ байх цөмүүдийн хувьд радиацийн өргөн Γ_γ -ийг тодорхойлжээ [4,5]. Тэрээр баяжигдсан изотопууд ба ердийн элементүүд дээр нейтроны нэвтрэлт, радиацийн шингээлт, өөрийн

индуки гэсэн гурван аргыг хэрэглэснээр урьд нь эрдэмтэдийн гаргаж авсанаас илүү чухал үр дүнд хүрчээ.

III. НЕЙТРОНООР ЯВАГДАХ УРВАЛЫН СУДАЛГАА

3.1. Удиртгал

1975 оноос манай улс ЦШНИ-ийн Нейтрон физикийн лабораторид хийгддэг цөмийн урвалын судалгаанд системтэйгээр орсон юм. 1980-аад оны төгсгөл хүртэл Ван-де-Граафын хурдасгуур дээр протоныг хурдасган ${}^7\text{Li}$ байг бөмбөгдөн гаргаж авсан 30 кэВ орчим энергитэй нейтроноор явагдах (n,α) урвалыг ${}^{67}\text{Zn}$, ${}^{95}\text{Mo}$, ${}^{129}\text{Te}$, ${}^{143}\text{Nd}$, ${}^{147}\text{Sm}$, ${}^{149}\text{Sm}$ зэрэг изотопууд дээр судлав [6-12]. Эдгээр туршлагын үр дүнгээс харахад удаан буюу бэсрэг энергитэй нейтроноор явагдах (n,α) урвалыг компаунд механизмд үндэслэсэн статистик загвараар хангалттай тайлбарлаж болж байв.

Иймд нейтроны энергийг өсгөх замаар дээрх судалгааг өргөжүүлэх зорилго тавин 1990 оноос өнөөг хүртэл хурдан нейтроноор явагдах (n,α), (n,p) урвалыг Бээжингийн их сургуулийн Хүнд ионы физикийн институт болон Дубна хот дахь ЦШНИ-ийн Нейтрон физикийн лабораторид тэндхийн эрдэмтэдтэй хамтран судалж байна [13-19]. Эдгээр туршлагын үр дүнгүүд гадаадын олон улсын болон мэргэжлийн сэтгүүл ба олон улсын эрдэм шинжилгээний хурлын материалд хэвлэгдсэн учир энд зөвхөн сүүлийн үед гарган авсан онолын зарим үр дүнгээс авч үзье.

3.2. Хурдан нейтроноор явагдах урвалын статистик загвар

Хурдан нейтроны үйлчлэлээр цэнэгтэй бөөм үүсэх урвалыг тайлбарлахын тулд цөмийн урвалын компаунд, хагас шууд, шууд механизмуудад үндэслэсэн статистик, экситон ба Борны хавтгай долгионы дөхөлтийн загваруудыг хөгжүүлэн хэрэглэсэн юм [20, 21]. Эдгээрээс бид цөмийн урвалын компаунд механизмыг ашиглан [22] сүүлийн жилүүдэд гарган авсан зарим үр дүнгээс дор сийрүүлье.

Компаунд цөм үүсэх болон задрах хоёр үзэгдлийг хоорондоо үл хамаарна гэж үзвэл урвалын огтлолыг хоёр магадлалын үржвэрээр илэрхийлж болно:

$$c_{\alpha} = c_n(C) \cdot G_x \quad (1)$$

Энд: $c_n(C)$ -нейтроны үйлчлэлээр компаунд цөм үүсэх магадлал буюу огтлол; G_x -компаунд цөм задарч x-бөөм гарах магадлал. Энд $x = p, n, \alpha$ гэх мэт дурын бөөм байж болно.

Нейтроны хувьд компаунд цөм үүсэх огтлолыг дараах байдлаар илэрхийлэх боломжтой:

$$\sigma_n(C) = \pi(R + \lambda)^2 \quad (2)$$

Энд: $R = r_0 A^{1/3}$ -бай цөмийн радиус, A -бай цөмийн масс тоо (нуклоны тоо); λ -тусч буй нейтроны долгионы уртыг 2π -д хуваасан утга. Нейтроны кинетик энергийн классик томъёоноос

$$E_n = \frac{P_n^2}{2m} = \frac{h^2 k^2}{2m} = \frac{h^2}{2m\lambda^2}$$

гэвэл

$$\lambda = \frac{h}{\sqrt{2mE_n}} = \frac{4.55 \cdot 10^{-13}}{\sqrt{E_n(\text{MeV})}} (\text{cm}) \quad (3)$$

болно. Энд: m -нейтроны масс, k -нейтроны долгион тоо.

Компаунд цөм задрах магадлалыг

$$G_x = \frac{\Gamma_x}{\Gamma} \quad (4)$$

гэж болно. Компаунд цөм задрах процессыг x-бөөм цөмөөс ууршиж байгаа мэт авч үзвэл цөмийн түвшний x-бөөмд харгалзах дэд өргөнийг

$$\Gamma_x = \frac{2S_x + 1}{\pi^2 h^2 \rho_c(E_c)} M_x \int_{v_x}^{v_x^{\max}} \epsilon_x \sigma_c(\epsilon_c) \rho_y(U_x) d\epsilon_x \quad (5)$$

гэж болно. Энд: S_x нь x-бөөмийн спин; M_x нь x-бөөмийн масс; $\rho_y(U_x)$ -урвалаас үүссэн цөмийн түвшний нягт; $\rho_c(E_c)$ -компаунд цөмийн түвшний нягт; $\sigma_c(\epsilon_c)$ нь ϵ_c -энергитэй x-бөөм y-цөмд шингэж компаунд цөм үүсгэх урвуу урвалын огтлол; V_x -үүссэн y-цөмийн зүгээс x-бөөмд учруулах Кулоны потенциал саад; Энд y-цөмийн зүгээс x-бөөмд учруулах бусад потенциалыг (цөмийн ба төвөөс зугтах) тооцохгүй орхиё. $A \gg 1$ үед урвалын кинематик засварыг тооцох шаардлагагүй бөгөөд компаунд цөмийн өдөөлтийн энерги

$$E_c = E_n - B_n - \xi_n \quad (6)$$

болно. Энд: B_n - компаунд цөм дэх нейтроны холбоос энерги; ξ_n -нейтроны тооны тэгш сондгойгоос хамаарсан засвар. А бага E_n их үед урвалын кинематик ёсоор инерцийн төвийн хөдөлгөөнийг тооцвол дараах томъёогоор илэрхийлэгдэнэ:

$$E_c = \frac{A}{A-1} E_n + B_n + \delta_n \quad (7)$$

Урвалаас гарч буй x-бөөмийн хамгийн их энерги нь

$$\epsilon_x^{\max} = E_c - B_x + \delta_x = E_n + Q_{nx} \quad (8)$$

байна. Энд:

$$Q_{nx} = B_n - B_x - \epsilon_n - \epsilon_x \quad (9)$$

байна. Үүссэн y -цөмийн өдөөлтийн энерги:

$$U_x = \epsilon_x^{\max} - \epsilon_x \quad (10)$$

Квазиклассик тохиолдолд урвуу урвалын огтлолыг дараах байдлаар авдаг:

$$\sigma_c(\epsilon_x) = \begin{cases} \pi R^2 \left(1 - \frac{V_x}{\epsilon_x}\right) & \epsilon_x > V_x \\ 0 & \epsilon_x < V_x \end{cases} \quad (11)$$

Цөмийн энтропийг

$$S = \ln(N) \quad (12)$$

гэж авбал цөмийн төлвийн нягт буюу энергийн нэгж интервалд харгалзах төлвийн тоо (12)-оос

$$\rho(E) = \frac{1}{D} = \frac{N}{\Delta E} = \frac{1}{\Delta E} e^{S(E)} \quad (13)$$

болно.

Энд: ΔE -энергийн муж; N -энергийн энэ мужид харгалзах төлвийн тоо. Мөхлөг байхгүй тохиолдолд төлвийн тоо түвшний тоо хоёр тэнцэнэ.

Энтропийн чанар ёсоор:

$$\frac{dS}{dE} = \frac{1}{\epsilon} \quad (14)$$

Энд: $\epsilon = kT$ -термодинамик температур;

k -Больцманы тогтмол; T -абсолют температур.

Тогтмол температурын нарийвчлалд $\epsilon = const$ болж (14)-өөс интеграл авбал

$$\int_{S_c}^{S_y} dS = \int_{E_c}^{U_x} \frac{1}{\epsilon} dE$$

буюу

$$S_y - S_c = (U_x - E_c) / \epsilon \quad (15)$$

болно. Тэгвэл (8), (9), (10) ба (15) томъёонуудаас

$$\frac{\rho_y(U_x)}{\rho_c(E_c)} \approx e^{S_y - S_c} = e^{\frac{1}{\epsilon}(B_x + \delta_x + \epsilon_x)} \quad (16)$$

болно. (5) илэрхийлэлд (11) ба (16)-ыг орлуулвал

$$\Gamma_x = \frac{2S_x + 1}{\pi h^2} M_x R^2 \int_{V_x}^{\epsilon_x^{\max}} \epsilon_x \left(1 - \frac{V_x}{\epsilon_x}\right) e^{-\frac{B_x + \delta_x + \epsilon_x}{\epsilon}} d\epsilon_x \quad (17)$$

болно. (17) томъёоноос интеграл авсаны дараа

$$\Gamma_x = \frac{2S_x + 1}{\pi h^2} M_x R^2 \Theta^2 e^{-\frac{B_x + \delta_x + V_x}{\Theta}} \left\{ 1 - \frac{\epsilon_x^{\max} - V_x}{\Theta} e^{-\frac{\epsilon_x^{\max} - V_x}{\Theta}} - e^{-\frac{\epsilon_x^{\max} - V_x}{\Theta}} \right\} \quad (18)$$

гарна. Хэрэв гамма квантыг тооцолгүй урвалаас зөвхөн бөөм гарна гэвэл (1), (4), (8), (18) илэрхийлэлүүдээс

(n, x) урвалын огтлолын ерөнхий томъёог дараах хэлбэртэй бичиж болно [23]:

$$\sigma(n, x) = \sigma_c(n) \frac{(2S_x + 1) M_x e^{-\frac{B_x + \delta_x + V_x}{\Theta}} \left\{ 1 - \frac{W_{nx}}{\Theta} e^{-\frac{W_{nx}}{\Theta}} - e^{-\frac{W_{nx}}{\Theta}} \right\}}{\sum_i (2S_n + 1) M_i e^{-\frac{B_i + \delta_i + V_i}{\Theta}} \left\{ 1 - \frac{W_{ni}}{\Theta} e^{-\frac{W_{ni}}{\Theta}} - e^{-\frac{W_{ni}}{\Theta}} \right\}} \quad (19)$$

Энд:

$$W_{nx} = E_n + Q_{nx} - V_x \text{ ба}$$

$$W_{ni} = E_n - Q_{ni} - V_i;$$

Ийнхүү цөмийн температур, энтропи, түвшнүүдийн дундаж өргөн, дундаж зай зэрэг ойлголтууд болон уурших загварыг ашигласан цөмийн урвалын статистик загварт үндэслэсэн ерөнхий томъёог (n, x) урвалын огтлолын хувьд

гаргав.

Энэ томъёогоор хурдан нейтроноор явагдах (n, x) урвалын огтлолыг бодож гаргах боломжтой.

Хурдан нейтроны хувьд $\Gamma \approx \Gamma_n$ гэвэл $i = n$,

$$V_n = 0, Q_{nn} = 0 \text{ учир}$$

$$\sigma(n, x) = \sigma_c(n) \frac{2S_x + 1}{2S_n + 1} \frac{M_x}{M_n} e^{\frac{Q_{nx} - V_x}{\Theta}} \left\{ \frac{1 - \frac{W_{nx}}{\Theta} e^{-\frac{W_{nx}}{\Theta}} - e^{-\frac{W_{nx}}{\Theta}}}{1 - \frac{E_n}{\Theta} e^{-\frac{E_n}{\Theta}} - e^{-\frac{E_n}{\Theta}}} \right\} \quad (20)$$

гэж арай хялбар томъёо гарна. Хурдан нейтроноор явагдах урвалын хувьд $E_n \gg \Theta$ гээд дээрх илэрхийллийн том хаалттай хэсэг нэг рүү тэмүүлнэ гэвэл түүнийг тооцолгүйгээр (n, p) урвалын огтлолын томъёог дараах хэлбэртэй бичиж болно:

$$\sigma(n, p) = \sigma_c(n) \frac{2S_p + 1}{2S_n + 1} \frac{M_p}{M_n} e^{\frac{Q_{np} - V_p}{\Theta}} \quad (21)$$

Энд: $S_p = S_n = \frac{1}{2}$ бөгөөд $M_p \approx M_n$ тул

(2) ба (21)-ээс

$$\sigma(n, p) = \pi(R + \lambda)^2 e^{\frac{Q_{np} - V_p}{\Theta}} \quad (22)$$

$$E_i = \alpha A - \beta A^{2/3} - \gamma \frac{(Z-1)^2}{A^{1/3}} - \xi \frac{(A-2(Z-1))^2}{A} - \frac{\delta_i}{A^{3/4}}$$

Энд: $\alpha = 15.7$ МэВ, $\beta = 17.8$ МэВ, $\gamma = 0.71$ МэВ, $\xi = 23.7$ МэВ, δ нь цөм дэх протон нейтроны тооны тэгш сондгойгоос

гэсэн хялбар томъёо гарна. Үүссэн цөмийн зүгээс протонд учруулах потенциал саадыг

$$V_p = \frac{1.029(Z-1)}{A^{1/3} - 1} \text{ MeV} \quad (23)$$

гэж авч болдог. Урвалын энерги Q_{np} -ыг олохын тулд цөмийн холбоос энергийг тооцдог Вейцеккерийн томъёог ашиглая.

Бай цөмийн хувьд:

$$E_i = \alpha A - \beta A^{2/3} - \gamma \frac{Z^2}{A^{1/3}} - \xi \frac{(A-2Z)^2}{A} - \frac{\delta_i}{A^{3/4}}$$

(n, p) урвалаас үүссэн цөмийн хувьд:

хамаарах бөгөөд $|\xi| = 34$ МэВ буюу 0 байдаг.

Эндээс урвалын энергийг олвол

$$Q_{np} = E_f - E_i = \gamma \frac{2Z-1}{A^{1/3}} - 4\xi \frac{N-Z-1}{A} - \frac{\Delta}{A^{3/4}} \quad (24)$$

хийв. (22) ба (24)-өөс

гарна. Энд: $\Delta = \delta_i - \delta_f$ гэсэн тэмдэглэгээ

$$\sigma(n, p) = \pi(R + \lambda)^2 \exp \frac{1}{\Theta} \left(\gamma \frac{2Z-1}{A^{1/3}} - 4\xi \frac{N-Z+1}{A} + \frac{\Delta}{A^{3/4}} - V_p \right) \quad (25)$$

болно. Энд:

$$C = \exp \frac{1}{\Theta} \left(\gamma \frac{2Z-1}{A^{1/3}} + \frac{\Delta}{A^{3/4}} - V_p \right) \quad (26)$$

$$K = \frac{4\xi}{\Theta} \quad (27)$$

гэсэн тэмдэглэгээ ашиглавал систематик анализ хийхэд тохиромжтой томъёо гарна:

$$\sigma(n, p) = C \pi(R + \lambda)^2 e^{-K \frac{N-Z+1}{A}} \quad (28)$$

Ийнхүү (25) буюу (28) томъёог ашиглан (n, p) урвалын огтлолд анализ хийх боломжтой болов. (28) томъёоны C ба K параметруудийг (26) ба (27) томъёонуудаар бодож олж болохоос гадна хурдан нейтроны үйлчлэлээр явагдах (n, p) урвалын огтлолын туршлагын утгуудаас хөөж, чөлөөт параметр хэлбэрээр бас олох боломжтой.

Цөмийн урвалын статистик онолыг ашиглан гаргасан (28) томъёонд байгаа C, K параметрууд нь (26) ба (27) томъёонуудаас харахад бай цөмийн масс тоо, цэнэг, урвалын болон нейтроны энергиэс хамаарсан

хэмжигдэхүүнүүд байна. Одоо C ба K -параметруудийн хоорондох хамаарлыг олъё. Үүссэн u -цөмийн өдөөлтийн хамгийн их энергиэр цөмийн E температурыг тодорхойлж болдог:

$$\Theta = \sqrt{\frac{U_p^{\max}}{a}} \quad (29)$$

Энд: a - цөмийн түвшний нягтын параметр. Цөмийн Ферми-хий загварыг ашиглавал

$$a = \frac{A}{10} \quad (30)$$

байдаг. $U_p^{\max} = \epsilon_p^{\max}$ учир

$$U_p^{\max} = E_n + Q_{np}$$

болно. (29) ба (30)-аас

$$\Theta = \sqrt{\frac{10(E_n + Q_{np})}{A}} \quad (31)$$

болох бөгөөд (27), (31)-ээс K -ийг тодорхойлж болно:

$$K = \varphi \sqrt{\frac{A}{E_n + Q_{np}}}; \quad (32)$$

болно. Энд

$$\varphi = \frac{4\xi}{\sqrt{10}} = const.$$

Ихэнхдээ $Z \gg 1$ учир (23)-аас Кулоны потенциал

$$V_p \approx \frac{Z}{A^{1/3}}$$

болж, Δ -ийг бага гэж үзээд $\Delta = 0$ гэвэл (26) томъёоноос

$$C = \exp\left(\omega \frac{ZA^{1/6}}{\sqrt{E_n + Q_{np}}}\right) \quad (33)$$

болно. Энд:

$$\omega = \frac{2\gamma - 1}{\sqrt{10}} = const$$

байна. (33) ба (32)-оос K ба C параметруудийн холбоог тогтоовол

$$\ln C = \frac{Z}{A^{1/3}} \left(\frac{2\gamma - 1}{4\xi} \right) K \quad (34)$$

болно. Энд:

$$B = \frac{Z}{A^{1/3}} \left(\frac{2\gamma - 1}{4\xi} \right)$$

гэсэн тэмдэглэгээ хийвэл (34) томъёо дараах хэлбэрт орно:

$$\ln C = BK \text{ буюу } C = e^{BK} \quad (35)$$

3.3. Хурдан нейтроноор явагдах (n, p) урвалын огтлолын анализ

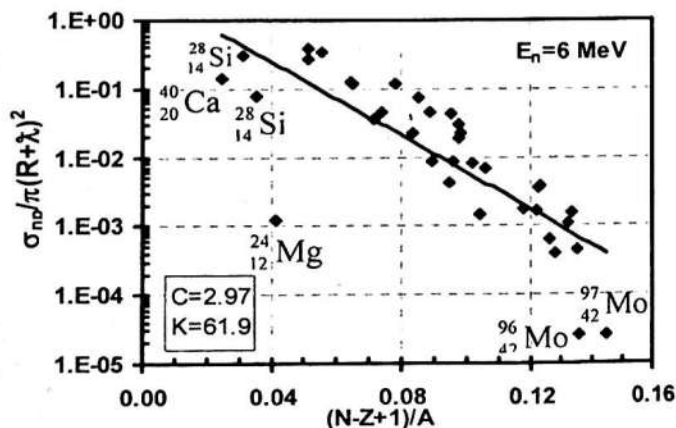
Анх В.Н.Левковский 14.5 МэВ энергитэй нейтроны үйлчлэлээр явагдах (n, p) ба (n, α) урвалын огтлолд тодорхой зүй тогтол байгааг ажигласан [24, 25]. Ийм зүй тогтол зөвхөн 14 МэВ энергийн мужид бус нейтроны энергийн өргөн мужид ажиглагдаж байгааг 1993 оноос хойш МУИС-ийн ЦСТ-д явуулж байгаа судалгааны үр дүн харуулсан [26-28].

(28) томъёоноос эмхэтгэсэн огтлол буюу (n, p) урвалын огтлолыг геометр огтлолд нь харьцуулсан харьцааг олоё:

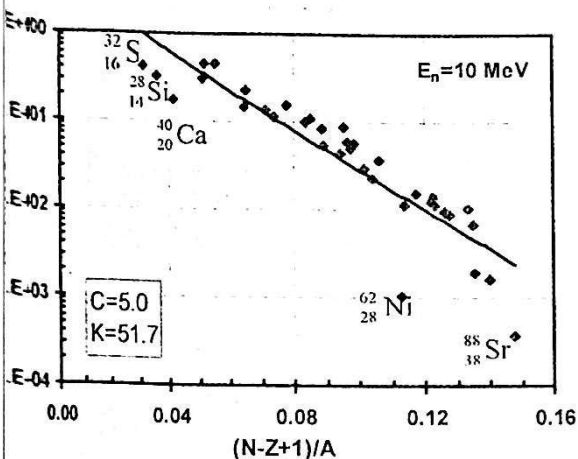
$$\frac{\sigma_{np}}{\pi(R + \lambda)^2} = Ce^{-K \frac{N-Z+1}{A}} \quad (36)$$

$E_n = 6$ ба 10 МэВ үед энэ томъёогоор тодорхойлогдох эмхэтгэсэн огтлол ба $(N - Z - 1)/A$ параметрийн хоорондох хамаарлыг 1 ба 2-р зурагт харуулав.

1, 2-р зургаас харахад $N = Z$ байдаг $^{40}_{20}\text{Ca}$, $^{32}_{16}\text{S}$, $^{28}_{14}\text{Si}$, $^{24}_{12}\text{Mg}$ изотопуудын хувьд эмхэтгэсэн огтлолын утгууд нь ерөнхий зүй тогтолоос ихээхэн хазайж байна. Эдгээр изотопын зарим өгөгдлийг 1-р хүснэгтэд бичив. 1-р хүснэгтээс харахад дээрх изотопууд нь тогтвортой бөгөөд байгаль дээр тархалт ихтэй, (n, p) урвалын босго харьцангуй өндөртэй учраас огтлол багатай байна.



1-р зураг.



2-р зураг.

Хүснэгт 1.

Изотоп	Байгальд орших %	Урвалын энерги Q_{np} (МэВ)
$^{24}_{12}Mg$	78.99	-4.732
$^{28}_{14}Si$	92.23	-3.860
$^{32}_{16}S$	95.02	-0.528
$^{40}_{20}Ca$	96.94	-0.529

Вейцеккерийн томъёоны 4-р гишүүн нь цөм дэх протон-нейтроны тооны ялгавартай

пропорциональ бөгөөд $\frac{(N-Z)^2}{A}$ -аар

тодорхойлогддог тул $N=Z$ цөмд холбоос энерги их байх нь ойлгомжтой. Нөгөө талаас энд гаргасан (28) буюу (36) томъёонд $(N-Z-1)/A$ гэсэн параметр экспонентийн сөрөг зэрэгтэй орж байгаа нь физик үндэслэлтэй гэдгийг харуулж байна. Эдгээрт тулгуурлан дээр дурьдсан дөрвөн изотопыг систематик анализад оруулалгүй орхив.

Мөн (n, p) урвалын өндөр босготой

$^{96}Mo(Q_{np} = -2.405)$ МэВ,

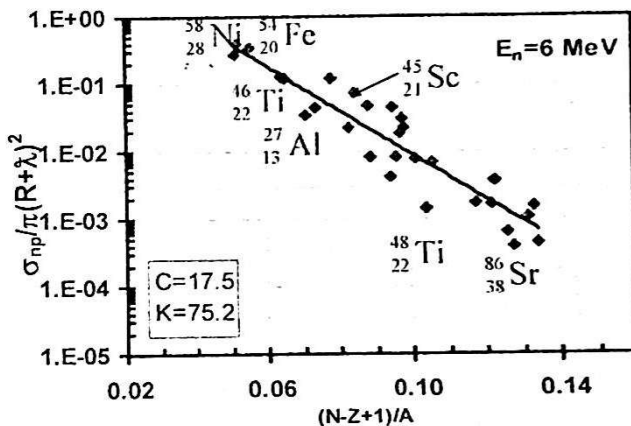
$^{97}Mo(Q_{np} = -1.153)$ МэВ,

$^{62}Ni(Q_{np} = -4.44)$ МэВ,

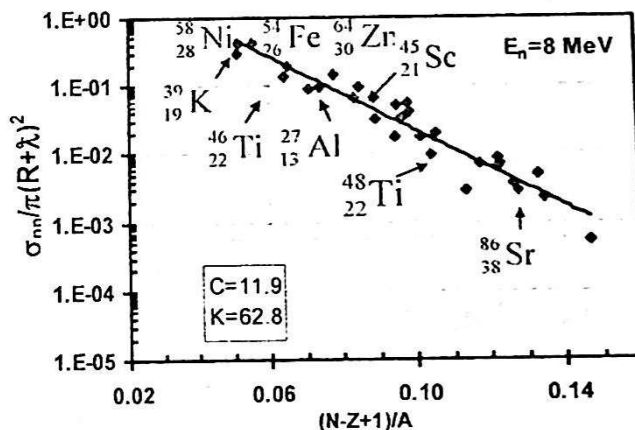
$^{88}Sr(Q_{np} = -4.522)$ МэВ дөрвөн изотоп $E_n = 6$

ба 10 МэВ үед ерөнхий зүй тогтлоос их хазайж байгааг 1 ба 2-р зургаас харж болно. Өндөр босготой урвалын огтлол нейтроны энерги $E_n : 10$ МэВ үед хүрэлцэхүйц өсч тодорхой зүй тогтолд хүрч амжаагүй байж болох юм. Түүнээс гадна эдгээр изотопын хувьд (n, p) урвалын огтлолын зөвхөн нэг өгөгдөл байдаг бөгөөд өөр судлаачид давтан хэмжилт хийгээгүй тул

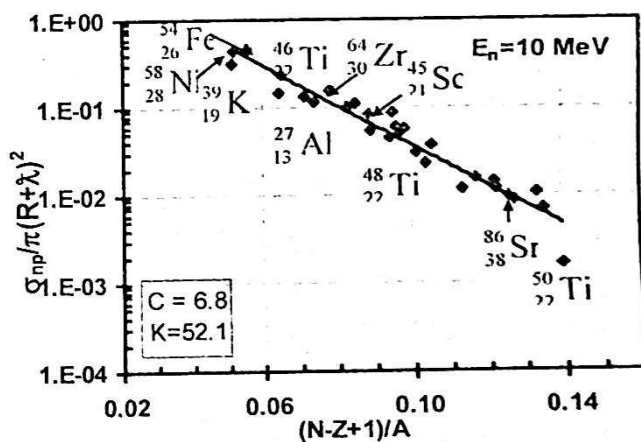
туршлагын утгыг $E_n : 10$ МэВ мужид хянаж үзэх шаардлагатай. Эдгээрт үндэслэн дээр дурдсан зарим изотопыг хасаад нейтроны энергийн $E_n = 6, 8, 10, 13, 16$ МэВ мужуудад тус бүр 30 орчим, $E_n = 14.5$ МэВ үед нийт 156 изотопыг систематик анализад хамруулсныг 3-8-р зурагт харуулав.



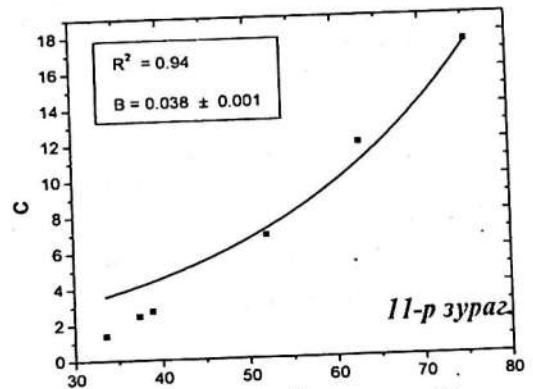
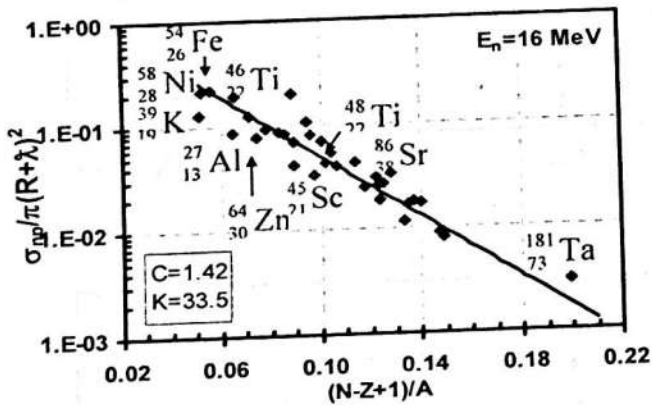
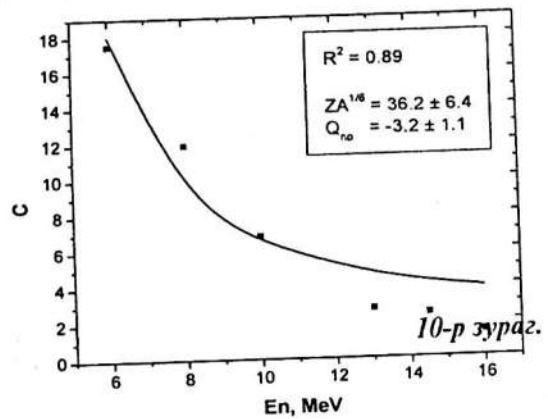
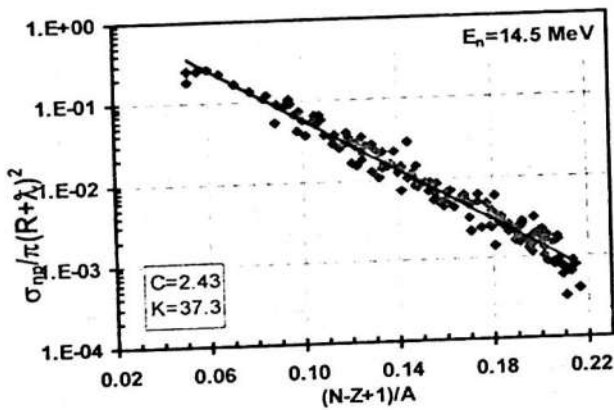
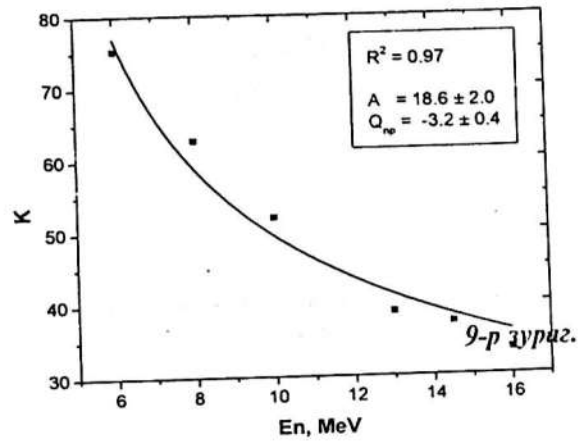
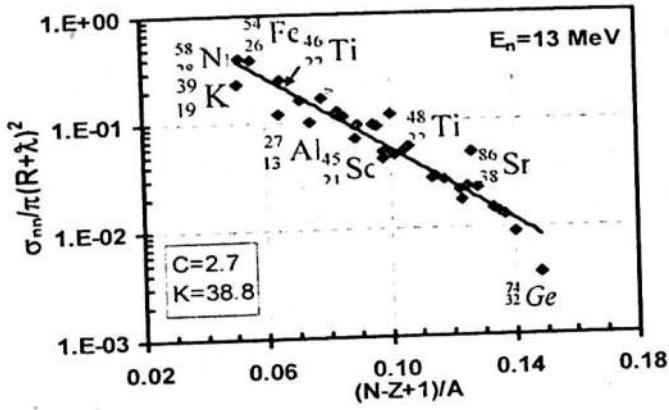
3-р зураг.



4-р зураг.



5-р зураг.



№	E_n (МэВ)	K	C
1	6	75.2	17.5
2	8	62.8	11.9
3	10	52.1	6.8
4	13	38.8	2.7
5	14.5	37.3	2.4
6	16	33.5	1.4

(28) буюу (36) томъёоны K ба C чөлөөт параметруудийг нейтроны энергийн янз бүрийн утганд харгалзах туршлагын өгөгдлүүдээс хөөж олсоныг 2-р хүснэгтэнд сийрүүлэв. Ингэж олсон K -параметрийн утгууд нейтроны энергиг хэрхэн хамаарч байгааг 9-р зурагт цэгүүдээр дүрслэв. Мөн энэ зураг дээр (32) томъёогоор илэрхийлэгдэх $K(E_n)$ хамаарлыг тасралтгүй муруйгаар дүрслэв. Урвалын энерги Q_{ν} ба байцөмийн масс тоо A хоёр нь цөм бүрт өөр байх

ёстой боловч энд бид $c(n, p)$ огтлол нь өгөгдсөн цөмүүдийн хувьд ямар нэг тогтмол эффектив A , Q_p утгууд байна гэж үзэн тэдгээрийг хөөж олсоноо мөн 9-р зурагт харуулав. Эдгээр эффектив A ба Q_p -ийг ашиглахад туршлагын өгөгдлүүдээс хөөж олсон ба онолын (32) томъёогоор бодсон K параметрийн утгууд хоорондоо сайн тохирч байгаа нь 9-р зургаас харагдаж байна. (28) томъёоны C -параметрийг туршлагаас хөөж олсоноо 10-р зурагт нейтроны энергигэс хамааруулан цэгээр дүрслэн харуулав. Харин онолын (33) томъёогоор олсон C -ийн утгыг тасралтгүй муруйгаар дүрслэв. Энд $(ZA)^{16}$ ба Q_p хэмжигдэхүүнүүдийг C -ийн онолын ба "туршлагын" утгууд хоорондоо хамгийн сайн тохирч байхаар хөөж олсоноо мөн 10-р зурагт өгөв. Эндээс харахад C параметрийн онолын ба "туршлагын" утгууд нейтроны өндөр энергийн мужид бага зэрэг зөрж байгаа боловч ерөнхий зүй тогтол нь муугүй тохирч байна. 2-р хүснэгтэнд байгаа C ба K -параметруудийн "туршлагын" утгуудын хоорондох хамаарлыг 11-р зурагт цэгээр дүрслэн харуулав. Энд C ба K хоёрыг холбосон (35) томъёоны B -ийг чөлөөт параметр гэж үзэн хөөж олоход дээрх хамаарлын онолын (тасралтгүй муруй) ба "туршлагын" утгууд муугүй тохирч байна.

ДҮГНЭЛТ

1. Дубна хот дахь ЦШНИ-ийн 50 жилийн ойг тохиолдуулан 1956 оноос хойш тус институтийн Нейтроны физикийн лабораторид ажиллаж нейтрон-цөмийн харилцан үйлчлэлийн талаар суурь судалгааны ажил хийсэн Монголын эрдэмтэн мэргэжилтнүүдийн гаргаж авсан зарим үр дүнгээс товч дурьдав.
2. Цөмийн урвалын компаунд механизмд үндэслэсэн статистик загварын нэгэн хувилбарыг хөгжүүлэн, түүнийгээ хурдан нейтроноор явагдах (n, p) урвалын огтлолын систематик анализад хэрэглэн гаргаж авсан зарим үр дүнг энд бичив. Тухайлбал, (n, p) урвалын огтлолын томъёон дахь параметр C , K хоёр нейтроны энергигэс болон өөр хоорондоо хэрхэн хамаарч байгааг харуулан статистик загварын томъёонууд сүүлийн үед бидний гарган авсан үр дүнг боломжийн тайлбарлаж чадаж байгааг нотлов.

ТАЛАРХАЛ

"Цөмийн урвал" сэдэвт суурь судалгааны хүрээнд гүйцэтгэсэн энэ ажлыг санхүүгийн талаар дэмжсэн БСШУЯ-ны Шинжлэх ухаан технологийн санд болон түүний захирал д-р, проф.Х.Цоохүүд гүн талархал илэрхийлэе.

АШИГЛАСАН НОМ ХЭВЛЭЛ

- [1]. Ли Га Ен, Г.М.Осетинский, Н.Содном, А.М.Говоров, И.В.Сизов, В.И.Салацкий. Исследование реакции ${}^3\text{He}+{}^3\text{H}$. Препринт ОИЯИ, р-426, 1959, Дубна
- [2]. Ли Га Ен, Г.М.Осетинский, Н.Содном, А.М.Говоров, И.В.Сизов, В.И.Салацкий. Исследование реакции ${}^3\text{He}+{}^3\text{H}$. ЖЭТФ, т.39, вып. 2(8), 1960
- [3]. Ю.А.Александров, Г.С.Самосват, Ж.Сэрээтэр, Цой Ген Сор. Рассеяние килловольтных нейтронов свинцом и электрическая поляризуемость нейтрона. Письма ЖЭТФ, т.4, вып.5, 1966, с.196
- [4]. Э.И.Шарапов, Л.Б.Пикельнер, К.Илиеску, Ким Хи Сан, Х.Спражет. Нейтронные резонансы необия и рубидия и радиационные ширины средних ядер. Препринт ОИЯИ, Р1771, 1964, Дубна
- [5]. Ким Хи Сан, Л.Б.Пикельнер, Х.Спражет, Э.И.Шарапов. Радиационные ширины средних ядер. ЖЭТФ, Том 49, вып.2(8), 1965
- [6]. В.А.Втиорин, Ю.П.Попов, В.И.Салацкий, А.М.Суховой, Г.Хуухэнхуу. Усредненные сечения реакции ${}^{147}\text{Sm}(n, \alpha){}^{144}\text{Nd}$ в области энергии нейтронов 30 кэВ. Сообщения ОИЯИ, Р 3-10733, 1977, Дубна
- [7]. Ю.П.Попов, В.И.Салацкий, Г.Хуухэнхуу. Усредненные сечения реакции ${}^{147}\text{Nd}(n, \alpha){}^{140}\text{Ce}$ в области энергий нейтронов 30 кэВ. Сообщения ОИЯИ, 3-12095, 1979, Дубна
- [8]. Ю.П.Попов, В.И.Салацкий, Г.Хуухэнхуу. Усредненные сечения реакции (n, α) на ядрах ${}^{147}\text{Sm}$, ${}^{143}\text{Nd}$ и ${}^{149}\text{Sm}$ в области энергии нейтронов 30 кэВ. Ядерная физика, т. 32, вып. 4(10), 1980, с.893
- [9]. Ю.П.Попов, В.И.Салацкий, Г.Хуухэнхуу, И. Чадраабал. Усредненное сечение реакции ${}^{95}\text{Mo}(n, \alpha){}^{92}\text{Zr}$ в области энергии нейтронов 30 кэВ. Сообщения ОИЯИ, Р3-82-774, 1982, Дубна
- [10]. В.А.Втиорин, А.В.Гребнев, А.Жак,

- А.Л.Кириллюк, Ю.П.Попов,
В.Ф.Украинцев, Фунг Ван Зуан,
И.Чадраабал
Измерение теплового сечения реакции ^{67}Zn
(n,α) ^{64}Ni и его интерпретация в рамках
многоуровневого формализма Райха-Мура.
Сообщения ОИЯИ, Р3-86-158, 1986, Дубна
- [11]. В.П.Вертебный, В.А.Втюрин, А.В.Гребнев,
А.Жак, И.Чадраабал
Исследование реакции ^{123}Te (n,α) в области
энергии нейтронов 2 кэВ с помощью
ионизационной камеры с двумя сетками.
Сообщения ОИЯИ, Р3-88-67, 1988, Дубна
- [12]. В.А. Втюрин, А.В.Гребнев, В.А.Пшеничный,
И.Чадраабал
Исследование реакции ^{123}Te (n,α) при энергии
нейтронов 24.5 кэВ
Сообщения ОИЯИ, Р 15-88-186, 1988, Дубна
- [13]. Tang Guoyou, Qu Decheng, Zhong Wenguang,
Cao Wentian, Bao Shanglian, Chen Zemin,
Chen Yingtang, Qi Huiquan, Yu.M.Gledenov,
G.Khuukhenkhoo
Angular Distribution and Cross Section
Measurements for the Reaction $^{40}\text{Ca}(n,\alpha)^{37}\text{Ar}$
Using Gridded Ionization Chamber
Nuclear Techniques, vol. 17, №3 (1994),
p. 129-135 (in Chinese)
- [14]. Zhang Xuemei, Chen Zemin, Liang Wei,
Tang Guoyou, Zhang Guohui, Yu.M.Gledenov,
G.Khuukhenkhoo, M.V.Sedysheva
Adjustment of High Pressure Twin Gridded
Ionization Chamber and Preliminary
Measurement of $^{58}\text{Ni}(n,p)$ Reaction
Nuclear Techniques, vol.22, №1, 1999,
P.R.China, Beijing, p.11-16
- [15]. Tang Guoyou, Bao Shanglian, Qu Decheng,
Zhong Wenguang, Cao Wentian, Chen Yingtang,
Qi Huiquan, Yu.M.Gledenov, G.Khuukhenkhoo
Measurement of Cross Section at 5 MeV and
Angular Distribution at 4 and 5 MeV for
Reaction $^{40}\text{Ca}(n,\alpha)^{37}\text{Ar}$
Communication of Nuclear Data Progress.№8
(1992), INDC(CPR)-029/L,
Chinese Nuclear Data Center, P.R.China, Atomic
Energy Press, Beijing, p. 7-15
- [16]. Tang Guoyou, Bai Xinhua, Shi Zhaomin,
Chen Jinxiang, Yu.M.Gledenov,
G.Khuukhenkhoo
Measurement of Angular Distribution and Cross
Section for $^{58}\text{Ni}(n,\alpha)^{55}\text{Fe}$ Reaction at 5.1 MeV
High Energy Physics and Nuclear Physics
(China), vol.19, №3, 1995, p.223-228
- [17]. Chen Yingtang, Chen Zemin, Qi Huiquan,
Li Mingtao, Tang Guoyou, Zhang Guohui,
Fan Jihong, Yu.M.Gledenov, G.Khuukhenkhoo
Angular Distribution and Cross Section
Measurements of $^{64}\text{Zn}(n,\alpha)^{61}\text{Ni}$ Reaction for
Neutron Energy 5 MeV
Chinese Journal of Nuclear Physics, vol.17, №2,
1995, p.167-170
- [18]. Guohui Zhang, Guoyou Tang, Jinxiang Chen,
Zhaomin Shi, Guangzhi Liu, Xuemei Zhang,
Zemin Chen, Yu.M.Gledenov, M.V.Sedysheva,
G.Khuukhenkhoo
Differential Cross Section Measurement for the
 $^6\text{Li}(n,t)^4\text{He}$ Reaction at 3.67 and 4.42 MeV
Nuclear Science and Engineering, (The
International Research Journal of the American
Nuclear Society), vol.134, №3, 2000, p.312-316
- [19]. Xuemei Zhang, Zemin Chen, Yingtang Chen,
Jing Yuan, Guoyou Tang, Guohui Zhang,
Jinxiang Chen, Yu.M.Gledenov,
G.Khuukhenkhoo, M.V.Sedysheva
Dispersion Relations for (n,n) (n,p) (n,α)
Reactions on ^{39}K and ^{40}Ca
Physical Review. C, (The International Research
Journal of the American Physical Society),
vol.61, №5, 2000, p.1-7
- [20]. G.Khuukhenkhoo, Yu.M.Gledenov,
B.Bayarbadrakh, M.V. Sedysheva
Nuclear Reaction Models and Systematical
Analysis for the Fast Neutron Induced (n,p)
Reaction Cross Sections
Proceedings of the XII International Seminar on
Interaction of Neutrons with Nuclei ISINN-12,
Dubna, 2004, p.394
- [21]. G.Khuukhenkhoo, B.Bayarbadrakh, M.Odsuren,
E.Sansarbayar, D.Ulzii-Orshikh
Nuclear Reaction Model Analysis of the Fast
Neutron Induced (n,p) Reaction Cross Sections
Proceedings of International School on
Contemporary Physics-III, August 8-15, 2005
Ulaanbaatar, Mongolia, University Press,
p.88-96.
- [22]. Г.Хүүхэнхүү, Г.Үнэнбат
Хурдан нейтроноор явагдах (n,p) урвалын
огтлол
МУИС-ийн эрдэм шинжилгээний бичиг, №7
(159), 2000, 72-83-р тал.
- [23]. G. Khuukhenkhoo, G. Unenbat,
Yu.M.Gledenov, M.V.Sedysheva
Statistical Model Approach to the Fast Neutron
Induced (n,p) Reaction Cross Section Systematics
Proceedings of the International Conference on
Nuclear Data for Science and Technology, Oct.
7-12, 2001, Tsukuba, Japan
Journal of Nuclear Science and Technology,
Supplement 2, Vol.1, p.782-784

- [24]. В.Н.Левковский
Эмпирические Закономерности в сечениях
реакций (n,p) при энергии нейтронов
14-15 МэВ
ЖЭТФ, т.45, 1963, вып. 2(8), с. 305
- [25]. В.Н.Левковский
Сечения реакций (n,p) и (n, α) при энергии
нейтронов 14-15 МэВ
Ядерная физика, Том.18, №4, 1973, с.705
- [26]. G.Khuukhenkhuu, Yu.M.Gledenov,
M.V.Sedysheva, G.Unenbat
Systematical Analysis of the Fast Neutron
Induced (n,p) Reaction Cross Sections
JINR Communications, E3-93-466, (1993),
Dubna, -4p
- [26]. G.Khuukhenkhuu Yu.M.Gledenov,
M.V.Sedysheva, G.Unenbat
Systematics of the Fast Neutron Induced (n, α)
Reaction Cross Sections
JINR Communications, E3-94-316. 1994. Dubna,
-6 p.
- [28]. G.Khuukhenkhuu, G.Unenbat, Yu.M.Gledenov,
M.V.Sedysheva
Systematical Analysis of the Fast Neutron
Induced Charged Particle Emission Reaction
Cross Sections
In book: "Proceedings of the International
Conference on Nuclear Data for Science
and Technology", May 19-24, 1997. Edited by
G.Reffo, A.Ventura, C.Grandi. Trieste, Italy,
Bologna, 1997, p.934-936