

ЗАХВАТ ЭЛЕКТРОНА МНОГОЗАРЯДНЫМИ ИОНАМИ И ЯДРАМИ АТОМОВ ИЗ МОЛЕКУЛ ВОДОРОДА

*В.В.Афросимов, А.А.Басалаев, Е.Д.Донец,
М.Н.Панов*

Измерены сечения захвата электрона ядрами C^{+6} , O^{+8} , N^{+7} , Ne^{+10} , а также ионами этих элементов и ионами A_r^{+z} ($z < 10$) при кинетической энергии $E = 1 z$ КэВ. Обнаружен немонотонный рост величины сечения захвата с увеличением заряда ядер.

Одним из каналов потерь энергии высокотемпературной плазмой, получаемой в установках для управляемого термоядерного синтеза, является излучение возбужденных ионов примесей, образующихся в результате процесса захвата электрона ионами у атомов, имеющих в плазме. Поэтому определение сечений процесса захвата весьма важно.

В плазме современных термоядерных установок легкие примеси существуют преимущественно в виде ядер. Однако из-за экспериментальных трудностей получения пучков ядер элементов достаточной интенсивности с энергией, соответствующей энергиям ионов в плазме ($E = 1 \div 10$ КэВ), в настоящее время нет экспериментальных величин сечений захвата ядрами с $z > 2$. Расчеты сечений, использующие различные модельные представления [1 - 3], дают при фиксированной скорости относительного движения сталкивающихся частиц отличные друг от друга зависимости сечений от заряда налетающего иона z .

В настоящей работе были впервые измерены сечения захвата электрона ядрами и многозарядными ионами углерода, азота, кислорода, неона, а также ионами аргона из молекул H_2 при энергии $1z$ КэВ, которая соответствует скорости ядер $v = 0,31 \cdot 10^8$ см/сек (0,14 ат. ед.). Пучки ионов и ядер были получены из источника "Крион-2", созданном в ЛВЭ ОИЯИ [4]. Для измерения сечений использовался анализ зарядового состава пучка быстрых частиц, прошедших газовую мишень из водорода в условиях однократных столкновений. Полученные данные о величинах сечений захвата одного электрона приведены в таблице в единицах 10^{-16} см². Ошибки при измерении сечений составляли $\pm 20\%$. Там же даны сечения для протонов и ядер гелия при той же скорости столкновения из работ [5, 6].

$z \backslash$	+ 1	+ 2	+ 3	+ 4	+ 6	+ 7	+ 8	+ 9	+ 10
H	3,4 [5]	-	-	-	-	-	-	-	-
He	-	5,6 [6]	-	-	-	-	-	-	-
C	-	-	-	8,8	49,7	-	-	-	-
N	-	2,7	-	-	44,8	19,6	-	-	-
O	-	4,0	18	-	60,6	24,9	57,4	-	-
Ne	-	-	28,2	-	59	-	57,2	50,7	115
Ar	-	-	20,3	-	46,5	59,3	53,6	62,5	43,3

Из таблицы видно, что сечения захвата ионами одной и той же зарядности и обладающими близкими скоростями ($C^{+6} - N^{+6}$, $N^{+7} - O^{+7}$, $O^{+8} - Ne^{+8}$) различаются не сильно. Это отражает тот факт, что захват происходит на больших расстояниях между частицами ($R \sim 10$ ат. ед.), что следует прямо из величин сечений и идет на возбужденные уровни иона. В результате влияние внутренней структуры иона на сечение невелико. В работах [1, 7] было предложено описывать сечение захвата универсальной степенной функцией $\sigma = Az^B$. Данные настоящей работы лучше всего согласуются с такой зависимостью при $A = 3,6$ и $B = 1,4$ (рис. 1, сплошная кривая). Однако такую аппроксимацию зависимости $\sigma = f(z)$ следует рассматривать как чисто феноменологическую, поскольку процессы захвата H^+ и He^{+2} [5, 6] являются эндотермическими, а ионами C^{+6} , N^{+7} , O^{+8} , Ne^{+10} - экзотермическими и имеют различные механизмы электронного перехода. Кроме того, как видно из рис. 1, наб-

людается нарушение монотонного роста сечений с увеличением заряда для пары $N^{+7} - H_2$. По-видимому, это является следствием малого числа квазипересечений кривых потенциальной энергии начального и конечного состояний для пар с $z < 10$.

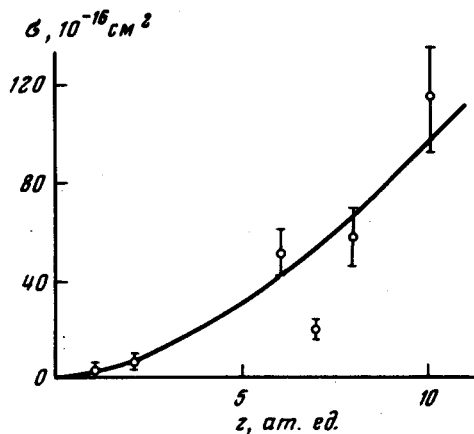


Рис.1. Зависимость сечения одноэлектронного захвата от заряда налетающего ядра при $v = 0,31 \times 10^8 \text{ см/сек}$. Сплошная кривая $\sigma_z = 3,6 z^{1,4} \cdot 10^{-16} \text{ см}^2$.

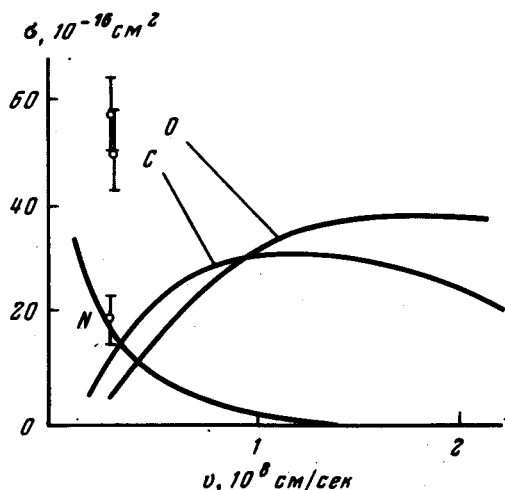


Рис.2. Зависимость сечения одноэлектронного захвата от скорости налетающих ядер C^{+6} , N^{+7} и O^{+8} .

В рамках модели Ландау – Зинера нами сделан расчет величины сечений для ионов C^{+6} , N^{+7} и O^{+8} (кривые на рис. 2). При этом ввиду больших межъядерных расстояний, на которых происходит захват, молекула H_2 рассматривалась как атом с соответствующим потенциалом ионизации ($I_{H_2} = 15,43 \text{ эВ}$). Точки квазипересечений определялись по расстояниям R , отвечающим равенству дефектов энергии для $R = \infty$ процесса захвата в электронное состояние с главным квантовым числом n и энергии кулоновского отталкивания в конечных состояниях, а матричный элемент взаимодействия определялся на основе формул

из работы Селопы и Олсона [8]. В случае $N^{+7} - H_2$ реализуется ситуация, когда захват определяется квазипересечением при $R = 14,65$ ат.ед. ($n=5$) и которое система при исследуемой скорости, проходит почти адиабатически ввиду слабого взаимодействия термов на таком значительном расстоянии R . Это пересечение дает малую величину сечения захвата при $v = 0,14$ ат.ед. Более близкое квазипересечение для $n = 4$ при $R = 6,22$ ат.ед. не дает вклада в сечение из-за сильного расщепления термов. Для ионов C^{+6} и O^{+8} точки квазипересечений лежат при $R = 8,96$ для $n=5$ иона C^{+5} и $R = 9,82$ для $n=6$ иона O^{+7} , где вероятность переходов достаточно велика. Рис. 2 показывает, что имеется область скоростей, где соотношения сечений захвата для N^{+7} , C^{+6} и O^{+8} соответствует экспериментально измеренным ($v \sim 6 \cdot 10^7$ см/сек). Однако экспериментальные величины сечений при $v = 3 \cdot 10^7$ см/сек отличаются от вычисленных — расчетные кривые $\sigma(v)$ сдвинуты в сторону больших скоростей сближения частиц. Это указывает на то, что величины матричных элементов, полученные согласно формулам работы [8], дают в случае взаимодействия многозарядный ион — молекула водорода завышенные значения.

Авторы выражают глубокую благодарность члену-корреспонденту АН СССР А.М.Балдину за содействие в постановке экспериментальной работы.

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

Поступила в редакцию
30 марта 1980 г.

Литература

- [1] R.E.Olson, A.Salop. Phys. Rev., A13, 1312, 1976.
- [2] Л.П.Пресняков, А.Д.Уланцев. Квантовая электроника, 1, 2377, 1974.
- [3] М.И. Чибисов. Письма в ЖЭТФ, 24, 56, 1976.
- [4] Е.Д.Донец, В.П.Овсянников. Препринт ОИЯИ Р-7-10780, Дубна, 1977.
- [5] В.В.Афросимов, Г.А.Лейко, М.Н.Панов, Ю.А.Мамаев. ЖЭТФ, 56, 1204, 1969.
- [6] В.В.Афросимов, Г.А.Лейко, М.Н.Панов. ЖТФ, 50, 519, 1980.
- [7] A.Muller, F.Salzborn. Phys. Lett., 62A, 391, 1977.
- [8] R.E.Olson, A.Salop. Phys. Rev., A14, 579, 1976.