

СЕЧЕНИЯ ЗАХВАТА ЭЛЕКТРОНА ЯДРАМИ И МНОГОЗАРЯДНЫМИ ИОНАМИ У АТОМОВ ВОДОРОДА

*В.В.Афросимов, А.А.Басалаев, Е.Д.Донец, А.Н.Зиновьев,
К.О.Ложкин, М.Н.Панов*

Измерены сечения захвата электрона у атомов водорода ядрами, водородоподобными и гелиеподобными ионами углерода, азота, кислорода и неона при скоростях сближения $3 - 10 \cdot 10^7$ см/с, соответствующих скоростям частиц в плазме современных термоядерных установок. Экспериментальные величины сечений сравниваются с результатами теоретических расчетов.

Интерес к изучению взаимодействия многозарядных ионов с атомами водорода вызван, в основном, проблемой примесей многозарядных ионов в высокотемпературной плазме установок управляемого термоядерного синтеза. В области скоростей сталкивающихся частиц $v = 10^7 - 10^8$ см/с соответствующий эксперимент встречает значительные трудности, связанные с проблемами получения пучка ядер или многозарядных ионов при таких скоростях и с созданием мишени из атомарного водорода. До настоящего времени в этой

области скоростей сечения захвата электрона ядрами у атомов водорода были измерены лишь для пары $\text{C}^{+6} - \text{H}$ при двух значениях $v = 1,7$ и $2 \cdot 10^7$ см/с¹. Поэтому при анализе процессов в плазме и оценке концентрации в ней примесей используются теоретические величины сечений захвата электрона ядрами у атомов H, рассчитанные в работах²⁻¹³. Однако результаты теоретических расчетов сечений сильно различаются между собой (рис. 1), и необходимо иметь экспериментально измеренные величины.

В настоящей работе впервые измерены сечения захвата электрона у атомов водорода ядрами и водородоподобными ионами C, N, O, Ne и повторены измерения для гелиеподобных ионов этих элементов.

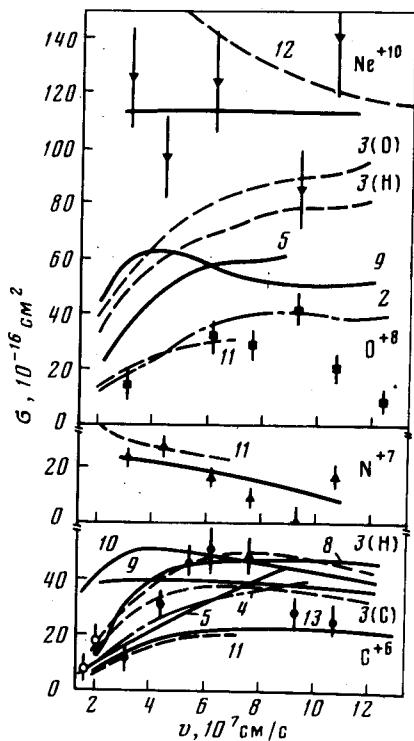


Рис. 1

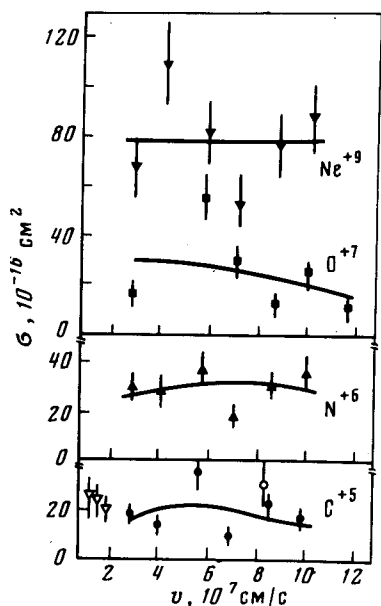


Рис. 2

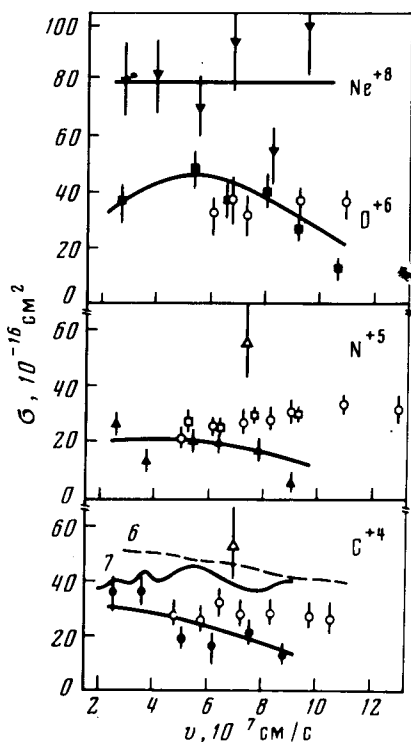


Рис. 3

Рис. 1. Сечения захвата электрона ядрами у атомов водорода. Эксперимент: \bullet — C^{+6} , \blacktriangle — N^{+7} , \blacksquare — O^{+8} , \blacktriangledown — Ne^{+10} — наши данные, \circ — данные из работы¹ для C^{+6} . Теория: цифры у кривых соответствуют номерам ссылок, из которых взяты данные. Индексы (H), (C), (O) у кривых $\bar{\sigma}$ отвечают выбору начала координат соответственно на протоне, ядрах C^{+6} и O^{+8} .

Рис. 2. Сечения захвата электрона водородоподобными ионами у атомов водорода. Эксперимент: \bullet — C^{+5} , \blacktriangle — N^{+6} , \blacksquare — O^{+7} , \blacktriangledown — Ne^{+9} — наши данные, ∇ — из работы¹¹, \circ — ¹⁷.

Рис. 3. Сечения захвата электрона гелиеподобными ионами у атомов водорода. Эксперимент: \bullet — C^{+4} , \blacktriangle — N^{+5} , \blacksquare — O^{+6} , \blacktriangledown — Ne^{+8} — наши данные, \circ — из работы¹⁸, Δ — ¹⁷, \square — ¹⁹. Теория: цифры у кривых соответствуют номерам ссылок.

Полное сечение σ захвата электрона ионом с зарядом z , когда образуется ион с меньшим на единицу зарядом $z - 1$, определялось путем анализа зарядового состава пучка, прошедшего газовую мишень известной плотности. Для получения пучка многозарядных ионов использовался источник КРИОН-2¹⁴. Мишень из атомарного водорода создавалась путем термической диссоциации молекул H_2 в камере столкновений, изготовленной из тантала и нагреваемой электронным пучком до температуры 2500К. Температура контролировалась с помощью пирометра. Плотность мишени определялась методом, аналогичным использованному в работе Бейфилда¹⁵. Зависимость плотности мишени от температуры определялась по изменению количества ионов C^{+5} , образующихся в процессе захвата $C^{+6} + Ag \rightarrow C^{+5} + Ag^+$. Доля недиссоциированных молекул H_2 определялась по количеству ионов C^{+2} , возникающих в процессе двухэлектронного захвата $C^{+4} + H_2 \rightarrow C^{+2} + 2H^+$. Последний процесс выбран потому, что он обладает большим сечением, в то время как маскирующий его процесс образования ионов C^{+2} путем одноэлектронного захвата у атомов H или молекул H_2 в двух последовательных столкновениях $C^{+4} \rightarrow C^{+3}$ и $C^{+3} \rightarrow C^{+2}$ маловероятен ввиду малого сечения одноэлектронного захвата ионом C^{+3} . Степень диссоциации молекул в камере столкновений составляла 85%. Плотность мишени в камере удовлетворяла условию однократности столкновений. В эксперименте путем измерений на холодной (H_2) и горячей (H и H_2) мишени определялось отношение величин сечений захвата электрона в атомарном и молекулярном водороде. Абсолютная калибровка сечений проводилась по измеренным нами ранее сечениям захвата электрона в молекулярном водороде¹⁶. Погрешности измерений составляли $\pm 20\%$.

Результаты измерений приведены на рис. 1 – 3. Наши данные для гелиеподобных ионов C^{+4} , N^{+5} , O^{+6} хорошо согласуются с имеющимися экспериментальными данными других авторов¹⁷⁻¹⁹.

При взаимодействии ядер и многозарядных ионов с атомами водорода наблюдается общая тенденция увеличения сечения захвата с ростом заряда налетающей частицы. Однако имеются и исключения: C^{+6} и N^{+7} на рис. 1, C^{+4} и N^{+5} на рис. 3. На немонотонную зависимость сечения захвата электрона от заряда налетающего иона (при $v = \text{const}$) указывалось в теоретической работе²⁰. Этот эффект связан с малым числом точек псевдопересечений термов начального и конечного состояний квазимолекулы в системах атом водорода – ядро при зарядах ядер $z \lesssim 10$. Поэтому рост сечения захвата с увеличением заряда ядра нарушается в тех случаях, когда точки пересечений попадают в область межядерных расстояний, где вероятности перехода становятся малыми (например $N^{+7} + H$). Что касается формы кривых $\sigma(v)$, то для пар $C^{+6} + H$, $O^{+8} + H$ захват происходит практически в одно состояние⁵, и кривая имеет максимум. Для $Ne^{+10} + H$, где захват происходит на несколько уровней, зависимость от скорости сближения слабее, поскольку $\sigma(v)$ определяется суммой парциальных сечений захвата в отдельные состояния. В эксперименте получено также более резкое уменьшение сечений захвата электрона ядрами с увеличением скорости, чем это следует из теории (рис. 1, пары $C^{+6} + H$, $O^{+8} + H$). Причина может состоять в том, что при скоростях $v > 10^8$ см/с реальная картина взаимодействия уже отличается от квазимолекулярной⁵, используемой в расчетах, так как время столкновения атомных частиц становится сравнимым с временами электронных переходов.

Авторы благодарны В.В.Сальникову и А.В.Голубкову за помощь в проведении эксперимента.

Литература

1. Phaneuf R.A. Phys. Rev., 1981, A24, 1138.
2. Harel C., Salin A. J. Phys., 1977, B10, 3511.
3. Salop A., Olson R.E. Phys. Rev., 1977, A16, 1811; 1979, A19, 1921.
4. Vaaben J., Briggs J.S. J. Phys., 1977, B10, L521.
5. Казанский А.К., Комазов И.В. ЖТФ, 1982, 52, 1734.

6. Думан Е.Л., Смирнов Б.М. Физика плазмы, 1978, 4, 1161.
7. Olson R.E., Shipsey E.J., Browne J.C. J. Phys., 1978, B11, 699.
8. Green T.A., Shipsey E.J., Browne J.C. Phys. Rev., 1982, A25, 1364.
9. Ryufuku H., Watanabe T. Phys. Rev., 1978, A18, 2005; 1979, A19, 1538.
10. Ryufuku H. Phys. Rev., 1982, A25, 720.
11. Salop A., Olson R.E. Phys. Rev., 1976, A13, 1312.
12. Grozdanov T.P., Janev R.K. Phys. Rev., 1978, A17, 880.
13. Greenland P.T. J. Phys., 1978, B11, L 191.
14. Донец Е.Д., Овсянников В.П. Сообщение ОИЯИ, 1977, Дубна, P7-10780.
15. Bayfield J.E. Rev. Sci. Instr., 1969, 40, 869.
16. Афросимов В.В., Басалаев А.А., Донец Е.Д., Ложкин К.О., Панов М.Н. Письма в ЖЭТФ, 1981, 34, 179.
17. Gardner L.D., Bayfield J.E., Koch P.M., Sellin I.A., Pegg D.J., Peterson R.S., Crandall D.H. Phys. Rev., 1980, A21, 1397.
18. Crandall D.H., Phaneuf R.A., Meyer F.W. Phys. Rev., 1979, A19, 504.
19. Seim W., Muller A., Wirkner-Bott I., Salzborn E. J. Phys., 1981, B14, 3475.
20. Janev R.K., Presnyakov L.P. Physics Reports 1981, 70, №1.

Физико-технический институт
им. А.Ф.Иоффе
Академии наук СССР

Поступила в редакцию
10 ноября 1982 г.