

# Фотоэлектроны импульсын түгэлт туйлшралаас хамаарах нь

Ч.Алдармаа\*, Г.Зоригт, Л.Хэнмэдэх

Шинжлэх Ухаан Технологийн Их Сургууль, Хэрэглээний Шинжлэх Ухааны Сургууль, Физикийн тэнхим

Энэ ажилд лазер атомын харилцан үйлчлэлийг Кулоны долгион функцын дискрет хувьсагчийн арга (CWDVR) ашиглан хугацаанаас хамаарсан гурван хэмжээст Шредингерийн тэгшитгэлийг тоон аргаар бодсон. Фотоэлектроны импульсын түгэлтийг континуумын долгион функц дээр долгион функцээ проекцлох замаар амплитудыг тодорхойлж гаргалаа. Шугаман, тойрог, эллипс туйлшрал лазерын пульсүүдийн хувьд харилцан үйлчлэлийг тооцоолж импульсын түгэлтийг харьцууллаа.

PACS numbers: Gs67.63.Gh, 67.80.Fh, 67.25.dt, 42.60.Rn, 31.55.ee, 32.80.Rm.

## ОРШИЛ

Лазерын пульс нь атом молекул дээр богино хугацаанд явагдах процессын судалгаанд өргөн ашиглагдаж байна. Энэ хүрээнд лазерын хүчтэй пульс атомтай харилцан үйлчлэх онолын судалгаанууд хийгдсээр байна. Лазерын пульсээр атомыг иончлох түүний фотоэлектроны импульсын түгэлтийн онолын судалгааны ажлууд нь R матрицын онолоор [1,2], хөндөх онолоор [3], хүчтэй орны ойролцооллоор [4,5], хугацаанаас хамаарсан Шредингерийн тэгшитгэл [6-9] гэх мэт тодорхой дөхөлтийн хүрээнд хийгдэж ирсэн байна. Олон электронтой атомын хувьд нэг идэвхитэй электроны ойролцооллоор (SAE) [10,11], нягтын функционалын онолоор [12] тус тус тооцоолсон байна. Онолын судалгааны хүрээнд атомыг шугаман туйлширсан лазерын пульсээр иончлох тооцооллыг [13,14], тойрог ба эллипс туйлширсан пульсын тохиолдолд гурван хэмжээст тооцоолол [15-18] хийжээ. Бид өмнө нь Кулоны долгион функцын дискрет хувьсагчийн аргыг ашиглан шугаман туйлшралтай лазер атомын харилцан үйлчлэлийг хоёр хэмжээст хугацаанаас хамаарсан Шредингерийн тэгшитгэлээр бодож өдөөлт болон иончлолын магадлалуудыг тодорхойлсон [19,20].

Энэ ажилд устөрөгчийн атомыг эллипс, тойрог, шугаман туйлширсан лазерын пульсээр үйлчилж гурван хэмжээст хугацаанаас хамаарсан Шредингерийн тэгшитгэлийг тоон аргаар бодсон үр дүнгээс орууллаа. Энэхүү

ажилд атом нэгжийн системийг ашигласан болно.

## ОНОЛ

Гадны оронд байгаа атомын хувьд Шредингерийн тэгшитгэлийг бичвэл [21]

$$i \frac{\partial \Psi(\vec{r}, t)}{\partial t} = (\hat{H}_0 + \hat{V}(\vec{r}, t)) \Psi(\vec{r}, t) \quad (1)$$

Энд:  $\Psi(\vec{r}, t)$  - электроны долгион функц,  $\hat{H}_0$  - устөрөгчийн атомын гамилтанионы оператор,  $\hat{V}(\vec{r}, t)$  - гадны орны харилцан үйлчлэлийн оператор.

$$\hat{V}(\vec{r}, t) = \vec{r} \cdot \vec{E}(t) \quad (2)$$

Лазерын цахилгаан орон:

$$\vec{E}(t) = E_0 \cos\left(\frac{\omega t}{2n}\right)^2 \left[ \frac{1}{\sqrt{\varepsilon^2 + 1}} \sin(\omega t + \phi_0) \vec{i} + \frac{\varepsilon}{\sqrt{\varepsilon^2 + 1}} \cos(\omega t + \phi_0) \vec{k} \right] \quad (3)$$

$E_0$  – лазерин цахилгаан орны далайц,  $n$  – циклийн тоо,  $\omega$  - давтамж,  $\varepsilon$  – туйлшралын тогтмол,  $\phi_0 = \frac{\pi}{2}$ .

Хугацаанаас хамаарсан Шредингерийн тэгшитгэлийн шийд болох фотоэлектроны импульсын түгэлтийг тодорхойлохын тулд хугацаанаас хамаарсан долгион функцыг Кулоны континуумын долгион функц дээр проекцлосон. Үүнд

$$\frac{dP}{d\varepsilon d\Omega_k} = \lim_{t \rightarrow \infty} |\langle \Phi_k^-(\mathbf{r}) | \Psi(\mathbf{r}, t) \rangle|^2 \quad (4)$$

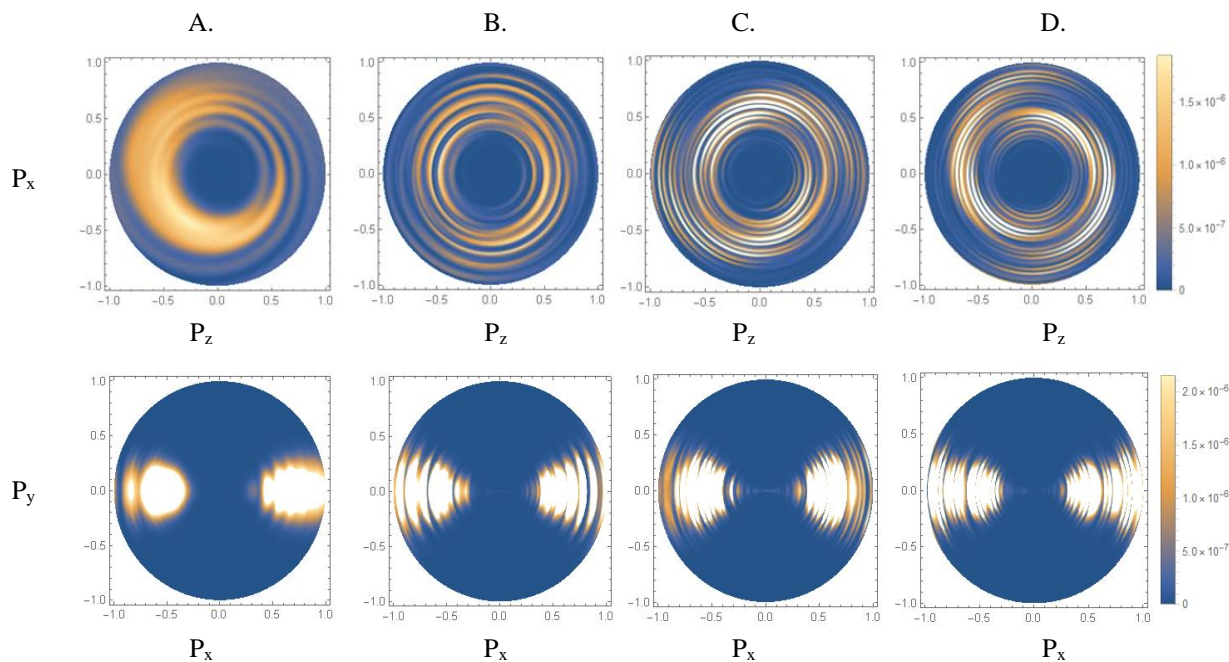
Устөрөгчийн атомын хувьд континуумын долгион функц  $\Phi_k^-(\mathbf{r})$  -ийн аналитик илэрхийлэлийг ашиглалаа. Хугацаанаас хамаарсан Шредингерийн тэгшитгэлийг

\* Electronic address: aldaraa2004@yahoo.com

CWDVR тоон аргаар тооцоолон лазерын пульс атомтай харилцан үйлчлэл дууснаас хойш  $\tau, 2\tau, 3\tau, 4\tau$  хугацаа өнгөрсний дараах долгион функцыг олж континиумын долгион функцэд проекцлон импульсын огторгуй дахь фотозэлектроны импульсын түгэлтийг тооцоолсон (Зураг 1). Шугаман туйлшралтай лазерын пульсээр атомд үйлчлэх үед хоёр хэмжээст тооцооллыг хийх боломжтой бол тойрог болон эллипс туйлширсан пульсын хувьд гурван хэмжээст тооцоолол хийх хэрэгтэй болно. Эллипс туйлширсан хүчтэй лазерын пульс нь атомыг ихээхэн цочироож их импульсын моменттой төлөвүүдийг тооцоололд оруулж ирэх шаардлагатай болж байна. Иймд дискрет торын хувьд зангилааг нягтруулах орбитын квант тооны дээд утгыг их авахад хүргэнэ.

### ТООЦООЛЛЫН ҮР ДҮН

Үндсэн төлөвтөө байгаа устөрөгчийн атомыг  $I = 5 \cdot 10^{13}$  Вт/см<sup>2</sup> эрчимтэй, 6 циклтэй, 0.057 а.н давтамжтай лазерын пульсээр үйлчлэн фотозэлектроны импульсын түгэлтийг тодорхойлов. Лазер атомын харилцан үйлчлэлийг уртыг тохируулгаар авч, электроны долгион функцыг бөмбөлөг координатын системд бөмбөлөг гармоник функцээр задлан радиал функцийг хугацаанаас хамааруулан тооцоолов. Радиал координатыг Кулоны долгион функцийн язгууруудаар дискретчилэн устөрөгчийн атомын псевдо спектрал баазуудыг байгуулж тооцооллыг хийлээ.



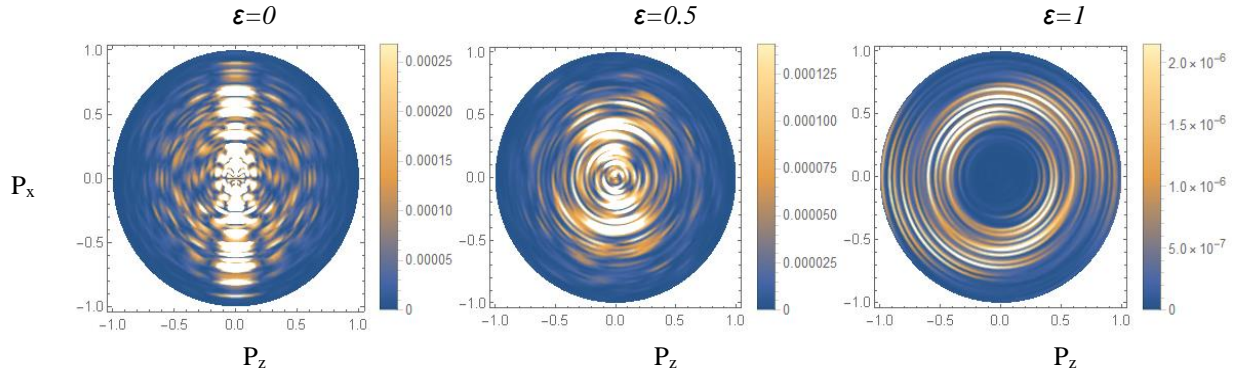
Зураг 1. Фотозэлектроны импульсын түгэлт (тойрог туйлшрал  $\epsilon = 1$ ).

орбитын моменты хамгийн их утгыг 32-оор авлаа. Лазерын пульсын урт 662.5 а.н, хугацааны итерацыг  $\Delta t = 1.32$  алхамтайгаар шилжүүлэн тооцооллыг хийв. Зураг 1 -д лазерын пульсын туйлшралын хавтгай XZ болон, XY хавтгай дээрх фотозэлектроны импульсын түгэлтийг харууллаа. Зургийн хоёр дахь мөрөнд дүрсэлсэн  $P_x, P_y$  түгэлтээс харахад цацрагийн тусаж буй чиглэл Y -ийн дагуу иончлол ажиглагдахгүй байна. Лазерын пульсын үйлчилж дууссан  $t = \frac{\tau}{2}$  (Зураг 1A), эгшинээс

эхлэн  $\tau$  хугацааны интервалтайгаар фотозэлектроны импульсын түгэлтийг дүрслэлээ. Зураг 1C нь  $2\tau$  хугацааны дүрслэл бөгөөд түүнээс хойш түгэлтийг хэлбэр тогтворжиж байна (Зураг 1D). Эллипс туйлширсан лазерын пульсын туйлшралын тогтмол  $\epsilon$  нь 0, 0.5, 1 байх тохиолдолд XZ хавтгай дээрх фотозэлектроны импульсийн түгэлтийг харуулав. Зураг 2-д эхний шугаман туйлширсан пульсийн хувьд туйлшралын чиглэлд буюу X тэнхлэгийн дагуу чиглэлд иончлол илүү магадлалтай байгаа бол

туйлшралын тогтмол ихсэхэд бүх чиглэлд иончлол жигд түгэлтэй болж байгаа дүрслэгдсэн байна. Бид энэхүү ажилд CWDVR аргаар лазер атомын харилцан үйлчлэлийг тооцоолох боломжийг эрэлхийлсэн бөгөөд тооцоололын үр дүн бусад онолын судалгааны

[22,23] ажлуудын үр дүнтэй хэлбэрийн хувьд ойролцоо үр дүнг өгч буй нь цаашид тооцоололын параметруудийг өргөтгөх замаар үр дүнг нарийвчлан тооцоолох боломжтойг харуулж байна.



Зураг 2. Фотоэлектроны импульсын түгэлт ( Туйлшралын тогтмол  $\epsilon = 0, 0.5, 1$ ).

### ДҮГНЭЛТ

Тойрог туйлширсан лазерын пульс нь электрон үүлийг эргэлдүүлэн хүчтэй хуйлруулж байгаа нь хугацааны явц дахь долгион функцын модулын квадратаас ажиглагдсан. Туйлшралын тогтмолын  $\epsilon = 0, \epsilon = 0.5, \epsilon = 1$  утганд тооцоолоход фотоэлектроны импульсын түгэлтийн максимумд харгалзах чиглэл нь туйлшралын эргэлтийн чиглэлийн эсрэг шилжиж байна. Фотоэлектроны импульсын түгэлтийн тархалт нь туйлшралын тогтмол ихсэхэд өргөсөж, төвийн орчим дахь магадлал багасаж байна (Зураг 2).

### АШИГЛАСАН МАТЕРИАЛ

[1] S. Basile, F. Trombetta, and G. Ferrante, Phys. Rev. Lett. 61, 2435 (1988)  
 [2] L. R. Moore, M. A. Lysaght, J. S. Parker, H. W. van der Hart, and K. T. Taylor, Phys. Rev. A 84, 061404(R) (2011).  
 [3] A. N. Grum-Grzhimailo and E. V. Gryzlova, Phys. Rev. A 89,043424 (2014).  
 [4] A. K. Kazansky, I. P. Sazhina, and N.M. Kabachnik, Phys. Rev.A 82, 033420 (2010).  
 [5] M. Klaiber, K. Z. Hatsagortsyán, and C. H. Keitel, Phys. Rev.Lett. 114, 083001 (2015).  
 [6] K. J. Schafer, B. Yang, L. F. DiMauro, and K. C. Kulander, Phys.Rev. Lett. 70, 1599 (1993).  
 [7] X. M. Tong, K. Hino, and N. Toshima, Phys. Rev. A 74,031405(R) (2006).  
 [8] D.A. Telnov and Shih. I. Chu Phys.Rev A 79 043421 (2009)

[9] M. F. Ciappina, J. A. Perez-Hernandez, T. Shaaran, L. Roso, and M. Lewenstein, Phys. Rev. A 87, 063833 (2013).  
 [10] M.Schuricke, G.Zhu, J.Steinmann, K. Simeonidis A.N. Grum-Grzhimailo Phys.Rev A83, 023413 (2011)  
 [11] Z.Chen, T.Morishita, A.T. Le, M.Wickenhauser, X.M.Tong and C.D. Lin Phys. Rev A74, 053405 (2006)  
 [12] Mitsuko Murakami, G.P.Zhang and Shih I Chu Phys.Rev A95, 053419 (2017)  
 [13] Alexei N. Grum- Grzhimailo, Brant Abeln, Klaus Bartschat and Daniel Weflen Phys.reiv A 81, 043408 (2010)  
 [14] Mitsuko Murakami, Shih I Chu Phys.Rev A93, 023425 (2016)  
 [15] N Douguet, K. Bartschat, Journals of Physics: Conf, Series 875 (2017) 022030  
 [16] I. A. Ivanov, A. S. Kheifets arxiv: 1309.7436v1, 2013  
 [17] M.Abu-samha, L.B. Madsen arxiv: 1004.3868v1, 2010  
 [18] C.P.J.Martuny, M.Abu-samba, L.B. Madsen arxiv: 10041468v1, 2010  
 [19] Ч.Алдармаа, Л.Хэнмэдэх, Г.Зоригт Физик сэтгүүл №29 (518) 2019  
 [20] Г.Зоригт, Л.Хэнмэдэх, Ч.Алдармаа Физик сэтгүүл №30 (527) 2020  
 [21] Landau LD, Lifshitz EM 1977 Quantum mechanics. Oxford, UK, Pergamon Press  
 [22] Mitsuko Murakami, Shih I Chu Phys.Rev A93, 023425 (2016)  
 [23] Xiao Min Tong, J.Phys, B: At.Mol.Opt.Phys. 50 (2017), 144004.