

## Мезоатомын гадаад Оже эффектийг бодох нэгэн арга

Х. Цоохүү, Н. Цогбадрах  
МУИС, Онолын Физикийн Тэнхим

Их концентрацтай хий буюу шингэн дотор үүссэн мезоатом бага энергитэй төлөв рүүгээ шилжих нэг механизм нь гадаад Оже эффект юм. Мезоатомын шатаасан шилжилтийг бодоходоо бид өнөөг хүртэл зөвхөн дотоод Оже эффект, цахилгаан соронзон шилжилт шилжилт хоёрыг тооцдог байсан [1]. Энэ нь гусгаарлагдсан атомын тохиолдол буюу сийрэг хийн хувьд тохирох ойролцоолол юм. Гэтэл сүүлийн жилүүдэд шингэн гелий дээр мезоатомын шинж чанарыг тодорхойлсон туршилтаар тавих нь цөөнгүй болов. Тухайлбал мезогелийн метастабиль төлөвийг туршлагаар илэрүүлж түүний амьдрах нас, эзлэх хувийг хэмжсэн явдлыг дурьдаж болно [2]. Эдгээр метастабиль төлөв гадаад Оже эффектээр задрах боломжийг авч үзэхгээр нирхолтой асуудал юм [3].

Гадаад Оже эффектийг устөрөгчийн атомын хувьд анх Лсон бодсон [4]. Энэ ажилд иончлогдсон электроны төлөв байдлыг хавтгай долгионоор дүрсэлсэн ион электрон харьцангуй их энергитэй гэж үзсэн хэрэг бөгөөд, иймд мезоатомын шатаасан шилжилтийн дунд буюу төгсгөлийн шатанд тохирох ба дөнгөж үүссэн мезоатомд хэрэглэхэд наарийвчлалын хувьд хангалттай бус болдог.

Гелийн мезоатомын хувьд гадаад Оже эффектийг [5] ажилд авч үзсэн. Гэхдээ энэ ажилд мезоатомын төлөвүүдээр дундач хурд бодсон учир парциал огтлолуудын талаар мэдээлэл гарган авах ( энэ нь метастабиль төлөвийн унтралтыг судлахад зайлшгүй шаардлагатай ) боломжгүй.

Энэхүү өгүүлэлд гелийн мезоатомд явагдах Оже шилжилтийн парциал хурд, огтлолыг бодох томъёог адиабат дөхүүлэлтэд бодох аргыг боловсруулав. Гадаад Оже эффектийг бодох нь атом-атомын мөргөлдөөний бодлого учраас дотоод Оже шилжилт бодохоос төвөгтэй байдаг.

Хялбарчлах үүднээс орбит дээрээ ганц мезонтой атом, устөрөгч төсөөт ердийн атомтай мөргөлдөх тохиолдлыг авч үзье. Мезоатомын хурд, электроны хурдаас олс дахин бага гэвэл  $(M^- A^+)^* - B$  квазимолекул задрах өргөн  $\Gamma(R)$ , атомуудын харьцангуй хөдөлгөөний хурдаас үл хамаарна гэж үзэж болно. Энэ тохиолдолд  $\rho$  шагай.

зайгаар,  $v_0$  хурдтай туссан мезоатом ердийн атомтай мөргөлдөхөд үүссэн квази-молекул задрах магадлал:

$$P(v_0, \rho) = 1 - \exp\left[-\int_{\rho}^{\infty} \frac{\Gamma(R)dR}{v_0\sqrt{1-\rho^2/R^2}}\right] \quad (1)$$

болно. Үүнийг бичихэд мезоатом шулууны дагуу хөдөлнө гэж үзсэн.

Квазимолекул задрах парциал өргөн

$$\frac{d\Gamma_{i \rightarrow f}(R)}{d\varepsilon} = 2\pi \delta(\varepsilon_i - \varepsilon_f) \int d\vec{v} |\langle f|V|i \rangle|^2, \quad (2)$$

гэж бичигдэнэ. Системийн эхний ба эцсийн төлвийг тодорхойлох индексийг харгалзан  $i$  ба  $f$  гэж томъёолсон.

Мезон хөрш атомын электронтой харилцан үйлчлэх оператор

$$V = \frac{1}{|\vec{R} + \vec{r} - \vec{r}_\mu|} \quad (3)$$

хэлбэртэй. Үүнд  $\vec{r}$ ,  $\vec{r}_\mu$ -мезон ба электроны координат. Эдгээр векторууд тодорхойлогдсон тооллын системийн эхлэл нь харгалзах атомын ( мезоатом, ердийн атом ) цөмтэй давхацана.

Потенциалыг  $|\vec{r}_1 - \vec{r}_\mu|$  -ийн зэргээр задлаад биелэг сфер функц

$$Y_{LM}(\vec{r}) = r^L Y_{LM}(\vartheta, \varphi) \quad (4)$$

тодорхойлж

$$Y_{LM}|\vec{r}_1 + \vec{r}_2| = \sum_{\substack{l_1 l_2 \\ m_1 m_2}} (l_1 m_1 l_2 m_2 | LM) \delta_{l_1+l_2, L} \sqrt{\frac{4\pi(2L+1)!}{(2l_1+1)!(2l_2+1)!}} Y_{l_1 m_1}(\vec{r}_1) Y_{l_2 m_2}(\vec{r}_2) \quad (5)$$

задаргааны томъёог алдиглавал харилцан үйлчлэлийн потенциал

$$V = \sum_{LM} \frac{4\pi}{2L+1} \frac{Y_{LM}(\vec{R})}{R^{L+1}} \sum_{l_1 l_2} (-1)^{l_2} \delta_{l_1+l_2, L} \times \quad (6)$$

$$\times \sqrt{\frac{4\pi(2L+1)!}{(2l_1+1)!(2l_2+1)!}} \sum_{m_1 m_2} (l_1 m_1 l_2 m_2 | LM) Y_{l_1 m_1}(\vec{r}_\mu) Y_{l_2 m_2}(\vec{r}_1)$$

хэлбэрт орно.

Иончлогдсон электроны өнцгөөр интегралчилж эхний төлөвийн проекцоор дун-  
чилан эцсийн төлөвийнхөөр нийлбэрчилбэл

$$\frac{d\Gamma_{i \rightarrow j}}{d\varepsilon} = \frac{2\pi}{2l+1} \sum_{m m'} \sum_{l_e m_e} | \langle \varphi_{n' l' m'} \varphi_{e l_e m_e} | V | \varphi_{n l m} \varphi_{1 S} \rangle |^2 \quad (7)$$

болно. Энэ илэрхийлэлд буй матрицын элемент (6) ёсоор мезон, электроны коор-  
динатаар салах ба өнцгөөрх интегралууд бүрэн авагдана. Үүний дараа  $\vec{R}$  векторын  
чиглэлээр дундчилж проекцуудаарх нийлбэрийг бодоход  $(M^- A^+)^- - B$  квазимолеку-  
л задрах өргөн

$$\Gamma_{n l \rightarrow n' l'} = \frac{2\pi E_a}{\hbar} \sum_{l_1} \left( \frac{a_\mu}{a_l} \right)^{2l_1} |I_{n l \rightarrow n' l'}^{l_1}|^2 \quad (8)$$

$$\frac{1}{R^{2l_1+2}} (l_1 0 l_1 0 | l' 0)^2 \sum_{l_e} \frac{1}{R^{2l_e}} \frac{(2l_1 + 2l_e)!}{(2l_1 + 1)! (2l_e + 1)!} J_{1 S \rightarrow e l}^2$$

хэлбэртэй бичигдэвэ. Үүнд  $l_1 = l' - l$  -мюоны шилжилтийн мультиполь,  $l_e$  -  
иончлогдсон электроны момент.

Мюоны ба электроны координатаарх хэмжээсгүй радиал интегралууд

$$I_{n l \rightarrow n' l'} = \int_0^\infty R_{n' l'}^*(r_\mu) \left( \frac{r_\mu}{a_\mu} \right)^{l_1} R_{n l}(r_\mu) r_\mu^2 dr_\mu \quad (9)$$

$$J_{1 S \rightarrow e l_e} = \sqrt{E_a} \int_0^\infty R_{e l_e}^*(r_e) \left( \frac{r_e}{a_e} \right)^{l_e} R_{1 S}(r_e) dr_e \quad (10)$$

гэж тодорхойлогдоно. Устөрөгч төсөөт атомын ойролцоололд эдгээр интеграл анги-  
литик хэлбэрээр гүйцэт бодогдоно. Диполийн ойролцоололд ( $l_1 = l_e = 1$ ) квазимоле-  
кулын задрах өргөн (8) томъёо ёсоор атом-мезоатомын хоорондох зайн 6 зэрэгтэд  
урвуу болно. Энэ тохиолдолд түүнийг

$$\Gamma_{i \rightarrow j}(R) = \frac{G_{i \rightarrow j}}{R^6} \quad (11)$$

хэлбэртэй бичих нь тохиромжтой. Үүнд  $G_{i \rightarrow j}$  хэмжигдэхүүн  $R$  -ээс хамаарахгүй  
ба үүнийг

$$G_{i \rightarrow j} = \Gamma_{i \rightarrow j}(R_0) R_0^6 \quad (12)$$

гэж бичих нь тохиромжтой. Үүнд  $R_0$  - ямар нэгэн зай.

Задралын хурдлыг мэдсэнээр шилжилтийн магадлал диполийн нарийвчлалд

$$P_j(\rho, \nu_0) = 1 - \exp\left(-\frac{C}{\rho^5}\right) \quad (13)$$

болно. Үүнд:

$$C' = \frac{3\pi\Gamma_j(R_0)R_0^6}{v_0} \quad (14)$$

Цааш нь гадаад Оже шилжилт-явагдах огтлолыг олж болно. Энэ нь

$$\sigma_j(v_0) = 2\pi \int_0^\infty \rho d\rho P_j(\rho, v) = \pi\Gamma\left(\frac{3}{5}\right)C'^{2/5} \quad (15)$$

гэж олдоно. Мезоатом байгаа хийн нягтыг  $N_0$  гэвэл Оже шилжилтийн нийт хурд

$$\lambda_j(v_0) = N_0 v_0 \sigma_j(v_0). \quad (16)$$

болно. Шилжилтийн парциал хурд, парциал огтлолыг

$$\lambda_{j \rightarrow f}(v) = \frac{\Gamma_{j \rightarrow f}}{\Gamma_j} \lambda_j(v) \quad (17)$$

$$\sigma_{j \rightarrow f}(v) = \frac{\Gamma_{j \rightarrow f}}{\Gamma_j} \sigma_j(v) \quad (18)$$

гэж тодорхойлж болно. Үүнд:

$$\Gamma_j = \sum_f \Gamma_{j \rightarrow f} \quad (19)$$

-задралын нийт өргөн.

Дээр гарган авсан үр дүнг ашиглан  $p=59.44$  атмосфер даралтанд ( $N_0 = 0.085n_0$ ,  $n_0 = 1,9 \cdot 10^{22} \text{ 1/см}^3$ ) орших гелийн хийн атомуудтай  $v_0 = 10^5$  см/сек хурд бүхний пионий гелий хий атомтай мөргөлдөхөд явагдах Оже шилжилтийн дундаж хурдыг

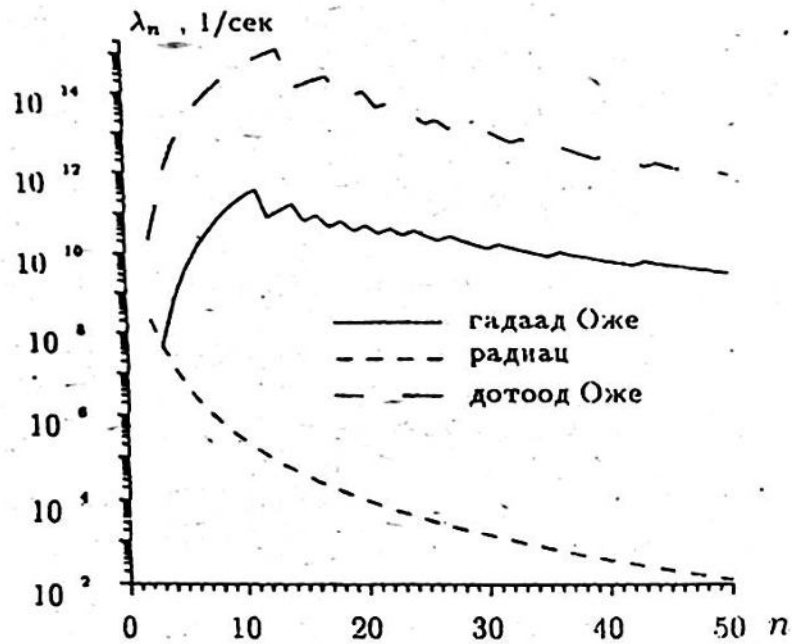
$$\lambda_n = \sum_{n''} \frac{2l+1}{n^2} \lambda_{nl \rightarrow n''}$$

пион байгаа орбитын гол квант тооноос хамааруулж тооцсоныг зурагт үзүүлсэн.

Графикаас үзэхэд гадаад Оже эффектний дундаж хурд гол квант тосны бүх утганд дотоод Оже эффектнийхээс 2-3 эрэмбэ бага хэмжигдэхүүн болох нь харигдана. Харин шингэн гелийд ( $N_0 = n_0$ ) энэ хоёр хурд ойролцоо хэмжигдэхүүнүүд байх болно.

## Дүгнэлт

1. Мезоатом, ердийн атомтай мөргөлдөхөд квазимолекуляр систем эхэлж үүсээд дараа нь задарна гэж үзэх санаан дээр үндэслэн мезоатомын гадаад Оже эффектнийг бодох шинэ арга боловсруулав.



Зур.1 Пионы гелийн атомын Оже ба радиац шилжилтийн дундаж хурд гол квант тооноос хамаарах нь

2. Квазимолекуляр системийн шугаман хэмжээний утга бүр дээр Оже эффектнийг явагдах парциал ба нийт өргөнийг бодох томъёог гарган авсан. Пионы гели, гелийн атомтай мөргөлдөхөд явагдах Оже шилжилтийн дундаж хурдыг бодож бусад процессуудын хурдтай жишиж дүгнэлт гаргасан.

## A Method for Calculation Mesic-atom External Auger Transitions

Kh. Tsokhuu, N. Tsogbadrakh

A method for calculating mesic-atom external Auger transitions is proposed. The transitions proceed in two stages. In the first stage, the quasi-molecular complex, consisting of the mesic atom and the atom is formed in their collisions and on the second stage, the decay of this complex leads to external Auger effects. At given distance between two atoms of the quasi-molecular system, the partial and total width of external Auger transitions are calculated. The average Auger transition rates of pionic helium (Helium gas pressure 59.44 atm, velocity of the pionic atom is  $v = 10^5 \text{ cm/s}$ ) are calculated and compared with rates of other competitive processes (Internal Auger and Radiation transitions).

## Ашигласан ном, зохиол

1. Теоретический практикум по ядерной и атомной физике. Под об. ред. Проф. В.В. Балашов; М.(1984)
2. T. Yamazaki, E. Widmann, I. Sugai and et. al., *Rhys. Rev. A* 49 (1994)4457
3. Kh. Tsookhuu and D. Orlokh, Mesons and Nuclei at Intermediate Energies. Book of Abstracts, Dubna, JINR, E4-94-123, 1994. p.60
- 4: M. Leon, H. A. Bethe *Phys.Rev. 127*, (1962),636.
5. T.V. Day *Phys. Rev. 128*, (1968)864
6. Г. А. Фесенко. Теоретические исследования образования мюонных атомов в молекулярном водороде. Автореферат диссертаций (1995)