

02.2

## Процессы захвата электронов и захвата электронов с ионизацией у атомов аргона ионами ${}^3\text{He}^{2+}$ при различных параметрах удара

© В.В. Афросимов, А.А. Басалаев, М.Н. Панов<sup>¶</sup>

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург

<sup>¶</sup> E-mail: m.panov@mail.ioffe.ru

Поступило в Редакцию 15 июля 2016 г.

Измерены абсолютные величины дифференциальных сечений рассеяния быстрых частиц, образовавшихся в процессах захвата одного или двух электронов у атомов Ar ионами  $\text{He}^{2+}$  с кинетической энергией 6 keV в диапазоне углов рассеяния  $0-2.5^\circ$ . Определены сечения процессов захвата и захвата с ионизацией как функции параметра удара. Проведено сопоставление вероятностей осуществления исследуемых процессов с распределением электронной плотности различных оболочек в атоме-мишени. Сделана оценка применимости моделей экранированных кулоновских потенциалов взаимодействия для описания рассеяния перезарядившихся частиц.

DOI: 10.21883/PJTF.2017.02.44190.16419

Измерения абсолютных дифференциальных сечений рассеяния медленных альфа-частиц ( $V_\alpha < 1$  a.u.) на многоэлектронном атоме при осуществлении различных элементарных процессов изменения зарядовых состояний позволяют проверить правильность используемых при расчетах потенциалов взаимодействия ионов водорода и гелия с атомами многоэлектронных примесей в плазме установок управляемого термоядерного синтеза, а также вычислить функцию отклонения и соотнести угол рассеяния частицы с параметром удара или расстоянием наибольшего сближения.

При взаимодействии альфа-частицы с атомами аргона возможно осуществление целого ряда процессов изменения зарядовых состояний. Наибольшими по величине сечения являются процессы захвата одного или двух электронов налетающим ионом и возможным удалением элект-

№	Обозначение и название процесса изменения зарядов частиц
1	$\text{He}^2 + \text{Ar} \rightarrow \text{He}^+ + \text{Ar}^+$ одноэлектронный захват
2	$\text{He}^{2+} + \text{Ar} \rightarrow \text{He}^+ + \text{Ar}^{2+} + e^-$ одноэлектронный захват с ионизацией
3	$\text{He}^{2+} + \text{Ar} \rightarrow \text{He}^0 + \text{Ar}^{2+}$ двухэлектронный захват
4	$\text{He}^{2+} + \text{Ar} \rightarrow \text{He}^0 + \text{Ar}^{3+} + e^-$ двухэлектронный захват с ионизацией
5	$\text{He}^{2+} + \text{Ar} \rightarrow \text{He}^+ + \text{Ar}^{n+} + (n-1)e^- \quad n \geq 3$
	$\text{He}^{2+} + \text{Ar} \rightarrow \text{He}^0 + \text{Ar}^{n+} + (n-2)e^- \quad n \geq 4$

трона из образовавшегося иона. Процессы 1–3 (см. таблицу) являются экзотермическими, имеют большие сечения и идут с преобразованием потенциальной энергии связанных электронов в кинетическую энергию тяжелых частиц или удаляемых электронов. Осуществление процесса 4 требует затрат кинетической энергии порядка 4 eV.

Процессы 5 являются сильно эндотермическими и имеют малые сечения и практически не дают вклада в полные сечения захвата.

Целью настоящей работы является измерение абсолютных величин дифференциальных сечений рассеяния частиц  $\text{He}^+$  и  $\text{He}^0$ , образующихся в процессах захвата и захвата с ионизацией (процессы 1–4), оценка применимости различных потенциалов взаимодействия частиц, используемых для вычислений функций отклонения, сопоставление вероятности осуществления процессов с распределением электронов в атоме мишени.

Измерения сечений рассеяния при столкновении  ${}^3\text{He}^{2+}$  проводились на установке, подробно описанной в предыдущей работе [1]. В качестве мишени использовалась эффузионная струя газа-мишени из капилляра диаметром  $d = 1 \text{ mm}$ . Угловая расходимость пучка  ${}^3\text{He}^{2+}$  составляла  $\Delta\theta \approx 4'$ , а полное угловое разрешение при измерениях дифференциальных сечений рассеяния составляло  $8'$ . Диапазон исследуемых углов рассеяния налетающих ионов составлял  $-1^\circ \leq \theta \leq +2.5^\circ$ . Для регистрации элементарного процесса использовался электростатический анализатор зарядового состояния налетающих ионов и времяпролетный анализатор для анализа зарядового состояния ионов отдачи  $\text{Ar}^{n+}$ . В эксперименте измерялись относительные величины дифференциальных сечений рассеяния  $\frac{d\sigma}{d\Omega}(\theta)$  ионов  $\text{He}^+$  или атомов  $\text{He}^0$ , образующихся в процессах 1–4. Соотношение между абсолютной величиной полного

сечения и соответствующим дифференциальным сечением определяется выражением

$$\sigma = 2\pi \int_0^{\pi} \frac{d\sigma}{d\Omega}(\theta) \sin(\theta) d\theta,$$

где  $\sigma$  — полное сечение процесса,  $\theta$  — угол рассеяния,  $\Omega$  — телесный угол.

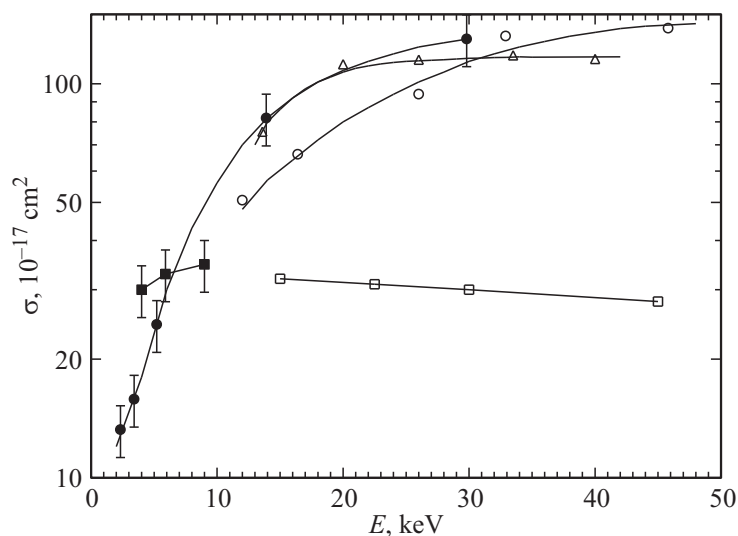
В эксперименте исследуемый диапазон углов отклонения  $0-2.5^\circ$  включает большую, но не всю величину полного сечения. В результате при нормировке относительных дифференциальных сечений необходимо внести поправку в величину полного сечения, соответствующую нерегистрируемой области углов отклонения при малых параметрах удара.

Экспериментальные ошибки определялись статистической погрешностью измерений времяпролетных спектров ионов отдачи, которая варьировалась в зависимости от угла рассеяния ( $0-150'$ ) от  $\pm 0.1$  до  $\pm 5\%$ , и точностью измерений абсолютных величин полных сечений процессов захвата одного или двух электронов ионов, которая составляла  $15\%$ .

Измеренные нами потенциальным методом абсолютные величины полных сечений захвата одного и двух электронов (рис. 1) удовлетворительно согласуются с данными, имеющимися в литературе [2-4]. Для энергии налетающих ионов  $\text{He}^{2+}$   $6 \text{ keV}$  величина сечения одноэлектронного захвата была определена как  $2.93 \cdot 10^{-16} \text{ cm}^2$ , а сечения двухэлектронного захвата —  $3.29 \cdot 10^{-16} \text{ cm}^2$ .

Данные об абсолютных величинах дифференциальных сечений рассеяния быстрых частиц, образующихся в процессах 1-4, приведены на рис. 2. При малых углах рассеяния основными по величине являются процессы захвата одного или двух электронов. С увеличением угла рассеяния наблюдается быстрое уменьшение вероятности захвата одного электрона. При угле рассеяния в  $\theta = 20'$  для одноэлектронного захвата и  $\theta = 40'$  для процесса двухэлектронного захвата более вероятными становятся процессы с дополнительной ионизацией мишени.

Для вычисления функции отклонения необходимо знать значения потенциала взаимодействия сталкивающихся частиц. Возможно использование потенциала Томаса-Ферми [5] или результатов работ [6,7], в которых были предложены выражения для универсальных потенциалов

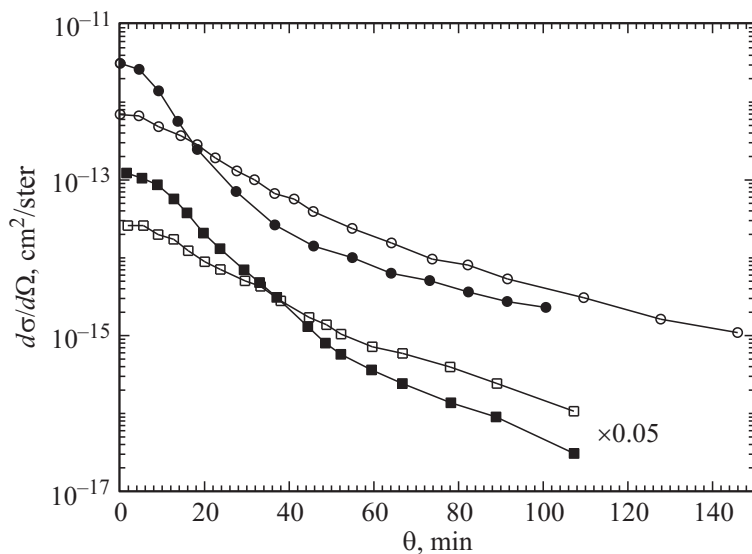


**Рис. 1.** Полные сечения процессов захвата одного и двух электронов при столкновении ионов  $\text{He}^{2+}$  с атомами Ar. Сумма сечений процессов 1 и 2: ● — настоящая работа, Δ — [2], ○ — [3]; сумма сечений процессов 3 и 4: ■ — настоящая работа, □ — [4].

взаимодействия между нейтральными атомными частицами с использованием экранированного кулоновского потенциала

$$U = \sum_n \frac{Z_n}{r} \exp(-A_n r),$$

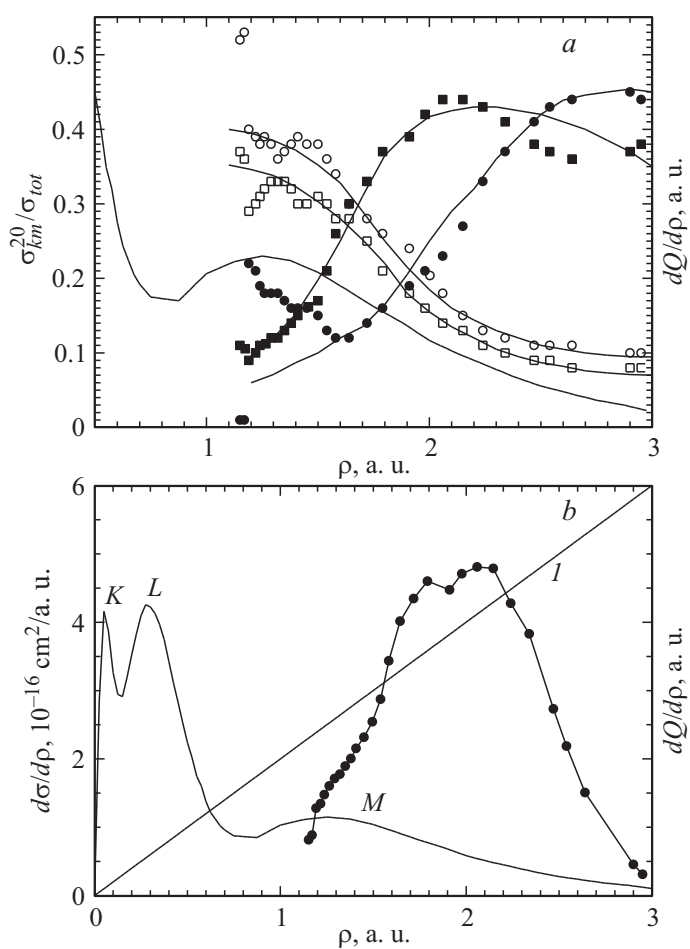
где  $r$  — межъядерное расстояние,  $Z_n$  и  $A_n$  — параметры. В нашей работе для определения функции отклонения был использован кулоновский потенциал взаимодействия иона  $\text{He}^{2+}$  с ядром Ar, экранированного электронами, распределение которых по радиусу от ядра атома аргона определялось результатами вычислений согласно теории Хартри–Фока [8]. Движение иона гелия при этом, как и в случае атом-атомных столкновений [6,7], рассматривалось в рамках классической механики.



**Рис. 2.** Дифференциальные сечения рассеяния ионов  $\text{He}^{2+}$  с кинетической энергией 6 keV, захвативших у атомов аргона один или два электрона: ● — процесс 1, ○ — процесс 2, ■ — процесс 3, □ — процесс 4.

На рис. 3, *a* представлены отношения сечений процессов 1–4 к полному сечению всех исследованных процессов. Кривая *LM* представляет распределение электронов по радиусу в самосогласованном поле [8]. Исследованный диапазон углов рассеяния соответствует сближению частиц на расстояния в пределах внешней *M* оболочки аргона. Процесс одноэлектронного захвата 1 преобладает при  $\rho \geq 2.5$  a.u. Это соответствует областям атома Ag с малой электронной плотностью. В области параметров удара  $\rho \approx 1.7$ – $2.3$  a.u. основным по величине сечения становится процесс двойного захвата 2. Сечения процессов захвата с образованием свободных электронов 2 и 4 имеют сходную зависимость от величины параметра удара. Это может свидетельствовать о сходном механизме осуществления этих двух процессов.

Рассеяние налетающих ионов на углы  $\theta \approx 120'$ – $150'$  соответствуют параметру удара  $\rho \approx 1.15$  a.u. Это означает, что в эксперименте не



**Рис. 3.** *a* — относительные вероятности процессов захвата электрона при различных величинах параметра удара: ● — процесс 1, ○ — процесс 2, ■ — процесс 3, □ — процесс 4. *b* — зависимость суммарного сечения захвата одного и двух электронов (●): кривая *KLM* —  $dQ/d\rho$  — распределение электронов по радиусу от ядра атома аргона в соответствующих оболочках в относительных единицах; прямая *I* —  $dS/d\rho = 1.76\rho$ , где *S* — площадь круга радиусом  $\rho$ .

фиксируются частицы, рассеянные при меньших параметрах удара. Геометрическое сечение этой ненаблюдаемой зоны  $\theta \geq 150'$  составляет примерно  $10^{-16} \text{ см}^2$ .

Для оценки применимости выбранного потенциала взаимодействия для вычисления углов рассеяния сравнили дифференциальные по параметру удара сечения рассеяния с геометрическими размерами атома-мишени. На рис. 3, *b* кривая *I* представляет дифференциальное по параметру удара суммарное сечение всех четырех процессов захвата. Площадь под ней соответствует абсолютной величине сечения процессов захвата  $\sim 5.21 \cdot 10^{-16} \text{ см}^2$ . Подавляющая часть сечений захвата соответствует взаимодействию налетающего иона с электронами внешней оболочки.

Площадь под прямой  $d\sigma/d\Omega = 1.7583\rho$  соответствует геометрической площади мишени радиусом  $\rho$ . Наблюдающееся в области  $\rho \sim 2 \text{ а.у.}$  превышение кривой сечения над прямой  $d\sigma/d\Omega$  может являться следствием погрешности измерений полных сечений захвата и дифференциальных сечений в области малых углов рассеяния, обусловленных конечным угловым разрешением (рис. 1). К такому же эффекту может привести занижение величины угла рассеяния в области параметров удара более 2 а.у. при использовании в расчете выбранного потенциала взаимодействия. Использование для обработки экспериментальных данных универсальных потенциалов [6,7], дающих при заданном параметре удара меньшие величины углов рассеяния по сравнению с потенциалом Хартри–Фока, сдвигает экспериментальную кривую в область малых параметров удара, что приводит к еще большему несовпадению сечения с геометрическими размерами.

В заключение следует сказать, что на основании экспериментальных данных определены сечения процессов 1–4 как функции параметра удара. Показано, что захват одного и двух электронов происходит при сближении частиц на расстояние внешней *M*-оболочки атома аргона. Процессы захвата с ионизацией начинают преобладать при приближении частиц к *L*-оболочке. При нормировке дифференциальных сечений на абсолютную величину полных сечений следует принимать во внимание размер ненаблюдаемой части атома-мишени. Для описания рассеяния кулоновского заряда более адекватным является взаимодействие с кулоновским ядром атома мишени, экранированным электронами, плотность которых определяется физическими расчетами [5,8].

## Список литературы

- [1] Афросимов В.В., Басалаев А.А., Огурицов Г.Н., Панов М.Н. // ЖТФ. 2014. Т. 84. В. 5. С. 14–20.
- [2] Bayfield J.E., Khayrallah G.A. // Phys. Rev. A. 1975. V. 11. P. 920–929.
- [3] Shah M.B., Gilbody H.B. // J. Phys. B: At. Mol. Phys. 1974. V. 7. N 2. P. 256–268.
- [4] Rudd M.E., Goffe T.V., Itoh A. // Phys. Rev. A. 1985. V. 32. P. 2128–2133.
- [5] Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Теоретическая физика. М.: Наука, 1988. Т. 3. 767 с.
- [6] Sidis V. // J. Phys. B: At. Mol. Phys. 1972. V. 5. P. 1517–1528.
- [7] Spranger T., Zapukhlyak M., Kirchner T. // J. Phys. B: At. Mol. Opt. Phys. 2007. V. 40. P. 1081–1088.
- [8] Zahlenwerte und Funktion, Atom- und Molekularphysik / Herausgegeben Arnold Eucken. Berlin–Göttingen–Heidelberg: Springer-Verlag, 1950. Band 1. Teil 1. S. 296.