

Альфа+протон системийн резонанс төлөвүүдийг комплекс хувиргалтын арга ашиглан тодорхойлсон нь

А.Золбаяр^{1*}, Г.Хүүхэнхүү¹, А. Сарсембаева², М. Одсүрэн¹

¹ Хэрэглээний Шинжлэх Ухаан Инженерчлэлийн сургууль болон Цөмийн Физикийн Судалгааны төв, МУИС, Улаанбаатар, Монгол Улс

² Аль-Фарабийн нэрэмжит Казахстаны Үндэсний их сургууль, Алмата, Казахстан Улс

Комплекс хувиргалтын аргад тулгуурлан Гаусс суурь функц ашиглан ${}^5\text{Li}$ цөмийг $\alpha + p$ системээс тогтсон хоёр кластерын систем гэж загварчлан, бага өдөөгдсөн $1/2^-$, $3/2^-$ төлөвүүдийн энерги, түвшний өргөнийг онолоор тооцоолон бусад судлаачдын үр дүнтэй харьцуулав.

ОРШИЛ

Цөмийн бүтэц, шинж чанарыг микро ертөнцийн зүй тогтлыг тайлбарладаг квант онолоор илэрхийлдэг. Ихэнх цөм нэлээн олон нуклоноос тогтдог учир квант физикт олон биеийн харилцан үйлчлэлийг бодох хэрэгтэй болдог. Ийм тооцоо хийхэд зарчмын хувьд хэд хэдэн бэрхшээлүүд тулгардаг учир олон нуклоны системийг хялбарчлахын тулд цөмийн кластер загварыг оруулж ирсэн. Кластер гэдэг нь цөмийг бүрдүүлэгч нуклонууд нь хэсэг хэсгээрээ бүлэг болж цөм дотроо харьцангуй бие даасан систем үүсгэхийг хэлнэ.

1936 онд АНУ-ын эрдэмтэд Г. Бете, Р. Бахер, 1938 онд Л. Хафштадтер, Э. Теллер [1] 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 [2].

Бид энэ ажилд 5 нуклоноос тогтсон ${}^5\text{Li}$ цөмийг $(\alpha + p)$ гэсэн 2 кластерын систем болгон хялбарчилж, ${}^5\text{Li}$ цөмийн бага өдөөгдсөн $J^\pi = 1/2^-$, $J^\pi = 3/2^-$ төлөвүүдийн энерги болон түүнд харгалзах түвшний өргөнийг онолоор тодорхойллоо.

АЛЬФА+ПРОТОН КЛАСТЕРЫН СИСТЕМ БА КОМПЛЕКС ХУВИРГАЛТЫН АРГА

1971 онд Ж.Агулиар, Ж.Комбес, Э.Балслев [3,4] нар Комплекс хувиргалтын аргыг (КХА)-г анх үндэслэж, Б.Симон энэ санааг өргөжүүлж ашигласан [5]. КХА-аар Шредингерийн тэгшитгэлд хувиргалт хийе. Үүний тулд радиал

координат r болон момент k -ийн хувьд дараах хувиргалт хийнэ:

$$U(\theta)rU^{-1}(\theta) = re^{i\theta}$$

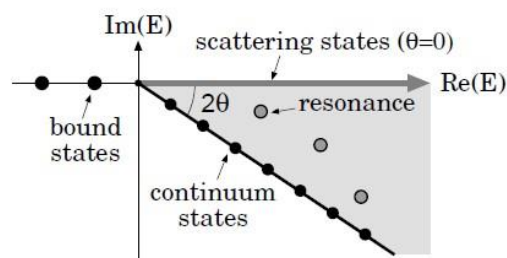
$$U(\theta)kU^{-1}(\theta) = ke^{-i\theta}, \quad (1)$$

энд θ -хувиргалтын өнцгөн параметр.

Комплекс хувиргалт хийгдсэн Шредингерийн тэгшитгэлийг бичвэл

$$H^\theta \Psi^\theta = E^\theta \Psi^\theta \quad (2)$$

болно.



Зураг 1. Комплекс энергийн хавтгай дээрх энергийн түгэлт.

Хувиргалтын өнцгөн параметр θ нь

$$\tan^{-1}(\Gamma/2E_r) < 2\theta \quad \text{үед}$$

$$E(\theta) = E_r - i\Gamma/2 \quad (3)$$

гэж олдоно.

Комплекс энергийн хавтгайд (3) илэрхийллийн шийдээр хувийн утгын түгэлтийг байгуулвал ерөнхий хэлбэр нь 1-р зурагт дүрслэгдсэн шиг олдоно. Энд $E(\theta)$ гэсэн тухайн комплекс хувийн утгын энерги E_r нь бодит утгад, харин нь Γ_r хуурмаг утгад тус тус харгалзана.

Хоёр кластераас тогтсон уг системийн хувьд Гамильтонианыг дараах хэлбэртэй бичье:

$$\hat{H} = T + V_{\alpha p}^{Nucl} + V_{\alpha p}^{Coul}, \quad (4)$$

энд T – Кинетик энергийн оператор, $V_{\alpha p}^{Nucl}$ – Гауссын потенциал, $V_{\alpha p}^{Coul}$ – Кулоны потенциал байна.

* Electronic address: zolbayar.a@num.edu.mn

Харин системийн долгион функц (Ψ)-ийг $\Psi = \sum_{n=1} c_n u_n$, (5)

гэж авах ба C_n , u_n нь харгалзан коэффициент, суурь функц болно. (5) илэрхийлэл дэх u_n суурь функцээр Гауссын суурь функцийг сонгон авсан:

$$u_i = r^l e^{-\frac{1}{2b_i^2}r^2}. \quad (6)$$

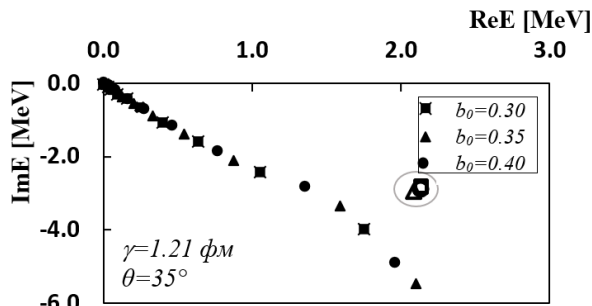
Дээрх (6) илэрхийлэл дэх Гаусс суурь функцийг $b_i = b_0 \gamma^{i-1}$ байна. Гаусс суурь функцийг параметрууд b_0 , γ – ийн тохиромжтой утгыг сонгон авч тооцоолол хийнэ. КХА-ийн хувиргалтын параметр θ нь бодит тоо байх бөгөөд уг хувьсах параметрийг $\theta = 15^\circ - 40^\circ$ өргөн мужид авч тооцоолол гүйцэтгэв. θ -ийн дурын утганд бидний хайж буй резонанс энергид “их” өөрчлөлт өгөх ёсгүй.

ҮР ДҮН

Энэ ажлаар альфа болон протон гэсэн хоёр кластераас тогтсон ${}^5\text{Li}$ цөмийн бага өдөөгдсөн $J^\pi = 1/2^-$, $J^\pi = 3/2^-$ төлөвүүдийн энерги болон түүнд харгалзах түвшний өргөнийг тооцоолов.

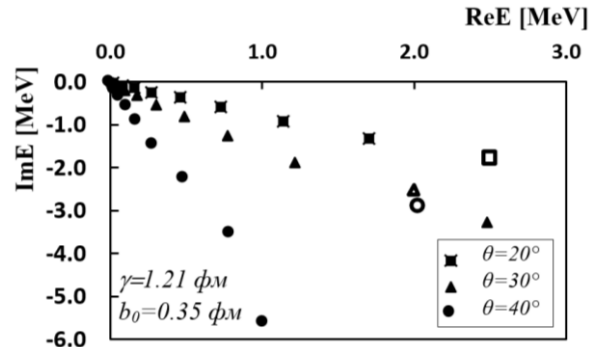
$J^\pi = 1/2^-$ төлөв

${}^5\text{Li}$ цөмийн $J^\pi = 1/2^-$ төлөвийн резонанс энерги болон түүнд харгалзах түвшний өргөнийг хувиргалтын өнцгөн параметрийн $\theta = 15^\circ - 40^\circ$ мужид $b_0 = 0.3 + 0.01k$ ($k = 0, 5, \dots, 10$) алхамтайгаар 11 өөр утганд, $\gamma = 1.19$ фм, 1.20 фм, 1.21 фм гэсэн 3 өөр утганд тус тус онолын тооцоог гүйцэтгэв. 2-р зурагт харуулснаар $b_0 = 0.3 - 0.4$ фм мужид $\theta = 35^\circ$, $\gamma = 1.21$ фм байх утганд резонансын энерги болон түвшний өргөнийг тодорхойлов. Гарган авсан үр дүнг комплекс энергийн хавтгайд дүрслэн харуулав.



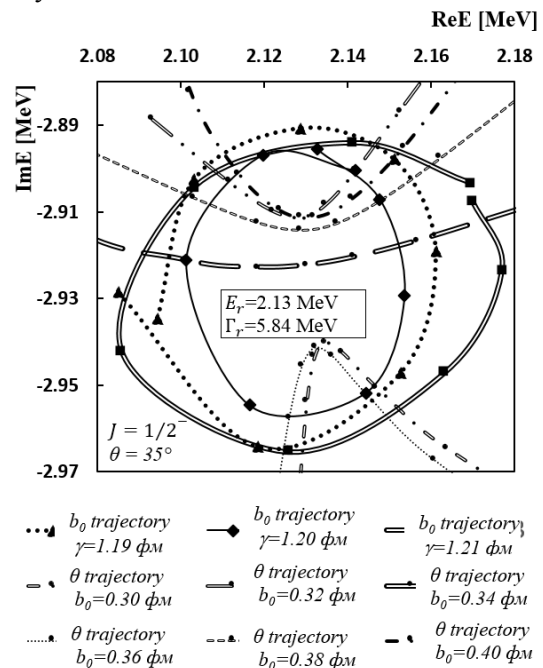
Зураг 2. $J^\pi = 1/2^-$ төлөвийн $b_0 = 0.30$ фм, 0.35 фм 0.40 фм гэсэн 3 өөр утганд авсан үр дүнг харуулав.

Бидний онолоор тооцоолон олсон резонансын энергийн утгууд b_0 параметрийн өөр өөр утганд хэдийгээр тогтвортой боловч таслалаас хойш зуутын орны нарийвчлалтайгаар өөрчлөгдөж байгаа нь ажиглагдав. Иймд резонансын энерги болон түвшний өргөнийг өндөр "нарийвчлал"-тай тодорхойлдог b_0 болон θ -мөрийн арга ашиглан тооцоог гүйцэтгэв. θ -мөрийн аргаар тооцоолол хийхдээ эхлээд θ -ийн хэд хэдэн өөр утганд онолын тооцоог явуулав. Үүнийг зураг 3-т үзүүлэв.



Зураг 3. θ -ийн 3 өөр утганд тооцоологдсон $J^\pi = 1/2^-$ төлөвийн комплекс энергийн хавтгай дахь энергийн түгээлт.

3-р зурагт дөрвөлжин дүрсээр $\theta = 20^\circ$, гурвалжин дүрсээр $\theta = 30^\circ$, дугуй дүрсээр $\theta = 40^\circ$ тус тус өнцгийн хувьд бодогдсон хувийн утгуудыг дүрслэн харуулсан. Бидний хайж байгаа резонанс энерги $\theta = 20^\circ$ үед $E_r = 2.51$ МэВ, $\theta = 30^\circ$ үед $E_r = 2.01$ МэВ, $\theta = 40^\circ$ үед $E_r = 2.03$ МэВ гэж тус тус олдсон.



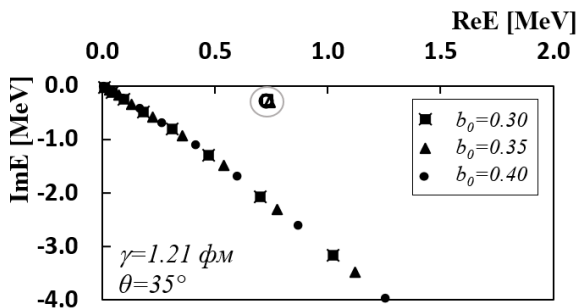
Зураг 4. θ болон b_0 - мөрийн аргаар тооцоологдсон үр дүн.

4-р зурагт b_0 болон θ -мөрийн арга ашиглан резонанс энерги болон түүнд харгалзах түвшний өргөнийг тодорхойлсон бөгөөд бидний хайж буй утга нэг талаас θ траекторуудын огтлолцлолын цэг дээр нөгөө талаас b_0 траекторын тойргийн төвд олдох ёстой. Иймд b_0 траекторийг $\gamma=1.19, 1.20, 1.21$ фм гэсэн 3 өөр утганд $\theta=35^\circ$ үед $b=0.30+0.01k$ ($k=0,1,\dots,10$) байхаар сонгож 6 давталт бүхий тооцоо хийсэн. 4-р зурагт b_0 траекторийг γ параметрийн 3 өөр утганд харгалзах үр дүнг тасралтгүй зураас дотор ромбо дүрс, давхар шулуун дотор дөрвөлжин дүрс, тасралттай бөөрөнхий дотор гурвалжин дүрс агуулсан тойргоор тус тус дүрслэв. Энэ төлөвийн θ болон b_0 мөрийн аргыг хангаж байгаа утга нь $E_r=2.13$ МэВ, $\Gamma_r=5.84$ МэВ гэж тус тус тодорхойлогдов.

$J^\pi = 3/2^-$ төлөв

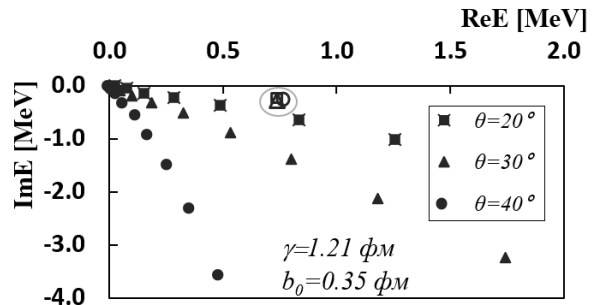
$J^\pi = 3/2^-$ төлөвийн резонансын энерги болон түвшний өргөнийг Гауссийн суурь функц ашиглан тооцоолол хийв. Энэ төлөв харьцангуй тогтвортой тул $J^\pi = 1/2^-$ үед тооцоололд ашигласан параметр болоод мөрийн аргуудыг ашиглан төлөвийн резонанс энергийн "нарийвчилсан" утга $E_r = 0.74$ МэВ, түвшний өргөн $\Gamma_r = 0.59$ МэВ гэж тодорхойлов.

5-р зурагт тухайн төлөвийн өөрчлөлтийн параметруудийг $\gamma=1.21$ фм $\theta=35^\circ$ үед b_0 параметрийг 3 өөр утганд авч онолын тооцоолол хийснийг комплекс энергийн хавтгайд буулган харуулав.



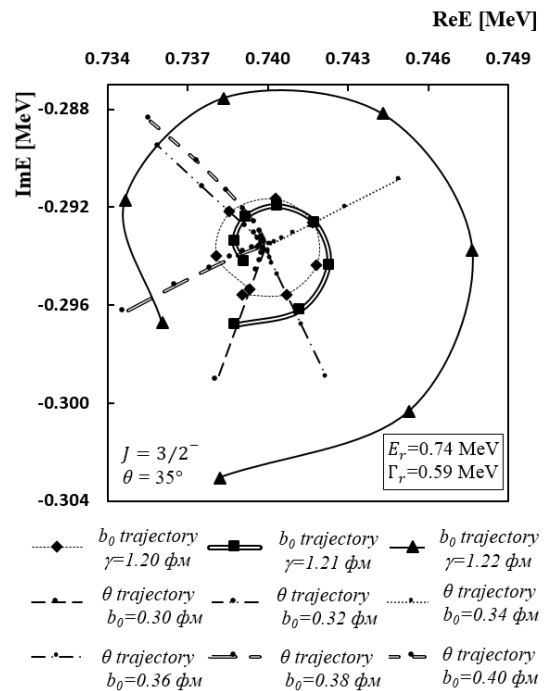
Зураг 5. $J^\pi = 3/2^-$ төлөвийн $b_0 = 0.30$ фм, 0.35 фм 0.40 фм гэсэн 3 өөр утганд авсан үр дүнг харуулав.

θ - мөрийн аргаар тооцоолол хийхдээ эхлээд θ -ийн хэд хэдэн өөр утганд онолын тооцоог явуулав. Үүнийг зураг 6-т үзүүлэв.



Зураг 6. θ -ийн 3 өөр утганд тооцоологдсон $J^\pi = 3/2^-$ төлөвийн комплекс энергийн хавтгай дахь энергийн түгээлт.

6-р зурагт харуулснаар дөрвөлжин дүрсээр $\theta=20^\circ$, гурвалжин дүрсээр $\theta=30^\circ$, дугуй дүрсээр $\theta=40^\circ$ тус тус дүрслэн харуулсан. Бидний хайж байгаа резонанс энерги $\theta=20^\circ$ үед $E_r=0.74$ МэВ, $\theta=30^\circ$ үед $E_r=0.74$ МэВ, $\theta=40^\circ$ үед $E_r=0.77$ МэВ гэж тус тус олдсон.



Зураг 7. θ болон b_0 - мөрийн аргаар тооцоологдсон үр дүн.

7-р зурагт $J^\pi = 3/2^-$ төлөвийн резонанс энерги түүнд харгалзах түвший өргөнийг b_0 болон θ мөрийн арга ашиглан тодорхойлов. 7-р зурагт үзүүлснээр b_0 траекторийг γ параметрийн 3 өөр утганд харгалзах үр дүнг тасралттай зураас дотор ромбо дүрс, давхар шулуун дотор дөрвөлжин дүрс, тасралтгүй зураас дотор гурвалжин дүрс агуулсан тойргоор тус тус дүрслэв.

Үр дүнгийн харьцуулалтыг 1-р хүснэгтэнд харуулав.

Хүснэгт 1. ${}^5\text{Li}$ цөмийн бага өдөөгдсөн төлөвүүдийн энерги болон түвшний өргөний харьцуулалт.

Цөмийн төлөв	Туршлагын утга [6] (МэВ)		Өмнөх ажил [7] (МэВ)		Энэ ажил (МэВ)	
	E_r	Γ_r	E_r	Γ_r	E_r	Γ_r
$1/2^-$	1.49	6.60	2.08	5.67	2.13	5.84
$3/2^-$	0.70	1.23	0.78	0.55	0.74	0.59

- [5] B. Simon, Commun. Math. Phys. v.27, (1972), pp.1-9
- [6] H. Kanada, T. Kaneko, S. Nagata, M. Nomoto, Prog. Theor. Phys. v.61, (1979), pp.1327-1341
- [7] S. Tatashi, Private communication: Master thesis of Hokkaido University, Japan, (2015), p.79.

ДҮГНЭЛТ

- ${}^5\text{Li}$ цөмийг альфа болон протоноос тогтсон хоёр кластерын систем гэж үзэн $J^\pi = 3/2^-$, $J^\pi = 1/2^-$ төлөвт харгалзах түвшний энерги болон өргөнийг Гауссын суурь функц болон комплекс хувиргалтын аргыг ашиглан тооцоолож олов.
- $J^\pi = 3/2^-$ төлөвийн энерги $E_r = 0.74$ МэВ, үүнд харгалзах түвшний өргөн $\Gamma_r = 0.59$ МэВ гэж онолоор олдсон нь бусад эрдэмтдийн өмнө нь гарган авсан онолын ажлын утгатай таарч байгаа боловч туршлагаар хэмжигдсэн утганаас бага зэрэг зөрж байна.
- $J^\pi = 1/2^-$ төлөвийн энерги $E_r = 2.12$ МэВ, үүнд харгалзах түвшний өргөн $\Gamma_r = 5.82$ МэВ гэж онолоос олдсон нь мөн өмнөх төлөвтэй адил өөр эрдэмтдийн онолын тооцооны үр дүнтэй таарч байгаа боловч туршлагын утгаас ялимгүй зөрж байна.

Эндээс харахад бидний гарган авсан томъёо, онолын тооцооллын аргазүй ${}^5\text{Li}$ цөмийн бага өдөөгдсөн төлөвүүдийн энерги болон түвшний өргөнийг тодорхойлож чадаж байгаа нь харагдаж байна.

ТАЛАРХАЛ

Онолын тооцооллыг 2019-2020 онд МУИС-ийн харьяа ЦФСТ-ийн “MINATO” серверт хийж гүйцэтгэв.

АШИГЛАСАН МАТЕРИАЛ

- [1] L. R. Hafstad, and E. Teller, The Alpha-Particle Model of the Nucleus. Phys. Rev. v.54, (1938), p.681
- [2] K. Ikeda, N. Takigawa, H. Horiuchi, Prog. Theor. Phys. Suppl. v.68, (1968), pp.464-475
- [3] J. Aguilar, J. M. Combes, Commun. Math. Phys. v.22, (1971), pp.269-279
- [4] E. Balslev, J. M. Combes Commun. Math. Phys. v.22, (1971), pp.280-294