МУИС, ЭРДЭМ ШИНЖИЛГЭЭНИЙ БИЧИГ №4 (137), 1998

Сөрөг цэнэгтэй удаан бөөмс, атомын мөргөлдөөний Т-матрицын онолын өргөтгөл

Х. Цоохүү, Н. Цогбадрах

Abstract

Мөргөлдөөний онол дахь Т-матрицын аргыг хагас классик онолтой хослуулж өргөтгөсөн. Урвалын орох, гарах сувгуудын холбоог тооцоход Т-матрицын уламжлалт илэрхийлэл, туссан бөөм орох сувагтаа үлдэх магадлалаар үржигдэнэ гэдгийг үзүүлсэн. Удаан антипротон, устөрөгчийн атомтай мөргөлдөх үеийн давхар дифференциал огтлолуудыг анхлан тооцоолов.

1 Оршил

Сүүлийн жилүүдэд дээд эрэмбийн дифференциал огтлолуудыг бодох аргыг боловсруулах явдал эрчимтэй хөгжиж байна. Энэ нь практик дээр давхцуулсан туршилтын арга зүй хөгжсөнтэй холбоотой юм.

Сарнилын нийт огтлол нь уг үзэгдлийг тодорхойлох интеграл мэдээллийг гарган өгдөг бол дифференциал огтлолууд нь үзэгдлийн механизмын талаар илүү нарийн дүр зураглалыг гаргаж өгдөг. Давхцуулсан туршилтын замаар процессын тухай бүрэн зураглал гаргаж болно гэж үздэг ба гүйцэд туршилт (total experiment) тавих асуудал яригдах боллоо. Гүйцэд туршилтыг илэрхийлэх онолын арга загварууд эрчимтэй хөгжиж байна. Үүнд жишээлбэл сарнилын онолын Т-матрицын арга [1], хагас классик онол [2] зэргийг дурьдаж болно.

Хагас классик онол сувгийн холбоог тооцож, бодлогыг туушитай квант механикийн аргаар шийдвэрлэдэг боловч өнөөг хүртэл зөвхөн нийт огтлол [3], анхдагч дифференциал огтлолуудыг бодоход хэрэглэгдэж ирсэн байна [2]. Хоёрлосон, гуравласан [4], дөрвөлсөн огтлолуудыг энэ онолд шууд бодох арга байхгүй. Иймд хагас классик онолыг өргөтгөх шаардлагатай.

Энэхүү өгүүлэлд мөргөлдөөний онол дахь Т-матрицын аргыг хагас классик онолтой хослуулж дээрх асуудлыг шийдвэрлэж болохыг харуулав.

Хүнд бөөмийн харьцангуй хөдөлгөөний гажилтын факторыг Эйкональ ойролцоололд сонгож, стационар фазын аргыг [2] хэрэглэвэл хагас классик онолын үндсэн ойлголт, томъёонуудтай маш төсөөтэй томъёог гарган авч болохыг харуулсан. Харин энэ үед зөвхөн харимхай сувагтаа үлдэх магадлал тооцогддоггүйг сувгийн холбоо тооцсон хагас классик онолоос иш татан физик утгаар нь оруулж ирэх боломж бүрэлдсэн.

Хоёрдугаар хэсэгт хагас классик онолын үндсэн ойлголтууд, холбогдох томъёог бичэв. Гуравдугаар хэсэг Эйкональ ойролцоололын хүрээнд хүнд бөөмийн хөдөлгөөнийг тодорхойлох, түүнд харгалзах хондох үйлчлэлийг байгуулах асуудалд зориулагдсан. Дөрөвдүгээр хэсэгт стационар фазын ойролцоололд Т-матрицын аргыг хэрэглэн давхар дифференциал огтлолыг бодох томъёог гарган авч удаан антипротон устөрөгчийн атомыг ионччлох үзэгдлийн хувьд тооцоог үзүүллээ.

2 Хагас классик онол

Сөрөг цэнэгтэй удаан бөөмс хөнгөн атомтай мөргөлдөх үзэгдлийг илэрхийлэх квант механикийн тууштай аргыг 1980-аад оны эхээр Москвагийн УИС дээр боловсруулжээ [5, 6]. Энэ онол урвалын орох, гарах сувгийн холбооны тэгшитгэлийг квазиклассик ойролцоололд, стационар фазын арга хэрэглэн бодох явдалд үндэслэнэ. Үүний дунд $M^- + A$ мөргөлдөөний үед явагдах классик зөвшөөрөгдсөн шилжилтүүдэд харгалзах сарнилын параметрүүдийн хувьд тов тодорхой физик утгатай, харьцангуй хялбар аналитик илэрхийлэлүүдийг гарган авдаг.

Классик зөвшөөрөгдсөн шилжилт явагдахын тулд орох (харимхай) сувгийн эффектив потенциал (U_0), гарах (ионччлох) сувгийн эффектив потенциалтай (U_ϵ) $R = R_0$ цэгт огтлолцож, $R < R_0$ мужид $U_0 < U_\epsilon$ нөхцөл биелэх явдал юм. $R < R_0$ муж бол классик зөвшөөрөгдсөн шилжилтийн муж бөгөөд R_0- ийг харимхай бус үйлчлэлийн радиус гэж үзэж болно (Зураг 1).

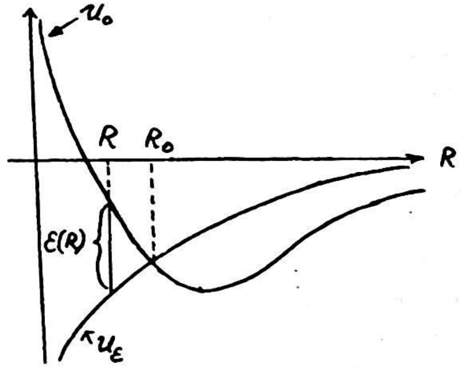
Эффектив потенциалуудын зөрөө нь ионччлогдон гарах электроны энерги болох ба

$$\epsilon(R) = U_0(R) - U_\epsilon(R) \tag{1}$$

гэж илэрхийлэгдэнэ. $R < R_0$ мужид квазимолекуляр аяндаа задрах боломжтой бөгөөд задралын парциал өргөн нь

$$\Gamma_{\epsilon,\vec{k}}(\vec{\rho}, Z) = 2\pi| < \Psi^{(-)}_{\epsilon,\vec{k}}|V_f|\Phi_i > |^2 \qquad (2)$$

томъёогоор илэрхийлэгдэнэ[2].



(зураг 1)

Классик зөвшөөрөгдсөн мужид урвалын нийт огтлол:

$$\sigma_r(E) = 2\pi \int_0^{\rho_0(E)} \rho d\rho\{1 - P^2(R_t^0, R_0)\} \qquad (3)$$

гэж илэрхийлэгдэнэ. Үүнд:

$$P(z_1, z_2) = exp\{-\int_{z_1}^{z_2} \frac{\Gamma_\epsilon(\rho, z')dz'}{v}\} \qquad (4)$$

-хүнд бөөм $[z_1, z_2]$ хэрчим дээр харимхай сувагтаа хөдлөх магадлал. $\rho(E)$ нь харимхай бус үйлчлэлийн радиуст хүрэх шагайх зайн хамгийн их утга ба $\Gamma_\epsilon(\rho, z)$-задралын нийт өргөн.

3 Сувгийн долгионы функц, хөндөх үйлчлэлийн операторыг тодорхойлох нь

Эхний сувгийн долгионы функцийг

$$\Phi_i^{(+)}(\vec{r}, \vec{R}) = \varphi_c(\vec{r}, \vec{R})\Phi_{\vec{K}}(\vec{R})D_{\vec{K}}^{(+)}(\vec{R}) \qquad (5)$$

хэлбэртэй гэж үзье. Үүнд $\varphi_e(\vec{r},\vec{R})$ нь элетроны төлөв ба

$$\hat{h}\varphi_e(\vec{r},\vec{R}) = \varepsilon_0(R)\varphi_e(\vec{r},\vec{R}) \tag{6}$$

тэгшитгэлийг хангана [7].

Энд $\hat{h}-$ хоёр төвийн бодлогын гамильтониан. $\Phi_{\vec{k}}(\vec{R})-$ хүнд бөөмийн хөдөлгөөнд харгалзах хавтгай долгион, $D^{(+)}_{\vec{k}}(\vec{R})-$ түүний амплитуд (гажаах фактор) . Шредингерийн тэгшитгэлд (5) функцийг орлуулвал гажаах факторын хангах тэгшитгэл

$$\frac{\vec{\nabla}^2 D^{(+)}_{\vec{k}}(\vec{R})}{2\mu D^{(+)}_{\vec{k}}(\vec{R})} + i\vec{v}\frac{\vec{\nabla} D^{(+)}_{\vec{k}}(\vec{R})}{D^{(+)}_{\vec{k}}(\vec{R})} + U_i(\vec{R}) = 0 \tag{7}$$

болох ба $U_i(\vec{R})$ нь

$$U_i(\vec{R}) = -\varepsilon_a + \varepsilon_0(R) - \frac{Z}{R} - \frac{1}{2\mu}H_{00}(\vec{R}) \tag{8}$$

$$H_{00}(\vec{R}) = < \varphi_e|\vec{\nabla}^2_{\vec{R}}|\varphi_e > \tag{9}$$

гэж тодорхойлогдоно. Энд ε_a нь атомын үндсэн төлөвийн энерги, $\varepsilon_0(R)$ нь электроны терм, $H_{00}(R)$ нь адиабат бус засвар.

Гажих фактор удаан өөрчлөгддөг учраас $\vec{\nabla}^2 D^{(+)}_{\vec{k}} << \vec{\nabla} D^{(+)}_{\vec{k}}$ нөхцөл биелэх ба хүнд бөөм шулуун траектороор хөдөлнө гэж үзвэл

$$D^{(+)}_{\vec{k}}(\vec{R}) = exp\{\frac{-i}{v}\int_{-\infty}^{z} U_i(\vec{\rho}, z')dz'\} \tag{10}$$

болно.

Энэ тохиолдолд хөндөх оператор

$$W_i(\vec{R}) = \frac{\vec{\nabla}^2{}_{\vec{R}}\varphi_e}{2\mu\varphi_e} + i\vec{v}\frac{\vec{\nabla}_{\vec{R}}\varphi_e}{\varphi_e} - \frac{1}{2\mu}H_{00}(\vec{R}) - \frac{iU_i(\vec{R})}{\mu v}\frac{\vec{\nabla}_R\varphi_e}{\varphi_e} \tag{11}$$

гэж олдоно.

Үүний адилаар атомын төлөөлөлд [8] авч үзвэл гажаах фактор, хөндөх оператор нь харгалзан

$$U_i(\vec{R}) = -\frac{Z}{R} + < \varphi_a|\frac{1}{|\vec{r}-\vec{R}|}|\varphi_a > \tag{12}$$

$$W_i(\vec{R}) = \frac{1}{|\vec{r}-\vec{R}|} - < \varphi_a|\frac{1}{|\vec{r}-\vec{R}|}|\varphi_a > \tag{13}$$

гэж тодорхойлогдоно.

4 Хагас классик онол ба Т-матрицын арга

Сарнилын Т-матрицыг мэдвэл дифференциал огтлол

$$\frac{d^4\sigma}{d\varepsilon dE d\Omega_{\vec{k_f}} d\Omega_{\vec{K_f}}} = k_f K_f \frac{(2\pi)^4}{v} |T_{fi}|^2 \tag{14}$$

гэж илэрхийлэгдэнэ. Үүнд $\varepsilon = \frac{k_f^2}{2}$, $E = \frac{K_f^2}{2\mu}$ нь электрон ба хүнд бөөмийн эцсийн төлөвийн энерги.

Эндээс ионччлолын хоёрлосон дифферециал огтлол:

$$\frac{d^2\sigma}{d\varepsilon d\Omega_{\vec{k}}} = \frac{(2\pi)^4}{v^2} \int d\vec{K_f} |T_{fi}|^2 \delta(\hat{v}\vec{K} - K + \frac{\frac{k^2}{2} - \varepsilon_a}{v}) \tag{15}$$

болно.

Цааш нь Т-матрицыг "prior" хэлбэрээр тодорхойлбол

$$T_{fi} = < \Psi^{(-)}_{\varepsilon,\vec{k}} \Phi_{\vec{K_f}} D^{(-)}_{\vec{K_f}}(\vec{R}) | W_i | \Phi_i^{(+)}(\vec{r}, \vec{R}) > \tag{16}$$

болно [9].

(16)-ийг бодохын тулд долгион функцийг (5) хэлбэртэй авбал:

$$\tilde{T}_{fi} = (2\pi)^{-2} \int_{-\infty}^{+\infty} dZ' exp\{\frac{-i}{v} S(\vec{\rho}, Z')\} < \Psi^{(-)}_{\varepsilon,\vec{k}} | W_i | \varphi_e >_{\vec{r}} \tag{17}$$

болно. Үүнд

$$S(\vec{\rho}, Z) = \int_{-\infty}^{+\infty} \{U_f(R) - U_i(R)\} dZ' \tag{18}$$

Үүнд $U_i(R)$, $U_f(R)$ нь эхний ба эцсийн сувгийн термүүд.

Удаан хүнд бөөмийн хувьд $\frac{1}{v}$ үржигдэхүүний улмаас интеграл доорхи функц хурдан осцилляцлана. Иймд интегралыг стационар фазын ойролцоолол авч болох ба

$$\frac{d^2\sigma}{d\varepsilon d\Omega_{\vec{k}}} = \frac{1}{v} \sum_{Z=Z_s} \int d\vec{\rho} \frac{\Gamma_{\varepsilon,\vec{k}}(\vec{\rho}, Z)}{|\frac{d}{dZ}(U_f - U_i)|} \tag{19}$$

болно.

Хагас классик онолыг үндэслэн хүнд бөөм харимхай сувагтаа хөдлөх магадлалаар үржүүлж өгвөл

$$\frac{d^2\sigma}{d\varepsilon d\Omega_{\vec{k}}} = \frac{1}{v} \sum_{Z=Z_s} \int d\vec{\rho} \frac{\Gamma_{\varepsilon,\vec{k}}(\vec{\rho}, Z) P_{\vec{\rho}}(Z_0, Z)}{|\frac{d}{dZ}(U_f - U_i)|} \tag{20}$$

болно.

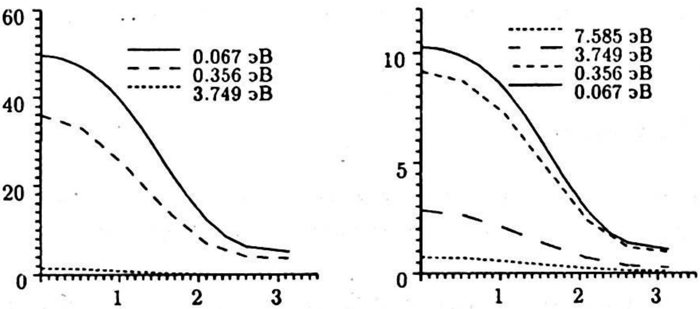
Цааш нь $A + M^- \to A^+ + M^- + e^-$ урвалын хоёрлосон дифференциал огтлол нь (20) томъёоноос

$$\frac{d^2\sigma}{d\varepsilon d\Omega_{\hat{k}}} = \frac{R_s}{v|\frac{d}{dR}\varepsilon(R)|_{R=R_s}} \int_0^{R_s} \rho d\rho \frac{\Gamma_{\varepsilon,\hat{k}}(\rho, Z) P_\rho(Z_0, Z)}{\sqrt{R_s^2 - \rho^2}} \tag{21}$$

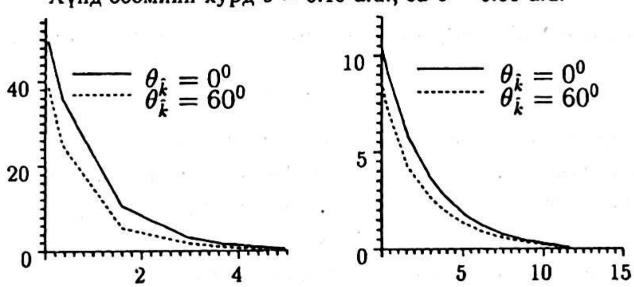
болно. Үүнд

$$\Gamma_{\varepsilon,\hat{k}}(\rho, Z) = \int_0^{2\pi} \Gamma_{\varepsilon,\hat{k}}(\vec{\rho}, Z) d\varphi_\rho \tag{22}$$

Удаан антипротоноор устөрөгчийн атомыг иончлох давхар дифференциал огтлолыг (21) томъёогоор бодсон тооцоог 2, 3-р зурагт үзүүллээ.



Зур.2. $H + p^- \to H^+ + p^- + e^-$ урвалын хоёрлосон дифференциал огтлол (атомын нэгжээр) ежекцийн өнцгөөс (радианаар) хамаарах нь Хүнд бөөмийн хурд $v = 0.10$ a.u., ба $v = 0.50$ a.u.



Зур.3. $H + p^- \to H^+ + p^- + e^-$ урвалын хоёрлосон дифференциал огтлол (атомын нэгжээр) ежекцийн энергиэс (эВ) хамаарах нь Хүнд бөөмийн хурд $v = 0.10$ a.u., ба $v = 0.50$ a.u.

5 Дүгнэлт

1. Хүнд бөөм, атомын мөргөлдөөнийг илэрхийлэх хагас классик онолыг T-матрицын аргаар өргөтгөснөөр дээд эрэмбийн дифференциал огтлолуудыг стационар фазын ойролцоололд бодох боломжтой болов. T-матрицын илэрхийлэлийг тусч байгаа бөөм харимхай сувагтаа үлдэх магадлалыг тооцож өргөтгөсөн.

2. Хүнд бөөмийн хөдөлгөөний гажилтыг тодорхойлох тэгшитгэл, түүний Эйкональ ойролцоололд дахь шийдийг байгууллаа. Эхний ба эцсийн төлвийг илэрхийлэх янз бүрийн загварт хөндөх операторыг тодорхойлох ерөнхий аргыг боловсруулсан.

3. Удаан антипротон устөрөгчийн атомтай мөргөлдөхөд ионглогдсон электроны нисч гарсан чиглэл, энергийн давхар дифференциал огтлолуудыг анх удаа тооцоолов.

6 Талархал

Энэхүү өгүүлэлд хөндөгдсөн зарим асуудлыг шүүн ярилцаж, зөвлөгөө өгсөн доктор, проф. О. Лхагва, Ph.D. Мадсен нарт талархал илэрхийлье.

Extension of T-matrix Theory for Slow Collisions of Negatively Charged Particle with Atoms

Kh. Tsookhuu and N. Tsogbadrakh
National University of Mongolia, Physics and Electronic School

Abstract

T-matrix theory is extended by accompaning half-classical theory of collision. With account of entrance and exit channel coupling, it is shown that, usually used expression for the T-matrix be multiplied by the surviving probability of heavy particle in elastic channel. Double differential cross sections for slow collisions between antiproton and hydrogen atom are calculated firstly.

References

[1] Jesper N.Madsen, Ionization ion-atom collisions, (Ph.D.) 1995

[2] Х.Цоохүү, Докторын дессертаци, Улаанбаатар, 1996

[3] Г.Я. Коренман, О.Лхагва,Х.Цоохүү,Р.Бадамдамдин, "Неупругие столкновения отицательных мюонов и адронов с метастабильными атомами водорода, Препринт, Дубна, 1994

[4] M.Brauner,J.S.Briggs and H.J.Klar, Joun.Phys.B.**22**.1989,p.2265

[5] Г. Я. Коренман, Н. Цоохүү, Тезисы докл. 9. Всес. конф. по физ. электронных и ат. столк., Рига, ИФАН Латв. ССР, 1984, т. 1, с.98

[6] Kh. Tsookhuu,*Sov. Jour. of Nucl. Phys. (ЯФ)* **56**, *(1993)76.*

[7] Т. Жанлав, Х.Цоохүү, Р.Ренчинбазар, Известия АН Республики Казахстана ,Сер.Физ.мат, N6(1993)33

[8] Л.Д.Ландау, Е.М.Лифшиц, Квантовая механика, М.,1974

[9] Charles. J.Joachain ,Quantum Collision Theory, Oxford.