

ARTICLES

**ФОТОЭМУЛЬСЫЙН АРГААР ХЭМЖСЭН НЕЙТРОНЫ ЭНЕРГИЙН
СПЕКТРИЙГ GEANT4 БАГЦ ПРОГРАМААР ЗАГВАРЧИЛЖ
ХАРЬЦУУЛСАН НЬ***Д.Отгонсүрэн^{1*}, Р.Тогоо¹, А.Төрсүх¹*¹ Физик технологийн хүрээлэн, Шинжлэх ухааны Академи, Монгол улс

Хүлээн авсан: 2018.03.02; Хянасан: 2018.03.31; Хэвлэгдсэн: 2018.05.21

ХУРААНГУЙ

Энэхүү ажлаар ОХУ-ын Дубна хот дахь Цөмийн шинжилгээний нэгдсэн институтийн Их энергийн физикийн лабораторид, “Энергия плюс трансмутация” хамтын ажиллагааны төслийн хүрээнд хартугалга-ураны төхөөрөмжийг 1.5 ГэВ энергитэй протоноор шарах үед фотоэмульсийн аргаар хэмжсэн нейтроны энергийн спектрийг GEANT4 багц програм ашиглан явуулсан симуляцийн үр дүнтэй харьцуулж, онол-туришлагын тохиролын үнэлгээг хийв. Загварчлалыг GEANT4 багц програмд байх Бертини, Бинари болон Лиже гэсэн 3 төрлийн каскад онолын моделиудыг ашиглаж гүйцэтгэсэн болно. Загварчлалаар уг төхөөрөмжид байрлуулсан фотоэмульсийн эзэлхүүнд Бертини моделийн хувьд 2954, Бинари моделийн хувьд 2075, Лиже моделийн хувьд 1799 тооны нейтронүүд ирсэн. Симуляц болон туришлагаар гаргаж авсан нейтроны энергийн спектрууд хоорондоо сайн тохирч байна.

Түлхүүр үг: фотоэмульс; симуляц; GEANT4; энергийн спектр; трансмутаци;

ОРШИЛ

Дэлхийн цөмийн эрчим хүчний салбарт тулгараад буй түлшний нөөц, ашигласан түлшийг хоргүйжүүлэх зэрэг үндсэн асуудлуудыг шийдэхэд хурдасгуурт удирдагдсан системийн оролцоо чухал юм. Цацраг идэвхт хаягдлыг хоргүйжүүлэх ба энерги үйлдвэрлэх процессийн судалгаанд тухайн төхөөрөмжид үүссэн нейтроны энергийн спектрийг тодорхойлох нь чухал

байдаг. Нейтроны энергийн спектрийг калориметр ашиглан тодорхойлдог уламжлалтай. Харин калориметрийг фотоэмульсээр орлуулсан туршилтыг дэлхийд хоёрдах удаагаа гүйцэтгэсэн. Дээрхи асуудлыг шийдвэрлэх туршилт нь маш их цаг хугацаа, хөрөнгө зарцуулдгийг оновчтой болгохын тулд симуляц хийж, хүлээсэн үр дүнг гарган авах туршилтын

*corresponding author: otgonsurehep@yahoo.com



The Author(s). 2018 Open access This article is distributed under the terms of the Creative Commons Attribution 4.0 International License (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>), which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided you give appropriate credit to the original author(s) and the source, provide a link to the Creative Commons license, and indicate if changes were made.

нөхцөл, дизайныг сонгодог зарчмыг үндэс болгон бид туршилтын үр дүнг онолын

үүднээс тайлбарлах зорилго тавьж байна.

МАТЕРИАЛ, АРГА ЗҮЙ

Хар тугалга-уран (Pb/U)-ны төхөөрөмжийн (зураг 1.) дөрвөн тасалгаатай бланкет [1]-ийн эхний завсрын дээр фотоэмульсийн спектрометрийг (хавтан) байрлуулсан. Хар тугалган байг 1.5 ГэВ энергитэй протоноор шарахад үүссэн хурдан нейтроны кинетик энерги нь харимхай сарнилын хуулиар протоны кинетик энергид шилжих ба протоны хөдөлгөөний улмаас фотоэмульс дотор мөр үүсэж, мөрний уртаар нь нейтроны энергийн спектрийг байгуулан судалсан ажлын үр дүнг үзүүлж байна [2]. Хэрвээ нейтрон цөмийн фотоэмульс дээр тусахад түүн дотор байгаа протоноуд, ялангуяа устөрөгчийн цөмтэй харилцан үйлчилж, харимхай бус сарнилд орж, ихэнх буюу бүтэн кинетик энергиэ протонд бүрэн шилжүүлнэ гэж үзсэн. Нейтронууд удаашруулагчийн гаднах гадаргуугийн талбайн огтлол болон ураны төхөөрөмжийн

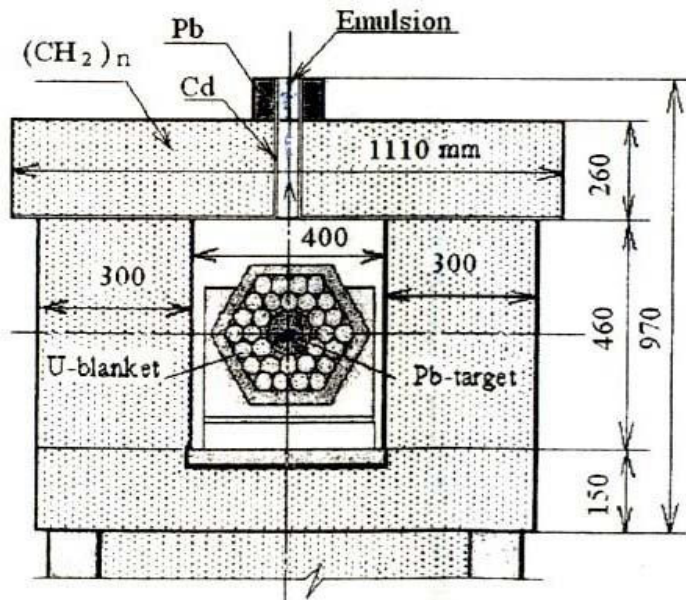
1 болон 2-р секцийн хооронд бүртгэгдэнэ. Протонуудын чиглэлийг микроскопоор хэмжиж сарнилын өнцөг θ -г тодорхойлов. Протоны энерги T_p нь эмульс дэх мөрний урт R -ын хэмжилтээр тодорхойлогддог, гэхдээ протоноор үүсгэгдсэн мөрний урт нь 60 микроноос багаар сонгосноос, түүнийг мөрний ургын хэмжилтээс хамааруулан бодохдоо фотоэмульсийн үндсэн $T_{кин.}(R)$ хамаарлыг

$$T_p = 0.145 * R^{-0.0152 * \log(R) + 0.76} \quad (1)$$

гэсэн дөхүүлэлтээр тодорхойлсон [3]. Харин нейтроны энерги T_n нь дараах томъёогоор тодорхойлогдоно:

$$T_n = T_p (\cos \theta_{np})^{-2} \quad (2)$$

энд θ_{np} нь нейтрон болон протоны хоорондох сарнилын өнцөг.



Зураг 1. Фотоэмульсийн хавтанг байрлуулсан үеийн хар тугалга-ураны төхөөрөмжийн хөндлөн огтлол [2].

ФИЗИК ПРОЦЕССЫН СИМУЛЯЦ

Бид Pb/U-ны цөмийн төхөөрөмжийг 1.5 ГэВ энергитэй протон бөөмөөр шарах үеийн бодит туршилтын компьютер симуляцийг Монте-Карло аргад суурилсан GEANT4 багц програм [4] ашиглаж, каскадын моделиудаар загварчилсан бөгөөд гарсан үр дүнг туршилтынхтай харьцууллаа. 20 МэВ хүртэлх энергийн мужид нейтроноор явагдах процесст урвалын огтлолын G4NDL4.5 өгөгдлийн санг ашиглаж, симуляцийг 1.5 сая удаагийн давталттайгаар явуулсан.

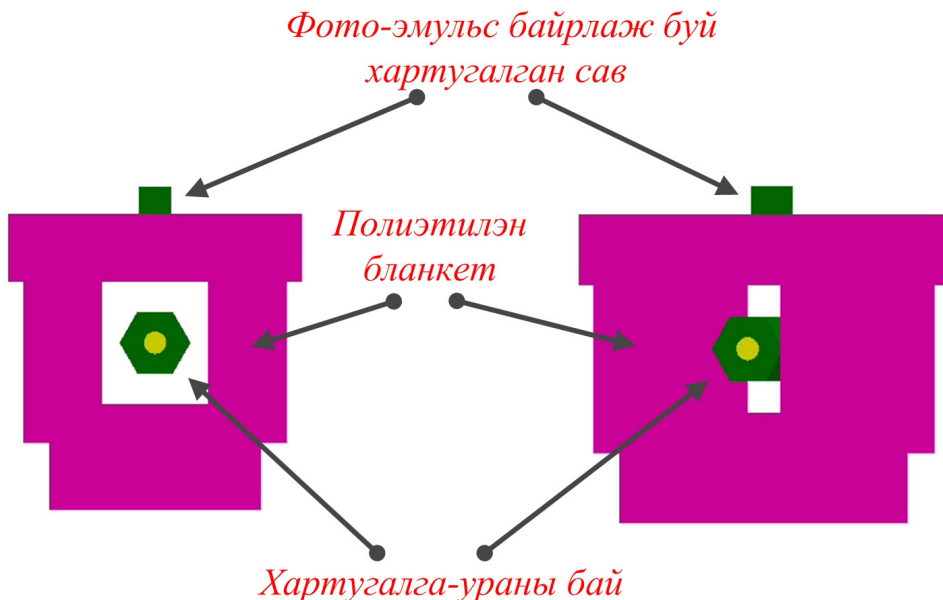
GEANT4 багц програм нь сум бөөмийн хувьд 10 ГэВ хүртэлх энергийн мужид явагдах физик процессуудыг загварчлах Лижэ (INCL++), Бертини, Бинари гэх мэт олон моделиудтай. Энэ удаад бид уг гурван моделийг ашиглаж байна.

- Бертини нь классик каскад модель. Энэ модель нь бөөмийн материтай хийх харилцан үйлчлэлийг сарнилын матрицгүйгээр Больцманы тэгшитгэлээр боддог. Бай-цөмийг тогтмол нягттай, 3 хүртэлх давхарга бүхий бүрхүүлээс тогтсон гээд үлдэгдэл цөмийн задралыг тэнцвэрийн

болон тэнцвэрийн өмнөх түвшинд авч үздэг. Анхдагч энерги нь 10 ГэВ хүртлэх байх боломжтой.

- Бинари модель нь Бертини-тэй төстэй бөгөөд ялгарах тал нь хугацаанаас хамаарсан тооцоог хийдэг ба адрон-нуклоны мөргөлдөөнийг өөрийн квант тоонуудаасаа хамаарч задардаг резонанс байдлаар авч үздэг. Сум бөөмийн хувьд p, n, пион байх боломжтой. Энэ модель нь цөмийг тодорхой импульстэй, бие даасан нуклонуудаас тогтсон гэж төсөөлөөд, бөөмсийг цөмийн потенциал дотор муруй замаар хөдлөнө гэж авдаг.

- Лижэ модель нь хугацаанаас хамаарсан тооцоог хийх ба Вүүдс-Саксоны эсвэл гармоник осциллятор потенциалыг ашигладаг. Энэ модель нь 150 МэВ – 3 ГэВ энергийн мужид p, n, π, d, t, ³He бөөмс болон 11<A<239 масстай бай цөмийн тохиолдолд ажиллахад хамгийн тохиромжтой бөгөөд өдөөгдсөн цөмийн энергиэ алдах процесст ablation model (ABLA)-той хамт хэрэглэгддэг. Цацаргалтад урвалын судалгаанд энэ загварыг амжилттай ашиглаж байгаа.



Зураг 2. Pb/U цөмийн төхөөрөмжийн геометр моделийг GEANT4 багц програмд байгуулсан байдал

Pb/U-ны төхөөрөмжид зориулсан моделийг геометрийн болон материалын тухай мэдээлэл [5] дагуу GEANT4 програмд байгуулж (зураг 2), хийцийн материалын болон орчны агаарын температурыг 20 градусаар өгсөн. Үүнээс гадна, Pb/U-ны

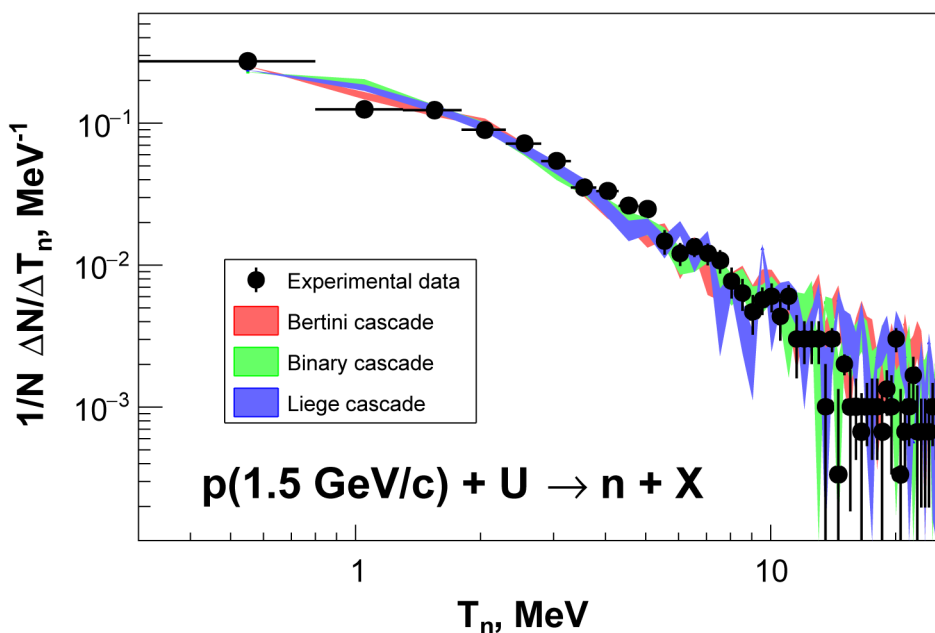
төхөөрөмжийн гадуур байгаа полиэтилен материалын нягтыг 0.7 гр/см³ утгаар авсан. Кадмийн хоолойн зузааныг 2 мм-ээр байгуулав. Уг төхөөрөмжийн тухай дэлгэрэнгүй мэдээллийг [5] ажлаас үзэж болно.

ҮР ДҮН, ХЭЛЭЛЦҮҮЛЭГ

Фотоэмульсийн эзлэхүүнд ирж буй болон үүссэн нийт нейтроны энергийн спектрийг симуляцийн аргаар гарган авч, туршлагын утгатай харьцуулахаас гадна анхны тусч буй сум протон болон бай цөмийн хооронд явагдах их энергитэй харилцан үйлчлэл буюу цөмийн цацаргалтат урвалаас үүсэж буй хоёрдогч нейтроны орон зайн түгэлтийг гаргаж авсан.

Зураг 1-д үзүүлсэн фотоэмульс дэх нейтрон өөрийн кинетик энергийг протонд

харимхай сарнилаар үүссэн мөрний урт, Энерги-трансмутац төхөөрөмжийн босоо тэнхлэгтэй харьцуулсан өнцөг болон гүний өнцгийг хэмжээд, (1) томъёогоор протоны кинетик энергийг фотоэмульс дотор үүсэж болох дэвсгэрийн хэмжилтийг хасаж тооцсон. Томъёо (2)-ыг хэрэглэн нейтроны энергийг тодорхойлоод, хэмжилтийн үр дүнг зураг 3 дээр битүү хар дугуйгаар үзүүллээ.



Зураг 3. Нейтроны энергийн нормчилсон тархиуд

Энд каскадын Бертини, Бинари болон Лижэ загваруудаар гүйцэтгэсэн онолын түгэлтүүдийг улаан, ногоон ба хөх өнгийн талбайгаар статистик алдааны хүрээнд нь тохируулан мөн хавсарган үзүүлэв. Өмнө

дурьдсан 1.5 сая давталтын тооцоогоор кинетик энергийн 3 МэВ <T_n<23 МэВ заагт Бертини каскадаар 2954, Бинари-2075 ба Лижэ-1799 нейтонууд хамрагдсан. Эндээс дээрх 3 загварууд нейтроны гаралтын

хөндлөн огтлолоороо ялгаатай, харин нейтроны спектрийн хэлбэр ижил төстэй байна. 3 моделиэр гаргаж авсан үр дүн туршлагынхтай хэрхэн тохирч байгааг тодруулахын тулд доорхи томъёогоор үнэлгээ хийсэн. Статистик үнэлгээний дэвшүүлэх таамаглал нь $H_0: a=0$ бөгөөд харин альтернатив таамаглал нь $H_a: a \neq 0$

байдаг [6]. Стьюдентийн болон χ^2 -ын тархацын үнэлгээг бид хийлээ.

Эхлээд Стьюдентийн тархацын үнэлгээг $n = 50$ цэгээр кинетик энерги нь 0.3 МэВ-ээс 25.3 МэВ энергийн хооронд тодорхойлоход $t_{\text{турш.}} < t_{95\%}^{\text{tab}} = 1.68$ гарсан тул 95% давхцалтай таамаглал H_0 үед $a \rightarrow 0$ байгаа нь давхцал сайн байгааг батлаж байна.

$$z_i = x_i - y_i; \quad \bar{z} = 1/n \sum_{i=1}^n z_i;$$

$$S^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (z_i - \bar{z})^2; \quad t_{\text{турш.}} = \frac{(\bar{z}-a)\sqrt{n-1}}{S};$$

энд a бол онолын дундаж утга байх бөгөөд хэрвээ $a \rightarrow 0$ байвал онолын ба туршилтын муруй давхцаж зөрөөгүй байхыг гэрчлэнэ, S -дисперси, x_i нь нормчлогдсон туршилтын,

харин y_i нь онолын (GEANT4) тархацын утгуудыг тэмдэглэсэн. Үнэлгээг Хүснэгт 1 -д үзүүлэв. Энэ багануудад нормчилсон утгуудыг толилуулсан.

Хүснэгт 1. Туршилт болон GEANT4 загваруудын тархацын утга болон үнэлгээ

№.	Туршилт	Бергини	Бинари	Лижэ
1	0.28190300	0.24576800	0.22361400	0.23068400
2	0.12885200	0.15267400	0.19036100	0.17343000
3	0.12574600	0.11611400	0.12289200	0.12340200
4	0.08870420	0.09884900	0.09253010	0.09116180
5	0.06797070	0.06465810	0.06313250	0.06448030
6	0.04968910	0.04536220	0.04337350	0.04724850
7	0.03339870	0.03351390	0.03421690	0.03557530
8	0.03217680	0.02403520	0.02506020	0.02445800
9	0.02537170	0.02065000	0.02024100	0.01723180
10	0.02441260	0.01557210	0.01831330	0.01834350
11	0.01609280	0.01692620	0.01542170	0.01334070
12	0.01215120	0.01015570	0.01060240	0.01778770
13	0.01287590	0.01354100	0.01060240	0.01111730
14	0.01196310	0.00812458	0.01204820	0.01500830
15	0.01072850	0.00710900	0.00867470	0.00444691
16	0.00722523	0.00710900	0.00674699	0.00722624
17	0.00626120	0.00812458	0.00771084	0.00389105
18	0.00451794	0.00541638	0.00530120	0.00222346
19	0.00571905	0.00778605	0.00578313	0.01278490
20	0.00596299	0.00744753	0.00674699	0.00444691

21	0.00429696	0.00575491	0.00530120	0.00611451
22	0.00568217	0.00541638	0.00289157	0.00611451
23	0.00306335	0.00304672	0.00530120	0.00500278
24	0.00311236	0.00473934	0.00481928	0.00222346
25	0.00272766	0.00541638	0.00626506	0.00389105
26	0.00311236	0.00710900	0.00096386	0.00611451
27	0.00066382	0.00236967	0.00530120	0.00111173
28	0.00323765	0.00473934	0.00433735	0.00222346
29	0.00051090	0.00575491	0.00096386	0.00555864
30	0.00166433	0.00270819	0.00289157	0.00333519
31	0.00089564	0.00169262	0.00240964	0.00333519
32	0.00085717	0.00338524	0.00289157	0.00222346
33	0.00080911	0.00440081	0.00337349	0.00444691
34	0.00115015	0.00304672	0.00289157	0.00166759
35	0.00110732	0.00304672	0.00144578	0.00055586
36	0.00085717	0.00135410	0.00192771	0.00222346
37	0.00072794	0.00169262	0.00289157	0.00277932
38	0.00123461	0.00169262	0.00192771	0.00333519
39	0.00127938	0.00304672	0.00192771	0.00166759
40	0.00285490	0.00169262	0.00096386	0.00389105
41	0.00025551	0.00135410	0.00144578	0.00277932
42	0.00064012	0.00372376	0.00192771	0.00222346
43	0.00115308	0.00169262	0.00289157	0.00000000
44	0.00174658	0.00236967	0.00048193	0.00055586
45	0.00025020	0.00304672	0.00096386	0.00111173
46	0.00059642	0.00236967	0.00144578	0.00222346
47	0.00076641	0.00067705	0.00144578	0.00055586
48	0.00085194	0.00203114	0.00192771	0.00277932
49	0.00110732	0.00033852	0.00048193	0.00111173
50	0.00106462	0.00135410	0.00192771	0.00055586
	\bar{z}	-0.000010	0.00000476	-0.000010
	S^2	0.00005166957	0.000159449	0.00010770688
	$t_{\text{турш.}}$	0.009329	0.002639	0.006816
	$\chi^2_{\text{турш.}}$	0.057729	0.081188	0.081660

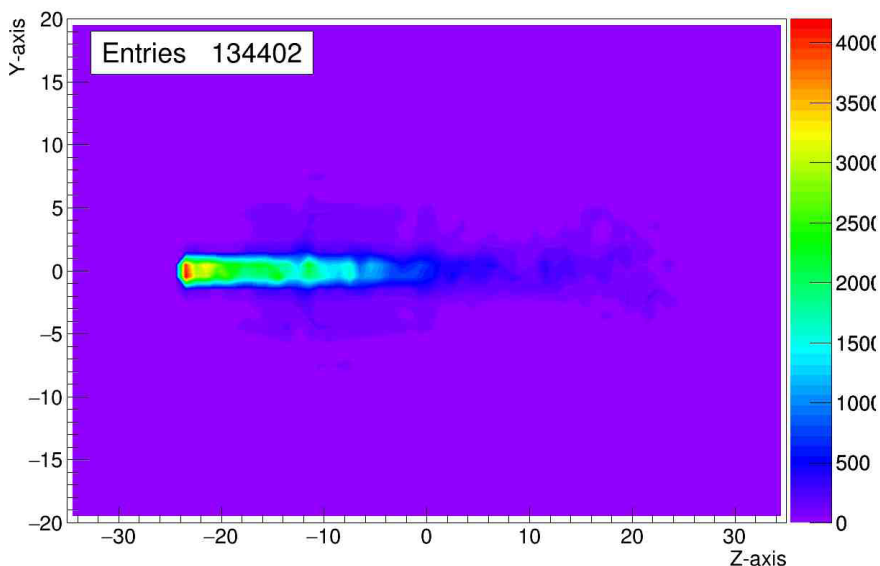
Дараачийн χ^2 тархацын үнэлгээг $\chi^2_{\text{турш.}} = \sum_{i=1}^n (x_i - y_i)^2 / y_i$ гэсэн томъёогоор хийсэн үнэлгээний $\chi^2_{\text{турш.}}$ утгыг Хүснэгт 1-д үзүүлэв. Энд мөн $\chi^2_{\text{турш.}} < (\chi_{0.99,5\%}^{\text{tab}})^2 = 27.99$

[7] байгаа тул 0.995 магадлалтай боллоо. Иймээс энэ дээрх хоёр үнэлгээг өгснөөр туршилт болон онолын каскад загварууд хоорондоо таарч байна.

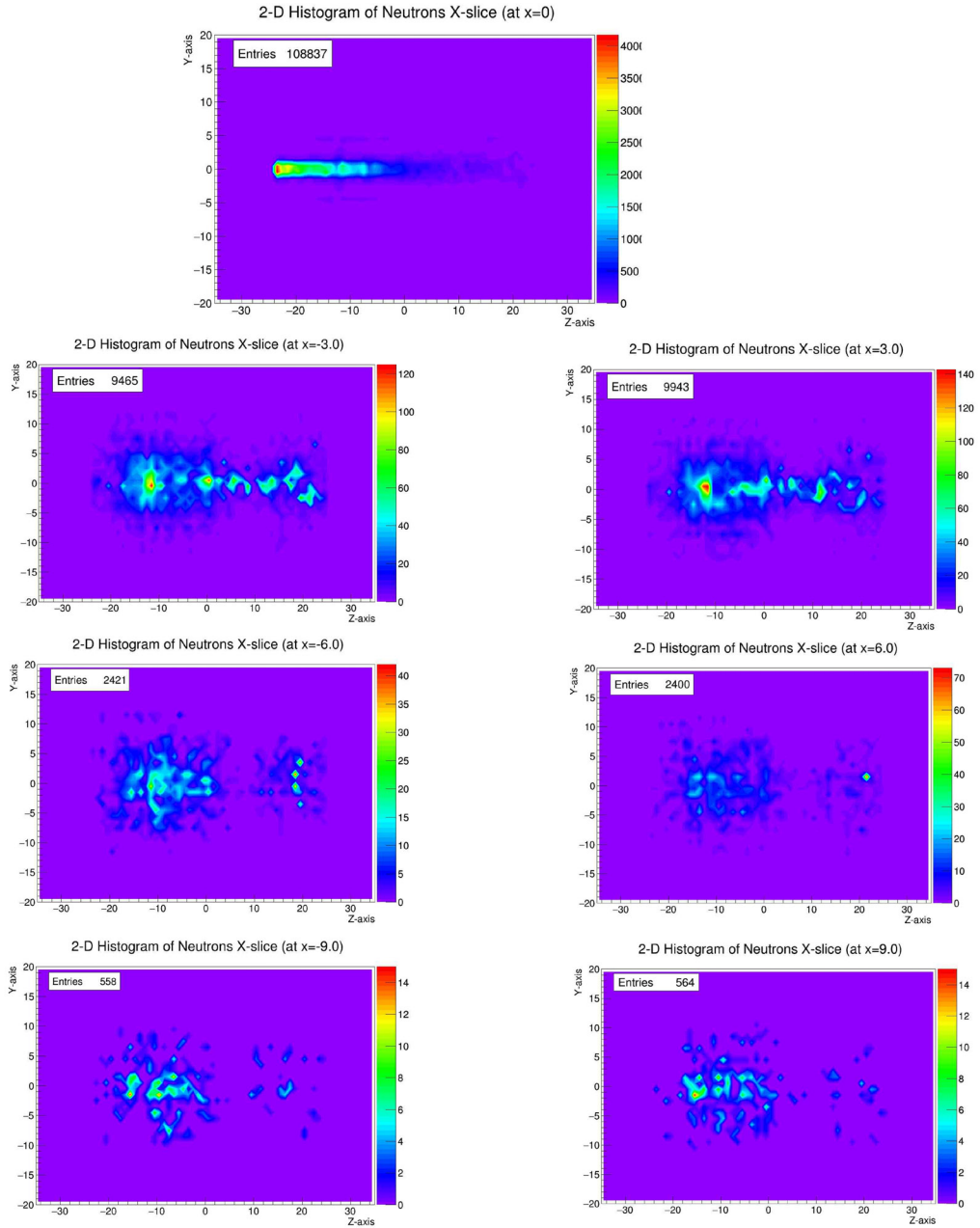
Цаашид бид нейтроны гаралтын нягтралыг тодруулах зорилгоор дараахь түгэлтүүдийг судлаж үзлээ. Үүнд: зураг 4-д хар тугалга-уран төхөөрөмжийн байн хэсэгт явагдсан цөмийн цацаргалтат урвалаас үүсч буй хоёрдогч нейтроны орон зайн түгэлтийг Z-Y хавтгай дагуух

интегралчилсан түгэлтээр, харин Зураг 5 -д уг интегралчилсан түгэлтийг 3 см зузаантай зүслэгүүдээр (x-slice) ялгаж харууллаа.

Зүслэгийн төвийг $x=0$; $x=3$; $x=-3$; $x=6$; $x=-6$; $x=9$; $x=-9$ (см)-д байрлаж байхаар тус тус сонгож авсан (симуляцын давталтын тоо = 5000).



Зураг 4. Цөмийн цацаргалтат урвалаас үүсэж буй хоёрдогч нейтроны Z-Y хавтгай дагуух орон зайн интегралчилсан түгэлт



Зураг 5. Цөмийн цацаргалтад урвалаас үүсэж буй хоёрдогч нейтроны орон зайн түгэлтүүд. Зүслэгийн зузаан 3 см бөгөөд төв нь $x=0$; 3; -3; 6; -6; 9; -9 (см) дээр тус тус байрлана

ДҮГНЭЛТ

1. 1.5 ГэВ энергитэй протоны хар тугалга-ураны мөргөлдөөнөөр Энерги-трансмутаци төхөөрөмжийн тодорхой орчинд байрлуулсан цөмийн фотоэмульс дотор үүссэн нейтроны энергийн спектрт дэвсгэр утгууд (фон)-ыг хасаж, нейтроны энергийн түгэлтийн хэлбэрийг тогтоолоо. Энэ хэлбэр нь [8] ажилд гаргасан үр дүнтэй төстэй байна.

2. Фотоэмульсийн аргын тусламжтай гаргаж авсан үр дүн нь энэ төрлийн цөмийн төхөөрөмжийн эзэлхүүний янз бүрийн

хэсэгт нейтроны энергийн спектрийг байгуулах бололцоотой болохыг харуулж байна. Гэхдээ энэ аргаар гаргаж авсан мэдээллийг боловсруулахад маш их цаг хугацааг зарцуулдаг.

3. Бидний туршлагаар хэмжиж тодорхойлсон нейтроны энергийн спектр нь GEANT4 Бертини, Бинари ба Лижэ каскад моделиуд, нейтроноор явагдах урвалын огтлолын G4NDL4.5 өгөгдлийн санг ашиглаж явуулсан тооцооны утгуудтай “сайн” тохирч байна.

НОМ ЗҮЙ

1. М.И.Кривоустов, Д.Чулгэм, И.Адам и др.
О первом эксперименте по калориметрии уранового бланкета на модели U/Pb-сборки электроядерной установки “Энергия плюс трансмутация” на пучке синхрофазотрона ОИЯИ при энергии протонов 1.5 ГэВ. Препринт ОИЯИ P1-2000-168, Дубна, 2000; “Kerntechnik”, 2003,68,pp.48-56.
2. Д.Чулгэм, М.И.Кривоустов, Ю.А.Батусов, А.Н.Соснин, И.Адам, О.С.Заверюха, А.В.Павлюк.
Исследование спектров быстрых нейтронов в урановом бланкете установки “Энергия плюс трансмутация” на протонном пучке нуклотрона ОИЯИ при энергии 1.5 ГэВ. Препринт ОИЯИ P1-2003-59, Дубна, 2003, Направлено в журнал “Nuclear Tracks and Radiation Measurements”
3. С.Пауэлл, П.Фаулер, Д.Перкинс.
Исследование элементарных частиц фотографическим методом, Москва,1962 г.,стр.64, фиг.19.
4. S.Agostinelli et al. GEANT4-A simulation toolkit, Nuclear instruments and methods in physics A 506,pp. 250-303, 2003.
5. A.Krasa et al. Neutron production in spallation reactions of 0.9 and 1.5 GeV protons on a thick lead target. Comparison between experimental data and Monte-Carlo simulations E1-2005-46, Dubna,Preprint, 2005.
6. https://en.wikipedia.org/wiki/Student%27s_t-distribution.
7. https://people.smp.uq.edu.au/YoniNazarathy/stat_models_B_course_spring_07/distributions/chisqtab.pdf.
8. L.Stewart. Leakage Neutron Spectrum from a Bare 239Pu Critical Assembly. Nuclear science and engineering: 1960,8, pp.595-597.

COMPARISON OF NEUTRON SPECTRUM MEASURED BY NUCLEAR PHOTO EMULSION METHOD WITH MONTE CARLO GEANT4 CODE

*Otgonsuren D. *, Togoo R., Tursukh A.*

Institute of Physics and Technology, Mongolian Academy of Sciences, Mongolia

**Corresponding author, e-mail: otgonsurenhep@yahoo.com*

Abstract: In this work, we have compared neutron energy spectrum measured by nuclear photo emulsion method in the “Energy plus Transmutation” collaboration in the Joint Institute for Nuclear Research, Russia to that produced by simulations using Geant4 toolkit and evaluated the agreement between theoretical and experimental results when bombarding the Pb/U setup with 1.5 GeV-energy protons. We used high energy Bertini, Binary, and Liege models in the toolkit for the simulations. For energy range of 3-25.3 MeV, the numbers of neutrons that entered and produced in the photoemulsion volume were 2954, 2075, and 1799 for Bertini, Binary, and Liege, respectively. The coincidence between the neutron energy spectra of simulation and experiment was very good.

Keywords: Photoemulsion, simulation, GEANT4, neutron energy spectrum, nuclear transmutation;