

Хуваагдлын Спектртэй Нейтроноор Явагдах (n,p) Урвалын Огтлолын Анализ

Г.Хүүхэнхүү, М.Одсүрэн

МУИС, Цөмийн судалгааны төв

Товч утга: Дулааны нейтроны үйлчлэлээр ^{235}U -ын цөм хуваагдахад үүссэн нейтроноор явагдах (n,p) урвалын огтлолын туршлагын утгуудад цөмийн урвалын статистик загварыг ашиглан анализ хийв. ^{235}U -ын хуваагдлын нейтроноор явагдах (n,p) урвалын дундаж огтлолын утгуудад тодорхой систематик зүй тогтол ажиглагдав. Дулааны нейтроноор ^{235}U -ын цөм хуваагдах урвалаас үүссэн нейтроны эффектив дундаж энерги (n,p) урвалын хувьд ~4 МэВ гэж олдов.

Түлхүүр үг: Хуваагдлын нейтрон, нейтроны урвал, урвалын огтлол, статистик загвар, систематик анализ, нейтроны эффектив энерги.

PACS: 25.70.Gh, 25.85.Ec, 24.10.-i, 24.10.Pa.

I. ОРШИЛ

Цөмийн эрчим хүчний гол эх үүсгүүр болон ашиглагддаг ураны цөм нейтроны үйлчлэлээр хуваагдах урвалаас 2 МэВ орчим дундаж энергитэй хурдан нейтроноор үүсэн гардаг [1]. Эдгээр нейтроны энергийн түгэлтийг хуваагдлын спектр гэдэг. Хуваагдлын спектртэй нейтроноор явагдах урвалыг судлах нь цөмийн эрчим хүчний төхөөрөмж буюу реакторын тооцоонд чухал ач холбогдолтой. Тухайлбал, хуваагдлын нейтроноор явагдах (n,p) урвалыг судалсанаар цөмийн реакторын эд ангид үүсэх цацраг идэвх, температурын өсөлт, эвдрэл зэргийг тооцоолоход шаардлагатай мэдээллийг гарган авдаг.

Хуваагдлын нейтроноор явагдах (n,p) урвалын огтлолын утгуудад О. Хорибе анализ хийж, зарим зүй тогтол байгааг илрүүлжээ [2,3]. Гэвч тэрээр урвалын огтлолыг онолын загвар, механизмтай холбож нарийвчлан авч үзээгүй байна. Бид уг асуудлыг 1993 онд Левковскийн туршлагын томъёоны [4] тусламжтайгаар судалж (n,p) урвалын эмхэтгэсэн огтлол бай-цөмийн протон-нейтроны тооны харьцангуй зөрүүнээс тодорхой систематик зүй тогтолтойгоор хамаарч байгааг анх тогтоосон юм [5].

Энэ ажилд дулааны нейтроны үйлчлэлээр ^{235}U -ын цөм хуваагдахад үүссэн хурдан нейтроноор явагдах (n,p) урвалын огтлолын утгуудад цөмийн урвалын статистик загварт тулгуурлан анализ хийсэн тухай өгүүлнэ.

II. СТАТИСТИК ЗАГВАР

Хуваагдлын спектртэй нейтроны хувьд цөмийн урвалын хагас шууд ба шууд

механизмын нөлөөг бага гээд зөвхөн компаунд механизм гол үүрэгтэй гээ. Тэгвэл цөмийн урвалын статистик загвар, тогтмол температурын нарийвчлал ба холбоос энергийн Вайцеккерийн томъёог ашиглан (n,p) урвалын огтлолын томъёог дараах хэлбэртэй бичиж болно [6]:

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

Үүний:

$$C = \exp\left(ZA^{1/6} \frac{2\gamma - 1}{\sqrt{13.5(E_n + Q_{np})}} \right) \quad (2)$$

$$K = 4\xi \sqrt{\frac{A}{13.5(E_n + Q_{np})}} \quad (3)$$

Энд: R -бай цөмийн радиус; λ -нейтроны долгионы ургыг 2π -д хуваасан утга; N, Z, A -харгалзан бай-цөм дэх нейтроны, протоны болон масс тоонууд; γ, ξ -Вайцеккерийн томъёоны тогтмолууд; E_n -нейтроны энерги; Q_{np} -урвалын энерги.

(2) ба (3) томъёонуудаас

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

гэж бичиж болно. Тэгвэл (4)-өөс

$$C = e^{BK} \quad (5)$$

болон ба үүний

$$B = \frac{Z}{A^{1/3}} \frac{2\gamma - 1}{4\xi} \quad \text{болно} \quad (6)$$

(1)-(3) томъёонуудыг ашиглан нейтроны энергийн $E_n = 6 - 16$ МэВ болон $E_n = 18; 20$ МэВ мужуудад (n,p) урвалын огтлолын туршлагын утгуудад анализ хийсэн тухай [6,7] ажлуудаас үзэж болно.

Одоо дээрх томъёонуудыг ашиглан хуваагдлын спектртэй нейтроноор явагдах (n,p) урвалын огтлолын утгуудад анализ хийе.

III. (n,p) УРВАЛЫН ОГТЛОЛЫН СИСТЕМАТИК АНАЛИЗ

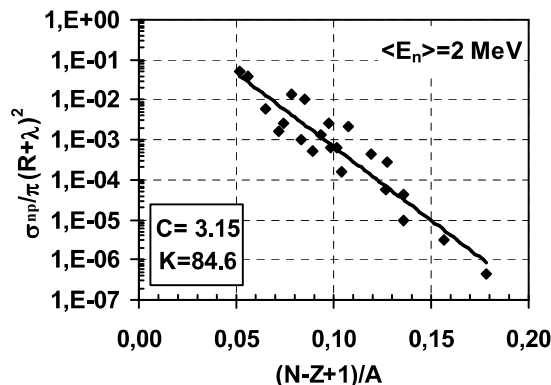
Хуваагдлын нейтроноор явагдах (n,p) урвалын дундаж огтлолын нилээд өгөгдлүүд нийтлэгдсэн байдаг (жишээ нь [8-11] ажлуудыг үз). Хуваагдлын нейтроны спектрийн хэлбэр болон туршлагын нөхцлөөс урвалын жинлэсэн дундаж огтлол

$$\langle \sigma(n, p) \rangle = \frac{\int \sigma_{np}(E_n) \phi(E_n) dE_n}{\int \phi(E_n) dE_n} \quad (7)$$

хамаардаг учир анализ дахь систематик алдааг багасгахын тулд зөвхөн нэг группийн хэмжсэн огтлолын утгуудыг [11] ашиглая. Ер нь дээр дурдсан (n,p) урвалын огтлолын өгөгдлүүд хоорондоо бараг таарч байгааг тэмдэглэх хэрэгтэй. (7) томъёон дахь $\phi(E_n)$ -хуваагдлын нейтроны энергийн спектр.

^{235}U изотоп дулааны нейтроноор хуваагдахад үүсэн гарах нейтроны дундаж энергийг $\langle E_n \rangle \approx 2$ МэВ гэж үзээд [11] дэх огтлолын өгөгдлүүдийг (1) томъёоны тусламжтайгаар боловсруулан системлэж анализ хийсэн дүнг 1-р зурагт харуулав. Эндээс харахад огтлолын өгөгдлүүд (1) томъёогоор татсан шулуунтай таарч байна. Энд (1) томъёон дахь C ба K-ийг чөлөөт параметрүүд гэж үзэн туршлагын цэгүүдээр хөөж олсоныг мөн харуулав.

Ингэж олсон C ба K-ийн утгууд нейтроны энергийн бусад муж дахь ($E_n = 6 - 20$ МэВ) утгуудын систематик зүй тогтолтой [6, 7] тохирохгүй байв. Энэ зөрүүгийн шалтгааныг тодруулахын тулд хоёр зүйлийг анхааралдаа авъя. Нэгдүгээрт, $\langle E_n \rangle \approx 2$ МэВ үед C ба K-ийн утга ямар байвал нейтроны энергийн бусад муж дахь ерөнхий зүй тогтлоос гажихгүй байх вэ. Хоёрдугаарт, (n,p) урвал явуулах хуваагдлын нейтроны дундаж эффектив энерги 2 МэВ-ээс өөр утгатай байж болох уу. Эдгээрээс гадна (1) томъёонд C ба K-ийн утгуудыг орлуулахад 1-р зурагт харуулсан туршлагын үр дүнтэй таарч байх ёстой.

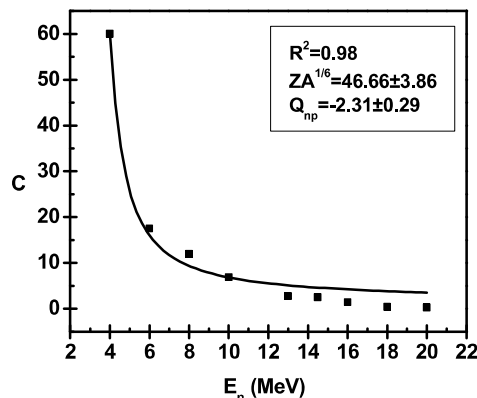


1-р зураг. (n,p) урвалын эмхтгэсэн огтлол ба $(N-Z+1)/A$ параметрийн хоорондох хамаарал

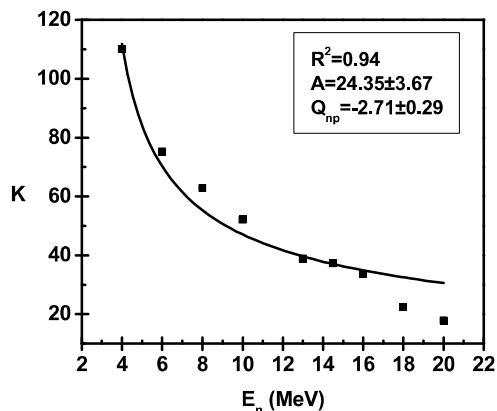
Энэ бүхнийг тооцсоны үндсэн дээр $C=60$, $K=110$, $\langle E_n \rangle_{eff} = 4$ МэВ байвал хамгийн боломжтой гэж олсоныг 1-р хүснэгтэд өгч, 2-5-р зургуудад харуулав. 1-р хүснэгт дэх C, K-ийн бусад утгыг [6, 7] ажлуудаас авав.

1-р хүснэгт. C, K параметрүүд ба нейтроны энергийн хоорондох хамаарал

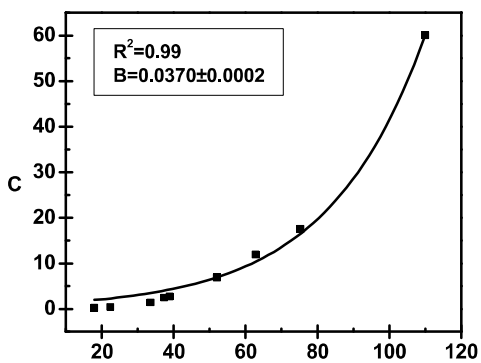
№	E_n (МэВ)	C	K
1	4	60	110
2	6	17.5	75.2
3	8	11.9	62.8
4	10	6.8	52.1
5	13	2.7	38.8
6	14.5	2.4	37.3
7	16	1.4	33.5
8	18	0.39	22.4
9	20	0.23	17.9



2-р зураг. Параметр C ба нейтроны энергийн хоорондох хамаарал

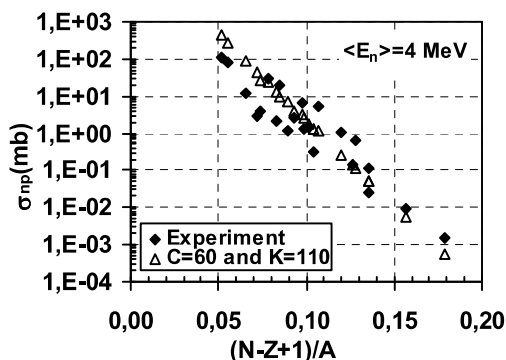


3-р зураг. Параметр K ба нейтроны энергийн хоорондох хамаарал



4-р зураг. C ба K параметруудийн хоорондох хамаарал

Эдгээр зурагт дөрвөлжин хар цэгээр туршлагаас хөөж олсон C буюу K-ийн утгуудыг, муруйгаар (2), (3) ба (5) томъёог ашиглан олсон онолын тооцооны үр дүнг дүрслэв.

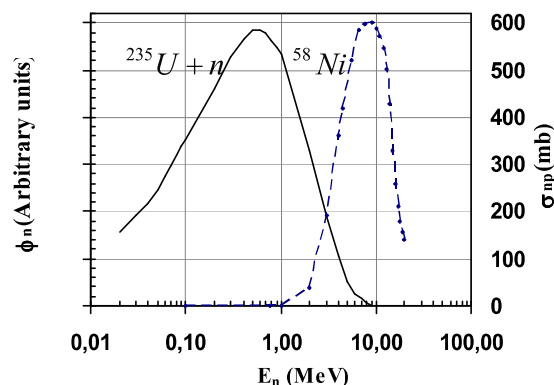


5-р зураг. (1) томъёоны $C=60$ ба $K=110$ байх үеийн (n,p) урвалын онолын огтлол ба туршилагын өгөгдлүүд

Цөмийн урвалын статистик загварт үндэслэн гаргасан онолын дээрх томъёонууд туршлагын үр дүнгүүдийг тайлбарлаж чадаж байгааг эдгээрээс харж болно.

IV. НЕЙТРОНЫ ЭФФЕКТИВ ЭНЕРГИ

Ураны ^{235}U -изотоп дулааны нейтроноор хуваагдахад үүсэн гарах нейтроны дундаж энерги $\langle E_n \rangle \approx 2$ МэВ байдгийг (n,p) урвал явуулах дундаж эффектив $\langle E_n \rangle_{\text{eff}} \approx 4$ МэВ энергээр сольсоны үндэслэлийг тодруулан авч үзье. ^{235}U -ын хуваагдлын спектрийн туршлагын олон утгыг онолын түгэлтүүдтэй харьцуулах замаар $E_n = 1.96$ МэВ ≈ 2 МэВ гэж олсоныг [1] найдвартай үр дүн гээд 6-р зурагт дүрслэв.



6-р зураг. Хуваагдлын нейтроны энергийн спектр [1] ба $^{58}\text{Ni}(n,p)^{58}\text{Co}$ урвалын огтлол [12].

Мөн 6-р зурагт $^{58}\text{Ni}(n,p)^{58}\text{Co}$ урвалын огтлолын муруйг жишээ болгон үзүүлэв. Эндээс харахад (n,p) урвал явагдах боломж дээрх хоёр муруйн давхцаж буй хэсгээр тодорхойлогдож байна. Нейтроны энергийн спектрээр жинлэсэн (n,p) урвалын дундаж огтлолыг (7) томъёогоор тодорхойлно. Дийлэнх изотопуудын хувьд (n,p) урвал явагдах босго энерги $E_{th} = 2 - 5$ МэВ мужид байгааг харж [12] болно. Тиймээс хуваагдлын спектртэй нейтроноор явагдах (n,p) урвалын хувьд нейтроны дундаж эффектив энергийг 2 МэВ-ээс их бөгөөд 4 МэВ орчим байна гэх үндэстэй.

V. ДҮГНЭЛТ

1. Ураны хуваагдлын нейтроноор явагдах (n,p) урвалын огтлолын туршлагын утгуудад цөмийн урвалын статистик загварыг ашиглан анализ хийж тодорхой систематик зүй тогтлууд байгааг харуулав.
2. Статистик загварыг ашиглан гаргасан онолын томъёонууд хуваагдлын нейтроноор явагдах (n,p) урвалын огтлолын туршлагын үр дүнг тайлбарлаж чадаж байгааг үзүүлэв.
3. Хуваагдлын спектртэй нейтроноор явагдах (n,p) урвалын хувьд нейтроны дундаж эффектив энерги 4 МэВ орчимд байж болохоор гарав.

АШИГЛАСАН НОМ СЭТГҮҮЛ

- [1]. Б.И.Старостов, А.Ф.Семенов, В.Н.Нефедов. Вопросы атомной науки и техники. Серия: Ядерные константы. Выпуск 2(37), 1980, сс.3-44.
- [2]. О.Horibe. Annals of Nuclear Energy. Vol.10, N7, 1983, pp.359-373.
- [3]. О.Horibe. In book: Nuclear Data for Basic and Applied Science. (Proceedings of the International Conference. Santa Fe, New Mexico, 13-17 May 1985), pp.517-520.
- [4]. В.Н.Левковский. Ядерная физика.т.18, N4, 1973, сс.705-709.
- [5]. G.Khuukhenkhoo, Yu.M.Gledenov, M.V.Sedysheva. JINR Communication. E3-93-205. 1993, Dubna.
- [6]. G.Khuukhenkhoo, G.Unenbat, M.Odsuren, Yu.M.Gledenov, M.V.Sedysheva, B.Bayarbadrakh. JINR Communication. E3-2007-25. 2007, Dubna.
- [7]. G.Khuukhenkhoo, Yu.M.Gledenov, M.V.Sedysheva, M.Odsuren. In book: Neutron Spectroscopy, Nuclear Structure, Related Topics. (Proceedings of the XVI International Seminar on Interaction of Neutrons with Nuclei, June 11-14, 2008). Dubna (in press).

- [8]. В.М.Бычков, В.Н.Манохин, А.Б.Пащенко, В.И.Пляскин. Сечения пороговых реакций, вызываемых нейтронами (справочник). Энергоиздат. Москва, 1982.
- [9]. A.Calamand. Handbook on Nuclear Activation Cross Sections. IAEA Technical Reports, series N156, pp.273-324.
- [10]. A.Calamand. Cross-Sections for Fission Neutron Spectrum Induced Reactions. INDC (IDS)-55/L, IAEA, 1973, Vienna.
- [11]. О.Horibe, Y.Mizumoto, T.Kusakobe, H.Chatani. In book: 50 Years with Nuclear Fission (Proceedings of the International Conference, April 25-28, 1989).vol.2, Washington, D.C., Editors: J.W.Behrens and A.D.Carlson. pp.923-930.
- [12]. Handbook on Nuclear Activation Data. IAEA Technical Reports, Series N273, 1987, Vienna.

Analysis of (n,p) Reaction Cross Sections for Fission Neutron Spectrum

Abstract

Using the statistical model known experimental (n,p) reaction cross sections averaged over the ^{235}U thermal fission neutron spectrum were analyzed. Some regularities for the (n,p) cross sections averaged in the ^{235}U thermal fission neutron spectrum were observed. It was shown that the experimental data are satisfactorily described by the statistical model. For (n,p) reactions of thermal neutron induced ^{235}U fission neutrons the effective average energy of neutrons was found to be ~ 4 MeV.

Анализ Сечений (n,p) Реакции Для Нейтронов Спектра Деления

Аннотация

Известные экспериментальные данные усредненных по спектру деления ^{235}U тепловыми нейтронами сечений (n,p) реакции анализируются с помощью статистической модели ядерных реакций. Некоторые закономерности обнаружены для сечений (n,p) реакции, усредненных по спектру деления ^{235}U . Показано, что результаты расчетов, проведенных статистической моделью, удовлетворительно согласуются с экспериментальными данными. Средняя эффективная энергия нейтронов для (n,p) реакции, индуцированной нейтронами деления ^{235}U , оказалась равной ~ 4 МэВ.