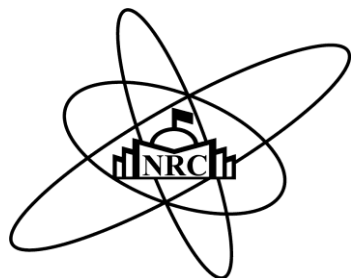


Улсын бүртгэлийн
дугаар

Нууцын зэрэглэл: Б

Аравтын бүрэн
ангиллын код



МОНГОЛ УЛСЫН ИХ СУРГУУЛЬ
ЦӨМИЙН ФИЗИКИЙН
СУДАЛГААНЫ ТӨВ

ЦӨМИЙН КЛАСТЕР БҮТЭЦ БА УРВАЛЫН СУДАЛГАА

Шинжлэх ухаан технологийн суурь судалгааны
төслийн тайлан
2019-2021

Төслийн удирдагч: М. Одсүрэн, доктор (Ph.D)
Санхүүжүүлэгч байгууллага: Шинжлэх ухаан технологийн сан
Захиалагч байгууллага: Боловсрол, шинжлэх ухааны яам

УЛААНБААТАР ХОТ
2022

Улсын бүртгэлийн
дугаар

Нууцын зэрэглэл: Б

АБА код

Төсөл хэрэгжүүлэх гэрээний
дугаар:

**МОНГОЛ УЛСЫН ИХ СУРГУУЛЬ
ЦӨМИЙН ФИЗИКИЙН СУДАЛГААНЫ ТӨВ**

**ЦӨМИЙН КЛАСТЕР
БҮТЭЦ БА УРВАЛЫН
СУДАЛГАА**

**Шинжлэх ухаан технологийн суурь судалгааны
төслийн тайлан
2019-2021 он**

Төслийн удирдагч: М. Одсүрэн, доктор (Ph.D)

Санхүүжүүлэгч байгууллага: БШУЯ, Шинжлэх ухаан технологийн сан

Захиалагч байгууллага: Боловсрол, шинжлэх ухааны яам

Гүйцэтгэгч байгууллага: Монгол улсын их сургууль,
Цөмийн физикийн судалгааны төв

Тайлан өмчлөгч: МУИС, Цөмийн физикийн судалгааны төв,
Улаанбаатар хот, 46а-ш/х305,
Их сургуулийн гудамж-1,
Утас: 456348, 99132035
Факс: 976-11-456348
E-mail: odsurenn@gmail.com

Улаанбаатар хот
2022

ГҮЙЦЭТГЭГЧДИЙН НЭРСИЙН ЖАГСААЛТ

№	Үндсэн гүйцэтгэгчид	Харьяалах байгууллага	Эрдмийн зэрэг	Цол
1	Г.Хүүхэнхүү	МУИС, Цөмийн физикийн судалгааны төв	Доктор (Ph.D)	Проф.
2	С.Даваа	Цөмийн энергийн комисс	Доктор (Ph.D)	Проф.
3	М.Одсүрэн	МУИС, ХШУИС	Доктор (Ph.D)	
4	Д.Баатархүү	МУИС, Цөмийн физикийн судалгааны төв	Доктор (Ph.D)	
5	Ж.Мөнхсайхан	МУИС, Цөмийн физикийн судалгааны төв	Магистр	
6	Ч.Сайханбаяр	МУИС, Цөмийн физикийн судалгааны төв	Магистр	
7	Ж.Батмягмар	МУИС, Цөмийн физикийн судалгааны төв	Магистрант	
8	Н.Батцоож	МУИС, Цөмийн физикийн судалгааны төв	Магистрант	
9	Т.Мөнх-эрдэнэ	МУИС, Цөмийн физикийн судалгааны төв	Магистрант	
10	Б.Өсөхбаяр	МУИС, Цөмийн физикийн судалгааны төв	Магистр	
11	А.Золбаяр	МУИС, Цөмийн физикийн судалгааны төв	Магистрант	

№	Гэрээт гүйцэтгэгчид	Харьяалах байгууллага	Эрдмийн зэрэг	Цол
1	Б.Эрдэмчимэг	Цөмийн шинжилгээний нэгдсэн институт, Дубна	Докторант	
2	Э.Сансарбаяр	Цөмийн шинжилгээний нэгдсэн институт, Дубна	Докторант	

**2019-2021 ОНД ХЭРЭГЖСЭН “ЦӨМИЙН КЛАСТЕР БҮТЭЦ БА
УРВАЛЫН СУДАЛГАА” СЭДЭВТ СУУРЬ СУДАЛГААНЫ ТӨСЛИЙН
САНХҮҮЖИЛТИЙН ТАЙЛАН**

Огноо	Санхүүжилтийн задаргаа /мян.төгрөг/				Нийт дүн /мян.төг/
	Гэрээт ажилтнуудын ажлын хөлс	Эрдэм шинжилгээний зардал	Томилолт	Хяналтын зардал /1%/	
2019	950.0	7,505.0	950.0	95.0	9,500.0
2020	-	-	-	-	-
2021	3,000.0	24,145.0	3,050.0	305.0	35,500.0
Бүгд	3,950.0	31,650.0	4,000.0	400.0	40,000.0
Төлөвлөлт	950.0	34,650.0	4,000.0	400.0	40,000.0
Зөрүү	+3,000.0	-3,000.0	-	-	0

ТОВЧИЛСОН ҮГСИЙН ЖАГСААЛТ

АНУ – Америкийн Нэгдсэн Улс

БНХАУ – Бүгд Найрамдах Хятад Ард Улс

БНСУ – Бүгд Найрамдах Солонгос Улс

ИБР – Импульсный Быстрый *Реактор*

КОМБАС – Комплекс Быстродействующего Анализатора-Спектрометра

МУИС – Монгол Улсын Их Сургууль

ОУАЭА – Олон Улсын Атомын Энергийн Агентлаг

ОХУ – Оросын Холбооны Улс

ЦШНИ – Цөмийн Шинжилгээний Нэгдсэн Институт

ЦФСТ – Цөмийн Физикийн Судалгааны Төв

ШУТС – Шинжлэх Ухаан Технологийн Сан

ADC – *Analog-to-Digital Converter*

BROND – Biblioteka Rekomendovannykh Ocenennykh Nejtronnykh Dannykh

CENDL – Chinese Evaluated Nuclear Data Library

CNRAC – Conservation & Natural Resources Advisory Council

EAF – European Activation File

ENDF – Evaluated Nuclear Data File

EXFOR – Experimental Nuclear Reaction Data

FENDL – Fusion Evaluated Nuclear Data Library

IAEA-TECDOC – International Atomic Energy Agency-Technical Document

JEFF – Joint Evaluated Fission and Fusion File

JENDL – Japanese Evaluated Nuclear Data Library

KKNN – Kanada, Kaneko, Nagata, Nomoto

NN – Nucleon-Nucleon

PRECO – Pre-Equilibrium Code with Direct Reactions

ROSFOND – *Russian* evaluated neutron data library

TENDL – TALYS-based Evaluated Nuclear Data Library

РЕФЕРАТ

1. НОМ ЗҮЙН ТОДОРХОЙЛОЛТ

Тайлангийн нэр: “ЦӨМИЙН КЛАСТЕР БҮТЭЦ БА УРВАЛЫН СУДАЛГАА” суурь судалгааны төсөл

Хуудасны тоо: 91

Зураг: 51

Хүснэгт: 16

Хавсралт: 4

Тайланг бичсэн газар: Цөмийн Физикийн Судалгааны Төв, МУИС

Он: 2019-2021

Тайлан өмчлөгчийн нэр: Цөмийн Физикийн Судалгааны Төв, МУИС

2. БИЧВЭР

2.1. Оршил

Бид 1990-ээд оны эхнээс Дубна хот дахь олон улсын ЦШНИ-ийн Нейтрон физикийн лаборатори болон Бээжин их сургуулийн Хүнд ионы физикийн институтийн мэргэжилтнүүдтэй хамтран өндөр үзүүлэлттэй багаж төхөөрөмж зохион бүтээж, орчин цагийн дэвшилтэт аргазүйг боловсруулснаар цөмийн урвалын туршлагын судалгааг дэлхийд тэргүүлэх байр сууринаас гүйцэтгэх боломжийг бүрдүүлсэн.

Мөн цөмийн бүтэц ба урвалын онолын дөхөлт, загваруудыг өргөжүүлэн хөгжүүлж, шинэ томъёонуудыг гаргаж, тооцоо судалгаандаа хэрэглэдэг боллоо. Ийнхүү цөмийн бүтэц, урвалын талаар дэлхийн түвшний, орчин үеийн онол, туршлага хосолсон цогц судалгаа явуулах боломжтой болсон юм.

Энэ бүрдүүлсэн материаллаг бааз, аргазүйдээ тулгуурлан ОХУ-ын Дубна хот дахь ЦШНИ ба БНХАУ-ын Бээжин их сургуульд байдаг өндөр үзүүлэлттэй суурь төхөөрөмж-хурдасгуурууд дээр хамтарсан туршилт тавин нейтроны үйлчлэлээр цэнэгт бөөмс үүсэн гарах урвалын талаар шинэ мэдээлэл гарган авах, манай улсад байгаа цорын ганц суурь төхөөрөмж-микротрон МТ-22 хурдасгуурыг ашиглан цөмийн фото-урвалын судалгаа явуулах, гаргасан томъёонуудаа ашиглан дэлхийн судалгааны төвүүдээс түгээгдэж буй нейтрон болон гамма-квантаар явагдах урвалын талаарх мэдээлэл, өгөгдлүүд, альфа-задралд ордог изотопуудын өгөгдлүүдийг эмхэтгэн системлэж, анализ хийх, тэдгээрт зүй тогтол хайх, ажиглагдсан зүй тогтлуудад онолын тайлбар өгөх, цөмийн бүтэц, урвал, задралыг кластер бүтэцтэй холбон тайлбарлах, цөмийн кластер загварын хүрээнд цөмийн урвалын компаунд ба шууд механизмын харьцуулсан судалгаа хийх зэрэг чиглэлүүдээр нилээд өргөн агуулгатай суурь судалгааны

ажлыг энэхүү төслийн хүрээнд БСШУСЯ-ны захиалгаар, ШУТС-гийн санхүүжилттэйгээр 2019-2021 онуудад гүйцэтгэж, гарган авсан үр дүнгийн талаар тус тайланд өгүүлнэ.

2.2. Зорилго

Энэхүү төслөөр орчин үеийн дэвшилтэт тэргүүний аргазүйд тулгуурлан цөмийн кластер бүтэц, цөмийн задрал, урвалын механизмын талаар онол туршлага хосолсон суурь судалгаа явуулж, шинжлэх ухаан-танин мэдэхүйн ач холбогдолтой шинэ мэдээлэл гарган авч, шинэ мэдлэгийг буй болгох зорилго тавьсан. Уг төслийн хүрээнд хэрэгжүүлэхээр дараах зорилтуудыг дэвшүүлсэн. Үүнд:

- Цөмийн альфа-задрал болон нейтроноор бөмбөгдөх үед цөмөөс альфа-бөөм үүсч гарах урвалын үед альфа-кластер бүрэлдэх үзэгдлийг онолын үүднээс судлах;
- Хурдан нейтроны үйлчлэлээр цөмөөс альфа-бөөм үүсэн гарах урвалыг орчин үеийн онолын загваруудыг ашиглан тайлбарлах;
- Дубна хот дахь олон улсын Цөмийн шинжилгээний нэгдсэн институт (ЦШНИ) болон Бээжин их сургуулийн өндөр үзүүлэлттэй хурдасгуурууд дээр цөмийн урвалын туршлагын судалгаа явуулж, шинэ өгөгдлүүдийг гарган авах;
- Цөмийн эрчим хүчний болон судалгааны реактор, халуун цөмийн урвалын ТОКАМАК зэрэг төхөөрөмжид нейтроны үйлчлэлээр гелийн хий хуримтлагдаж, эвдрэлд хүргэхээс урьдчилан сэргийлэх тооцоонд ашиглагдах мэдээлэл гарган авах;
- Анагаах ухаан, уул уурхайн үйлдвэрлэл, цацраг идэвхт ашигт малтмалын хайгуул, олборлолт, боловсруулалт болон хүрээлэн буй орчны судалгаа, хяналтанд цөмийн физикийн аргыг нэвтрүүлэхэд хэрэгтэй өгөгдлүүдийг гарган авах;
- Дэлхийн судалгааны төвүүдээс гаргаж буй цөмийн мэдээлэл, өгөгдлүүдийг эмхэтгэн сан бүрдүүлж, тэдгээрт системчилсэн анализ хийж, ажиглагдаж буй зүй тогтлуудад онолын тайлбар өгөх.

2.3. Шаардлага, үндэслэл

- Монгол улсын урт хугацааны хөгжлийн бодлого “*Алсын хараа-2050*”-д 2041-2050 онд ураны их хэмжээний нөөцөө ашиглан хамгийн найдвартай, аюулгүй технологиор боловсруулалтын түвшинг нэмэгдүүлж, цахилгаан эрчим хүч үйлдвэрлэж, экспортлох гэж цөмийн эрчим хүчийг ашиглаж эхлэхтэй холбоотой заалт оржээ. Мөн, Монгол Улсын Засгийн Газраас 2015 оны 9-р сарын 14-нд баталсан “*Шинжлэх ухаан, технологийг хөгжүүлэх тэргүүлэх чиглэл, цөм технологийн жагсаалт (2015-2021 он)*”-д хүрээлэн буй орчны асуудал болон сэргээгдэх эх үүсвэртэй эрчим хүчний технологи, эрдэс баялгийн хайгуул, олборлолт, боловсруулалтын технологи, нанотехнологи зэрэг чиглэлүүд оржээ. Бидний дэвшүүлж буй цөмийн физикийн суурь судалгааны төсөл нь УИХ-ын болон ЗГ-ын дээрх тогтоол, шийдвэрүүдийн холбогдох заалтуудыг хэрэгжүүлэхэд чиглэгдсэн, *улс орны тулгамдсан хэрэгцээт шаардлагад бүрэн нийцсэн* гэж үзэх үндэслэлтэй.
- **Аргазүйн шаардлага.** Хурдан нейтроноор явагдах урвалын туршлагын судалгаа нь хэдийгээр танин мэдэхүйн болоод практик хэрэглээний чухал ач холбогдолтой боловч аргазүйн хүндрэл бэрхшээлээс болоод дэлхий дахинаа маш хангалтгүй байв. Энэ нь, нэг

талаас, хурдан нейтроны эрчимтэй үүсгүүр зохион бүтээхэд төвөгтэй байдгаас болоод дэлхийн судалгааны төвүүдэд тийм үүсгүүр ховор байдагтай холбоотой. Нөгөө талаас, бөөмийг бүртгэх багаж, детекторт хурдан нейтроны үйлчлэлээр эвдрэл үүсч, шинж чанар, үзүүлэлт нь мууддаг. Иймээс ихэвчлэн идэвхжүүлэх анализын аргыг ашиглаж ирсэн байна. Гэтэл энэ аргаар хэт богино буюу хэт урт настай изотопыг судлах боломжгүй. Түүнээс гадна нилээд олон цөмийн хувьд хурдан нейтроны үйлчлэлээр цацраг идэвхт изотоп үүсэхгүй тохиолдол байдаг. Эдгээр нөхцлийн үед хурдан нейтроны үйлчлэлээр үүссэн бөөмийг шууд бүртгэх аргыг ашиглах зайлшгүй шаардлага гардаг. Энэ шаардлагыг хангасан өндөр үзүүлэлттэй багаж төхөөрөмжийг бид зохион бүтээсэн.

- **Онолын шаардлага.** Цөм нь микро-ертөнц учраас түүний шинж чанарыг квант онолоор тайлбарлах ёстой. Гэтэл квант онолоор олон бөөмөөс тогтсон цөм шиг системийн төлвийг нарийн бичиглэх боломж зарчмын хувьд бэрхшээлтэй. Нөгөө талаас, цөмийн урвалын ерөнхий нэгдсэн онол одоогоор бүрэн боловсрогдоогүй байна. Үүнээс гадна орчин үеийн цөмийн онол нь хэт хийсвэр болж, туршлагын физикчид, хэрэглэгчид ойлгож ашиглахад улам бэрх болох хандлага ажиглагдаж байна. Эдгээрээс болоод цөмийн бүтэц ба урвалыг тодорхой түвшинд тайлбарлаж чадах онолын хялбар аргагүй орчин үед зүй ёсоор шаардагдаж байна. Бид статистик физик ба квант механикийн аргыг ашиглаад цөмийн бүтэц ба урвалын туршлагын судалгааны зарим үр дүнг тайлбарлахад чиглэсэн онолын аргагүй боловсруулан хэрэглэж зохих амжилтанд хүрч байна.
- **Манай улсын хэрэгцээ, шаардлага.** Цөмийн судалгаа явуулдаг, цөмийн цацрагийг хэрэглэдэг ихэнх улсууд цөмийн мэдээллийн үндэсний сан бүрдүүлж, тэндээсээ хэрэглэгчидээ мэдээлэл түгээж, хангаж байдаг. Манай оронд цөмийн физикийн аргыг хэрэглэдэг, энэ чиглэлээр судалгаа явуулдаг байгууллага, хүмүүс нилээд байдаг бөгөөд цаашид цацраг идэвхт ашигт малтмал, уран олборлож, боловсруулах, цөмийн цацрагийг анагаах ухааны эмчилгээ, оношилгоо болон үйлдвэр хөдөө аж ахуйн салбаруудад ашиглахтай холбогдон нилээд өргөжих хандлагатай байна. Гэвч цөмийн мэдээллийн үндэсний сан, түүнийг хариуцсан албан ёсны байгууллага, хүмүүс байхгүй учир энэ талын мэдээллээр гачигдах, эсвэл асар олон мэдээллээс хэрхэн яаж үнэн зөвийг нь сонгож авах нь ойлгомжгүй байх, заримдаа хэрэгцээтэй мэдээллээ гадаадаас өндөр үнэ төлж авах зэрэг бэрхшээл тулгарч байна. Иймээс эх орондоо цөмийн мэдээллийн “үндэсний сан” бүрдүүлж, хэрэглэгчид үйлчлэх, судалгаа, сургалт, үйлдвэрлэлд нэвтрүүлэх шаардлага зүй ёсоор гарч байна. Энэ ажлыг бид хэрэгжүүлж эхэлж байгаа юм.
- **Цөмийн эрчим хүчний технологийн шаардлага.** Өнөөгийн байдлаар дэлхий дээр 32 оронд 440 гаруй цөмийн эрчим хүчний реактор ажиллаж, үйлдвэрлэгдэж буй нийт эрчим хүчний 10 гаруй хувийг гаргаж байна. Эдгээр реакторын дийлэнх олонхи нь дулааны нейтроноор хуваагдаж, гинжин урвалд ордог ^{235}U изотопыг голомтондоо түлш болгон ашигладаг. Гэтэл ^{235}U нь байгалийн ураны нөөцийн дөнгөж 0.7%-ийг эзэлдэг бөгөөд үлдсэн 99.3% болох ^{238}U нь дулааны нейтрон гэж нэрлэгдэх удаан нейтроноор хуваагддаггүй, гинжин урвалд оролцож энерги ялгаруулдаггүй тул хаягдал болж иржээ. Хэрэв хурдан нейтроноор ажилладаг реакторыг ашиглавал ^{238}U -ыг түлш болгох боломжтой. Ингэснээр эрчим хүчний зорилгоор ураны ашиглалт дээшилж, цацраг идэвхт ураны хаягдал эрс буурах боломжтой. Уран ашиглан эрчим хүч гаргах технологи орчин үед дэлхий дахинаа ерөнхийдөө үүнд

чиглэгдэж байна. Энэ чиглэлийн ажил дэлхий даяар эхлэл төдий бөгөөд судалгааны түвшинд байгаа юм. Иймээс хурдан нейтроны үйлчлэлээр явагдах цөмийн урвалын онолын ба туршлагын судалгааг өндөр түвшинд гүйцэтгэх, ялангуяа цөмийн эрчим хүчний төхөөрөмжийн эд ангийн найрлагад ордог бодисуудын хувьд юуны түрүүнд хийх шаардлага тулгарч байна. Хүн төрөлхтний эрчим хүчний ирээдүйн гол эх үүсвэр болох халуун цөмийн урвалуудаас их эрчимтэй хурдан нейтонууд үүсэн гардаг. Энд ашиглагдах төхөөрөмжийн бат бөх чанарыг тодорхойлоход ч хурдан нейтроны урвалын нарийвчилсан судалгаа чухал шаардлагатай болж байна.

- **Цөмийн үнэн зөв мэдээлэл, шинэ өгөгдлүүдийн шаардлага.** Дээр дурьдсанчлан аргазүйн бэрхшээлээс болоод хурдан нейтроноор явагдах урвалын туршлагын мэдээлэл ховор бөгөөд байгаа цөөвөр өгөгдлүүд нь хоорондоо ихээхэн зөрүүтэй байдгаас болоод практикт тэдгээрийг ашиглахад хүндрэл ихээхэн гардаг. Гэтэл энэ талын үнэн зөв мэдээллийн эрэлт хэрэгцээ шинжлэх ухаан технологи хөгжихийн хирээр сүүлийн жилүүдэд улам бүр өсөн нэмэгдэж байна. Бидэнд өөрсдийн зохион бүтээсэн багаж төхөөрөмж, боловсруулсан аргазүйдээ тулгуурлан цөмийн мэдээллийн энэ гачигдлыг тодорхой хэмжээгээр нөхөх боломж бүрдсэн юм.
- **Дэлхий дахинаа гарч буй цөмийн мэдээлэл, өгөгдлүүдийг эмхэтгэн цэгцлэх шаардлага.** Дэлхийн судалгааны лаборатори, төвүүдээс гарч буй цөмийн бүтэц ба урвалын тухай асар их мэдээллүүдээс үнэн зөвийг нь олж ашиглах, мэдээлэл өгөгдөл нь байхгүй цөмүүдийн хувьд ойролцоогоор тооцоолсон өгөгдөл гаргаж авах, үүний тулд байгаа мэдээллүүдийг эмхэлж цэгцлэн зүй тогтол хайж тогтоох шаардлага зүй ёсоор гарч байна. Энэ чиглэлийн ажлыг бид сүүлийн жилүүдэд нилээд эрчимтэй явуулж багагүй туршлага хуримтлуулсан. Эдгээр шаардлага, үндэслэлүүдтэй уялдуулан бид энэ ажлыг гүйцэтгэсэн юм.

2.4.Төслийн ач холбогдол

Эдийн засгийн ач холбогдол:

Бидний дэвшүүлж, хэрэгжүүлсэн төсөл нь цөмийн бүтэц ба урвалын талаар хийгдэх суурь судалгаа учраас шууд хэрэглэгдэн эдийн засгийн үр ашиг өгөхөд тодорхой хугацаа шаардагдана. Гэвч бидний үр дүнг хэрэглэснээр хүлэмжийн хий бараг ялгаруулдаггүй, харьцангуй цэвэр цөмийн эрчим хүчний төхөөрөмж, реакторын эд ангид гелийн хий хуримтлагдаж эвдрэл үүсгэх хугацааг урьдчилан тооцоолох боломж дээшилнэ. Улмаар ирээдүйд халуун цөмийн урвалыг ашиглах үед гелийн хий төхөөрөмжийн бүтээцийн материалд үүсч хуримтлагдах хэмжээг урьдчилан тооцоолох боломж ихээхэн сайжирна. Ашигт малтмалыг хайх, олборлох, боловсруулах, хүрээлэн буй орчны бохирдлыг цөмийн аргаар судлах, хянах, анагаах ухааны зориулалттай богино наст, цацраг идэвхт изотоп гарган авах зэрэгт ашиглагдах шинэ мэдээлэл буй болно.

Нийгмийн ач холбогдол:

- Уг төслийг гүйцэтгэх явцад оюутан, магистрант, докторантууд болон залуу судлаачдыг оролцуулж, дагалдуулан сургаж, мэргэшүүлэх замаар энэ талын үндэсний мэргэжилтэн бэлтгэх ажилд бид өөрсдийн хувь нэмрээ оруулна.

- Олон улсын цөмийн мэдээллийн санд өөрсдийн мэдээллийг оруулах, тэндээс өөрт хэрэгтэй мэдээллийг татаж авах, тэдгээр мэдээллийг эмхэлж цэгцлэн анализ хийх, онолын тооцоо боловсруулалтыг компьютерийн сүлжээ, серверийн тусламжтайгаар гүйцэтгэх зэрэг аргаар залуу мэргэжилтнүүдийг сургаж, орчин үеийн мэдээллийн технологийг ашиглах, нэвтрүүлж нутагшуулахад идэвхтэй оролцоно.
- Утаа болон хүлэмжийн хийн ялгаралтыг эрс бууруулах боломжтой цөмийн эрчим хүчийг ашиглах бэлтгэл ажлын хүрээнд хийгдэх энэхүү төсөл нь хүн амын амьдрах эрүүл цэвэр орчныг буй болгох зорилтыг хэрэгжүүлэхэд чухал хувь нэмэр болно.

Шинэжлэх ухааны ач холбогдол:

- Цөмийн урвалын механизмууд, цөмийн бүтцийн онолын загварууд, ялангуяа цөмийн кластер бүтцийн талаар шинэ мэдээлэл, мэдлэг буй болно.
- Од нарны төв дэх халуун цөмийн урвал, тэнд гелийн хий шатах процесс, ертөнцөд химийн элементүүд үүсч хуримтлагдах талаар цөмийн астрофизикийн тооцоонд хэрэгтэй шинэ мэдээлэл гарган авна.

2.5. Туршилтын ажил

Энэхүү төслийг дараах өндөр үзүүлэлт бүхий багаж, төхөөрөмж, судалгааны баазад тулгуурлан гүйцэтгэв:

Дотоодын лаборатори бааз:

- Цөмийн физикийн судалгааны төвийн Микротрон МТ-22 электроны цикл хурдасгуурын лаборатори.
- Цөмийн физикийн судалгааны төвийн цэвэр германий детектор бүхий гамма-спектрометрийн лаборатори.
- Компьютер, тооцооллын програмууд, интернет сүлжээ, номын сан.

Гадаадын туршилтын бааз:

- Дубна хот дахь ЦШНИ-ийн Нейтрон физикийн лабораторийн Ван-де-Граафын ЭГ-5 хурдасгуур.
- Дубна хот дахь ЦШНИ-ийн Нейтрон физикийн лабораторид бидний шууд оролцоотой зохион бүтээгдсэн өндөр үзүүлэлттэй альфа-спектрометр.
- Бээжин их сургуулийн Хүнд ионы физикийн институтын Ван-де-Граафын хурдасгуур.
- Дубна хот дахь ЦШНИ-д бидний зохион бүтээж, Бээжин их сургуулийн Хүнд ионы физикийн институтид аваачиж ажилд оруулсан ионжилтын 3 төрлийн камер бүхий иж бүрэн автомат спектрометр зэргийг ашиглав.

2.6. Үр дүн, шинэлэг тал

Хурдан нейтроноор явагдах цөмийн урвалын өгөгдлийн сан

ОУАЭА-ийн EXFOR санд байгаа EXFOR форматтай маш олон тооны өгөгдлүүдийг цаашид ашиглахад эвтэй хялбар байдлаар ангилан ялгах, боловсруулалт хийх, хадгалах

программын эхний хувилбарыг R хэлний орчинд боловсруулав. Боловсруулсан программынхаа тусламжтайгаар EXFOR форматтай цөмийн урвалын 22579 файл буюу 22579 удаагийн туршилтын өгөгдлүүдийг ангилан, нейтроноор явагдсан 58482, гамма-квантаар явагдсан 6484, хөнгөн цөмөөр явагдсан 66344, хүнд ионоор явагдсан 11844 урвалын файл болон одоогоор бүрэн ангилагдаагүй 14448 файл үүсгэн МУИС-ийн ЦФСТ-ийн сервер компьютерт хадгалав.

Нейтронноор явагдах урвалын огтлолын утгуудад хийсэн системчилсэн анализ

Цөмийн бүтэц, урвал, механизмыг танин мэдэхэд чухал ач холбогдолтой хурдан нейтроноор явагдах урвалын огтлолын утгуудад системчилсэн анализ хийв. Үүнд:

- Статистик загварын хүрээнд хурдан нейтроноор явагдах $(n,2n)$ урвалын огтлолын онолын томъёоны гаргалгаа хийв. Мөн, статистик бус механизмын нөлөөллийг тооцсон $(n,2n)$ урвалын огтлолын томъёог гаргав. Гарган авсан томъёоны тусламжтай 14-15 МэВ энергийн муж дахь $(n,2n)$ урвалын огтлолын туршлагын өгөгдлүүдэд систематик анализ хийв. Үр дүнгээс харахад статистик бус механизмын нөлөөг тооцсон томъёоны муруй нь туршлагын өгөгдлүүдийн ерөнхий зүй тогтолтой таарч байна.
- Статистик загварын хүрээнд хурдан нейтроноор явагдах (n,t) урвалын огтлолд систематик анализ хийх хялбар томъёоны гаргалгааг хийв. Гарган авсан томъёогоо ашиглан 14-15 МэВ энергитэй нейтроноор явагдах (n,t) урвалын огтлолд систематик анализ хийв. Бэсрэг болон хүнд масстай цөмүүдийн хувьд онолын шулуунтай дагуу тархсан буюу таарч байна. Харин огтлолын абсолют утга нь туршлагын утгаас бага зэрэг их гарсан нь тритоны кластер бүрэлдэх эффекттэй холбоотой байх магадлалтай.
- Цөмийн урвалын компаунд механизмд үндэслэсэн статистик загварын хүрээнд хурдан нейтроноор явагдах $(n,^3\text{He})$ урвалын огтлолын томъёог гаргав. Хурдан нейтроноор явагдах $(n,^3\text{He})$ 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.

Альфа-задралд ордог изотопуудын системчилсэн анализ

Гейгер-Нэттолын хуулийг квант механикийн Гамовын онолыг ашиглан гаргав. 450 гаруй байгалийн болон зохиомол альфа-задралд ордог изотопуудын өгөгдлүүдэд Гейгер-Нэттолын хуулийг ашиглан анализ хийв. Систематик анализаас харахад хагас задралын үе ба альфа бөөмийн энергиэс хамаарсан 5 бүл үүссэн байна. U, Pu ба Cm тэгш-тэгш цөмүүдийн хувьд хагас задралын үе болон нэгийг хуваах нь язгуур доор E_{α} (МэВ) хамаарал Гейгер-Нэттолын хуулийн дагуу яг шугаман хамааралтай байна. Гейгер-Нэттолын хуулийн дагуу масс тоо өсөж байна. Po, Ra ба Th зэрэг зарим тэгш-тэгш цөмийн хувьд Гейгер-Нэттолын хуулийн дагуу масс тоо өсөж буй зүй тогтол эвдэгдэж байна. Энэ шалтгаан нь цөмийн бүрхүүлэн загвараар тайлбарлагдав.

Нейтронор явагдах цөмийн урвалын туршлагын судалгаа

Бээжин их сургуулийн Хүнд ионы физикийн институтийн болон Цөмийн шинжилгээний нэгдсэн институтын Нейтрон физикийн лабораторийн Ван де Граафын хурдасгуур дээр бор-10, никель-58, 60, 61, хлор-35 зэрэг изотопууд дээр хурдан нейтронор явагдах (n, α) урвалын туршлагын судалгаа явуулж, нейтроны энергийн 3.3-5.3 МэВ мужид тухайн изотопуудын (n, α) урвалын огтлолыг тодорхойлов. Хэмжилтийн үр дүнгээ дэлхийн судалгааны төвүүдийн үнэлгээ, бусад судлаачдын туршлагын үр дүн болон TALYS кодыг ашиглан тооцоолсон үр дүнтэй харьцуулсан анализ хийж, зохих дүгнэлт гаргав.

Нил спектртэй гамма-цацрагаар явагдах цөмийн урвалын туршлагын судалгаа

Тасралтгүй спектртэй саатлын гамма-цацрагаар өдөөгдсөн $^{196m,g}\text{Au}$ цөмийн изомер харьцааг Микротрон-хурдасгуур дээр туршилт тавин тодорхойлж, бусад судлаачдын үр дүнтэй харьцуулав. Бидний үр дүн $^{196m,g}\text{Au}$ -ийн изомер харьцааны саатлын гамма цацрагийн энергийн ерөнхий хамаарал буюу хандлагатай сайн тохирч байна.

Цөмийн кластер загварын хүрээнд цөмийн урвалын компаунд ба шууд механизмын харьцуулсан судалгаа

Цөмийн урвалын компаунд болон шууд механизмд нейтроны үйлчлэлээр цөмд хөнгөн кластер бүрэлдэх магадлалын тооцох томъёоны гаргалгааг (n, α), (n, ^3He), (n,t) урвалуудад тус тус хийв. Гаргасан томъёогоо ашиглан компаунд болон шууд механизмд нейтроны үйлчлэлээр α , ^3He , t-кластер бүрэлдэх магадлалуудыг (n, α), (n, ^3He), (n,t) урвал тус бүрд нь тодорхойлов.

2.7. Дүгнэлт

Тус төслийн хүрээнд орчин үеийн дэвшилтэт тэргүүний аргазүйд тулгуурлан цөмийн кластер бүтэц, цөмийн задрал, урвалын механизмын талаар онол туршлага хосолсон суурь судалгаа явуулж, шинжлэх ухаан-танин мэдэхүйн ач холбогдолтой дээр дурьдсан үр дүнгүүдийг гарган авлаа.

Төслийн хүрээнд гарган авсан үр дүнгүүдээр олон улсын болон гадаадын мэргэжлийн сэтгүүлд-9, дотоодын мэргэжлийн сэтгүүлд-10, олон улсын хурлын илтгэлүүдийн эмхэтгэлд-12 бүтээл хэвлүүлээд байна. Мөн магистрын дипломын ажил-2, бакалаврын дипломын ажил-2-ыг тус тус хэвлүүллээ. Төслөөр нийт 35 бүтээл хэвлүүлэв.

2.8. Түлхүүр үг

Цөмийн бүтэц, цөмийн задрал, цөмийн урвал, нейтрон, компаунд механизм, статистик загвар, нил спектр, саатлын гамма цацраг, хурдасгуур, ионжилтын камер, альфа-бөөм, альфа-задрал, кластержилт, урвалын огтлол, систематик анализ.

**“ЦӨМИЙН КЛАСТЕР БҮТЭЦ БА УРВАЛЫН СУДАЛГАА” сэдэвт суурь судалгааны
төслийн тайлангийн агуулга**

ГҮЙЦЭТГЭГЧИД	1
САНХҮҮЖИЛТ	2
ТОВЧИЛСОН ҮГСИЙН ЖАГСААЛТ	3
РЕФЕРАТ	5
ГАРЧИГ	12
ОРШИЛ	14
I БҮЛЭГ. ХУРДАН НЕЙТРОНООР ЯВАГДАХ ЦӨМИЙН УРВАЛЫН ӨГӨГДЛИЙН САН	15
1.1. Удиртгал	15
1.2. Олон улсын EXFOR сангийн өгөгдлүүдийг ангилах арга зүй	16
1.3. Олон улсын цөмийн өгөгдлийн санг нутагшуулж буй зарим үр дүн, хэрэглээний жишээ	17
1.4. Дүгнэлт	19
II БҮЛЭГ. НЕЙТРОНООР ЯВАГДАХ УРВАЛЫН ОГТЛОЛЫН УТГУУДАД ХИЙСЭН СИСТЕМЧИЛСЭН АНАЛИЗ	21
2.1. Удиртгал	21
2.2. (n,2n) урвалын огтлолын системчилсэн анализ	22
2.2.1. (n,2n) урвалын статистик загвар	22
2.2.2. (n,2n) урвалын огтлолын системчилсэн анализын үр дүн	24
2.2.3. Дүгнэлт	26
2.3. (n,t) урвалын огтлолын системчилсэн анализ	26
2.3.1. (n,t) урвалын статистик загвар	27
2.3.2. (n,t) урвалын огтлолын системчилсэн анализын үр дүн	28
2.3.3. Дүгнэлт	30
2.4. (n, ³ He) урвалын огтлолын системчилсэн анализ	30
2.4.1. (n, ³ He) урвалын статистик загвар	31
2.4.2. (n, ³ He) урвалын огтлолын системчилсэн анализын үр дүн	34
2.4.3. Дүгнэлт	35
2.5. Дүгнэлт	35
III БҮЛЭГ. АЛЬФА-ЗАДРАЛД ОРДОГ ИЗОТОПУУДЫН СИСТЕМЧИЛСЭН АНАЛИЗ	38
3.1. Удиртгал	38
3.2. Альфа-задралын онолын үндэс ба Гейгер-Нэттолын хууль	38
3.3. Альфа-задралд ордог изотопуудын системчилсэн анализ	41
3.4. Дүгнэлт	44
IV БҮЛЭГ. НЕЙТРОНООР ЯВАГДАХ ЦӨМИЙН УРВАЛЫН ТУРШЛАГЫН СУДАЛГАА	45
4.1. Удиртгал	45
4.2. Туршлагын судалгааны аргазүй	45
4.2.1. Нейтроны үүсгүүр ба тоолуур	45

4.2.2.	(n, α) урвалаас үүсэн гарч буй α -бөөмийн бүртгэгч	47
4.2.3.	$^{10}\text{B}(n,\alpha)^7\text{Li}$ ба $^{10}\text{B}(n,t\alpha)$ урвалын туршлагын үр дүн	50
4.2.4.	$^{58,60,61}\text{Ni}(n,\alpha)^{55,57,58}\text{Fe}$ урвалуудын туршлагын үр дүн	53
4.2.5.	$^{35}\text{Cl}(n,\alpha)^{32}\text{P}$ урвалын туршлагын үр дүн	56
4.3.	Дүгнэлт	59
V БҮЛЭГ. НИЛ СПЕКТРТЭЙ ГАММА-ЦАЦРАГААР ЯВАГДАХ ЦӨМИЙН УРВАЛЫН ТУРШЛАГЫН СУДАЛГАА		61
5.1.	Удиртгал	61
5.2.	Изомер харьцааг судлах онолын үндэс	63
5.3.	Нил спекртэй гамма цацрагаар алтны цөмийн изомер төлвийг өдөөх туршлагын аргазүй	64
5.4.	$^{196m,g}\text{Au}$ – ийн изомер харьцааг тодорхойлсон туршлагын үр дүн	67
5.5.	Дүгнэлт	69
VI БҮЛЭГ. ЦӨМИЙН КЛАСТЕР ЗАГВАРЫН ХҮРЭЭНД ЦӨМИЙН УРВАЛЫН КОМПАУНД БА ШУУД МЕХАНИЗМЫН ХАРЬЦУУЛСАН СУДАЛГАА		70
6.1.	Удиртгал	70
6.2.	(n, α) урвал дахь дөрвөн нуклоны кластержилт	71
6.2.1.	Удаан нейтроноор явагдах (n, α) урвал дахь α -кластержилт (статик загвар)	73
6.2.2.	Бэсрэг нейтроноор явагдах (n, α) урвал дахь α -кластержилт	74
6.2.3.	Хурдан нейтроноор явагдах (n, α) урвал дахь α -кластержилт	74
6.2.4.	Дүгнэлт	77
6.3.	(n, ^3He) урвал дахь гурван нуклоны кластержилт	77
6.3.1.	Компаунд механизм ба ^3He -кластер үүсэх магадлал	77
6.3.2.	Шууд механизм ба ^3He -кластер үүсэх магадлал	79
6.3.3.	Дүгнэлт	80
6.4.	(n,t) урвал дахь гурван нуклоны кластержилт	80
6.4.1.	Статистик загвар ба t-кластержилт	80
6.4.2.	Кноск-он загвар ба t-кластержилт	83
6.4.3.	Дүгнэлт	84
6.5.	Дүгнэлт	84
ЕРӨНХИЙ ДҮГНЭЛТ		86
ХЭВЛҮҮЛСЭН БҮТЭЭЛИЙН ЖАГСААЛТ		87
ХАВСРАЛТ		91

ОРШИЛ

Энэхүү төслийн хүрээнд Монгол улсын урт хугацааны хөгжлийн бодлого “Алсын хараа-2050”, Шинжлэх ухаан, технологийг хөгжүүлэх тэргүүлэх чиглэл, цөм технологи (2015-2021) зэрэг манай улсын шинжлэх ухаан технологийн талаар баримталж буй нэгдсэн бодлогын дагуу, ашигт малтмалын олборлолтыг боловсронгуй болгох, хүн амын эрүүл мэндийн үйлчилгээг сайжруулах, цөмийн эрчим хүчийг ашиглах бэлтгэл ажлыг хангах, үйлдвэр аж ахуйн чухал салбаруудад дэвшилтэт технологийг нэвтрүүлэх зэрэг зорилтуудыг хэрэгжүүлэхэд чиглэсэн цөмийн бүтэц, цөмийн задрал, сарнил, урвалын механизмын талаар суурь судалгааны ажлыг онол, туршлага хосолсон орчин үеийн арга зүйг ашиглан явуулав.

Бид МУИС-ийн ЦФСТ-ийн материаллаг бааз, багаж төхөөрөмжийг ашиглахын зэрэгцээ гадаад харилцаагаа өргөжүүлэн хөгжүүлж, Дубна хот дахь ЦШНИ-ийн Нейтрон физикийн лаборатори, Цөмийн урвалын лаборатори болон Бээжин их сургуулийн Хүнд ионы физикийн институтийн эрдэмтэдтэй хамтран ажиллаж, тэндхийн өндөр үзүүлэлттэй суурь төхөөрөмжүүд дээр хэмжилтийн нарийн багаж, спектрометрүүдийг зохион бүтээж, тэдгээрийн тусламжтайгаар туршилт, судалгаа явуулснаар цөмийн бүтэц, урвалын талаар дэлхийн түвшний, орчин үеийн цогц судалгаа явуулах боломжийг бүрдүүллээ.

Буй болгосон материаллаг бааз, онол-арга зүйн чадавхидаа тулгуурлан цөмийн дотоод бүтэц, цөмийн задрал, сарнил, урвалын механизмын тухай тулгуур шинэ мэдээлэл гарган авч, төрөл бүрийн сорьц, дээжин дэх химийн элементийн агуулгыг цөмийн физикийн аргаар тодорхойлох, анагаах ухааны салбарт аливаа өвчнийг оношлох, хавдрыг эмчлэх, дүрслэл оношлогоо хийхэд өргөн ашиглагддаг цацраг идэвхт изотопыг бага чадлын төхөөрөмж дээр гарган авах боломжийг судлах, цөмийн эрчим хүчний төхөөрөмжийн эд ангид нейтроны үйлчлэлээр гелийн хий үүсч, хуримтлагдан эвдрэлд хүргэх аюулыг урьдчилан тооцоолох зэрэгт шаардлагатай цөмийн өгөгдлүүдийг тодорхойлсон тухай энэхүү тайланд өгүүлэх болно.

I БҮЛЭГ. ХУРДАН НЕЙТРОНООР ЯВАГДАХ ЦӨМИЙН УРВАЛЫН ӨГӨГДЛИЙН САН

1.1. Удиртгал

Англиар “data”, Оросоор “данные” гэдгийг бид Монгол хэлнээ “өгөгдөл” гэж орчуулан хэрэглэж нэгэнт хэвшжээ. Өгөгдөл нь байгаль, нийгэм дэх аливаа үзэгдэл юмсын тухай тоо баримт бөгөөд мөн чанараараа зөвхөн “түүхий эд” юм. Энэ түүхий эдэд боловсруулалт хийснээр ашигтай мэдээлэл болдог. 2016 онд IBM компанийн гаргасан судалгаагаар хүн төрөлхтний нийт өгөгдлийн 90 % нь сүүлийн хоёрхон жилд буй болсон гэжээ. Орчин үед бараг хүн бүр контент бүтээгч болж, интернет, нийгмийн сүлжээгээр асар их өгөгдөл, мэдээлэл дэлхий даяар хил хязгааргүй тархаж, хүн төрөлхтөн өгөгдөл, мэдээллийн ёроолгүй далайд живж байна. Өнгөцхөндөө энэ байдал нь хүний нийгмийн цаашдын хөгжил ирээдүйд сөрөг нөлөөтэй ч юм шиг харагдаж мэднэ. Гэвч “хорин нэгдүгээр зууны газрын тос” гэж нэрлэж болох өгөгдлүүдийг эмхэтгэн ангилж, боловсруулалт хийснээр хувь хүмүүс, аливаа байгууллага, улс гүрэн хүртэл өөрт ашигтайгаар хэрэглэх мэдээллээ гарган авах боломжтой болж байна. Орчин үед аливаа байгууллагын менежмент, томоохон шийдвэрүүдийг өгөгдөлд тургуурлан гаргадаг өгөгдлийн шинжээч, өгөгдлийн инженер, өгөгдлийн менежер зэрэг мэргэжилтнүүд буй боллоо. Үүгээр ч зогсохгүй, уламжлалт тоо баримтаар удаан хугацааны турш хүний хийдэг байсан ажлуудыг өнөөгийн өндөр хүчин чадалтай компьютер, хиймэл оюуны алгоритм, мэдээллийн технологийг ашиглан богино хугацаанд гүйцэтгэж, асар олон өгөгдлөөс хувь хүний олж ашиглах боломжгүй цоо шинэ зүй тогтлуудыг нээн илрүүлдэг өгөгдөлзүй буюу өгөгдлийн шинжлэх ухаан хурдацтай хөгжиж байна. Орчин үеийн физикийн шинжлэх ухаанд, ялангуяа цөмийн физикт өгөгдлийн ач холбогдол маш чухал болж байна. Англиар “nuclear data”, Оросоор “ядерные данные” гэдгийг бид “цөмийн өгөгдөлзүй” гэж орчуулан хэрэглэж хэвшиж байна.

Цөмийн энергийн түвшин, түвшний өргөн, спин, тэгшлиг, түвшин хоорондын зай, цөмийн задралын энерги, хагас задралын үе буюу нас, цөмийн урвалын интеграл ба дифференциал огтлол, урвалаас үүсэх бөөмийн гаралт, энергийн ба өнцгөн түгэлт зэрэг маш олон тоо баримтуудыг цөмийн өгөгдөл гэнэ. Эдгээрийг 1896 онд цөмийн цацраг, 1911 онд атомын цөм, 1919 онд цөмийн урвал нээгдсэнээс хойш 100 гаруй жилийн турш дэлхийн судалгааны лаборатори, төвүүдийн үйл ажиллагааны үр дүнд гаргасан байдаг. Энэ олон өгөгдлүүд нь хоорондоо ихээхэн зөрүүтэй байдаг тул яг өөрт хэрэгтэй үнэн бодитойг нь хаанаас хэрхэн олж авах вэ гэдэг асуулт зүй ёсоор тавигдана. Цөмийн өгөгдлийг хэрэглэгчийн үйл ажиллагааг хөнгөвчлөхөд 1957 онд байгуулагдсан Олон улсын атомын энергийн агентлаг (ОУАЭА) маш чухал үүрэг гүйцэтгэсэн. ОУАЭА-аас дэлхий дахинаа гарч буй цөмийн өгөгдлүүдийг эмхэтгэн нэгдсэн сан бүрдүүлж, гишүүн орнууддаа үнэ төлбөргүй ашиглах боломж олгодог. 1973 онд Монгол Улс ОУАЭА-ийн гишүүн болсноор эндээс цөмийн өгөгдлүүдийг чөлөөтэй ашиглах боломж нээгдсэн. EXFOR санд одоогийн байдлаар нейтрон, протон, хүнд, хөнгөн ионуудаар явагдсан урвалуудаас гадна гамма-квантаар явагдах цөмийн фото урвалтай холбоотой дэлхийн олон орны судалгааны төвүүдэд хийгдсэн 20000 гаруй удаагийн туршилтаар хэмжиж хуримтлуулсан үнэт мэдээллүүд хадгалагддаг. Үүнд, 100 гаруй төрлийн элементийн 1000

гаруй изотоп дээр 400 гаруй төрлийн бөөмөөр явагдсан, 2700 орчим төрлийн цөмийн урвалтай холбогдох огтлол, дифференциал огтлол, хуваагдлын бүтээгдэхүүний гаралт гэх мэт 27 төрлийн хэмжигдэхүүний мэдээлэл агуулагддаг.

Цөмийн физикийн судалгаа үүссэнээс хойших 100 гаруй жилийн хугацаанд цөмийн бүтэц, урвалын талаар маш олон өгөгдөл, мэдээлэл хуримтлагджээ. Дэлхийн судалгааны лабораториудад янз бүрийн аргаар гарган авсан өгөгдлүүд хоорондоо ихээхэн зөрөх явдал элбэг байдаг. Иймээс, энэ олон өгөгдлүүдээс өөрт хэрэгтэйг олж авах, аль нь үнэн зөв болохыг тогтоох нь хэрэглэгчид ихээхэн төвөг учруулдаг. Цөмийн эрчим хүч, цөмийн технологийг ашиглаж буй ихэнх орнууд өөрсдийн цөмийн өгөгдлийн сантай байдаг бөгөөд тэндээсээ хэрэглэгчдээ найдвартай мэдээллээр хангаж байдаг. Манай улсад цөмийн цацраг, технологийг анагаах ухаан, геологи хайгуул, уул уурхайн үйлдвэрлэл зэрэгт нэвтрүүлэхтэй холбоотойгоор цөмийн өгөгдөл, мэдээллийг хэрэглэгчдийн тоо, эрэлт хэрэгцээ улам өсч байна. Гэвч манайд цөмийн өгөгдөл, мэдээллийн нэгдсэн сан байхгүй учир мэдээллээр гачигдаж, үнэн зөв мэдээлэл олж авахад бэрхшээл учирч байна. Үнэн зөв мэдээллийн эрэлт хэрэгцээ шинжлэх ухаан технологи хөгжихийн хэрээр сүүлийн жилүүдэд улам бүр өсөн нэмэгдэж байна. Бидэнд өөрсдийн зохион бүтээсэн багаж төхөөрөмж, боловсруулсан аргазүйдээ тулгуурлан цөмийн мэдээллийн энэ гачигдлыг тодорхой хэмжээгээр нөхөх боломж бүрдсэн юм.

“Цөмийн кластер бүтэц ба урвалын судалгаа” (2019-2021) суурь судалгааны төслийн зорилтод тусгагдсан (*Хурдан нейтроноор явагдах цөмийн урвалын өгөгдлийн сан бүрдүүлэх ажлыг үргэлжлүүлэх*) ажлын хүрээнд нейтроноор явагдах урвалуудын EXFOR форматтай, их хэмжээний өгөгдлийг ангилан эмхэтгэж ашиглахад хялбар өгөгдлийн санг бүрдүүлэх зорилго тавив.

1.2. Олон улсын EXFOR сангийн өгөгдлүүдийг ангилах арга зүй

EXFOR форматтай өгөгдөл (entry) нь дотроо тухайн туршилттай холбоотой тоон болон чанарын бүх л мэдээллүүдийг нэг буюу олон тооны дэд мэдээллүүд (subentry)-эд хуваан агуулсан байдаг. Тухайлбал, туршилтыг явуулсан судалгааны байгууллага, судлаачийн нэр, огноо, судалгааны арга зүй, хэрэглэгдсэн детектор, бай цөм болон сум бөөм, түүний энерги, туршилтаар хэмжигдсэн урвалын төрөл, огтлол, физик нэгж, алдаа, нийтлэгдсэн хэвлэл, сэтгүүл гэх мэт цогц мэдээллүүд нь өөр өөрсдийн түлхүүр тэмдэгтийн тусламжтайгаар танигдахаар хадгалагдсан байдаг. Жишээ болгож, 1.1-р зурагт ${}^6\text{Li}$ цөм дээр нейтрон тусаад тритон болон альфа бөөм гарах урвалын огтлол хэмжсэн туршилтын тухай мэдээллийг харуулав. Бид EXFOR форматтай, цөмийн урвалын өгөгдлийн 22579 файл буюу 22579 удаагийн туршилтаас хуримтлагдсан мэдээллийг цуглуулсан. Эдгээр өгөгдлийг ангилан төрөлжүүлэх, форматыг хялбаршуулж хадгалахын тулд эхлээд программчлалын R хэлний “exforParser package”-ийг ашиглан уншина. Үүний дараа сум бөөмийг таних түлхүүр тэмдэгт болон өөрсдийн зохиосон хялбар алгоритм бүхий программаар өгөгдлийг боловсруулан ангилж төрөлжүүлсэн өгөгдлийг санах байгууламжид хадгална. EXFOR форматад таних түлхүүр тэмдэгт нь сум бөөм бүрийн хувьд давтагдахгүй ялгаатай байна. Жишээлбэл, нейтроны түлхүүр тэмдэгт нь “N” байх ба түүгээр явагдсан урвалын мэдээллийг ялгахын тулд бүх өгөгдлийг уншиж буй циклд `if(reac_info$projectile == “N00)` гэсэн нөхцөл тавина. Бусад

төрлийн сум бөөмүүдийн хувьд дейтон бол “D”, тритон бол “T”, альфа бол “A”, протон бол “P”, ^3He бол “HE3”, гамма бол “G” гэж, харин сум цөмүүдийн хувьд ^5He -ийг “2-HE-5” гэж тэмдэглэж буйтай төстэйгээр түлхүүр тэмдэгтийг бичиж таних боломжтой.

ENTRY	11008	820106	20050926	0000	
SUBENT	11008001	820106	20050926	0000	
BIB	6	8			
INSTITUTE	(1USANMU)				Туришилт явагдсан байгууллага
REFERENCE	(J,BAP,4,218(AB6),59)				Нийтлэгдсэн өгүүллийн эшлэл
AUTHOR	(B.PARDO,J.ROBERTS)				Өгүүллийн зохиогч(ид)
TITLE	PROPERTIES OF THE 7.46 MEV STATE OF LI7.				Өгүүллийн нэр
STATUS	(SCSRS)				
HISTORY	(760628T) TRANSLATED FROM SCISRS (800606U) CONVERTED TO REACTION FORMALISM (820106A) CONVERTED TO REACTION FORMALISM				
ENDBIB	8				
NOCOMMON	0	0			
ENDSUBENT	11				
SUBENT	11008002	820106	20050926	0000	
BIB	3	3			
REACTION	(3-LI-6(N,T)2-HE-4,,SIG)				Туришлтаар судалсан цөмийн урвал
DETECTOR	(TRD) NUCLEAR EMULSIONS				Туришлтад хэрэглэгдсэн детекторын тухай мэдээлэл
ANALYSIS	INTEGRATED ANGULAR DISTRIBUTION.				
ENDBIB	3				
NOCOMMON	0	0			
DATA	3	1			
EN	DATA	DATA-ERR			
MEV	B	B			Туришлтаар хэмжигдсэн огтлолын тухай мэдээллүүд
2.70	-01 3.7	+00 4.			
ENDDATA	3				
ENDSUBENT	11				
ENDENTRY	2				

Зураг 1.1. $^6\text{Li}(n,t)^4\text{He}$ урвалын EXFOR форматтай өгөгдөл.

1.3. Олон улсын цөмийн өгөгдлийн санг нутагшуулж буй зарим үр дүн, хэрэглээний жишээ

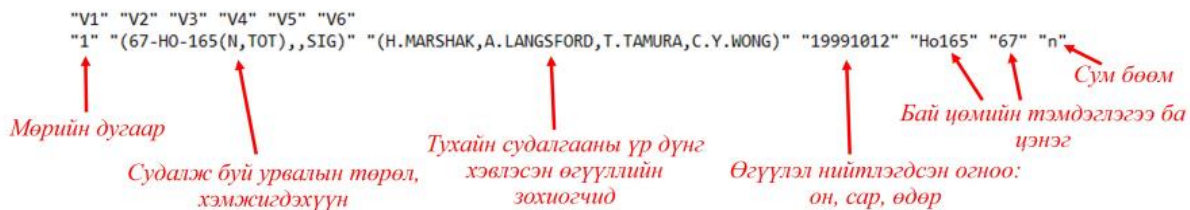
EXFOR форматтай, их хэмжээний өгөгдлийг анхан шатны боловсруулалтад оруулж тус тусдаа файл хэлбэрээр хадгалснаар дараагийн шатанд тухайн нэг урвалын хувьд нарийвчилсан судалгаа хийх бүрт их хэмжээний эх өгөгдөлтэй харьцах шаардлагагүй болно. Эх өгөгдлийг нейтроноор явагдсан урвал, гамма квантаар явагдсан урвал, протоноос ^{17}C хүртэлх хөнгөн цөмүүдээр явагдсан урвал болон бусад хүнд цөмүүдээр явагдсан урвал гэсэн 4 бүлэгт оруулж, туршилт бүрийн мэдээллийг тухайн урвал бүрээр нь тус тусдаа файлд хадгалав. 22579 өгөгдлийг ангилан ялгахад гаммагаар явагдсан урвалын 6484, нейтроноор явагдсан урвалын 58482, хөнгөн цөмөөр явагдсан урвалын 66344, хүнд цөмөөр явагдсан урвалын 11844 файл болон урвал нь одоогоор бүрэн ялгагдаагүй 14448 файл үүсэв. Бүрэн ялгагдаагүй эдгээр

урвалын мэдээлэл нь олон урвалын комбинацтай тул ялгахад одоогоор хүндрэлтэй байна. Ангилалт хийж, гаргаж авсан өгөгдлийн жишээ болгож нейтроноор болон гамма квантаар явагдсан урвалуудын мэдээллийг 1.2-1.5-р зурагт үзүүлээ.

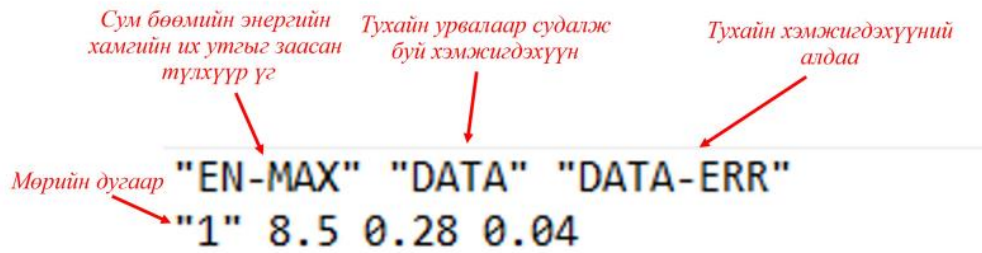
Тухайн урвалаар судалж буй хэмжигдэхүүн

<i>Энергийг заасан түүхүүр үг</i>	<i>Мөрийн дугаар</i>	<i>Тухайн хэмжигдэхүүний статистик алдаа</i>
"EN"	"DATA"	"ERR-S"
"1"	1.063	7020 660
"2"	1.161	6870 300
"3"	1.258	6720 170
"4"	1.356	6770 110
"5"	1.454	6650 80
"6"	1.553	6810 70
"7"	1.652	6880 60
"8"	1.751	6830 60
"9"	1.85	6820 60
"10"	1.95	6750 50
"11"	2.049	6720 50
"12"	2.15	6810 50
"13"	2.25	6640 50
"14"	2.35	6670 50
"15"	2.449	6740 50
"16"	2.55	6510 50
"17"	2.65	6550 50
"18"	2.75	6480 60
"19"	2.849	6410 60
"20"	2.95	6460 60
"21"	3.097	6290 30
"22"	3.297	6250 30
"23"	3.498	6110 30
"24"	3.698	6030 30
"25"	3.899	5850 30
"26"	4.098	5860 40

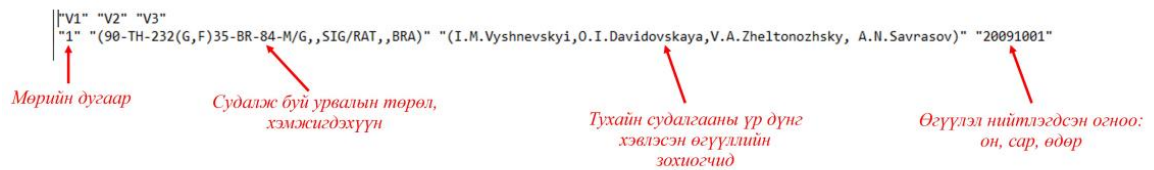
Зураг 1.2. Нейтроноор явагдсан урвалын өгөгдлийн жишээ.



Зураг 1.3. 1.2-р зурагт үзүүлсэн өгөгдлийн дагалдах нэмэлт мэдээлэл.



Зураг 1.4. Гамма-квантаар явагдсан урвалын өгөгдлийн жишээ.



Зураг 1.5. 1.4-р зурагт үзүүлсэн өгөгдлийн дагалдах нэмэлт мэдээлэл.

Анхан шатны боловсруулалт хийж, ашиглахад хялбар болгон ЦФСТ-ийн сервер компьютерт хадгалсан цөмийн урвалын өгөгдөл нь сонирхсон судлаач, хэн бүхэнд нээлттэй бөгөөд ЦФСТ-ийн Захиргаа болон Цөмийн өгөгдөлзүйн салбарт хүсэлт гаргаж, серверийн линукс систем дээр хэрэглэгчийн аккаунт авч төвийн дотоод сүлжээнээс хандан ашиглах бүрэн боломжтой.

1.4. Дүгнэлт

1. ОУАЭА-ийн EXFOR санд байгаа EXFOR форматтай маш олон тооны өгөгдлүүдийг цаашид ашиглахад эвтэй хялбар байдлаар ангилан ялгах, боловсруулалт хийх, хадгалах программын эхний хувилбарыг R хэлний орчинд боловсруулав. Боловсруулсан программынхаа тусламжтайгаар EXFOR форматтай цөмийн урвалын 22579 файл буюу 22579 удаагийн туршилтын өгөгдлүүдийг ангилан, нейтроноор явагдсан 58482, гамма-квантаар явагдсан 6484, хөнгөн цөмөөр явагдсан 66344, хүнд ионоор явагдсан 11844 урвалын файл болон одоогоор бүрэн ангилагдаагүй 14448 файл үүсгэн МУИС-ийн ЦФСТ-ийн сервер компьютерт хадгалав. Буй болсон өгөгдлийн сангаа цаашид хэрхэн ашиглахын жишээ болгож, $(n, \alpha), (n, p), (n, t), (n, 2n)$ болон (γ, n) урвалын огтлолын утгуудад системчилсэн анализ хийсний зарим үр дүнг харуулав.
2. Цаашид боловсруулсан программа улам төгөлдөржүүлж, одоогоор ялгагдаагүй өгөгдлүүдийг ангилж, ангилсан өгөгдлүүддээ цөмийн урвалын загвар, механизмуудад үндэслэн, бай-цөмийн болон сум-бөөмийн шинж чанараас хамааруулан өргөн хэмжээний судалгаа боловсруулалтын ажлыг гүйцэтгэхээр төлөвлөж байна.

Энэхүү бүлэгт хийгдсэн ажлуудыг төслийн үр дүнгийн даалгаврын 1-р даалгавар (*Хурдан нейтроноор явагдах цөмийн урвалын өгөгдлийн сан бүрдүүлэх ажлыг үргэлжлүүлэх*)-т тусгагдсан ажлын хүрээнд гүйцэтгэв.

Тус ажлын хүрээнд хэвлүүлсэн бүтээл:

1. А.Төрсүх, М.Одсүрэн, Г.Хүүхэнхүү, Ж.Мөнхсайхан, Ч.Сайханбаяр, Н.Батцоож
Цөмийн урвалын өгөгдлийн сан нутагшуулж буй ажлын эхний зарим үр дүн.
МУИС-ийн Эрдэм Шинжилгээний Бичиг: **ФИЗИК**, 2020, №31 (536), х.167-172.

II БҮЛЭГ. НЕЙТРОНООР ЯВАГДАХ УРВАЛЫН ОГТЛОЛЫН УТГУУДАД ХИЙСЭН СИСТЕМЧИЛСЭН АНАЛИЗ

2.1. Удиртгал

Цөмийн бүтэц, шинж чанарыг судлах, цөмийн цацраг болон цөмийн эрчим хүчийг ашиглахын тулд зайлшгүй цөмийн урвалыг явуулах шаардлага гардаг. Цөмийн урвалыг явуулахын тулд бай-цөмийг сум-бөөмөөр бөмбөгддөг. Цөмийн урвалыг тусч буй сум-бөөмөөс нь хамааруулан:

1. Цэнэгтэй хөнгөн бөөмсөөр явагдах,
2. Хүнд ионоор явагдах,
3. Гамма-квантаар явагдах,
4. Нейтроноор явагдах урвал гэх мэт ангилдаг.

Сум-бөөм олон янз байж болох боловч тэдгээрийн дотор нейтрон онцгой байр эзэлдэг. Нейтрон цахилгаан цэнэггүй учир цөмд дөхөж очиход Кулоны потенциал саад байхгүйгээс гадна протоны хамт хүчтэй харилцан үйлчлэлд ордог. Иймээс нейтрон нь цөмийн урвалыг маш эрчимтэй явуулдаг. Урвал явагдах эрчим нь нейтроныхоо энергиэс хамаардаг. Урвал явуулах нейтроныг энергиэр нь гурав ангилж болно:

1. Удаан нейтрон ($E < 1$ кэВ),
2. Бэсрэг энергитэй нейтрон (1 кэВ $< E < 1$ МэВ),
3. Хурдан нейтрон ($E > 1$ МэВ).

Энэ бүлэгт хурдан нейтроноор явагдах $(n,2n)$, (n,t) ба $(n,^3\text{He})$ урвалын огтлолын утгуудад хийсэн системчилсэн анализын үр дүнгээс танилцуулна.

1932 онд Английн эрдэмтэн Дж.Чэдвик нейтроныг нээснээр цөмийн урвал, бүтцийн судалгаа маш хурдацтай хөгжиж чанарын шинэ түвшинд гарсан. Цөмийн урвалыг тодорхойлдог гол физик хэмжигдэхүүн бол урвалыг огтлол юм. Урвалын огтлол нь математикийн хувьд бөөм цөм хоёрын мөргөлдөх магадлалаар тодорхойлогдох бөгөөд физик утгаараа тэдгээрийн харилцан үйлчлэлийн эффектив талбай гэж үзэж болно.

Цөмийн урвалын онолын загваруудыг ашиглан нейтроноор явагдах урвалын огтлолын туршлагын утгуудыг бай-цөмийн тодорхой параметруудээс хамааруулан судалж ерөнхий зүй тогтол хайхыг огтлолын систематик анализ гэдэг. Ийм судалгаа нь эргээд цөмийн бүтэц шинж чанарын талаар тулгуур мэдээлэл гарган авах, онолын загваруудыг шалгах, туршлагаар хэмжигдээгүй болон хэмжих боломжгүй цөмүүдийн урвалын огтлолын утгыг ойролцоогоор үнэлэх боломжийг олгодог онол ба практикийн ач холбогдолтой. Энэ төрлийн судалгааг 1956 оны үеэс ЗХУ-ын эрдэмтэн В.Н.Левковский анх (n,p) , (n,α) урвалын огтлолд систематик анализ хийж, шинэ зүй тогтлыг тодорхойлж байсан бол манай улсын хувьд анх 1990-ээд оноос МУИС-ийн Цөмийн Физикийн Судалгааны Төвд системчилсэн анализын судалгааг эхлэн явуулж урвалуудад тодорхой үр дүнгүүдийг гарган аваад байна. “Цөмийн кластер бүтэц ба урвалын судалгаа” (2019-2021) суурь судалгааны төслийн зорилтод тусгагдсан *(Нейтронноор явагдах урвалын огтлолын утгуудад системчилсэн анализ хийж, зүй тогтол хайх, ажиглагдсан зүй тогтлыг цөмийн бүтэц ба урвалын орчин үеийн загвар, механизмуудад тулгуурлан тайлбарлах, Ажиглагдсан зүй тогтлыг цөмийн бүтэц ба урвалын орчин үеийн загвар,*

механизмуудад тулгуурлан тайлбарлах;) ажлуудын хүрээнд хурдан нейтроноор явагдах (n,2n), (n,t) ба (n,³He) урвалын огтлолын утгуудад цөмийн урвалын компаунд механизмын хүрээнд боловсруулсан статистик загварын томъёог ашиглан систематик анализ хийж, зүй тогтол илрүүлэх зорилго тавин ажиллав.

2.2. (n,2n) урвалын огтлолын системчилсэн анализ

(n,2n) урвалын огтлолын өгөгдлүүдийн тусламжтайгаар цөмийн загваруудыг ойлгох, сайжруулах боломжтойгоос гадна цөмийн реакторын технологийн хэрэглээнд чухал мэдээлэл өгдөг. Реакторын голомт дахь ураны хуваагдлаас гарч буй нейтроны энергийн түгэлтийг харвал реакторын бүтээцийн материалуудын (n,2n) урвалын босго энергийг давсан тодорхой мужууд ажиглагддаг. Реакторын аюулгүй ажиллагаа, цацрагийн хамгаалалтын тооцоо, нейтрон үржих тооцоолол зэрэгт эдгээр урвалын нөлөөллийг заавалчгүй тооцох шаардлагатай. Зөвхөн үүгээр зогсохгүй (n,2n) урвалын огтлолын хэрэглээ анагаахын салбарт ч ашиглагддаг. Үүний нэг тод жишээ гэвэл бидний мэдэх цөмийн оношлогоонд өргөн ашиглагддаг ^{99m}Tc изотопын эх цөм болох ⁹⁹Mo изотопыг сүүлийн жилүүдэд ¹⁰⁰Mo(n,2n)⁹⁹Mo урвалаар гарган авах боломжийн судалгаанууд өргөн хийгдэж байна.

Бид энэ ажлаар статистик загварын хүрээнд (n,2n) урвалын огтлолын онолын томъёоны гаргалгаа хийв. Мөн гарган авсан томъёоны тусламжтайгаар 14-15 МэВ энергитэй нейтроноор явагдах (n,2n) урвалын огтлолын өгөгдлүүдэд анализ хийж систематик зүй тогтол хайв.

2.2.1. (n,2n) урвалын статистик загвар

Цөмийн урвалын нэгдсэн ерөнхий онолыг бүрэн төгс боловсруулахад учрах бэрхшээлүүдээс үүдэн цөмийн урвалыг тайлбарлахын тулд онолын янз бүрийн загвар буюу ойролцооллыг хэрэглэх болдог. Энэ зорилгоор юун түрүүнд цөмийн урвалын механизм гэдэг ойлголтыг авч хэрэглэдэг. Урвалын механизм гэж тухайн урвал хэрхэн яаж явагдаж байгааг хялбарчилсан үе шатуудаар төлөөлүүлэн авч үзэхийг хэлнэ. Урвалын механизмын тухай онолын олон янзын хувилбарууд байдаг бөгөөд ерөнхийд нь тэдгээрийг 3 ангилж болно:

1. Компаунд цөм үүсэх урвал
2. Хагас шууд урвал
3. Шууд урвал

Тодорхой нэг механизмын хүрээнд онолын тооцоо хийхэд түүнд тохирсон цөмийн урвалын загварыг ашигладаг. Н.Борын үндэслэсэн компаунд механизм болон түүний хүрээнд боловсрогдсон цөмийн урвалын статистик загварыг ашиглан хурдан нейтроноор явагдах (n,x) урвалын огтлолын томъёог Г.Хүүхэнхүү нар дараах байдлаар тодорхойлсон:

$$\sigma(n, x) = \sigma_c(n) \frac{2S_x + 1}{2S_n + 1} \frac{M_x}{M_n} e^{\frac{Q_{n,x} - V_x}{\Theta}} \left\{ \frac{1 - \frac{W_{nx}}{\Theta} e^{-\frac{W_{nx}}{\Theta}} - e^{-\frac{W_{nx}}{\Theta}}}{1 - \frac{E_n}{\Theta} e^{-\frac{E_n}{\Theta}} - e^{-\frac{E_n}{\Theta}}} \right\}. \quad (2.2.1)$$

Энд: $\sigma_c(n) = \pi(R + \lambda_n)^2$ нь нейтроны үйлчлэлээр компаунд цөм үүсэх огтлол; R нь бай-цөмийн радиус; λ_n нь тусч буй нейтроны долгионы уртыг 2π -д хуваасан утга; S_n ба S_x нь тусч буй болон

урвалаас гарч буй x -бөөмийн спин; M_n ба M_x нь нейтрон болон x -бөөмийн масс; $Q_{n,x}$ нь урвалын энерги; V_x нь цөмийн зүгээс x -бөөмд учруулах Кулоны потенциал саад; Θ нь термодинамик температур; E_n нь тусч буй нейтроны энерги; $W_{n,x} = E_n + Q_{n,x} - V_x$.

Тооцоогоор (2.2.1) томьёоны арын том хаалттай хэсэг нь хурдан нейтроноор явагдах $(n,2n)$ урвалын үед ойролцоогоор 1-тэй тэнцүү байв. Ингээд том хаалттай хэсгийг 1-тэй тэнцүү гэж авч үзвэл гарч буй томьёо нь П.Куццокрио нарын болон Эриксоны гарган авсан томьёотой төстэй томьёо болно:

$$\sigma(n,2n) = \sigma_c(n) \frac{2S_{2n} + 1}{2S_n + 1} \frac{M_{2n}}{M_n} e^{\frac{Q_{n,2n} - V_{2n}}{\Theta}}. \quad (2.2.2)$$

Урвалын энерги $Q_{n,2n}$ – ийг олохын тулд цөмийн холбоос энергийг тооцдог К.Ф.Вейцзеккерийн томьёог ашиглая. Үүний тулд К.Ф.Вейцзеккерийн томьёог бай болон урвалаас үүссэн цөмийн хувьд бичнэ.

Бай цөмийн хувьд:

$$E_i = \alpha A - \beta A^{2/3} - \gamma \frac{Z^2}{A^{1/3}} - \xi \frac{(N-Z)^2}{A} \pm \frac{\delta_i}{A^{3/4}}. \quad (2.2.3)$$

$(n,2n)$ урвалаас үүссэн цөмийн хувьд:

$$E_f = \alpha(A-1) - \beta(A-1)^{2/3} - \gamma \frac{Z^2}{(A-1)^{1/3}} - \xi \frac{(N-1-Z)^2}{A-1} \pm \frac{\delta_f}{(A-1)^{3/4}}. \quad (2.2.4)$$

Эндээс урвалын энерги $Q_{n,2n} = E_f - E_i$ -ийг олбол:

$$Q_{n,2n} = -\alpha - \beta \left((A-1)^{2/3} - A^{2/3} \right) - \gamma \left(\frac{Z^2}{(A-1)^{1/3}} - \frac{Z^2}{A^{1/3}} \right) - \xi \left(\frac{(N-1-Z)^2}{A-1} - \frac{(N-Z)^2}{A} \right) \pm \frac{\delta_f}{(A-1)^{3/4}} \mp \frac{\delta_i}{A^{3/4}} \quad (2.2.5)$$

болно. Энд: $\alpha = 15.7$ МэВ, $\beta = 17.8$ МэВ, $\gamma = 0.71$ МэВ, $\xi = 23.7$ МэВ, δ_i ба δ_f нь цөм дэх протон нейтроны тэгш сондгойгоос хамаараад $|\delta| = 34$ МэВ эсвэл 0 байдаг.

(2.2.2) томьёонд цөмийн зүгээс нейтронд үзүүлэх Кулоны потенциал саад $V_{2n} = 0$, нейтроны спин болон масс, урвалын энерги зэргийг тооцвол бид $(n,2n)$ урвалын огтлолын дараах томьёог гарган авна:

$$\sigma(n,2n) = 4\pi(R + \lambda_n)^2 \exp \left\{ \frac{-\alpha - \beta \left((A-1)^{2/3} - A^{2/3} \right) - \gamma \left(\frac{Z^2}{(A-1)^{1/3}} - \frac{Z^2}{A^{1/3}} \right) - \xi \left(1 - \frac{4Z^2}{A(A-1)} \right) \pm \frac{\delta_f}{(A-1)^{3/4}} \mp \frac{\delta_i}{A^{3/4}}}{\Theta} \right\} \quad (2.2.6)$$

(2.2.6) томьёог систематик хийхэд тохиромжтой томьёо болгохын тулд дараах 2 тэмдэглэгээг хийе:

$$C = 4 \exp \left(\frac{-\alpha - \beta \left((A-1)^{2/3} - A^{2/3} \right) - \gamma \left(\frac{Z^2}{(A-1)^{1/3}} - \frac{Z^2}{A^{1/3}} \right) \pm \frac{\delta_f}{(A-1)^{3/4}} \mp \frac{\delta_i}{A^{3/4}} + \xi}{\Theta} \right), \quad (2.2.7)$$

$$K = \frac{4\xi}{\Theta}. \quad (2.2.8)$$

(2.2.7) ба (2.2.8) тэмдэглэгээг (2.2.6)-д ашиглавал систематик анализ хийхэд тохиромжтой томьёо гарна:

$$\sigma(n,2n) = C \sigma_c(n) \exp\left(-K \frac{Z^2}{A(A-1)}\right). \quad (2.2.9)$$

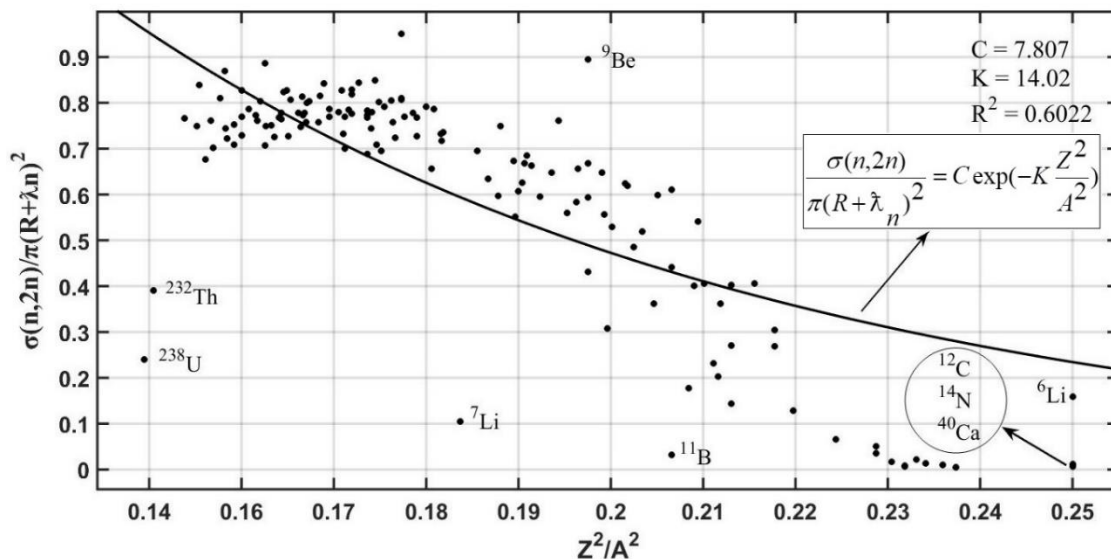
Хэрэв $A \gg 1$ их гэвэл (2.2.9) томьёо дараах хэлбэртэй илэрхийлэгдэнэ:

$$\frac{\sigma(n,2n)}{\pi(R + \lambda_n)^2} = C \exp\left(-K \frac{Z^2}{A^2}\right). \quad (2.2.10)$$

(2.2.10) томьёог $(n,2n)$ урвалын огтлолын систематик анализд ашиглав.

2.2.2. $(n,2n)$ урвалын огтлолын системчилсэн анализын үр дүн

Энэ ажилд 14-15 МэВ хурдан нейтроноор явагдах $(n,2n)$ урвалын огтлолд систематик анализ хийхээр зорьсон. Ингэхийн тулд ОУАЭА-ийн EXFOR цөмийн өгөгдлийн сангаас 14-15 МэВ энергийн мужид харьяалагдах $(n,2n)$ урвалын огтлолын туршлагын утгуудад анализ хийж ${}^6\text{Li}$ -аас ${}^{238}\text{U}$ хүртэл нийт 147 изотопын өгөгдлийг сонгон авав. Эдгээр өгөгдлүүдийг ашиглан эмхэтгэсэн огтлол болон Z^2/A^2 параметр хоорондын хамаарлын график байгуулсныг Зураг 2.1-т харуулав.



Зураг 2.1. Эмхэтгэсэн огтлол ба Z^2/A^2 хоорондын хамаарлын график

2.1-р зургаас харахад статистик загварын хүрээнд гарган авсан онолын томьёо (2.2.10)-гоор байгуулсан муруй туршлагын өгөдлүүдийн ерөнхий буурч буй зүй тогтолтой сайн таарахгүй байна. Эндээс бид 14-15 МэВ энергитэй нейтроноор явагдах $(n,2n)$ урвалууд нь компаунд механизмаар явагддаггүй, хагас шууд болон шууд механизмаар зонхилон явагддаг байж болох магадлалтай гэж үзэв. Ингээд статистик бус механизмын хувь, оролцоог тооцсон томьёог гарган авъя. Ямар ч цөмийн хувьд нейтроноор явагдах урвалын бүрэн огтлол дараах байдлаар тодорхойлогддог:

$$\sigma_n^{tot} = \sigma^{tot}(n,2n) + \sigma^{tot}(n,\gamma) + \sigma^{tot}(n,\alpha) + \sigma^{tot}(n,p) + \sigma^{tot}(n,3n) + \dots \approx \pi(R + \lambda_n)^2 \quad (2.2.11)$$

(2.2.11) томьёо дахь $(n,2n)$ урвалын бүрэн огтлолын эзлэх хувь бусад урвалуудынхаас өндөр байдаг. Тэгвэл хагас шууд болон шууд механизмаар тодорхойлогдох огтлолыг (2.2.11)-д тооцвол:

$$\sigma_n^{tot} \approx \sigma^{tot}(n,2n) \approx \pi(R + \lambda_n)^2 \approx \sigma^{comp}(n,2n) + \sigma^{pre}(n,2n) + \sigma^{dir}(n,2n) \quad (2.2.12)$$

Энд: $\sigma^{comp}(n,2n)$ нь бидний гаргасан (2.2.10) томьёогоор тодорхойлогдоно.

Хагас шууд болон шууд урвалын механизмаар тодорхойлогдох урвалын огтлолын нийлбэрийг статистик бус гээд дараах байдлаар тэмдэглэв:

$$\sigma^{pre}(n,2n) + \sigma^{dir}(n,2n) = \sigma^{nonstat}(n,2n). \quad (2.2.13)$$

Тэгвэл статистик бус механизмын хувь, нөлөөг тооцсон томьёо дараах байдлаар илэрхийлэгдэнэ:

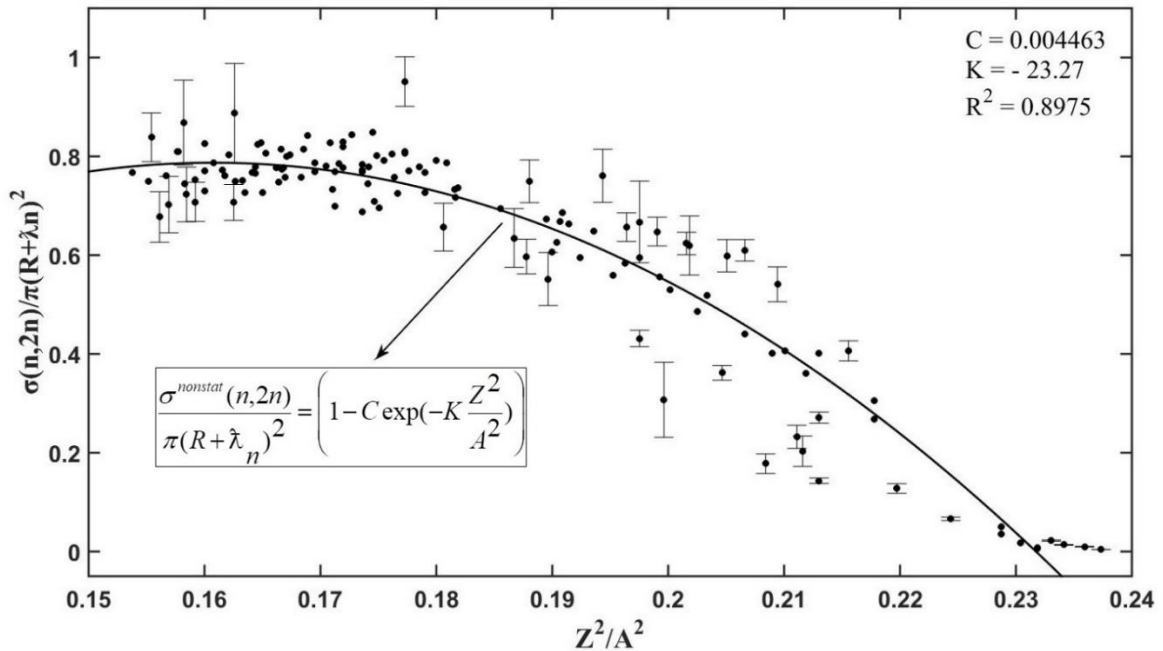
$$\begin{aligned} \sigma^{nonstat}(n,2n) &= \sigma^{tot}(n,2n) - \sigma^{comp}(n,2n) = \pi(R + \lambda_n)^2 - C\pi(R + \lambda_n)^2 \exp\left(-K \frac{Z^2}{A^2}\right) = \\ &= \pi(R + \lambda_n)^2 \left(1 - C \exp\left(-K \frac{Z^2}{A^2}\right)\right). \end{aligned} \quad (2.2.14)$$

Эмхэмтгэсэн огтлол байдлаар илэрхийлэгдвэл:

$$\frac{\sigma^{nonstat}(n,2n)}{\pi(R + \lambda_n)^2} = \left(1 - C \exp\left(-K \frac{Z^2}{A^2}\right)\right). \quad (2.2.15)$$

болно.

Эмхэтгэсэн огтлол болон Z^2/A^2 хамаарлын графикийг дахин байгуулан Зураг 2.2-т харуулав. Зураг 2.1-т туршлагын цэгүүдийн ерөнхий зүй тогтлоос мэдэгдэхүйц хол байгаа цэгүүдийг тэмдэглэсэн байсан. Тус цэгүүдийг 2.2-р зурагт тооцоогүй. Учир нь: ${}^6,7\text{Li}$, ${}^9\text{Be}$, ${}^{11}\text{B}$, ${}^{12}\text{C}$ – хэт хөнгөн цөмүүд нь кластер бүтэцтэй тул компаунд механизмаар тайлбарлагдахгүй, ${}^{238}\text{U}$, ${}^{232}\text{Th}$ – хэт хүнд цөмүүд нь хуваагдах урвалд ордог, ${}^{40}\text{Ca}$ нь 2 дахин шидэт цөм.



Зураг 2.2. Эмхэтгэсэн огтлол ба Z^2/A^2 хамаарлын график

Зураг 2.2-т онолын муруйг байгуулахдаа (2.2.15) томъёог ашиглав. Зураг 2.2-оос харвал статистик бус механизмын нөлөөг тооцсон томъёогоор байгуулсан муруй нь туршлагын цэгүүдтэй сайн таарч байна.

2.2.3. Дүгнэлт

1. Энэ ажлаар бид статистик загварын хүрээнд хурдан нейтроноор явагдах (n,2n) урвалын огтлолын онолын томъёоны гаргалгаа хийв. Мөн, статистик бус механизмын нөлөөллийг тооцсон (n,2n) урвалын огтлолын томъёог гаргав.
2. Гарган авсан томъёоны тусламжтай 14-15 МэВ энергийн муж дахь (n,2n) урвалын огтлолын туршлагын өгөгдлүүдэд анализ хийв. Үр дүнгээс харахад статистик бус механизмын нөлөөг тооцсон томъёоны муруй нь туршлагын өгөгдлүүдийн ерөнхий зүй тогтолтой таарч байна.

2.3. (n,t) урвалын огтлолын системчилсэн анализ

Хурдан нейтроноор явагдах (n,t) урвалын огтлолын өгөгдөлд анализ хийснээр цөмийн урвалын болон халуун цөмийн реакторын технологийн судалгаанд чухал ач холбогдолтой мэдээлэл гарган авах боломжтой. Цөмийн эрчим хүчний болон судалгааны реактор, халуун цөмийн урвалын ТОКАМАК болон ИТЕР зэрэг төхөөрөмжийн бүтээцийн материал нь цацрагт маш сайн тэсвэртэй байх шаардлагатай. Харин нейтроны үйлчлэлээр реакторын бүтээцийн материалд тритон үүсэх боломжтой ба энэ нөлөөллийг зайлшгүй судлах шаардлагатай. Гэвч, (n,t) урвалын огтлол нь ерөнхийдөө маш бага байдаг учир туршлагын өгөгдлүүд ховортой, байсан ч нэг изотопын хувьд л гэхэд ихээхэн өргөн мужид туршлагын утгууд нь олддог. Иймд

онолын загварын томъёог ашиглах нь үр дүнтэй, үлүү нарийвчлалтайгаар урвалын огтлолыг тодорхойлох боломжийг олгоно.

Энэ ажлаар бид статистик загварын хүрээнд тодорхойлсон томъёог ашиглан 14-15 МэВ энергитэй нейтроноор явагдах (n,t) урвалын огтлолын өгөгдлүүдэд системчилсэн анализ хийж, систематик зүй тогтлыг судлав.

2.3.1. (n,t) урвалын статистик загвар

Н.Борын үндэслэсэн компаунд механизм болон түүний хүрээнд боловсрогдсон цөмийн урвалын статистик загварыг ашиглан (n,t) урвалын огтлолын томъёог дараах байдлаар бичив:

$$\sigma(n,t) = \sigma_c(n)G(t). \quad (2.3.1)$$

Энд: $\sigma_c(n) = \pi(R+\lambda_n)^2$ нь нейтроны үйлчлэлээр компаунд цөм үүсэх огтлол; R нь бай-цөмийн радиус;

$$\lambda_n = \frac{4.55 \cdot 10^{-13}}{\sqrt{E_n}} \text{ (см)} \quad (2.3.2)$$

нь тусч буй нейтроны долгионы уртыг 2π -д хуваасан утга; E_n нь тусч буй нейтроны энерги.

Компаунд цөм задарч тритон гарах магадлал дараах байдлаар тодорхойлогдоно:

$$G(t) = \frac{\Gamma_t}{\Gamma} = \frac{\Gamma_t}{\sum_i \Gamma_i}. \quad (2.3.3)$$

Энд: Γ_t нь компаунд цөмийн өдөөгдсөн төлөвт харгалзах түвшний тритонд харгалзах дэд өргөн; Γ нь цөмийн түвшний нийт өргөн.

Компаунд цөм задрах процессыг цөмөөс тритон бөөм ууршиж байгаа мэт авч үзвэл цөмийн түвшний тритон бөөмд харгалзах дэд өргөнийг детальчлан тэнцэх зарчимд тулгуурлан:

$$\Gamma_t = \frac{2S_t + 1}{\pi^2 \hbar^2 \rho_c(E_c)} M_t \int_{V_t}^{E_t^{\max}} E_t \sigma_c(E_t)(U_t) dE_t \quad (2.3.4)$$

болно. Энд: S_t , M_t , E_t ба V_t нь харгалзан тритоны спин, масс, энерги болон цөмийн зүгээс тритонд учруулах Кулоны потенциал саад, $\rho_c(E_c)$ ба $\rho_y(U_t)$ нь компаунд c -цөмийн түвшний нягт ба урвалаас үүссэн u -цөмийн түвшний нягт; U_t нь урвалаа үүссэн цөмийн өдөөлтийн энерги; $\sigma_c(E_t)$ нь E_t энергитэй тритон u -цөмд шингэж компаунд цөм үүсгэх урвуу урвалын огтлол:

$$\sigma_c(E_t) = \begin{cases} \pi R^2 \left(1 - \frac{V_t}{E_t}\right) & \text{for } E_t > V_t \\ 0 & \text{for } E_t < V_t \end{cases}. \quad (2.3.5)$$

Цөмийн энтропи болон тогтмол температурын нарийвчлалыг ашиглан дээрх томъёонуудаас бид дараах хурдан нейтроноор явагдах (n,t) урвалын огтлолыг тодорхойлов:

$$\sigma_{(n,t)} = \pi(R + \lambda_n)^2 \frac{2S_t + 1}{2S_n + 1} \cdot \frac{M_t}{M_n} e^{\frac{Q_{nt} - V_t}{\theta}}. \quad (2.3.6)$$

Урвалын энерги $Q_{n,t}$ – ийг олохын тулд цөмийн холбоос энергийг тооцдог К.Ф.Вейцеккерийн томъёог ашиглавал:

$$Q_{n,t} = -\alpha A + \alpha(A-2) + \beta[A^{2/3} - (A-2)^{2/3}] + \gamma \left[\frac{Z^2}{A^{1/3}} - \frac{(Z-1)^2}{(A-2)^{1/3}} \right] + \xi \left\{ \frac{(A-2Z)^2}{A} - \frac{[(A-2) - 2(Z-1)]^2}{A-2} \right\} \pm \left[\frac{\delta_f}{(A-2)^{3/4}} - \frac{\delta_i}{A^{3/4}} \right] + \varepsilon_i. \quad (2.3.7)$$

болно. Энд: $\varepsilon_i = 8.48$ МэВ нь тритоны хувийн дотоод холбоос энерги; $\alpha = 15.7$ МэВ; $\beta = 17.8$ МэВ; $\gamma = 0.71$ МэВ; $\xi = 23.7$ МэВ; δ_i ба δ_f нь цөм дэх протон нейтроны тэгш сондгойгоос хамаараад $|\delta| = 34$ МэВ эсвэл 0 байдаг.

Бэсрэг болон хүнд масстай цөмүүдийн хувьд $A \gg 2$ ойролцооллыг ашиглаж болох ба ингэвэл:

$$Q_{n,t} = \gamma \frac{2Z-1}{A^{1/3}} - 4\xi \frac{N-Z+1}{A} + \varepsilon_i. \quad (2.3.8)$$

Үүссэн цөмийн зүгээс тритонд учруулах потенциал саадыг:

$$V_i = 1.029 \frac{(Z-1)}{A^{1/3} + 3^{1/3}}. \quad (2.3.9)$$

гэж авч болно. Хэрэв Ферми хий загварын түвшний нягтын параметрийг ашиглавал цөмийн термодинамик температур дараах байдлаар илэрхийлэгдэнэ:

$$\Theta = \sqrt{\frac{13.5(E_n + Q_{n,t})}{A}}. \quad (2.3.10)$$

Эндээс бид дээрх томьёонуудыг ашиглавал (n,t) урвалын огтлолын томьёо:

$$\sigma(n,t) = C\pi(R + \lambda_n)^2 e^{-K \frac{N-Z+1}{A}} \quad (2.3.11)$$

болно. Энд: C ба K параметрууд дараах байдлаар илэрхийлэгдэнэ:

$$C = 3 \exp \left\{ \frac{\gamma \frac{2Z-1}{A^{1/3}} + \varepsilon_i - 1.029 \frac{(Z-1)}{A^{1/3} + 3^{1/3}}}{\Theta} \right\}, \quad (2.3.12)$$

$$K = \frac{4\xi}{\Theta}. \quad (2.3.13)$$

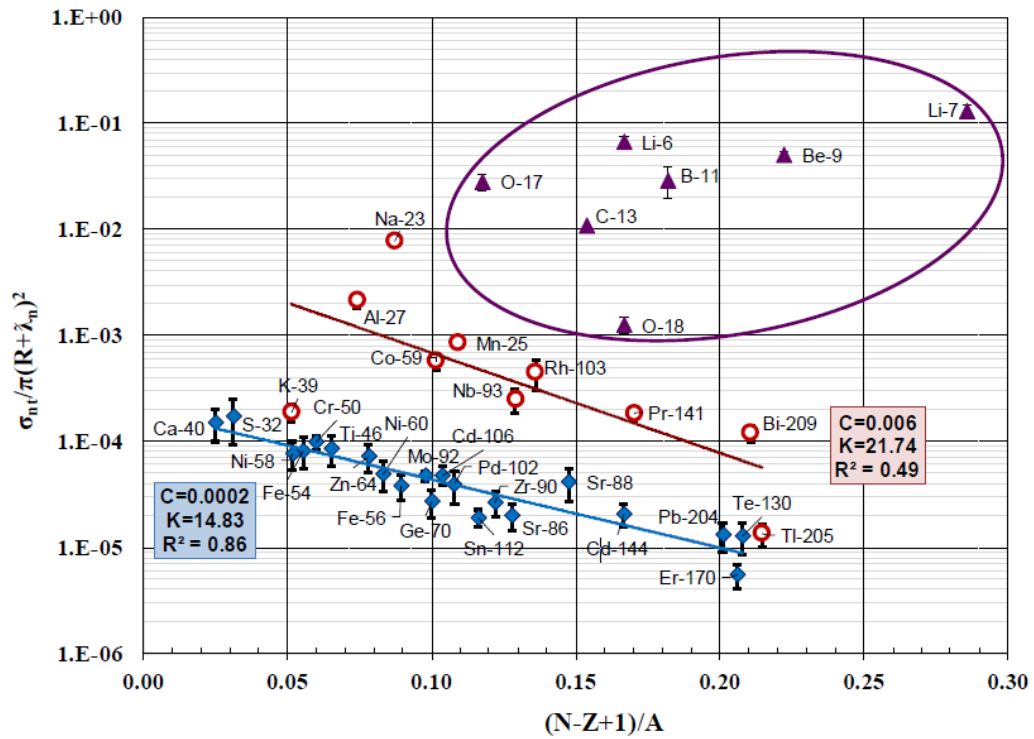
(2.3.11) томьёог эмхэтгэсэн огтлолоор илэрхийлбэл:

$$\frac{\sigma(n,t)}{\pi(R + \lambda_n)^2} = C e^{-K \frac{N-Z+1}{A}} \quad (2.3.14)$$

болно. Энэ ажилд (2.3.14) томьёог ашиглан (n,t) урвалын огтлолын өгөгдлүүдэд систематик анализ хийв.

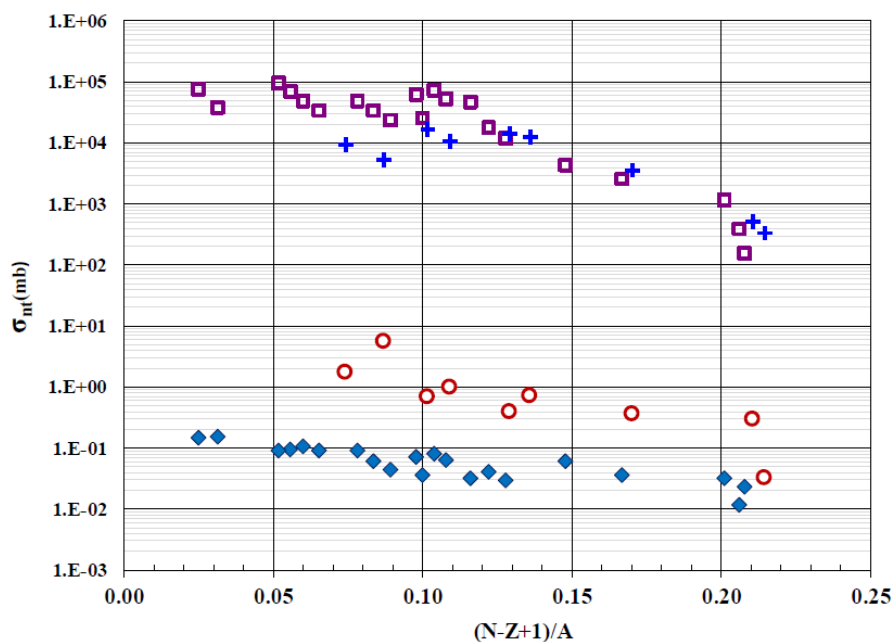
2.3.2. (n,t) урвалын огтлолын системчилсэн анализын үр дүн

Бид 14-15 МэВ энергитэй нейтроноор явагдах (n,t) урвалын эмхэтгэсэн огтлол болон $(N-Z+1)/A$ параметрийн хоорондох хамаарлыг байгуулж Зураг 2.3-г харуулав.



Зураг 2.3. (n,t) урвалын эмхэтгэсэн огтлол болон $(N-Z+1)/A$ параметрийн хоорондох хамаарал: ▲ - хөнгөн цөм; ○ – сондгой-тэгш цөм; ◆ - тэгш-тэгш цөм. Онолын шулууныг (2.3.14) томъёогоор байгуулав.

Масс тоо ($A = 6-18$)-той хөнгөн цөмүүдийг эс тооцвол бусад өгөгдлүүдийн хувьд (n,t) урвалын эмхэтгэсэн огтлол болон $(N-Z+1)/A$ параметрийн хооронд тодорхой хамаарал Зураг 2.3-аас харагдаж байна. Хөнгөн цөмүүдийн хувьд кластер бүтэцтэй, урвалын огтлолд өндөр резонанстай байдаг нь ерөнхий систематикаас зөрж байхад нөлөөлөх магадлалтай. Сондгой-тэгш болон тэгш-тэгш цөмүүдийн (n,t) огтлолын өгөгдлүүд нь тусдаа тусдаа тодорхой хамааралтайгаар бидний гаргасан (2.3.14) томъёогоор тодорхойлогдох онолын шулууны дагуу байна. Бид $A \gg 2$ ойролцооллыг ашиглан (n,t) урвалын огтлолын абсолют утгыг (2.3.10)-(2.3.13) томъёогоор тодорхойлов. Үр дүнгээ мэдэгдэж буй туршлагын утгуудтай харьцуулан Зураг 2.4-г харуулав.



Зураг 2.4. Туршлагын өгөгдөл ба (2.3.10)-(2.3.13) томъёогоор бодсон (n,t) урвалын огтлолын абсолют утгын хамаарал:

- ба + нь тэгш-тэгш ба сондгой-тэгш цөмийн онолын огтлол;
- ◆ ба ○ нь тэгш-тэгш ба сондгой тэгш цөмийн туршлагын утга, (${}^3\text{H}$ ороогүй).

Зураг 2.4-өөс харахад статистик загварын томъёогоор тодорхойлсон (n,t) урвалын огтлолын онолын утга нь туршлагын утгаас бага зэрэг зөрүүтэй харагдаж байж. Энэ зөрүү нь магадгүй 3 нуклон буюу тритоны кластер бүрэлдэх эффекттэй хамааралтай байж болох юм. Энэ талаар 6-р бүлэгт дэлгэрэнгүй авч үзнэ.

2.3.3. Дүгнэлт

1. Статистик загварын хүрээнд хурдан нейтроноор явагдах (n,t) урвалын огтлолд систематик анализ хийх хялбар томъёоны гаргалгааг хийв.
2. Гарган авсан томъёогоо ашиглан 14-15 МэВ энергитэй нейтроноор явагдах (n,t) урвалын огтлолд систематик анализ хийв. Бэсрэг болон хүнд масстай цөмүүдийн хувьд онолын шулуунтай дагуу тархсан буюу таарч байна. Харин огтлолын абсолют утга нь туршлагын утгаас бага зэрэг их гарсан нь тритоны кластер бүрэлдэх эффекттэй холбоотой байх магадлалтай.

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

Хурдан нейтроны үйлчлэлээр 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 ${}^6_3\text{Li} + {}^1_0n \rightarrow {}^4_2\text{He} + {}^3_1\text{H}$ 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 хийх зорилго тавив.

2.4.1. $(n, {}^3\text{He})$ урвалын статистик загвар

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

$$\sigma(n, {}^3\text{He}) = \sigma_c(n) \cdot G_{{}^3\text{He}} \quad (2.4.1)$$

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

$$\sigma_c(n) = \pi(R + \lambda_n)^2 \quad (2.4.2)$$

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;

$$\lambda_n = \frac{4.55 \cdot 10^{-13}}{\sqrt{E_n (\text{МэВ})}} \text{ (см)} \quad (2.4.3)$$

нейтроны долгионы уртыг 2π -д хуваасан утга; E_n -нейтроны энерги.

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

$$G_{{}^3\text{He}} = \frac{\Gamma_{{}^3\text{He}}}{\Gamma} \quad (2.4.4)$$

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.

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

$$\sigma(n, {}^3\text{He}) = \sigma_c(n) \frac{(2S_{{}^3\text{He}} + 1) M_{{}^3\text{He}} e^{-\frac{(B_{{}^3\text{He}} + \delta_{{}^3\text{He}} + V_{{}^3\text{He}})}{\Theta}}}{\sum_i (2S_i + 1) M_i e^{-\frac{(B_i + \delta_i + V_i)}{\Theta}}}. \quad (2.4.5)$$

Эндээс хурдан нейтроны үед буюу нейтроны энерги их үед $\Gamma \approx \Gamma_n$ гэдэг нөхцлийг тооцвол $i=n$ гээд (2.4.5) илэрхийллээс 1971 онд П.Куццокрио нарын гаргасан томъёотой төстэй ($n, {}^3\text{He}$) урвалын огтлолын томъёо гарна:

$$\sigma(n, {}^3\text{He}) = \sigma_c(n) \frac{(2S_{{}^3\text{He}} + 1) M_{{}^3\text{He}} e^{-\frac{Q_{n, {}^3\text{He}} - V_{{}^3\text{He}}}{\Theta}}}{(2S_n + 1) M_n}. \quad (2.4.6)$$

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

$$V_{{}^3\text{He}} = 2.058 \frac{Z-2}{(A-2)^{1/3} + 3^{1/3}} \text{МэВ} \quad (2.4.7)$$

гэж болно.

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

$$Q_{n, {}^3\text{He}} = E_f - E_i + \varepsilon_{{}^3\text{He}} \quad (2.4.8)$$

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

(2.4.8) томъёон дахь бай-цөм болон үүссэн цөмийн холбоос энергийг олохдоо К.Ф.Вейцзеккерийн томъёог ашиглая. Бай-цөмийн хувьд:

$$E_i = \alpha A - \beta A^{2/3} - \gamma \frac{Z^2}{A^{1/3}} - \xi \frac{(A-2Z)^2}{A} \pm \frac{\delta_i}{A^{3/4}} \quad (2.4.9)$$

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

$$E_i = \alpha(A-2) - \beta(A-2)^{2/3} - \gamma \frac{(Z-2)^2}{(A-2)^{1/3}} - \xi \frac{[(A-2) - 2(Z-2)]^2}{A-2} \pm \frac{\delta_f}{(A-2)^{3/4}} \quad (2.4.10)$$

гэж тус тус бичиж болно.

Энд: $\alpha = 15.7 \text{ МэВ}$, $\beta = 17.8 \text{ МэВ}$, $\gamma = 0.71 \text{ МэВ}$, $\xi = 23.7 \text{ МэВ}$, δ -ийн утга нь цөм дэх протон нейтроны тооны тэгш сондгойгоос хамааран дараах утгуудтай байна: тэгш-тэгш цөмд $\delta = +34 \text{ МэВ}$, тэгш-сондгой цөмд $\delta = 0$, сондгой-сондгой цөмд $\delta = -34 \text{ МэВ}$.

(2.4.9) ба (2.4.10) илэрхийллүүдийг (2.4.8) томъёонд орлуулвал

$$Q_{n, {}^3\text{He}} = \alpha[(A-2) - A] + \beta[A^{2/3} - (A-2)^{2/3}] + \gamma \left[\frac{Z^2}{A^{1/3}} - \frac{(Z-2)^2}{(A-2)^{1/3}} \right] - \xi \left[\frac{(A-2Z)^2}{A} - \frac{[(A-2Z+2)]^2}{A-2} \right] \pm \left[\frac{\delta_f}{(A-2)^{3/4}} - \frac{\delta_i}{A^{3/4}} \right] + \varepsilon_{{}^3\text{He}} \quad (2.4.11)$$

гэж ($n, {}^3\text{He}$) урвалын энерги гарна. Хэрэв (2.4.6),(2.4.7) ба (2.4.11) илэрхийллүүдээс ($n, {}^3\text{He}$) урвалын огтлолын томьёог бичвэл:

$$\sigma(n, {}^3\text{He}) = \sigma_c(n) \frac{(2S_{3\text{He}} + 1) M_{3\text{He}}}{(2S_n + 1) M_n} \exp \frac{1}{\Theta} \left\{ \alpha[(A-2) - A] + \beta[A^{2/3} - (A-2)^{2/3}] + \gamma \left[\frac{Z^2}{A^{1/3}} - \frac{(Z-2)^2}{(A-2)^{1/3}} \right] - \right.$$

$$\left. \xi \left[\frac{(A-2Z)^2}{A} - \frac{[(A-2Z+2)]^2}{A-2} \right] \pm \left[\frac{\delta_f}{(A-2)^{3/4}} - \frac{\delta_i}{A^{3/4}} \right] + \varepsilon_{3\text{He}} - 2.058 \frac{Z-2}{A^{1/3} + 3^{1/3}} \right\}$$

(2.4.12)

болно.

($n, {}^3\text{He}$) урвалын үед цөмийн тэгш сондгой чанар өөрчлөгдөхгүй учир (2.4.12) томьёонд δ_i ба δ_f -гэй гишүүд байхгүй болно. (2.4.12) томьёо олон хувьсагч параметртэй, хэт урт учир шууд тооцоо хийх, системчилсэн анализад ашиглахад тохиромж муутай. Тиймээс (2.4.12) томьёог хялбарчлан хураангуй томьёо гаргах зорилго тавья. Бэсрэг болон хүнд масстай бай цөмүүдийн хувьд тооцоолол хийх учир $A \gg 2$ гэж үзээд урвалаас гарах энергийн томьёог (2.4.11) илэрхийллээс бичвэл

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

(2.4.13)

болно.

(2.4.13) илэрхийллийг ашиглан ($n, {}^3\text{He}$) урвалын огтлолын хураангуй томьёог $A \gg 2$ тохиолдолд (2.4.12)-оос бичвэл:

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

(2.4.14)

болно.

Ферми-хий загварыг ашиглаад цөмийн термодинамик температурыг тодорхойлвол

$$\Theta = \sqrt{\frac{13.5(E_n + Q_{n, {}^3\text{He}})}{A}}$$

(2.4.15)

болно.

Систематик анализ хийхэд тохиромжтой байхаар (2.4.14) томьёог хялбарчилвал

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

(2.4.16)

болно.

Дээрх томьёонд байгаа C, K параметрүүд нь:

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

(2.4.17)

$$K = 4\xi \sqrt{\frac{A}{13.5(E_n + Q_{n,^3\text{He}})}} \quad (2.4.18)$$

гэж илэрхийлэгдэнэ.

(2.4.14)-(2.4.18) томьёонуудаар ($n, ^3\text{He}$) урвалын огтлолын утгуудыг тооцоолох боломжтой.

2.4.2. ($n, ^3\text{He}$) урвалын огтлолын системчилсэн анализын үр дүн

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

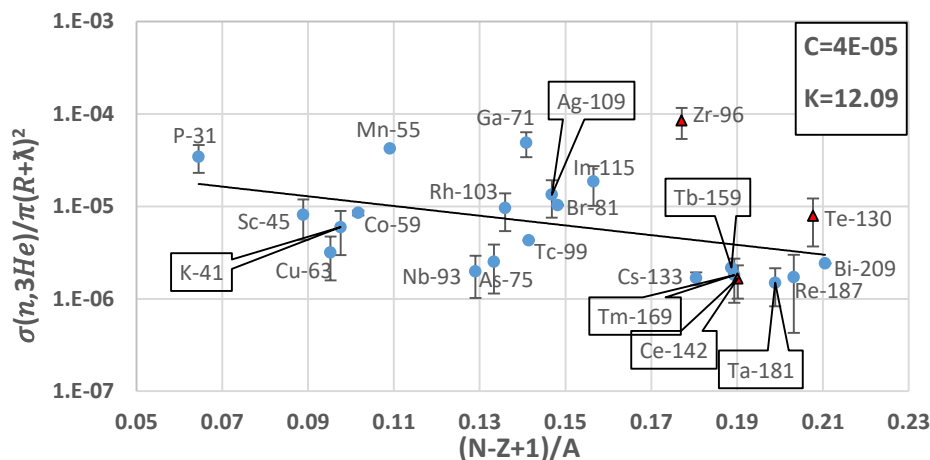
Ийм системчилсэн анализыг 14-15 МэВ энергитэй нейтроноор явагдах ($n, ^3\text{He}$) урвалын огтлолын хувьд анх Yao Lishan, Jin Yuling нар 1992 онд хийсэн байдаг. Бид Олон улсын атомын энергийн агентлагийн мэдээллийн сан EXFOR-оос авсан ($n, ^3\text{He}$) урвалын огтлолын туршлагын утгуудын оршин буй мужуудыг, тухайн мужуудаас өөрсдийн тооцоонд сонгон авч ашигласан утгуудын хамт Хүснэгт 2.1-д харуулав.

Хүснэгт 2.1. 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	
					EXFOR	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

(n, ³He) урвалын огтлолын сонгон авсан утгуудад системчилсэн анализ хийснийг Зураг 2.5-д харуулав. Зураг 2.5-д (2.4.16) томьёоны C, K параметрүүдийг тогтмол гэж үзэн туршлагын өгөгдлүүдээс хөөж тодорхойлсноо мөн харууллаа.



Зураг 2.5. (n, ³He) урвалын эмхэтгэсэн огтлол ба (N-Z+1)/A параметр хоорондын хамаарал.

(▲ -Масс тоо нь тэгш цөмүүд; ● -Масс тоо нь сондгой цөмүүд)

Зураг 2.5-аас 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 1992 онд Yao Lishan, Jin Yuling нарын хийсэн ажлын үр дүнтэй төстэй байна.

2.4.3. Дүгнэлт

Энэхүү ажлаар цөмийн урвалын компаунд механизмд үндэслэсэн статистик загварын хүрээнд хурдан нейтроноор явагдах (n, ³He) урвалын огтлолын томьёог гаргав. Хурдан нейтроноор явагдах (n, ³He) урвалын туршлагаар хэмжигдсэн огтлолын өгөгдлүүдийг эмхэтгэн, онолын томьёогоо 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.

2.5 Дүгнэлт

Цөмийн урвалын компаунд механизмын хүрээнд боловсруулсан статистик загварын хүрээнд хурдан нейтроноор явагдах (n,2n), (n,t) ба (n, ³He) урвалын огтлолын утгуудад

системчилсэн анализ хийж, зүй тогтлуудыг ажиглан, тэдгээрт тохирох онолын тайлбаруудыг өгөв.

Энэхүү бүлэгт хийгдсэн ажлуудыг төслийн үр дүнгийн даалгаврын 2,3-р даалгавар (Нейтроноор явагдах урвалын огтлолын утгуудад системчилсэн анализ хийж, зүй тогтол хайх, ажиглагдсан зүй тогтлыг цөмийн бүтэц ба урвалын орчин үеийн загвар, механизмуудад тулгуурлан тайлбарлах, Ажиглагдсан зүй тогтлыг цөмийн бүтэц ба урвалын орчин үеийн загвар, механизмуудад тулгуурлан тайлбарлах;) -т тусгагдсан ажлын хүрээнд гүйцэтгэв.

Тус ажлын хүрээнд хэвлүүлсэн бүтээлүүд:

1. G.Khuukhenkhuu, J.Munkhsaikhan, M.Odsuren, Ch.Saikhanbayar, Yu.M.Gledenov, E.Sansarbayar, M.V.Sedysheva.
Statistical Model Analysis of (n,t) Cross Sections for 14-15 MeV Neutrons.
Proceedings of the XXVII International Seminar on Interaction of Neutron with Nuclei (Dubna, Russia, June 10-14,2019). –Dubna:JINR,2020, pp.97-102.
2. Ch.Saikhanbayar, G.Khuukhenkhuu, M.Odsuren, Yu.M.Gledenov, E.Sansarbayar, Guohui Zhang
Systematical Analysis of (n,2n) Reaction Cross Sections for 14-15 MeV Neutrons (Proceedings of the XXVIII International Seminar on Interactions of Neutrons with Nuclei, ISINN-28, May 24-28, 2021, Xi'an, China) 2022, pp.222-226.
3. B.Batchimeg, G.Khuukhenkhuu, M.Odsuren, J.Munkhsaikhan, Ch.Saikhanbayar, Yu.M.Gledenov, E.Sansarbayar and M.V.Sedysheva, Guohui Zhang
Knock-on Mechanism and Alpha-cluster Formation Probability in (n, α) Reaction. (Proceedings of the XXVI International Seminar on Interaction of Neutrons with Nuclei, ISINN-26, May 28-June 1, 2018, Xi'an, China), 2019, p.55-62.
4. G.Khuukhenkhuu, M.Odsuren, J.Munkhsaikhan, B.Batchimeg, Yu.M.Gledenov, E.Sansarbayar and M.V.Sedysheva
Alpha-clustering in Slow and Fast Neutron Induced (n, α) Reactions. (Proceedings of the XXVI International Seminar on Interaction of Neutrons with Nuclei, ISINN-26, May 28-June 1, 2018, Xi'an, China), 2019, p.72-79.
5. 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.
6. Ch.Saikhanbayar, M.Odsuren, G.Khuukhenkhuu
Systematical Analysis of (n,2n) Reaction Cross Sections for 14-15 MeV Neutrons. МУИС-ийн Эрдэм Шинжилгээний Бичиг: **ФИЗИК**, 2020, №31 (536), х.60-67.
7. Н.Батцоож, Б.Батчимэг, М.Одсүрэн, Г.Хүүхэнхүү
(n, ^3_2He) Урвалын Огтлолын Анализ ба ^3_2He Кластер Бүрэлдэх Магадлал. МУИС-ийн Эрдэм Шинжилгээний Бичиг: **ФИЗИК**, 2020, №31 (536), х.94-100.

8. Б.Өсөхбаяр, Г.Хүүхэнхүү, С.Даваа, А.Сарсембаева, К.Като, М.Одсүрэн
Альфа-альфа Системийн Резонанс Төлөвүүдийг Комплекс Хувиргалтын Арга Ашиглан
Тодорхойлох нь.
МУИС-ийн Эрдэм Шинжилгээний Бичиг: **ФИЗИК**, №28 (510), 2019, х.11-14.

III БҮЛЭГ. АЛЬФА-ЗАДРАЛД ОРДОГ ИЗОТОПУУДЫН СИСТЕМЧИЛСЭН АНАЛИЗ

3.1. Удиртгал

Альфа-задрал нь цацраг идэвхит задралын нэг төрөл бөгөөд альфа бөөм атомын цөмөөс гарах үзэгдэл юм. Альфа-бөөм гэж 2 протон болон 2 нейтроноос тогтсон ${}^4\text{He}$ -ийн цөмийг нэрлэдэг. Альфа-задралд ордог изотопуудын систематик анализ нь цөмийн технологийн хэрэглээнд болон цөмийн бүтцийн судалгааг ойлгох, шинэ мэдээлэл өгөхөд чухал ач холбогдолтой. Жишээлбэл: альфа-задралын нөлөөгөөр цөмийн реакторын болон халуун цөмийн реакторын бүтээцийн материалд гелий хий хуримтлагдах процесс явагддаг. Реактор болон цөмийн эрчим хүчний төхөөрөмжийн ажиллагааны найдвартай байдал, ажиллах хугацаа зэрэг нь бүтээцийн материалын шинж чанараас ихээхэн хамаардаг тул энэ төрлийн судалгааг хийснээр реакторын бүтээцийн материалын бат бөх, аюулгүй байдлыг сайжруулах боломжтой.

Гейгер болон Нэттол нар нь задарч буй альфа бөөмийн энерги болон задралын тогтмолын хамаарлыг судлаад үүний хүрээнд 1911 онд Гейгер-Нэттолын хуулийг баталсан байдаг. Альфа-задралын онол нь квант механикийн туннелийн үзэгдэлд үндэслэгддэг. Альфа бөөм цөмийн потенциал саадыг нэвтрэн өнгөрөхийг туннелийн үзэгдэл гэнэ. Сонгодог механикийн хууль ёсоор потенциал саадын өндрөөс бага энергитэй бөөм уг саадыг туулан гарах боломжгүй. Харин квант механикийн хуулиар микро-бөөм долгионлог шинж чанартай учир өөрийн энергиэс өндөр потенциал саадыг нэвтрэн гарах боломжтой гэж үздэг. Энэ санаанд үндэслэн альфа-задралын квант онолыг 1928 онд Г.А.Гамов анх боловсруулжээ.

“Цөмийн кластер бүтэц ба урвалын судалгаа” (2019-2021) суурь судалгааны төслийн зорилтод тусгагдсан (*Альфа-задралд ордог изотопуудад системчилсэн анализ хийж, кластер бүтэцтэй холбон тайлбарлах*) ажлын хүрээнд Гейгер-Нэттолын хууль болон цөмийн бүрхүүлэн загварын хүрээнд альфа-задралд ордог изотопуудын туршлагын өгөгдөлд систематик анализ хийв.

3.2. Альфа-задралын онолын үндэс ба Гейгер-Нэттолын хууль

1911 онд Гейгер болон Нэттол нар альфа-задралд ордог цөмүүдийн хувьд дараах шугаман хамааралтай хууль байгааг нээсэн:

$$\log(\lambda) = A \log R_\alpha + B. \quad (3.2.1)$$

Энд: λ нь задралын тогтмол, $\lambda = 0.693/T_{1/2}$; $T_{1/2}$ нь хагас задралын үе; R_α нь альфа бөөмийн гүйлтийн урт, $R_\alpha \sim E_\alpha$; A ба B нь тогтмол.

Гамовын гаргасан томъёог ашиглан квант механикийн аргаар (3.2.1) томъёог дараах хэлбэртэй хувирган бичиж болдог:

$$\ln(T_{1/2}) = a \frac{1}{\sqrt{E_\alpha}} + b. \quad (3.2.2)$$

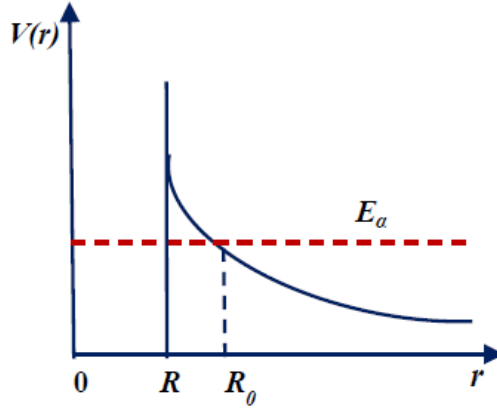
Альфа бөөм потенциал саадыг нэвтрэх магадлал:

$$\ln(T_\alpha) = -2 \int_R^{R_0} \sqrt{\frac{2m_\alpha(V(r) - E_\alpha)}{\hbar^2}} dr. \quad (3.2.3)$$

гэж тодорхойлогдоно. Энд: m_α нь альфа бөөмийн масс; $V(r)$ нь охин цөмийн потенциал энерги; R_0 нь альфа бөөм цөмөөс сугаран гарах гадаад хязгаар; R нь охин цөмийн радиус:

$$R = r_0 A_D^{1/3}. \quad (3.2.4)$$

Энд: A_D нь охин цөмийн масс тоо; $r_0 = 1.25 \cdot 10^{-13}$ см.



Зураг 3.1. Потенциал саадыг альфа бөөм нэвтрэх үзэгдлийг цөмийн потенциал орноор дүрслэн харуулав.

Охин цөмийн потенциал энергийг тодорхойлохын тулд Кулоны потенциалыг ашиглавал:

$$V(r) = \frac{2Ze^2}{r} \quad (3.2.5)$$

болно. Зураг 3.1-ээс харвал альфа бөөмийн энерги E_α дараах байдлаар илэрхийлэгдэнэ:

$$\frac{2Ze^2}{R_0} = E_\alpha. \quad (3.2.6)$$

Эндээс (3.2.3) томъёо дараах байдлаар бичигдэх боломжтой:

$$\ln(T_\alpha) = -2 \int_R^{R_0} \sqrt{\frac{2m_\alpha \left[\frac{2Ze^2}{r} - E_\alpha \right]}{\hbar^2}} dr. \quad (3.2.7)$$

(3.2.7)-д дараах ойролцооллыг ашиглан:

$$x = \frac{r}{R_0} \quad \text{ба} \quad x_0 = \frac{R}{R_0} \quad (3.2.8)$$

интегралыг бодвол (3.2.7) дараах хэлбэртэй болно:

$$\ln(T_\alpha) = -\frac{4e^2 Z}{\hbar} \sqrt{\frac{2m_\alpha}{E}} \int_{x_0}^1 \sqrt{\frac{1}{x} - 1} dx. \quad (3.2.9)$$

(3.2.9) томъёоны интегралтай хэсэг:

$$\int_{x_0}^1 \sqrt{\frac{1}{x} - 1} dx = \int_0^1 \sqrt{\frac{1}{x} - 1} dx - \int_0^{x_0} \sqrt{\frac{1}{x} - 1} dx \approx \int_0^1 \sqrt{\frac{1}{x} - 1} dx - \int_0^{x_0} \sqrt{\frac{1}{x}} dx = \int_0^1 \sqrt{\frac{1}{x} - 1} dx - 2\sqrt{x_0} \quad (3.2.10)$$

дээрх байдлаар бичигдэж болох ба энд $x_0 \ll 1$ ойролцоолол ашиглагдсан. Хэрэв (3.2.10) тэгшитгэлийн интегралтай хэсэгт $x = \sin^2 \theta$ орлуулгыг хийвэл:

$$\int_0^1 \sqrt{\frac{1}{x} - 1} dx = 2 \int_0^{\pi/2} \cos^2 \theta d\theta = \frac{\pi}{2} \quad (3.2.11)$$

болох ба (3.2.9) тэгшитгэлийн интегралтай хэсэг:

$$\int_{x_0}^1 \sqrt{\frac{1}{x} - 1} dx \approx \frac{\pi}{2} - 2\sqrt{\frac{R}{R_0}} \quad (3.2.12)$$

болно. Тэгвэл (3.2.7), (3.2.9) ба (3.2.12)-оос дараах томъёо гарна:

$$\ln(T_\alpha) \approx -\frac{2\pi e^2 Z}{\hbar} \sqrt{\frac{2m_\alpha}{E_\alpha}} + \frac{8}{\hbar} \sqrt{e^2 Z R m_\alpha}. \quad (3.2.13)$$

Альфа-кластер бүрэлдэх эффектийг тооцвол альфа-задралын тогтмол дараахаар илэрхийлэгдэнэ:

$$\lambda = \phi_\alpha f_\alpha T_\alpha. \quad (3.2.14)$$

Энд: ϕ_α нь альфа-кластержилтийн фактор; f_α нь альфа бөөм охин цөмийн потенциал саадыг дотроос нь ирж мөргөх давтамж. Нэг биеийн ойролцооллын үед альфа-кластержилтийн фактор нь $\phi_\alpha = 1$ байж болдог. Үүнийг (3.2.14)-д тооцвол:

$$\lambda = \frac{0.693}{T_{1/2}} = f_\alpha T_\alpha \quad (3.2.15)$$

болно. Альфа бөөм охин цөмийн потенциал саадыг дотроос нь ирж мөргөх давтамж:

$$f_\alpha = \frac{v_\alpha}{2R} = \frac{\sqrt{2E_\alpha / m_\alpha}}{2R}. \quad (3.2.16)$$

(3.2.15) ба (3.2.16)-гаас хагас задралын үеийг олвол:

$$T_{1/2} = \frac{2R \cdot 0.693}{\sqrt{2E_\alpha / m_\alpha}} \cdot \frac{1}{T_\alpha} \quad (3.2.17)$$

(3.2.13) ба (3.2.17)-оос дараах илэрхийлэл гарав:

$$\ln(T_{1/2}) = \ln \frac{2R \cdot 0.693}{\sqrt{2E_\alpha / m_\alpha}} - \frac{8}{\hbar} \sqrt{e^2 Z R m_\alpha} + \frac{2\pi e^2 Z}{\hbar} \sqrt{\frac{2m_\alpha}{E_\alpha}}. \quad (3.2.18)$$

Тэгвэл (3.2.18)-ыг дараах байдлаар бичиж болно:

$$\ln(T_{1/2}) = a \frac{1}{\sqrt{E_\alpha}} + b. \quad (3.2.19)$$

Энд:

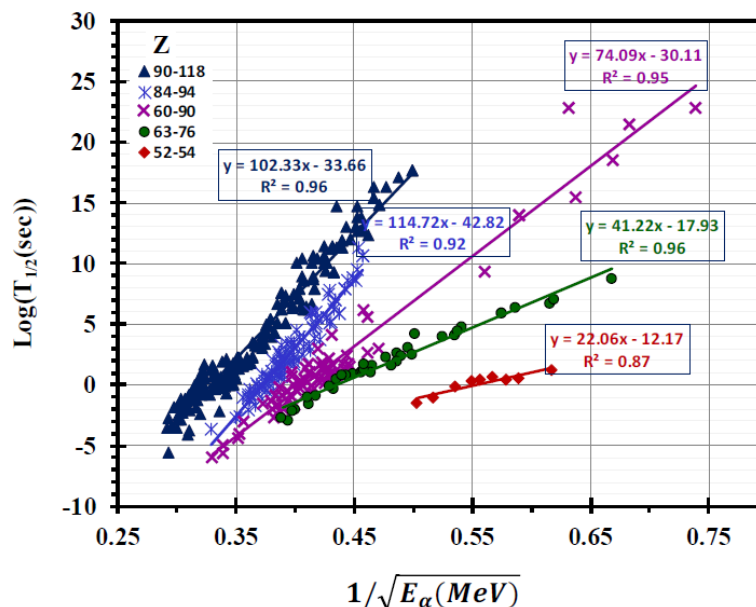
$$a = \frac{2\pi e^2 Z}{\hbar} \sqrt{2m_\alpha}, \quad (3.2.20)$$

$$b = \ln \frac{2R \cdot 0.693}{\sqrt{2E_\alpha / m_\alpha}} - \frac{8}{\hbar} \sqrt{e^2 Z R m_\alpha}. \quad (3.2.21)$$

(3.2.19) томъёог харвал энэ нь (3.2.2)-той буюу Гейгер-Нэттолын хуулиас гарга авсан томъёотой ижил томъёо байна. Бид энэ ажилд (3.2.19) томъёог альфа-задралд ордог изотопуудад систематик анализ хийхэд ашиглав.

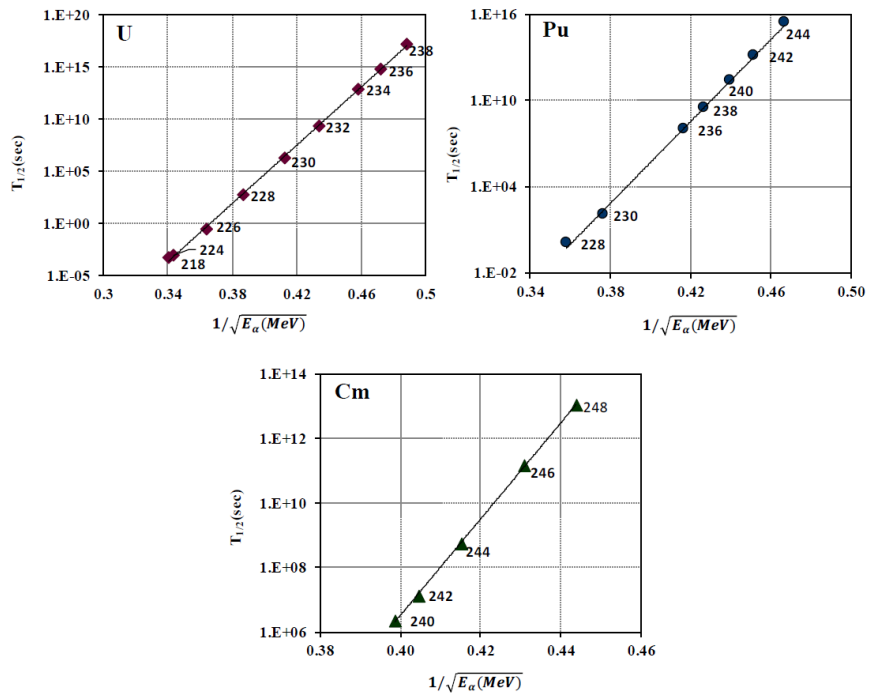
3.3. Альфа-задралд ордог изотопуудын системчилсэн анализ

Нийт 450 гаруй байгалийн болон зохиомол альфа-задралд ордог изотопуудын өгөгдлүүдэд Гейгер-Нэттолын хуулийг ашиглан анализ хийв. Логаритм хагас задралын үе болон нэгийг хуваах нь язгуур доор E_α (МэВ) хамаарлыг судлан график байгуулан Зураг 3.2-т харуулав.



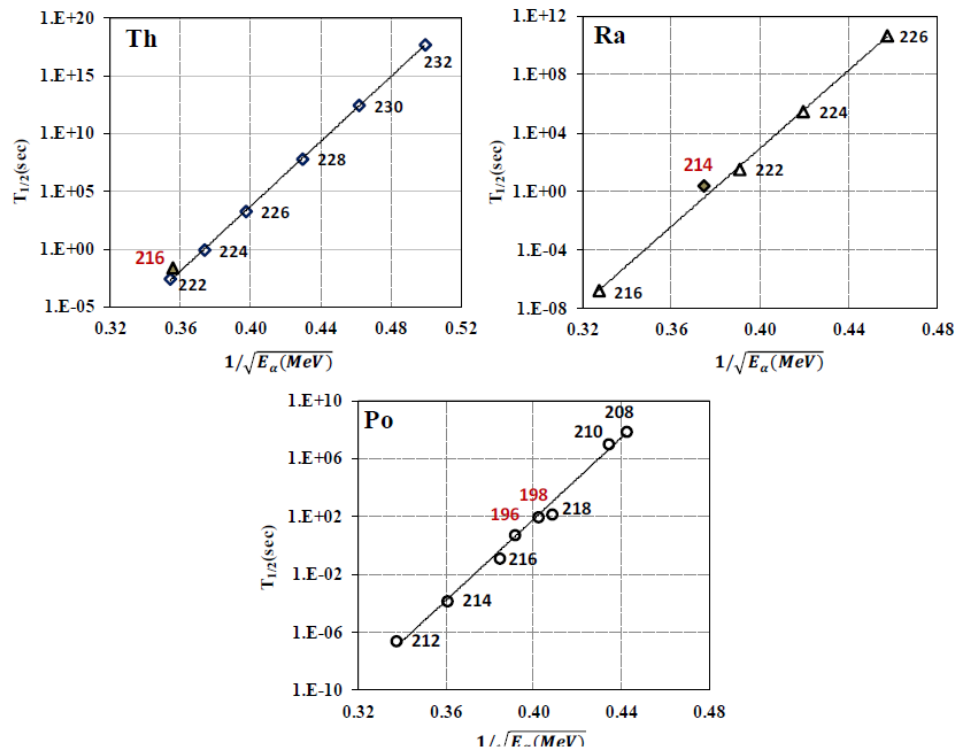
Зураг 3.2. Логаритм хагас задралын үе болон $1/\sqrt{E_\alpha}$ (МэВ) хамаарал

Урьдчилсан байдлаар Зураг 3.2-т үзүүлсэн графикуудад анализ хийхэд хагас задралын үе ба альфа бөөмийн энергиэс хамаарсан 5 групп эсвэл бүл үүсгэсэн нь харагдаж байна. Илүү нарийвчилсан анализ хийж үзэхэд тэгш-тэгш цөмүүдийн хувьд хагас задралын үе болон нэгийг хуваах нь язгуур доор E_α (МэВ) хамаарал Гейгер-Нэттолын хуулийн дагуу яг шугаман хамааралтай байгаа нь Зураг 3.3-аас харагдана. Мөн шулууны дагуу масс тоо нь өсөж байна. U, Pu ба Cm изотопуудын жишээг харуулав.



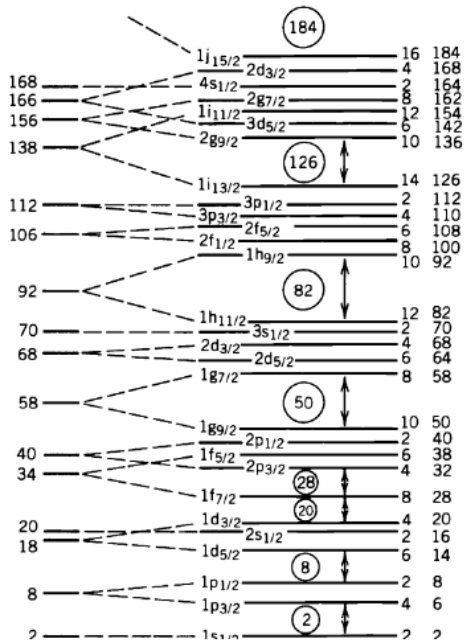
Зураг 3.3. Хагас задралын үе болон $1/\sqrt{E_\alpha}$ (МэВ) хамаарал (U, Pu, Cm)

Харин зарим нэг Po, Ra ба Th зэрэг тэгш-тэгш цөмүүдийн хувьд дээрх зүй тогтол бага зэрэг зөрчигдөж байгаа ажиглагдав (Зураг 3.4).



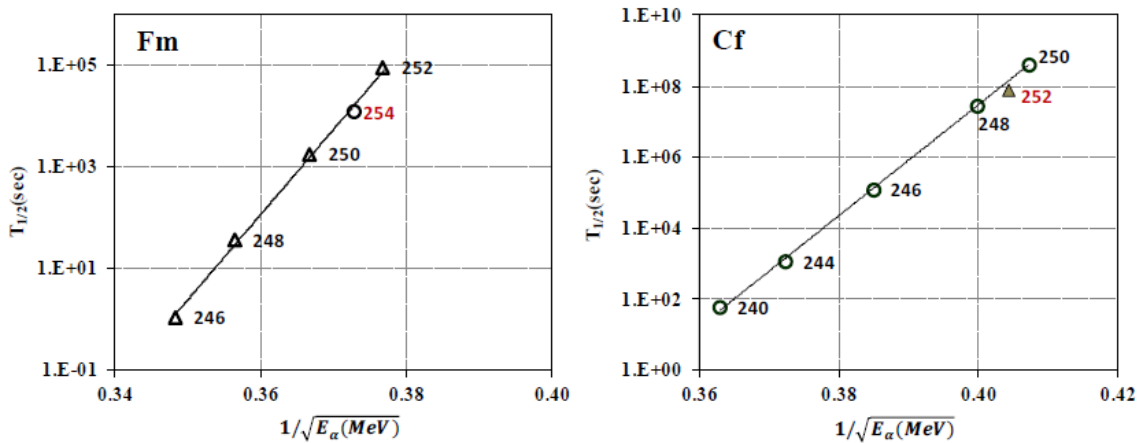
Зураг 3.4. Хагас задралын үе болон $1/\sqrt{E_\alpha}$ (МэВ) хамаарал (Po, Ra, Th)

Зураг 3.4-өөс харахад $^{196,198,208,210}\text{Po}$, ^{214}Ra ба ^{216}Th изотопууд Гейгер-Нэттолын хуулиар байгуулсан шулууны дагуу масс тоо ихсэх зүй тогтлын дагуу биш байна. Дээрх зүй тогтол алдагдаж буй энэ шалтгааныг цөмийн бүрхүүлэн загвартай холбон тайлбарлахыг зорив. ^{210}Po , ^{214}Ra ба ^{216}Th изотопууд нь цөмдөө 126 нейтронтой буюу шидэт цөм, ингэснээр цөмийн бүрхүүл нь дүүрсэн байгааг Зураг 3.5-аас харж болно.



Зураг 3.5. Цөмийн бүрхүүлэн загварын энергийн түвшин

126 нейтронтой шидэт цөмийн энергийн түвшинг харвал дараагийн энергийн түвшнөөс нилээд өргөн зайтай байна. Иймд, ерөнхий зүй тогтлыг эвдэж буй эдгээр $^{210,208}\text{Po}$, ^{214}Ra ба ^{216}Th изотопуудын шалтгаан нь магадгүй энэ энергийн түвшний зайнаас болж байж мэдэх юм. $^{196,198}\text{Po}$ изотопын хувьд ерөнхий зүй тогтлоос зөрж буй шалтгаан нь мөн л $3P_{1/2}$ ($N=112$) электроны бүрхүүл дүүрсэнтэй холбоотой. ^{252}Cf ба ^{254}Fm изотопуудын хувьд Гейгер-Нэттолын хуулийг ашиглан байгуулсан шулуун дээр огцом үсрэлт ажиглагддаг (Зураг 3.6).



Зураг 3.6. Хагас задралын үе болон $1/\sqrt{E_\alpha}$ (МэВ) хамаарал (Fm ба Cf)

Энэ тохиолдол ч мөн адил нейтроны тоо нь 154, $1i_{11/2}$ электроны бүрхүүл нь дүүрсэн буюу хаагдсан.

3.4. Дүгнэлт

1. Гейгер-Нэттолын хуулийг квант механикийн Гамовын онолыг ашиглан гаргав. 450 гаруй байгалийн болон зохиомол альфа-задралд ордог изотопуудын өгөгдлүүдэд Гейгер-Нэттолын хуулийг ашиглан анализ хийв. Систематик анализаас харахад хагас задралын үе ба альфа бөөмийн энергиэс хамаарсан 5 бүл үүссэн байна.
2. U, Pu ба Cm тэгш-тэгш цөмүүдийн хувьд хагас задралын үе болон нэгийг хуваах нь язгуур доор E_{α} (МэВ) хамаарал Гейгер-Нэттолын хуулийн дагуу яг шугаман хамааралтай байна. Гейгер-Нэттолын хуулийн дагуу масс тоо өсөж байна.
3. Po, Ra ба Th зэрэг зарим тэгш-тэгш цөмийн хувьд Гейгер-Нэттолын хуулийн дагуу масс тоо өсөж буй зүй тогтол эвдэгдэж байна. Энэ шалтгаан нь цөмийн бүрхүүлэн загвараар тайлбарлагдав.

Энэхүү бүлэгт хийгдсэн ажлуудыг төслийн үр дүнгийн даалгаврын 4-р даалгавар (*Альфа-задралд ордог изотопуудад системчилсэн анализ хийж, кластер бүтэцтэй холбон тайлбарлах*)-т тусгагдсан ажлын хүрээнд гүйцэтгэв.

Тус ажлын хүрээнд хэвлүүлсэн бүтээл:

1. J.Munkhsaikhan, M.Odsuren, G.Khuukhenkhuu
Systematical Analysis of Alpha-active Nuclides.
IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2020, 1000-012002.
2. J.Munkhsaikhan, M.Odsuren, G.Khuukhenkhuu
Systematics of Alpha-Active Nuclides And on the Validity of the Geiger-Nuttall Law.
МУИС-ийн Эрдэм Шинжилгээний Бичиг: **ФИЗИК**, 2020, №31 (536), х.138-143.

IV БҮЛЭГ. НЕЙТРОНООР ЯВАГДАХ ЦӨМИЙН УРВАЛЫН ТУРШЛАГЫН СУДАЛГАА

4.1. Удиртгал

Манай эрдэмтэн судлаачид нейтроны үйлчлэлээр цөмөөс протон, альфа-бөөм зэрэг цэнэгт бөөмс үүсэн гарах урвалын онол-туршлагын хосолсон судалгааны ажлыг 1970-аад оноос эхлүүлж, танин мэдэхүйн болон практикийн чухал ач холбогдолтой шинэ мэдээлэл өгөгдлүүдийг гарган авч, тодорхой зүй тогтлуудыг илрүүлж ирсэн билээ. Эдгээр үр дүн нь цөмийн эрчим хүчний төхөөрөмжийн эд ангид нейтроны үйлчлэлээр устөрөгч, гелийн хий үүсч, хуримтлагдан эвдрэлд хүргэх аюулыг урьдчилан тооцоолох, од нарны төвд явагддаг халуун цөмийн урвалын талаар, ялангуяа гелийн хий шатах процесс, ертөнцөд химийн элементүүд үүсч хуримтлагдах зэргийн талаарх цөмийн астрофизикийн тооцоонд хэрэгтэй шинэ мэдээлэл гарган авах, цөмийн бүтэц, задрал болон урвалын онолын загваруудыг шалгахад чухал ач холбогдолтой байдаг.

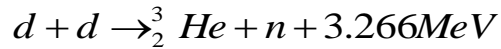


Бидний оролцоотойгоор Дубна хот дахь ЦШНИ-д өндөр, дунд, нам даралтын 3 камер бүхий, компьютерийн удирдлагатай иж бүрэн автомат альфа-спектрометрийн зураг төслийг гарган, зохион бүтээж, угсарч ажилд оруулан, бүх үзүүлэлтийг нь тодорхойлж, хурдан нейтроны үйлчлэлээр цэнэгтэй бөөм үүсэх урвалын судалгааг орчин цагийн өндөр түвшинд явуулж, чухал үр дүнгүүдийг гарган авсан юм. Тухайлбал, энэ аргазүйн үндсэн дээр нейтроноор явагдах урвалаас гарах цэнэгт бөөмсийг ялган таних, тэдгээрийн энергийн ба өнцгөн түгэлтийг хэмжих, урвалын огтлолыг тооцоолох боломж нээгджээ. Одоо энэ төхөөрөмжүүд Бээжин их сургуулийн Хүнд ионы физикийн институт, Дубна хот дахь ЦШНИ-ийн Нейтрон физикийн лабораторид хамтын судалгаанд хэрэглэгдэж байна. Ийнхүү бид тухайн судалгааны чиглэлдээ дэлхийд тэргүүлэх байранд хүрсэн бөгөөд сүүлийн жилүүдэд уг судалгааны ажил амжилттай үргэлжилж, тодорхой үр дүнгүүдийг гарган авлаа. “Цөмийн кластер бүтэц ба урвалын судалгаа” (2019-2021) суурь судалгааны төслийн зорилгод тусгагдсан (*Зарим изотопыг янз бүрийн энергитэй сум бөөмөөр бөмбөгдөх үед явагдах цөмийн урвалын туршлагын судалгаа явуулж, шинэ мэдээлэл гарган авах*) ажлын хүрээнд бор-10, никель-58, 60, 61, хлор-35 зэрэг изотопууд дээр хурдан нейтроноор явагдах (n,α) урвалын туршлагын судалгаа явуулж, нейтроны энергийн 3.3-5.3 МэВ мужид тухайн изотопуудын (n,α) урвалын огтлолыг тодорхойлов.

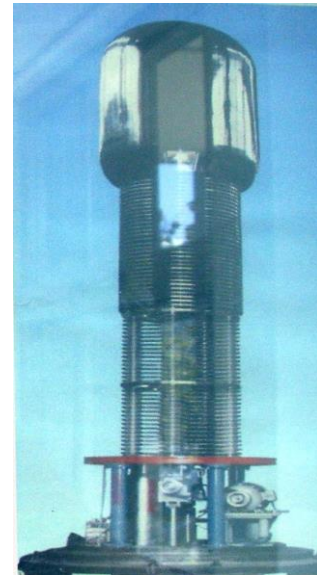
4.2. Туршлагын судалгааны аргазүй

4.2.1. Нейтроны үүсгүүр ба тоолуур

БНХАУ-ын Бээжин их сургуулийн Хүнд ионы физикийн институтийн 4.5 МэВ-ийн болон Дубна хот дахь ЦШНИ-ийн Нейтрон физикийн лабораторийн 5 МэВ-ийн Ван-де-Граафын хурдасгуурууд дээр дейтерийн ионыг хурдасган дейтерий-хий байг бөмбөгдөн

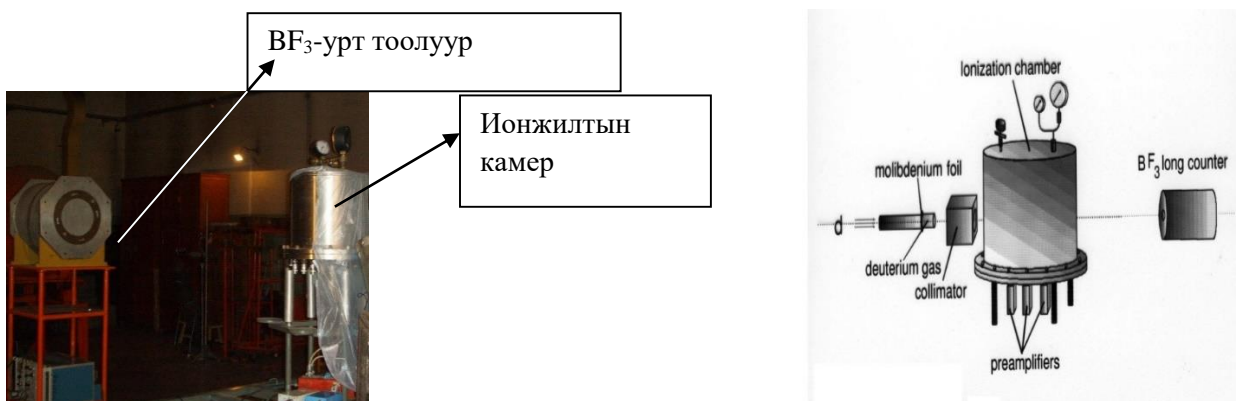


урвал явуулж нейтроныг гаргав. Зураг 4.1-т Ван-де-Граафын хурдасгуурыг харуулав. Тусч буй дейтоны энергийг өөрчлөх замаар нейтроны энергийг өөрчилж болно. Бай-бодис болох дейтерийн хийг 5 мкм орчим зузаантай Мо нимгэн ялтсан цонх бүхий тусгай камерт байрлуулж гаднаас нь өндөр даралттай агаараар үлээлгэн хөргөдөг. Дейтерийн камер нь 1 см орчим диаметрэй 2-3 см урттай хөнгөн цагааны хайлшаар хийсэн цилиндр хэлбэртэй (Зураг 4.2). Энэ камер доторхи d -хийн даралт ойролцоогоор 2-3 атм байна. $d+d$ урвалыг ашиглан $E_n \geq 3.5$ МэВ энергитэй нейтроныг гарган авч болно. Хурдасган дейтоны гүйдэл 5-10 мкА байх үед хурдан нейтроны гаралт $\sim 10^{8-9}$ н/с байв. Нейтроны урсгалыг $E_n = 2 - 6.5$ МэВ мужид ${}^{238}\text{U}$ -ын цөмийн хуваагдлаар тодорхойлов. ${}^{238}\text{U}$ -ын агуулга 99.999% байх ${}^{238}\text{U}_3\text{O}_8$ -ыг тантал буюу вольфрам аравч дээр тодорхой зузаантай суулгав. Үүнийгээ өндөр даралтын ионжилтийн камерт дээж байрлуулах 5 байрлалын нэгэнд тогтооно. ${}^{238}\text{U}$ -ын цөмийн тоо мэдэгдэж байх учир түүний хуваагдлын хэлтэрхийг ионжилтын камераараа бүртгэж аван тусч буй хурдан нейтроны урсгалыг тодорхойлов. ${}^{238}\text{U}(n,f)$ урвалын огтлолын утгыг ENDF/B-VI олон улсын өгөгдлийн сангаас авсан. Орчинд сарнисан дулааны нейтроноос хамгаалахын тулд ионжилтын камераа 0.5 мм орчим зузаантай кадмийгаар бүрэв.



Зураг 4.1. БНХАУ-ын Бээжин их сургуулийн Хүнд ионы физикийн институтийн Ван-де-Граафын 4.5 МэВ-ийн хурдасгуур

Нейтроны гаралтын хэр тогтвортой байгааг BF_3 урт тоолуур ашиглан (4.2-р зураг) мониторинг болгон хянаж байв.

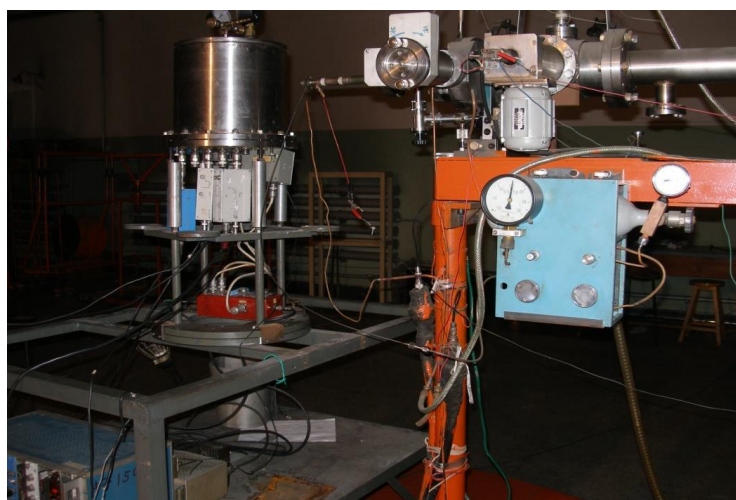


Зураг 4.2. Нейтроны урсгал дээр байрлах багаж төхөөрөмжүүд

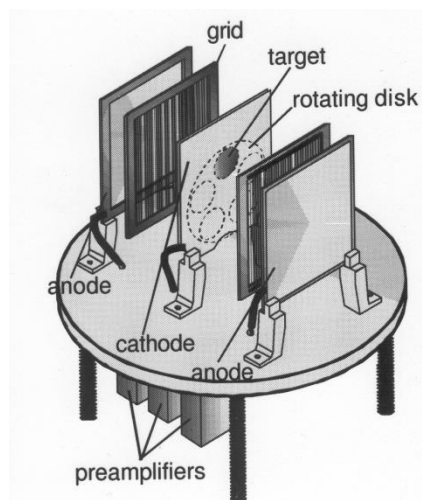
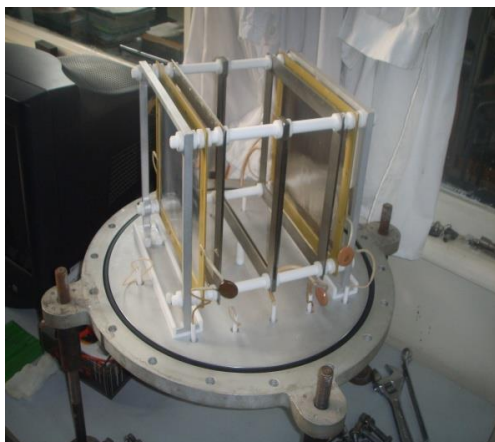
4.2.2. (n, α) урвалаас үүсэн гарч буй α -бөөмийн бүртгэгч

ЦШНИ-ийн И.М.Франкийн нэрэмжит Нейтрон физикийн лабораторийн эрдэмтэдтэй бидний хамтран зохион бүтээсэн өндөр даралтын ионжилтын камерыг цэнэгтэй бөөмсийн детектор болгон энэхүү цуврал судалгаанд ашиглав.

Өндөр даралтын ионжилтын камер: Энэ камерын онцлог гэвэл юуны түрүүнд 15 атм хүртэл өндөр даралт даахын тулд камерын эх биеийг зэвэрдэггүй гангаар хийснийг тэмдэглэх хэрэгтэй. Уг камер нь цилиндр хэлбэртэй бөгөөд 27.2 см өндөр, 28.2 см диаметртэй, 2 мм зузаан хажуу ханатай хийгдсэн (Зураг 4.3). 1.7 см зузаантай ёроолын дотор талд байрлах хөндийрүүлэгч саваанууд дээр электродуудын бэхлэж, гадна талд байх залгууруудыг ашиглан өндөр хүчдэлийн тэжээл өгөх ба сигнал авна. Дээжүүдийг вольфрам ялтсаар бүрсэн хөнгөн цагаан хоёр хавтгайн хооронд байрлах эргэлдэгч хөнгөн цагаан нимгэн диск дээр нааж тогтоодог бөгөөд нэг талдаа 5 дээж, нийт 10 дээж дээр туршилт явуулах боломжтой (Зураг 4.4-ийн 2 дахь хэсэг). Уг ионжилтын камер нэг катод, хоёр тор, хоёр анод нийт 5 электродтой. Катод нь камерын төв хэсэгт байрлах бөгөөд хоёр талд нь байрлах секцүүдэд ерөнхий катодын үүрэг гүйцэтгэнэ. Өндөр хүчдэлийн тэжээл өгөх ба сигнал авах боломж аль ч электродод адилхан хангагдсан байна.



Зураг 4.3. Нейтроны урсгал дээрх өндөр даралтын ионжилтын камерын байрлал



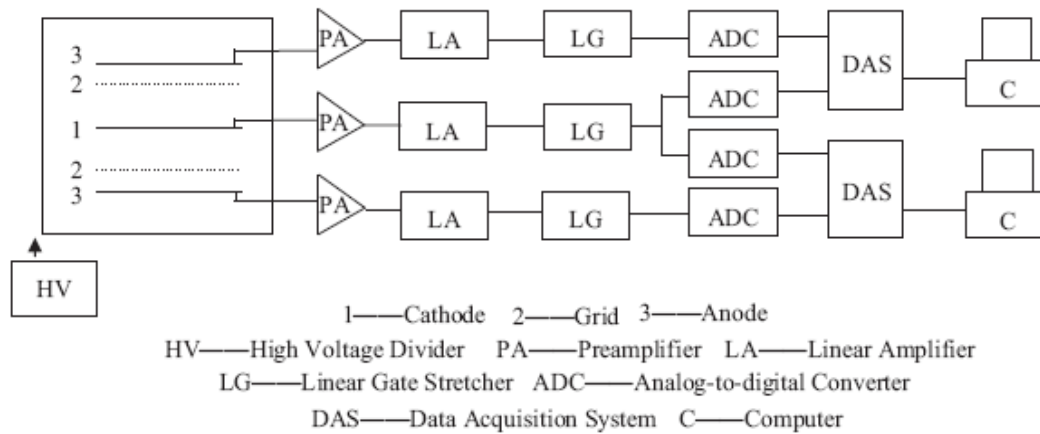
Зураг 4.4. Өндөр даралтын ионжилтын камерын электродуудын байрлал

Дээжийг эргэлдүүлж, байрлалыг сольж болох бөгөөд ээлж дараалан 48 мм диаметртэй цонхоор ил гарч байхаар байрлуулна. Дээжийг хоёр, хоёроор нь ар араар нь тааруулан нааж байрлуулан туршилтыг хийдэг. Дээж буюу судлах бодисын 5 байрлалын 1 нь энергийн тохируулга (калибровка) хийхэд зориулагдсан α -үүсгүүр байна. Камерыг онгойлгохгүйгээр ёроолын гадна талд байрлах бариулыг эргүүлэн харьцагч тусгай араануудын тусламжтайгаар дээжүүдийг сольж болдгоороо хэмжилтийн ажиллагааг ихээхэн хялбарчилсан. Мөн уг камер нь өндөр даралтанд ажиллах чадвартай тул (n,p) урвалаас үүсэн гарах гүйлт урттай протоныг ч бас бүртгэх боломжтой.

Альфа-спектрометрийн электроникийн хэсгийн ерөнхий дүрсийг Зураг 4.5-д, блок схемийг Зураг 4.6-д тус тус харуулав. Тавьж буй туршилтын зорилгоосоо хамаараад спектрометрийн блок схем янз бүр байх боломжтой. Ионжилтын камер дотор цэнэгтэй бөөм хөдлөхөд үүсэх цахилгаан сигналын импульсийг урьдчилсан өсгөгч ба үндсэн өсгөгчөөр өсгөнө. Сигналыг катод ба анодаас нэгэн зэрэг авч давхцуулах аргыг хэрэглэв. Катодын сигналын далайц нь бүртгэгдсэн цэнэгтэй бөөмийн хөдлөх өнцгийг, анодын сигналын далайц нь уг бөөмийн энергийг тус тус илэрхийлнэ.



Зураг 4.5. Альфа-спектрометрийн электроникийн хэсэг



Зураг 4.6. Альфа-спектрометрийн блок-схем

Ийм учраас бүртгэгдсэн бөөмийн энергийн ба өнцгөн түгэлтийг тодорхойлох боломжтой болдог. Эдгээр мэдээллүүд ADC-гээр кодчилогдон компьютерт очих бөгөөд тусгай программ хангамжийн тусламжтайгаар бөөмийн 3 хэмжээст (эзэлхүүнт), 2 хэмжээст (хавтгайд) (Зураг 4.7) болон ердийн шугаман (амплитудын) спектруудийг гарган авдаг. Мөн түүнчлэн бөөмийн өнцгөн түгэлтийг дурын боломжит өнцөгт харгалзуулан гаргаж болно. Өнцгөн түгэлтээсээ тухайн урвалын дифференциал огтлолыг тодорхойлно. Дифференциал огтлолоо интегралчлан бүх боломжит өнцгийг тооцож интеграл буюу бүрэн огтлолыг тодорхойлдог.



Зураг 4.7. Цэнэгт бөөмийн хоёр хэмжээст спектр

(n, α) урвалын огтлолыг дараах томъёогоор тооцоолдог:

$$\sigma_{\alpha} = G \sigma_f \frac{N_{\alpha}}{N_f} \frac{N_{238U}}{N_{\text{дээж}}}$$

Энд: σ_f нь $^{238}\text{U}(n, f)$ урвалын огтлол. N_{α} ба N_f нь (n, α) урвалаас гарч буй альфа-бөөмийн болон $^{238}\text{U}(n, f)$ урвалаас гарах хуваагдлын хэлтэрхийнүүдийн бүртгэгдсэн тоо, N_{238U} , $N_{\text{дээж}}$ нь ^{238}U ба дээжин дэх судлах элементийн атомын тоо, G нь судлах элементийн ба ^{238}U дээр туссан нейтроны урсгалын нягтын харьцаа буюу засвар. Өндөр даралтын ионжилтын камерыг ашиглаж буй тохиолдолд судалж буй дээж, ^{238}U хоёулаа нэг цэгт байрлах боломжтой тул нейтроны урсгалын ялгаа байхгүй.

4.2.3. $^{10}\text{B}(n,\alpha)^7\text{Li}$ ба $^{10}\text{B}(n,t2\alpha)$ урвалын туршлагын үр дүн

Энэ ажлаар бид нейтроны үйлчлэлээр цөмөөс 2 бөөм үүсэн гарах $^{10}\text{B}(n,\alpha)^7\text{Li}$ урвалын огтлол болон 3 бөөм үүсэн гарах $^{10}\text{B}(n,t2\alpha)$ урвалын огтлолыг нейтроны энергийн $E_n = 4.0, 4.5, 5.0$ МэВ үед хэмжив. Хэмжилтийг 2017 онд Зураг 4.8-д харуулсан блок схемийг ашиглан гүйцэтгэсэн. Бид энэ судалгаандаа түрүүчийн хэмжилтүүдэд хэрэглэж байсан, хоёр секц бүхий ионжилтийн камер (GIC)-ыг ашигласан ба өгөгдөл боловсруулах системаа илүү сайжруулан WFD (waveform digitizer)-д үндэслэн боловсруулсан. Энэ удаагийн хэмжилтийн ялгагдах бас нэг гол онцлог нь гэвэл судлах дээж ^{10}B -ыг маш нимгэн хальс хэлбэрээр бэлдсэнд орших бөгөөд энэ тохиолдолд камерын хоёр секцийн дунд хэсэгт байрлах ерөнхий катодонд бэхлэгдсэн ^{10}B дээжээс $^{10}\text{B}(n,t2\alpha)$ урвалын үед үүссэн гурван бөөмс гэдрэг ба урагш зэрэг гарах ёстой. Эдгээр гурван бөөмсийг давхцуулан бүртгэснээр уг урвалыг найдвартай бүртгэх боломж бүрдэж байгаа юм. 94% баяжилттай ^{10}B материалыг вакуумд электроны багцаар бөмбөгдөн ууршуулж 0.16 мкм зузаантай Al-аравч дээр суулгав (Зураг 4.9). Ингэж бэлдсэн ^{10}B -дээжийн зузааныг тодорхойлохдоо урьдчилан зузааныг нь тодорхойлсон ^6LiF -ыг (94.5 мкг/см²) стандарт болгон түүнтэй харьцуулж олох аргыг ашиглав. Ийнхүү тодорхойлсон ^{10}B -дээжийн зузаан 18.1 мкг/см² байв.

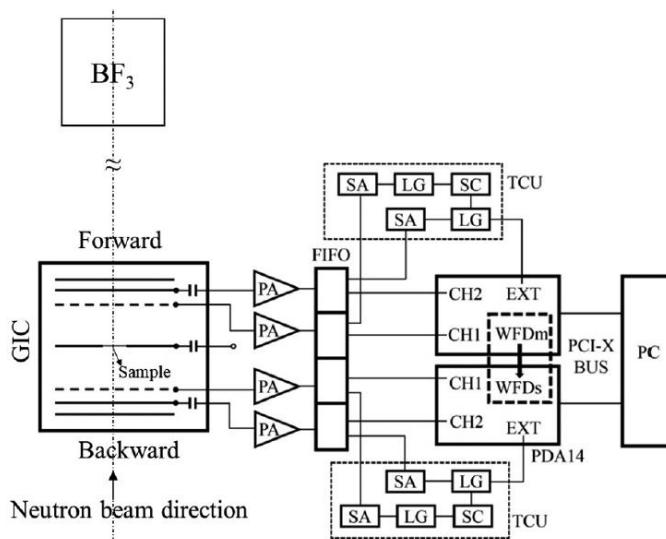
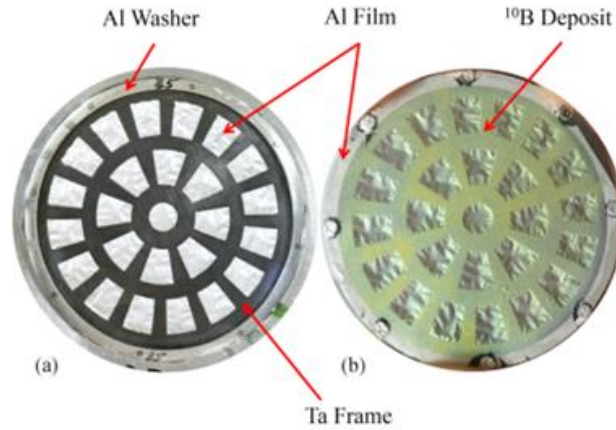


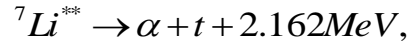
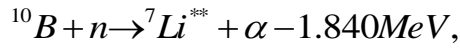
Fig. 1. The block diagram of the experimental setup: BF_3 , BF_3 long counter; GIC, twin gridded ionization chamber; PA, preamplifier; FIFO, Fan In-Fan Out; TCU, trigger control unit; SA, signal amplifier; LG, linear gate; SC, single channel analyzer; PDA14, waveform digitizer; CH, input channel; EXT, external trigger; WFDm, WFD master; WFDs, WFD slave; and PC, personal computer.

Зураг 4.8. Хэмжилтийн блок схем

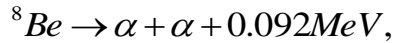
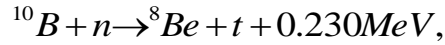


Зураг 4.9. Торлож хийсэн Та-жаазанд бэхэлсэн нимгэн Al-аравч дээр суулгасан ^{10}B -дээжийн ерөнхий байдал

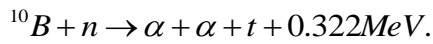
Хурдан нейтрон ^{10}B дээр тусахад дараах урвалууд явагдах боломжтой:



(4.2.1)



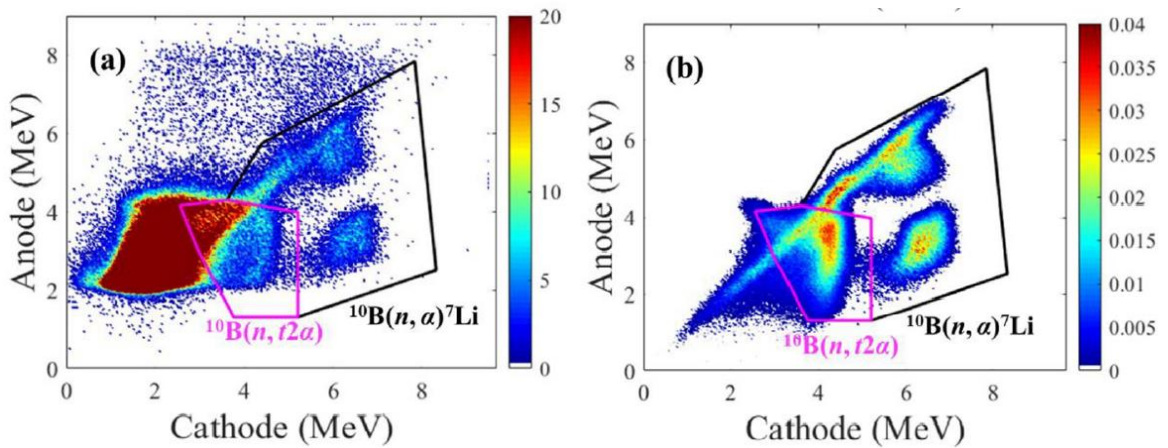
(4.2.2)



(4.2.3)

Дээрх урвалуудыг харахад үндсэн гурван төрлийн механизм буюу боломж байна. (4.2.1) ба (4.2.2) урвалууд ^7Li ба ^8Be гэсэн завсрын цөм үүссэн хоёр-биеийн оролцоотой процессууд байна. Харин (4.2.3) урвалаар ^{11}B -компаунд цөм шууд гурван бөөм болон задарч (бутарч) байна.

$^{10}\text{B}(n,t\alpha)$ ба $^{10}\text{B}(n,\alpha)^7\text{Li}$ урвалаас гарсан бөөмсийн туршлагын спектрт боловсруулалт хийж буй байдлыг Зураг 4.10-т харуулав.

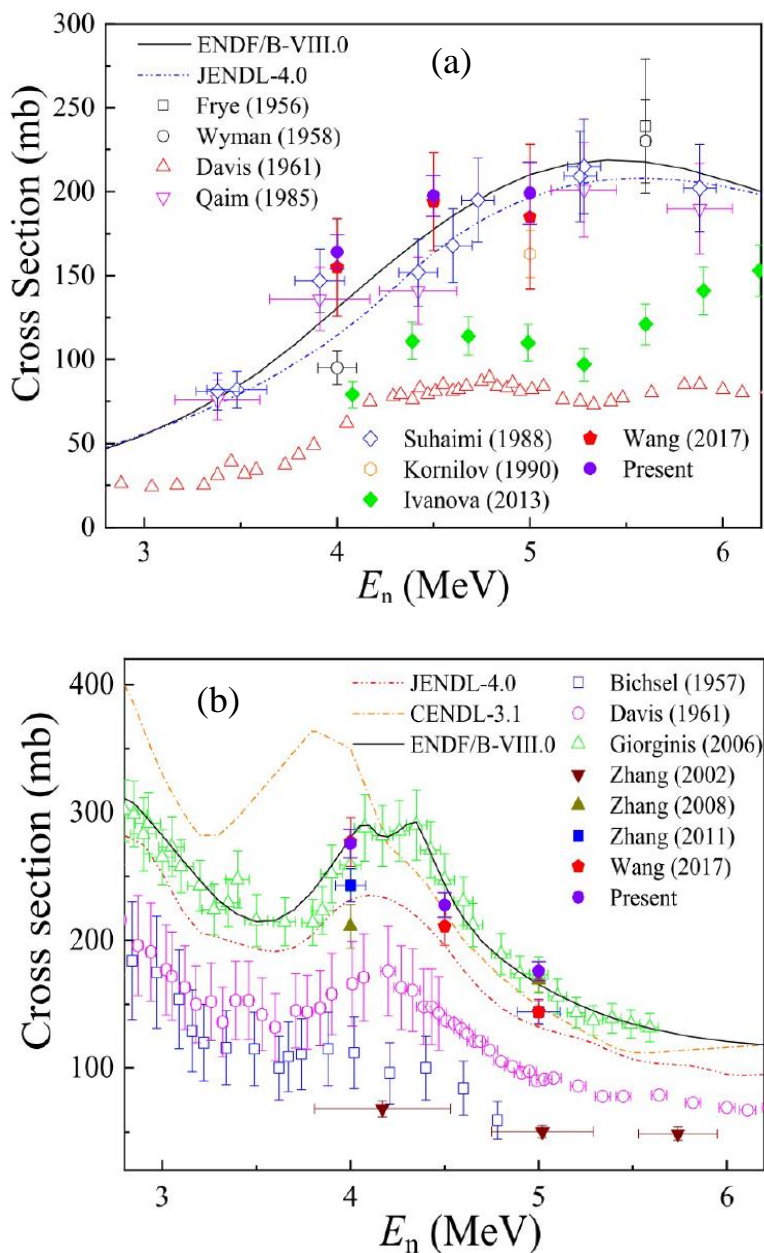


Зураг 4.10. $E_n = 4.5\text{MeV}$ энергитэй нейтроноор явагдах $^{10}\text{B}(n,t2\alpha)$ ба $^{10}\text{B}(n,\alpha)^7\text{Li}$ урвалын хоёр хэмжээст анод-катодын спектр (туршлагаар хэмжсэн үр дүн) (a) ураги болон (b) араги гарах тохиолдлууд

Зураг 4.10-г харуулсан анод-катодын спектрээс бид $^{10}\text{B}(n,t2\alpha)$ ба $^{10}\text{B}(n,\alpha)^7\text{Li}$ урвалын эффе́ктив талбайг тодорхойлох боломжтой. Ийнхүү детекторт бүртгэгдсэн бөөмсийн тоогоо ашиглан бид судалж буй урвалын огтлолыг тооцоолон гаргав (Хүснэгт 4.1).

Хүснэгт 4.1. $^{10}\text{B}(n,t2\alpha)$ болон $^{10}\text{B}(n,\alpha)^7\text{Li}$ урвалуудын огтлолын туршилагын хэмжсэн утгууд

E_n (MeV)	$\sigma_{(n,\alpha)}$ (mb)	$\sigma_{(n,t2\alpha)}$ (mb)
4.0	275.6 ± 11.2 ($74.3 \pm 3.2^{\text{L}}$; $105.4 \pm 4.4^{\text{F}}$; $95.9 \pm 4.4^{\text{B}}$)	164.1 ± 10.2
4.5	227.6 ± 9.5 ($64.9 \pm 2.9^{\text{L}}$; $80.4 \pm 3.5^{\text{F}}$; $82.3 \pm 3.5^{\text{B}}$)	197.6 ± 12.0
5.0	176.0 ± 7.5 ($58.0 \pm 2.7^{\text{L}}$; $56.6 \pm 2.5^{\text{F}}$; $61.4 \pm 2.5^{\text{B}}$)	199.2 ± 18.5



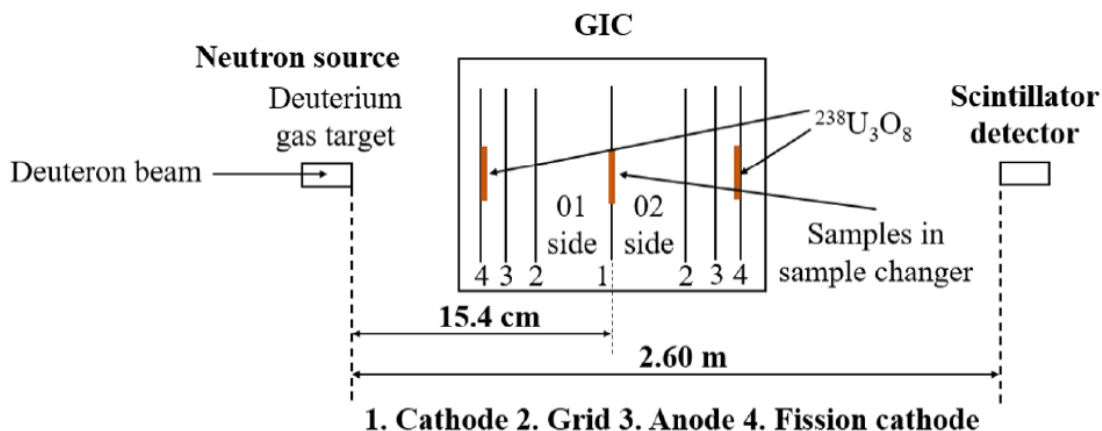
Зураг 4.11. (a) $^{10}\text{B}(n,t2\alpha)$ болон (b) $^{10}\text{B}(n,\alpha)^7\text{Li}$ урвалуудын огтлолын туршилагын утгууд ба судалгааны төвүүдийн үнэлгээ

Бид үр дүнгээ бусад судлаачдын туршлагын болон ENDF/B-VIII.0, JENDL-4.0, CENDL-3.1 зэрэг тооцооны үр дүнгүүдтэй харьцуулан Зураг 4.11-т харуулав. $^{10}\text{B}(n,t\alpha)$ урвалын хувьд бидний үр дүн Qaim (1985) болон Suhaimi (1988) нарын үр дүнтэй таарч байна. Харин Davis (1961) ба Ivanova (2013) нарын огтлолын спектрийн хэлбэртэй манай үр дүн адилхан байна. Цаашид бид туршлагаар хэмжсэн үр дүнгийн алдааг багасгах шаардлагатай төдийгүй $^{10}\text{B}(n,t\alpha)$ болон $^{10}\text{B}(n,\alpha)^7\text{Li}$ урвалуудын хувьд нейтроны энергийн өргөн мужид судлах, ялангуяа нейтроны энергийн 4 МэВ-ээс бага мужид туршлагын утгууд хэрэгтэй байна.

4.2.4. $^{58,60,61}\text{Ni}(n,\alpha)^{55,57,58}\text{Fe}$ урвалуудын туршлагын үр дүн

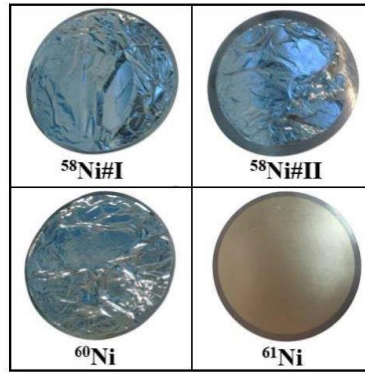
Никель нь ган хийхэд болон зэврэлтэнд тэсвэртэй бусад төрлийн хайлшид өргөн ашиглагддаг бөгөөд эдгээр нь цөмийн реакторын болон хурдасгуур зэрэг цөмийн төхөөрөмжийн бүтээцийн материал болдог. (n,α) урвалын үйлчлэлээр цөмийн реакторын бүтээцийн материалд гелий хий хуримтлагдах, цаашлаад бүтээцийн материалд ноцтой эвдрэл үүсгэх боломжтой. 4.50-5.50 МэВ энергитэй нейтроны мужид $^{58,60,61}\text{N}(n,\alpha)$ урвалын огтлолын туршлагын маш цөөхөн өгөгдөл байдаг, мөн эдгээр өгөгдлүүд нь хоорондоо нийлээд зөрүүтэй байдаг нь онолын тооцоо хийхэд төвөгтэй байдал үүсгэдэг. Бид энэ ажлаар 4.50-5.50 МэВ нейтроны мужид $^{58,60,61}\text{N}(n,\alpha)$ урвалын огтлолыг туршлагаар тодорхойлов.

Хэмжилтийг БНХАУ-ын Бээжин их сургуулийн Хүнд ионы физикийн институтийн Ван-де-Граафын 4.5 МэВ-ийн хурдасгуур дээр гүйцэтгэсэн ба Зураг 4.12-т харуулсан аппаратыг хэмжилтэд ашигласан. Бид энэ судалгаандаа түрүүчийн хэмжилтүүдэд хэрэглэж байсан, хоёр секц бүхий ионжилтийн камер (GIC)-ыг ашигласан.



Зураг 4.12. Хэмжилтийн аппаратын блок схем

Зураг 4.12-т харагдаж буй $^{238}\text{U}_3\text{O}_8$ нь нейтроны урсгалыг хэмжих, монитор хийхэд ашиглагдсан. Хэмжилтэнд Зураг 4.13-т харуулсан 4 дээжийг ашигласан.



Зураг 4.13. Дээжийн харагдах байдал

Шаралтыг дээж №1,2,3,4 гэх дарааллаар нейтроны тодорхой энерги бүрт гүйцэтгэсэн. Шаралтын нийт хугацаа ~ 70 цаг. Хэмжилтээс гарсан үр дүнгээ боловсруулан судалж буй урвалын огтлолуудын өгөгдлийг тодорхойлов. Хэмжилтийн утгыг TALYS-1.9 тооцооллын программаар бодсон болон бусад судлаачид, судалгааны төвүүдийн тодорхойлсон урвалын огтлолын утгатай харьцуулав (Хүснэгт 4.2-4.4, Зураг 4.14-4.15).

Хүснэгт 4.2. $^{58}\text{Ni}(n,\alpha)^{55}\text{Fe}$ урвалын огтлолын хэмжигдсэн утгыг TALYS-1.9 тооцооллын утгатай харьцуулсан байдал

E_n/MeV	cross section /mb		forward/backward ratio	
	measurement	calculation	measurement	calculation
4.50 ± 0.07	25.7 ± 1.3	24.6	0.96 ± 0.07	1.05
4.75 ± 0.07	28.7 ± 2.0	30.7	1.03 ± 0.10	1.05
5.00 ± 0.07	37.2 ± 2.2	36.8	1.03 ± 0.09	1.05
5.25 ± 0.08	44.6 ± 2.7	42.9	1.05 ± 0.09	1.05
5.50 ± 0.08	51.7 ± 3.0	48.7	1.04 ± 0.08	1.04

Хүснэгт 4.3. $^{60}\text{Ni}(n,\alpha)^{57}\text{Fe}$ урвалын огтлолын хэмжигдсэн утгыг TALYS-1.9 тооцооллын утгатай харьцуулсан байдал

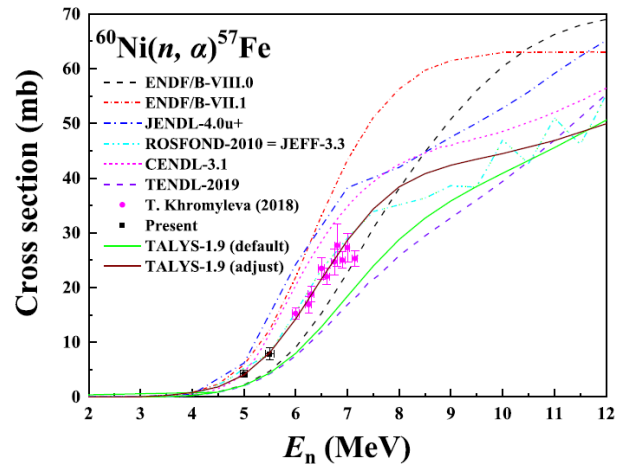
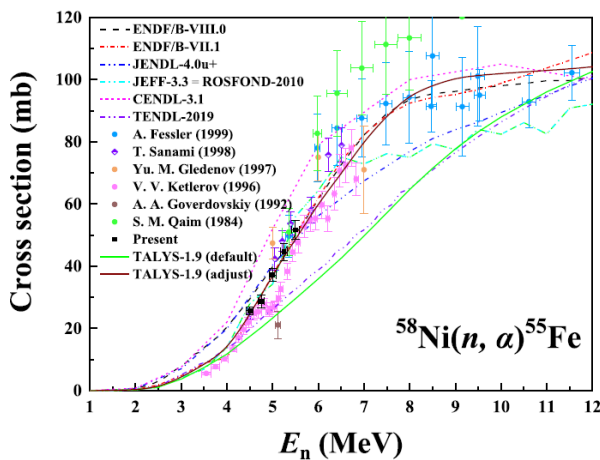
E_n/MeV	cross section /mb		forward/backward ratio	
	measurement	calculation	measurement	calculation
5.00 ± 0.07	4.22 ± 0.63	4.03	1.31 ± 0.31	1.06
5.50 ± 0.08	7.87 ± 1.09	8.10	1.32 ± 0.27	1.05

Хүснэгт 4.4. $^{61}\text{Ni}(n,\alpha)^{58}\text{Fe}$ урвалын огтлолын хэмжигдсэн утгыг TALYS-1.9 тооцооллын утгатай харьцуулсан байдал

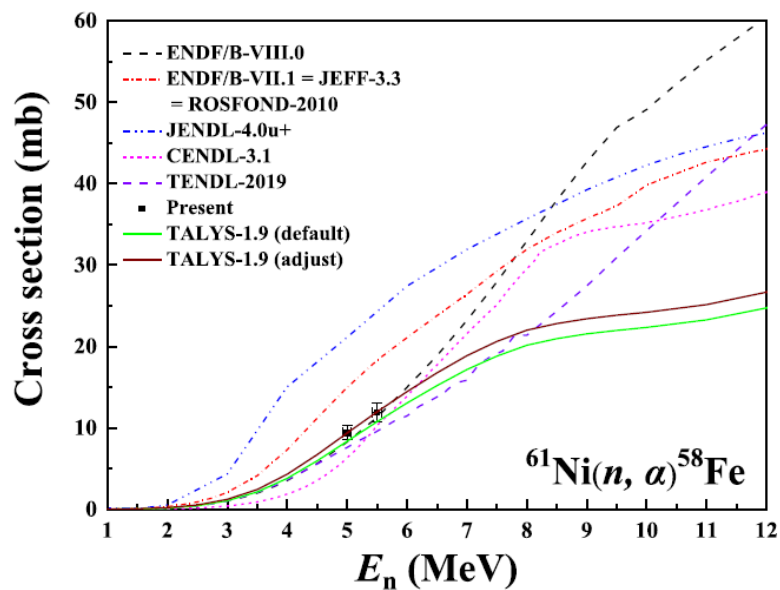
E_n/MeV	cross section /mb		forward/backward ratio	
	measurement	calculation	measurement	calculation
5.00 ± 0.07	9.40 ± 0.84	9.36	1.04 ± 0.13	1.05
5.50 ± 0.08	11.9 ± 1.1	12.0	1.00 ± 0.13	1.04

(a)

(b)



Зураг 4.14. (a) $^{58}\text{Ni}(n, \alpha)^{55}\text{Fe}$ болон (b) $^{60}\text{Ni}(n, \alpha)^{57}\text{Fe}$ урвалуудын огтлолын туршилагын утгууд ба судалгааны төвүүдийн үнэлгээ



Зураг 4.15. $^{61}\text{Ni}(n, \alpha)^{58}\text{Fe}$ урвалуудын огтлолын туршилагын утга ба судалгааны төвүүдийн үнэлгээ

Бид үр дүнгээ бусад судлаачдын туршилагын болон ENDF/B-VIII.0, ENDF/B-VII.1, JENDL-4.0u+, JEFF-3.3, ROSFOND-2010, CENDL-3.1, TENDL-2019 зэрэг тооцооны үр дүнгүүдтэй харьцуулан Зураг 4.14-4.15-уудад харуулав. $^{58}\text{Ni}(n, \alpha)^{55}\text{Fe}$ урвалын хувьд бидний үр дүн Fessler (1999, 5.36-19.4 МэВ), T.Sanami (1998, 4.51-6.51 МэВ), S.M.Qaim (1984, 5.36-9.49 МэВ) нарын болон ENDF/B-VII.1 үнэлгээний үр дүнтэй сайн таарч байна. Харин Gledenov (1997, 5.00-7.00) нарын утгаас 21.6%-иар бага, Goverdovsky (1992, 5.12 МэВ) нарын утгаас 79.1%-иар их байна. $^{60}\text{Ni}(n, \alpha)^{57}\text{Fe}$ урвалын хувьд туршилагын Khromyleva (2018, 6.00-7.15 МэВ)-ын ганцхан утга байна. Энэ утга нь бидний үр дүнтэй нэг муруй дээр дараалсан байдлаар оршиж байна. JEFF-3.3 (=ROSFOND-2010) үнэлгээний үр дүнтэй манай үр дүн сайн тохирч байна. $^{60}\text{Ni}(n, \alpha)^{57}\text{Fe}$ урвалын хувьд бусад судлаачдын хэмжсэн туршилагын өгөгдөл байхгүй.

Үнэлгээний утгууд бидний үр дүн хоорондоо зөрүүтэй байгаа нь харагдаж байна. Харин ENDF/B-VIII.0 үнэлгээний утгатай бидний үр дүн боломжийн таарч байна.

4.2.5. $^{35}\text{Cl}(n,\alpha)^{32}\text{P}$ урвалын туршлагын үр дүн

Хлор нь байгаль дээр маш өргөн тархсан бөгөөд бидний өдөр тутмын амьдралд зайлшгүй хэрэгцээтэй элемент юм. $^{35}\text{Cl}(n,\alpha)^{32}\text{P}$ урвал нь нейтроноор явагдах гол урвалын нэг. Учир нь, ^{35}Cl -ын байгалийн тархалт нь 75.77%. Энэ урвалын туршлагийн судалгааг хийснээр одоо мэдэгдэж буй урвалын огтлолын өгөгдлүүд болон судалгааны төвүүдийн үнэлгээнүүдийг шалгах, харьцуулах боломжтой. Үүнээс гадна, ^{32}P изотопыг ургамалд бордооны шингээлт хэрхэн явагдаж буй процессыг судлахад тэмдэгт элемент байдлаар ашигладаг. Мөн, хлор нь сүүлийн үеийн хайлмал давсан хөргүүртэй хурдан нейтроны реакторын хөргүүрийн элементэд ордог. $^{35}\text{Cl}(n,\alpha)^{32}\text{P}$ урвалын хувьд 1-4 МэВ энергийн мужид 8 туршлагын утга, 14 МэВ орчим энергийн мужид 5 туршлагийн утга EXFOR цөмийн өгөгдлийн сангаас олдож байна. Бид энэ ажлаар 3.3-5.3 МэВ энергийн мужид $^{35}\text{Cl}(n,\alpha)^{32}\text{P}$ урвалын огтлолыг туршлагаар тодорхойлох зорилт тавив.

Бид энэ судалгаандаа түрүүчийн хэмжилтүүдэд хэрэглэж байсан, хоёр секц бүхий ионжилтийн камер (GIC)-ыг ашигласан (Зураг 4.16). Шаралтыг Цөмийн Нэгдсэн Институтын Нейтрон физикийн лабораторийн Ван-де-Граафын EG-5 хурдасгуур дээр гүйцэтгэсэн.

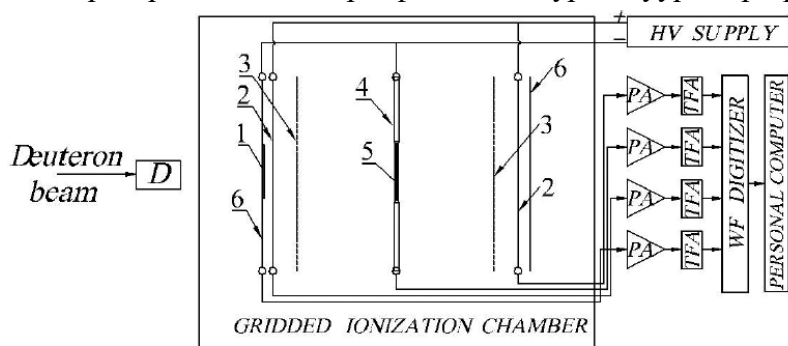
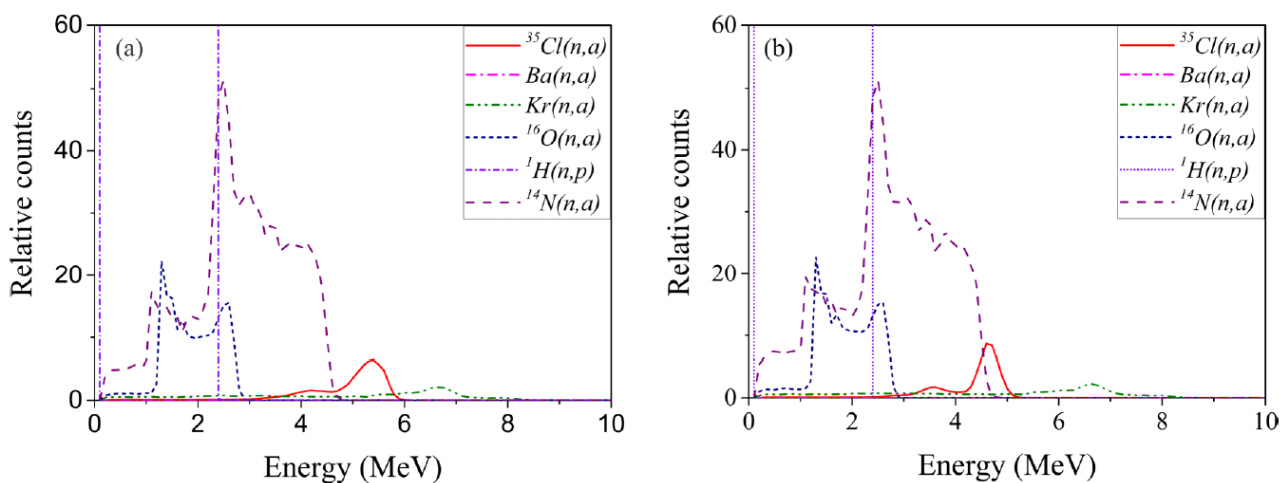


FIG. 1. Scheme of the experimental setup. 1- ^{238}U sample of fission chamber; 2,3,4-anode, grid, and cathode of the GIC, respectively; 5-samples on the sample changer; 6-Fission chamber cathode; PA-charge sensitive preamplifier; TFA-timing filter amplifier.

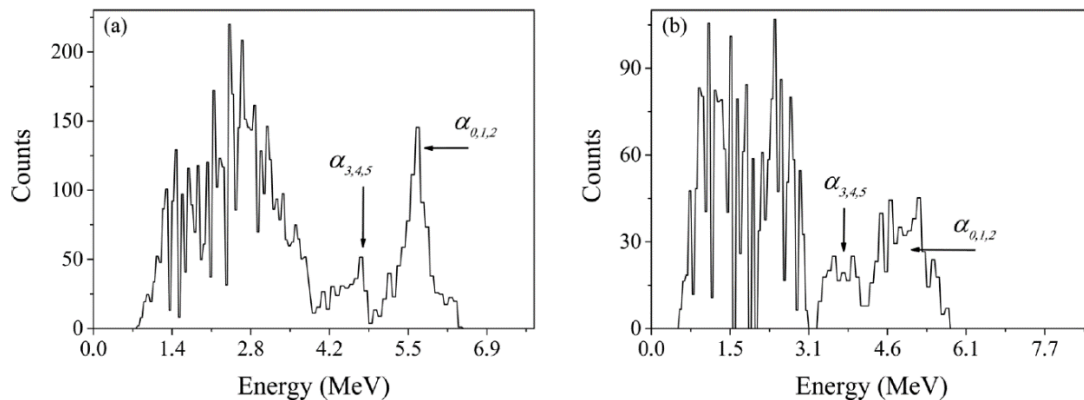
Зураг 4.16. Хоёр секц бүхий ионжилтийн камерын блок схем

Шарлагад өндөр цэвэршилттэй NaCl ба BaCl₂ дээжүүдийг ашигласан ба 0.1мм зузаантай, 48мм диаметртэй тантан аравч дээр суулгасан. Дээжээс $^{35}\text{Cl}(n,\alpha)$ урвалын үед үүссэн бөөмс гэдрэг ба урагш зэрэг гарах ёстой. Эдгээр бөөмсийг давхцуулан бүртгэснээр уг урвалыг найдвартай бүртгэх боломж бүрдэж байгаа юм. Урвалаас гарах бөөмсийн спектрийг найдвартай зөв боловсруулалт хийхийн тулд эхлээд тусгай программын тусламжтайгаар загварчлан симуляци хийж гарган авсан 2 хэмжээст спектрийг урагш ба хойш гарах бөөмсийн (саад болох урвалаас гарах бөөмсийн тооцсон) хувьд Зураг 4.17-д харуулав.



Зураг 4.17. $E_n = 5.0$ МэВ энергитэй нейтроноор явагдах $^{35}\text{Cl}(n,\alpha)^{32}\text{P}$ урвалын хоёр хэмжээст спектр (онолын тооцооны үр дүн): (a) урагш болон (b) арагш гарах тохиолдлууд

Дээрх симуляцийн тооцоогоо ашиглан $^{35}\text{Cl}(n,\alpha)^{32}\text{P}$ урвалаас гарсан бөөмсийн туршлагын спектрт боловсруулалт хийж буй байдлыг Зураг 4.18-д харуулав.



Зураг 4.18. $E_n = 5.3$ МэВ энергитэй нейтроноор явагдах $^{35}\text{Cl}(n,\alpha)^{32}\text{P}$ урвалын хоёр хэмжээст анодын спектр (турилагаар хэмжсэн үр дүн): (a) урагш болон (b) арагш гарах тохиолдлууд

Ийнхүү дээрх спектрт бүртгэгдсэн бөөмсийн тоогоо ашиглан бид судалж буй урвалын огтлолыг тооцоолон гаргав (Хүснэгт 4.5).

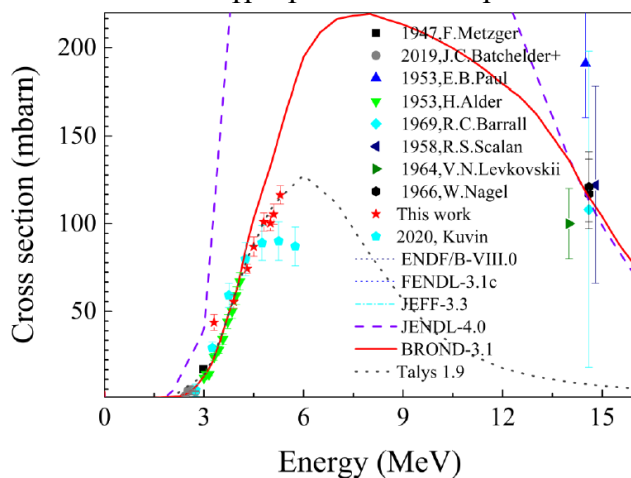
Хүснэгт 4.5. Хэмжигдсэн $^{35}\text{Cl}(n,\alpha)^{32}\text{P}$ урвалын огтлолыг TALYS-1.9 тооцооллын утгатай харьцуулсан байдал

Energy (MeV)	Samples (thickness, $\mu\text{g}/\text{cm}^2$)	Cross sections (mbarn)				
		Forward	Backward	Total		TALYS-1.9
				Experiment	TALYS-1.9	
3.3	NaCl(302, ^a 289 ^b)	24.2 ± 3.4	19.4 ± 3.0	43.6 ± 4.5	43.6 ± 4.5	24
3.9	NaCl(302, ^a 289 ^b)	28.6 ± 3.0	26.9 ± 2.5	55.5 ± 3.9	55.5 ± 3.9	57.4
4.3	NaCl(707, ^a 667 ^b) NaCl(302, ^a 289 ^b) BaCl ₂ (125, ^a 108 ^b)	35.7 ± 3.7	37.6 ± 3.9	73.3 ± 5.4	74.3 ± 2.8	79.9
		38.6 ± 4.0	36.7 ± 3.8	75.3 ± 5.5		
		40.3 ± 4.2	36.3 ± 3.8	76.6 ± 5.6		
		38.0 ± 3.5	32.7 ± 3.0	70.7 ± 4.6		
4.5	NaCl(302, ^a 289 ^b) BaCl ₂ (125, ^a 108 ^b)	40.5 ± 6.8	35.1 ± 6.0	75.6 ± 9.0	86.9 ± 5.5	87.7
		47.9 ± 4.4	38.4 ± 3.5	86.3 ± 5.6		
4.8	NaCl(302, ^a 289 ^b) BaCl ₂ (125, ^a 108 ^b)	44.2 ± 6.3	43.3 ± 7.3	87.5 ± 9.6	101.0 ± 5.1	100.9
		57.3 ± 5.2	44.7 ± 4.0	102.0 ± 6.5		
5.0	NaCl(302, ^a 289 ^b) NaCl(707, ^a 667 ^b)	48.3 ± 4.7	52.3 ± 6.5	100.6 ± 8.0	100.3 ± 4.2	108
		58.1 ± 4.7	43.4 ± 4.5	101.5 ± 6.5		
5.1	NaCl(302, ^a 289 ^b) BaCl ₂ (125, ^a 108 ^b)	52.4 ± 3.6	46.7 ± 4.2	99.1 ± 5.5	105.4 ± 5.8	110.1
		61.8 ± 6.2	45.4 ± 4.5	107.2 ± 7.7		
5.3	NaCl(302, ^a 289 ^b) BaCl ₂ (125, ^a 108 ^b)	53.3 ± 5.9	50.4 ± 6.6	103.7 ± 8.8	116.4 ± 5.2	114.8
		59.6 ± 5.4	46.6 ± 4.3	106.2 ± 6.9		
		60.5 ± 5.0	66.1 ± 6.1	126.6 ± 7.9		

^aFor the forward cross sections.

^bFor the backward cross sections.

Бид үр дүнгээ бусад судлаачдын туршлагын болон ENDF/B-VIII.0, JENDL-4.0, JEFF-3.3, FENDL-3.1c, BROND-3.1, TALYS-1.9 зэрэг тооцооны үр дүнгүүдтэй харьцуулан Зураг 4.19-д харуулав. $^{35}\text{Cl}(n,\alpha)^{32}\text{P}$ урвалын хувьд бидний үр дүн ENDF/B-VIII.0, FENDL-3.1c, JEFF-3.3, BROND-3.1 зэрэг судалгааны төвүүдийн үнэлгээний утгатай 3.9-4.3 МэВ нейтроны энергийн мужид таарч байна. Мөн, бидний үр дүн 4.8-5.3 МэВ нейтроны энергийн мужид ENDF/B-VIII.0, FENDL-3.1c, JEFF-3.3, BROND-3.1 зэрэг судалгааны төвүүдийн үнэлгээний утгаас бага байгаа нь харагдаж байна. JENDL-4.0 үнэлгээний утга бусад үнэлгээний утга болон туршлагын утгуудаас хамаагүй өндөр утга өгч байгааг зургаас харж болно. Үүнээс гадна, бидний үр дүн TALYS-1.9 тооцооллын үр дүнтэй сайн таарч байна.



Зураг 4.19. $^{35}\text{Cl}(n,\alpha)^{32}\text{P}$ урвалын огтлолын туршлагын утгууд ба судалгааны төвүүдийн үнэлгээ

4.3. Дүгнэлт

1. Бээжин их сургуулийн Хүнд ионы физикийн институтийн болон Цөмийн шинжилгээний нэгдсэн институтын Нейтрон физикийн лабораторийн Ван де Граафын хурдасгуур дээр бор-10, никель-58, 60, 61, хлор-35 зэрэг изотопууд дээр хурдан нейтроноор явагдах (n,α) урвалын туршлагын судалгаа явуулж, нейтроны энергийн 3.3-5.3 МэВ мужид тухайн изотопуудын (n,α) урвалын огтлолыг тодорхойлов.
2. Хэмжилтийн үр дүнгээ дэлхийн судалгааны төвүүдийн үнэлгээ, бусад судлаачдын туршлагын үр дүн болон TALYS кодыг ашиглан тооцоолсон үр дүнтэй харьцуулсан анализ хийж, зохих дүгнэлт гаргав.

Энэхүү бүлэгт хийгдсэн ажлуудыг төслийн үр дүнгийн даалгаврын 5-р даалгавар (*Зарим изотопыг янз бүрийн энергитэй сум бөөмөөр бөмбөгдөх үед явагдах цөмийн урвалын туршлагын судалгаа явуулж, шинэ мэдээлэл гарган авах*)-г тусгагдсан ажлын хүрээнд гүйцэтгэв.

Тус ажлын хүрээнд хэвлүүлсэн бүтээл:

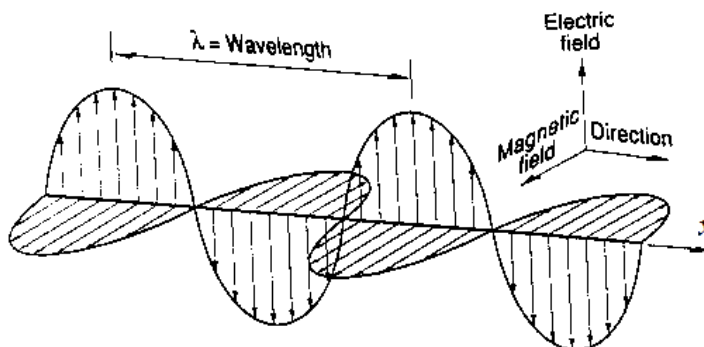
1. Huaiyong Bai, Haoyu Jiang, Yi Lu, Zengqi Cui, Jinxiang Chen, Guohui Zhang, Yu.M.Gledenov, M.V.Sedysheva, G.Khuukhenkhuu, Xichao Ruan, Hanxiong Huang, Jie Ren and Qiwen Fan
 $^{54,56}\text{Fe}(n,\alpha)^{51,53}\text{Cr}$ cross sections in the MeV region
Physical Review C, N99, 2019, p.024619-1-7.
2. E. Sansarbayar, Yu. M. Gledenov, I. Chuprakov, G. Khuukhenkhuu, G. S. Ahmadov, L. Krupa, Guohui Zhang, Haoyu Jiang, Zengqi Cui, Yiwei Hu, Jie Liu, N. Battsooj, I. Wilhelm, M. Solar, R. Sykora, and Z. Kohout
Cross Sections for the $^{35}\text{Cl}(n,\alpha)^{32}\text{P}$ Reaction in the 3.3–5.3 MeV Neutron Energy Region
Physical Review C **104**, 044620, 2021 (IF=3.88)
3. Haoyu Jiang, Zengqi Cui, Yiwei Hu, Jie Liu, Jinxiang Chen, Guohui Zhang, Yu.M.Gledenov, E.Sansarbayar, G.Khuukhenkhuu, L.Krupa, I.Chuprakov
Cross-Section Measurements for $^{58,60,61}\text{Ni}(n,\alpha)^{55,57,58}\text{Fe}$ Reactions in the 4.50 – 5.50 MeV Neutron Energy Region.
Chinese Physics C, 2020, v44, No.11, pp.114102-1-12
4. Huaiyong Bai, Zhimin Wang, Haoyu Jiang, Zengqi Cui, Yiwei Cui, Jinxiang Chen, Guohui Zhang, Yu.M.Gledenov, M.V.Sedysheva, G.Khuukhenkhuu
Cross sections of the $^{10}\text{B}(n,\alpha)^7\text{Li}$ two-body and $^{10}\text{B}(n,t2\alpha)$ three-body reactions at 4.0, 4.5 and 5.0 MeV
European Physical Journal. A, 2019, v.55, N219.
5. Yu.M.Gledenov, M.V.Sedysheva, L.Krupa, E.Sansarbayar, G.Khuukhenkhuu, Haoyu Jiang, Huaiyong Bai, Zengqi Cui, Jinxiang Chen, Guohui Zhang
Cross Sections of the $^{144}\text{Sm}(n,\alpha)^{141}\text{Nd}$ Reaction at 5.5 and 6.5 MeV.
(Proceedings of the XXVI International Seminar on Interaction of Neutrons with Nuclei, ISINN-26, May 28-June 1, 2018, Xi'an, China), 2019, p.63-71.

6. Haoyu Jiang, Huaiyong Bai, Yi Lu, Zengqi Cui, Jinxiang Chen, Guohui Zhang, Yu.M.Gledenov, M.V.Sedysheva, G.Khuukhenkhuu
Determination of the ^{232}Th Nucleus Number Using Small Solid Angle Method.
(Proceedings of the XXVI International Seminar on Interaction of Neutrons with Nuclei, ISINN-26, May 28-June 1, 2018, Xi'an, China), 2019, p.198-204.
7. Guohui Zhang, Huaiyong Bai, Haoyu Jiang, Zengqi Cui, Yi Lu, Yiwei Hu, Jinxiang Chen, Yu.M.Gledenov, M.V.Sedysheva, G.Khuukhenkhuu
Measurements of Neutron-Induced Light-Charged Particle Emission 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.01001-1-5.

V БҮЛЭГ. НИЛ СПЕКТРТЭЙ ГАММА-ЦАЦРАГААР ЯВАГДАХ ЦӨМИЙН УРВАЛЫН ТУРШЛАГЫН СУДАЛГАА

5.1. Удиртгал

Гамма квант нь гэрлийн нэгэн адил цахилгаан соронзон долгион учраас түүгээр явагдах урвал нь цахилгаан соронзон харилцан үйлчлэлээр явагддаг. Гамма-квантыг гэрлийн фотонтой адилтган, түүгээр явагдах урвалыг цөмийн фото-урвал гэдэг. Цахилгаан соронзон долгион гэдэг нь орчинд цахилгааны ба соронзоны векторууд хамтдаа тархах үзэгдэл юм. Энэ 2 вектор x тэнхлэгийн дагуу c хурдтай тарж байгааг Зураг 5.1-т харуулав.



Зураг 5.1. Цахилгаан соронзон долгионы тархалт

Цөмийн фото-урвалыг явуулахын тулд тухайн цөм дээр гамма квантыг тусгана. Энэ үед цөмд цахилгаан ба соронзон векторууд буюу цахилгаан соронзон хүч үйлчилнэ. Цөм нь протон p^+ , нейтрон n^0 -оос тогтдог. n^0 цэнэггүй учраас цахилгаан оронгийн нөлөөнд орохгүй, p^+ нь нэмэх цэнэгтэй учраас цахилгаан оронгийн нөлөөнд орно. Харин протон ба нейтрон нь хоёул соронзон моменттой. Иймээс соронзон оронгийн нөлөөнд хоёул орно. Гэхдээ цахилгаан оронгийн хүч нь соронзон оронгийн хүчнээс олон дахин их байдаг. Иймээс цөмийн фото-урвалын үед цөмд үйлчлэх цахилгаан соронзон оронгийн хүчнээс зөвхөн цахилгааны харилцан үйлчлэлийг авч үзэхэд хангалттай байдаг. Анх 1933 онд Английн эрдэмтэн Чэдвик, Голдхабер нар дейтоныг гамма квантаар шарж задлах цөмийн фото-урвалыг явуулжээ. Бид цөмийн фото-урвалын хэд хэдэн чиглэлийн судалгааг хийж, тодорхой үр дүнгүүдийг гарган авав. Үүнд:

- Анхны фото-урвалыг явуулсанаас хойшхи 80 гаруй жилийн хугацаанд дэлхийн олон судалгааны төвүүдэд их хэмжээний мэдээлэл, өгөгдлүүдийг гарган авсан байдаг. Бид тэдгээр өгөгдөл мэдээллүүдийг эмхэтгэн системчилсэн анализ хийв. Ийм судалгааг хийснээр тухайн урвалын мөн чанарыг таних, зүй тогтлыг гарган авах цаашдын судалгаанд ашиглахад чухал ач холбогдолтой байдаг.
- Фото-идэвхжилийн анализаар сорьцон дахь элементийн найрлагыг химийн ямар нэгэн урвалж хэрэглэлгүйгээр шууд тодорхойлж болдог. Өөрөөр хэлбэл, бодисыг химийн аргаар задлахгүйгээр, өндөр мэдрэх чадвар бүхий цацрагийн спектрометрүүдийг ашиглан нэгэн зэрэг олон элементийн хувьд анализ хийдэг. Энэ анализад абсолют болон харьцангуй аргуудыг ашиглан тоон анализ хийдэг. Абсолют аргын хувьд цөмийн урвал

явуулж буй сум бөөмийн урсгалыг эсвэл манай тохиолдолд буюу фото-идэвхжилийн анализад гамма цацрагийн урсгалыг тодорхойлсон байх шаардлагатай болдог. Абсолют аргаар урсгал тодорхойлох нь моно-энергитэй гамма цацрагийн хувьд түүний урвалын огтлол нь мэдэгдэж байвал тодорхойлох боломжтой. Харин үргэлжилсэн спектртэй саатлын гамма цацрагаар явагдах цөмийн фото-урвалын хувьд гамма цацрагийн урсгалыг тодорхойлох нь их төвөгтэй байдаг. Энэ тохиолдолд харьцангуй аргыг ашиглах нь илүү хялбар бөгөөд тохиромжтой. Харьцангуй аргын хувьд харьцуулж буй стандарт дээж маань сорьцонд байгаа элементтэй ижилхэн элементийг мэдэгдэж буй хэмжээгээр агуулж байх шаардлагатай байдаг. Бид стандарт нэг дээжээр сорьцуудын агуулгыг тодорхойлох боломжийг судалсан. Өөрөөр хэлбэл харьцуулж буй дээж заавал сорьцтой ижилхэн бүрэлдэхүүн элемент буюу изотоптой байх шаардлагагүй бөгөөд агуулга нь мэдэгдэж буй өөр ямар нэгэн элемент агуулсан дээж нь стандарт дээж болох боломжтой гэдгийг харуулахыг зорьсон. Учир нь стандарт дээж нь ховор байдгаас гадна өндөр үнэтэй байдаг тул ийм судалгаа нь чухал ач холбогдолтой юм.

- Манай улсын хувьд цөмийн эрчим хүчний бус технологийг 1960-аад оноос хөгжүүлж ирсэн ба үүнд геологи уул уурхай, материал судлал, хөдөө аж ахуй зэрэг олон салбарт ашиглаж байгаа ч хамгийн өндөр үр дүнтэй байгаа нь анагаах ухааны салбар юм. Үүгээрээ ч эрчимтэй хөгжиж, улсын болон хувийн эрүүл мэндийн байгууллагууд цөмийн технологийн нарийн багаж төхөөрөмжүүдийг ашиглах болж, цацраг идэвхт изотопын эрэлт хэрэгцээ ихсэж байна. Манай орны хувьд эдгээр изотопуудыг үйлдвэрлэдэггүй гадны улсаас импортлож авдаг. Энд голлон урд хөрш БНХАУ болон Солонгос улсаас тодорхой хугацааны давтамжтай агаарын тээврээр авч ашигладаг. Энэ нь тээвэрлэлтийн зардал өндөр, хагас задралын үе богинотой зарим изотопуудын хувьд замдаа задарч эрчим нь сулрах, цэвэршилт тодорхой бус байх болон нийлүүлэлт тогтвортой биш зэрэг бэрхшээлтэй байдаг. Иймээс бид бага чадлын судалгааны реактор болон хурдасгуур зэрэг төхөөрөмж дээр анагаах ухааны эмчилгээ, оношлогоонд шаардлагатай богино наст зарим изотопыг гарган авах боломжийг судалсан.

Эдгээр ажлуудыг бид ШУТС-гийн санхүүжилтээр 2015-2017 онуудад хэрэгжсэн “Цөмийн задрал, урвалын механизм” сэдэвт суурь судалгааны хүрээнд гүйцэтгэн төслийн тайланд оруулсан. Энэ удаад бид “Цөмийн кластер бүтэц ба урвалын судалгаа” (2019-2021) суурь судалгааны төслийн зорилтод тусгагдсан (*Зарим изотопыг янз бүрийн энергитэй сум бөөмөөр бөмбөгдөх үед явагдах цөмийн урвалын туршилагын судалгаа явуулж, шинэ мэдээлэл гарган авах*) ажлын хүрээнд нил спектртэй гамма цацрагаар алтны цөмийн изомер төлвийг өдөөж тодорхойлох ажлыг гүйцэтгэх зорилт тавив.

Гамма цацрагаар өдөөгдөх төлвийн шинж чанарыг судалснаар цөмийн урвалын механизм ба энергийн түвшний бүтцийн талаарх чухал мэдээллийг гарган авах боломжтой. Цөмийн изомер төлөв гэдэг нь харьцангуй урт хугацааны турш орших цөмийн өдөөгдсөн төлөв юм. Ердийн цөмийн өдөөгдсөн төлвийн орших хугацаа дунджаар $\tau \approx 10^{-13}$ - 10^{-12} сек байдаг. Харин цөмийн изомер төлвийн орших хугацаа $\tau \approx 10^{-9}$ сек ба үүнээс дээш байдаг. Энэ чиглэлийн судалгааг хийх нэг чиглэл нь изомер харьцаа гэх хэмжигдэхүүнийг тодорхойлоход оршдог. Изомер харьцаа нь изомер төлөв үүсэх урвалын огтлол ба үндсэн төлөв үүсэх урвалын огтлолын харьцаа $IR = \frac{\sigma_m}{\sigma_g}$ -гаар тодорхойлогддог.

Бид энэ ажлаар МУИС-ийн ЦФСТ-ийн электроны цикл хурдасгуур Микротрон МТ-22-ын нил спектртэй саатлын гамма цацрагаар өдөөгдсөн цөмийн изомер төлвийг судлах туршлагын аргазүйг боловсруулж, эзэмших, түүнийгээ шалгах үүднээс өөрсдийн боломжиндоо үндэслэн алтыг судлах объект болгон сонгов. Түүнээс гадна алтны ^{196m}Au изомер төлвийг 22 МэВ энергитэй саатлын гамма цацраг ашиглан судалсан ажил ховор учир бидний гарган авсан үр дүн цаашдын судалгаанд тодорхой нэмэлт мэдээлэл болно.

5.2. Изомер харьцааг судлах онолын үндэс

Судлах дээжийг моно-энергитэй гамма цацрагаар шарж буй тохиолдолд изомер харьцаа нь урвалын огтлолуудын харьцаагаар тодорхойлогддог. Харин цөмийг нил спектртэй саатлын гамма цацрагаар өдөөж байгаа тохиолдолд изомер харьцаа нь тухайн цөм изомер ба үндсэн төлөвтөө үүсэх урвалын гаралтын харьцаагаар тодорхойлогдоно:

$$IR = \frac{Y_m}{Y_g}. \quad (5.2.1)$$

Энэ үед урвалын гаралт нь:

$$Y_{m,g} = N_0 \int_{E_{th}^{m,g}}^{E_{\max}} \sigma_{m,g}(E) \phi(E, E_{\max}) dE \quad (5.2.2)$$

байна. Энд: N_0 нь бай цөмийн тоо; $\sigma_{m,g}(E)$ нь изомер ба үндсэн төлөвтөө үүсэх урвалын огтлол; $\phi(E, E_{\max})$ нь саатлын гамма цацрагийн урсгал; $E_{th}^{m,g}$ нь урвалын босго энерги; E_{\max} нь саатлын гамма цацрагийн максимум энерги.

Саатлын гамма цацрагаар дээжийг шарахад нэгж хугацаанд үүсэх цацраг идэвхт цөмийн тооны өөрчлөлт дараах тэгшитгэлээр илэрхийлэгдэнэ:

$$\frac{dN_m}{dt} = Y_m - \lambda_m N_m, \quad (5.2.3)$$

$$\frac{dN_g}{dt} = Y_g - \lambda_g N_g + P \lambda_m N_m. \quad (5.2.4)$$

Энд: N_m , N_g нь изомер ба үндсэн төлөвтөө үүсч байгаа цацраг идэвхт цөмийн тоо; λ_m , λ_g нь тэдгээрийн задралын тогтмол; P нь изомер шилжилтийн коэффициент (изомер төлвөөс үндсэн төлөврүү шилжих магадлал).

Шарсан (t_1), хөргөсөн (t_2), хэмжсэн хугацаа (t_3), детекторын бүртгэмж ($\varepsilon_{m,g}$), гамма шугамын эрчим ($I_{m,g}$) зэргийг оролцуулан тооцож (5.2.3) ба (5.2.4) тэгшитгэлийн шийдийг олоод изомер харьцааг дараах байдлаар тодорхойлж болно:

$$IR = \frac{Y_m}{Y_g} = \frac{\Lambda_2^g \Lambda_5^g \Lambda_8^g}{\frac{S_g \varepsilon_m I_m}{S_m \varepsilon_g I_g} \Lambda_3^m \Lambda_6^m \Lambda_9^m - \Lambda_1^{m,g} \Lambda_5^g \Lambda_8^g - \Lambda_3^m \Lambda_4^{m,g} \Lambda_8^g - \Lambda_3^m \Lambda_6^m \Lambda_7^{m,g}}. \quad (5.2.5)$$

Энд: $S_{m,g}$ нь детекторт бүртгэгдсэн тухайн гамма шугамын талбай; бусад тэмдэглэгээнүүдийг дараах илэрхийллүүдээр олно:

$$\Lambda_1^{m,g} = \frac{P}{\lambda_g} \left[1 - \frac{\lambda_m \lambda_g}{\lambda_m - \lambda_g} \left(\frac{e^{-\lambda_g t_1}}{\lambda_g} - \frac{e^{-\lambda_m t_1}}{\lambda_m} \right) \right]; \quad \Lambda_2^g = \frac{1}{\lambda_g} (1 - e^{-\lambda_g t_1}); \quad \Lambda_3^m = \frac{1}{\lambda_m} (1 - e^{-\lambda_m t_1});$$

$$\Lambda_4^{m,g} = P \frac{\lambda_m}{\lambda_m - \lambda_g} \left(e^{-\lambda_g t_2} - e^{-\lambda_m t_2} \right); \quad \Lambda_5^g = e^{-\lambda_g t_2}; \quad \Lambda_6^m = e^{-\lambda_m t_2};$$

$$\Lambda_7^{m,g} = P \left[1 - \frac{\lambda_m \lambda_g}{\lambda_m - \lambda_g} \left(\frac{e^{-\lambda_g t_3}}{\lambda_g} - \frac{e^{-\lambda_m t_3}}{\lambda_m} \right) \right]; \quad \Lambda_8^g = 1 - e^{-\lambda_g t_3}; \quad \Lambda_9^m = 1 - e^{-\lambda_m t_3}.$$

(5.2.5) томьёоны Λ_i – нуудыг хооронд нь үржүүлэн, зохих үйлдлүүдийг гүйцэтгэн хялбарчлахад:

$$IR = \frac{Y_m}{Y_g} = \left[\frac{\lambda_g F_m}{\lambda_m F_g} \left(\frac{S_g \varepsilon_m I_m}{S_m \varepsilon_g I_g} - \frac{P \lambda_g}{\lambda_g - \lambda_m} \right) + \frac{P \lambda_m}{\lambda_g - \lambda_m} \right]^{-1} \quad (5.2.6)$$

Энд: $F_{m,g} = (1 - e^{-\lambda_{m,g} t_1}) e^{-\lambda_{m,g} t_2} (1 - e^{-\lambda_{m,g} t_3})$.

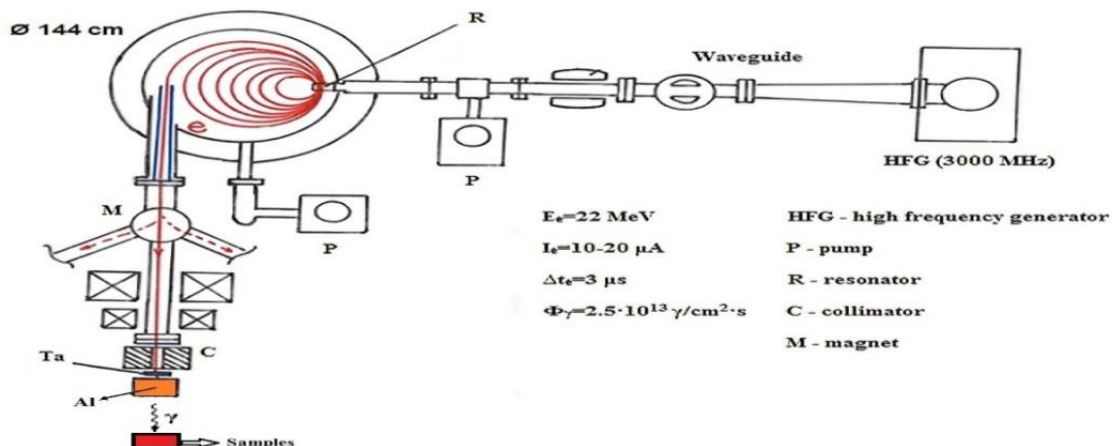
2006 онд *Письма в ЭЧАЯ* сэтгүүлд хэвлүүлсэн Tran Duc Theip нарын ажилд байгаа (5.2.5)-тай төстэй томьёонд хуваарь дахь 3-р гишүүн $\Lambda_3 \Lambda_4 \Lambda_8$ -ийг $\Lambda_3 \Lambda_5 \Lambda_8$ гэж бичсэн нь алдаатай юм шиг байна. Харин бидний гаргасан (5.2.6) томьёо нь 1998 онд *Physical Review C*-д хэвлүүлсэн А.Р.Тончев нарын болон 2012 онд *Communications in Physics* сэтгүүлд хэвлүүлсэн Pham Duc Khue нарын ажлуудад байгаа изомер харьцааны томьёотой таарч байгаа тул уг томьёог зөв гэж үзэн энэ ажилд ашиглалаа.

5.3. Нил спектртэй гамма цацрагаар алтны цөмийн изомер төлвийг өдөөх туршлагын аргазүй

Цөмийн урвалыг 2 аргаар судалдаг. Үүнд:

1. Шууд бүртгэх арга: Цөмийн урвалаас үүсэн гарч буй бөөм, цөм 2-ын аль нэгийг эсвэл хоёуланг бүртгэнэ. Ихэвчлэн урвалаас гарах бөөмийг бүртгэдэг. Энэ аргаар урвалаас гарах бөөмийн энерги ба өнцгөн түгэлтийг хэмжиж болдог боловч өндөр энергитэй урвалаас гарах бөөмийн урсгалд ихэнх детектор эвдрэх буюу ажиллагаагүй болох талтай. Мөн энэ арга нь харьцангуй өртөг өндөртэй нилээд төвөгтэй боловч гарган авсан үр дүн нь мэдээлэл ихтэй байдаг.
2. Идэвхжүүлэх арга: Цөмийн урвалаас үүссэн бөөмийг шууд бүртгэхгүйгээр дээжид үүссэн цөмийг судалдаг. Үүний тулд үүссэн цөм цацраг идэвхтэй байх шаардлагатай. Хэрэв үүссэн цөм цацраг идэвхгүй байвал энэ аргыг ашиглаж болохгүй. Мөн урвалаас гарах бөөмийн өнцгөн түгэлтийг хэмжиж болдоггүй зэрэг сул талтай боловч энэ арга нь харьцангуй хялбар, детекторыг эвдрэлд оруулдаггүй сайн талтай.

Энэ ажилд бид идэвхжүүлэх аргыг ашиглав. Энэ арга нь идэвхжүүлэх, үүссэн цөмийн задралыг судлах гэсэн үндсэн 2 үе шаттай. Идэвхжүүлэх шатанд судлах гэж буй дээжийг цацрагаар шарж урвал явуулан цацраг идэвхт цөм үүсгэнэ. Задралыг судлах шатанд дээжид үүссэн цацраг идэвхт цөмөөс гарах цацрагийг детектороор бүртгэнэ. Дээжийг шарах гамма цацрагийн үүсгүүр болгон МУИС-ийн ЦФСТ-ийн электроны цикл хурдасгуур Микротрон МТ-22-ыг ашиглав. Микротрон МТ-22-ын бүдүүвч зургыг Зураг 5.2-т харуулав. Дээжид үүссэн цацраг идэвхт цөмөөс гарах гамма цацрагийг бүртгэхэд ЦФСТ-д ашиглагдаж буй цэвэр Ge детектортой гамма спектрометрийг ашиглав.

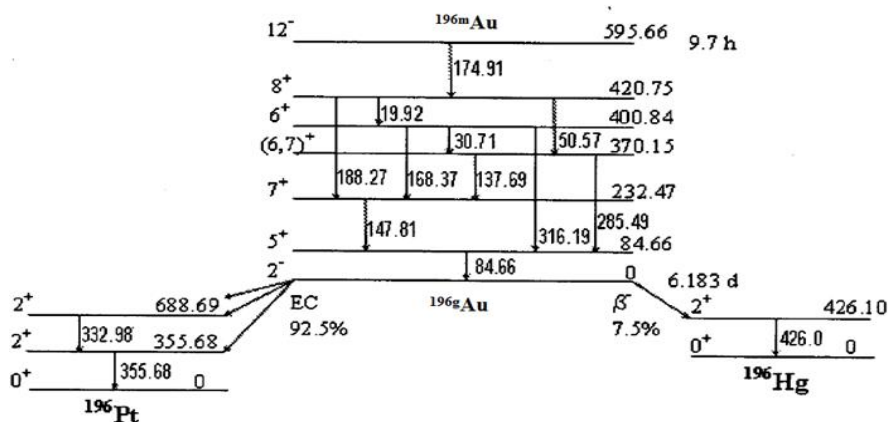


Зураг 5.2. Микротрон МТ-22-ын бүдүүвч схем

Au1, Au2, Au3, Au4 гэж дугаарласан, тус бүр 0.0373г, 0.0476г, 0.1442г ба 0.3409г масстай, ойролцоогоор 1см орчим диаметртай, 0.2мм зузаантай алтны 4 дээжийг бэлдэж ашиглав. $^{197}\text{Au}(\gamma, n)^{196m,g}\text{Au}$ урвалын өгөгдлийг Хүснэгт 5.1-т, $^{196m,g}\text{Au}$ цөмийн задралын схемийг Зураг 5.3-т тус тус харуулав.

Хүснэгт 5.1. $^{197}\text{Au}(\gamma, n)^{196m,g}\text{Au}$ урвалын өгөгдөл

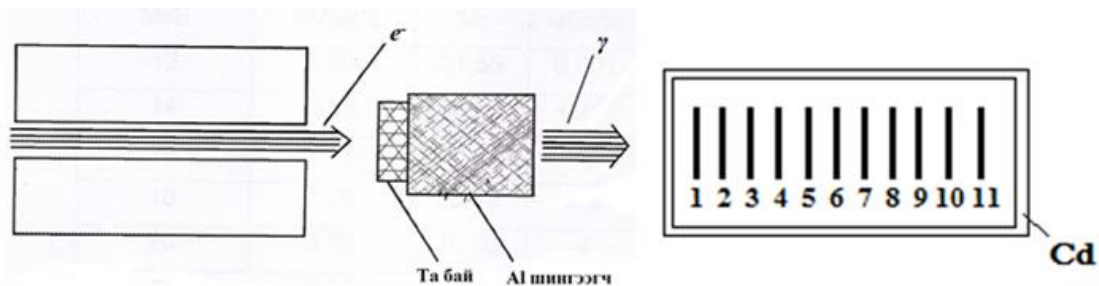
Бай цөм	Үүссэн цөм	Спин J^π	$T_{1/2}$	E_{th} , МэВ	E_γ , кэВ (гаралт, %)	P, %
^{197}Au (100%)	^{196m}Au	12^-	9.7ц	8.68	148 (43.5)	100
					188 (37.4)	
	^{196g}Au	2^-	6.2х	8.09	333 (22.9)	
					426 (7.2)	



Зураг 5.3. $^{196m,g}\text{Au}$ задралын схем

Микротрон МТ-22 хурдасгуурт 22 МэВ энергитэй болтол хурдассан электроныг 2мм зузаантай Тантал (Та)-байд тусган саатлын гамма цацрагийг үүсгэдэг. Нимгэн Та-бай дээр тусч буй зарим

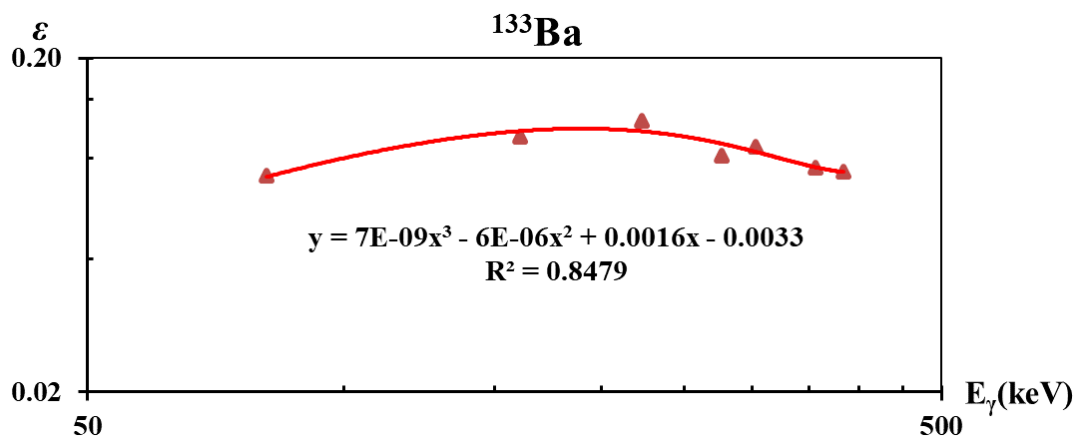
электрон нэвтрэн өнгөрдөг учраас тэдгээрийг шингээхийн тулд 25мм зузаантай хөнгөн цагаан (Al)-ыг Та-байны ар талд байрлуулсан байдаг. Энэ нь гамма цацрагийн гаралт ба эрчимд бараг нөлөөлөхгүй. Микротрон МТ-22 дээр 2 удаа шаралт хийсэн бөгөөд 1-р шаралтанд Au1, Au2 дээжийг зэс (Cu) монитор ба Индий (In) дээжтэй хамт 2 цаг, 2-р шаралтанд Au3, Au4 дээжийг Cu монитор ба In дээжтэй хамт 2 цаг 10 мин тус тус гамма цацрагаар шарав. Дээрх 2 шаралтын үед Микротрон МТ-22-ын электроны дундаж гүйдэл 3мкА байв. Микротрон МТ-22-ын саатлын гамма цацрагийн сувагт дээж ба монитрыг Зураг 5.4-т харуулсан схемийн дагуу байрлуулав.



Зураг 5.4. Микротроны гамма суваг дахь дээжийн байрлал

Энд: 1,3,5,7,9,11 – Cu монитор; 2,4 – Au дээж; 6, 8,10 – In дээж.

Энэ ажлаар зөвхөн Au-ны дээжүүд дээр боловсруулалт хийсэн үр дүнг харуулах бөгөөд In дээжийг цаашид судлах зорилготойгоор хамт шарсан болно. Микротроны гамма цацрагийн суваг нь гадуураа хар тугалгаар хамгаалагдсан байдаг тул түүнтэй гамма цацраг харилцан үйлчилснээр (γ, n) , $(\gamma, 2n)$ зэрэг фото-урвалууд явагдах боломжтой. Эндээс үүсч буй фото-нейтроноос дээжийг хамгаалах зориулалтаар металл кадмий (Cd)-гаар дээжүүдээ боож шарсан. 2 шаралтанд дээжүүдийн байрлал, шаралтын геометр зэрэг бүх үзүүлэлтүүд нь ижил байв. Микротрон МТ-22-ын саатлын гамма цацрагийн үйлчлэлээр үүссэн цацраг идэвхт цөмөөс гарах гамма цацрагийг цэвэр Ge-детектортой, ^{60}Co -ын 1333кэВ энергитэй гамма шугам дээр ~2кэВ ялгах чадвартай гамма спектрометр ашиглан бүртгэсэн. ^{133}Ba үүсгүүр ашиглан гамма спектрометрийн бүртгэмжийн муруйг байгуулсныг Зураг 5.5-д харуулав.



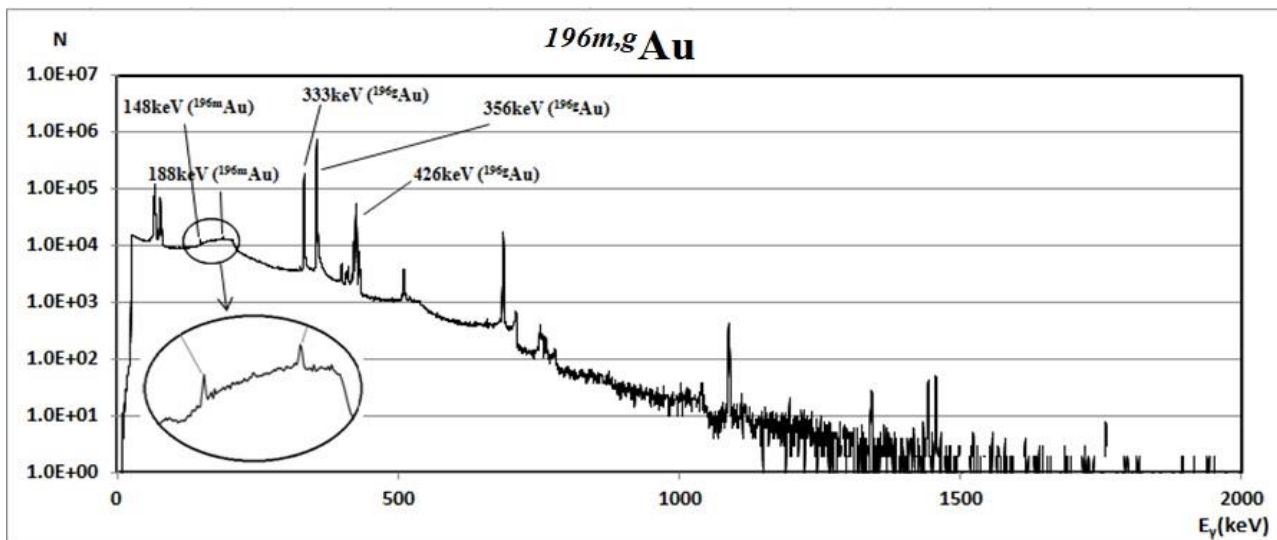
Зураг 5.5. Гамма спектрометрийн бүртгэмжийн муруй

Эндээс тухайн гамма шугамд харгалзах бүртгэмж ϵ -ыг шууд тодорхойлж болно.

Хүснэгт 5.2. Гамма шугамд харгалзах спектрометрийн бүртгэмж

E_γ , кэВ	148	188	333	356
ε	0.125	0.132	0.123	0.122

Гамма цацрагаар шарагдсан Au-ны дээжийн гамма спектрийг Зураг 5.6-д харуулав. Энд илэрсэн алтны изомер шилжилтэд харгалзах 148кэВ ба 188кэВ энергитэй шугамууд ба үндсэн төлвийн задралаас үүссэн 333кэВ, 356кэВ, 426кэВ энергитэй шугамуудын талбайг тодорхойлж үр дүнгийн боловсруулалт хийв.



Зураг 5.6. AuI дээжийг 22МэВ энергитэй саатлын гамма квантаар 120мин шарж, 256мин хүлээсний дараа 10мин хэмжсэн спектр

5.4. $^{196m,g}\text{Au}$ – ийн изомер харьцааг тодорхойлсон туршлагын үр дүн

Изомер харьцааг тодорхойлоход шаардагдах дээжүүдийн туршилтийн болон хэмжилтийн өгөгдлийг Хүснэгт 5.3-т өгөв.

Хүснэгт 5.3. Au1,2,3,4 дээжийн хэмжилтийн болон туршлагын өгөгдлүүд

Дээж	$S_{m,g} \pm \Delta S\%$				t_1 (мин.)	t_2 (мин.)	t_3 (мин.)
	148кэВ	188кэВ	333кэВ	356кэВ			
Au1	2753±10	3862±10	400687±0.3	1737286±0.1	120	256	10
Au2	3366±10	5103±9	508688±0.3	2185659±0.1		269	
Au3	6338±8	8846±8	1004572±0.2	4402407±0.1	130	214	
Au4	2086±21	3268±15	357120±0.3	1675496±0.2		200	

Хүснэгт 5.1,5.2 ба 5.3-ууд дах өгөгдлүүдийг ашиглан $^{196m,g}\text{Au}$ -ийн изомер харьцааг (5.2.6) томъёогоор тодорхойлов. Дээж тус бүрт алтны изомер харьцааг (5.2.6) томъёогоор бодож, дундаж утгыг $IR=(4.1 \pm 1.0) \cdot 10^{-4}$ гэж олов.

Хүснэгт 5.4. Алтны изомер харьцааг тодорхойлсон үр дүн

Дээж	Харьцуулж буй γ шугам		IR (10^{-4})	$\langle IR_{Au} \rangle$ (10^{-4})	$\langle IR_{Au} \rangle$ (10^{-4})
	m, (кэВ)	g, (кэВ)			
Au1	148	333	3.3	4.0±1.0	4.1±1.0
		356	2.9		
	188	333	5.2		
		356	4.5		
Au2	148	333	4.2	4.6±1.1	
		356	3.8		
	188	333	5.5		
		356	4.9		
Au3	148	333	3.7	4.1±1.0	
		356	3.1		
	188	333	5.2		
		356	4.4		
Au4	148	333	2.8	3.5±0.8	
		356	2.3		
	188	333	4.9		
		356	3.9		

Энэ утгаа бусад судлаачдын тодорхойлсон үр дүнтэй харьцуулсныг Хүснэгт 5.5-д харуулав.

Хүснэгт 5.5. Саатлын гамма цацрагийн энергиэс хамаарсан $^{196m,g}Au$ -ийн изомер харьцаа

$^{197}Au(\gamma,n)^{196m,g}Au$			
E_{γ}^{max} (МэВ)	$IR = Y_m/Y_g$ Энэ ажилд (10^{-4})	Бусад ажилд (10^{-4})	Эшлэл
15		1.28	A.P.Tonchaev <i>et al.</i> 1998
18		2.94	A.P.Tonchaev <i>et al.</i> 1998
21.5		3.78	A.P.Tonchaev <i>et al.</i> 1998
22	(4.1±1.0)	(6.0±0.40)	Yu.P.Gangrsky <i>et al.</i> 2004
23.5		4.03	A.P.Tonchaev <i>et al.</i> 1998
25		(5.4±0.30)	S.R.Palvanov <i>et al.</i> 1999
30		(5.5±0.40)	S.R.Palvanov <i>et al.</i> 1999
50		(4.95±0.51)	Md.S.Rahman <i>et al.</i> 2010
60		(5.72±0.72)	Md.S.Rahman <i>et al.</i> 2010

Энэ ажлаар $E^{max} = 22$ МэВ үед тодорхойлогдсон $^{196m,g}Au$ цөмийн изомер харьцаа 2004 онд *Physics of Atomic Nuclei* сэтгүүлд хэвлэгдсэн Yu.P.Gangrsky нарын ажилд тодорхойлогдсон

утгаас ~ 1.5 дахин бага байна. Саатлын гамма цацрагийн максимум энерги 22 МэВ үед $^{196m,g}\text{Au}$ цөмийн изомер харьцааг тодорхойлсон өөр ажил байхгүй учраас яагаад зөрүүтэй байгаа талаар одоогоор тодорхой тайлбар өгөхөд хүндрэлтэй байна. Гэхдээ изомер харьцаа өдөөж буй саатлын гамма цацрагийн максимум энергиэс хамаарч буй байдлаас харахад, Yu.P.Gangrsky нарын ажил дахь утга бусдаасаа ялгарч харьцангуй өндөр байна. Харин бидний тодорхойлсон изомер харьцаа бусад судлаачдын үр дүнгийн ерөнхий хандлагатай сайн тохирч байгааг тэмдэглэх хэрэгтэй.

5.5. Дүгнэлт

1. Изомер харьцааг тодорхойлоход ашиглагддаг томьёонуудын гаргалгааг хийж бусад судлаачдын гаргасан томьёотой харьцуулав.
2. Саатлын гамма цацрагаар өдөөгдсөн цөмийн изомер төлвийг судлах туршлагын арга зүйг эзэмшиж, Микротрон МТ-22 хурдасгуурын нил спектртэй гамма цацрагаар ($E^{\max} = 22$ МэВ) өдөөгдсөн $^{196m,g}\text{Au}$ -ын изомер харьцааг $IR=(4.1\pm 1.0)\cdot 10^{-4}$ гэж тодорхойлов.
3. Бидний тодорхойлсон утга Yu.P.Gangrsky нарын гарган авсан үр дүнгээс ~ 1.5 дахин бага гарав.
4. Саатлын гамма цацрагийн энергийн өөр мужид бусад судлаачдын гарган авсан үр дүнгүүдтэй харьцуулахад Yu.P.Gangrsky нарын тодорхойлсон утга харьцангуй өндөр байгаа бөгөөд харин бидний үр дүн $^{196m,g}\text{Au}$ -ийн изомер харьцааны ерөнхий хамаарал буюу хандлагатай сайн тохирч байна.

Энэхүү бүлэгт хийгдсэн ажлуудыг төслийн үр дүнгийн даалгаврын 5-р даалгавар (*Зарим изотопыг янз бүрийн энергитэй сум бөөмөөр бөмбөгдөх үед явагдах цөмийн урвалын туршлагын судалгаа явуулж, шинэ мэдээлэл гарган авах*)-т тусгагдсан ажлын хүрээнд гүйцэтгэв.

Тус ажлын хүрээнд хэвлүүлсэн бүтээл:

1. Ч.Сайханбаяр, Г.Хүүхэнхүү, М.Одсүрэн
Саатлын гамма цацрагаар өдөөгдсөн $^{196m,g}\text{Au}$ -ийн изомер харьцаа.
МУИС-ийн Эрдэм Шинжилгээний Бичиг: **ФИЗИК**, 2021, №33 (In press)

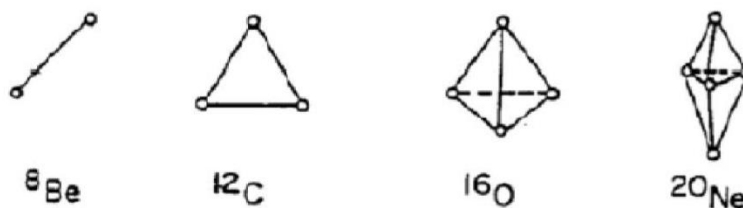
VI БҮЛЭГ. ЦӨМИЙН КЛАСТЕР ЗАГВАРЫН ХҮРЭЭНД ЦӨМИЙН УРВАЛЫН КОМПАУНД БА ШУУД МЕХАНИЗМЫН ХАРЬЦУУЛСАН СУДАЛГАА

6.1. Удиртгал

Цөм өөрөө олон нуклоноос тогтсон олон биеийн систем болдог учир бүтцийг тайлбарлахын тулд олон биеийн бодлогыг бодох шаардлагатай тулгардаг. Уг олон биеийн бодлогыг бодох нь ихээхэн төвөгтэй асуудал. Иймд олон биеийн системийг бодохдоо хэд хэдэн нуклоноос тогтсон кластер гэх ойлголтыг оруулж ирж, харилцан үйлчилэлд оролцож буй биетийн тоог цөөрүүлэх замаар тооцоолол хийдэг арга үүссэн. Кластер гэдэг нь цөмийг бүрэлдүүлэгч нуклонууд нь хэсэг хэсгээрээ бүлэгрэн бие даасан дэд системүүдийг үүсгэж буй явдал юм. Зарим цөмийн бүтэц, урвалын туршлагын судалгааны үр дүн ч цөм кластеруудаас тогтсон болохыг баталдаг.

1936 онд АНУ-ын эрдэмтэд Г. Бете, Р. Бахер, 1938 онд Л. Хафштадтер, Э. Теллер нар зарим цөм кластер бүтэцтэй байж болох таамаглалыг дэвшүүлсэн бөгөөд 1968 онд Японы эрдэмтэн К. Икеда уг санааг өргөжүүлж хөнгөн цөмөөс бэсрэг масстай цөм хүртэлх массын өргөн мужид цөмийн кластер бүтцийн диаграммыг байгуулсан. 2006 онд нейтрон илүүдэлтэй цөмүүдийг оруулан Икедагийн кластерын диаграммыг өргөтгөсөн байдаг.

Цөм дэх кластер бүтцийн судалгааны үндсийг 1900 онд Э.Резерфорд альфа-задралыг нээснээр тавьсан гэж үздэг. Задралын дүнд альфа бөөм цөмөөс сугаран гардаг үзэгдэл нь альфа бөөмийн хүчтэй дотоод холбоостой хамаатай гэдэг. Альфа бөөмийг бүрэлдүүлэгч хоёр протон болон хоёр нейтрон тус бүр харилцан эсрэг чиглэсэн спинтэй учир Паулийн хоригийн зарчмыг зөрчилгүйгээр нэгэн төлөвт тогтвортой оршдог. Иймд альфа бөөм бусад хөнгөн цөмүүдээс харьцангуй өндөр холбоос энергитэй ($E_{хол}=28.7\text{МэВ}$) байдаг.

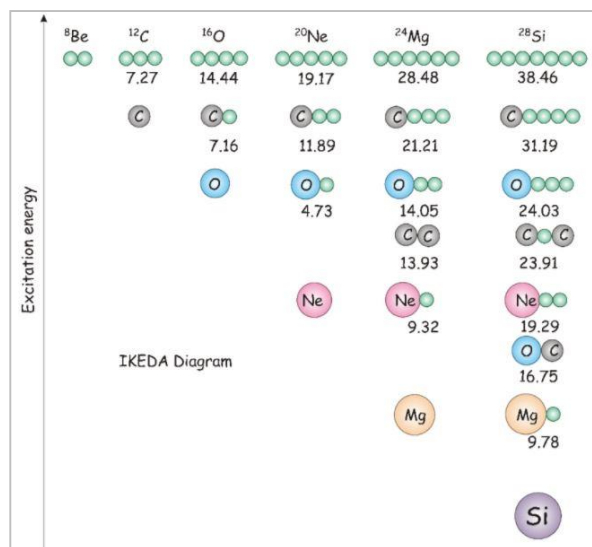


Зураг 6.1. Цөм альфа кластераас тогтох боломж

Э.Резерфордоос хойш 36 жилийн дараа эрдэмтэн Г.А.Бете болон Р.Ф.Бакер нар цөмүүд тодорхой зохион байгуулалттай орших альфа кластеруудаас тогтдог гэж үзжээ. Тухайлбал, Зураг 6.1-т харуулсанчлан 8Be нь хоорондоо нэг холбоост “гантель хэлбэрийн” хоёр альфа кластераас, 12C нь хоорондоо гурван холбоост “гурвалжин хэлбэрийн” гурван альфа кластераас, 16O нь хоорондоо зургаан холбоост “тетраэдр хэлбэрийн” дөрвөн альфа кластераас гэх мэтээр тогтоно гэжээ. 1938 онд Л.Р.Хафштад болон Е.Теллер нар Х.А.Бетегийн ажлыг өргөжүүлэн, тэгш-тэгш $N=Z$ цөмүүдийн альфа кластерын бүтцийн судалгаа хийсэн байдаг. Үүнээс хойш цөмийн кластер бүтцийн судалгаа олон жилийн турш хийгдсээр ирэв. Иймд

альфа бөөм нь цөм дэх кластержилт болон цөмийн кластер загварын судалгааны салшгүй нэгэн хэсэг болсон байна.

Японы эрдэмтэн К.Икеда 1968 онд цөмийн кластер бүтцийн талаарх ойлголтыг дэлгэрүүлэн үзэж, анх удаа хөнгөн цөмөөс бэсрэг масстай цөм хүртэлх массын өргөн мужид цөмийн кластер бүтцийн систематик анализ хийн диаграмм байгуулсан байдаг. Уг диаграммыг Икедагийн диаграмм гэж нэрлэдэг бөгөөд түүний судалгаагаар цөм нь альфа бөөм, нүүрстөрөгч, хүчилтөрөгч болон бусад өөр олон төрлийн кластеруудаас тогтох боломжтой гэж үзээд тэдгээрийн босго энерги болон нуклоны тоо хоёрын хамаарлыг байгуулжээ (Зураг 6.2).



Зураг 6.2. Икедагийн диаграмм

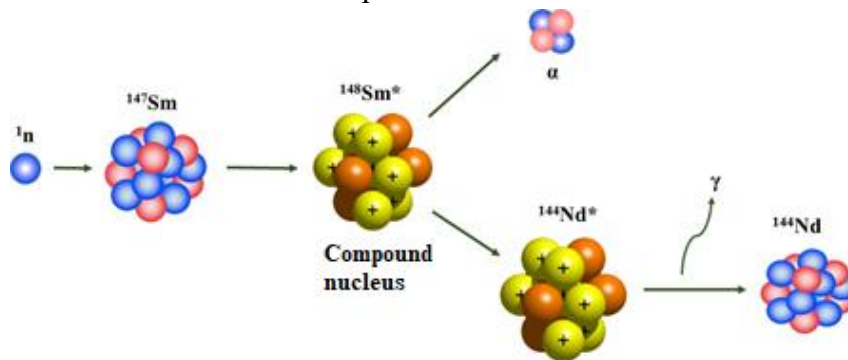
Альфа кластер нь янз бүрийн масстай цөмд байж болох боловч $A < 40$ цөмийн хувьд протон, нейтроны тоонууд нь хоорондоо тэнцүү буюу ойролцоо байх учир илүү магадлалтай байдаг гэж үздэг бөгөөд хөнгөн цөмийн бүтцийн судалгаанд цөмийн кластер бүтцийн загварыг өргөн ашигладаг.

“Цөмийн кластер бүтэц ба урвалын судалгаа” (2019-2021) суурь судалгааны төслийн зорилгод тусгагдсан (Цөмийн урвалын механизмууд болон загваруудын харьцуулсан судалгаа явуулах) ажлын хүрээнд компаунд болон шууд механизмд нейтроны үйлчлэлээр цөмд хөнгөн кластер бүрэлдэх магадлалуудыг тооцоолж, хооронд нь харьцуулах зорилго тавив.

6.2. (n,α) урвал дахь дөрвөн нуклоны кластержилт

1932 онд Английн эрдэмтэн Дж.Чэдвик бериллийг α-бөөмөөр бөмбөгдөн нейтрон гэж нэрлэгдэх цахилгаан цэнэггүй, протонтой хамт цөмийн буюу хүчтэй харилцан үйлчлэлд ордог бөөмийг нээснээр цөмийн урвалын судалгаа өргөжин чанарын шинэ дээд шатандаа гарах боломж нээгдсэн юм. Нейтроноор явагдах урвалын нэг гол суваг нь (n,α) урвал юм (Зураг 6.3). Альфа-задрал ба (n,α) урвал хоёуланд цөмөөс альфа-бөөм сугаран гардаг. Тиймээс энэ хоёр процессын ялгаатай ба төстэй талуудыг эрдэмтэд дээр үеэс анхааран судалж ирсэн бөгөөд одоо болтол энэ асуудал судлаачдын сонирхлыг татсан хэвээр байна. Ийм төрлийн судалгаа

явуулснаар цөмийн α -задрал ба (n,α) урвалын үед цөмийн гадаргуу дээр α -кластер ямар магадлалтайгаар үүсч байгааг тодорхойлж, улмаар цөмийн задрал, урвалын механизмыг танин мэдэхэд чухал ач холбогдолтой мэдээлэл гарган авах нэг боломж нээгдэж байгаа юм.



Зураг 6.3. $^{147}\text{Sm}(n,\alpha)^{144}\text{Nd}$ урвалын үед нейтроны үйлчлэлээр компаунд цөм ^{148}Sm -гаас альфа-бөөм гарч буй байдал

Цөмөөс альфа-бөөм гарах үзэгдэл нь цөмийн гадаргуу дээр 4 нуклон нэгдэж α -бөөм бүрэлдэх магадлал, үүссэн α -бөөм цөмийн потенциал саадыг нэвтрэх магадлал хоёроор тодорхойлогдоно. Альфа-бөөм цөмийн потенциал саадыг нэвтрэн гарах магадлалыг анх 1920-оод оны дундуур Г.Гамов квант онолын туннелийн үзэгдэлд үндэслэн тооцоолох аргыг боловсруулж ерөнхий томъёог гаргасан байдаг. Цаашид түүний томъёог Расмуссен зэрэг нилээд судлаачид нарийвчлан авч үзсэнээр орчин үед цөмийн потенциал саадыг альфа-бөөм нэвтрэн гарах магадлалыг онцын бэрхшээлгүйгээр тооцоолдог болжээ. Харин цөмийн гадаргуу дээр 4 нуклон нэгдэж α -бөөм бүрэлдэх магадлалыг тооцоолоход онолын ихээхэн бэрхшээл тулгардаг. Ийм тооцоог хийхэд математикийн хувьд 4 нуклон тус бүрийн долгион функцуудын давхацлын интеграл буюу дөрвөлсөн интегралыг бодох хэрэгтэй болдог. Физикийн үүднээс энэ нь 4 нуклоны хоорондох болон тэдгээрийн охин цөмтэйгээ хэрхэн харилцан үйлчилж байгааг тооцоолно гэсэн үг. Энд охин цөмийн төдийгүй эх цөмийн дотоод бүтцийг бас авч үзэх шаардлагатай. Ийм төвөгтэй харилцан үйлчлэлийг ердийн потенциал хэлбэрээр илэрхийлэх боломж туйлын хязгаарлагдмал байдаг. Эдгээр томъёо, тооцооллын хүндрэлээс гадна зарчмын гэмээр бэрхшээл бас тулгардаг. Энэ нь микро-ертөнцийг тайлбарладаг квант онолд байдаг ерөнхий хязгаарлалт юм. Ердийн квант онолоор 2 биеийн бодлогыг л нарийн бодох боломжтой. Харин 3 ба түүнээс дээш тооны нуклоны системийн төлвийг бодоход ямар нэг ойролцоолох аргыг хэрэглэх болдог. Энэ нь дээр дурдсан 4 нуклон хоорондын болон тэдгээрийн охин цөмтэйгээ харилцан үйлчлэх потенциалыг сонгож авахад илэрдэг.

Бид энэ ажлаараа энд дурдагдсан төвөгтэй арга замаас зайлсхийж, янз бүрийн энергитэй нейтроноор явагдах (n,α) урвалын туршлагын үр дүнгүүдийг ашиглан, классик механик, квант онолын хялбар ойлголтуудад тулгуурлан, цөмийн статистик загварын хүрээнд альфа-кластер үүсэх магадлал буюу факторыг тооцоолж, бусад судлаачдын үр дүнтэй харьцуулах зорилго тавилаа.

6.2.1. Удаан нейтроноор явагдах (n,α) урвал дахь α-кластержилт (статистик загвар)

Цөмийн статистик загварын хүрээнд В.Ф.Вайскопфийн гаргасан α-бөөмд харгалзах цөмийн түвшний дундаж өргөний томъёог бичвэл:

$$\langle \Gamma_{\alpha}(J) \rangle = \frac{D(J)}{2\pi} T_{\alpha} \Phi_{\alpha}. \quad (6.2.1)$$

Энд: D(J)- J спинтэй цөмийн түвшнүүдийн хоорондох дундаж зай, T_α- альфа бөөм охин цөмийнхөө потенциал саадыг нэвтрэн гарах магадлал, Φ_α- альфа кластер бүрэлдэх магадлал.

(6.2.1) илэрхийллээс α-кластер бүрэлдэх магадлалыг дараах илэрхийллээр тодорхойлж болно.

$$\Phi_{\alpha} = 2\pi \frac{\langle \Gamma_{\alpha}(J) \rangle}{D(J)T_{\alpha}}. \quad (6.2.2)$$

(6.2.2) илэрхийллийг ашиглан зарим изопуудын хувьд резонансын нейтроноор явагдах (n,α) урвалын үед α-кластер бүрэлдэх магадлалыг тооцоолсон үр дүнгээ Хүснэгт 6.1-д үзүүлэв. Тооцоог хялбарчилахын тулд (6.2.2) илэрхийлэлд өнцөг моментийн хамаарлыг орхив. α-бөөмд харгалзах түвшний дундаж өргөний туршлагын утгуудыг (N.P. Balabanov et al., Investigation of Alpha-Widths of compound nuclei, *Phys. Part. Nucl.* 21, p.317, 1990.)-аас авч, s-резонансуудын түвшний дундаж зайг (S.F. Mughabghab, Atlas of Neutron Resonances, 5th Edition, *Elsevier*, Amsterdam, 2006.)-аас авав. T_α- альфа бөөмийн хувьд l_α=0, өнцөг моментийг тэг гэсэн Расмуссений томъёогоор тооцов.

Хүснэгт 6.1. Резонансын нейтроноор (E_n≤5кэВ) явагдах (n,α) урвалын үед α-кластер бүрэлдэх магадлал.

Isotopes	Γ _α (exp) [μeV]	D _o [eV]	T _α	Φ _α
⁶⁴ Zn	12	2940	8.63×10 ⁻⁸	0.30
⁶⁷ Zn	580±340	367	2.75×10 ⁻⁵	0.21
⁹⁵ Mo	26±18	81	1.58×10 ⁻⁶	0.53
¹²³ Te	7.3±3.7 (3.0±2.0)*	25.1	2.32×10 ⁻⁷	1.97 (0.81)*
¹⁴³ Nd	21±8	37.6	4.12×10 ⁻⁶	0.37
¹⁴⁵ Nd	0.32±0.19	17.8	1.41×10 ⁻⁷	0.35
¹⁴⁷ Sm	2.3±0.6	5.7	4.67×10 ⁻⁶	0.24
¹⁴⁹ Sm	0.21±0.06	2.2	5.12×10 ⁻⁷	0.52

6.2.2. Бэсрэг нейтроноор явагдах (n,α) урвал дахь α-кластержилт

Статистик загварын хүрээнд дундаж (n,α) хөндлөн огтлолыг дараах байдлаар илэрхийлж болно.

$$\langle \sigma(n, \alpha) \rangle = 2\pi^2 \left(\frac{\lambda_n}{2\pi} \right)^2 \sum_l \sum_J \frac{g(J) \langle \Gamma_n(J, l) \rangle \langle \Gamma_\alpha(J, l) \rangle}{D(J) \langle \Gamma(J, l) \rangle} F_l. \quad (6.2.3)$$

Энд: λ_n -нейтроны долгионы урт, $\langle \Gamma_n(J, l) \rangle, \langle \Gamma_\alpha(J, l) \rangle, \langle \Gamma(J, l) \rangle$ - нейтрон, альфа шилжилтэд харгалзах түвшний дэд болон нийт дундаж өргөнүүд, F_l -түвшний өргөний хэлбэлзлийн фактор 0.6-1.0 хооронд байна.

Бэсрэг энергитэй нейтроны хувьд $\Gamma_n \gg \Gamma_\gamma \gg \Gamma_\alpha$ гэвэл $\langle \Gamma(J, l) \rangle \approx \langle \Gamma_n(J, l) \rangle$ гэсэн ойролцооллыг ашиглаж болно. Нейтроны энергийн өргөн мужид орбиталь момент болон спинээс хамаарсан хамаарлыг тооцолгүй, түвшний өргөний флукуацийн факторыг $F_l \approx 1$ гэж үзвэл (6.2.3) илэрхийллээс α-кластер бүрэлдэх магадлалыг тооцоолох онолын хялбар томъёо гарна:

$$\Phi_\alpha \approx \frac{\langle \sigma(n, \alpha) \rangle}{\pi \left(\frac{\lambda_n}{2\pi} \right)^2 T_\alpha}. \quad (6.2.4)$$

24-30 кэВ энергитэй нейтроноор явагдах (n,α) урвалд α-кластер бүрэлдэх магадлалыг (6.2.4) илэрхийллээр бодож олсныг Хүснэгт 6.2-т харуулав.

Хүснэгт 6.2. 24-30 кэВ энергитэй нейтроноор явагдах (n,α) урвалд α-кластер бүрэлдэх магадлал

Target Nuclei	E_n [keV]	$\sigma(n, \alpha)$ [μbarn]	$T_\alpha (l_\alpha = 0)$	Φ_α
⁹⁵ Mo	30	20±4	1.75 x10 ⁻⁶	0.53
¹²³ Te	24	2.8±0.7	2.48 x10 ⁻⁷	0.52
¹⁴³ Nd	30	20±3	4.50 x10 ⁻⁶	0.20
¹⁴⁷ Sm	30	28±5	5.14 x10 ⁻⁶	0.25

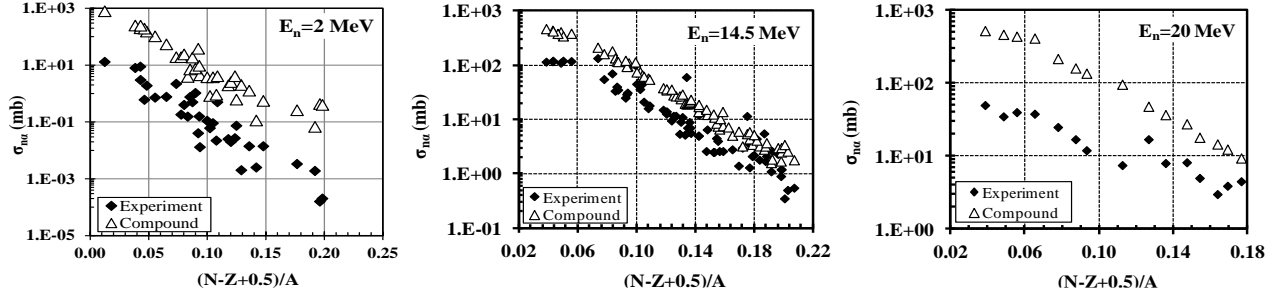
6.2.3. Хурдан нейтроноор явагдах (n,α) урвал дахь α-кластержилт

Компаунд механизм ба α-кластер бүрэлдэх магадлал

Цөмийн статистик загварын хүрээнд компаунд механизмд гаргасан (n,α) урвалын огтлолыг тооцох онолын томъёо дараах хэлбэртэй байна.

$$\sigma^{th}(n, \alpha) = C\pi(R + \lambda_n)^2 e^{-K \frac{N-Z+0.5}{A}}. \quad (6.2.5)$$

Цөмийн уурших загварыг ашиглан цөмийн термодинамик температурыг тодорхойлж, бай-цөм болон үүссэн цөмийн холбоос энергийг олохдоо К.Ф.Вейцеккерийн томьёог ашиглан (6.2.5) илэрхийллээр бодсон (n,α) урвалын онолын огтлолоо туршлагын утгуудын хамт Зураг 6.4-т харуулав.



Зураг 6.4. 2, 14.5, 20 МэВ энергитэй нейтронуудаар явагдах (n,α) урвалын огтлолын онолын ба туршлагын утгууд.

Зураг 6.4-өөс харахад онолын томьёогоор тооцсон (n,α) урвалын онолын огтлолууд туршлагын огтлолуудаасаа их утгатай гарч байв. Энэ нь онолын огтлолыг бодсон (6.2.5) илэрхийлэлдээ α -кластер бүрэлдэх магадлалыг тооцоогүйтэй холбоотой гэж үзэн уг илэрхийлэлд α -кластер бүрэлдэх магадлалыг нэмсэнээр дараах илэрхийлэл гарав.

$$\sigma^{th}(n, \alpha) \cdot \Phi_{\alpha} = C \pi (R + \lambda_n)^2 \cdot \Phi_{\alpha} \cdot e^{-K \frac{N-Z+0.5}{A}} = \sigma^{exp}(n, \alpha). \quad (6.2.6)$$

(6.2.6) илэрхийллээс α -кластер бүрэлдэх магадлалыг онол болон туршлагын огтлолын харьцаагаар тодорхойлж болно.

$$\Phi_{\alpha} = \frac{\sigma^{exp}(n, \alpha)}{\sigma^{th}(n, \alpha)}. \quad (6.2.7)$$

2-20 МэВ хооронд энергитэй нейтронуудаар явагдах (n,α) урвалд α -кластер бүрэлдэх магадлалыг (6.2.7) илэрхийллийг ашиглан тооцсон утгуудаа Хүснэгт 6.3-т үзүүлэв.

Хүснэгт 6.3. Компаунд механизмд хурдан нейтроноор явагдах (n,α) урвалд α -кластер бүрэлдэх магадлал.

E_n [MeV]	2	4	4.5	5	5.5	6	6.5	8	10	13	14.5	16	18	20
$\langle \Phi_{\alpha} \rangle$	0.02	0.22	0.22	0.25	0.28	0.28	0.28	0.33	0.33	0.33	0.28	0.22	0.18	0.10

Шууд механизм ба α -кластер бүрэлдэх магадлал

Шууд урвалын механизмд хурдан нейтроноор явагдах (n,α) урвалын огтлолын томьёог бичвэл дараах хэлбэртэй болно.

$$\sigma(n, \alpha) = \Phi_{\alpha} \sigma_n^{tot}(^4\text{He}). \quad (6.2.8)$$

$\sigma_n^{tot}({}^3\text{He})$ - нейтрон ${}^3\text{He}$ цөмтэй харилцан үйлчлэх бүрэн огтлол.

Илэрхийлэл (6.2.8)-аас α -кластер бүрэлдэх магадлалыг олж болно.

$$\Phi_\alpha = \frac{\sigma^{exp}(n, \alpha)}{\sigma_n^{tot}({}^4\text{He})} \quad (6.2.9)$$

Нейтрон ${}^4\text{He}$ цөмтэй харилцан үйлчлэх бүрэн огтлолын утгуудыг олон улсын цөмийн өгөгдлийн сан EXFOR-оос авч ашиглав. Ингээд (6.2.9) илэрхийллээр 4-6 МэВ энергитэй нейтонуудаар явагдах (n, α) урвалд α -кластер бүрэлдэх магадлалыг хэдэн хүнд масстай цөмийн хувьд тооцоолсныг Хүснэгт 6.4-т үзүүлэв.

Хүснэгт 6.4. Шууд механизмд хурдан нейтроноор явагдах (n, α) урвалд α -кластер бүрэлдэх магадлал.

Isotopes	E_n	$\sigma(n, \alpha)$ [mbarn]	$\Delta\sigma(n, \alpha)$ [mbarn]	Φ_α	$\Delta\Phi_\alpha$
${}^{95}\text{Mo}$	4	0.700	0.070	2.79×10^{-4}	2.79×10^{-5}
	5	1.220	0.120	0.001	5.53×10^{-5}
	6	1.700	0.170	0.001	8.30×10^{-5}
${}^{143}\text{Nd}$	4	0.120	0.012	4.781×10^{-5}	4.781×10^{-6}
	5	0.210	0.021	9.633×10^{-5}	9.673×10^{-6}
	6	0.310	0.031	1.512×10^{-4}	1.513×10^{-5}
${}^{147}\text{Sm}$	5	0.230	0.023	1.055×10^{-4}	1.059×10^{-5}
	6	0.290	0.029	1.415×10^{-4}	1.415×10^{-5}

(n, α) урвал дахь альфа кластержилтийн давтамж

Бид α -бөөмсийн хөдөлгөөний давтамжийг цөмийн доторх хөдөлгөөн гэж таамаглаж, энэ нь цөмийн гадарга дээр α -кластер үүсэхэд шаардагдах босго энергиээс хамаардаг болохыг олж мэдсэн. Хэйзенбергийн тодорхойгүйн зарчмаар цөмд маш богино хугацаанд Δt хангалттай энергийг ΔE үүсгэж болох бөгөөд энэ нь охин цөмийн гадаргуу дээр кластер үүсгэх боломжтой гэж бид үзэж байна. Энэ тохиолдолд эерэг босго энергитэй цөмүүдийн α -бөөмийн хөдөлгөөний давтамжийг дараах байдлаар тооцоолж болно.

$$f_\alpha = \frac{\Phi_\alpha}{\Delta t}. \quad (6.2.10)$$

Мөн сөрөг босго энергитэй цөмүүдийн α -бөөмийн хөдөлгөөний давтамжийг дараах байдлаар тооцоолж болно.

$$f_\alpha = \frac{1}{R} \sqrt{\frac{E_\alpha}{2m_\alpha}}. \quad (6.2.11)$$

Ингээд (6.2.10),(6.2.11) илэрхийлүүдийг ашиглан удаан, бэсрэг, хурдан нейтроноор явагдах (n,α) урвалд үүсэх α-бөөмийн давтамжийг зарим хүнд цөмүүдийн хувьд тооцоолов. Тооцоолсон үр дүнгээ Хүснэгт (6.5)-д харуулав.

Хүснэгт 6.5. Нейтроны үйлчлэлээр зарим изотопуудад үүсэх альфа бөөмийн давтамж

Target	Reaction mechanism	Compound			Knock-on
		Resonance (E _n ≤5keV)	Intermediate (E _n =30keV)	Fast (E _n =6MeV)	Fast (E _n =6MeV)
⁹⁵ Mo		2.220x10 ²¹	2.245 x10 ²¹	5.615 x10 ²¹	3.402 x10 ¹⁸
¹⁴³ Nd		6.935 x10 ²⁰	6.989 x10 ²⁰	1.412 x10 ²¹	3.639 x10 ²⁰
¹⁴⁷ Sm		7.017 x10 ²⁰	7.069 x10 ²⁰	1.407 x10 ²¹	7.581 0 ²⁰

6.2.4. Дүгнэлт

1. Резонансын энергитэй (E_n<5 кэВ) нейтроноор явагдах (n,α) урвалын үед α-кластер бүрэлдэх магадлалыг онолоор тооцов.
2. Бэсрэг энергитэй (E_n=24÷30 кэВ) нейтроноор явагдах (n,α) урвалын дундаж огтлолыг ашиглан (n,α) урвалын үед α-кластер бүрэлдэх магадлалыг онолоор тооцов.
3. Цөмийн урвалын компаунд болон шууд механизм ашиглан хурдан нейтроноор явагдах (n,α) урвалд α-кластер бүрэлдэх магадлалыг тус тус тооцоолов.
4. Удаан, бэсрэг, хурдан нейтроноор явагдах (n,α) урвалд үүсэх α-бөөмийн давтамжийг зарим хүнд цөмүүдийн хувьд тооцоолов.

6.3. (n,³He) урвал дахь гурван нуклоны кластержилт

6.3.1. Компаунд механизм ба ³He-кластер үүсэх магадлал

Цөмийн урвалын компаунд механизмд хурдан нейтроноор явагдах (n,³He) урвалын үед ³He-кластер бүрэлдэх магадлалыг авч үзье. ³He-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 ³He 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. Альфа задралын хувьд

спектроскопик фактор гэж түвшний α -бөөмд харгалзах өргөнийг (Γ_α) нэг бөөмд харгалзах түвшний өргөнд (Γ_0) харьцуулсныг хэлдэг:

$$S_\alpha = \frac{\Gamma_\alpha}{\Gamma_0} = \frac{\delta_\alpha^2}{\delta_0^2} \quad (6.3.1)$$

Энд: δ_α^2 - түвшний α -бөөмд харгалзах эмхэтгэсэн өргөн, δ_0^2 - нэг бөөмт төлөвт харгалзах түвшний эмхэтгэсэн өргөн. Үүнтэй төстэйгээр ^3He -ийн хувьд спектроскопик факторыг

$$S_{^3\text{He}} = \frac{\Gamma_{^3\text{He}}}{\Gamma_0} \quad (6.3.2)$$

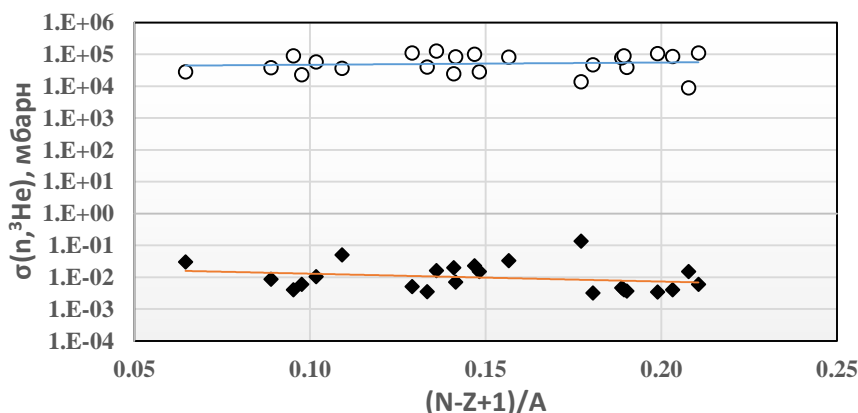
гэж болно. Энд: $\Gamma_{^3\text{He}}$ нь ^3He -т харгалзах төлвийн түвшний өргөн.

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

$$\Phi_{^3\text{He}} = \frac{\sigma_{(n, ^3\text{He})}^{\text{exp}}}{\sigma_{(n, ^3\text{He})}^{\text{theor}}} \quad (6.3.3)$$

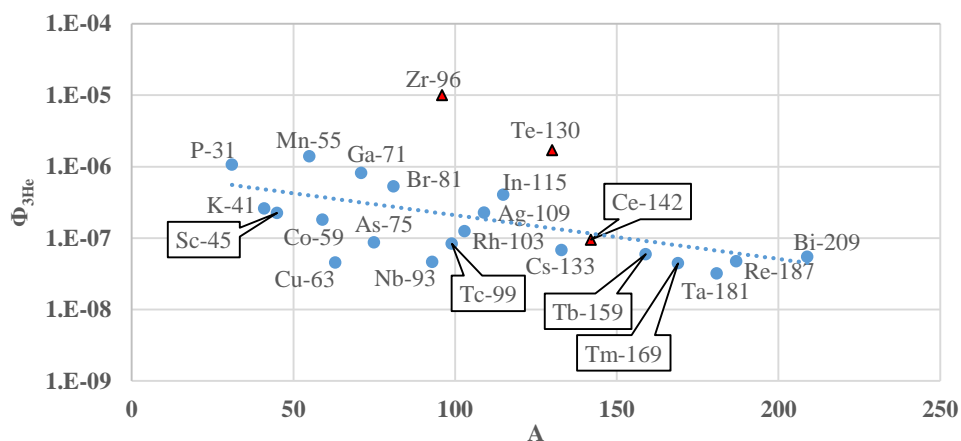
гэж туршлагын огтлолыг нэг бөөмт загварын буюу ^3He кластержилтийг тооцоогүй онолын огтлолд харьцуулан тодорхойлж болохоор байна.

II бүлгийн (2.4.14) томъёогоор бодож олсон ($n, ^3\text{He}$) урвалын огтлолын онолын утгуудыг туршлагын утгуудтай хамт Зураг 6.5-д харуулав.



Зураг 6.5. 14-15 МэВ энергитэй нейтроноор явагдах ($n, ^3\text{He}$) урвалын огтлолын онолын (\circ) ба туршлагын (\blacklozenge) утгууд.

Цөмийн урвалын статистик загвараар тодорхойлсон ($n, ^3\text{He}$) урвалын онолын огтлолууд абсолют утгаараа туршлагын өгөгдлүүдээс олон дахин их гарч байв. Энэ нь онолын огтлолыг бодохдоо ^3He кластер үүсэх магадлалыг тооцоогүйтэй холбоотой гэж үзэн (6.3.1) томъёогоор ^3He кластер үүсэх магадлалыг тооцоолж олсноо бай цөмийн масс тооноос хамааруулан Зураг 6.6-д үзүүлэв.



Зураг 6.6. 14-15 МэВ энергитэй нейтроноор явагдах $(n, {}^3\text{He})$ урвалын үед ${}^3\text{He}$ кластер үүсэх магадлал. \blacktriangle -Масс тоо нь тэгш цөмүүд; \bullet -Масс тоо нь сондгой цөмүүд.

Зураг 6.6-аас харахад бай-цөмийн масс тоо тэгш, сондгой байхаас онц хамаарахгүйгээр ${}^3\text{He}$ кластер үүсэх магадлал $\Phi_{{}^3\text{He}} = 10^{-5} - 3.2 \cdot 10^{-8}$ өргөн мужид байна.

6.3.2. Шууд механизм ба ${}^3\text{He}$ -кластер үүсэх магадлал

Шууд урвалын механизмд хурдан нейтроноор явагдах $(n, {}^3\text{He})$ урвалын огтлолын томьёог бичвэл:

$$\sigma(n, {}^3\text{He}) = k_{{}^3\text{He}} \Phi_{{}^3\text{He}} \sigma_n^{\text{tot}}({}^3\text{He}) \quad (6.3.4)$$

Энд: $k_{{}^3\text{He}}$ -нейтрон бай цөмийг онох параметр. Үүнийг геометр хөндлөн огтлолын талбайгаар илэрхийлвэл:

$$k_{{}^3\text{He}} = \frac{\pi r_{{}^3\text{He}}^2}{\pi(R_D^2 + r_{{}^3\text{He}}^2)} = \frac{3^{2/3}}{(A-3)^{2/3} + 3^{2/3}} \quad (6.3.5)$$

болно.

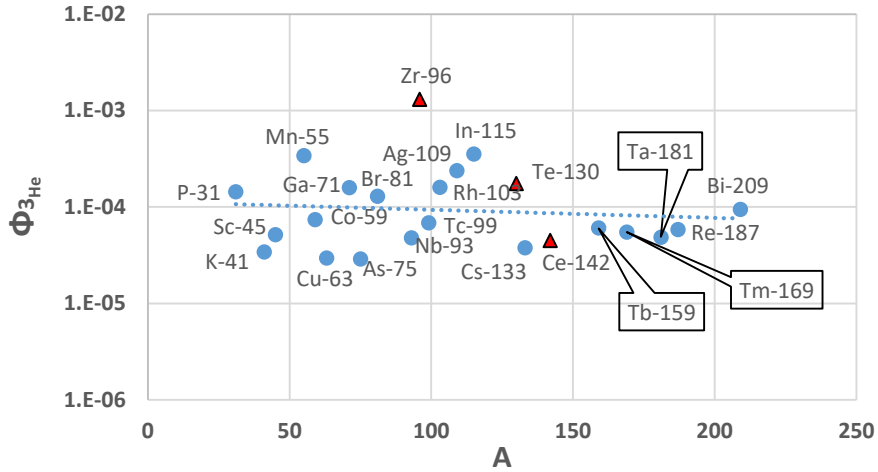
Энд: $r_{{}^3\text{He}}$ - ${}^3\text{He}$ цөмийн радиус, R_D -охин цөмийн радиус, $\Phi_{{}^3\text{He}}$ - ${}^3\text{He}$ кластер үүсэх магадлал, $\sigma_n^{\text{tot}}({}^3\text{He})$ - нейтрон ${}^3\text{He}$ цөмтэй харилцан үйлчлэх бүрэн огтлол.

(6.3.4),(6.3.5) илэрхийллүүдээс ${}^3\text{He}$ кластер үүсэх магадлалыг олвол:

$$\Phi_{{}^3\text{He}} = \frac{\sigma(n, {}^3\text{He}) (A-3)^{2/3} + 3^{2/3}}{\sigma_n^{\text{tot}}({}^3\text{He}) 3^{2/3}} \quad (6.3.6)$$

$(n, {}^3\text{He})$ урвалын огтлолын туршлагын утгуудыг ашиглан (6.3.6) томьёогоор ${}^3\text{He}$ кластер үүсэх магадлалыг тооцоолно.

(n, ^3He) урвалын огтлолын туршлагын утгуудыг ашиглан (6.3.6) томъёогоор ^3He кластер үүсэх магадлалуудыг тооцоолсноо бай цөмийн масс тооноос хамааруулан зураг 6.7-д үзүүлэв.



Зураг 6.7. ^3He кластер үүсэх магадлал ба бай цөмийн масс тооны хамаарал

Шууд урвалын механизмд хурдан нейтроноор явагдах (n, ^3He) урвалд ^3He кластер үүсэх магадлалын утга $\Phi_{^3\text{He}} = 10^{-5} - 10^{-3}$ мужид гарч байна.

6.3.3. Дүгнэлт

1. Альфа-кластер бүрэлдэх магадлалыг тооцоолоход ашигладаг спектроскопик факторын аргатай төстэйгээр компаунд механизмд хурдан нейтроноор явагдах (n, ^3He) урвалд ^3He кластер үүсэх магадлалыг туршлагын ба онолын $\sigma(n, ^3\text{He})$ -огтлолуудын харьцаагаар тодорхойлов.
2. Шууд механизмд хурдан нейтроноор явагдах (n, ^3He) урвалд ^3He кластер үүсэх магадлалыг нейтрон ^3He цөмтэй харилцан үйлчлэх бүрэн огтлолыг ашиглан тооцоолов.

6.4. (n,t) урвал дахь гурван нуклоны кластержилт

6.4.1. Статистик загвар ба t-кластержилт

Н.Борын таамаглалд суурилсан компаунд механизмаар явагдах (n,t) урвалын огтлолыг дараах байдлаар тодорхойлж болно:

$$\sigma_{(n,t)}^{stat} = \sigma_c(n)G(n) \quad (6.4.1)$$

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

$$\sigma_c(n) = \pi(R + \lambda_n)^2 \quad (6.4.2)$$

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;

$$\lambda_n = \frac{4.55 \cdot 10^{-13}}{\sqrt{E_n (\text{МэВ})}} \text{ см} \quad (6.4.3)$$

нейтроны долгионы уртыг 2π -д хуваасан утга; E_n -нейтроны энерги.

Компаунд цөмөөс t -бөөм гарах магадлалыг

$$G_t = \frac{\Gamma_t}{\Gamma} \quad (6.4.4)$$

гэж илэрхийлнэ. Энд: Γ ба Γ_t – компаунд цөмийн өдөөгдсөн төлөвт харгалзах түвшний нийт өргөн ба t -бөөмд харгалзах дэд өргөн.

Компаунд цөм задрах процессыг цөмөөс t -бөөм ууршиж байгаа мэт авч үзвэл цөмийн түвшний t -бөөмд харгалзах дэд өргөнийг детальчлан тэнцэх зарчимд тулгуурлан

$$\Gamma_t = \frac{2S_t + 1}{\pi^2 \hbar^2 \rho_c(E_c)} M_t \int_{V_t}^{E_t^{\max}} E_t \sigma_c(E_t) \rho_y(U_t) dE_t. \quad (6.4.5)$$

Энд: S_t нь t -бөөмийн спин; M_t нь t -бөөмийн масс; $\rho_y(U_t)$ -урвалаас үүссэн цөмийн түвшний нягт; $\rho_c(E_c)$ -компаунд цөмийн түвшний нягт; $\sigma_c(E_t)$ нь E_t -энергитэй t -бөөм урвалаас үүссэн цөмд шингэж компаунд цөм үүсгэх урвуу урвалын огтлол; V_t –урвалаас үүссэн цөмийн зүгээс t -бөөмд учруулах Кулоны потенциал саад.

Цөмийн энтропи болон термодинамик температур ашиглан (6.4.1), (6.4.2) ба (6.4.5)-аас хурдан нейтроны үйлчлэлээр явагдах (n,t) урвалын огтлолыг тооцох томъёог бичвэл:

$$\sigma_{(n,t)}^{\text{stat}} = \pi (R + \lambda_n)^2 \frac{2S_t + 1}{2S_n + 1} \frac{M_t}{M_n} e^{\frac{Q_{n,t} - V_t}{\Theta}}. \quad (6.4.6)$$

Бай-цөм болон үүссэн цөмийн холбоос энергийг олохдоо К.Ф.Вейцеккерийн томъёог ашиглая. Бэсрэг болон хүнд масстай бай цөмүүдийн хувьд тооцоолол хийх учир $A \gg 2$ гэж үзээд урвалаас гарах энергийн томъёог бичвэл:

$$Q_{n,t} = \gamma \frac{2Z - 1}{A^{1/3}} - 4\xi \frac{N - Z + 1}{A} + \varepsilon_t \quad (6.4.7)$$

Энд: Вейцеккерийн томъёоны тогтмол $\gamma = 0.71$ МэВ, $\xi = 23.7$ МэВ, тритийн дотоод холбоос энерги $\varepsilon_t = 8.48$ МэВ.

Охин цөм ба t -ийн харилцан үйлчлэлийн Кулоны потенциал энергийг:

$$V_t = 1.029 \frac{(Z - 1)}{A^{1/3} + 3^{1/3}} \text{ МэВ}. \quad (6.4.8)$$

Ферми-хий загварыг ашиглаад цөмийн термодинамик температурыг тодорхойлвол

$$\Theta = \sqrt{\frac{13.5(E_n + Q_{n,t})}{A}}. \quad (6.4.9)$$

(6.4.6)-(6.4.8) илэрхийллүүдээс (n,t) урвалын огтлолыг тооцох томъёог бичвэл:

$$\sigma_{(n,t)}^{stat} = C\pi(R + \lambda_n)^2 e^{-K \frac{N-Z+1}{A}} \quad (6.4.10)$$

Дээрх томъёонд байгаа C, K параметрууд нь:

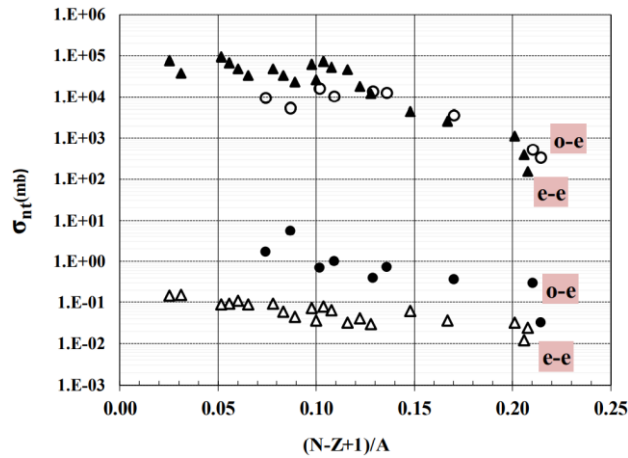
$$C = 3 \exp \left\{ \frac{\gamma \frac{2Z-1}{A^{1/3}} + \varepsilon_t - 1.029 \frac{(Z-1)}{A^{1/3} + 3^{1/3}}}{\Theta} \right\} \quad (6.4.11)$$

$$K = \frac{4\xi}{\Theta} \quad (6.4.12)$$

(6.4.9)-(6.4.12) томъёонуудыг ашиглан 14-15 МэВ энергитэй нейтроноор явагдах (n,t) урвалын огтлолын онолын утгуудыг бодов. Тритон кластер үүсэх магадлалыг спектроскопик факторын аргыг ашиглан 14-15 МэВ энергитэй нейтроноор явагдах (n,t) урвалын огтлолын туршлагын утгуудыг онолын утгуудад нь харьцуулан тодорхойлов.

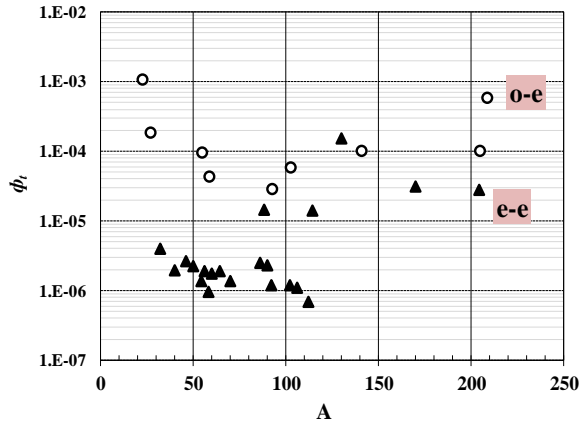
$$\Phi_t = \frac{\sigma_{(n,t)}^{exp}}{\sigma_{(n,t)}^{theor}} \quad (6.4.13)$$

EXFOR мэдээллийн сангаас сонгон авсан 14-15 МэВ энергитэй нейтроноор явагдах (n,t) урвалын огтлолын туршлагын утгууд болон (6.4.9)-(6.4.12) томъёонуудаар бодож олсон онолын утгуудыг ассиметр параметрээс нь хамааруулан системчилсэн анализ хийснээ Зураг 6.8-т үзүүлэв.



Зураг 6.8. 14-15 МэВ энергитэй нейтроноор явагдах (n,t) урвалын огтлолын онолын (○, ▲) ба туршлагын (●, Δ) утгууд. (○, ●-сондгой тэгш, ▲, Δ-тэгш тэгш цөмүүд)

Цөмийн урвалын статистик загвараар тодорхойлсон (n,t) урвалын онолын огтлолууд абсолют утгаараа туршлагын өгөгдлүүдээс олон дахин их гарч байв. Энэ нь онолын огтлолыг бодоходоо t-кластер үүсэх магадлалыг тооцоогүйтэй холбоотой гэж үзэв. Ингээд (6.4.13) томъёогоор t-кластер үүсэх магадлалыг тооцоолон үр дүнгээ бай цөмийн масс тооны тэгш сондгойгоос хамааруулан Зураг 6.9-т харуулав.



Зураг 6.9. Статистик загвараар тооцоолсон тритон-кластер үүсэх магадлал: (o-тэгш сондгой, ▲-тэгш тэгш цөмүүд).

Зураг 6.9-өөс харахад t-кластер үүсэх магадлал нь тэгш-тэгш цөмүүдийн хувьд сондгой-тэгш цөмүүдээс ойролцоогоор 10^2 эрэмбээр бага байна. Энэ нь тритийн сондгой-тэгш бүтэцтэй холбоотой байж магадгүй юм.

6.4.2. Кноск-он загвар ба t-кластержилт

Шууд урвалын механизмд хурдан нейтроноор явагдах (n,t) урвалын огтлолын томьёог бичвэл:

$$\sigma(n,t) = k_t \Phi_t \sigma_n^{tot}(t) \quad (6.4.14)$$

Энд: k_t -нейтрон бай цөмийг онох параметр. Үүнийг геометр хөндлөн огтлолын талбайгаар илэрхийлвэл:

$$k_t = \frac{\pi r_t^2}{\pi(R_D^2 + r_t^2)} = \frac{3^{2/3}}{(A-3)^{2/3} + 3^{2/3}} \quad (6.4.15)$$

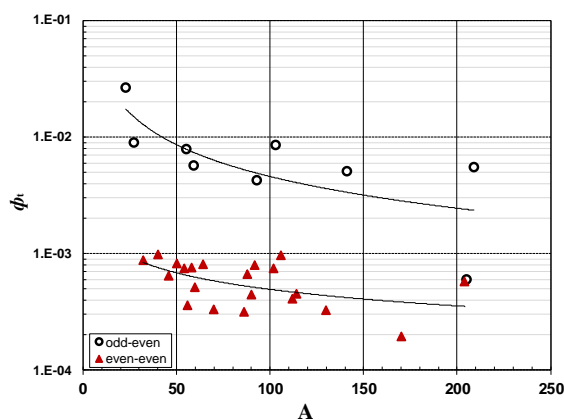
болно.

Энд: r_t - Тритий цөмийн радиус, R_D -охин цөмийн радиус, Φ_t - t-кластер үүсэх магадлал, $\sigma_n^{tot}(t)$ - нейтрон t-цөмтэй харилцан үйлчлэх бүрэн огтлол.

(6.4.14),(6.4.15) илэрхийллүүдээс t-кластер үүсэх магадлалыг олвол:

$$\Phi_t = \frac{\sigma(n,t)}{\sigma_n^{tot}(t)} \frac{(A-3)^{2/3} + 3^{2/3}}{3^{2/3}} \quad (6.4.16)$$

(n,t) урвалын огтлолын туршлагын утгуудыг ашиглан (6.4.16) томьёогоор t-кластер үүсэх магадлалыг тооцоолов. Тооцоолж олсон t-кластер бүрэлдэх магадлалын утгуудаа бай цөмийн масс тооны тэгш сондгойгоос хамааруулан Зураг 6.10-т харуулав.



Зураг 6.10. Суга цохих загвараар тооцоолсон тритон-кластер үүсэх магадлал.

6.4.3. Дүгнэлт

Цөмийн урвалын статистик болон суга цохих загвараар тритон-кластер үүсэх магадлалыг тооцоолсон үр дүнгээс харахад статистик загвараар бодсон кластерын факторын утгууд суга цохих загварын утгаас $\sim 10^2$ дахин бага гарсан байна. Мөн тритон-кластерын фактор нь сондгой цөмүүдэд тэгш-тэгш цөмүүдтэй харьцуулахад нэг эрэмбээр бага байна. Үүнийг бид бай цөмтэй нейтрон харилцан үйлчлэхээс өмнө тритон-кластер цөмд үүсдэг байж магадгүй гэж үзэж байна.

6.5 Дүгнэлт

Цөмийн урвалын компаунд болон шууд механизмд нейтроны үйлчлэлээр цөмд хөнгөн кластер бүрэлдэх магадлалын тооцох томъёоны гаргалгааг (n,α) , $(n,{}^3\text{He})$, (n,t) урвалуудад тус тус хийв. Гаргасан томъёогоо ашиглан компаунд болон шууд механизмд нейтроны үйлчлэлээр α , ${}^3\text{He}$, t -кластер бүрэлдэх магадлалуудыг (n,α) , $(n,{}^3\text{He})$, (n,t) урвал тус бүрд нь тодорхойлов.

Энэхүү бүлэгт хийгдсэн ажлуудыг төслийн үр дүнгийн даалгаврын 6-р даалгавар (*Цөмийн урвалын механизмууд болон загваруудын харьцуулсан судалгаа явуулах*)-т тусгагдсан ажлын хүрээнд гүйцэтгэв.

Тус ажлын хүрээнд хэвлүүлсэн бүтээл:

1. Т.Мую, М.Одсүрэн, К.Катō
Five-body resonances in ${}^8\text{He}$ and ${}^8\text{C}$ using the complex scaling method
Physical Review C **104**, 044306-1-6, 2021 (IF=3.88)
2. М.Одсүрэн, А.Сарсембаяева, Г.Хуукхенхуу, С.Давая, А.Золбаяр, В.Усукхбаяр, А.Турсукх, К.Като, М.Абышев.
Investigation of Virtual State of ${}^8\text{Be}+n$ System Using the Complex Scaling Method.
News of the National Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan, Series Physico Mathematical, 2020, v.4, No.332, pp.77-85.
3. Г.Хуукхенхуу, М.Одсүрэн, Ж.Мункхайхан, А.Турсукх, Ч.Сайханбаяр, А.Сарсембаяева, М.Абышев.

- 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.
4. A.T. Sarsembayeva, M.Odsuren, F.B.Belisarova, A.T.Sarsembay, M.E.Abyshev
 Solar Activity Monitoring for the Period March 20-25, 2019.
News of the National Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan, Physico Mathematical Series, 4(332), 2020, ISSN1991-346X, pp.35-41.
 5. M.Odsuren, G.Khuukhenkhuu, A.Sarsembayeva, S.Davaa, B.Usukhbayar.
 Structure of Continuum States and Strength Function in the Complex Scaling Method.
 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.04003-1-3.
 6. M.Odsuren, Y.Kikuchi, T.Myo, K.Katō
 The First Unbound States in the $A = 9$ Mirror Nuclei ${}^9\text{B}$ and ${}^9\text{Be}$
 Springer Proceedings in Physics: Recent Progress in Few-Body Physics 238 (XXII International Conference on Few-Body Problems in Physics, 9-13 July 2018, Caen, Normandy, France), Chapter-16, 2020, pp.91-95.
 7. M.Odsuren, G.Khuukhenkhuu, A.T.Sarsembayeva, S.Davaa, B.Usukhbayar, A.Zolbayar, K.Kato
 Scattering Problems of Two-Body Systems.
 (Proceedings of the 10th Asian Nuclear Reaction Database Development Workshop, AASPP 2019, 24-27 June, 2019), INDC(KAS)-0002, IAEA, Vienna, Austria, 2019, Almaty, Kazakhstan, p.19-23.
 8. M.Odsuren, G.Khuukhenkhuu, S.Davaa, K.Kato
 Structure of Resonance States in the Simple Schematic Model
International Journal of Mathematics and Physics, v.12 (1) 2021, pp.48-51
 9. B.Batchimeg, G.Khuukhenkhuu, J.Munkhsaikhan
 Alpha-Clustering in (n, α) Reactions
 (Proceedings of the International Conference on “Modern Trends in Natural Sciences and Advanced Technologies in Science Education”, Ulaanbaatar, Aug. 20-23, 2018),
Mongolian Journal of Physics, Issue 5, 2019, p.49-55.
 10. A.Zolbayar, G.Khuukhenkhuu, A. Sarsembayeva, M.Odsuren.
 Study of Resonance States of α +p System in the Complex Scaling Method.
Scientific Transactions “PHYSICS” 30 (527), Press of National University of Mongolia, 2020, pp.74-77.
 11. M.Odsuren, A.T.Sarsembayeva, G.Khuukhenkhuu, S.Davaa, K.Kato
 Photodisintegration Cross Section of Deuteron.
 МУИС-ийн Эрдэм Шинжилгээний Бичиг: **ФИЗИК**, 2020, №31 (536), х.6-9.
 12. A.Zolbayar, G.Khuukhenkhuu, S.Davaa, A.Sarsembayeva, N.Amangeldi, M.Odsuren
 Scattering Phase Shifts of α +p System in the Complex Scaling Method
Scientific Transactions “PHYSICS” 32 (553), Press of National University of Mongolia, 2021, pp.50-55.

ЕРӨНХИЙ ДҮГНЭЛТ

Монгол улсын урт хугацааны хөгжлийн бодлого “Алсын хараа-2050”, Шинжлэх ухаан, технологийг хөгжүүлэх тэргүүлэх чиглэл, цөм технологи (2015-2021) зэрэг манай улсын шинжлэх ухаан технологийн талаар баримталж буй нэгдсэн бодлогын дагуу, ашигт малтмалын олборлолтыг боловсронгуй болгох, хүн амын эрүүл мэндийн үйлчилгээ сайжруулах, цөмийн эрчим хүчийг ашиглах бэлтгэл ажлыг хангах зэрэгт дэвшилтэд технологийг нэвтрүүлэхэд чиглэсэн цөмийн бүтэц, цөмийн задрал, сарнил, урвалын механизмын талаар суурь судалгааны ажлыг онол, туршлага хосолсон орчин үеийн аргаар явуулж дараах гол үр дүнгүүдийг энэхүү төслийн хүрээнд гарган авлаа. Үүнд:

1. Манай орны геологи, уул уурхай, анагаах ухаан, шинжлэх ухааны байгууллага зэрэг цөмийн цацрагийг ашигладаг үйлдвэр аж ахуйн газруудад шаардлагатай хурдан нейтроноор явагдах цөмийн урвалын өгөгдлүүдийг дэлхийн цөмийн өгөгдлийн сангуудаас авч эмхэтгэн нэгтгэж, сан бүрдүүлж, олон тооны өгөгдлүүдийг цаашид ашиглахад эвтэй хялбар байдлаар ангилан ялгах, боловсруулалт хийх, хадгалах программын эхний хувилбарыг R хэлний орчинд боловсруулан МУИС-ийн ЦФСТ-ийн сервер компьютерт хадгалав.
2. Цөмийн урвалын компаунд механизмын хүрээнд боловсруулсан статистик загварын хүрээнд хурдан нейтроноор явагдах $(n,2n)$, (n,t) ба $(n,^3\text{He})$ урвалын огтлолын утгуудад системчилсэн анализ хийж, зүй тогтлуудыг ажиглан, тэдгээрт тохирох онолын тайлбаруудыг өгөв.
3. Байгалийн болон зохиомлоор гаргаж авсан 450 гаруй альфа-цацраг идэвхт цөмүүдэд Гейгер-Нэттолын хуулийг ашиглан систематик анализ хийж 5 цацраг идэвхт бүл байгааг ажиглав. Цаашид нарийвчлан судлахад ихэнх тэгш-тэгш цөмүүдийн хувьд Гейгер-Нэттолын хуультай шугаман хамааралтай зүй тогтол ажиглагдсан. Харин Po, Ra ба Th зэрэг зарим тэгш-тэгш цөмийн хувьд Гейгер-Нэттолын хууль зөрчигдөж байна. Энэ шалтгаан нь цөмийн бүрхүүлэн загвараар тайлбарлагдав.
4. Бээжин их сургуулийн Хүнд ионы физикийн институтийн болон Цөмийн шинжилгээний нэгдсэн институтын Нейтрон физикийн лабораторийн Ван де Граафын хурдасгуур дээр бор-10, никель-58, 60, 61, хлор-35 зэрэг изотопууд дээр хурдан нейтроноор явагдах (n,α) урвалын туршлагын судалгаа явуулж, нейтроны энергийн 3.3-5.3 МэВ мужид тухайн изотопуудын (n,α) урвалын огтлолыг өндөр нарийвчлалтай тодорхойлж, бусад судлаачдын үр дүнтэй харьцуулав.
5. ЦФСТ-ийн микротрон МТ-22 хурдасгуур дээр нил спектртэй саатлын гамма-цацрагаар өдөөгдсөн $^{196m,g}\text{Au}$ цөмийн изомер харьцааг туршлагаар тодорхойлж, бусад судлаачдын үр дүнтэй харьцуулан манайд байгаа төхөөрөмжүүд дээр энэ төрлийн суурь судалгаа явуулах боломжтой гэдгийг харуулав.
6. Цөмийн урвалын компаунд болон шууд механизмд нейтроны үйлчлэлээр цөмд хөнгөн кластер бүрэлдэх магадлалын тооцох томьёоны гаргалгааг (n,α) , $(n,^3\text{He})$, (n,t) урвалуудад тус тус хийв. Гаргасан томьёогоо ашиглан компаунд болон шууд механизмд нейтроны үйлчлэлээр α , ^3He , t-кластер бүрэлдэх магадлалуудыг (n,α) , $(n,^3\text{He})$, (n,t) урвал тус бүрд нь тодорхойлов.

2019-2021 ОНД ХЭВЛҮҮЛСЭН БҮТЭЭЛИЙН ЖАГСААЛТ

Олон улсын болон гадаадын мэргэжлийн сэтгүүлд хэвлүүлсэн бүтээл:

1. Huaiyong Bai, Haoyu Jiang, Yi Lu, Zengqi Cui, Jinxiang Chen, Guohui Zhang, Yu.M.Gledenov, M.V.Sedysheva, G.Khuukhenkhuu, Xichao Ruan, Hanxiong Huang, Jie Ren and Qiwen Fan
 $^{54,56}\text{Fe}(n,\alpha)^{51,53}\text{Cr}$ cross sections in the MeV region
Physical Review C, N99, 2019, p.024619-1-7.
2. Huaiyong Bai, Zhimin Wang, Haoyu Jiang, Zengqi Cui, Yiwei Cui, Jinxiang Chen, Guohui Zhang, Yu.M.Gledenov, M.V.Sedysheva, G.Khuukhenkhuu
Cross sections of the $^{10}\text{B}(n,\alpha)^7\text{Li}$ two-body and $^{10}\text{B}(n,t\alpha)$ three-body reactions at 4.0, 4.5 and 5.0 MeV
European Physical Journal. A, 2019, v.55, N219.
3. G.Khuukhenkhuu, M.Odsuren, J.Munkhsaikhan, A.Tursukh, Ch.Saikhanbayar, A.Sarsembayeva, M.Abyshev.
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.
4. M.Odsuren, A.Sarsembayeva, G.Khuukhenkhuu, S.Davaa, A.Zolbayar, B.Usukhbayar, A.Tursukh, K.Kato, M.Abyshev.
Investigation of Virtual State of $^8\text{Be}+n$ System Using the Complex Scaling Method.
News of the National Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan, Series Physico Mathematical, 2020, v.4, No.332, pp.77-85.
5. Haoyu Jiang, Zengqi Cui, Yiwei Hu, Jie Liu, Jinxiang Chen, Guohui Zhang, Yu.M.Gledenov, E.Sansarbayar, G.Khuukhenkhuu, L.Krupa, I.Chuprakov
Cross-Section Measurements for $^{58,60,61}\text{Ni}(n,\alpha)^{55,57,58}\text{Fe}$ Reactions in the 4.50 – 5.50 MeV Neutron Energy Region.
Chinese Physics C, 2020, v44, No.11, pp.114102-1-12
6. E. Sansarbayar, Yu. M. Gledenov, I. Chuprakov, G. Khuukhenkhuu, G. S. Ahmadov, L. Krupa, Guohui Zhang, Haoyu Jiang, Zengqi Cui, Yiwei Hu, Jie Liu, N. Battsooj, I. Wilhelm, M. Solar, R. Sykora, and Z. Kohout
Cross Sections for the $^{35}\text{Cl}(n,\alpha)^{32}\text{P}$ Reaction in the 3.3–5.3 MeV Neutron Energy Region
Physical Review C **104**, 044620, 2021 (IF=3.88)
7. A.T. Sarsembayeva, M.Odsuren, F.B.Belisarova, A.T.Sarsembay, M.E.Abyshev
Solar Activity Monitoring for the Period March 20-25, 2019.
News of the National Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan, Physico Mathematical Series, 4(332), 2020, ISSN1991-346X, pp.35-41.
8. M.Odsuren, G.Khuukhenkhuu, S.Davaa, K.Kato
Structure of Resonance States in the Simple Schematic Model
International Journal of Mathematics and Physics, v.12 (1) 2021, pp.48-51
9. T.Myo, M.Odsuren, K.Katō
Five-body resonances in ^8He and ^8C using the complex scaling method

Дотоодын мэргэжлийн сэтгүүлд хэвлүүлсэн бүтээл:

1. B.Batchimeg, G.Khuukhenkhuu, J.Munkhsaikhan
Alpha-Clustering in (n,α) Reactions
(Proceedings of the International Conference on “Modern Trends in Natural Sciences and Advanced Technologies in Science Education”, Ulaanbaatar, Aug. 20-23, 2018),
Mongolian Journal of Physics, Issue 5, 2019, p.49-55.
2. Б.Өсөхбаяр, Г.Хүүхэнхүү, С.Даваа, А.Сарсембаева, К.Като, М.Одсүрэн
Альфа-альфа Системийн Резонанс Төлөвүүдийг Комплекс Хувиргалтын Арга Ашиглан
Тодорхойлох нь.
МУИС-ийн Эрдэм Шинжилгээний Бичиг: **ФИЗИК**, №28 (510), 2019, х.11-14.
3. M.Odsuren, A.T.Sarsembayeva, G.Khuukhenkhuu, S.Davaa, K.Kato
Photodisintegration Cross Section of Deuteron.
МУИС-ийн Эрдэм Шинжилгээний Бичиг: **ФИЗИК**, 2020, №31 (536), х.6-9.
4. Ch.Saikhanbayar, M.Odsuren, G.Khuukhenkhuu
Systematical Analysis of $(n,2n)$ Reaction Cross Sections for 14-15 MeV Neutrons.
МУИС-ийн Эрдэм Шинжилгээний Бичиг: **ФИЗИК**, 2020, №31 (536), х.60-67.
5. Н.Батцоож, Б.Батчимэг, М.Одсүрэн, Г.Хүүхэнхүү
 $(n, {}^3_2\text{He})$ Урвалын Огтлолын Анализ ба ${}^3_2\text{He}$ Кластер Бүрэлдэх Магадлал.
МУИС-ийн Эрдэм Шинжилгээний Бичиг: **ФИЗИК**, 2020, №31 (536), х.94-100.
6. J.Munkhsaikhan, M.Odsuren, G.Khuukhenkhuu
Systematics of Alpha-Active Nuclides And on the Validity of the Geiger-Nuttall Law.
МУИС-ийн Эрдэм Шинжилгээний Бичиг: **ФИЗИК**, 2020, №31 (536), х.138-143.
7. А.Төрсүх, М.Одсүрэн, Г.Хүүхэнхүү, Ж.Мөнхсайхан, Ч.Сайханбаяр, Н.Батцоож
Цөмийн урвалын өгөгдлийн сан нутагшуулж буй ажлын эхний зарим үр дүн.
МУИС-ийн Эрдэм Шинжилгээний Бичиг: **ФИЗИК**, 2020, №31 (536), х.167-172.
8. A.Zolbayar, G.Khuukhenkhuu, A. Sarsembayeva, M.Odsuren.
Study of Resonance States of $\alpha+p$ System in the Complex Scaling Method.
Scientific Transactions “PHYSICS” 30 (527), Press of National University of Mongolia, 2020, pp.74-77.
9. A.Zolbayar, G.Khuukhenkhuu, S.Davaa, A.Sarsembayeva, N.Amangeldi, M.Odsuren
Scattering Phase Shifts of $\alpha+p$ System in the Complex Scaling Method
Scientific Transactions “PHYSICS” 32 (553), Press of National University of Mongolia, 2021, pp.50-55.
10. Ч.Сайханбаяр, Г.Хүүхэнхүү, М.Одсүрэн
Саатлын гамма цацрагаар өдөөгдсөн ${}^{196m,g}\text{Au}$ -ийн изомер харьцаа.
МУИС-ийн Эрдэм Шинжилгээний Бичиг: **ФИЗИК**, 2021, №33 (In press)

Олон улсын хуралд илтгэж, эмхэтгэлд нь хэвлүүлсэн бүтээл

1. B.Batchimeg, G.Khuukhenkhoo, M.Odsuren, J.Munkhsaikhan, Ch.Saikhanbayar, Yu.M.Gledenov, E.Sansarbayar and M.V.Sedysheva, Guohui Zhang
Knock-on Mechanism and Alpha-cluster Formation Probability in (n, α) Reaction.
(Proceedings of the XXVI International Seminar on Interaction of Neutrons with Nuclei, ISINN-26, May 28-June 1, 2018, Xi'an, China), 2019, p.55-62.
2. Yu.M.Gledenov, M.V.Sedysheva, L.Krupa, E.Sansarbayar, G.Khuukhenkhoo, Haoyu Jiang, Huaiyong Bai, Zengqi Cui, Jinxiang Chen, Guohui Zhang
Cross Sections of the $^{144}\text{Sm}(n,\alpha)^{141}\text{Nd}$ Reaction at 5.5 and 6.5 MeV.
(Proceedings of the XXVI International Seminar on Interaction of Neutrons with Nuclei, ISINN-26, May 28-June 1, 2018, Xi'an, China), 2019, p.63-71.
3. Haoyu Jiang, Huaiyong Bai, Yi Lu, Zengqi Cui, Jinxiang Chen, Guohui Zhang, Yu.M.Gledenov, M.V.Sedysheva, G.Khuukhenkhoo
Determination of the ^{232}Th Nucleus Number Using Small Solid Angle Method.
(Proceedings of the XXVI International Seminar on Interaction of Neutrons with Nuclei, ISINN-26, May 28-June 1, 2018, Xi'an, China), 2019, p.198-204.
4. G.Khuukhenkhoo, M.Odsuren, J.Munkhsaikhan, B.Batchimeg, Yu.M.Gledenov, E.Sansarbayar and M.V.Sedysheva
Alpha-clustering in Slow and Fast Neutron Induced (n, α) Reactions.
(Proceedings of the XXVI International Seminar on Interaction of Neutrons with Nuclei, ISINN-26, May 28-June 1, 2018, Xi'an, China), 2019, p.72-79.
5. G.Khuukhenkhoo, J.Munkhsaikhan, M.Odsuren, Ch.Saikhanbayar, Yu.M.Gledenov, E.Sansarbayar, M.V.Sedysheva.
Statistical Model Analysis of (n,t) Cross Sections for 14-15 MeV Neutrons.
Proceedings of the XXVII International Seminar on Interaction of Neutron with Nuclei (Dubna, Russia, June 10-14,2019). –Dubna:JINR,2020, pp.97-102.
6. Guohui Zhang, Huaiyong Bai, Haoyu Jiang, Zengqi Cui, Yi Lu, Yiwei Hu, Jinxiang Chen, Yu.M.Gledenov, M.V.Sedysheva, G.Khuukhenkhoo
Measurements of Neutron-Induced Light-Charged Particle Emission 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.01001-1-5.
7. G.Khuukhenkhoo, 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.
8. M.Odsuren, G.Khuukhenkhoo, A.Sarsembayeva, S.Davaa, B.Usukhbayar.
Structure of Continuum States and Srength Function in the Complex Scaling Method.
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.04003-1-3.
9. M.Odsuren, G.Khuukhenkhuu, A.T.Sarsembayeva, S.Davaa, B.Usukhbayar, A.Zolbayar, K.Kato
Scattering Problems of Two-Body Systems.
(Proceedings of the 10th Asian Nuclear Reaction Database Development Workshop, AASPP 2019, 24-27 June, 2019), INDC(KAS)-0002, IAEA, Vienna, Austria, 2019, Almaty, Kazakhstan, p.19-23.
 10. J.Munkhsaikhan, M.Odsuren, G.Khuukhenkhuu
Systematical Analysis of Alpha-active Nuclides.
IOP Conference Series:Materials Science and Engineering, 2020,1000-012002.
 11. M.Odsuren, Y.Kikuchi, T.Myo, K.Katō
The First Unbound States in the A = 9 Mirror Nuclei ⁹B and ⁹Be
Springer Proceedings in Physics: Recent Progress in Few-Body Physics 238 (XXII International Conference on Few-Body Problems in Physics, 9-13 July 2018, Caen, Normandy, France), Chapter-16, 2020, pp.91-95.
 12. Ch.Saikhanbayar, G.Khuukhenkhuu, M.Odsuren, Yu.M.Gledenov, E.Sansarbayar, Guohui Zhang
Systematical Analysis of (n,2n) Reaction Cross Sections for 14-15 MeV Neutrons
(Proceedings of the XXVIII International Seminar on Interactions of Neutrons with Nuclei, ISINN-28, May 24-28, 2021, Xi'an, China) 2022, pp.222-226.

Магистрын судалгааны ажил

1. Ц.Билгүүн
Цөмийн фото-урвалын гигант резонансын анализ
Улаанбаатар хот, 2019 он
2. Б.Өсөхбаяр
⁸Be цөмийн энергийн спектрийн судалгаа
Улаанбаатар хот, 2020 он

Бакалаврын судалгааны ажил

1. А.Золбаяр
⁵Li цөмийн энергийн спектрийн судалгаа
Улаанбаатар хот, 2019 он
2. Н.Батцоож
Хурдан нейтроноор явагдах (n,³He) урвалын огтлолын системчилсэн анализ
Улаанбаатар хот, 2020 он

ХАВСРАЛТ

- 1. Ц.Билгүүний Магистрын дипломын хуулбар**
- 2. Б.Өсөхбаярын Магистрын дипломын хуулбар**
- 3. А.Золбаярын Бакалаврын дипломын хуулбар**
- 4. Н.Батцоожийн Бакалаврын дипломын хуулбар**



МОНГОЛ УЛС
МОНГОЛ УЛСЫН ИХ СУРГУУЛЬ
МАГИСТРЫН ДИПЛОМ

Дугаар E 20194031

Монгол улсын иргэн Цогтжаргалын БУЛГАВУН нь

2019 онд "Цөмийн фото-урвалын тгаш резонансын анализ" сэдвэр диломны ажил бийж тамаалсан тул магистрын ажил тамаалуулах зөвлөлийн шийдвэрийн үндсэн дээр 2019 оны 06 дугаар сарын 07-ны өдрийн А/266 тоот шухалаар

ЦӨМИЙН ЭНХЭНЮЛӨВЧИЙН МАУИСНИР-ын

Зэрэг олов.



С.С

Проф, Д-р С.Чэдидамба
Урьдах зөвлөлийн дарга

Д.Б

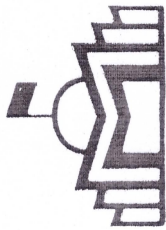
Д-р. Б.Энх-Амалан
Ажлын гурвгийн сургуулийн бодлогын
гзармы дарга

Д.Х

Д-р Д.Хасбаатар
Хамгаалуулах зөвлөлийн дарга



Бүртгэлийн дугаар 09045



МОНГОЛ УЛС
МОНГОЛ УЛСЫН ИХ СУРГУУЛЬ
МАГИСТРЫН ДИПЛОМ

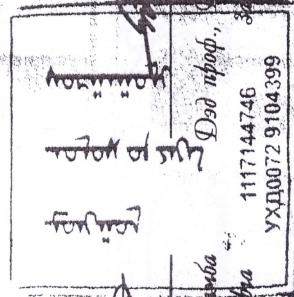
Дугаар E20204217

Монгол улсын иргэн Батсайханы ОСОХБААР нь

2020 онд "8-Ве үеийн энергийн спектрийн судалгаа" сэдвээр дипломын ажил бийрж тамаалсан тул
магистрын ажил хамгаалуулах Зөвлөлийн шийдвэрийн үндэслэн Засварын 2020 оны 06 дугаар сарын 11
-ний өдрийн А/143 тоот тушаалаар

ЦОМЯИЙН ТЕХНОЛОГИЙН МАГИСТЕР-ын

Зэрэг олоов.



Проф., Д-р С.Гэвэсэндорж
Яндрах Зөвлөлийн дарга

Дэд проф., Д-р Б.Ойрзуул
Засвар

1117144746
УХД0072 9104399

C. G. G. Dorj

Batbayar

Проф., Д-р Н.Балдарынэгэ
Ажлын төвийн сургуулийн Засвар

Д-р С.Даваа
Хамгаалуулах Зөвлөлийн дарга



Бүртгэлийн дугаар 09498





МОНГОЛ УЛС
МОНГОЛ УЛСЫН ИХ СУРГУУЛЬ
БАКАЛАВРЫН ДИПЛОМ

Дугаар D 201914900

Монгол улсын иргэн Анхбаярын ЗОЛБАР нь
2019 онд Хэрэгжээний тунхагх ухаан, инженерлэлийн сургуульд

ЦОМЮЙН ИНЖЕНЕРЧДЭЛ

мэргэжл (D 071306)-ээр сурагдан төгссөн тул төгсөлтийн комиссын
2019 оны 06 дугаар сарын 12-ны өдрийн шийдвэрийн үндсэн,
Захирлын 2019 оны 06 дугаар сарын 13-ны өдрийн А/279 тоот тушаалаар
ИНЖЕНЕРЧДЭЛИЙН УХААНЫ БАКАЛАВР-ын зэрэг олоов.



Проф., Д-р. С.Тsendamba
Удирдах Зөвлөлийн дарга



Д-р. Я.Пурвбалтар
Захирал
1117144746
УХД0072 9104300



Дэд проф., Д-р. Б.Оиргuzун
Төгсөлтийн комиссын дарга



Проф., Д-р. Я.Баатарбаяр
Хэрэгжээний тунхагх ухаан,
инженерлэлийн сургуулийн
Захирал



Бүртгэлийн дугаар 5857





МОНГОЛ УЛС
МОНГОЛ УЛСЫН ИХ СУРГУУЛЬ
БАКАЛАВРЫН ДИПЛОМ

Дугаар D202019045

Монгол улсын ирэн Нэгжрийн БАЙЦООЖ нь
2020 онд Хэрэглээний тунгэжээ ухаан, инженерлэлийн сургуульд

ЦЮМИЙН ИНЖЕНЕРЧЛЭЛ

мэргэжл (D 071306)-ээр суралцан төгссөн тул төгсөлтийн комисст

2020 оны 06 дугаар сарын 11-ний өдрийн тунгэвэрийн үндэслэн,

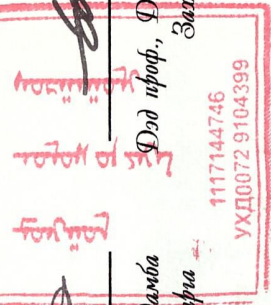
Захирлын 2020 оны 06 дугаар сарын 12-ны өдрийн А/144 тоот тушаалаар

ИНЖЕНЕРЧЛЭЛИЙН УХААНЫ БАКАЛАВР-ын зэрэг олов.

C. Цэцэг

Проф., Д-р. С.Цэцэгдамба
Ундрах Зөвлөлийн дарга

Дэд ирөф., Д-р. Б.Ойрзуу
Захирал



У. Доржпүрэв

Дэд ирөф., Д-р. Д.Бадмаалынбуу
Төгсөлтийн комиссын дарга

Д. Батсайхал

Д-р. Д.Батсайхал
Хэрэглээний тунгэжээ ухаан,
инженерлэлийн сургуулийн захирал



Бичлэлийн дугаар 6242