

Уран Бүхий “Квинта” Төхөөрөмжийг Релятив Цөмөөр Шарсан Процесс Дахь Нейтрон-Физикийн Үзүүлэлтүүд

Д. Отгонсүрэн*

ШУА, Физик Технологийн хүрээлэн, Энхтайваны өргөн чөлөө-546, Баянзүрх Дүүрэг, Улаанбаатар, Монгол Улс

(“E&T-Цөмийн хаягдлыг хоргүйжүүлэх” коллаборацийн нэрийн өмнөөс)

Орчин үед цөмийн хэрэглэж дууссан түлш, шатахууны нийлүүлэлт болон хаягдлыг хоргүйжүүлэх асуудал нь цөмийн эрчим хүчний өргөн хэрэглээг хязгаарлах хоёр гол шалтгаан болоод байгаа юм. Энэ асуудлыг шийдэх арга замуудын нэг нь релятив цөмийн технологийг ашиглах бөгөөд түүний зорилго нь байгалийн болон баяжуулагүй ураны байг $2\div 10$ ГэВ-ийн их энергийн цацрагаар бөмбөгдөж аль болох их хэмжээний нейтроны тархацын спектрийг үүсгэхэд оршино. Энэ ажилд Нуклотрон хурдасгуураас (ЦШНИ, Дубна) гарах 2 ба 4 АГэВ релятив энергитэй дейтроны болон нүүрстөрөгчийн ионы цацрагаар бөмбөгдөж, их хэмжээний ураны бай ($m_u \sim 500$ кг жинтэй “Квинта” төхөөрөмж) дотор нейтроны үүсэлтийн тухай асуудал хөндөгдөнө. Үүнд идэвхжүүлэх арга техникийг ашиглаж $^{238}\text{U}(n,f)$, $^{238}\text{U}(n,\gamma)$ болон $^{59}\text{Co}(n,x)$ урвалуудын судалгааг явуулсан. Туршилтын үр дүнгийн харьцуулалт нь сум болон бөөмсийн төрлөөс энергийн хамаарлыг судлан тогтоов.

PACS numbers: 28.41. Kw, 28.50. Ft

УДИРТГАЛ

Өнгөрсөн хоёр арван жилд критикээс доогуурх горимын хурдасгуурын системээр хавсарга судалгааны асуудлуудыг шийдэх зорилгоор ашиглах сонирхол өсөж байгаа нь энэ чиглэлд цөмийн судалгааны томоохон онолын ба туршилтын тэргүүлэх төвүүдийг татан оруулаад байна. Орчин үеийн олон зорилготойгоор хүчтэй хурдасгуурын төвүүд, тухайлбал, SNS, USA (~ 1.3 MW чадал) [1], J-PARC, Japan (~ 1 MW) [2], the PSI, Switzerland (~ 0.75 MW) [3] ажиллаж байгаа юм. Тэдгээр нь янз бүрийн салбарын бүтэцтэйгээр материал судлал, цацраг идэвхт хаягдлыг хоргүйжүүлэх, анагаах ухааны цацраг идэвхт изотопыг үүсгэх г.м. судалгааг явуулж байна. Эдгээр төвүүд нь ~ 1 ГэВ (эсвэл бага) протоны хурдасгууруудыг ашиглаж нейтрон үүсгэхэд хэрэглэдэг. Одоогийн байдлаар хэд хэдэн туршилтууд зузаан байн дээр нейтрон үүсгэх судалгаа явуулж байгаагаас гадна, (JINR, LANL, KEK, ITER) нейтроныг үүсгэхэд илүү үр дүнтэйгээр их энергийн хурдасгуур шаардлагатай болохыг тогтоосон. В.Юревич [4,5] (ЦШНИ, Дубна) туршилтын судалгааны цуврал ажлуудыг гүйцэтгэж, зузаан байн дотор үүссэн нейтроны энергийн спектрийн өгөгдлүүдээр анализ хийсэн. Зузаан байнуудын хувьд байн дээрх хоёрдогч харилцан үйлчлэл нь нейтроны цацаргалтад нэмэлт хувь нэмэр нөлөө оруулж байгааг харуулсан юм. Нейтроны өсөх үржилт нь цэнэгтэй бөөмс зузаан байнаас сугарч гарах үед ялангуяа байг нейтроны үүсгэгч болгоно. Нейтроныг үүсгэхэд зарцуулсан бүтэн энергийг

анхдагч багц цацрагийн энергид харьцуулахад сул өсөлт нь ажиглагдаж, багцын энергийн өсөлтөөс сул хамаарч байгаагаас гадна анхдагч бөөмсийн багцын төрлөөс хамаарахгүй болохыг харуулсан. Энд тэмдэглэхэд, багцын нэгжид ноогдох нейтроны дундаж энергийн өсөлт нь багц энерги өсөхөд дагах нь ажиглагдсан. Энэ нь цаашид квази-хязгааргүй байнд нейтроныг үржүүлэхэд хэрэглэх боломжтойг харуулсан болно. Энэ талаасаа бол нейтроныг үүсгэх багцын энергийг илүү эрчимтэй хэрэглэх нь бөөмсийн цацрагийн энергийн тохиромжтой хэмжээгээр өсгөж болно. Сүүлийн 5 жилд Цөмийн шинжилгээний нэгдсэн институтийн (Дубна хот) дахь хамтын ажиллагааны хүрээнд “Энерги ба трансмутац- RAW” хөтөлбөрийн дагуу $1\div 8$ ГэВ энергийн багцын цацрагаар ураны зузаан байнд үүсэх нейтроны орон зайн цөмийн физик үзүүлэлтүүдийг боловсруулсан. Хамтын ажиллагааны гол зорилго бол ураны байнд нейтроны үүсэлтийг түүнийг буудсан анхдагч цацрагийн энергийн багцаас хамаарах хамаарлыг судлах асуудал юм. Энэ ажилд тугалгаар хүрээлэгдсэн ураны (“Квинта”) төхөөрөмжид 2 ба 4 АГэВ энергитэй дейтроны болон нүүрстөрөгч (^{12}C) цөмийн ионы цацрагаар бөмбөгдсөн туршилтын тухай тайлбарлав. Энэ ажлын зорилго нь:

1. ^{12}C болон дейтроны багц цацрагийн судалгаа шинжилгээ хийх.
2. Идэвхжүүлэх аргыг ашиглан цацрагийн $^{238}\text{U}(n,\gamma)$ залгих урвал, байгалийн $^{238}\text{U}(n,f)$ хуваагдлын болон $^{59}\text{Co}(n,x)$ задрах урвалуудын орон зайн тархацын нягтаршлыг

* Electronic address: otgonsurenhep@yahoo.com

тогтоох, спектрийн индексийг болон залгих ба задрах урвалын нийт тоог гаргаж авах.

- Тусч байгаа анхдагч багцын энерги болон хурдасгагдсан бөөмсийн төрлөөс хамааруулсан туршилтын өгөгдлүүдэд харьцуулалтын судалгаа хийх.

ТУРШИЛТ БА АРГУУД

Туршилтын "Квинта" [6, 7] төхөөрөмж нь ураны бай (^{238}U , түүний жин $m = 512$ кг) болон гадна талдаа 10 см зузаан тугалгаар хүрээлэгдсэн бай юм. Ураны бай нь 5 тасалгаатай. Цацрагаар бөмбөгдөхийн өмнө идэвхжүүлэх хэмжигч детектор, хавтан буюу ялтас ба мөрдөх хэмжигчийг тасалгааны хоорондох зайнд нь, мөн байн өмнө ба хойно байрлуулсан. Тусч байгаа цацрагийн багц төхөөрөмж дотор өмнөх тугалган хаалтийн 150x150 мм хэмжээний нүхээр орно. Түүнээс гадна эхний нэгдүгээр тасалгаа нь оролтын 80 мм хэмжээний цонхтой хийгдсэн. Байгалийн ураныг идэвхжүүлэх 1 мм зузаан 8 мм диаметрын детекторууд туршилтанд хэрэглэгдсэн бөгөөд ^{238}U –ны нейтроныг залгих болон байгалийн ^{238}U –ны задрах урвалуудын орон зайн тархацыг тогтооход зориулагдсан. Шарах детекторуудыг хэвтээ чиглэлд ($Z = 0, 123, 254, 385, 516, 647$ мм) 6 хавтангуудад бэхлээд, хоорондох зайд байрлуулсан. Хавтан болгон нь эхнийхээс бусад нь босоо чиглэлд төвөөсөө $R = 0, -40, -80, -120, +80$ мм тус тус зайтай 5 детектортой.

γ -спектрийн хэмжилтийг цэвэр германийн (HPGE) детектор дээр хэмжсэн. Детекторын эрчмийн ба энергийн тохируулгыг анхдагч цацрагийн гамма-шугамын үүсгэсэн багцаар гүйцэтгэсэн. Нейтрон цацрагийг шингээх урвалын тоог 277.6 кэВ гамма-туяаны гаралт, түүний дагалдах ^{239}Np -ыг ($^{238}\text{U}(n, \gamma)^{239}\text{U} \xrightarrow{\beta^-} ^{239}\text{Np} \xrightarrow{\beta^-} ^{239}\text{Pu}$) задралаар тодорхойлно. Задралын тоог түүний бүтээгдэхүүний гаралтаар тодорхойлогддог. Энэхүү кумулятив гаралт нейтроны энергийн өргөн мужид (нейтроны задралын спектрээс 100 МэВ энергийн нейтрон хүртэл) бараг тогтмол хэвээр үлддэг. ^{97}Zr (5.7%), ^{131}I (3.6%), ^{133}I (6.3%), ^{143}Ce (4.3%) задралын, хэлтэрхийнүүдийн гаралтыг тодорхойлоход, 743.36 кэВ, 364.49 кэВ, 529.9 кэВ ба 293.3 кэВ-д харгалзах гамма-шугамуудаар тогтоосон. Кумулятив гаралт нь хуваагдлын тоог тодорхойлоход ашигласныг хаалтуудад харуулсан.

Мөн нэмж 3 мм зузаан болон 15 мм диаметртэй Со детекторыг хэрэглэж, нейтроны спектрийн судалгаа явуулсан. Зургаан ширхэг детекторыг төвөөсөө $R = +40$ мм зайнд хавтан тус бүрт байрлуулж, туяагаар шарах болгонд судалгааг гүйцэтгэсэн. Эндээс тэмдэглэхэд, ~ 1 МэВ -ээс ~ 100 МэВ хүртэлх өргөн хүрээнд хамрагдах босгын энерги E_{th} бүхий $^{59}\text{Co}(n, x)$ босго урвалуудын бүтээгдэхүүнүүдийг кобальтийн детекторын γ -спектрээр ажигласан. Тогтоосон орон зайн тархацын урвалын нягтаршлыг "Квинта" төхөөрөмжийн уран байд үүссэн нейтроны спектрийн анализ хийхэд ашигласан.

$^{27}\text{Al}(d, x)^{24}\text{Na}$, $^{27}\text{Al}(^{12}\text{C}, x)^{24}\text{Na}$, $^{64}\text{Cu}(d, x)^{24}\text{Na}$ ба $^{64}\text{Cu}(^{12}\text{C}, x)^{24}\text{Na}$ урвалуудад дейтрон ба ^{12}C цөмийн багцыг хянахад стандарт техникийн хөнгөн цагаан болон зэс ялтас хэрэглэсэн. Энэ арга барилыг [8] ажилд дэлгэрэнгүй бичигдсэн болно. Урвалын хөндлөн огтлолыг өгөгдсөн цацрагийн туяаны багцын хувьд энергийг сонгохдоо мэдэж байсан туршилтын [8-10] утгуудаар экстраполяци хийж олсон. Анхдагч бөөмсийн эрчим болон хөндлөн огтлолыг хүснэгт 1 харуулав.

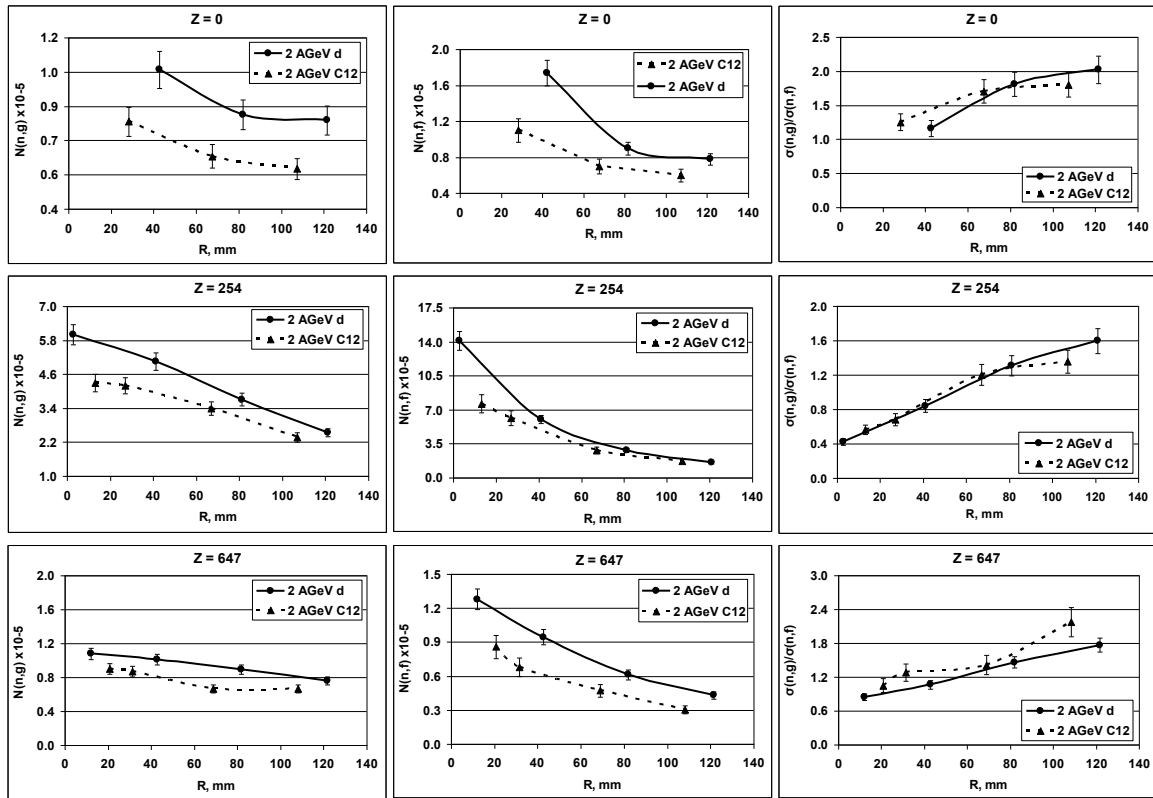
Хүснэгт 1. $^{27}\text{Al}(d, x)^{24}\text{Na}$, $^{27}\text{Al}(^{12}\text{C}, x)^{24}\text{Na}$, $^{64}\text{Cu}(d, x)^{24}\text{Na}$, $^{64}\text{Cu}(^{12}\text{C}, x)^{24}\text{Na}$ урвалуудын хөндлөн огтлолууд ба анхдагч бөөмсийн бүтэн эрчим

Изопо-пууд	Энерги АГЭВ	Хөндлөн огтлол (Al) мб	Хөндлөн огтлол (Cu) мб	Нийт эрчим
d	2	14.6	6.0	$2.16 \cdot 10^{13}$
	4	14.0	6.3	$6.11 \cdot 10^{12}$
^{12}C	2	19.4	9.5	$2.14 \cdot 10^{11}$
	4	19.0	9.5	$6.18 \cdot 10^{10}$

Хөнгөн цагаан болон зэс ялтасын технологи нь тогтоогдсон эрчмийн утгуудын хувьд хоорондоо 7% алдааны хэмжээнд ижилхэн гарсныг тэмдэглэх хэрэгтэй.

ҮР ДҮН, ХЭЛЦЭЛ

Жишээ болгож зураг 1 дээр нейтроны шингээх урвалууд, байгалийн ^{238}U задралууд мөн $\bar{\sigma}_{\text{capt}} / \bar{\sigma}_f$ индексийн спектрийг детекторын ($Z = 0, 254, 647$ мм) ялтасуудад дейтрон ба ^{12}C цөмийн 2 АГЭВ энергитэй үед тогтоосон нягтаршлын тархацыг радиусын дагуу харуулсан. Энэ өгөгдлүүд 1 граммд, хурдасгагдсан нэг бөөмс болон 1 ГэВ энергид ноогдохоор өгсөн.



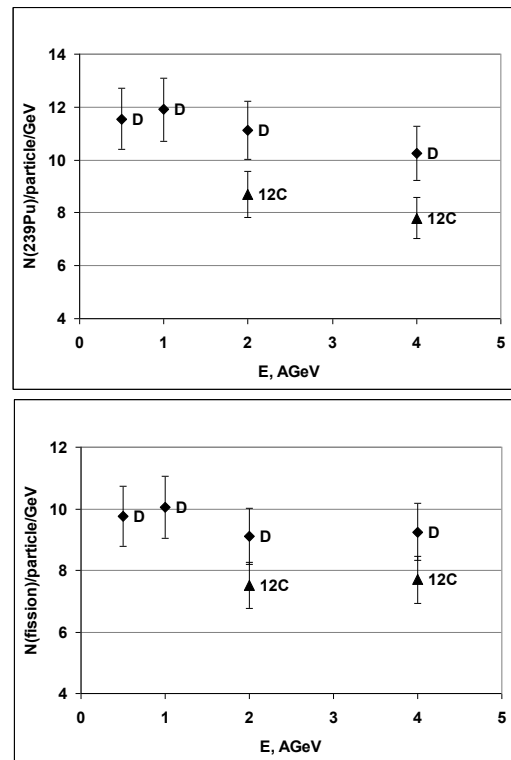
Зураг 1. Дейтрон ба ^{12}C цөмийн хувьд 2 АГэВ энергитэй нейтроны шингээх урвалууд байгалийн $U(n, f)$ (дунд талд), $^{238}\text{U}(n, \gamma)$ задралууд (зүүн талд) болон $\bar{\sigma}_{\text{capt}}^{238\text{U}} / \bar{\sigma}_f^{238\text{U}}$ индексийн спектр детекторын ($Z = 0, 254, 647$ мм) ялтасуудад оногдсон нягтаршлын радиус дагуух тархац.

Шингээх ба задралын урвалын гаралт нь детекторын ялтасууд $Z = 0$ үед ойролцоогоор дейтроны 25% харьцангуй ^{12}C цөмөөс дээш илүү тохиолдолд харуулсан. Детекторын $Z = 254, 647$ мм хавтангуудад гаралтын ялгаа бууралттай байсан, харин дейтроны гаралтын тохиолдолд өндөр. Радиус дагуух спектрийн индексийн хамаарал нь бүгд детекторын ялтасуудад дейтрон ба ^{12}C цөмийн аль алинд нь ойролцоогоор ижилхэн. Спектрийн индексийн утгын өөрчлөлт нь ~ 0.5 -аас ~ 2 хооронд хэлбэлзэнэ. Эндээс харахад, нэгдүгээрт, Z өсөх тутам нейтроны спектрийн түгэлт нь “зөөлөрч”, хоёрдугаарт бүх детекторын хувьд нейтроны спектр нь тусч байгаа бөөмийн 2 цацрагийн хувьд ойролцоогоор адилхан байна.

“Квинта” төхөөрөмжийн байгалийн ураны байнд ^{238}U -ны нейтроныг шингээх урвал ба байгалийн U задралын тогтоосон орон зайн тархац дээр үндэслэн ^{239}Pu үүсгэх тоо хэмжээ болон байгалийн U задралын нийлбэр тоог ураны эзлэх зай хэмжээгээр тодорхойлсон.

(0.5, 1, 2 ба 4 АГэВ) [6] дейтроноор мөн хоёр энергийн мужид (2 ба 4 АГэВ) ^{12}C цөмөөр бөгөөд нийтдээ таван туршилтыг “Квинта” төхөөрөмжийн ураны байн нейтрон-физикийн үзүүлэлтийн судалгааг явуулж зураг 2 дээр үүссэн ^{239}Pu цөмийн ба задралын нийт тоог

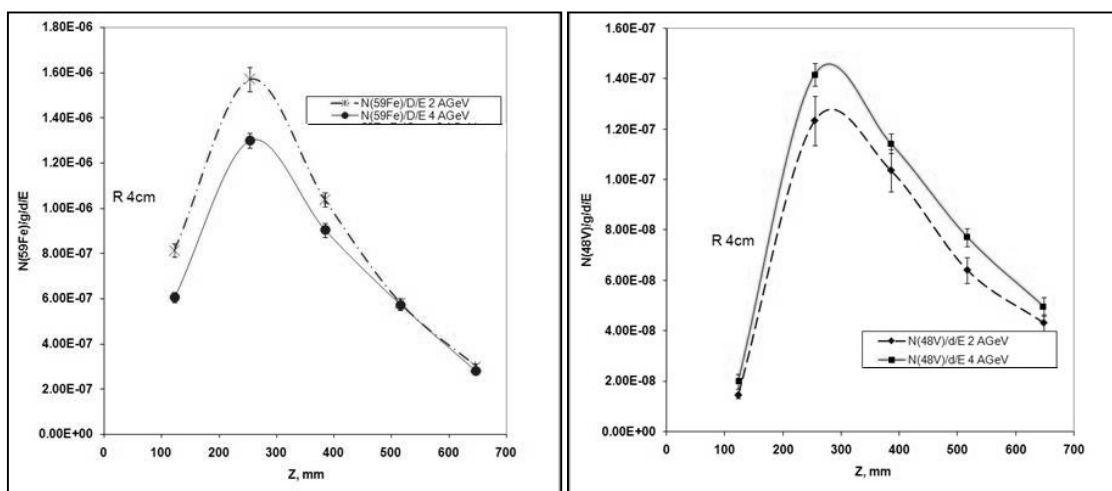
дөрвөн өөр энергитэй дейтроны энергийн горимд болон ^{12}C цөмийн хурдатгасан нэгж бөөмс ба 1 ГэВ энергид харуулсан.



Зураг 2. «Квинта» төхөөрөмжийн ураны байнд дейтроны энерги $E_d = 0.55, 1, 2, 4$ АГэВ болон

$E^{12C} = 2$ ба 4 АГЭВ бүхий 12C цөмийн энергид ^{239}Pu цөмийн нийт тоо (дээд талынх) мөн задралын нийт тоо (доод талынх).

Дейтроны өгөдлүүдийг хэд хэдэн үр дүнд гарсан гаралтаас дундчилсан. Анхдагч тусч байгаа бөөмийн энергийн хэмжээ өсөлтөд цацраг шингээх болон задрах урвалын тоо дейтрон ба 12C цөмийн хувьд тодорхой алдаанд хамааралгүй болохыг харж болно. 12C цөмийн тохиолдолд нийт задралын тоо хэмжээ болон ялангуяа шингээлтийн нийт тоо нь дейтроны цацрагийн



Зураг 3. Дейтроны $E_d = 2$ ба 4 АГЭВ хоёр өөр энергийн хувьд $^{59}Co(n,p)^{59}Fe$ (зүүн талд) болон $^{59}Co(n,x)^{48}V$ (баруун талд) урвалын харьцаануудын тархац.

Кобальт идэвхжилттэй детекторуудын туяаны ү-спектрын боловсруулалтын үр дүнд янз бүрийн $^{59}Co(n,x)$ урвалуудыг гаргаж авсан. Жишээ нь Зураг 3 дээр $^{59}Co(n,p)^{59}Fe$ болон $^{59}Co(n,x)^{48}V$ урвалын хурдны радиус дагуух тархацыг дейтроны $E_d = 2$ ба 4 АГЭВ энергийн хувьд харуулсан. ^{59}Fe үүсэлтийн хөндлөн огтлолын хамгийн их утга бол $E_{max} \sim 13$ МэВ [10]. ^{48}V үүсэх урвалын огтлолын максимум нь $E_{max} = 160$ МэВ [11]. 100 МэВ-ээс их энергитэй нейтроны тоо нь дейтроны 2 ба 4 АГЭВ энерги өсөхөд дагаж өсөхийг харуулах бөгөөд хамтдаа нейтроны тоо < 30 МэВ энергид буурна. Энэ баримтаас шууд бус хэлбэрээр харахад, "Квинта" төхөөрөмжийн ураны байн дейтроны энергийн өсөлтөд нейтроны спектр хатуу болж байгааг нотолно. Ижил үр дүнгүүд өмнө нь дейтроны гурван 1, 2, 4 АГЭВ энергитэй байг шарахад илэрч байсан.

ДҮГНЭЛТ

Цацрагийн нейтроныг шингээх болон задрах урвалын хэмжсэн орон зайн тархацын нягтаршил дээр үндэслэж "Квинта" төхөөрөмжийн ураны байн эзэлхүүнд дээрх урвалуудын нийт тоог гаргаж авсан. Туршилтын алдааны хэмжээнд $^{238}U(n,\gamma)$ урвалуудын нийт тоо болон байгалийн $U(n,f)$

тохиолдлоос доогуур болохыг тэмдэглэгдсэн. Гэхдээ энэ нь урвалын мониторинг хөндлөн огтлолын утгыг 12C цөмийн хувьд доогуур үнэлсэнтэй холбоотой.

Ингэснээр бид нейтроны гаралтын өсөлтийг тусч байгаа бөөмсөөс В.Юревичийн таамагласан хурдасгагдсан бөөмс хамааралгүй болохыг авч үзлээ. Энэ нь ураны байн хэмжээ нь хэт бага учраас болсон гэж үзсэн болно.

урвалуудын нийт тоо дейтроны (энерги 1-ээс 8 ГэВ хооронд) ба 12C цөм (24 ба 48 ГэВ) хувьд хоёулаа өөрчлөгдөхгүй. Тийм учраас дулааны нейтроноос төдийгүй 1 МэВ-ээс дээш энергийн нейтроноос үүсэх нейтроны гаралт нь өсөхгүй болохыг ажиглаагүй. Магадгүй энэ нь цацрагийн туяанд ураны байн нь квази-хязгааргүй биш ($R \sim 15$ см ба дундаж нягтаршил ~ 12 гр/см³) байгаатай холбоотой. Идэвхжилтийн кобальт детектор хэрэглэж "Квинта" төхөөрөмжийн ураны байнд нейтроны спектр хатуу болох нь ажиглагдсан. Энэ төрлийн бөөмсүүд болон түүний энергийн хүрээнд ийм туршилтууд анх удаа явагдсан болно.

ТАЛАРХАЛ

Энэ хамтын ажлыг гүйцэтгэхэд гүн туслалцаа үзүүлсэн проф. В.Воронко болон "Е&Т-Цөмийн хаягдлыг хоргүйжүүлэх" коллаборацийн хамт олонд талархал илэрхийлье.

НОМ ЗҮЙ

- [1] Web site of ORNL. <http://neutrons.ornl.gov/facilities/SNS/works.shtml>
- [2] Web site of J-PARC. <http://j-parc.jp/index-e.html>

- [3] Y. Kadi, A. Herrera-Martinez. Multi-MW target development for EURISOL & EUROTRANS European Organization for Nuclear Research // *BENE Week*, CERN, Switzerland, March 16-19, 2005.
- [4] V.I. Yurevich, R.M. Yakovlev, V.G. Lyapin. The study of neutron emission in the interaction of nuclei ^1H , ^2H , ^4He , ^{12}C , with energy of 1 - 2 AGeV with lead nuclei // *Nuclear Physics*. 2006, v. 69, № 9, p.1531-1543. (in Russian)
- [5] V.I. Yurevich, R.M. Yakovlev, R.G. Vassilkov et al. Production and multiplication of neutrons in lead targets induced by protons above 1 GeV // *Nucl. Instr & Meth in Phys. Research, A*. 2006, № 562. p.747-749.
- [6] M.Yu. Artiushenko, V.A. Voronko, K.V. Husak et al. Investigation of the spatial and energy distributions of neutrons in the massive uranium target irradiated by deuterons with energy of 1...8 GeV // *Problems of Atomic Science and Technology. Series: Nuclear Physics Investigation* (88). 2013, v. 6, p.170-174.
- [7] L. Zavorka, J. Adam, V.V. Sotnikov et al. Neutron-induced transmutation reactions in ^{237}Np , ^{238}Pu , and ^{239}Pu at the massive natural uranium spallation target // *Nucl. Instr & Meth in Phys. Research, B*. 2015, № 349. p.31-38.
- [8] M. Artiushenko, V. Voronko, Yu. Petrusenko, et al. Monitoring of high energy deuteron beams in the experiments with massive targets // *Problems of Atomic Science and Technology. Series: Nuclear Physics Investigation* (91). 2014, v. 3, p.186-189.
- [9] A.A. Safronava, A.A. Patapenka, V.V. Sotnikov, et al. Monitoring of GeV Deuteron Beam Parameters in ADS Experiments at the Nuclotron (JINR, Dubna) // *Proceedings of DIPAC2011*, Hamburg, Germany, May 2011, p.530-532.
- [10] Web site of Experimental Nuclear Reaction Data (EXFOR). <https://www-nds.iaea.org/exfor/exfor.htm>
- [11] Web site of TENDL-2014: TALYS-based evaluated nuclear data library. <ftp://ftp.nrg.eu/pub/www/talys/tendl2014/tendl2014.html>

Neutron-Physical Characteristics of Assembly “Quinta” Irradiated By Relativistic Nuclei

D.Otgonsuren

MAS, Institute of Physics and Technology Institute, Enkhtaivan Ave.54b, Bayanzurkh District, Ulaanbaator, Mongolia

(On behalf of “Energy&Transmutation of RAW” collaboration)

At the present time disposal of spent nuclear fuel and fuel supply problem are two main reasons preventing wide distribution of nuclear power. One of the ways to solve this problem is using Nuclear Relativistic Technologies aimed at forming of maximum hard neutron spectrum in natural or depleted massive uranium targets irradiated by high energy (2-10 GeV) beams of relativistic particles. This paper describes the neutron generation in massive natural uranium target (assembly "QUINTA", $m \sim 500$ kg) irradiated by beams of relativistic deuterons and ^{12}C ions with energies of 2 and 4 AGeV at the accelerator Nuclotron (JINR, Dubna). The reactions $^{nat}\text{U}(n,f)$, $^{238}\text{U}(n,\gamma)$, and $^{59}\text{Co}(n,x)$ were investigated using activation technique. Comparison of obtained experimental results in dependence on energy of incident beam and type of particles was carried out.

ACKNOWLEDGEMENT

I would like to express my thanks to prof. V.Voronko and to other researchers of our collaboration "Energy&Transmutation of RAW".