

## Geant4 багцаар нейтроны сарнилын дүрслэлт тооцоо үйлдэхүй

О. Лхагва<sup>1\*</sup>, М. Батмөнх<sup>2</sup>, П. Батзул<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Монгол Улс, Улаанбаатар-210646, Их сургуулийн гудамж-1, Монгол Улсын Их Сургууль,  
Физик-электроникийн сургууль, Онолын физикийн тэнхим,

<sup>2</sup>Оросын Холбооны Улс, Дубна хот, Цөмийн Шинжилгээний Нэгдсэн Институт,  
Цацрагийн биологийн лаборатори

\*Э-шуудан: [olhagvao@yahoo.com](mailto:olhagvao@yahoo.com)

Сүүлийн хоёр жил олон улсын Geant4 програмын нөмөр нөөлөг дагаж, цацраг, бөөмс нано цараанд бодис болон биологи биеттэй харилцан үйлчлэлцэхүйг судлахаар боловсруулсан тооцооллын цогц хэрэглүүрүүдийг компьютерт суулгаад шинжилгээний угтвар дасгал, бодлогуудыг шийдэхэд, залуус зохих дадал чадвар эзэмшсэн юм. Энэхүү ажилд нейтрон биет- дээжтэй үйлчлэлцэх зүйг тусгалын энергээс хамааруулсан тооцооны зарим үр дүнг толилуулав. Geant4 багцаар үйлдсэн тооцооныхоо тоон дүнг АНУ, Канадын физикчдийн бүрдүүлсэн цөмийн ENDF/B-7 баримттай жишиг.

### I. УЛААЧ ҮГ

Мэдээллийн технологи, хийгээд тооцоот дүрслэлийн өнөөгийн дэвшилд суурьлан атом, цөм, эгэл бөөмийн физикийн олон он жилийн туршилт болон онолын судалгаа, тооцооллын ололтыг нэгтгэснээр бодис, биологи биетийн бүтэц зүй тогтлыг хумхи цараанд туршин судлах арга зүй боловсорч, дүрслэлт тооцоогоор 3D биеж дүрсийг босгох таатай боломж[1,2] бүрдээд байна. Цацраг, туяаны нано- микрон голчтой урсгалаар бөөмс, үлэг молекул, эсийн жишиг цараатай дээжийг шарж туршилтын баримт гаргахын сацуу квант сарнил, мөргөлдөөний онолоор тооцоолж, уг хувирлын орон зайн өрнөл, мөрлөл хэмжээг нь геометр дүрслэл, 3D загварт буулган босгодог боллоо. Энэ бол нано цараанд бодис хийгээд биологи биетийн туршилт, онолын судалгааны арга зүйн нэгдлийг хангах шинэ эхлэл даруй мөн.

Geant4 хэмээн нэрлэж буй эл тооцоо дүрслэлт иж төхөөрөг нь цөмийн физикээс нано царааны бодис, биологийн бичил биет, удамшлын ДНХ, бактери, вирус хүртэлх дээжийг цацраг, туяагаар үйлчилж судлах аргыг цогц физик туршилт, тооцоо дүрслэлийн суурьтай болгоод байна. Сүүлийн жил гаруй хугацаанд Франц, Япон, Итали улс болон ЦШНИ-ийн физичдын дэмжлэг чиглүүлэлтээр Geant4 багц програмын заримыг МУИС-ийн онолын физикийн лабораторт суурьшуулж, заавал үйлдэх туршилт, шинжилгээний бодлогуудыг гүйцэтгээд судалгааны анхны үр дүнг [3,4] гаргасан юм. Мөн чиглэлээр хүнд ионоор ЦШНИ-ийн Цацрагийн биологийн лаборатортой хамтран хурдан

хүнд ионы үйлчлэлээр ДНХ молекулын бүтэцэд шингэсэн энерги болон цацрагийн тунгийн эзлэхүүнээр түгэх зүйг загварчлах[5-7], хүнд цэнэгт ионы үйлчлэлээр ДНХ-д үүсэх мөрлөлийн бүтэц, энергийн шугаман дамжууллын ойролцооллод өөр өөр төрлийн ДНХ-ийн дан болон хоймсон мушгаан дахь эвдрэлийн тоог үнэлэх, загварчлах, зөөвөрлөх донжийг боловсруулах судалгааг хамтран гүйцэтгэхэд бэлтгэлээ.

Нано хэмжээ бүхий бөөмс, цацрагийн урсгал биологийн амьд биеттэй үйлчлэлцэх судалгаа нь цаашдаа цацрагийн үйлчлэлээр ДНХ хуваагдах, бутарч бөөмнөрөх, эргэж сэргэх, мөхөх динамикийг тодруулах, цацрагийн аюулаас хамгаалах, удамшлын өвчнийг анагаах, хорт хавдрын ургацыг унтраах цацрагийн микро-нано дозиметрийн арга зүйг боловсруулах зорилготой юм. Энэ чиглэлээр эмчилгээ-оношлогоонд хэдийнэ хэрэгжсэн найдвартай баримт бол MRI, позитроны компьютер биеж дүрслүүр (томограф), хэт авиан биеж дүрслүүр мөн [6].

Сүүлийн жилд Geant4 цогцын хадрон нанобөөмийн харилцан үйлчлэлийн судалгааны хүрээнд нейтроны цацрагаар нанохэмжээтэй дээжид үйлчлэхэд үүсэх зүй тогтлыг судлах зориулалтай багц програм боловсруулахад ихээхэн анахаарал тавьж байна. Энэхүү шинэ арга барил хийгээд цогц програмыг нь эзэмших, үр дүнг их сургуулийн сургалтад нэвтрүүлэх зорилтыг эрхэмлэн энэхүү ажилд Geant4 багцын хүрээнд нейтроны урсгалыг ашиглахад чиглэсэн техник, загварчлалын шинэ зохион бүтээх ажлын өрнөлийн өнөөг

тоймлож, тооцооны анхны үр дүнг олноо толилуулж байна.

## II. НЕЙТРОН

Цацраг туяагаар бодисыг тандсан мэдээллээс уг юмсын бүтэц, эвдрэх, гажих хийгээд сэргэж эдгэрэх зүй тогтлыг танин мэдэх арга барил эдүгээ нэгэн гольдрол лугаа нийлэн цэгцэрч, цаашид эрчтэй хөгжиж байгааг өмнө цухас дурьдлаа. Өнөөдөр дэлхийн 100 шахам том лабораторыг хамарсан Gean4 туршилт, тооцоо дүрслэл бүхий цогц програмын үйл ажиллагаа нь нейтроны урсгалт судалгаанд илүүтэй анхаарч байна. Ялангуяа, нейтроны цацрагийн өвөрмөц шинж төрх нь эсийн чанад хийгээд нано цараанд физик болон биологи биетийг эвдрэл нөлөө багатай судлахад илүү тохиромжтой юм. Нейтрон нь долгиолог болон бөөмлөг(квант шид) төрхтэй бас цөмийн чанга хүчээр ( $R \leq 10^{-15}$  м) протон мөн хадроны төрөл бөөмстэй үйлчлэлэцэн хурахад, эерэг цэнэгт цөмийг багцлан бүрэлдэнэ.

Нейтрон цахилгаан саармаг, диполийн момент бараг үгүй, хагас спинтэй, соронзон моменттэй, бодист гүн нэвтэрдэг, хурдыг нь сааруулж, долгионы уртыг нь жолоодоход дорвитой ахиц олсноор бодисын бүтэц болон соронзон орон бүрэлдэхүйн зүйг нь тандан шинжихэд шуурхайлан хэрэглэх боллоо. Сул тал гэвэл тааруухан сарнидаг, өндөр эрчимтэй урсгалыг нь үүсгэхэд ч бэрхшээл бий.

## III. НЕЙТРОН САРНИХУЙ

Нейтрон талстын тороос ойж дифракцлах, бага өнцгөөр сарних түүнчлэн соронзон орноос нь ч харимхай сарниж болно. Зангилаанд суугаа цөмд шингэх буюу харимхай бус ч сарнина. Онолын судалгаанд зангилаан дахь атомын шилжилтийг сонгон тохируулсаар Брэггийн эрчмийн туршилтын дүнг нарийн тодорхойлохуйц талст бүтцийг загварчлан тогтоодог. Нейтрон болон рентген туяаны бодисоос сарних бага өнцгийн сарнилын туршилтын болон онолын тулгуур үзэл ихээхэн төстэй. Гол ялгаа нь бол рентген буюу цахилгаан соронзон цацраг нь ион тойрон дахь электрон бүрхүүлтэй мэдэгдэм үйлчлэлдэгт оршино. Тухайн энергид атомаас сарнисан нейтроны сарнилын амплитуд тогтмол байдаг бол рентген

туяаных өнцгөөс хамааран өөрчлөгдөнө. Талстаас сарнисан нейтроны энерги болон долгионы анхны фаз нь хувираагүй байвал харимхай, харин зөвхөн фаз нь шилжиж бас энерги нь өөрчлөгдсөн бол харимхай бус сарнил явна. Нейтроны цөм дэх сарнилын огтлолыг сарнилына уртаар [8] илэрхийлнэ.

$$\sigma = 4 \cdot \pi \cdot a^2 \quad (1)$$

Сарнилын  $a$  уртыг тухайн нейтронд цөмийн “харагдах” радиус гэвэл зохиму. Харин нейтроны цөм дэх харимхай бус сарнилын (цөмийн урвал, цочирлоос үүдэн урсгал нь ширгэх, нэмэгдэх) тохиолдолд энэхүү урт нь энергээс хамаарсан комплекс тоонд хувирдаг юм. Хурдан нейтрон харимхай сарнихын сацуу энерги шилжүүлэн цөмийг цочирсон төлөвт оруулаад харимхай бус сарнина. Өнөөх цочирсон цөм  $\gamma$  туяа цацруулан шууд буюу завсар зуурын төлөв дайран үндсэн төлөвтөө шилжинэ. Өмнө өгүүлснээс үзэхүл, цөмийн мөргөлдөөн, харимхай болон харимхай бус сарнил бас цөмд шингэх эл гурван гол үйл хувирлаар нейторны хурд саардаг байна. Тэгэхдээ их энергитэй ( $>20$  МэВ) нейтроны хувьд тийм хувирал голлон тохионо. Харин нейтроны энерги 0.025эВ (дулааны нейтрон) зиндааны болоход харимхай сарнилын нөхцөл бүрэлдэнэ. Geant4 (геометр дүрслэлт мөрлөл) тооцоололт багц нь нейтроны бодис дундуур нэвтрэх дүрслэлт замнал үүсгэдэг юм.

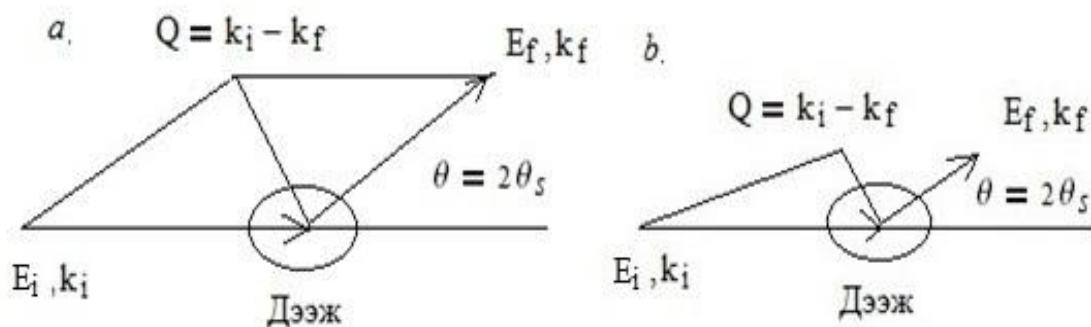
### A. Бага өнцгийн сарнил

Нейтроны бага өнцгийн сарнилыг судлах туршилтын санааг тоймлон дүрслэе. Эхлээд өмнө өгүүлснийг багцлан сарнилын геометр дүрслэлт туршилтыг тоймлон өгүүлье. Тодорхой  $k_i$  импүүльстэй нейтроны I урсгалыг дээжин дээр тусгаад бага өнцгөөр чиглэсэн  $k_f$  тойрон дахь фаз огторгуйн  $d^3k_f$  төгсгөлгүй бага эзлэхүүн дундуур нэвтрэх урсгалыг бүртгээд анхны урсгалд харьцуулан диференциал огтлолыг олно. Нейтроны сарнилын давхар диференциал огтлолыг хэмжиж бас тооцоолдог:

$$\frac{d^2\sigma}{d\Omega dE_f} = \frac{k_f}{k_i} \cdot S(Q, \omega) \quad (2)$$

Энд  $S(Q, \omega)$  нь нейтроны сарних явцад системийн энерги нь  $\hbar\omega$ , импульс нь  $\hbar Q$  хэмжээтэй хувирсныг илэрхийлж буй магадлал. (2) илэрхийлэл нь  $k_f$  импульсийн

тойронд  $d\Omega$  биет өнцгөөр, энергийн  $dE_f$  завсарт сарнисан нейтроны сарнилын огтлолын нэгж биет өнцөг, энергийн нэгж завсарт оногдож буй хувь нь юм.



Зураг 1. Анхны  $k_i$  импульстэй  $E_i$  энергитэй нейтрон цагираг дотор ионтой үйлчлэлцээд,  $Q$  импульс шилжүүлээд бага өнцгөөр сарниж,  $k_f$  импульстэй  $E_f$  энергитэй эцсийн төлөв төрхөө олно. Үйлийн эцэст эхний төлвийн  $k_i, E_i$  нь эцсийн  $k_f, E_f$  лүгээ тэнцүү байгаа бол харимхай сарнил (a), харин өөрчлөгдсөн байвал хаимхай бус сарнил (b) болно.

Ионуд торын зангилаа орчимд температураас хамаарсан эрч бүхий хэлбэлзэл үйлдэнэ. Торын хэмжээнд нийлэлдээд ирэхээрээ өвч нүргээн(фонон)-ий хэлбэлзэл үүсгэнэ. Нүргээн хэлбэлзэл нь гармоник хууль ёсоор салангад энергийн төвшинтэй. Бага энергит нейтрон талстаас сарнихдаа нүргээн лүгээ үйлчлэлцэж  $h\nu$  энерги бүхий квантыг нь шингээж бас цацруулна. Ихэнх талст биеийн фонон хэд хэдэн терагерц давтамж буюу харгалзан хэд хэдэн мэВ (~4.18 мэВ) энергийн завсарт багтана. Өлгөж бодвоос дулааны нейтрон сарнихад фононтой харилцсны улмаас энерги нь мөн мэВ жишиг цараанд өөрчлөгдөнө. Нейтроны энэхүү бага тун энергийг хэмжээд улмаар талстын нүргээн буюу фононы давтамжийг тодорхойлдог юм.

туйлшраагүй нейтроны талстын соронзон бүтэц дээрх сарнилын  $S(Q, \omega)$  магадлалыг хэлбэрт бичье:

$$S_M(Q) \cong C \cdot \sum_{G_M} F_M(G)^2 \cdot \delta(Q - G_M) \quad (5)$$

Энд талстын урвуу торын  $G_M$  вектороор нийлбэрлэнэ.  $C$  тогтмол коэффициент. Соронзон бүтцийн үржигдүүн:

$$F_M G = \sum_j f_j(Q) \cdot m_{i,j} \cdot e^{iG \cdot r_{i,j}} \quad (6)$$

Энд эгэл соронзон торын эрэмбэлэгдсэн моментоор нийлбэрлэнэ. Нейтроны сарнилын мэдээнээс атомын жишиг цараанд хатуу болон шингэн бодисын соронзон бүтэц хийгээд динамик шинжийг танин мэддэг байна. Өмнө дурьдсан харимхай болон харимхай бус сарнилын спектраль баримтаас спины бүтцийг нарийн тэмтэрч, соронзон цочролын спектр, фазын соронзон хувирлын торгон мэдээллийг гарган авдаг.

Нейтрон бодисын соронзон үйлчлэлцлийн потенциал:

$$V_{\mu r} = -\mu_n \cdot B(r) \quad (3)$$

Энд,  $B(r)$  электроны спин болон орбитын гүйдлийн түгэлтээр үүссэн соронзон орны вектор,  $\mu_n$  нь нейтроны соронзон момент бөгөөд соронзон орны вектор болон нейтроны спины чиглэлээс хамаарна:

$$\mu_n = -2 \cdot \gamma \cdot \mu_N \cdot S_n \quad (\gamma = 1.913) \quad (4)$$

$\mu_N$  нь цөмийн магнетон. Туйлширсан нейтроныг ашиглабал талстын соронзон орны янз бүрийн чиглэл дэх соронзон байгуулагчийг тэмтэрч тогтоох боломж бүрдэнэ. Диполийн ойролцоолд

Туршилтын нэн найдвартай цаашид хөгжих төхөөрөг бүтээгээд байна. Нейтрон цэнэггүй учраас нейтроноор бодисын гүн дэх бүтцийг эвдэлгүй судлах, төрх хувирлыг тэмтрэх боломж ийнхүү бүрдээд байна. Цөмийн төвшинд фермион-хадрон, барион, тэртээд нь кварк бүтэц, инагшлаад амьд болон амьгүй бодис юмсын бүтэц, бүрэлдэл хийгээд хувирлын зүй тогтлыг илт эвдэлж бэртээлгүйгээр тандан судлах туршилт болонолын найдвартай арга барил нейтроны өвөрмөц физик чанар, судалгааны үр дүнд суурилан ийнхүү бүрэлдэж байна.

Үүний шинэ чиглэлийг Geant4 програмын хүрээнд хөгжиж байгааг дээр дурссан.

Эцэст хэлэхэд Geant4 програмын хүрээнд нейтроны цацраг эмчилгээний арга зүй хадрон эмчилгээний нэг эрчимтэй чиглэл болон хөгжиж байна. Ганц жишээ дурьдахад, хорт хавдрын ахны хэмжээнийх нь 0.001 жишигт хүртэл багасгахын тулд нейтроны 7 грэй, харин фотоны 28 грэй тунг тус тус залгиулдаг байна. Эндээс үзэхүл, нейтроны хавдрын эсийг мөхөөх чадвар фотоныхоос 4 дахин үр нөлөөтэй байх ажээ.

### Б.Цэгнэхүй

Нейтрон бодис руу ороод сарниж бас цөмд бариулна. Нейтрон цөмийн хүчний үйлчлэлд ороод аяндаа шинэ цөм буюу цаашидзадрах зуурдын бүрэлдэл үүсгээд протон,  $\alpha$  - бөөм, нейтрон, бусад бөөмс,  $\gamma$  - туяа цацруулах урвалыг өгдөөнө. Тийм урвалын магадал нь тусч буй электроны энергээс гадна цөмийн шинж төрлөөс[8,9] хамаарна. Нейтроны эл сарнил, урвалын огтлолыг  $1 \text{ барн} = 10^{-28} [\text{м}^2]$  нэгжээр хэмжинэ.

### В.Цөм дэх сарнилын огтлол, урвалын хурдын нягт.

Нейтрон бодис руу тусч байгаа учраас чухам цөмөөс сарних огтлолыг хэрхэн тодорхойлодог тооцооны жортой танилцах хэрэгтэй[8]. Бай бодисын нягт  $\rho [\text{г}/\text{см}^3]$ , атомын жин нь  $M$  бол Авогадро хуулийг хувиргаж бай дахь цөмийн нягттай холбье:

$$N = \frac{\rho}{M} \cdot S \quad (7)$$

Урвалын  $R$  хурдыг байн тосгуур талбай  $S$ , зузаан  $x$ , цацраг дахь нейтроны хурд, нягт, болон бай дахь цөмийн нягт оролцсон дараах математик томъёогоор баримжаалдаг:

$$R \sim S \cdot x \cdot n \cdot v \cdot N \left[ \frac{\text{урвалууд}}{\text{секунд}} \right] \quad (8)$$

Энд  $V = S \cdot x$  болохыг анхаарч, шууд хамаарлын  $\sigma$  коэффициент оруулаад нэгж эзлэхүүнд явах урвалын хурдыг  $R$  тодорхойлбол:

$$R = \frac{R}{V} = n v N \cdot \sigma \cdot \left[ \frac{\text{урвалууд}}{\text{секунд}} \right] \quad (9)$$

Эл илэрхийллээс шууд хамаарлын коэффициентыг нэгжтэй нь тодорхойлбье:

$$\sigma = \frac{R}{n v N} \cdot \frac{\frac{\text{урвалууд}}{\text{м}^3 \cdot \text{сек}}}{\frac{\text{нейтрон}}{\text{м}^3} \cdot \frac{\text{м}}{\text{сек}} \cdot \frac{\text{цөм}}{\text{м}^3}} = \frac{R}{n v N} [\text{м}^2] \quad (10)$$

Энэхүү талбайн нэгж бүхий хэмжигдэхүүнийг байн нэг цөм цөмийн урвалыг илэрхийлэх магадал буюу огтлол хэмээнэ. Нэгж хугацаанд нэгж талбайгаар нэвтэрч буй бөөмийн тоог урсгалын нягт хэмээдэг учир

$$I = n \cdot v \frac{\text{нейтрон}}{\text{м}^3} \cdot \frac{\text{м}}{\text{сек}} = n \cdot v \left[ \frac{\text{нейтрон}}{\text{м}^2 \cdot \text{сек}} \right] \quad (11)$$

Сүүлчийн хоёр илэрхийллээс цөм дээрх урвалын огтлол:

$$\sigma = \frac{R}{I \cdot N} \cdot \frac{\frac{\text{урвалууд}}{\text{м}^3 \cdot \text{сек}}}{\frac{\text{нейтрон}}{\text{м}^2 \cdot \text{сек}} \cdot \frac{\text{цөм}}{\text{м}^3}} = \frac{R}{I N} [\text{м}^2] \quad (12)$$

томъёогоор илэрхийлэгдэх бөгөөд чухамдаа нейтроны нэгж урсгалаар нэгж эзлэхүүн дэх цөмд явах урвалын хурдын нягтыг тодорхойлж байгаа юм. Өгүүлснийг эргэн санавал: урвалын хурдын нягт:

$$R = I \cdot N \cdot \sigma \quad (13)$$

$R$  нягтыг олсноор урвалын огтлолын утга учрыг урсгалын нэгж эрчмээр нэгж эзлэхүүн дэх нэг цөмд үүсэх урвалын хурд мэтээр тайлбарлах боломжтой болсон юм. Цөмийн урвалын огтлол нь бага энергид цөмийн хэмжээнээс асар их байдаг. Харин нэн их энергитэй нейтроны огтлол цөмийн хэмжээ лүгээ жишихүйц болж ирнэ. Нейтроноор олон төрлийн урвал үүссэн бол тэдгээрийн огтлолуудынх нь нийлбэр бүтэн огтлол болно:

$$\sigma_{\text{б}} = \sigma_{\text{хс}} + \sigma_{\text{хб}} + \sigma_{\gamma} + \sigma_{\text{f}} + \sigma_{\text{p}} + \sigma_{\text{T}} + \sigma_{\alpha} = \sigma_{\text{хс}} + \sigma_{\text{хб}} + \sigma_{\text{хс}} + \sigma_{\text{ур}} \quad (14)$$

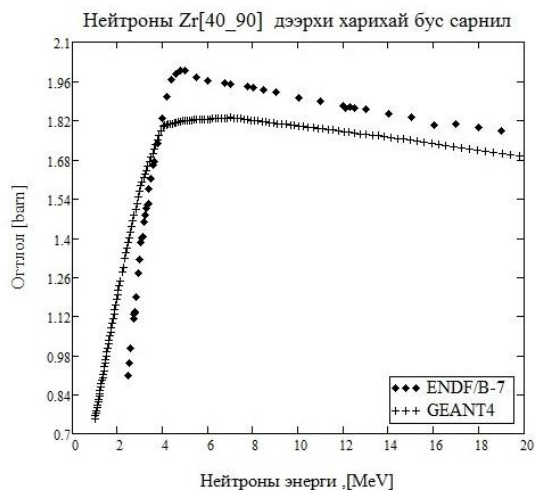
Гол урвал бол  $\sigma_{\text{хс}}$  нь харимхай сарнилын огтлол,  $\sigma_{\text{хб}}$  нь харимхай бус сарнилын огтлол,  $\sigma_{\text{f}}$  нь хуваагдлын огтлол,  $\sigma_{\text{p}}$   $n, p$  нь цацралт шингэлтийн огтлол,  $\sigma_{\text{T}}(n, p)$  нь цацралт шингэлтийн огтлол,  $\sigma_{\alpha}(n, \alpha)$  нь ацралт шингэлтийн огтлол.

### IV. ТООЦООНЫ ҮР ДҮН

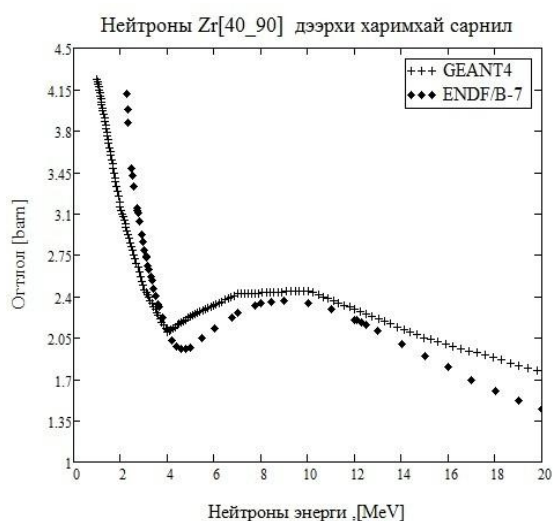
Geant4 багцыг хэрэглэн үйлдсэн анхны тооцооны зарим үр дүнг энд тавилаа. Geant4 багцын үйл ажиллагааны хүрээнд бодис цацраг, бөөмсийн харилцан үйлчлэлийн туршилтын сан, цахилгаан соронзон цагаг хийгээд хадрон, мезон, лептон зэрэг бөөмсийн бодистой харилцан

үйлчлэх хувирлын онорлын судалгааны олон дэд салбар бүхий цогц програм хангамжууд бий болжээ. Дэлхийн томоохон төвүүдэд онолын тооцоо болон туршилтын судалгааг зуун изотоп хийгээд олон төрлийн бодис дээр үйлдсэн байна. Бид үйлдсэн тооцооны үр дүнг туршилтын болон сан дахь шилмэл тооцооны үр дүнтэй харьцуулсан болно.

Судалгааны үр дүнд энэ удаа физик тайлал хийхийг урьдал болгож харин дүрслэлт тооцооны аргын хувьд шинжилгээний өнөөгийн төвшинд дөхөж хүрснээ толилуулахыг эрхэмлэв. Иймээс тооны үр дүнг дэлгэж үзүүлээ. Geant4 багцын тооцоолт төхөөргийг ашиглан үйлдсэн тооцооныхоо үр дүнг ENDF/B-7 буюу Америк, Канадын олон их сургууль, үндэсний лаборатор, үйлдвэрийн газрын хамтын чармайлтаар үйлдэж, бүрэлдүүлсэн “цөмийн тооцооны хуримтлал” сангаас баримтыг авсныг энд тэмдэглэе.



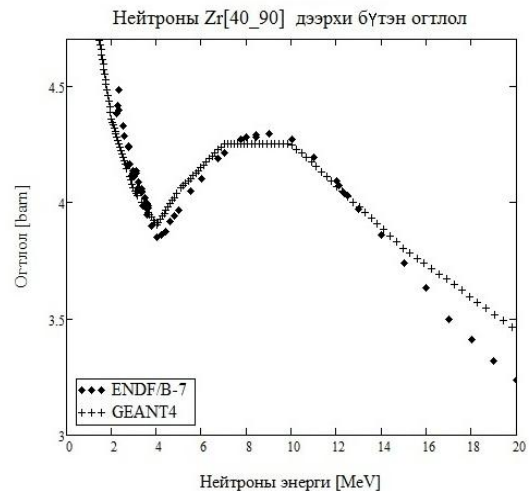
Зураг 2. Нейтроны циркон дээрх харимхай бус сарилын огтлол.



Зураг 3. Нейтроны циркон дээрх харимхай сарилын огтлол.

2-р зурагт тооцооны тоо үзүүлэлт ENDF/B-7 сангийн баримтаас бага зэрэг зөрж байгаа нь цаашид тооцооны нарийвчлалыг сайжруулах

шаардлагатайг анхааруулж буй. 3-р зураг нь тооцооны нарийвчлалыг бодолцвол Geant4 тооцоо ENDF/B-7 сангийн үр дүнтэй хангалттай таарч байгааг харуулж байна. Geant4 тооцоо ENDF/B-7 сангийн үр дүнтэй сайн таарч байгааг 4-р зурагт үзүүлэв.



Зураг 4. Циркон дээрх нейтроны сарилын бүтэн огтлол.

## ИШЛЭЛ

1. S. Incerty, Physics-Biology Frontier: The GEANT4 Project, Texas AM, 10-14, Jan. 2011.
2. Geant4.9.5 Physics Reference Manual Book
3. О.Лхагва М.Батмөнх П.Батзул Нүүрстөрөгчин нанобүтцийн онолын судалгаа Нанотехнологи Үндэсний хоёрдугаар симпозиум. Илтгэлийн эмхтгэл. Улаанбаатар 2011 он. Х.39.
4. М.Батмөнх О.Белов О.Лхагва П.Батзул Хурдан ион эс ДНХ лүгээ нанотүвшинд үйлчлэлцэхүйн тооцоо дүрслэл Нанотехнологи Үндэсний хоёрдугаар симпозиум. Илтгэлийн эмхтгэл. Улаанбаатар 2011 он. Х. 41.
5. Аксенова С.В., Белов О.В., Лхагва О. Моделирование пространственного распределения объемной энергии и поглощенной дозы излучения в структуре ДНК при действии ускоренных тяжелых ионов, Препринт ОИЯИ Р19-2011-45. Дубна. 2011. 8 с.
6. Аксенова С.В., Белов О.В., Лхагва О. Моделирование пространственного распределения объемной энергии поглощенной дозы излучения в структуре ДНК при действии ускоренных тяжелых ионов, Письма в ЭЧАЯ. 2012. Т.9. No 1(171). С. 161-168.
7. Аксенова С.В., Белов О.В., Лхагва О. Моделирование Modeling the mechanism

of DNA damage induction by accelerated heavy ions, The 39th COSPAR Scientific Assembly will be held at the Global Education Centre, 2 Infosys Training Centre Mysore, Karnataka India from 14 - 22 July 2012.

8. A. Boothroyd, Concepts of Neutron Scattering, Lectures, VI Summer School on Condense Matter Research, Zuoz, August, 2007
9. О. Лхагва, Хумхи ертөнцийн квант жам. Бүлэг VIII. х. 181. Улаанбаатар, 2011.

## **Simulation of Neutron Scattering Cross Section using the Geant4 code**

**O. Lkhagva<sup>1</sup>, M. Batmunkh<sup>2</sup>, P. Batzul<sup>1</sup>**

*<sup>1</sup>Department of Theoretical Physics, School of Physics and Electronics,  
National University of Mongolia, University Street -1, Ulaanbaatar-210646, Mongolia*

*<sup>2</sup>Laboratory of Radiation Biology, Joint Institute for Nuclear Research,  
Joliot-Curie 6, 141980 Dubna, Moscow region, Russia*

Last two years under the directions of International Geant4 program the complex computing tools, invented for investigation of interaction radiation and particles with material objects have been installed in PC and held scientific trainings in order to acquire an experience for carrying out research calculations. In this report some results of neutron- object interaction simulation, in dependence on incoming energy are presented. Our Geant4 simulation numbers are compared with numerical results from ENDF/B-7 nuclear data, created by US and Canada physicists.