

Альфа-протон системийн фазын шилжилтийг комплекс хувиргалтын арга ашиглан тодорхойлсон нь

А.Золбаяр^{1*}, Г.Хүүхэнхүү¹, С.Даваа¹, А. Сарсембаева³, Н. Амангелди⁴, М. Одсүрэн^{1,2}

¹ Цөмийн Физик Судалгааны төв, МУИС, Улаанбаатар, Монгол Улс

² Хэрэглээний Шинжлэх Ухаан Инженерчлэлийн Их сургууль, МУИС, Улаанбаатар, Монгол Улс

³ Аль-Фарабийн нэрэмжит Казахстанын Үндэсний Их Сургууль, Алмата, Казахстан Улс

⁴ Гумилёвийн нэрэмжит Евро-Азийн Үндэсний Их Сургууль, Астана, Казахстан Улс

⁵Li цөмийг $\alpha + p$ хоёр кластераас тогтсон систем гэж загварчлан, комплекс хувиргалтын аргаар бага өдөөгдсөн $J^\pi = 1/2^-$ ба $3/2^-$ үндсэн төлөвүүдийн сарнилын фазын шилжилтийг тодорхойлов.

ОРШИЛ

Энэхүү судалгаагаар ⁵Li цөмийг $\alpha + p$ хоёр кластераас тогтсон систем [1] гэж загварчлан, өмнөх ажлын хүрээнд хийсэн $J^\pi = 3/2^-$ үндсэн төлөв ба бага өдөөгдсөн $J^\pi = 1/2^-$ төлөвүүдийн резонанс энерги болон түүнд харгалзах түвшний өргөнийг тооцоолон гарган авсан үр дүнг [2] ашиглан сарнилын фазын шилжилтийг тодорхойлов. ⁵Li системийн сарнилын фазын шилжилтийн аналитик томъёог гарган, уг томъёогоор онолын тооцоолол хийх кодыг фортран программчлалын хэл ашиглан бичин тооцооллыг гүйцэтгэв. Бидний гарган авсан аналитик томъёо нь резонанс энергийн утга болон тасралтгүй төлөвийн утгуудыг тус тусад нь тооцоолох боломж олгоно. Ингэснээр резонанс болон тасралтгүй төлөвүүдийн фазын шилжилтэд өгөх нөлөөллийг тогтооно.

Мөн онолоор тооцоолсон үр дүнг бусад эрдэмтдийн туршлагаар хэмжсэн утгуудтай харьцуулж, нэг энергийн төлөвт олдож байгаа резонанс энерги нь ойр орших бусад төлөврүү сарниж байгаа эсэх талаар судалж, тасралтгүй төлөвүүдийн сарнилын физик хэмжигдэхүүнүүдэд үзүүлэх хувь нэмрийг ⁵Li цөмийн үндсэн болон бага өдөөгдсөн төлөвүүдэд тооцоолов.

АЛЬФА-ПРОТОН КЛАСТЕРИЙН СИСТЕМ БА КОМПЛЕКС ХУВИРГАЛТЫН АРГА

Судалгаанд хэрэглэгдэх үндсэн арга нь комплекс хувиргалтын арга (КХА) юм. Энэ аргыг 1971 онд Ж.Агулиар, Ж.Комбес, Э.Балслев [3,4] нар анх санааг гаргаж математикт оруулж ирсэн ба тус аргыг Б.Симон

өргөжүүлж цөмийн физикийн судалгаанд ашигласан [5]. КХА-аар Шредингерийн тэгшитгэлд хувиргалт хийвэл:

$$H^\theta \Psi^\theta = E^\theta \Psi^\theta \quad (1)$$

болно.

Хоёр кластераас тогтсон системийн хувьд Гамильтонианыг дараах хэлбэртэй бичье:

$$\hat{H} = T + V_{\alpha p}^{Nucl} + V_{\alpha p}^{Coul}. \quad (2)$$

Харин системийн долгион функц (Ψ)-ийг

$$\Psi = \sum_{n=1} c_n u_n, \quad (3)$$

байх ба энд u_n суурь функцээр Гауссын суурь функцийг сонгон авсан:

$$u_i = r^l e^{-\frac{1}{2b_i^2} r^2} \quad (4)$$

ФАЗЫН ШИЛЖИЛТ

Тасралтгүй төлөвийн нягтыг:

$$\Delta(E) = \rho(E) - \rho_0(E), \quad (5)$$

гэж илэрхийлэх ба Грийний функцийг ашиглавал:

$$\Delta(E) = -\frac{1}{\pi} \text{Im}\{\text{Tr}[G(E) - G_0(E)]\} \quad (6)$$

болно.

Тасралтгүй төлөвийн нягтыг фазын шилжилтээр илэрхийлбэл:

$$\Delta(E) = \frac{1}{\pi} \frac{d\delta(E)}{dE} \quad (7)$$

болно.

(6) илэрхийллийг дэлгэрэнгүй байдлаар бичвэл:

*Electronic address: zolo.011263@gmail.com

$$\Delta(E) = -\frac{1}{\pi} \text{Im} \left\{ \text{Tr} \left[\frac{1}{E-H} - \frac{1}{E-H^0} \right] \right\} \quad (8)$$

H -цөмийн харилцан үйлчлэлийг тооцсон системийн Гамильтониан харин H^0 -харилцан үйлчлэлгүй системийн Гамильтониан ба системийн чөлөөт Гамильтониан гэж нэрлэгддэг. (8) илэрхийллийг тооцоологдсон хувийн утгуудаар илэрхийлэн (7)-д орлуулан бичвэл

$$\delta(E) = -\text{Im} \int \left| \frac{1}{E-E_r+i\Gamma_r/2} + \frac{1}{E-E_c+iE_c} - \frac{1}{E-E_k^0+iE_k^0} \right| dE, \quad (9)$$

болох ба илэрхийллийн интегралыг авбал [6]

$$\delta(E) = \tan^{-1} \left(\frac{E-E_r}{\Gamma_r/2} \right) - \tan^{-1} \left(\frac{E-E_c}{E_c} \right) + \tan^{-1} \left(\frac{E-E_k^0}{E_k^0} \right) \quad (10)$$

болно. Фазын шилжилтийн илэрхийлэл дэх r, c болон k индексүүд харгалзан резонансын энерги, тасралтгүй төлөвүүд болон чөлөөт Гамильтонианы сарнилын фазын шилжилтийн өгөх нөлөөллийг харуулах ба тус бүр дараах хэлбэртэй

$$\tan \delta_r = \frac{E - E_r}{\Gamma_r/2},$$

$$\tan \delta_c = \frac{E - E_c}{E_c},$$

$$\tan \delta_k = \frac{E - E_k^0}{E_k^0},$$

бичигдэнэ.

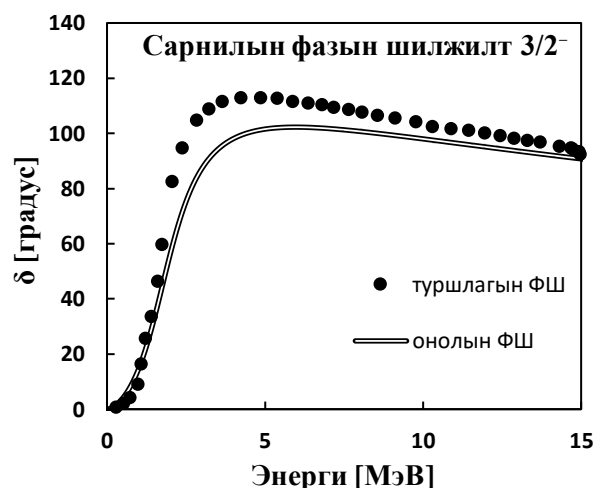
ҮР ДҮН

${}^5\text{Li}$ цөмийн үндсэн $3/2^-$ төлөвийн резонанс энерги $E_r = 0.74$ МэВ түүнд харгалзах түвшний өргөн $\Gamma_r = 0.59$ МэВ, бага өдөөгдсөн $1/2^-$ төлөвийн резонанс энерги $E_r = 2.12$ МэВ түүнд харгалзах түвшний өргөн $\Gamma_r = 5.82$ МэВ гэж бидний өмнөх ажилд [2] олдсон. Өмнөх судалгаагаар гарган авсан үр дүнгийн тусламжтайгаар (10) томъёог ашиглан фазын шилжилтийг онолоор бодож, туршлагаар хэмжигдсэн утгуудтай харьцуулан анализ хийв. Судалгааны үр дүнд гарган авсан резонанс энерги нь фазын шилжилтэд хамгийн их нөлөө үзүүлдэг болох нь 2 болон 7-р зургаас харагдаж байна. Сарнилын фазын шилжилтийг тооцоолоход тасралтгүй төлөвүүдийн хувь нэмрийг орхигдуулж болохгүй бөгөөд

тэдгээрийн нөлөөллийг тодруулахын тулд резонанс энергитэй ойр болон хол орших төлөвүүд сарнилын фазын шилжилтэд хэрхэн нөлөөлж байгааг 3-5 болон 8-11-р зургуудад үзүүлэв. Резонанс энергийн ойр орших тасралтгүй төлөвүүдээс сарнилын фазын шилжилтэд өгөх хувь өндөр байгаа бөгөөд эндээс резонанс энергийн төлөв ойр орших төлөвүүд рүүгээ сарнидаг болох нь тогтоогдож байна. Сарнилын фазын шилжилтэд өгөх резонанс энерги болон тасралтгүй төлөвүүдийн хувь нэмрийг нэг бүрчлэн нарийн тооцоолж чадаж байгаа нь бидний боловсруулсан аналитик томъёоны давуу талыг харуулав.

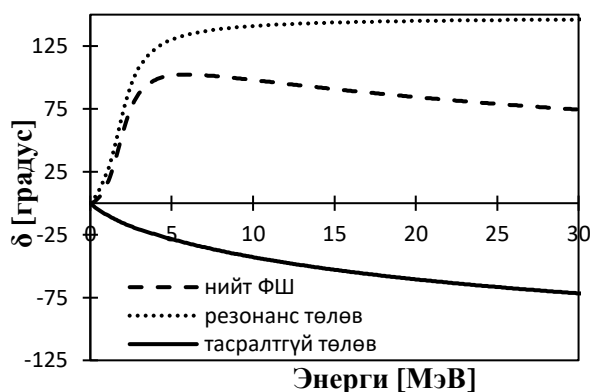
$J^\pi = 3/2^-$ төлөвийн фазын шилжилт

${}^5\text{Li}$ цөмийн үндсэн $3/2^-$ төлөвийн сарнилын фазын шилжилтийг (10) томъёог ашиглан тооцоолно. Онолоор тооцоологдсон сарнилын фазын шилжилтийг хар муруйгаар, туршлагаар хэмжигдсэн утгуудыг хар цэгүүдээр дүрслэн Зураг 1-г үзүүлэв. Онолоор тооцоолсон болон туршлагаар хэмжигдсэн сарнилын фазын шилжилтийн утгууд 4-6 МэВ энергийн мужид ялимгүй зөрж байна. Харин бага болоод өндөр энергийн мужид онол болоод туршлагаар хэмжигдсэн утгуудын тохироо сайн байна. Энэ нь бидний сонгосон онолын тооцооллын аргазүй энэ талын судалгаанд тохиромжтойг харуулж байна.



Зураг 1. $J^\pi = 3/2^-$ үндсэн төлөвийн сарнилын фазын шилжилтийн онолоор тооцоолсон үр дүн, туршлагаар [7,8] хэмжигдсэн утгуудын харьцуулалт. Бөөрөнхий хар цэгүүдээр туршлагаар хэмжигдсэн утгуудыг дүрсэлсэн бол тасралтгүй муруйгаар онолоор тооцоологдсон сарнилын фазын шилжилтийг харуулав.

Зураг 2-т резонансын энерги болон тасралтгүй төлөвүүдийн сарнилын фазын шилжилтэд өгөх нөлөөллийг тус тусад нь тооцоолж харуулав.

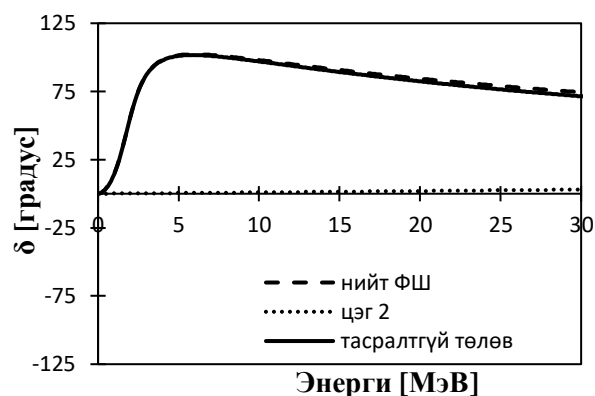


Зураг 2. $3/2^-$ төлөвийн сарнилын фазын шилжилтэд резонанс болон тасралтгүй төлөвүүдийн өгөх нөлөөлөл. Цэгэн муруйгаар резонанс энергиэр тооцоологдсон резонанс энергийн (11-р төлөв) сарнилын фазын шилжилтэд өгөх нөлөөллийг, тасралтгүй хар зураасаар тасралтгүй төлөвүүдийн сарнилын фазын шилжилтэд өгөх нөлөөллийг дүрслэв.

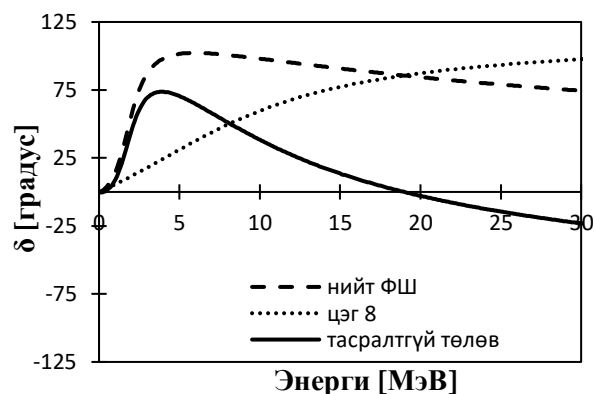
Зураг 2-г сарнилын фазын шилжилтийг тасралттай зураасаар (Зураг 1 дэх онолын муруй), цэгэн муруйгаар ${}^5\text{Li}$ цөмийн $3/2^-$ төлөвт олдсон резонанс энергиэр ($E_r = 0.74$ МэВ энерги түүнд харгалзах түвшний өргөн $\Gamma_r = 0.59$ МэВ) тооцоологдсон резонанс энергийн сарнилын фазын шилжилтэд өгөх нөлөөллийг, үргэлжилсэн хар зураасаар тасралтгүй төлөвүүдийн сарнилын фазын шилжилтэд өгөх нөлөөллийг дүрслэв. Зураг 2-оос харахад, нэг талаас, цэгэн муруйгаар дүрслэгдсэн резонанс энергиэр илэрхийлэгдэх резонансийн фазын шилжилт өндөр далайцтай, 180 градус хүрч сарнилын фазын шилжилтэд зонхилох нөлөөллийг үзүүлдэг болох нь харагдаж байна. Нөгөө талаас, тасралтгүй төлөвүүдийн сарнилын фазын шилжилтэд өгөх нөлөөллийг хэт бага гээд тооцохгүй орхиж болохгүй нь харагдаж байна. Зураг 3-5-д харуулсан үр дүнд анализ хийхэд резонанс төлөвөөс хол орших төлөвийн хувьд сарнилын фазын шилжилтэд өгөх нөлөөлөл маш бага (Зураг 3 дахь цэгэн муруй) харин резонанс төлөвтэй ойр эсхүл дэргэд байрлах төлөвийн сарнилын фазын шилжилтэд өгөх нөлөөлөл их байгаа нь харагдаж байна.

Ялангуяа Зураг 4-с харахад цэгэн муруйгаар дүрслэгдсэн резонанс төлөвийн өмнө нь байрлах түүнтэй ойр орших 8-р төлөвөөс бага энергийн буюу 10 МэВ хүртэлх энергийн мужид сарнилын фазын шилжилтэд өгөх нөлөөлөл аажмаар өсч

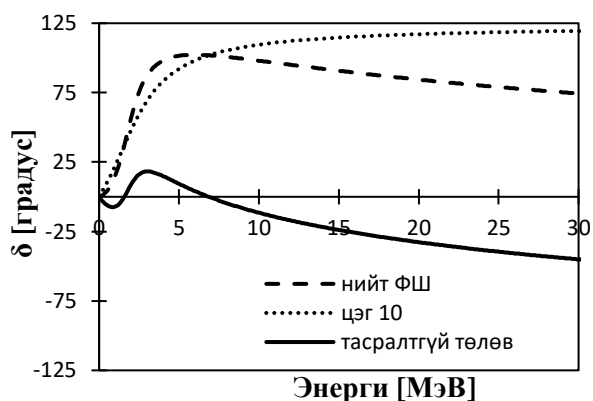
байгаад өндөр энергийн мужид тогтворжиж, харьцангуй өндөр нөлөөлөлтэй байгаа нь тогтоогдов. Мөн Зураг 5-д анализ хийвэл цэгэн муруйгаар дүрслэгдсэн резонанс төлөвийн зэргэлдээ буюу хамгийн ойр байрлах 10-р төлөвөөс сарнилын фазын шилжилтэд өгөх нөлөөлөл бага энергийн мужид огцом өсч, харьцангуй өндөр байгаа нь тогтоогдов. Резонанс төлөвийн ойр болон хажууд байрлах 8 ба 10-р төлөвөөс сарнилын фазын шилжилтэд өгөх нөлөөллийг их байгааг тогтоосон ч тэдгээрийн үзүүлэх нөлөөлөл (фазын шилжилтийн далайц) резонанс төлөвийн сарнилын фазын шилжилтэд өгөх нөлөөлөлтэй харьцуулшгүй болно.



Зураг 3. Тасралтгүй төлөвүүдийн фазын шилжилтэд өгөх нөлөөллийг резонанс төлөвөөс хол орших тасралтгүй төлөвийн нэг цэгээр төлөөлөл болгон авч тооцоолсон үр дүн. Тасралттай зураасан муруйгаар сарнилын фазын шилжилт, тасралтгүй муруйгаар резонанс болон бусад төлөвүүдийн фазын шилжилтэд өгөх нөлөөллийг харуулав. Цэгэн муруйгаар резонанс төлөвөөс хол байрлах 2-р төлөвөөс сарнилын фазын шилжилтэд өгөх нөлөөллийг дүрслэв.



Зураг 4. Тасралтгүй төлөвүүдийн фазын шилжилтэд өгөх нөлөөллийг резонанс төлөвийн өмнө орших нэг цэгээр төлөөлөл болгон авч тооцоолсон үр дүн. Тасралттай муруйгаар сарнилын, тасралтгүй муруйгаар резонансийн төлөвийг оруулан тооцсон бусад төлөвүүдийн фазын шилжилтэд өгөх нөлөөллийг тус тус дүрслэв. Цэгэн муруйгаар резонанс төлөвийн өмнө байрлах түүнтэй ойр орших 8-р төлөвөөс сарнилын фазын шилжилтэд өгөх нөлөөллийг тооцоолов.

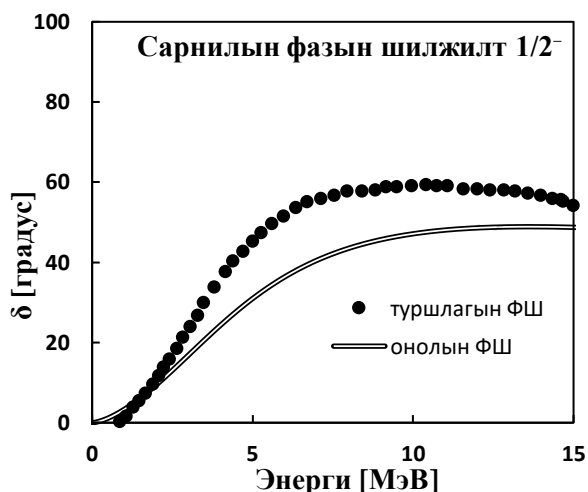


Зураг 5. Тасралтгүй төлөвүүдийн фазын шилжилтэд өгөх нөлөөллийг резонанс төлөвийн хажууд орших тасралтгүй төлөвийн нэг цэгээр төлөөлөл болгон авч тооцоолсон үр дүн. Тасралттай муруйгаар сарнилын, тасралтгүй муруйгаар резонансийн төлөвийг оруулан тооцсон бусад төлөвүүдийн фазын шилжилтэд өгөх нөлөөллийг тус тус дүрслэв. Цэгэн муруйгаар резонанс төлөвийн өмнө буюу дэргэд орших 10-р төлөвөөс сарнилын фазын шилжилтэд өгөх нөлөөллийг тооцоолов.

Резонанс төлөвийн дэргэд болон ойр орших төлөвүүдийн сарнилын фазын шилжилтэд өгөх нөлөөлөл өндөр байгааг тогтоосноор резонанс төлөв ойр болон зэргэлдээ орших төлөвүүд рүүгээ сарнидаг болох нь харагдаж байна. Харин резонанс төлөвөөс хол орших төлөвүүдийн сарнилын фазын шилжилтэд өгөх нөлөөлөл маш бага хэдий ч тэдгээрийн нөлөөг тооцохгүй орхигдуулж болохгүй.

$J^\pi = 1/2^-$ төлөв

^5Li цөмийн бага өгөөгдсөн $1/2^-$ төлөвийн сарнилын фазын шилжилтийг (10) томъёог ашиглан тооцоолно.

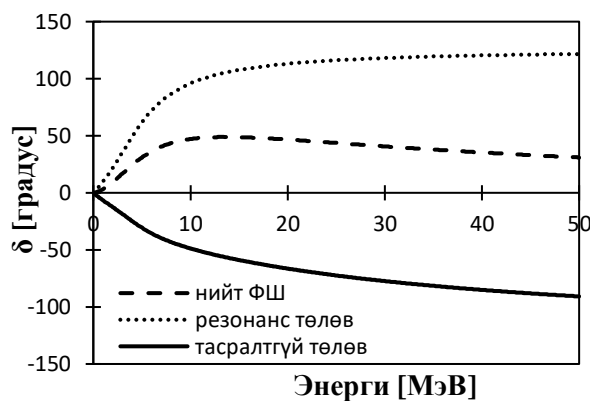


Зураг 6. $J^\pi = 1/2^-$ төлөвийн онолоор тооцоолсон сарнилын фазын шилжилт, туршлагын [7,8] утгуудын харьцуулалт. Бөөрөнхий хар цэгүүдээр туршлагаар хэмжигдсэн утгуудыг дүрсэлсэн бол муруйгаар онолоор тооцоологдсон сарнилын фазын шилжилтийг харуулав.

Онолоор тооцоологдсон үр дүнг хар муруйгаар, туршлагын утгуудыг хар цэгүүдээр дүрслэн

Зураг 6-д үзүүлэв. Онолоор тооцоолсон болон туршлагаар хэмжигдсэн сарнилын фазын шилжилтийн утгууд 4 МэВ хүртэлх бага энергийн мужид таарч байгаад их энергийн мужид зөрүүтэй болж байна.

Зураг 7-т резонансын энерги болон тасралтгүй төлөвүүдийн сарнилын фазын шилжилтэд өгөх нөлөөллийг тус тусад нь тооцоолж харуулав.

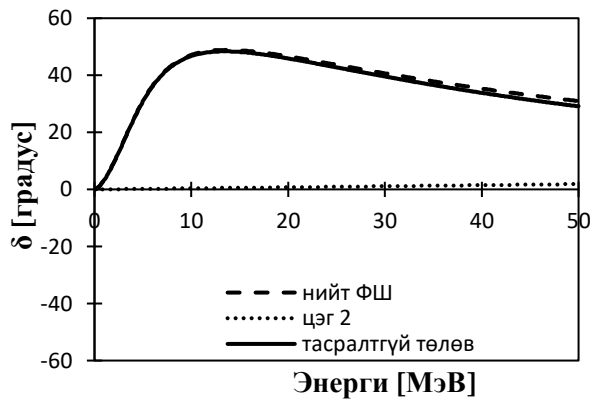


Зураг 7. $1/2^-$ төлөвийн сарнилын фазын шилжилтэд резонанс болон тасралтгүй төлөвүүдийн өгөх нөлөөлөл. Цэгэн муруйгаар резонанс энергиэр тооцоологдсон резонанс энергийн (15-р төлөв) сарнилын фазын шилжилтэд өгөх нөлөөллийг, тасралтгүй хар зураасаар тасралтгүй төлөвүүдийн сарнилын фазын шилжилтэд өгөх нөлөөллийг дүрслэв.

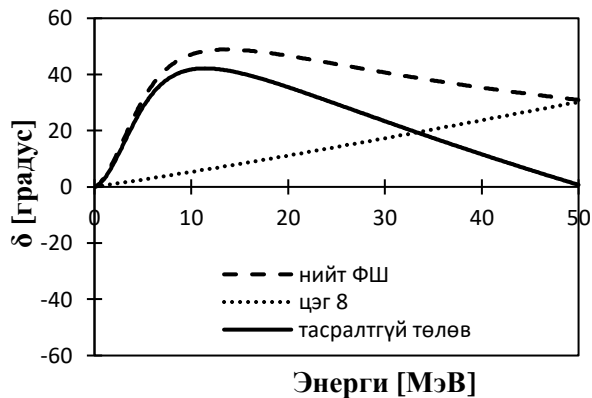
Зураг 7-д сарнилын фазын шилжилтийг тасралттай зураасаар (Зураг 6 дахь онолын муруй), цэгэн муруйгаар ^5Li цөмийн $1/2^-$ төлөвт олдсон резонанс ($E_r = 2.12$ МэВ, $\Gamma_r = 5.82$ МэВ) энергиэр тооцоологдсон резонанс энергийн сарнилын фазын шилжилтэд өгөх нөлөөллийг, үргэлжилсэн муруйгаар тасралтгүй төлөвүүдийн сарнилын фазын шилжилтэд өгөх нөлөөллийг дүрслэв.

Зураг 7-с харахад $3/2^-$ төлөвт ажиглагдсан (Зураг 2) үр дүн ижил гарч байна. Энэ үр дүн нь тухайн төлөвт олдох резонанс энерги сарнилын фазын шилжилтэд зонхилох нөлөөллийг үзүүлдэг болохыг бататгаад тасралтгүй төлөвүүдийн сарнилын фазын шилжилтэд өгөх нөлөөллийг маш бага гээд тооцохгүй орхиж болохгүй гэдгийг харуулж байна.

Зураг 8-д резонанс төлөв (цэгэн муруй)-өөс хол орших төлөвийн сарнилын фазын шилжилтэд өгөх нөлөөлөл маш бага болох нь дахин батлагдаж байна. Харин резонанс төлөв рүү ойртох тутамд тухайн төлөв (цэгэн муруй)-ийн сарнилын фазын шилжилтэд өгөх нөлөөлөл аажмаар өсч байгааг Зураг 9-с харж болно.



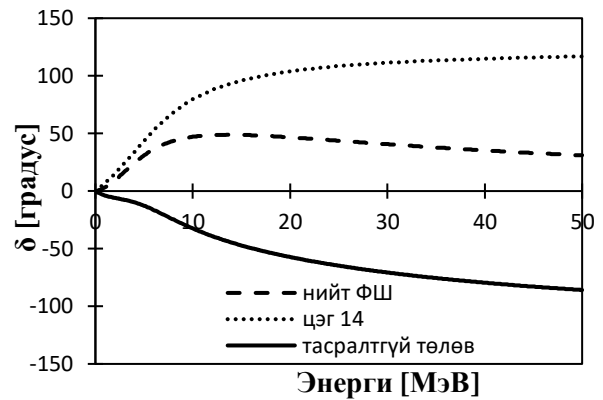
Зураг 8. Тасралтгүй төлөвүүдийн фазын шилжилтэд өгөх нөлөөллийг резонанс төлөвөөс хол орших тасралтгүй төлөвийн нэг цэгээр төлөөлөл болгон авч тооцоолсон үр дүн. Тасралттай муруйгаар сарнилын фазын шилжилт, тасралтгүй муруйгаар резонанс болон бусад төлөвүүдийн фазын шилжилтэд өгөх нөлөөллийг харуулав. Цэгэн муруйгаар резонанс төлөвөөс хол байрлах 2-р төлөвөөс сарнилын фазын шилжилтэд өгөх нөлөөллийг дүрслэв.



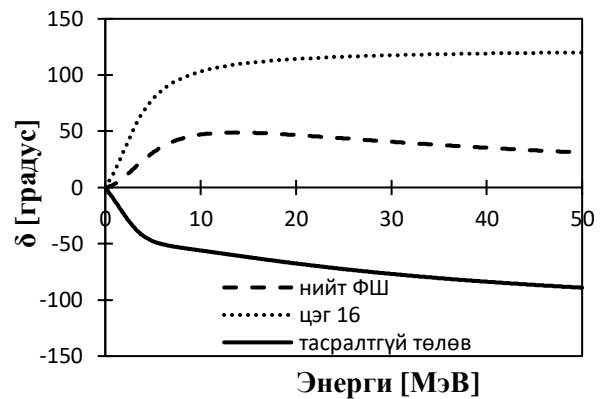
Зураг 9. Зураг 8-д үзүүлсэнтэй адил үр дүн. Энд 8-р төлөвийг авч үзсэн. Цэгэн муруйгаар резонанс төлөвөөс хол байрлах 8-р төлөвөөс сарнилын фазын шилжилтэд өгөх нөлөөллийг дүрслэв.

$J^{\pi} = 3/2^{-}$ төлөвийн хувьд сарнилын фазын шилжилтэд тасралтгүй төлөвүүдийн үзүүлэх нөлөөллийг резонанс төлөвөөс хол орших эсхүл дэргэд байрлах төлөвүүдийн хувьд авч үзсэн бол $1/2^{-}$ төлөвийн хувьд резонанс төлөвийн өмнө болон хойно байрлах зэрэгцээ төлөвүүдийн нөлөөллийг авч үзсэнээрээ онцлогтой юм.

Зураг 10-11-т резонанс төлөвийн өмнө болон хойно байрлах зэрэгцээ төлөвүүдийн сарнилын фазын шилжилтэд өгөх нөлөөллийг цэгэн муруйгаар дүрсэлсэн ба эдгээр нь резонансийн фазын шилжилт шиг өндөр нөлөөллийг үзүүлж байна. Эндээс үзэхэд сарнилын фазын шилжилтийг тооцоолохдоо тасралтгүй төлөвүүдийн өгөх нөлөөллийг орхигдуулж болохгүй гэдгийг дахин харуулж байна.



Зураг 10. Зураг 8-д үзүүлсэнтэй адил үр дүн. Энд 14-р төлөвийг авч үзсэн. Цэгэн муруйгаар резонанс төлөвийн дэргэд буюу өмнө нь орших 14-р төлөвөөс сарнилын фазын шилжилтэд өгөх нөлөөллийг дүрслэв.



Зураг 11. Зураг 8-д үзүүлсэнтэй адил үр дүн. Энд 16-р төлөвийг авч үзсэн. Цэгэн муруйгаар резонанс төлөвийн дэргэд буюу хойно нь орших 16-р төлөвөөс сарнилын фазын шилжилтэд өгөх нөлөөллийг дүрслэв.

ДҮГНЭЛТ

1. Онолын аналитик томъёогоор тооцоолсон сарнилын фазын шилжилтийг туршлагаар хэмжигдсэн утгуудтай харьцуулахад сайн тохироо муугүй байв.
2. Онолоор тооцоолсон сарнилын фазын шилжилт туршлагын утгаас ялимгүй зөрүүтэй байгаа нь бидний тооцооллын нарийвчлалтай холбоотой гэж үзэж байна. Үүнийг цаашид нарийвчлан судлах шаардлагатай.
3. ${}^5\text{Li}$ цөмийн $3/2^{-}$ ба $1/2^{-}$ төлөвүүдийн сарнилын фазын шилжилтэд резонанс төлөвийн өмнө болон хойно байрлах төлөвүүдийн өгөх нөлөөллийг судалж, резонанс төлөв нь өөрт ойр орших төлөвүүд рүүгээ сарнидаг болохыг тогтоов.

АШИГЛАСАН МАТЕРИАЛ

- [1] L. R. Hafstad, and E. Teller, The Alpha-Particle Model of the Nucleus. Phys. Rev. v.54, (1938), p.681

- [2] А.Золбаяр, Г.Хүүхэнхүү, А. Сарсембаева, М. Одсүрэн, МУИС Физик сэтгүүл, 527, (2020), pp.74-77
- [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
- [5] B. Simon, Commun. Math. Phys. v.27, (1972), pp.1-9
- [6] M.Odsuren, Y.Kikuchi, Т.Мyo, G.Khuukhenkhuu, H.Masui, K.Katō, Phys. Rev. C 95, (2017), 064305.
- [7] J. E. Bond and F. W. K. Firk, Nucl. Phys. A287, (1977), 317.
- [8] P. Schwandt, T. B. Clegg, and W. Haerberli, Nucl. Phys. A163, (1971), 432.