

ГАЗРЫН ТАТАХ ХҮЧНИЙ ОРОН ДАХЬ БӨӨМИЙН ХӨДӨЛГӨӨНИЙ КВАНТЛАЛ

М.Галбадрах¹, Г.Лхагвасүрэн², Х.Отгонмөнх², О.Лхагва¹

¹Физик-электроникийн сургууль, МУИС

²Математик-компьютерийн салбар, Мөнх Тэнгэр дээд сургууль

ОРШИЛ

Цөмийн шинжигээний нэгдсэн институтийн нейтрон физикийн лабораторит хэт хөрсөн нейтрон гаргаж, "саванд" хоргоох арга олсон тухай нилээд дуулиантай хэлэлцэж байсан билээ¹. Нейтроны хөдөлгөөнийг тасралтгүй сааруулахын хамтаар савын хана руу нэвтрүүлэлгүй буцааж ойлгох аргыг олсон байжээ. Ийнхүү хэт хөрсөн нейтроныг "саванд" хадгалах боломжийг нээсэн юм. Тэр цагаас хэт хөрсөн нейтроныг судалгаанд хэрэглэх арга зүй ихэд нарийсан хөгжжээ.

Физикийн тулгуур асуудлын нэг бол саармаг бөөм таталцлын оронд хоргоход үүсэх квант төлвийг илрүүлэх асуудал юм. Тийм туршилт үйлдэх санааг хорь гаруй жилийн тэртээ мөнхүү лабораторийн захирал И. Франк шинжээч В. Луциковын хамт [1] дэвшүүлжээ. Тэд хэт хөрсөн нейтроны туршлагын арга зүйг газрын татах хүчний орон дахь түүний квант төлвийг илрүүлэхэд ашиглах боломжийг зөгнөжээ.

Энэ нь нэн мэдрэмтгий техник, бас хэмжилтийн өндөр нарийвчлалыг шаардсан тун ч эмзэг нарийн туршлага болох байв. Газраас нейтроныг татах хүч нь устөрөгчийн атом дахь электронд үйлчлэх кулоны хүнээс даруй 19 зэрэг дахин сулхан юм. Газрын татах хүчний оронд хургасан нейтроны квант төлвийг илрүүлэх асуудлыг туршлагаар шийдэхэд тийнхүү цаг хугацаа шаардлагатай байжээ.

Эл тулгуур туршлагыг Францын Лауэ - Ланживены лабораторит үйлдсэн байна[1,2]. Энэхүү туршлага нь таталцлын орон дахь бөөм квант төлөвт хургаж болохыг нотолсноор барахгүй цаашид нейтронд нэн өчүүхэн цэнэг түүнчлэн инерцийн болон таталцлын массын хооронд ялгаа байгаа эсэхийг эрж хайх болон физикийн зарим тулгуур асуудлыг судлах туршлага үйлдэх замыг

¹ О. Лхагвад тэр үр дүнгийн тухай ЦШНИ-ийн семинарт оролцож сонирхох завшаан тохиож байв.

нээж байгаа юм. Эдүгэ нейтроны цэнэгийн дээд хэмжээг электроны цэнэгийн 10^{-21} гэж туршлагаар тандаад байгаа билээ.

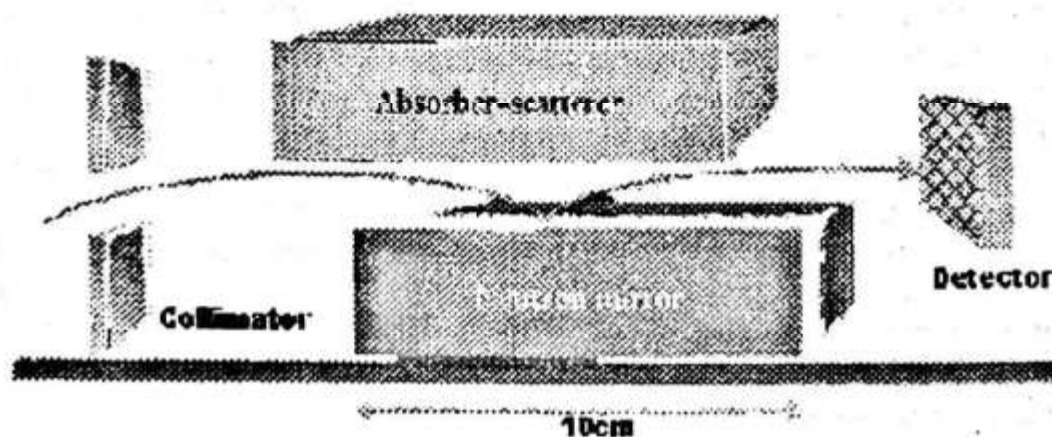
Бид энэхүү ажилд тодорхой энергитэй хэт хөрсөн нейтрон хүндийн хүчний нүхэнд хургаж холбоост төлөв үүсгэж байгааг шалгасан туршлагын дагуу онолын тооцоо үйлдлээ. Манай тооцоо туршлага болон өмнөх тооцоотой сайн тохирч байна.

Энэ ажлыг их номч багш Намсрайн Содномын мэлмий гийсний 80 сүүдрийн өндөрлөгт зориулав.

ТУРШЛАГЫН ТУХАЙ

Хэвтээ хавтгайд нейтроны ойлгогч байрлажээ(1-р зураг). Хэт хөрсөн нейтроны ойролцоогоор 10 м/с хурдтай урсгал завсраар нэвтрэн таталцлын орны "нүхэнд" орно. Таталцлын нүх нь бүрэн ойлгогч толь түүний харалдаа дээр байрласан шингээн-сарниулагчаас бүрэлдэнэ. Хэт хөрсөн нейтрон нэн урт

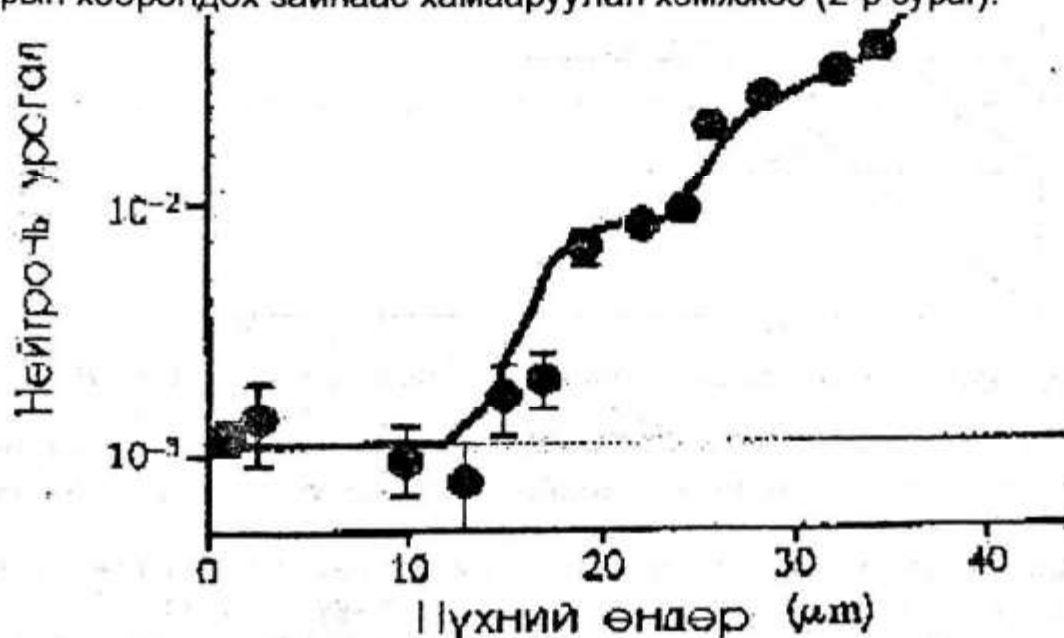
($\lambda \approx 400 \text{ \AA}$) долгиотой учир олонх металлын талст тороос бүрэн ойдог байна. Урсгал дахь нейтроны босоо хурд харьцангуй өргөн завсарт цацагдсан байжээ.



1-р зураг. Таталцлын нүхэнд хургасан нейтроны квант төлвийг бүртгэх төхөрөмжийн бүдүүвч. Нейтроны дээш яльгүй даялсан урсгал бүрэн ойлгогч суурь болон шингээн-сарниулагч хоёрын хоорондох нарийхан урт завсар руу орно. Завсрын өндрийг өөрчлөн нейтроны босоо хурдны хязгаарыг тогтооно. Шүүлтүүр нейтроны нэвтэрсэн урсгалыг өндрөөс хамааруулан тоолно.

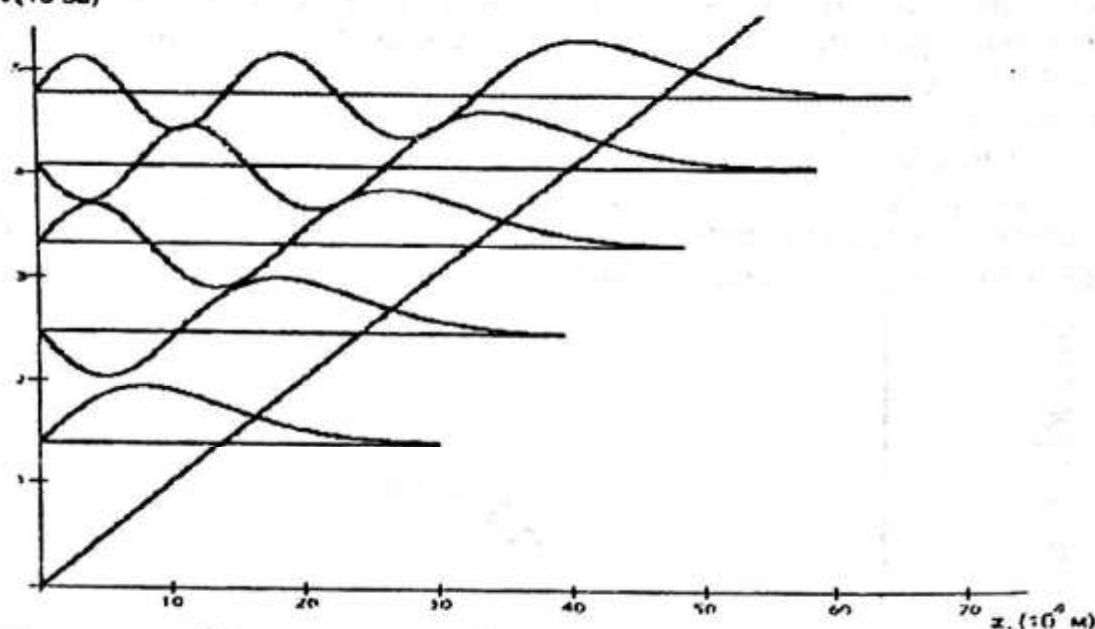
Таталцлын потенциал нүхэн дэх эхний төвшин нь ёроолоос $E_0=1.4$ пэВ (10^{-12} , эВ) зайд оршихыг туршлагаар хэмжжээ[1]. Классик механикийн үүднээс бол тольноос ойсон ийм кинетик энергитэй нейтрон хурдаа барсаар суурь- толиноос 14 мкм зайд зогсоно. Тэгэхлээр эл нөхцөлд тохиосон нейтрон нь толь саяын "тааз" өндрийн хооронд дэвхцэн квант хөдөлгөөн үйлдэнэ. Товчхон хэлбэл, таталцлын орны квант занганд хургаж, квант төлөвт шилжинэ. Энерги нь энэхүү квант тавилан тохиосноос их буюу бага бол нейтрон таталцлын оронд хэрхэвч хургахгүй. Нейтроны дараачийн квант төлвүүд нь бас л тодорхой өндөр буюу нүхний гүнд бүрэлдэнэ. Тухайлбал, 2, 3, 4 –р төлөв завсрын ~24, 32.4, 40 мкм зайд тус тус харгалзана.

Туршлагыг өгүүлсний дагуу хялбархан үйлдэх болмжгүй. Гэвч туршлагын уран санаа олжээ[1,2]. Завсраар нэвтэрсэн нейтроны хэвтээ урсгалыг ойлгогч суурь ба шингээн- сарниулагч хоёрын хоорондох зайнаас хамааруулан хэмжжээ (2-р зураг).



2-р зураг. Нэвтэрсэн нейтроны урсгал ойлгогч суурь болон шингээн- сарниулагч хоёрын хоорондох зайн хамаарлын хэмжилтийн график[1,2].

Шингээн- сарниулагчийг алгуур өргөж байтал тодорхой өндөрт орны таталтаар хурдаа бүрэн барсан нейтрон нүхэнд хургаж квант төлөвт орно. Энэ тухай бид дээр дурьдсан. Тэр нейтрон "тааз" өндөр болон ойлгогчийн хооронд хязгаартай квант хөдөлгөөн үйлдэхийн сацуу хэвтээ хурдаараа шилжсээр завсраас гарна. Шингээн- сарниулагчийг өргөхөд дараачийн квант төвшинд хүртэл гагцхүү эл анхны квант төлөвт хургаж, харьцангуй саатсан нейтроны урсгал бүртгэгдэнэ. Тэр урсгал гагцхүү ижил энерги, нягттай байх нь мэдээж. Ийм учраас занганд орсон нейтроны урсгал өндрийн харгалзах завсарт тогтмол байх юм (3-р зураг).

 $v(10^5 \text{ м/с})$


3-р зураг. Хэт хөрсөн нейтроныг ойлгогч толь болон газрын татах хүчний орноор үүссэн хана бүхий таталцын потенциал нүх. Эл нүхэнд хургасан нейтроны энергийн төвшин болон харгалзсан долгион функцийг төрхийг тухайн тооцооны үр дүнгээр дүрсэлжээ.

Харин квантлах тавилан тохиогоогүй нейтрон шингэж, сарниж эсвэл аяараа урсан өнгөрнө. Ийнхүү Лауэ-Ланжевины лабораторийн туршлагад[2] нейтроны урсгалыг ойлгогч болон шингээн-сарниулагчийн хоорондох зайнаас хамааруулан хэмжсэн байна(2-р зураг).

ОНОЛ

Нейтрон таталцын $V(z) = mgz$ потенциал оронд хөдлөх учир түүний төлөв байдлыг Шредингерийн

$$\left[-\frac{\hbar^2}{2m} \frac{d^2\Psi(z)}{dz^2} + mgz \right] \Psi(z) = E\Psi(z) \quad (1)$$

тэгшитгэлээр илэрхийлнэ. Хөдөлгөөн $z > 0$ мужид ойлгогч гадаргуугаас дээш таталтын оронд явна. Нейтрон гадаргуугаас бүрэн харимхай ойх учир

$$\Psi(0) = 0 \quad (2)$$

бас дээшээ хөдлөхдөө хүндийн хүчний оронд хурд нь саарсаар зогсох тул

$$\Psi(z) = 0 \quad z \rightarrow \infty \quad (3)$$

захын нөхцөлд тус тус таарах ёстой. (1) тэгшитгэлд

$$\frac{2m g}{\hbar^2} = \frac{1}{l^3}, \quad \frac{2mE}{\hbar^2} = \frac{\lambda}{l^2}$$

хамаарлаар жишиг зай оруулан дараах

$$\eta = \frac{z}{l} - \lambda$$

нэргүй хувьсагчийг хэрэглэн, (1) тэгшитгэл (2), (3) захын нөхцлийг

$$\frac{d^2\Psi}{d\eta} - \eta\Psi = 0 \quad (4)$$

$$\varphi(-\lambda) = 0 \quad \varphi(\infty) = 0 \quad (5)$$

хэлбэртэй бичье. Классик онолоор баримжаалбал бөөм $\eta = -\lambda$ ба $\eta = \infty$ хязгаар хооронд төгсөглөг хөдөлгөөн үйлдэнэ. Эл нөхцөлд бөөм таталцлын нүхэнд хургаж холбоост төлөв бүрэлдэнэ. (4) тэгшитгэлийн ерөнхий шийд [3] нь $1/3$ эрэмбэтэй Бесселийн функц юм. Мөн $\varphi(\infty) = 0$ захын нөхцөлд таарах шийд- Эйрийн функц:

$$\varphi(\eta) = C \cdot A(\eta) \quad (6)$$

нь хувьсагчийн сөрөг утгад Бесселийн функцийг шугаман нийлбэрээр:

$$A(\eta) = \frac{C}{3} \sqrt{|\eta|} \left[J_{\frac{1}{3}} \left(\frac{2}{3} |\eta|^{\frac{3}{2}} \right) + J_{\frac{1}{3}} \left(\frac{2}{3} |\eta|^{\frac{3}{2}} \right) \right] \quad \eta < 0 \quad (7)$$

илэрхийлэгдэнэ. Дээрх $\varphi(-\lambda) = 0$ захын нөхцөл ёсоор $\varphi(\eta)$ функц $z = 0$ буюу $\eta = -\lambda$ цэгт тэг болно. Ийнхүү

$$A = (-\lambda) = 0 \quad (8)$$

нөхцлөөс энергийн тасанги утгуудыг олно. (зураг-2) Харин $\eta > 0$ мужид

$$A(\eta) \approx C \cdot \eta^{-\frac{1}{2}} e^{-\frac{2}{3} \eta^{\frac{3}{2}}} \rightarrow 0 \quad \eta \rightarrow \infty \quad (9)$$

хуулиар тэг рүү тэмүүлнэ. (3-р зураг)

ТООЦОО

Эйрийн (6) функцийн (8) нөхцөлд тохирох язгуураас энергийн салангад утгад дүйх λ параметрыг олбол:

$$\eta_n = -\lambda_n$$

Энэхүү язгуурыг хоёр аргаар өндөр нарийвчлалтай тооцоолов[6]. Нэгдүгээрт, язгуурыг Ньютоны шугаман бус тэгшитгэлийн язгуур олдог аргыг хэрэглэн зүгшрүүлсэн программыг ашиглав[4]. Тооцоог мөн Matcad программыг ашиглан тооцоолоход 9 орны нарийвчлалтай тохирч байв. Тэгшитгэлийн язгуурын тооцооны дүнг 1-р хүснэгт үзүүлэв.

Хүснэгт 1. Таталцлын потенциал нүхэн дэх нейтроны хөдлөгөөнийг илэрхийлж буй λ_n язгуур ба түүнд харгалзсан энергийн төвшин хийгээд "нүхний" z_n өндрийг энд жагсаажээ.

Энергийн төвшний дугаар n	λ_n	E_n (пэВ = 10^{-12} эВ)	$z_n z_n$ (мкм = 10^{-6} м)
1	2.338	1.406	13.72
2	4.087	2.458	23.98
3	5.520	3.319	32.39
4	6.786	4.081	39.81
5	7.944	4.777	46.60

Энергийн төвшний утга болон харгалзсан долгион функцийг төрхийг доор хавсаргасан 3-р зурагт үзүүлэв. Тооцооны дүн туршлагын баримттай тохирч байгаа юм.

ДҮГНЭЛТ

Таталцлын орон дахь хэт хөрсөн нейтроны квант төлвийн энерги, долгион функцийг онолоор тооцоолов. Тооцооны үр дүн нь туршлагын болон түрүүчийн онолын тооцоотой сайн тохирч байна. Таталцлын орон дахь квант төлвийг туршлагаар тодорхойлсон нь физикийн хувьд нэн ач холбогдолтой чухал ололт юм. Ингэснээр бүх тулгуур харилцан үйлчлэлийн потенциал оронд квант зүй тогтол байгааг нээж байна. Энэ нь нэгдмэл орны онол, квант таталцлын асуудлын судалгаанд ач тустай болж мэдэх юм.

ИШЛЭЛ

1. B. Scswartzschild, Physics Today, 23, March, 2000.
2. V. Nesvizhevsky et al. Nature, 415, (2002), 297
3. З.Флюорге. 'Задачи по квантовой механике. Т1, Москва, (1974). 113.
4. Г.Лхагвасүрэн, Х.Отгонмөнх, Мөнх Тэнгэр дээд сургууль. программын сан, 2002 .