

ОЖЕ-ИОНИЗАЦИЯ В КВАЗИМОЛЕКУЛЕ $\text{He}^+ - \text{He}$

В.Р.Асатрян, А.П.Шергин

Исследованы оже-переходы в простейшей квазимолекуле, образующейся в столкновениях $\text{He}^+ - \text{He}$ кэВ-энергий. Показано, что оже-спектры хорошо описываются в рамках квантово-механической модели эмиссии электронов из квазимолекулы, основанной на приближении Эйри.

В последние годы неоднократно обсуждался вопрос о применимости квантово-механической модели ¹ эмиссии оже-электронов из квазимолекулы — системы, образующейся при столкновении двух атомов и существующей $\sim 10^{-15} \div 10^{-16}$ с. Однако однозначного ответа экспериментальные исследования ²⁻⁵ не дали. Основной причиной является наличие в исследованных квазимолекулах большого числа электронов и сложной структуры квазимолекулярных уровней, что приводит к заселению различных начальных состояний, распадающихся путем оже-переходов.

В настоящей работе оже-ионизация исследована в квазимолекуле $\text{He}^+ - \text{He}$, в которой число электронов невелико, но достаточно для оже-перехода. Простые квазимолекулы представляют наибольший интерес для изучения свойств оже-ионизации, однако измерение квазимолекулярных спектров в этом случае сильно затруднено тем, что ожидаемые сечения оже-переходов гораздо меньше, чем в случае многоэлектронных систем, таких как $\text{Kr}^+ - \text{Kr}^4$. Тем не менее, как показали оценки, эксперимент при определенных условиях осуществим, а целесообразность его проведения обуславливается возможностью получения однозначного ответа на вопрос о применимости модели. В квазимолекуле $\text{He}^+ - \text{He}$, выбранной для экспериментального изучения, внутренняя $1s\sigma$ -вакансия образуется с высокой вероятностью: для этого случая также выполнены расчеты энергий $E(R)$ и оже-ширин $\Gamma_A(R)$ уровня с $1s\sigma$ -вакансией при различных межъядерных расстояниях ^{6,7}.

Измерены квазимолекулярные оже-спектры $d^3\sigma(E_e)/dE_e d\Omega_e db$ при фиксированных параметрах удара b (и, соответственно, расстояниях наибольшего сближения R_0), которые гораздо чувствительнее к выводам модели, чем спектры, проинтегрированные по всем возможным b . Измерение таких спектров требует применения метода регистрации совпадений между оже-электроном и ионом, рассеянным на фиксированный угол и, как следствие, больших затрат времени. Это обуславливает необходимость выбора оптимальных условий эксперимента. Выделение оже-переходов осложняют прямые переходы электронов в континуум ⁸, которые также приводят к непрерывному распределению эмиттируемых электронов по энергиям. Энергии соударения E_0 и расстояния сближения R_0 в эксперименте по измерению спектров $d^3\sigma/dE_e d\Omega_e db$ выбраны с использованием результатов ⁹. Разделение оже-ионизации и прямой ионизации в ⁹ было основано на различном поведении сечений процессов в зависимости от скорости столкновения.

Измерения проводились с использованием метода совпадений "электрон-рассеянный ион" ⁴ при энергиях $E_0 = 1,25$ и $2,5$ кэВ и углах рассеяния ионов $\theta_i = 4^\circ 20'$; 5° и 9° , что соответствует расстояниям наибольшего сближения $R_0 = 0,23$; $0,38$ и $0,55$ ат. ед., и для энергий эмиттированных электронов $E_e = 20 \div 100$ эВ. При измерении спектров $d^2\sigma(E_e)/dE_e d\Omega_e$ регистрировались электроны, вылетающие под углом $\theta_e = 125^\circ$ к направлению первичного пучка ионов He^+ . При исследовании спектров методом совпадений, в целях увеличения светосилы, кольцевая щель цилиндрического анализатора электронов была полностью открыта и регистрировались электроны с $\theta_e = 55 \div 125^\circ$.

Согласно ¹ квазимолекулярный оже-спектр описывается выражением, содержащим функцию Эйри $Ai(x)$:

$$\frac{d^3\sigma}{dE_e d\Omega_e db} = \pi \Gamma_A n b \alpha^{-2/3} Ai^2 \{ \alpha^{-1/3} [E_e - E_e(R_0)] \}, \quad (1)$$

где n — вероятность образования $1s\sigma$ -вакансии, $\alpha = \frac{1}{2} \frac{dE_e}{dR} \frac{d^2R}{dt^2} \Big|_{R=R_0}$. В окрестности

$E_e(R_0)$ расположен главный максимум, распространяющийся в область $E_e \geq E_e(R_0)$. Появление электронов в этой области связано с принципом неопределенности и называется столкновительным уширением. Левее главного максимума возникают осцилляции, связанные с интерференцией волн, соответствующих электронам с одинаковой энергией, вылетевшим при сближении и разлете частиц. Приближение (1) получило название простого приближения Эйри, так как при его выводе предполагалось, что $\Gamma_A n$ не зависит от R .

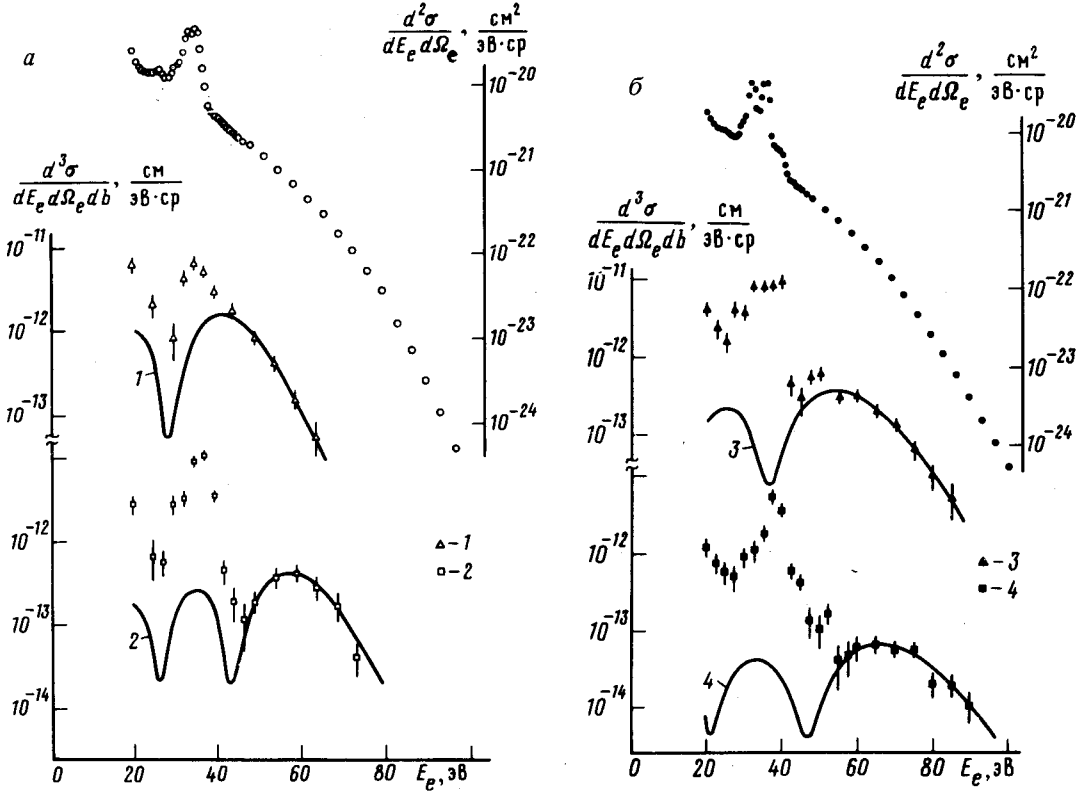


Рис. 1. Энергетические спектры электронов, образующихся в столкновениях $\text{He}^+ - \text{He}$ при энергиях соударения: а — $E_0 = 1,25$ кэВ и б — $E_0 = 2,5$ кэВ: 1 — $\theta_i = 5^\circ$, $R_0 = 0,55$ ат.ед.; 2 — $\theta_i = 9^\circ$, $R_0 = 0,38$ ат.ед.; 3 — $\theta_i = 4^\circ 20'$, $R_0 = 0,38$ ат.ед.; 4 — $\theta_i = 9^\circ$, $R_0 = 0,23$ ат.ед. Расстояния R_0 рассчитаны для межатомного потенциала 1^0 . Сплошные кривые — расчет по формуле (1)

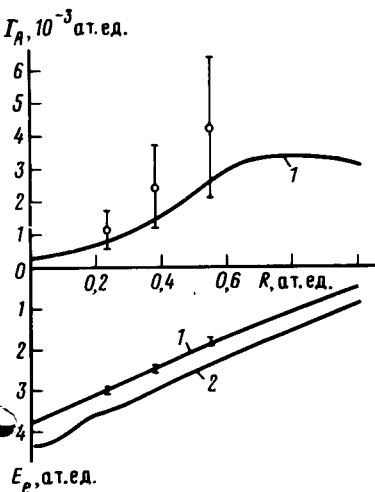


Рис. 2. Уровень энергии $E_e(R)$ и ширина уровня $\Gamma_A(R)$ для квазимолекулы $\text{He}^+ - \text{He}$: 1 — расчет 6^0 ; 2 — расчет 7^0

Экспериментальные спектры приведены на рис. 1. Оже-переходы в квазимолекуле определяют спектры электронов при $E_e \gtrsim 50$ эВ. При меньших энергиях E_e доминируют прямые переходы в континуум и автоионизационные переходы в изолированных атомах He после столкновения (структура в окрестности $E_e \approx 35$ эВ). В спектрах $d^2\sigma/dE_e d\Omega_e$ квазимолекулярные оже-переходы проявляются в виде широкой полосы. В спектрах $d^3\sigma/dE_e d\Omega_e db$ выделяется главный квазимолекулярный максимум, предсказываемый моделью эмиссии, который смещается с изменением межъядерного расстояния.

При расчете спектров по соотношению (1) вероятность перехода $1s$ -вакансии в ионе He^+ в квазимолекулярную $1s\sigma$ -вакансию принималась равной 0,5 из статистических соображений. Энергии $E_e(R)$, рассчитанные в ^{6, 7}, показаны на рис. 2. Энергии E_e при трех значениях межъядерного расстояния были определены также из эксперимента. Процедура определения $E_e R$ из спектров основана на том, что функция $Ai^2(x)$ при обращении аргумента в ноль, т. е. при $E_e = E_e(R_0)$, принимает значение, равное 0,44 от своей максимальной величины. Из рис. 2 видно хорошее согласие полученных из эксперимента значений E_e с расчетным уровнем $E_e(R)$ ⁶, который и был использован для описания экспериментальных спектров. В модели ¹ $\Gamma_A \approx \text{const}$. Для спектров, измеренных при фиксированных параметрах удара, это условие выполняется, так как оже-переходы сконцентрированы в узкой области в окрестности точки поворота R_0 . Ширины $\Gamma_A(R)$ определялись из абсолютных величин экспериментальных сечений по соотношению (1). Во всех приведенных случаях полученные $\Gamma_A(R)$ в пределах погрешности абсолютной калибровки спектров согласуются с $\Gamma_A(R)$, рассчитанными в ⁶ (рис. 2).

Расчетные спектры с учетом поправки на эффект Доплера приведены на рис. 1. Вывод о соответствии расчетного и экспериментального спектров основан на анализе формы главного максимума. Первый осцилляционный максимум, расположенный при меньших энергиях электронов, не мог быть выделен на фоне прямых переходов и автоионизационных переходов в изолированных атомах. Из рисунка видно, что главный квазимолекулярный максимум с хорошей точностью описывается выражением (1). Ширина главного максимума и экспоненциально спадающий высокоэнергетический участок спектра, вызванный столкновительным уширением, изменяются с увеличением скорости столкновения в полном согласии с моделью.

Хорошее согласие экспериментальных и расчетных спектров по форме и поведению главного максимума говорит о том, что простое приближение Эйри достаточно точно описывает оже-переходы в квазимолекуле.

Авторы признательны В.В.Афросимову и Ю.С.Гордееву за ценные обсуждения.

Литература

1. Девдариани А.З., Островский В.Н., Себякин Ю.Н. ЖЭТФ, 1977, 73, 412.
2. Shergin A.P., Mann R., Beyer H.F. Z. Phys. A, 1981, 302, 191.
3. Liesen D., Zinoviev A.N., Saris F.W. Phys. Rev. Lett., 1981, 47, 1392.
4. Афросимов В.В., Месхи Г.Г., Царев Н.Н., Шергин А.П. ЖЭТФ, 1983, 84, 454.
5. Shergin A.P., Bilau R., Stötzel R., Lutz H.O. Abstr. XIV Int. Conf. on Phys. of Electronic and Atomic Collisions, Palo Alto, 1985, 427.
6. Sidis V. J. Phys. B, 1973, 6, 1188.
7. Ermler W.C., Mulliken R.C., Wahl A.C. J. Chem. Phys., 1977, 66, 3031.
8. Zinoviev A.N., Ovchinnikov S. Yu., Gordeev Yu.S. Abstr. XII Int. Conf. on Phys. of Electronic and Atomic Collisions, Gatlinburg, 1981, 900.
9. Asatrian V.R., Afrosimov V.V., Gordeev Yu. S., Shergin A.P. Abstr. X. Int. Conf. on Atomic Physics, Tokyo, 1986, 481.
10. Никулин В.К. ЖТФ, 1971, 41, 41.