

## Устөрөгчийн атомыг хүчтэй лазерын аттосекундын пульсээр өдөөх магадлалыг диполийн ойролцоололд бодох нь

Ч.Алдармаа<sup>1\*</sup>, Л.Хэнмэдэх<sup>1</sup>, О.Лхагва<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Монгол Улс, Улаанбаатар хот, Шинжлэх Ухаан Технологийн Их Сургууль, Материалын Технологийн Сургууль, Онолын физик загварчлалын баг

<sup>2</sup> Монгол Улс, Улаанбаатар-210646, Их сургуулийн гудамж-1, Монгол Улсын Их Сургууль, Физик Электроникийн Сургууль, Онолын физикийн тэнхим  
\*Э-шуудан: aldaraa2004@yahoo.com

Устөрөгчийн атомын S төлөвийг (n=1-6) аттосекундын лазерын хүчтэй пульсээр бр<sup>0</sup> өдөөгдөх магадлалыг диполийн ойролцоололд бодлоо. Диполийн ойролцоолол биелэхгүй мужид ч шилжилтийн магадлалын эцсийн утга нь нарийвчилсан бодолттой тохирч байна.

**ТҮЛХҮҮР ҮГ:** Аттосекундын пульс, диполийн ойролцоолол, уртын тохируулга, хурдны тохируулга

### I. ОРШИЛ

Лазерийн техник хөгжиж хэдхэн аттосекундын хугацаанд үргэлжлэх пульсыг гарган авах болсноор атомын босгон дээрээс иончлох, атомын тогтворжих, дээд эрэмбийн гармоник үүсгэх зэрэг үзэгдлүүдийг нээж, ойлгож чадсан байна. Атомын электрон оролцсон процесс нь хугацааны аттосекунд мужид явагддаг тул атомд явагдах процессыг судлахад аттосекундын пульсыг ашиглаж байна. Лазерын богино хүчтэй пульсээр атомыг өдөөх, иончлох магадлалыг хөндөх онолын хүрээнд [1,2] болон Шредингерийн хугацаанаас хамаарсан тэгшитгэлийг бодох замаар судалж байна.

Луговской, Брэй нар 1s төлөвөөс пр<sup>0</sup> төлөвт шилжих магадлалыг хөндөх онолын нэгдүгээр эрэмбээр тооцоолсон байна. Бид ns төлөвөөс бр<sup>0</sup> төлөвт шилжих шилжилтийн магадлалыг диполийн ойролцоололд уртын тохируулга (length gauge) болон хурдны тохируулгаар (velocity gauge) мөн хөндөх онолын нэгдүгээр эрэмбээр бодлоо. Энэ ажилд атомын нэгжийг ашигласан.

### II. ОНОЛ

Бидний ажлын зорилго нь лазерын хүчтэй пульсын үйлчлэлээр устөрөгчийн атомыг өдөөх шилжилтийн амплитудыг хугацаанаас хамааруулан хөндөх онолын нэгдүгээр эрэмбийн дөхөлтөөр, диполийн ойролцоололд харилцан үйлчлэлийг уртын болон хурдны тохируулгаар илэрхийлж онолын хувьд тооцоолох явдал юм.

Огторгуйд тарж байгаа лазерын хүчтэй пульсийн нөлөөнд орших устөрөгчийн атомыг авч үзье. Координатын эхийг бай цөм дээр авч

x тэнхлэгийг пульсийн тарах чиглэлийн дагуу давхцуулая. Лазерын пульсын цахилгаан орны хүчлэгийг дараах хэлбэртэйгээр сонгоё.

$$E(t, x) = \begin{cases} \hat{z} E_0 \cos^2\left(\frac{(t - \alpha \cdot x) \cdot \pi}{\tau}\right) \sin \omega \cdot (t - \alpha \cdot x) + \phi & \text{if } |t - \alpha \cdot x| \leq \frac{\tau}{2} \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (1)$$

$E_0$  -цахилгаан орны амплитуд,  $\omega$ ,  $\phi$  - тээгчийн давтамж ба фаз, Цахилгаан орны хүчлэг нь вектор потенциалтай  $E(\eta) = -\frac{\partial A(\eta)}{\partial t}$  гэж холбогдоно.

Лазерын хүчтэй пульсын үйлчлэлээр атом эхний төлөвөөс эцсийн төлөвт шилжих шилжилтийн амплитуд [4]:

$$a_{fi} = - \int_{-\infty}^t V_{fi}(t) \cdot e^{i\omega_f t} dt \quad (2)$$

Үүнд:  $V_{fi}(t) = \langle f | \hat{V}(\eta) | i \rangle$  - өдөөлтийн матрицын элемент,  $\hat{V}(\eta)$  -лазер -атомын харилцан үйлчлэл,  $\omega_f = \varepsilon_f - \varepsilon_i$  шилжилтийн давтамж, атомын эхний төлвийн хувьд  $n_i, l_i, m_i$  гэсэн квант тоонууд, эцсийн  $|f\rangle$  төлөвт  $n_f, l_f, m_f$  гэсэн квант тоонууд тус тус харгалзана. Эхний төлөв  $\varepsilon_i = -1/2n_i^2$ , эцсийн төлөв  $\varepsilon_f = -1/2n_f^2$  энергитэй байна. Устөрөгчийн долгион функц дараах хэлбэртэй байна[3].

$$|i\rangle = \Psi_{nlm} = Y_{lm}(\theta, \varphi) \cdot R_{nl}(r) \quad (3)$$

Лазер-атомын харилцан үйлчлэлийг дараах томъёогоор илэрхийлнэ [2].

$$\hat{V}(\eta) = -A(\eta) \cdot \hat{p} + \frac{A^2(\eta)}{2} \quad (4)$$

$A(\eta)$  – вектор потенциал,  $\hat{p} = -i\nabla$  моментын оператор байна. Диполийн ойролцооллод пульсын урт атомын хэмжээнээс олон дахин их үед  $l \ll d_i$ , хугацааны нэг эгшинд атомын нэг захаас нөгөө зах хүртэлх пульсын орны өөрчлөлтийг тооцохгүй байж болох тул  $\vec{A}(x, t) = \vec{A}(0, t)$  гэж үзэж болно. Өөрөөр хэлбэл пульсын орон зөвхөн хугацаанаас хамаарна. Энэ ойролцооллод харилцан үйлчлэлийн операторыг Уртын тохируулга (Length gauge)

$$\hat{V}(\eta) = \mathbf{r} \cdot \mathbf{E}(t) \quad (5)$$

Хурдны тохируулга (Velocity gauge)

$$\hat{V}(\eta) = \hat{p} \cdot \mathbf{A}(t) \quad (6)$$

хэлбэрээр авч болно [5].

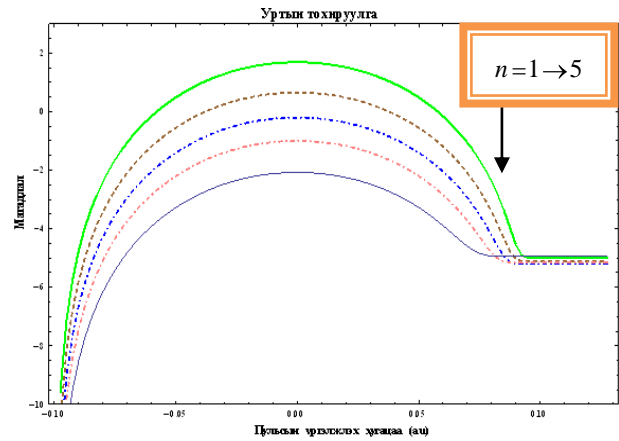
### Ш.ҮР ДҮН БА ДҮГНЭЛТ

Устөрөгчийн атомын S төлөв ( $n=1-6$ ) дээр 27 а.ц урттай, 0.2а.ц-ын мужид үргэлжлэх лазерын хүчтэй пульс тусахад атом  $br^0$  төлөвт шилжих диполийн шилжилтийн магадлалыг хөндөх онолын нэгдүгээр эрэмбээр бодлоо.

Лазер-атомын харилцан үйлчлэлийг диполийн ойролцооллод уртын болон хурдны тохируулгаар сонгон авч бодсон үр дүнг, нарийвчилсан (exact) бодолтын үр дүнтэй тулган харуулав.

#### А. Уртын тохируулга

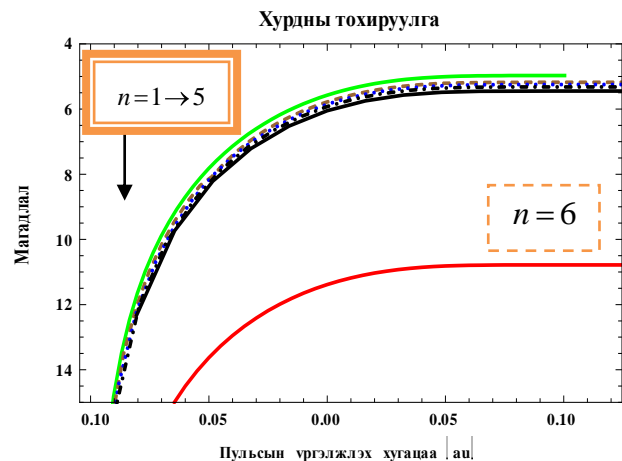
Атомын эхний төлөвийн энергиэс хамаарч шилжилтийн магадлал нь атомын төв, лазерын пульсын төв хоёрын давхцал хүртэл өсөж цааши хугацааны мужид багасаж шилжилтийн магадлалын эцсийн утганд хүрнэ. Шилжилт магадлалын өөрчлөгдөх муж нь лазерын пульсын үргэлжлэх хугацаагаар хязгаарлагдана. (Зураг №1).



Зураг№1. Шилжилтийн магадлал хугацаанаас хамаарах хамаарал.

#### Б. Хурдны тохируулга

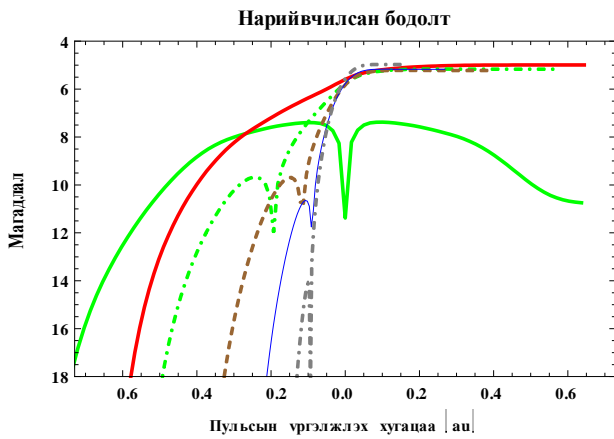
Шилжилтийн магадлал нь пульсын үргэлжлэх хугацааны туршид өссөөр шилжилтийн магадлалын эцсийн утганд хүрнэ. Магадлал нь эхний төлөвийн n-ээс бараг хамаарахгүй харин n=6 үед магадлал эрс багасна (Зураг №2).



Зураг№2. Шилжилтийн магадлал хугацаанаас хамаарах хамаарал.

#### В. Нарийвчилсан бодолт

Шилжилтийн магадлалын өөрчлөгдөх муж нь атом пульсын харилцан үйлчлэлийн хугацааны мужаар хязгаарлагдах тул эхний төлөвийн n –ээс хамаарч өргөснө. n=6 үеийн магадлал нь тоон утгаараа эрс багаас гадна хэлбэр нь ч өөр байна (Зураг №3).



Зураг № 3. Шилжилтийн магадлал хугацаанаас хамаарах хамаарал.

Бидний тооцоолсон  $1s-6p^0$  төлөвийн шилжилтийн магадлал (Lugovskoy, Bray) нарын хийсэн ажилтай тохирч байна. Шилжилтийн магадлалын эцсийн утга нь хөндөх онолын нэгдүгээр эрэмбээр бодсон нарийвчилсан бодолт, диполийн ойролцоолд уртын болон хурдны тохируулгаар бодсон бодолтууд ойролцоо байлаа. Шилжилтийн магадлалын эцсийн үр дүнгийн дараах хүснэгтээр харуулав.

Хүснэгт №1

Шилжилт ҮҮД	Нарийвчилсан бодолт	Диполийн ойролцоолол	
		Уртын тохируулга	Хурдны тохируулга
1s-6p0	-4.97186	-4.9613	-4.97177
2s-6p0	-5.17104	-5.18854	-5.17909
3s-6p0	-4.9636	-4.96413	-4.97177
4s-6p0	-4.99698	-5.11791	-4.98286
5s-6p0	-4.99698	-4.9887	-4.98286
6s-6p0	-10.7792	-29.0787	-10.7823

Диполийн ойролцоолол нь пульсын урт атомын хэмжээнээс олон дахин их  $l \ll d_i$  атомын эхний төлөвийн  $n < 3$  үед таарах ёстой боловч бидний хийсэн тооцооноос үзэхэд  $n=3$ ,  $n > 3$  үед нарийвчилсан тооцоотойгоо тохирч байна. (Хүснэгт №1) Харин ижил  $n$ -тэй үед уртын тохируулгаар бодоход тохиромжгүй байна.

### Талархал

Энэхүү эрдэм шинжилгээний ажлыг хийж гүйцэтгэхэд гүн туслалцаа үзүүлж зөвлөж, дэмжиж ажилласан Онолын физик загварчлалын багийн хамт олондоо талархсанаа илэрхийлэе.

### НОМ ЗҮЙ

- [1] T.K. Kjeldsen and L.B.Madsen J.Phys B: At. Mol. Opt.Phys. **37** (2004) 2033-2044
- [2] A.V Lugovskoy and I Bray J.Phys B: At. Mol. Opt.Phys. **37** (2004) 3427-3434
- [3] Г.Бете и Э. Солпитер Квантовая механика атомов с одним и двумя электронами 1960
- [4] Л.Д.Ландау и Е.М. Лифшиц Теоретическая физика том-III. 1974
- [5] Frank Grossman “ Theoretical Femto-second Physics ” 2008