

УДК 539.186.3

НЕЙТРАЛИЗАЦИЯ ИОНОВ H^- ПРИ МЕДЛЕННЫХ СТОЛКНОВЕНИЯХ С МНОГОЗАРЯДНЫМИ ИОНАМИ

А. Д. Кондорский, Д. Б. Усков

Нестационарная теория атомных столкновений, основанная на обобщенном методе Келдыша, распространена на область малых энергий столкновений (до 1 эВ). Найдено хорошее согласие с имеющимися экспериментальными данными.

Систематические экспериментальные и теоретические исследования нейтрализации H^- при так называемых энергичных столкновениях с многозарядными ионами [1], выполненные при энергиях в системе центра масс от 20 до 200 кэВ (эксперимент) и от 5 до $2 \cdot 10^6$ кэВ (теория), находятся в хорошем согласии друг с другом. Целью настоящей работы является распространение теоретического подхода [1] на область малых энергий (до 1 эВ). Это оказывается возможным, если учесть эффект кулоновского притяжения в начальном канале реакции. Нестационарный подход, развитый в [1-3], допускает такое обобщение.

Запишем вероятность отрыва электрона от отрицательного иона в виде

$$W = 1 - \exp\left\{-\int d\mathbf{p} |h(\mathbf{p})|^2\right\}, \quad (1)$$

где приведенная амплитуда перехода равна

$$h(\mathbf{p}) = \int_{-\infty}^{+\infty} \langle \phi_{\mathbf{p}}(\mathbf{r}, t) | \mathbf{r} \mathbf{F}(t) | \phi_0(\mathbf{r}) e^{-i\epsilon_0 t} \rangle dt. \quad (2)$$

Здесь \mathbf{p} и \mathbf{r} – импульс и радиус-вектор электрона, ϕ_0 – невозмущенная волновая функция отрицательного иона и ϵ_0 – энергия связи. Поле налетающего многозарядного иона представлено в дипольном приближении

$$\mathbf{F}(t) = q \frac{\mathbf{R}(t)}{R^3(t)} \quad (3)$$

и является функцией заряда q и зависящего от времени расстояния $\mathbf{R}(t)$. В этом случае функция конечного канала является точным решением нестационарного уравнения Шредингера в форме, предложенной Келдышем [4], с естественной заменой периодического поля электромагнитной волны на дипольное (3):

$$\phi_0(\mathbf{r}, t) = \exp \left[i\mathbf{k}(t)\mathbf{r} - \frac{i}{2} \int_0^t k^2(\tau) d\tau \right], \quad (4)$$

$$\mathbf{k}(t) = \mathbf{p} - \mathbf{A}(t), \quad \mathbf{A}(t) = - \int_0^t \mathbf{F}(\tau) d\tau. \quad (5)$$

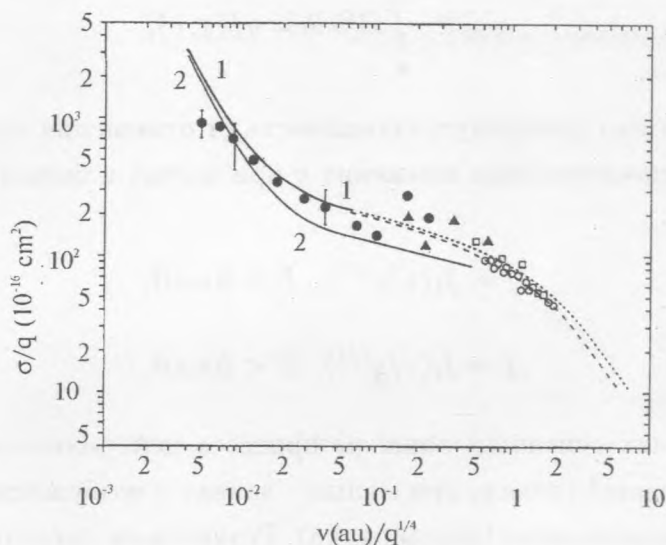


Рис. 1. Сечение нейтрализации отрицательного иона водорода как функция скорости относительного движения (v в атомных единицах). Теория: кривая 1 – результат настоящей работы, кривая 2 – расчет [5]; кривые - - - и — — — расчет [1] для ионов с $q = 4$ и 8 соответственно. Экспериментальные данные: \bullet [6]; Δ [7] для $q = 2$; \circ , \square [1] для ионов с зарядами $q = 4$ и $q = 8$ соответственно.

Ранее [1 – 3] вычисления проводились по прямолинейной траектории $\mathbf{R}(t) = \mathbf{b} + \mathbf{v}t$, где \mathbf{b} – прицельный параметр и \mathbf{v} – скорость относительного движения. С уменьшением энергии необходимо учитывать зависимость скорости относительного движения от междядерного расстояния, т.е. кулоновскую траекторию в поле притяжения:

$$R(\xi) = a(\operatorname{ech}(\xi) - 1), \quad t(\xi) = \sqrt{\frac{ma^3}{q}}(\operatorname{esh}\xi - \xi),$$

$$a = \frac{q}{2E}, \quad e = \sqrt{1 + \frac{2Emv^2b^2}{q^2}}, \quad (6)$$

где E – энергия и v – скорость относительного движения на бесконечности. Отметим, что при этом время численного расчета интегралов в (1), (2) несколько увеличивается. Полное сечение одноэлектронной обдирки отрицательного иона может быть параметризовано в виде

$$\sigma = 2\pi \int_0^{\infty} W b db = qf(q, v), \quad (7)$$

где функция $f(q, v)$ имеет различную зависимость от отношения заряда многозарядного иона q к скорости относительного движения v при малых и больших энергиях:

$$f = f_1(v/q^{1/2}), \quad E > 5 \text{ кэВ},$$

$$f = f_2(v/q^{1/4}), \quad E < 5 \text{ кэВ}. \quad (8)$$

При больших энергиях основным каналом процесса нейтрализации является переход электрона в непрерывный спектр, при малых – захват в возбужденные (ридберговские) состояния многозарядного иона (перезарядка). Результаты расчетов в сопоставлении с экспериментальными данными и другими расчетами [5] приведены на рис. 1. Результаты настоящей работы (кривая 1) являются аналитическим продолжением предыдущих расчетов [1] и несколько превышают результаты работы [5] (кривая 2), поскольку изложенная здесь теория учитывает все каналы отрыва электрона от отрицательного иона, в то время как в работе [5] учитывалась только перезарядка в рамках теории неадиабатических переходов с двухцентровыми базисными волновыми функциями.

Хорошее согласие с экспериментальными данными [1, 6, 7] указывает на перспективность применения обобщенного метода Келдыша в теории атомных столкновений с перераспределением частиц.

Авторы признательны Л. П. Преснякову за обсуждения. Работа поддержана РФФИ (грант 96-02-16090-а), МНТЦ (проект 0-76) и INTAS (грант 94-4698).

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Melchert F., Venner M., Schulze R., et al., Phys. Rev. Lett., **74**, 888 (1995).
- [2] Пресняков Л. П., Усков Д. Б. ЖЭТФ, **89**, 882 (1984).
- [3] Пресняков Л. П., Усков Д. Б. Труды ФИАН, **179**, 103 (1987).
- [4] Келдыш Л. В. ЖЭТФ, **47**, 1945 (1964).
- [5] Пресняков Л. П., Тавага Н. Phys. Scripta (in press).
- [6] Terao M., Szucs S., Cherkani M., et al., Europhys. Lett., **1**, 123 (1986).
Z. Phys., **D 7**, 319 (1988).
- [7] Peart B., Bennet M. A. J. Phys., **B 27**, 2551 (1995).

Поступила в редакцию 27 ноября 1996 г.