

Альфа-альфа системийн резонанс төлөвүүдийг комплекс хувиргалтын арга ашиглан тодорхойлох нь

Б. Өсөхбаяр^{1,*}, Г. Хүүхэнхүү¹, С. Даваа¹, А. Сарсембаева², К. Като³, М. Одсүрэн¹

¹ Хэрэглээний Шинжлэх Ухаан Инженерчлэлийн Их Сургууль болон Цөмийн Физик Судалгааны төв, МУИС, Улаанбаатар, Монгол.

² Аль-Фарабийн нэрэмжит Казахстанын Үндэсний их сургууль, Алмата, Казахстан.

³ Цөмийн урвалын өгөгдөлзүйн төв, Шинжлэх ухааны факультет, Хоккайдо Их сургууль Саппоро, Япон.

Комплекс хувиргалтын аргад тулгуурлан ${}^8\text{Be}$ цөмийг $\alpha + \alpha$ бөөмөөс тогтсон хоёр кластерийн систем гэж загварчлан, тухайн системийн бага өдөөгдсөн 2^+ , 4^+ төлөвүүдийг Шмид-Вильдермутын потенциал болон гармоник хэлбэлзлийн суурь функцийг ашиглан онолоор тооцоолов.

ОРШИЛ

Цөмийн бүтэц, шинж чанарыг микро ертөнцийн зүй тогтлыг тайлбарладаг квант онолоор илэрхийлдэг. Цөмийг бүрдүүлэгч нуклонуудын хоорондох харилцан үйлчлэлийн зүй тогтлыг тайлбарлах бүрэн гүйцэд цогц онол өнөөг хүртэл гараагүй байна. Иймд цөмийн бүтцийг загварчилж хялбар хэлбэрт авч үздэг. Тухайлбал цөмийг бүрдүүлэгч нуклонуудыг хамтад нь нэг нийлмэл систем болгож үздэг хамтын загвар, нуклон тус бүрийн хөдөлгөөнийг авч үздэг нэг бөөмийн загвар, энэ хоёр санааг нэгтгэсэн ерөнхийлсөн загварыг ихэвчлэн ашигладаг. Гэвч энэ гурван загвараар бүрэн тайлбарлагдахгүй үзэгдэл зүй тогтол цөөнгүй байдаг.

Нөгөө талаас, цөм нь олон нуклоноос тогтдог учир квант онолоор тайлбарлахын тулд олон биеийн бодлогыг бодох болдог. Жишээ нь, 100 нуклоноос тогтсон бэсрэг масстай цөмийн нуклон бүр x , y , z гэсэн 3 координат буюу хувьсагчаас хамаарна гэвэл 300 хувьсагчтай 100 бөөмийн бодлого болно. Уг бодлогыг бодох нь ихээхэн хүндрэлтэй байдаг. Иймд олон биеийн системийг цөөн биеийн систем болгон хялбарчлахад чиглэсэн кластер загвар 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 тухайн 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 [1]. 2006 онд нейтрон илүүдэлтэй цөмүүдийг оруулан кластерын диаграммыг өргөтгөсөн.

Бид энэ ажилд кластер загварыг ашиглан ${}^8\text{Be}$ цөмийг 2 альфа бөөмөөс тогтсон гэж үзээд 8 нуклоны буюу 8 биеийн бодлогыг 2 кластерын буюу 2 биеийн бодлого болгон авч үзнэ.

${}^8\text{Be}$ цөм нь хэт богино настай ($T_{1/2} = 6.7(17) \times 10^{-17}$ сек) тогтворгүй цөм юм. Од нарны төвд хоёр альфа бөөмийн мөргөлдөөний дүнд богино хугацаанд ${}^8\text{Be}$ цөм болж өдөөгдсөн төлөвтөө үүсээд буцан хоёр альфа бөөм болон задарч байдаг. ${}^8\text{Be}$ цөм цаашлаад бусад бөөм цөмүүдтэй нэгдэх урвалд орж илүү хүнд цөм үүсгэх бөгөөд уг үзэгдлийг хүнд цөмүүдийн эхлэлийн цэг гэж үздэг. Иймд ${}^8\text{Be}$ цөмийн бүтцийн судалгаа нь ертөнц дэх элементийн үүсэл болон хоёр биеийн системийн онолын хувьд маш чухал асуудал юм.

Өмнө дурдсанчлан бид энэ судалгаагаараа ${}^8\text{Be}$ цөмийг альфа-альфа кластераас тогтсон систем гэж үзээд бага өдөөгдсөн $J^\pi = 2^+$, $J^\pi = 4^+$ төлөвүүдийн резонансын энерги, тухайн энергид харгалзах түвш хэмжээсний ний өргөнийг Комплекс хувиргалтын арга (КХА), Шмид-Вильдермутын цөмийн потенциал, гармоник хэлбэлзлийн суурь функц зэргийг ашиглан тодорхойлов. Гарган авсан онолын үр дүнгүүдээ бусад эрдэмтэн судлаачдын онолын

* Electronic address: Usuhbayar_Batsaihan@yahoo.com

болон туршлагын утгатай харьцуулан анализ хийв.

КОМПЛЕКС ХУВИРГАЛТЫН АРГА БА АЛЬФА-АЛЬФА КЛАСТЕРЫН СИСТЕМ

1971 онд Францын эрдэмтэд Ж. Агулиар, Э. Балслев Ж. Комбес нар комплекс хувьсагчийн функцийн онолд байдаг конформ хувиргалттай төстэй аргыг ашиглан КХА-ын үндсийн математик загварчлал гаргасан [2]. Үүний дараа Б. Саймон цөмийн физикт уг аргыг оруулж ирсэн [3].

${}^8\text{Be}$ цөмийг альфа-альфа гэсэн хоёр кластераас тогтсон систем гэж загварчлаад КХА ашиглан тухайн системийн өдөөгдсөн төлөвүүдийн энерги болон тухайн энергид харгалзах түвшиний өргөнийг тодорхойлно.

КХА-р r координат болон k моментыг θ өнцгөөр хувиргалт хийхэд

$$\begin{aligned} U(\theta)rU^{-1}(\theta) &= re^{i\theta}; \\ U(\theta)kU^{-1}(\theta) &= ke^{i\theta}, \end{aligned} \quad (1)$$

дээрх хэлбэртэй болно.

Энд $U(\theta)U^{-1}(\theta) = 1$ (Нэгж матриц) нормчлолын нөхцөл болно. Шредингерийн тэгшитгэлийг шийдэхэд нормчлол хийх шаардлагатай байдаг.

Шредингерийн тэгшитгэлийг бичвэл

$$\hat{H}|\Psi\rangle = E|\Psi\rangle, \quad (2)$$

харин (1) илэрхийллийг ашиглан хувиргалт хийн дахин бичвэл

$$\hat{H}(\theta)|\Psi^\theta\rangle = E(\theta)|\Psi^\theta\rangle, \quad (3)$$

болно. Үүнд $\hat{H}(\theta)$ комплекс хувиргалт хийгдсэн Гамильтониан болон Ψ^θ долгион функц байна. Хоёр альфа кластераас тогтсон системийн хувьд Гамильтонианыг дараах хэлбэртэй бичнэ [4]:

$$\hat{H} = \sum_{i=1}^2 \hat{T}_i - \hat{T}_{c.m} + V_{\alpha\alpha}^{Nucl}(r) + V_{\alpha\alpha}^{Coul}(r). \quad (4)$$

Энд: $\sum_{i=1}^2 \hat{T}_i - \hat{T}_{c.m}$ – Кинетик энергийн потенциал;

$V_{\alpha\alpha}^{Nucl}$ – Цөмийн потенциал;

$V_{\alpha\alpha}^{Coul}(r)$ – Кулоны потенциал байна.

Долгион функц нь

$$\Psi = \sum_{i=1} c_i u_i \quad (5)$$

байх ба c_i коэффициент, u_i суурь функц байна.

Гаусс, гармоник хэлбэлзлийн суурь функцүүдийг судалгааны зорилго, гарган авах үр дүнгээс хамааран сонгож авдаг. Энэ ажилд суурь функцээр гармоник хэлбэлзлийн суурь

функцийг ашиглав. Гармоник хэлбэлзлийн суурь функцийг бичвэл:

$$u_{nl}(r) = N_l^n \left(\frac{r}{b_F}\right)^l L_n^{l+\frac{1}{2}}\left(\left(\frac{r}{b_F}\right)^2\right) \exp\left(-\frac{1}{2b_F^2}r^2\right) Y_{lm}(r). \quad (6)$$

Үүнд $L_n^{l+\frac{1}{2}}$ орбитал моментын Лагерийн цуваа, $N_l^n \left(\frac{r}{b_F}\right)^l$ нормчлолын коэффициент бөгөөд

$$N_l^n \left(\frac{r}{b_F}\right)^l = \left\{ \frac{2\Gamma(n+1)}{b_F^3 \Gamma(l+n+\frac{3}{2})} \right\}^{1/2} \text{ байна. Энэ ажилд бид}$$

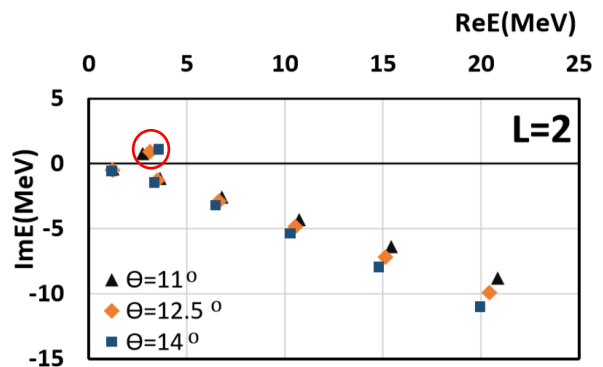
$b_F = 0.967$ фм (фемтометр) гэж авав. b_F нь гармоник хэлбэлзлийн суурь функцийн өргөний хэмжээсийг илэрхийлдэг параметр юм.

Комплекс хувиргалт хийгдсэн (3) илэрхийллийн шийд $E(\theta) = E_r - i\Gamma/2$ (MeV) гэж олдоно. Энд E_r төлөвийн резонансын энерги, Γ тухайн энергид харгалзах түвшиний өргөн байна. (6) илэрхийлэл дэх n нь матрицын хэмжээсийг илэрхийлэх бөгөөд манай тохиолдолд төгсгөлөг байна.

ҮР ДҮН

Энэ ажлаар ${}^8\text{Be}$ цөмийг хоёр альфа кластераас тогтсон систем гэж үзээд бага өдөөгдсөн $J^\pi = 2^+$, $J^\pi = 4^+$ төлөвүүдийн энерги болон тухайн энергид харгалзах түвшиний өргөнийг Шмид-Вильдермутын потенциал болон гармоник хэлбэлзлийн суурь функцийг ашиглан тооцоолов.

${}^8\text{Be}$ цөмийн $J^\pi = 2^+$ төлөвийн резонансын энерги болон энергид харгалзах түвшиний өргөнийг хувиргалтын параметрийн $\theta = 11^\circ, 12.5^\circ, 14^\circ$ гэсэн гурван өөр утганд олов. (3) илэрхийллээр тооцоологдсон бүх утгуудыг комплекс энергийн хавтгайд буулган 1-р зурагт харуулав.

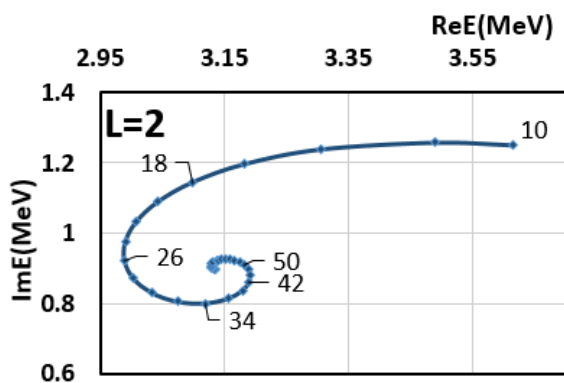


1-р зураг. $J^\pi=2^+$ төлөвийн $\theta=11^\circ$ (хар гурвалжин), 12.5° (шар ромбо), 14° (хөх дөрвөлжин)-ийн гурван өөр утганд

онолоор тооцоологдсон энергийн утгыг комплекс энергийн хавтгайд буулгасан нь.

1-р зурагт резонансын энергийн болон тасралтгүй төлөвүүдийн утга нэгэн хавтгайд хамт дүрслэгдсэн байна. Эндээс харахад θ хувиргалтын параметрийн гурван өөр утганд олдож буй утгууд нь улаан дугуй дотор орших резонансын энергийн утгууд нь $E_r(11^\circ) = 2.75 \text{ MeV}$, $E_r(12.5^\circ) = 3.57 \text{ MeV}$, $E_r(14^\circ) = 3.13 \text{ MeV}$ гэж олдох ба тасралтгүй төлөвөөс ялгаран тусдаа олдоно.

Дээрх зургаас харахад резонанс энергийн утгууд θ хувиргалтын параметрээс хамааран өөр хоорондоо ялимгүй зөрөөтэй байна. Бид резонанс энергийн нарийвчилсан утгыг θ хувиргалтын параметр болон n_{max} матрицын хэмжээсний параметрийг өөрчлөн траекторын буюу мөрийн аргыг ашиглан олно. $J^\pi = 2^+$ төлөвийн резонансын энергийн нарийвчилсан утгыг олохдоо $\theta = 12.5^\circ$ үед $n_{max} = n + k$ илэрхийллээр 2 алхамтайгаар нийт 36 тооцоог хийж n_{max} утга бүрд олдсон утгаар муруй байгуулан тогтворжилтын цэгийг 2-р зурагт харуулав. Энд $n = 9, k = 0, 2, 4, \dots 50$ гэж авав.

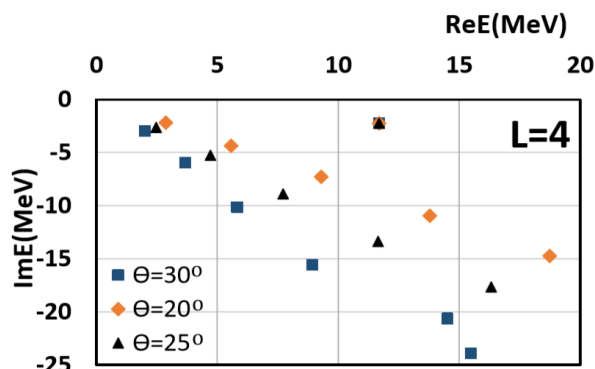


2-р зураг. $J^\pi = 2^+$ төлөвийн резонанс энергийн нарийвчилсан утгыг n_{max} – траекторын буюу мөрийн аргыг ашиглан олсон нь.

Дээрх графикаас үзэхэд $J^\pi = 2^+$ төлөвийн резонансын энерги $E_r = 3.14 \text{ MeV}$, тухайн энергид харгалзах түвшиний өргөн $\Gamma = 1.79 \text{ MeV}$ гэж олдов. $J^\pi = 2^+$ төлөвийн резонансын энергийн нарийвчилсан утгыг олоход θ - мөрийн арга хэрэглэгдсэн бөгөөд n_{max} матрицын хэмжээсний өөр хоорондоо ялгаатай 5 утганд хувиргалтын параметрийг $\theta = 10^\circ + \theta_0$ илэрхийллээр 0.5° алхамтайгаар тооцооллыг хийсэн. Энд $\theta_0 = 0^\circ, 0.5^\circ \dots 5^\circ$ гэж авав. θ - мөрийн аргаар бодогдсон утгуудыг 2-р зурагт

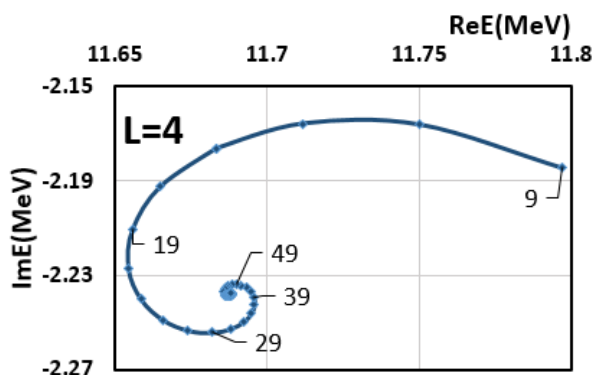
оруулаагүй ч [4] ажилд дүрслэгдсэн муруйнууд бидний тооцооллын үед ч мөн олдсон.

^8Be цөмийн $J^\pi = 4^+$ төлөвийн резонансын энерги болон энергид харгалзах түвшиний өргөнийг хувиргалтын параметрийн $\theta = 20^\circ, 25^\circ, 30^\circ$ гэсэн гурван өөр утганд бодож, комплекс энергийн хавтгайд буулган 3-р зурагт харуулав.



3-р зураг. $J^\pi = 4^+$ төлөвийн $\theta = 25^\circ$ (хар гурвалжин), 20° (шар ромбо), 30° (хөх дөрвөлжин)-ийн гурван өөр утганд онолоор тооцоологдсон энергийн утгыг комплекс энергийн хавтгайд буулгасан нь.

Дээрх резонансын энергийн утгууд нь $E_r(25^\circ) = 11.69 \text{ MeV}$; $E_r(20^\circ) = 11.69 \text{ MeV}$; $E_r(30^\circ) = 11.68 \text{ MeV}$ байна. $J^\pi = 4^+$ төлөвийн резонансын энергийн нарийвчилсан утгыг олохдоо $\theta = 25^\circ$ үед $n_{max} = n + k$ илэрхийллээр 2 алхамтайгаар нийт 26 тооцоог хийж n_{max} утга бүрд олдсон утгаар муруй байгуулан тогтворжилтын цэгийг 4-р зурагт харуулав. Энд $n = 9, k = 0, 2, 4, \dots 50$ гэж авав.



4-р зураг. $J^\pi = 4^+$ төлөвийн резонанс энергийн нарийвчилсан утгыг n_{max} – траекторын буюу мөрийн аргыг ашиглан олсон нь.

Дээрх графикаас үзэхэд $J^\pi = 4^+$ төлөвийн резонансын энерги $E = 11.69 \text{ MeV}$, тухайн энергид харгалзах түвшиний өргөн $\Gamma = 4.47 \text{ MeV}$ гэж олдов. Мөн $J^\pi = 4^+$ төлөвийн

резонансын энергийн нарийвчилсан утгыг олохдоо θ - мөрийн аргыг n_{max} матрицын хэмжээсний өөр хоорондоо ялгаатай 5 утганд хувиргалтын параметрийг $\theta = 5^\circ + \theta_0$ илэрхийллээр 5° -н алхамтайгаар тооцооллыг хийж олсон. Энд $\theta_0 = 0^\circ, 5^\circ \dots 30^\circ$ гэж авав. $J^\pi = 2^+$, $J^\pi = 4^+$ төлөвүүдийн бидний тооцоолсон энерги болон тухайн энергид харгалзах түвшиний өргөнийг бусад судлаачдын ижил арга ашиглан онолоор тооцоолсон болон туршлагын үр дүнтэй харьцуулах шаардлагатай. 1-р хүснэгтэд 2 болон 4-р зургуудаас олдсон нарийвчилсан утгуудыг бусад эрдэмтдийн туршлагын болон ижил арга ашиглан гарган авсан онолын утгуудтай өгөв. Мөн хүснэгтэд (4) илэрхийллийн потенциалын параметруудийг өгөв.

1-р хүснэгт. ^8Be цөмийн бага өдөөгдсөн төлөвийн энерги болон түвшний өргөний харьцуулалт.

Төлөв	Туршлагын утга [5]		Гармоник осцилляторын суурь функц			
			Бусад судлаачид [6]		Энэ ажил	
	$E_r(\text{MeV})$	$\Gamma_r(\text{MeV})$	$E_r(\text{MeV})$	$\Gamma_r(\text{MeV})$	$E_r(\text{MeV})$	$\Gamma_r(\text{MeV})$
2^+	2.94	1.51	2.9	1.4	3.14	1.79
4^+	11.35	≈ 3.5	11.7	4.4	11.69	4.47
Потенциалын параметрууд(4)			Шмид-Вильдермутын потенциал [7]			
$V_0(\text{MeV})$	-	-	106.09			
$\beta(\text{fm}^2)$	-	-	0.2009			
$\alpha(\text{fm}^1)$	-	-	0.5972			

ДҮГНЭЛТ

Энэхүү судалгааны ажлаар ^8Be цөмийг хоёр альфа кластераас тогтсон систем гэж үзээд $J^\pi = 2^+$, $J^\pi = 4^+$ төлөвт харгалзах резонансын энерги болон тухайн энергид харгалзах түвшиний өргөнийг гармоник хэлбэлзлийн суурь функц, Шмид-Вильдермутын потенциал болон КХА ашиглан онолын тооцоолол хийсэн. ^8Be цөмийн бага өдөөгдсөн төлөвүүдийн резонансын энерги болон түүнд харгалзах түвшиний өргөнийг бүрэн тооцоолж харьцуулалт хийсэн. $J^\pi = 4^+$ төлөвийн энергийн утгууд өмнө хийгдсэн туршлагын утга болон онолын үр дүнтэй маш сайн тохирсон. Харин $J^\pi = 2^+$ төлөвийн энергийн утгууд өмнө хийгдсэн туршлагын утга болон онолын үр дүнгээс бага зэрэг зөрөөтэй байна. Үүнийг нягтлан авч үзэх хэрэгтэй. Энэ нь матрицын

Энэ ажлаар ^8Be цөмийн бага өдөөгдсөн $J^\pi = 2^+$ төлөвийн резонансын энерги $E_r = 3.14 \text{ MeV}$, тухайн энергид харгалзах түвшиний өргөн $\Gamma = 1.79 \text{ MeV}$, $J^\pi = 4^+$ төлөвийн резонанс энерги $E = 11.69 \text{ MeV}$, тухайн энергид харгалзах түвшиний өргөн $\Gamma = 4.47 \text{ MeV}$ гэж олдов. Бусад судлаачдын ажилд ижил потенциал ашигласан боловч суурь функцийг хэлбэр нь биднийхээс өөр байдаг. хэдийгээр өөр өөр суурь функц ашиглан резонанс энерги, түвшиний өргөнийг тооцоолж байгаа хэдий ч олох утга ижил байх ёстой. 1-р хүснэгтээс харахад онолоор тооцоолон олсон ^8Be цөмийн бага өдөөгдсөн $J^\pi = 2^+$, $J^\pi = 4^+$ төлөвийн энергийн утгууд нь өмнө хийгдсэн туршлагын утга [5] болон онолын үр дүнтэй [6] тохирсон болно.

хэмжээсний сонголт болон тооцооллын кодын нарийвчлалаас хамаарсан байж мэдэх юм.

НОМ ЗҮЙ

- [1] K. Ikeda, N. Takigawa, H. Horiuchi, Prog. Theor. Phys. Suppl. Volume E68, No. Pages 464-475 (1968).
- [2] J. Aguilar, J. M. Combes, Commun. Math. Phys. Volume 22, Pages 269-279 (1971). E. Balslev, J. M. Combes Commun. Math. Phys. Volume 22, Pages 280-294 (1971).
- [3] B. Simon, Commun. Math. Phys. Volume 27, Pages 1-9 (1972).
- [4] A. T. Kruppa, K. Kato, Prog. Theor. Phys. Volume 84, Pages 1145-1159 (1990).
- [5] D. R. Tilley et al., Nucl. Phys. Volume A 708, Pages 3-163 (2002).
- [6] M. Odsuren, K. Katō, M. Aikawa Nuclear Data Sheets 120, Pages 126-128, (2014).
- [7] E. W. Schmid and K. Wildermuth, Nucl. Phys. Volume A 26, Pages 463-468 (1961).