

(n, ${}^3\text{He}$) урвалын огтлолын анализ ба ${}^3\text{He}$ кластер бүрэлдэх магадлал

Н.Батцоож*, Б.Батчимэг, М.Одсүрэн, Г.Хүүхэнхүү

Цөмийн Физикийн Судалгааны Төв, Монгол Улсын Их Сургууль, Улаанбаатар, Монгол Улс

Цөмийн урвалын компаунд механизмын хүрээнд, статистик загварыг ашиглан (n, ${}^3\text{He}$) урвалын огтлолын томъёог гаргав. Энэ томъёогоо ашиглан 14-15 МэВ энергитэй нейтроноор явагдах (n, ${}^3\text{He}$) урвалын огтлолын туршлагын утгуудад системчилсэн анализ хийв. (n, ${}^3\text{He}$) урвалын туршлагын эмхэтгэсэн огтлолууд нь бай цөм дэх протон, нейтроны тооны асимметр параметр $(N-Z+1)/A$ -ээс тодорхой зүй тогтлоор хамаарч байгааг харуулав. (n, ${}^3\text{He}$) урвалын огтлолын онолын ба туршлагын утгуудыг хооронд нь харьцуулах замаар ${}^3\text{He}$ кластер бүрэлдэх магадлалыг олов. Ингэж олсон ${}^3\text{He}$ кластер бүрэлдэх магадлалаа урьд нь бидний тодорхойлсон ${}^4\text{He}$ ба ${}^3\text{H}$ кластер үүсэх фактортой харьцуулав.

PACS numbers: 24.60.Dr, 21.60.Gx

Түлхүүр үгс: Цөмийн урвал, компаунд механизм, статистик загвар, урвалын огтлол, эмхэтгэсэн огтлол, огтлолын анализ, ${}^3\text{He}$ кластер

1. ОРШИЛ

Хурдан нейтроны үйлчлэлээр цэнэгт бөөм үүсэн гарах урвалыг судалснаар цөмийн бүтэц, урвалын талаар онол танин мэдэхүйн ач холбогдолтой тулгуур мэдээлэл гарган авах боломжтой учир эдгээр урвалын огтлолын талаар дэлхийн судалгааны төвүүдээс гарч буй мэдээллүүдийг нэгтгэн эмхэтгэж, системчилсэн анализ хийх, онолын тооцоотой жиших хэрэгтэй болдог. Хурдан нейтроны үйлчлэлээр бай цөмөөс цэнэгт бөөм гарах урвалын онолын судалгаа МУИС-ийн Цөмийн физикийн судалгааны төвд 1990 оны эхнээс хийгдэж эхэлсэн бөгөөд (n,p), (n, α) урвалын огтлолыг тусч буй нейтроны энергийн $E_n = 2-20$ МэВ өргөн мужид судалж ирсэн. (n,p), (n, α) урвалуудын үед устөрөгч ба гелий (${}^4\text{He}$) үүссэний улмаас нейтроны өндөр урсгалтай цөмийн реакторын эд ангид хийн бөмбөлөг бүрэлдэж эвдрэлд хүргэж болзошгүй аюулаас сэргийлэхийн тулд урьдчилсан тооцоо хийх практик шаардлага ч гардаг.

Хурдан нейтроны үйлчлэлээр ${}^4\text{He}$ -өөс гадна бай-цөмөөс ${}^3\text{He}$ үүсэн гарах боломжтой. ${}^3\text{He}$ -хий дэлхий дээр нэн ховор (${}^4\text{He}=99.999866\%$; ${}^3\text{He}=0.000134\%$) боловч цөмийн физикт нейтроныг бүртгэхэд, криогеникийн техникт хэт нам температур гарган авахад, анагаах ухаанд эмчилгээний дүрслэл оношилгоонд хэрэглэгддэг

чухал ач холбогдолтой. Эдгээрээс гадна ${}^3\text{He}$ -ыг ирээдүйд халуун цөмийн урвалыг ашиглан эрчим хүч гаргахад гол түүхий эд болох боломжтой гэж үздэг. Дэлхий дээр ${}^3\text{He}$ -ыг гарган авах гол арга нь (n, ${}^3\text{He}$) урвал бөгөөд энд ${}^6_3\text{Li} + {}^1_0\text{n} \rightarrow {}^4_2\text{He} + {}^3_1\text{H}$ урвал ба ${}^3_1\text{H} \rightarrow {}^3_2\text{He} + \beta^- + \bar{\nu}$ задрал гэсэн хоёр шатлалт процессыг ашигладаг. Ийнхүү (n, ${}^3\text{He}$) урвалын огтлолын талаар дэлхий дахинаа гарч буй туршлагын өгөгдлүүдийг эмхэтгэн, анализ хийх нь цөмийн бүтэц ба урвалын механизмыг танин мэдэхэд чухал ач холбогдолтойгоос гадна ${}^3\text{He}$ -ыг гарган авахад ч ашиглаж болох мэдээллийг өгөх боломжтой.

Энэ ажилд цөмийн урвалын компаунд механизмын хүрээнд боловсрогдсон статистик загварыг ашиглан нейтроны үйлчлэлээр цөмөөс цэнэгтэй бөөм гарах урвалын огтлолын ерөнхий томъёоноос (n, ${}^3\text{He}$) урвалын огтлолыг тооцоолох томъёог гаргаж, түүнийгээ ашиглан 14-15 МэВ энергитэй нейтроноор явагдах (n, ${}^3\text{He}$) урвалын огтлолын туршлагаар хэмжигдсэн утгуудад системчилсэн анализ хийж, онол туршлагын утгуудыг харьцуулах замаар ${}^3\text{He}$ кластер үүсэх магадлалыг анх удаа тооцоолж олох зорилго тавив.

* Electronic address: nbattsooj123@gmail.com

2. АНАЛИТИК ТОМЬЁНЫ ГАРГАЛГАА

Н.Борын таамаглалд суурилсан компаунд механизмаар явагдах ($n, {}^3\text{He}$) урвалын огтлолыг дараах байдлаар тодорхойлж болно [1]:

$$\sigma(n, {}^3\text{He}) = \sigma_c(n) \cdot G_{3\text{He}}. \quad (1)$$

Энд: $\sigma_c(n)$ нь бай-цөм дээр нейтрон тусч компаунд цөм үүсгэх огтлол бөгөөд

$$\sigma_c(n) = \pi(R + \lambda_n)^2 \quad (2)$$

гэж геометр огтлол шиг илэрхийлж болно. Үүнд: $R = r_0 A^{1/3}$ - бай цөмийн радиус, $r_0 = 1.3 \cdot 10^{-13}$ см, A -бай цөмийн масс тоо;

$$\lambda_n = \frac{4.55 \cdot 10^{-13}}{\sqrt{E_n(\text{MeV})}} (\text{см}) \quad (3)$$

нейтроны долгионы уртыг 2π -д хуваасан утга;

$$\sigma(n, {}^3\text{He}) = \sigma_c(n) \frac{(2S_{3\text{He}}+1)M_{3\text{He}}e^{-\frac{(B_{3\text{He}}+\delta_{3\text{He}}+V_{3\text{He}})}{\theta}}}{\sum_i(2S_i+1)M_i e^{-\frac{(B_i+\delta_i+V_i)}{\theta}}}. \quad (5)$$

Эндээс хурдан нейтроны үед буюу нейтроны энерги их үед $\Gamma \approx \Gamma_n$ гэдэг нөхцлийг тооцвол $i=n$ гээд (5) илэрхийллээс 1971 онд П.Куццокрио нарын гаргасан [4] томьёотой төстэй ($n, {}^3\text{He}$) урвалын огтлолын томьёо гарна:

$$\sigma(n, {}^3\text{He}) = \sigma_c(n) \frac{2S_{3\text{He}}+1}{2S_n+1} \frac{M_{3\text{He}}}{M_n} e^{\frac{Q_{n,3\text{He}}-V_{3\text{He}}}{\theta}}. \quad (6)$$

Охин цөм ба ${}^3\text{He}$ -ийн харилцан үйлчлэлийн потенциал энергийг:

$$V_{3\text{He}} = 2.058 \frac{Z-2}{(A-2)^3+3^3} \text{ МэВ} \quad (7)$$

гэж болно [5].

(6) илэрхийллийн $Q_{n,3\text{He}}$ -ийг энерги хадгалагдах хууль ёсоор

$$Q_{n,3\text{He}} = E_f - E_i + \epsilon_{3\text{He}} \quad (8)$$

гэж бичиж болно.

Энд: E_i -бай цөмийн холбоос энерги, E_f -гүүссэн цөмийн холбоос энерги, $\epsilon_{3\text{He}}$ нь ${}^3\text{He}$ -ийн хувийн дотоод холбоос энерги ($\epsilon_{3\text{He}} = 7.718$ МэВ).

$$Q_{n,3\text{He}} = \alpha[(A-2) - A] + \beta \left[A^{\frac{2}{3}} - (A-2)^{\frac{2}{3}} \right] + \gamma \left[\frac{Z^2}{A^{\frac{1}{3}}} - \frac{(Z-2)^2}{(A-2)^{\frac{1}{3}}} \right] + \xi \left[\frac{(A-2Z)^2}{A} - \frac{(A-2Z+2)^2}{A-2} \right] \pm \left[\frac{\delta_f}{(A-2)^{\frac{3}{4}}} - \frac{\delta_i}{A^{\frac{3}{4}}} \right] + \epsilon_{3\text{He}} \quad (11)$$

E_n -нейтроны энерги.

Компаунд цөмөөс ${}^3\text{He}$ бөөм гарах магадлалыг

$$G_{3\text{He}} = \frac{\Gamma_{3\text{He}}}{\Gamma} \quad (4)$$

гэж илэрхийлнэ. Энд: Γ ба $\Gamma_{3\text{He}}$ - компаунд цөмийн өдөөгдсөн төлөвт харгалзах түвшний нийт өргөн ба ${}^3\text{He}$ бөөмд харгалзах дэд өргөн.

Компаунд цөм задрах процессыг цөмөөс ${}^3\text{He}$ бөөм ууршиж байгаа мэт авч үзвэл цөмийн түвшний ${}^3\text{He}$ бөөмд харгалзах дэд өргөнийг детальчлан тэнцэх зарчимд тулгуурлан олж болдог [2].

Тэгвэл цөмийн урвалын статистик загварт үндэслэн ($n, {}^3\text{He}$) урвалын огтлолыг дараах хэлбэртэй илэрхийлж болно [3]:

(8) томьёон дахь бай-цөм болон гүүссэн цөмийн холбоос энергийг олохдоо К.Ф.Вейцеккерийн томьёог [6] ашиглая. Бай-цөмийн хувьд:

$$E_i = \alpha A - \beta A^{\frac{2}{3}} - \gamma \frac{Z^2}{A^{\frac{1}{3}}} - \xi \frac{(A-2Z)^2}{A} \pm \frac{\delta_i}{A^{\frac{3}{4}}} \quad (9)$$

($n, {}^3\text{He}$) урвалаас гүүссэн цөмийн хувьд:

$$E_f = \alpha(A-2) - \beta(A-2)^{\frac{2}{3}} - \gamma \frac{(Z-2)^2}{(A-2)^{\frac{1}{3}}} - \xi \frac{[(A-2)-2(Z-2)]^2}{A-2} \pm \frac{\delta_f}{(A-2)^{\frac{3}{4}}} \quad (10)$$

гэж тус тус бичиж болно.

Энд: $\alpha = 15.7$ МэВ, $\beta = 17.8$ МэВ,

$\gamma = 0.71$ МэВ, $\xi = 23.7$ МэВ, δ -ийн утга нь цөм дэх протон нейтроны тооны тэгш сондгойгоос хамааран дараах утгуудтай байна: тэгш-тэгш цөмд $\delta = +34$ МэВ, тэгш-сондгой цөмд $\delta = 0$, сондгой-сондгой цөмд $\delta = -34$ МэВ.

(9) ба (10) илэрхийллүүдийг (8) томьёонд орлуулвал

гэж (n, ${}^3\text{He}$) урвалын энерги гарна.

$$\sigma(n, {}^3\text{He}) = \sigma_c(n) \frac{2S_{3\text{He}}+1}{2S_n+1} \frac{M_{3\text{He}}}{M_n} \exp \frac{1}{\theta} \left\{ \alpha [(A-2) - A] + \beta \left[A^{\frac{2}{3}} - (A-2)^{\frac{2}{3}} \right] + \gamma \left[\frac{Z^2}{A^{\frac{1}{3}}} - \frac{(Z-2)^2}{(A-2)^{\frac{1}{3}}} \right] + \xi \left[\frac{(A-2Z)^2}{A} - \frac{(A-2Z+2)^2}{A-2} \right] \pm \left[\frac{\delta_f}{(A-2)^{\frac{3}{4}}} - \frac{\delta_i}{A^{\frac{3}{4}}} \right] + \varepsilon_{3\text{He}} - 2.058 \frac{Z-2}{(A-2)^{\frac{1}{3}} + 3^{\frac{1}{3}}} \right\} \quad (12)$$

болно.

(n, ${}^3\text{He}$) урвалын үед цөмийн тэгш сондгой чанар өөрчлөгдөхгүй учир (12) томъёонд δ_i ба δ_f -тэй гишүүд байхгүй болно. (12) томъёо олон хувьсагч параметртэй, хэт урт учир шууд тооцоо хийх, системчилсэн анализад ашиглахад тохиромж муутай. Гиймээс (12) томъёог хялбарчлан хураангуй томъёо гаргах зорилго тавья. Бэсрэг болон хүнд масстай бай цөмүүдийн хувьд тооцоолол хийх учир $A \gg 2$ гэж үзээд

$$\sigma(n, {}^3\text{He}) = 3\pi(R + \lambda_n)^2 \exp \frac{1}{\theta} \left\{ 4\gamma \left(\frac{Z-1}{A^{\frac{1}{3}}} \right) - 4\xi \left[\frac{(N-Z+1)}{A} \right] + \varepsilon_{3\text{He}} - 2.058 \frac{Z-2}{A^{\frac{1}{3}} + 3^{\frac{1}{3}}} \right\} \quad (14)$$

болно.

Ферми-хий загварыг ашиглаад цөмийн термодинамик температурыг тодорхойлвол

$$\theta = \sqrt{\frac{13.5(E_n + Q_{n,3\text{He}})}{A}} \quad (15)$$

болно.

Систематик анализ хийхэд тохиромжтой байхаар (14) томъёог хялбарчилвал

$$\sigma(n, {}^3\text{He}) = C\pi(R + \lambda_n)^2 e^{-K \frac{N-Z+1}{A}} \quad (16)$$

болно.

Дээрх томъёонд байгаа C, K параметрүүд нь:

$$C = 3 \exp \sqrt{\frac{A}{13.5(E_n + Q_{n,3\text{He}})}} \left[4\gamma \left(\frac{Z-1}{A^{\frac{1}{3}}} \right) + \varepsilon_{3\text{He}} - 2.058 \frac{Z-2}{A^{\frac{1}{3}} + 3^{\frac{1}{3}}} \right] \quad (17)$$

$$K = 4\xi \sqrt{\frac{A}{13.5(E_n + Q_{n,3\text{He}})}} \quad (18)$$

гэж илэрхийлэгдэнэ.

(14)-(18) томъёонуудаар (n, ${}^3\text{He}$) урвалын огтлолын утгуудыг тооцоолох боломжтой. Гэвч (14) томъёог гаргахдаа (n, ${}^3\text{He}$) урвалын явцад 3 нуклон нийлж ${}^3\text{He}$ кластер бүрэлдэх процессийг тооцолгүй, ${}^3\text{He}$ -ийг цөмд байдаг нуклонуудтай адилханаар авч үзсэн. Ингэж болохгүй гэдэг нь (n, α) урвалын огтлолын утгуудад анализ хийж байхад харагдсан бөгөөд

Хэрэв (6),(7) ба (11) илэрхийллүүдээс (n, ${}^3\text{He}$) урвалын огтлолын томъёог бичвэл:

урвалаас гарах энергийн томъёог (11) илэрхийллээс бичвэл

$$Q_{n,3\text{He}} \approx 4\gamma \left(\frac{Z-1}{A^{\frac{1}{3}}} \right) - 4\xi \left(\frac{N-Z+1}{A} \right) + \varepsilon_{3\text{He}} \quad (13)$$

болно.

(13) илэрхийллийг ашиглан (n, ${}^3\text{He}$) урвалын огтлолын хураангуй томъёог $A \gg 2$ тохиолдолд (12)-оос бичвэл:

энд α -кластер бүрэлдэх магадлалыг заавал тооцох хэрэгтэй болсон [7,8]. Үүнтэй төстэйгээр (n, ${}^3\text{He}$) урвалын үед ${}^3\text{He}$ -кластер бүрэлдэх магадлалыг авч үзэх шаардлагатай. ${}^3\text{He}$ кластер бүрэлдэх магадлал нь гурван нуклоны хувьд бичигдсэн долгион функцүүдийн давхцал буюу гурвалсан интегралаар тодорхойлогдох ёстой. Гурван нуклоны харилцан үйлчлэл нь квант онолоор шууд бодогддоггүй учир ойролцоолох аргыг хэрэглэх болдог. Түүнээс гадна бай-цөм буюу эх-цөмийн бүтцийг загварчлан тооцох, охин цөм ба ${}^3\text{He}$ цөм хоорондын харилцан үйлчлэлийн потенциалыг сонгох зэрэг нарийн шаардлагууд гарна. Ийм тооцоо хийх нь цөмийн онолын нэлээд нарийн, төвөгтэй асуудлын нэг байдаг. Харин үүний оронд, α -кластер үүсэх процессийн тооцоонд сүүлийн үед ашиглаж буй спектроскопик факторын хялбар аргыг авч үзье [9]. Альфа задралын хувьд спектроскопик фактор гэж түвшний α -бөөмд харгалзах өргөнийг (Γ_α) нэг бөөмд харгалзах түвшний өргөнд (Γ_0) харьцуулсныг хэлдэг:

$$S_\alpha = \frac{\Gamma_\alpha}{\Gamma_0} = \frac{\delta_\alpha^2}{\delta_0^2}. \quad (19)$$

Энд: δ_α^2 - түвшний α -бөөмд харгалзах эмхэтгэсэн өргөн, δ_0^2 - нэг бөөмт төлөвт харгалзах түвшний

эмхэтгэсэн өргөн. Үүнтэй төстэйгээр ${}^3\text{He}$ -ийн хувьд спектроскопик факторыг

$$S_{3\text{He}} = \frac{\Gamma_{3\text{He}}}{\Gamma_0} \quad (20)$$

гэж болно. Энд: $\Gamma_{3\text{He}}$ нь ${}^3\text{He}$ -т харгалзах төлвийн түвшний өргөн.

Дээр дурьдсан санаануудад үндэслэн, $\sigma(n, {}^3\text{He}) \sim \Gamma_{3\text{He}}$ гэвэл спектроскопик факторын оронд ${}^3\text{He}$ кластер бүрэлдэх магадлалыг

$$\Phi_{3\text{He}} = \frac{\sigma_{(n, {}^3\text{He})}^{\text{exp}}}{\sigma_{(n, {}^3\text{He})}^{\text{theor}}} \quad (21)$$

гэж туршлагын огтлолыг нэг бөөмт загварын буюу ${}^3\text{He}$ кластержилтийг тооцоогүй онолын огтлолд харьцуулан тодорхойлж болохоор байна.

3. ҮР ДҮН, ХЭЛЭЛЦҮҮЛЭГ

3.1 (n, ${}^3\text{He}$) урвалын огтлолын системчилсэн анализ

Цөмийн урвалын онолын загваруудыг ашиглан нейтроноор явагдах урвалын огтлолын туршлагын утгуудыг бай-цөмийн тодорхой параметруудээс хамааруулан судалж ерөнхий зүй тогтол хайхыг урвалын огтлолын системчилсэн анализ гэдэг.

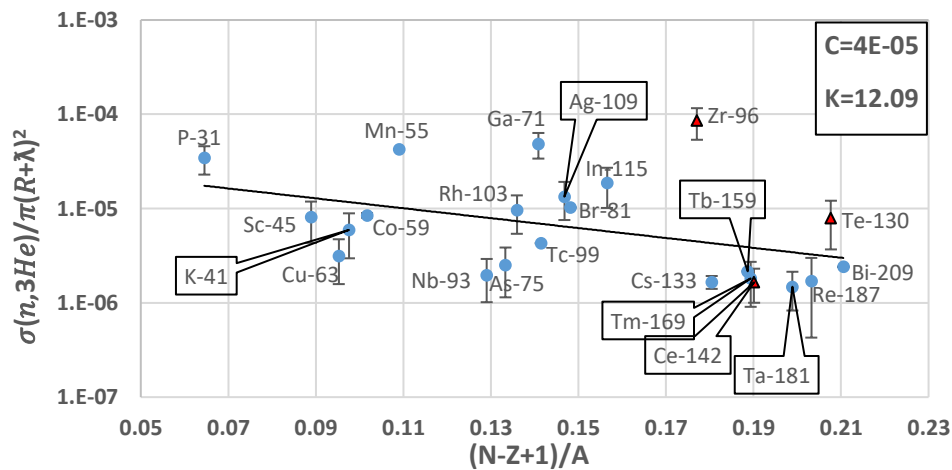
Хүснэгт 1. 14-15 МэВ энергитэй нейтроноор явагдах (n, ${}^3\text{He}$) урвалын огтлолын туршлагын утгууд

Бай цөм	A	Z	N	(N-Z+1)/A	$\sigma(n, {}^3\text{He})$, мбарн	
					[11]	Тооцоонд ашигласан
P	31	15	16	0.0645	0.03-0.25	0.03±0.01
K	41	19	22	0.0976	0.006-2.5	0.006±0.003
Sc	45	21	24	0.0889	0.0086-0.33	0.0086±0.004
Mn	55	25	30	0.1091	0.05-0.8	0.05
Co	59	27	32	0.1017	0.0104-0.1	0.0104±0.0006
Cu	63	29	34	0.0952	0.004-3.0	0.004±0.002
Ga	71	31	40	0.1408	0.02-0.066	0.066±0.02
As	75	33	42	0.1333	0.0035-0.58	0.0035±0.0019
Br	81	35	46	0.1481	0.015	0.015
Nb	93	41	52	0.1290	0.0031±0.0015	0.0031±0.0015
Zr	96	40	56	0.1771	0.136±0.05	0.136±0.05
Tc	99	43	56	0.1414	0.007	0.007
Rh	103	45	58	0.1359	0.0004-0.09	0.016±0.007
Ag	109	47	62	0.1468	0.023±0.01	0.023±0.01
In	115	49	66	0.1565	0.007-0.033	0.033±0.015
Te	130	52	78	0.2077	0.015±0.008	0.015±0.008
Cs	133	55	78	0.1805	0.0032-0.15	0.0032±0.0005
Ce	142	58	84	0.1901	0.0033±0.0013	0.0033±0.0013
Tb	159	65	94	0.1887	0.0046	0.0046
Tm	169	69	100	0.1893	0.004±0.002	0.004±0.002
Ta	181	73	108	0.1989	0.0034±0.0015	0.0034±0.0015
Re	187	75	112	0.2032	0.004±0.003	0.004±0.003
Bi	209	83	126	0.2105	0.006	0.006

Ийм системчилсэн анализыг 14-15 МэВ энергитэй нейтроноор явагдах (n, ${}^3\text{He}$) урвалын огтлолын хувьд анх Yao Lishan, Jin Yuling нар 1992 онд хийсэн байдаг[10]. Бид Олон улсын атомын энергийн агентлагийн мэдээллийн сан EXFOR-оос авсан (n, ${}^3\text{He}$) урвалын огтлолын туршлагын утгуудын [11] оршин буй мужуудыг, тухайн мужуудаас өөрсдийн тооцоонд сонгон

авч ашигласан утгуудын хамт Хүснэгт 1-д харуулав.

(n, ${}^3\text{He}$) урвалын огтлолын сонгон авсан утгуудад системчилсэн анализ хийснийг Зураг 1-д харуулав. Зураг 1-д (16) томъёоны C,K параметруудийг тогтмол гэж үзэн туршлагын өгөгдлүүдээс хөөж тодорхойлсноо мөн харууллаа.

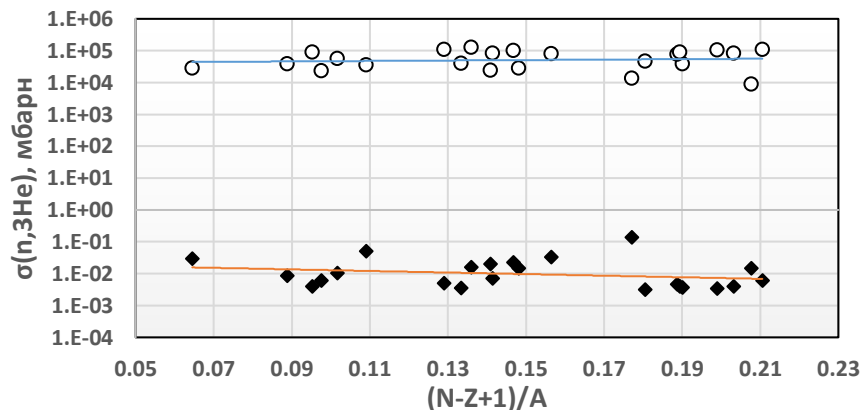


Зураг 1. (n, ^3He) урвалын эмхэтгэсэн огтлол ба $(N-Z+1)/A$ параметр хоорондын хамаарал. \blacktriangle -Масс тоо нь тэгш цөмүүд; \bullet -Масс тоо нь сондгой цөмүүд.

Зураг 1-ээс харахад (n, ^3He) урвалын эмхэтгэсэн огтлол нь бай-цөмийн протон, нейтроны тооны харьцангуй зөрүү буюу асимметр параметрээс хамааран экспоненциал хуулиар буюу хагас логарифмийн хуваарь дээр шулуунаар буурсан ерөнхий зүй тогтол ажиглагдаж байгаа нь [10] ажлын үр дүнтэй төстэй байна.

3.2 ^3He кластер бүрэлдэх магадлал

(n, ^3He) урвалын огтлолын (14),(15) томъёогоор бодож олсон онолын утгуудыг туршлагын утгуудтай хамт Зураг 2-г харуулав.

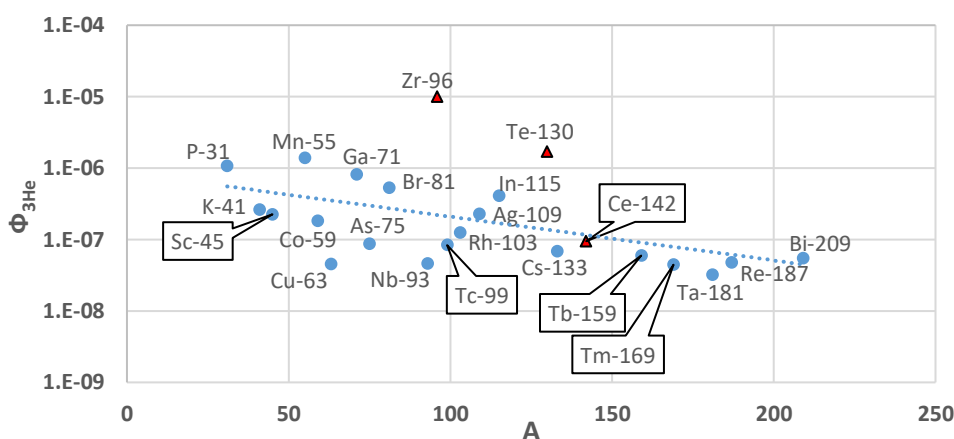


Зураг 2. 14-15 МэВ энергитэй нейтроноор явагдах (n, ^3He) урвалын огтлолын онолын (○) ба туршлагын (◆) утгууд.

Цөмийн урвалын статистик загвараар тодорхойлсон (n, ^3He) урвалын онолын огтлолууд абсолют утгаараа туршлагын өгөгдлүүдээс олон дахин их гарч байна. Энэ нь онолын огтлолыг бодохдоо ^3He кластер бүрэлдэх магадлалыг тооцоогүйтэй холбоотой гэж үзэн (21) томъёогоор ^3He кластер бүрэлдэх магадлалыг тооцоолж олсноо бай цөмийн масс тооноос хамааруулан Зураг 3-т үзүүлэв.

Зураг 3-аас харахад бай-цөмийн масс тоо тэгш, сондгой байхаас онц хамаарахгүйгээр ^3He

кластер бүрэлдэх магадлал $\Phi_{^3\text{He}} = 10^{-5} - 3.2 * 10^{-8}$ өргөн мужид байна. Энэ утгыг $E_n = 14.5$ МэВ үеийн (n, α) урвалын хувьд α -кластер буюу ^4He бүрэлдэх магадлал $\Phi_\alpha = 0.28$ байдагтай [7] харьцуулахад маш бага байна. Харин $E_n = 14 - 15$ МэВ үед явагдах (n,t) урвалын үед тритийн кластер буюу ^3H бүрэлдэх магадлалыг бидний энд хэрэглэсэн аргаар олсон утга $\Phi_{^3\text{H}} = 10^{-4} - 10^{-6}$ мужид байсантай [12] харьцуулахад нэлээд дөхүү, нэгээс хоёр эрэмбээр л бага гарлаа.



Зураг 3. 14-15 МэВ энергитэй нейтроноор явагдах (n, ³He) урвалын үед ³He кластер бүрэлдэх магадлал. ▲ - Масс тоо нь тэгш цөмүүд; ● - Масс тоо нь сондгой цөмүүд.

Энэ нь 14-15 МэВ энергитэй хурдан нейтроноор цөмийг бөмбөгдөж урвал явуулах үед 4 нуклоны кластер үүсэх магадлал их ($\Phi_\alpha = 0.28$), харин 3 нуклоны кластер бүрэлдэх магадлал маш бага байна гэсэн үг. Үүний нарийн учрыг цаашид үргэлжлүүлэн, цөмд протон буюу нейтроны хос үүсэх (Куперийн хос) үзэгдэлтэй холбон судлах шаардлагатай.

Түүнээс гадна анхаарал татах ёстой нэг баримт байгааг энд дурдъя. Байгаль дээр химийн элемент гелийн хоёр тогтвортой изотоп байдаг бөгөөд $^4\text{He} = 99.999866\%$ ба $^3\text{He} = 0.000134\%$ тус тус агуулгатай байдаг.

Эдгээрийн харьцааг олвол:

$$\frac{^3\text{He}}{^4\text{He}} = \frac{0.000134}{99.999866} = 1.34 \cdot 10^{-6} \quad (22)$$

байна.

Тэгвэл кластержилтын буюу кластер бүрэлдэх факторуудын харьцаа нь:

$$\frac{\Phi_{^3\text{He}}}{\Phi_{^4\text{He}}} = \frac{10^{-5} - 3.2 \cdot 10^{-8}}{0.28} = 3.6 \cdot 10^{-5} - 10^{-7} \quad (23)$$

(22) ба (23) харьцаанууд хоорондоо ойролцоо байна. Тиймээс байгаль дахь гелийн хийн изотопуудын агуулга нь 3 ба 4 нуклоны кластер бүрэлдэх магадлалтайгаа холбоотой байж болох юм гэсэн таамаглал дэвшүүлж болохоор байна.

4. ДҮГНЭЛТ

1. Цөмийн урвалын компаунд механизмд үндэслэсэн статистик загварын хүрээнд хурдан нейтроноор явагдах (n, ³He) урвалын огтлолын томъёог гаргав.

2. Хурдан нейтроноор явагдах (n, ³He) урвалын туршлагаар хэмжигдсэн огтлолын өгөгдлүүдийг эмхэтгэн, онолын томъёогоо ашиглан тэдгээрт системчилсэн анализ хийж, уг урвалын эмхэтгэсэн огтлол нь бай-цөмүүдийн протон, нейтроны тооны харьцангуй зөрүү буюу асимметрийн параметр $(N-Z+1)/A$ -ээс ерөнхийдөө экспоненциал хуулиар хамааран буурч байгааг харуулав.

3. Онолын хялбаршуулсан томъёогоор бодож олсон (n, ³He) урвалын огтлолууд туршлагын утгаасаа олон дахин их гарч байгааг ³He кластер бүрэлдэх процесстэй холбоотой гэж үзэв.

4. Альфа-кластер бүрэлдэх магадлалыг тооцоолоход ашигладаг спектроскопик факторын аргатай төстэйгээр ³He кластер үүсэх магадлалыг туршлагын ба онолын $\sigma(n, ^3\text{He})$ -огтлолуудын харьцаагаар тодорхойлов. Ингэж олсон кластержилтын фактор $\Phi_{^3\text{He}} = 10^{-5} - 3.2 \cdot 10^{-8}$ байгаа нь (n,α) урвалын үед ⁴He -кластер үүсэх магадлал $\Phi_\alpha = 0.28$ -аас маш бага боловч (n, t) урвалын үед ³H-кластер бүрэлдэх магадлал $\Phi_{^3\text{H}} = 10^{-4} - 10^{-6}$ байсантай нэлээд дөхүү байна.

5. Байгаль дээр тогтвортой оршдог гелийн хийн ³He ба ⁴He гэсэн хоёр изотопуудын агуулгын харьцаа $1.34 \cdot 10^{-6}$ байгаа нь (n, ³He) ба (n, ⁴He) урвалуудын хувьд олсон кластержилтын факторуудын харьцаатай ойрхон байна. Иймээс уг хоёр изотопын байгаль дахь агуулга буюу тархалт нь кластер бүрэлдэх магадлалтайгаа

холбоотой байж магадгүй гэсэн таамаглал дэвшүүлэв.

ТАЛАРХАЛ

Энэ ажлыг ШУТС-гийн санхүүжилтээр 2019-2021 онуудад хэрэгжиж буй, ШуСс-2019/06 дугаартай, “Цөмийн кластер бүтэц ба урвалын судалгаа” сэдэвт суурь судалгааны төслийн хүрээнд гүйцэтгэв.

НОМ ЗҮЙ

- [1] J.M.Blatt, V.F.Weisskopf, Theoretical Nuclear Physics. John Wiley and Sons, New York, 1952,
- [2] V.F.Weisskopf, D.H.Ewing, On the Yield of Nuclear Reactions with Heavy Elements. Phys.Rev, 1940, v.57, No.6, pp.472-485.
- [3] T.Ericson, The Statistical Model and Nuclear Level Densities. Advances in Physics, 1960, v.9, No.36, pp.425-511.
- [4] P.Cuzzocreo, E.Perillo, S.Notarrigo, Shell Effects in (n,p) and (n, α) Cross Sections at About 14 MeV. Nuovo Cimento. A, 1971, v.4, No.2, pp.251-298.
- [5] D.G.Gardner, S.Rosenblum, Trends in Nuclear Reaction Cross Sections (IV). Recalculated (n,p) Cross Sections for 14.5 MeV Neutrons of Nuclei in the Range $6 \leq Z \leq 50$. Nuclear Physics A, 1967, v.96 A, No.1, pp.121-137.
- [6] C.F.Weizsäcker, Zur Theorie der Kernmassen. Z. Phys. 1935, v.96 A, No.7-8, pp.431-458.
- [7] G.Khuukhenkhuu, J.Munkhsaikhan, M.Odsuren et al., Alpha-cluster Formation Factor in (n, α) Reaction Cross Sections. Proceedings of the XXIV International Seminar on Interaction of Neutrons with Nuclei, JINR, Dubna, 2017, pp.166-174.
- [8] G.Khuukhenkhuu, M.Odsuren, Yu.Gledenov, G.H.Zhang, B.Batchimeg, J.Munkhsaikhan, Ch.Saikhanbayar, E.Sansarbayar, M.Sedysheva, An Evaluation of the Alpha-cluster Formation Factor in (n, α) Reactions. Proceedings of the International Conference on Nuclear Data for Science and Technology (ND 2019), Beijing, China, May 19-24, 2019, EPJ Web of Conferences, 2020, v.239, pp.03007-1-3.
- [9] L.Scherk, E.W.Vogt, On Alpha-decay Rates in Heavy Nuclei. Canadian Journal of Physics, 1968, v.46, No.9, pp.1119-1128.
- [10] Yao Lishan, Jin Yuling. Systematics of the (n, ^3He) Reaction Cross Sections at 14 MeV. Communication of Nuclear Data Progress, 1992, No.7, pp.95-101.
- [11] <https://www-nds.iaea.org/exfor/>
- [12] G.Khuukhenkhuu, M.Odsuren, J.Munkhsaikhan et al., Triton Clustering in (n,t) Reactions. News of the National Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan, Series Physico-Mathematical, 2020, v.4, No.332, pp.21-27.