

УСТӨРӨГЧИЙН АТОМЫГ ИОНЫ МӨРГӨЛТӨӨР ИОНЧЛОХ АСУУДЛЫГ БОРНЫ II ЭРЭМБИЙН ДӨХӨЛТӨД СУДАЛСАН НЬ

Наранцацралт.Н¹, Алтаннар.Р¹, Хэнмэлэх.Л¹, Лхагва.О²

¹-Монгол Улсын Шинжлэх Ухаан Технологийн Их Сургууль

²-Монгол Улсын Их Сургууль

Тухайн ажилд устөрөгчийн атомыг хурдан ионы мөргөлтөөр иончлох урвалаар сугарсан электроны шилжүүлсэн импульст перпендикуляр хавтгай дээрхи бүрэн дифференциал огтлолын Борны 1, 2 –р эрэмбийн ойролцоололд болсон онолын өөрсдийн тооцоог онолын судлагааны бусад үр дүнтэй жишиг. Борнын 2-р эрэмбийн ойролцоолол Glauber ба CDW-EIS аргаар бодсонтой ойролцоо үр дүнд хүргэлтийг харуулж байна. Шилжүүлсэн импульст перпендикуляр хавтгай дээр ($\phi_k=90$) сугарсан электроны БДО-ыг тооцоолсон онолын тооцоо Устөрөгч болон Гелийн атомыг иончлох хоёр тохиолдолд тосоотой үр дүнд хүрч байгаа нь Гелийн атомын хувьд ажиглагдсан онол туршлагын зөрөө атомын электронуудын хоорондох корреляцаас хамаараагүй болохыг харуулсан.

Оршил

Сүүлийн жилүүдэд атомын электроноос их хурд бүхий ионы мөргөлтөөр атомыг иончлох асуудлыг судлахад ихээхэн анхаарал тавьж байна[1-4]. Устөрөгчийн атомыг хурдан ионы мөргөлтөөр иончлох урвалын туршлага болон онолын судалгаа нь найдвартай үр дүнд хүргэж болох харьцангуй хялбар тохиолдол юм. Нөгөөтэйгүүр эл судалгаа нь атомын хүчтэй цочирсон болон нэл спектр дэх төлөв байдлын бүтэц, зүй тогтлыг судлах шинжилгээний шинэ чиглэл учраас онол, туршлагын аль алиных хувьд зохих шийдлийг хүлээж байгаа юм.

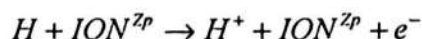
Ион, атомын мөргөлдөөний онолын судалгаанд тусч буй бөөм, атомын хоорондох харилцан үйлчлэлийг Борны 1-р эрэмбийн дөхөлтөд зонхилон тооцож байгаа юм. Эл дөхөлт нь ион атом хоёр нэг удаа ганц харилцан үйлчлэлцэхэд дүйж байна. Гэвч тэр нь төвөгтэй харилцан үйлчлэлийг тооцоход тун хангалтгүй байдаг. Тэгэхлээр уг үйлчлэлийг шатлан тооцох шаардлага зүй ёсоор тавигдаж байна. Энэ чиглэлээр сүүлийн үед хийсэн туршлагын дүн [12,13] шаталсан процессийн нөлөө их байгааг харуулав.

Тухайн ажилд устөрөгчийн атомыг хурдан ионы мөргөлтөөр иончлох урвалаар сугарсан электроны бүрэн дифференциал огтлолыг Борны 1, 2 –р эрэмбийн дөхөлтөд судалж, эдүгээ байгаа туршлага болон онолын судлагааны үр дүнтэй жишиг. Энэхүү ажилд

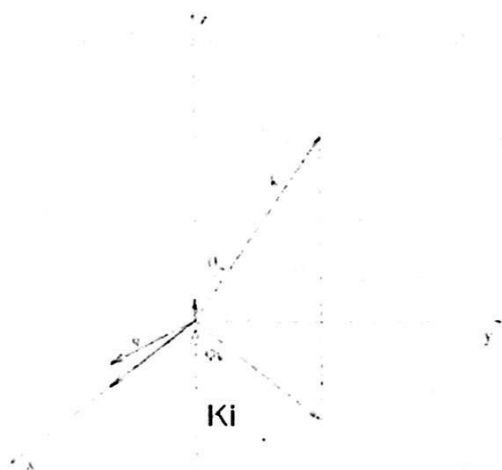
ионы цэнэг болон хурдны харьцаа $\left(\frac{|Z_p|}{V_p} \leq 0.1 \right)$ нөхцлийг хангаж байх тохиолдолд атомыг иончлох процессийг судаллаа. Энд Z_p, V_p нь туссан бөөмийн атомын нэгж бүхий цэнэг, хурд. Энэ ажилд цаашид атомын нэгжийг хэрэглэв.

Онол

Устөрөгчийн атомыг ионы мөргөлтөөр иончлох урвалыг дараах байдлаар дүрслэе:



Декартын координатын систем дэх энэхүү урвалын кинематик схемийг 1-р зурагт үзүүллээ. Ион z тэнхлэгийн дагуу туссан бөгөөд шилжүүлсэн импульс q нь x тэнхлэгтэй бага өнцөг үүсгэснийг дүрслэв.



1-р зураг. Устөрөгчийн атомыг ионы мөргөлтөөр иончлох урвалын кинематик схем

Их хурдтай, бага цэнэгтэй туссан бөөмийн хувьд бүрэн дифференциал огтлолд зонхилох хандивыг Борны 1-р эрэмбийн дөхөлт өгдөг.

Борны 1-р эрэмбийн ойролцоололд иончлолын амплитуд дараах хэлбэртэй:

$$A_{fi}^{1B} = \frac{Z_p}{2\pi^2} \frac{\langle \psi_k^{(-)}(\mathbf{r}) | \exp(i\mathbf{q}\mathbf{r}) | \psi_i(\mathbf{r}) \rangle}{q^2} \quad (1)$$

байна. Энд \mathbf{r} устөрөгчийн атомын цөмөөс тоолсон электроны координат. $\mathbf{q} = \mathbf{K}_i - \mathbf{K}_f$ нь туссан бөөмөөс атомд шилжүүлсэн импульс. Шилжүүлсэн импульсийг $\mathbf{q} = (\mathbf{q}_\perp, q_\parallel)$ хэлбэртэй бичие. \mathbf{q}_\perp бол шилжүүлсэн импульсын хөндлөн байгуулагч ($\mathbf{q}_\perp \perp \mathbf{K}_i$). Харин q_\parallel бол туссан чиглэлийн дагуу шилжүүлсэн импульс.

$$q_\parallel = \frac{\epsilon_f - \epsilon_i}{V_p}$$

$\epsilon_f - \epsilon_i$ - атомд тийрэлтээр шилжсэн энерги. Дээрх (1) амплитудыг хэрэглэн атомыг ион мөргөж иончлох урвалын бүрэн дифференциал огтлолыг

$$\frac{d^5 \sigma_{1B}}{d^3 \mathbf{k} d^2 \mathbf{q}_\perp} = \frac{4Z_p^2}{V_p^2} \frac{|\langle \psi_k^{(-)}(\mathbf{r}) | \exp(i\mathbf{q}\mathbf{r}) | \psi_i(\mathbf{r}) \rangle|^2}{q^4} \quad (2)$$

хэлбэртэй бичиж болно. Борнын 1 ба 2-р эрэмбийн дөхөлтийг тооцон атомыг ион мөргөж иончлох амплитудыг

$$A_{fi} = A_{fi}^{1B} + A_{fi}^{2B} \quad (3)$$

хэлбэртэй бичье. Энд

$$A_{fi}^{2B} = \left(\frac{Z_p}{2\pi^2} \right)^2 \sum_n \int d^3 \mathbf{K} \frac{\langle \psi_f^{(-)} | 1 - \exp(i(\mathbf{K}_i - \mathbf{K}) \cdot \mathbf{r}) | \psi_n \rangle \langle \psi_n | 1 - \exp(i(\mathbf{K} - \mathbf{K}_f) \cdot \mathbf{r}) | \psi_i \rangle}{|\mathbf{K}_i - \mathbf{K}|^2 |\mathbf{K} - \mathbf{K}_f|^2 (E_i + \epsilon_0 - E - \epsilon_n + i0)}$$

Энэ илэрхийлэлд туссан бөөмийн \mathbf{K} импульсээр авсан интеграл бас атомын ε_n энерги бүхий завсрын төлвөөр гүйх нийлбэр орж байна. E_i ба E_f нь туссан бөөмийн анхны ба завсрын төлвийн энерги болно. Завсрын төлвөөр нийлбэрчлэх closure ойролцооллыг хэрэглэвэл

$$A_{fi}^{2R} = \left(\frac{Z_p}{2\pi} \right)^2 \int d^3\mathbf{K} \frac{\langle \psi_f^{(-)} | 1 - \exp(i(\mathbf{K}_i - \mathbf{K}) \cdot \mathbf{r}) - \exp(i(\mathbf{K} - \mathbf{K}_f) \cdot \mathbf{r}) + \exp(i\mathbf{q} \cdot \mathbf{r}) | \psi_i \rangle}{|\mathbf{K}_i - \mathbf{K}|^2 |\mathbf{K} - \mathbf{K}_f|^2 (E_i + \varepsilon_0 - E - \varepsilon_n + i0)} \quad (4)$$

болно. Дээрх (4) амплитудыг хэрэглэхэд Борны 2-р дөхөлт дэх бүрэн дифференциал огтлол:

$$\frac{d^5 \sigma_{2R}}{d^3 \mathbf{k} d^2 \mathbf{q}_i} = \frac{d^5 \sigma_{1R}}{d^3 \mathbf{k} d^2 \mathbf{q}_i} \left(1 + 2 \operatorname{Re} \left(\frac{A_{fi}^{2R}}{A_{fi}^{1R}} \right) \right) \quad (5)$$

хэлбэртэй болно[3]. Энэхүү бүрэн дифференциал огтлол нь Z_p^2 ба Z_p^3 гишүүдийг агуулдаг учраас $Z_p < 0$, $Z_p > 0$ ялгаатай үр дүнд хүргэхийг тэмдэглэе. Хэдийгээр олон сөрөг цэнэгт ион байхгүй боловч Борнын дөхөлтөд боловсруулсан аргыг туршин шалгах онолын тооцооны хэрэглүүр болдог юм.

Тооцоо

Исн, устөрөгчийн атомын мөргөхөд сугарсан электроны бүрэн дифференциал огтлолыг мөргөлдөөний хавтгай дээр ($\varphi_k=0$) 2 дугаар зурагт, шилжүүлсэн импульст перпендикуляр хавтгай дээр ($\varphi_k=90$) 3 ба 4 дугаар зурагт Борны 1, 2-р дөхөлтөд тооцоолж, онолын холбогдох [3] үр дүнтэй харьцууллаа.

2 ба 3 дугаар зурагт $H + C^{6\pm} \rightarrow H^+ + C^{6\pm} + e^-$ урвалын сугарсан электроны энергийн хоёр өөр утганд хийсэн тооцооны дүнг, 4-р зурагт $H + ION^{30\pm} \rightarrow H^+ + ION^{30\pm} + e^-$ урвалын тооцооны дүнг тус тус харуулав.

Туссан бөөмийн цэнэгийн $Z_p > 0$ ба $Z_p < 0$ утга дахь БДО эрс ялгаатай нь зургаас харагдаж байна.

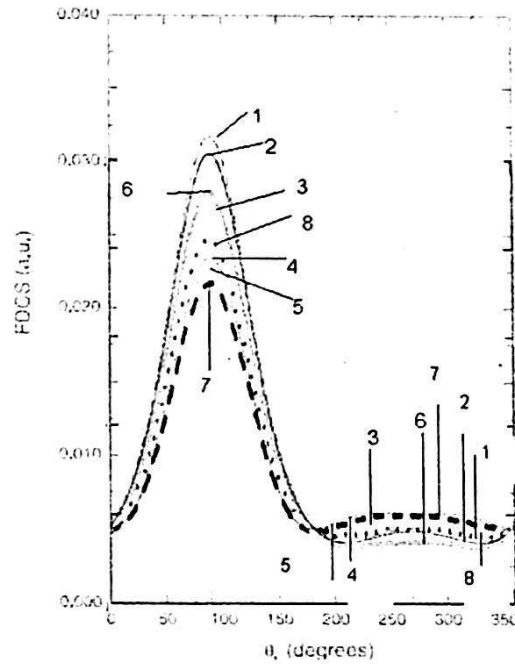
Зургуудаас үзвэл устөрөгчийн атомыг эерэг ба сөрөг ионоор иончлох тохиолдолд сугарсан электроны бүрэн дифференциал огтлолын Борны 1, 2-р дөхөлт дахь манай тооцоо А.В.Войткин нарын[3] Glauber ба CDW-EIS аргаар үйлдсэн онолын үр дүн (Зураг 2, 3, 4) болон Борнын 2-р ойролцоолол дахь тооцоотой (Зураг 3) таарч байна. Үүнээс гарах дүгнэлт:

- бидний боловсруулсан Борнын 2-р эрэмбийн хандив тооцох Fortran хэл дээр бичсэн програм болон аргачлал нь хурдан ионы мөргөлтөөр атомыг иончлох урвалаар сугарсан электроны БДО-ыг мөргөлдөөний хавтгай дээр ($\varphi_k=0$) тооцоолох судалгаанд цаашид хэрэглэж болох нь харагдаж байна.

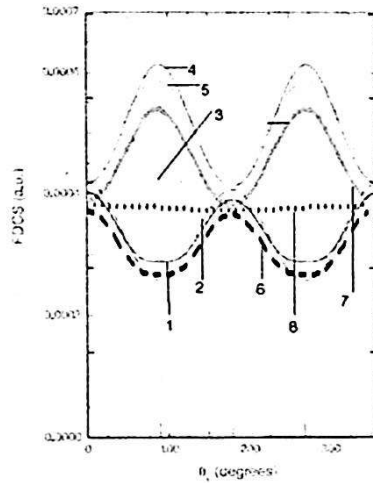
Үүний зэрэгцээ Устөрөгч болон Гелийн атомыг $Z_p = \pm 30$ цэнэгт ионы мөргөлтөөр иончлоход сугарсан электроны БДО хоорондоо төсөөтэй [21] байгаа нь шилжүүлсэн импульст перпендикуляр хавтгай дээрхи иончлолын урвалын динамикт их цэнэгтэй ион тусах тохиолдолд ч Борнын 2-р эрэмбийн ойролцоолол Glauber ба CDW-EIS аргаар бодсонтой ижил үр дүнд хүргэдгийг харуулж байна.

Устөрөгч болон Гелийн атомыг цэнэгт ионы мөргөлтөөр иончлоход сугарсан электрон шилжүүлсэн импульст перпендикуляр хавтгай дээр ($\varphi_k=90$) орших БДО-ыг Устөрөгчид бодсон Борнын 2-р эрэмбийн ойролцоолол дахь онолын тооцоо Гелийн атомыг иончлох үеийн мөн тийм онолын тооцоотой нэгэн адил хэлбэртэй байгаа нь Гелийн атомыг

цэнэгт ионы мөргөлтөөр иончлох үед ажиглагдсан онол туршлагын зөрөө нь [5,12,13,15,21] атомын электронуудын хоорондох корреляцаас хамаарсан бус болохыг харуулсан ба энэ чиглэлд цаашид шинэ аргаар хандах хэрэгтэй байгааг харуулж байна.

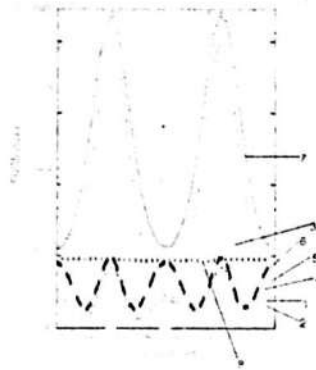


2-зураг. Устөрөгчийн атомыг 100 МэВ энергитэй C^{6+} ба C^{6-} ионы мөргөлтөөр иончлоход мөргөлдөөний хавтгай дээр ($\phi_k=0$) сугарсан электроны бүрэн дифференциал огтлол (БДО) эжекцийн онцгоос хэрхэн хамаарахыг харуулж байна. $E_{ej}=1$ эВ $Q=1$ а.н. Тод тасралтгүй муруй (2) нь Glauber $Z_p=6$, бүдэг үргэлжилсэн муруй (4) нь Glauber $Z_p=-6$. Тод цэгтэй тасархай муруй(1) нь CDW-EIS $Z_p=6$. Бүдэг цэгтэй тасархай муруй (5) нь CDW-EIS $Z_p=-6$, бүдэг цэгүүд(3) нь А.В.Voitkin нарын Борнын 1-р дөхөлт дэх тооцоо. Тод цэгүүд (8) нь бидний бодсон Борнын 1-р дөхөлт дэх тооцоо. Бүдүүн үргэлжилсэн муруй (6) нь Борнын 2-р дөхөлт дэх $Z_p=6$ үеийн бидний бодсон тооцоо бөгөөд бүдүүн тасархай муруй (7) нь мөн дөхөлт дэх $Z_p=-6$ тохиолдлын бидний бодсон тооцоо болно.



3-зураг. Устөрөгчийн атомыг 100 МэВ энергитэй C^{6+} ба C^{6-} ионы мөргөлтөөр иончлоход шилжүүлсэн импульст перпендикуляр хавтгай дээр ($\phi_k=90$) сугарсан электроны бүрэн дифференциал огтлол (БДО) эжекцийн онцөг хоорондын хамаарлыг харуулав. $E_{ej}=10$ эВ $Q=1$ а.н
Тод тасралтгүй муруй (1) нь Glauber $Z_p=6$, бүдэг үргэлжилсэн муруй (4) нь Glauber $Z_p=-6$. Тод цэгтэй тасархай муруй(2) нь CDW-EIS $Z_p=6$. Бүдэг цэгтэй тасархай муруй (5) нь CDW-EIS $Z_p=-6$, бүдэг цэгүүд(3) нь А.В.Voitkin нарын Борнын 1-р дөхөлт дэх тооцоо. Тод цэгүүд (8) нь бидний бодсон Борнын 1-р дөхөлт дэх тооцоо. Бүдүүн үргэлжилсэн муруй (7) нь Борнын 2-р

дохолт дэх $Z_p \approx -6$ үеийн бидний бодсон тооцоо бөгөөд бүдүүн тасархай муруй (6) нь мөн дохолт дэх $Z_p = 6$ тохиолдлын бидний бодсон тооцоо болно.



4-зураг. Устөрөгчийн атомыг эерэг ба сөрөг ионы мөргөлтөөр иончлоход шилжүүлсэн импульст перпендикуляр хавтгай дээр ($\phi_k = 90$) сугарсан электроны бүрэн дифференциал огтлол (БДО) эжекцийн онцгоос хамаарах нь. $E_{ej} = 10 \text{ eV}$, $Q = 1$ а.н $v_p = 60 \text{ a.u.}$ $Z_p = \pm 30$. Энэхүү зурагт тод үргэлжилсэн муруй (1) нь Glauber $Z_p = 30$, бүдэг үргэлжилсэн муруй (4) нь Glauber $Z_p = -30$. Тод тасархай муруй (2) нь CDW-EIS $Z_p = 30$, бүдэг тасархай муруй (5) нь CDW-EIS $Z_p = -30$. Бүдэг нэгүүд (3) нь А.В. Voitkiv нарын Борнын 1-р ойролцооллын муруй. Тод нэгүүд (8) нь бидний бодсон Борнын 1-р ойролцооллын муруй, бүдүүн үргэлжилсэн муруй (7) нь бидний бодсон Борнын 2-р ойролцооллын муруй $Z_p = -30$. Бүдүүн тасархай муруй (6) нь бидний бодсон Борнын 2-р ойролцооллын муруй $Z_p = 30$.

Дүгнэлт

Устөрөгчийн атомыг эерэг ба сөрөг ионы мөргөлтөөр иончлоход мөргөлдөөний хавтгай дээр ($\phi_k = 0$) сугарсан электроны бүрэн дифференциал огтлолыг илэрхийлэхэд Борны 1, 2-р дөхөлтийг хэрэглэж болохыг манай судалгаа харуулж байна.

Энэхүү Борны 2-р дөхөлтийн аргаар шилжүүлсэн импульст перпендикуляр хавтгай дахь иончлох урвалын динамикт их цэнэгтэй ион тусах тохиолдолд ч Борнын 2-р эрэмбийн ойролцоолол Glauber ба CDW-EIS аргаар бодсонтой ижил үр дүнд хүргэдгийг харуулж байна. Шилжүүлсэн импульст перпендикуляр хавтгай дээр ($\phi_k = 90$) сугарсан электроны БДО-ыг тооцоолсон онолын тооцоо Устөрөгч болон Гелийн атомыг иончлох хоёр тохиолдолд төсөөтэй үр дүнд хүрч байгаа нь Гелийн атомд ажиглагдсан онол туршлагын зөрөө атомын электронуудын хоорондох корреляцаас хамаарсан бус болохыг харуулсан. Энэхүү дүгнэлтийг туршлагаар шалгах боломжтой юм.

Ашигласан материал:

- [1]. McCurie, J.H 1997 Electron Correlation Dynamics in Atomic Collisions (Cambridge: Cambridge University Press)
- [2]. Storefoht N, DuBios R.D and Rivarola R.D 1997 Electron Emission in Heavy Ion-Atom Collisions (Berlin: Springer) .
- [3]. Voitkiv A.B, Najjari B., Ullrich J. J. Phys. B: At. Mol. Opt. Phys. 36(2003) 2591-2609
- [4]. Zhangjin Chen et al J. Phys. B: At. Mol. Opt. Phys. 38(2005) 4195-4209
- [5]. Madison.D et al J. Phys. B: At. Mol. Opt. Phys. 37(2004) 981-995
- [6]. Klaus Bartschat et al J. Phys. B: At. Mol. Opt. Phys. 34(2001)
- [7]. Brau I Phys. Rev. Lett. 89 273201 (2002)
- [8]. Brau I J. Phys. B: At. Mol. Opt. Phys.36 (2003)
- [9]. Baertschy M et al Phys. Rev. A 64 022709 (2001)
- [10]. Roberts. M. J. J. Phys. B: At. Mol. Opt. Phys.30 (1997) L175-L180
- [11]. Brauner. M. et al J. Phys. B: At. Mol. Opt. Phys. 24(1991) 287-297
- [12]. Madison.D, Moshhammer.R., Shulz.M et. all. J.Phys.B.35(2002) 3297-3314
- [13]. Moshhammer.R., Shulz.M et. all. J.Phys.B.36(2003) L311-L317

- [14]. Ciappina. B.F et. all. J.Phys.B.36(2003) 3775-3786
- [15]. Khenmedekh.L., Lhagva. O., Narantsatsralt. N., ICPEAC 2003 XXIII International Conference on Photonic, Electronic and Atomic Collisions
- [16]. Mota Furtado.F, O'Mohany.P.F J.Phys.B.21(1988) 137-151
- [17]. Sharma.S, Srivastava.M.K Phys.Rev.A. 38(2)(1988)1083-1086
- [18]. Byron Jr.F.W, Joachain.C.J, Piraux.B J.Phys.B.19(1986)1201-1210
- [19]. Balashov V.V., Martin S.E. and Crowe A. (1996) J.Phys.B: At.Mol.Opt.Phys.29, L337
- [20]. Godunov A.L., Kunikeev Sh. D., Novikov N.V. and Senashenko V.S.(1989) Zh. Eksp. Teor. Fiz. 63, 1638-49
- [21]. Хэнмэдэх.Л., Наранцацралт.Н., Лхагва.О., Ш.Рашид, ШУТИС ЭШБ эмхэтгэл 2006. 2/82 40-44 тал