

## ПРОЦЕССЫ ЗАХВАТА ЭЛЕКТРОНА ЯДРАМИ АТОМОВ У АТОМОВ ГЕЛИЯ И МОЛЕКУЛ ВОДОРОДА ПРИ НИЗКИХ ЭНЕРГИЯХ

В.В.Афросимов, А.А.Басалаев, Е.Д.Донец,

К.О.Ложкин, М.Н.Панов

Измерены сечения захвата электрона  $\sigma^{z, z-1}$  ядрами  $C^{+6}$ ,  $N^{+7}$ ,  $O^{+8}$ ,  $Ne^{+10}$ ,  $Ar^{+18}$  при столкновениях с атомами гелия и молекулами водорода при энергиях налетающих частиц  $E = 0,5 - 8$  КэВ/ат. ед. массы.

Одним из процессов, играющих важную роль в энергетическом балансе высокотемпературной плазмы установок управляемого термоядерного синтеза, является захват электрона ядрами примесей тяжелых элементов. Излучение образующихся возбужденных ионов меньшей зарядности может уносить из плазмы значительную долю энергии. Для оценки потока излучения необходимы величины сечений захвата электрона ядрами элементов примесей при энергиях сталкивающихся частиц  $E \cong \cong 0,1 - 10$  КэВ/ат. ед. массы. Однако имеющиеся данные относятся к высокоэнергетической области  $E \sim 100$  КэВ/ат. ед. массы, ввиду трудностей, связанных с получением пучков ядер при низких энергиях. В настоящей работе впервые измерена зависимость сечений захвата электрона ядрами  $C^{+6}$ ,  $N^{+7}$ ,  $O^{+8}$ ,  $Ne^{+10}$ ,  $Ar^{+18}$  у атомов He и молекул  $H_2$  в интересующей физику высокотемпературной плазмы области энергий столкновений  $E = 0,5 - 8$  КэВ/ат. ед. массы.

Сечения захвата определялись путем анализа зарядового состава пучка, прошедшего газовую мишень. Плотность мишени удовлетворяла условию однократности столкновений.

Полное сечение образования иона меньшей зарядности  $\sigma^{z, z-1}$ , измеряемое в эксперименте, представляет собой сумму сечений двух элементарных процессов: а) одноэлектронного захвата (сечение  $\sigma_{0,1}^{z, z-1}$ ) –

$$A^{+z} + B - A^{+(z-1)} + B^+, \quad (1)$$

б) захвата электрона с ионизацией (сечение  $\sigma_{0,2}^{z, z-1}$ )

$$A^{+z} + B - A^{+(z-1)} + B^{+2} + e^-. \quad (2)$$

Результаты измерений представлены на рисунках 1, а и 1, б. Ошибки в определении абсолютных величин сечений составляют  $\sim 20\%$ .

Достаточно низкие скорости столкновений ( $v = 0,14 - 0,6$  ат. ед.) позволяют рассматривать взаимодействие частиц в рамках квазимолекулярных представлений и применить для оценки вероятности электронных переходов модель Ландау – Зинера. (Ввиду больших величин сечений захвата и, следовательно, расстояний сближения  $R$ , при которых происходят электронные переходы, молекулу  $H_2$  можно рассматривать как атом с соответствующим потенциалом ионизации  $I(H_2)$ ). При сближении ядра с зарядом  $z - A^{+z}$  с мишенью  $B$  терм начального состояния

системы проходит ряд точек квазипересечений с термами конечных состояний, отвечающих различному возбуждению иона  $A^{+(z-1)*}$  (рис.2).

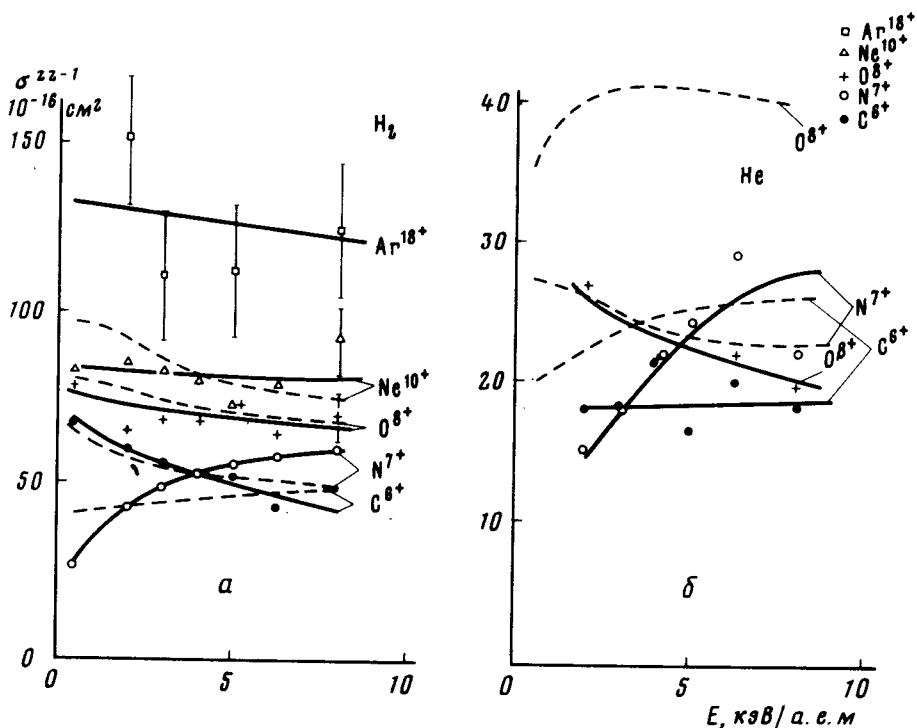


Рис.1. Полные сечения захвата электрона ядрами  $C^{+6}$ ,  $N^{+7}$ ,  $O^{+8}$ ,  $Ne^{+10}$ ,  $Ar^{+18}$ . Пунктирные линии – результат оценок сечений по формуле (4). Заряды ядер указаны у соответствующих кривых: а – в молекулярном водороде; б – в гелии

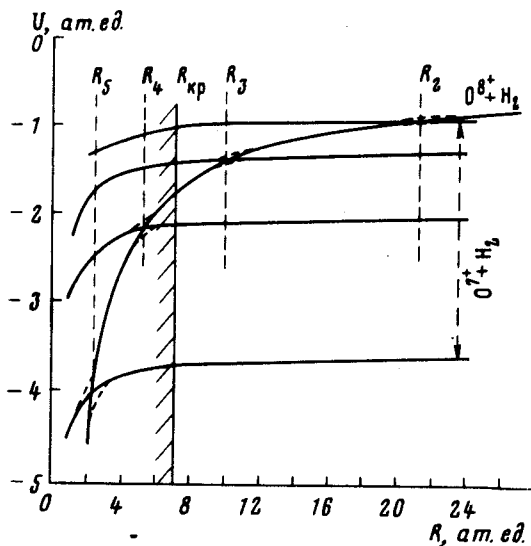


Рис.2. Схема термов для системы  $O^{+8} + H_2 \rightarrow O^{+7}(n) + H_2^+$ ,

$$U(O^{+8} + H_2) = -\frac{8\alpha(H_2)}{2R^4} - \frac{8}{R} - I(H_2); U(O^{+7} + H_2^+) = -\frac{1}{R} - I(O^{+7*}(n)).$$

$I_{H_2}$  – потенциал ионизации,  $\alpha$  – поляризуемость молекулы  $H_2$ .  $n$  – главное квантовое число состояния иона  $O^{+7}$ . Значения  $n$  указаны у соответствующих кривых: I – область Ландау – Зинеровских переходов, II – область надбарьерных переходов (модель поглощающей сферы)

При исследуемых скоростях сближения область далеких квазипересечений (для пары  $O^{+8} - H_2$  это  $R_1 \cong 300$  и  $R_2 \cong 20$  ат. ед.) система проходит адиабатически, и вклад этих квазипересечений в сечение одноэлектронного захвата пренебрежимо мал. (Величины расщепления термов, определяющие вероятность переходов при исследуемых скоростях сближения частиц, как функции межъядерного расстояния оценивались по формуле Салопа и Олсона [1]). Вклад следующего квазипересечения в сечение при  $R_3 \sim 10$  ат. ед. оценивался по формуле Ландау - Зинера на основании величин расщепления термов [1], расстояния квазипересечения  $R_3$  и универсальной кривой для величин сечений, полученной в работе Моисеевича [2]. Квазипересечение  $R_3$  хорошо отделено по расстоянию сближения от других квазипересечений, и задача может рассматриваться как двухуровневая. Величина сечения  $\sigma_{L-3}^{z, z-1}$  исправлялась на коэффициент  $K$ , учитывающий влияние на вероятность электронного перехода конечной ширины области квазипересечения согласно работе Овчинниковой [3]. Величина  $K$  зависит от расстояния сближения частиц, при котором достигается квазипересечение, а также от наклона и расщепления термов в этой области. Учет конечной ширины области квазипересечения может в некоторых случаях в два раза увеличить сечение по сравнению с сечением  $\sigma_{L-3}$ . Переходы в области  $R \sim 10$  ат. ед. определяют заселенность уровней иона  $O^{+7}$  с главным квантовым числом  $n = 5$ . В области еще меньших  $R < 5$  ат. ед. взаимодействуют сразу несколько термов, и сечение в этой области не может быть оценено на основании численного решения двухуровневой задачи Ландау - Зинера, выполненного в работе [2]. Однако уже при расстоянии  $R_{кр}$  ( $R_{кр} > R_4$ ), определяемого на основании работы Комарова и др. [4]

$$R_{кр} = \frac{1}{I_{H_2}} \left[ \sqrt{2I_{H_2}} - 1 + \sqrt{2(z-1) + I_{H_2}} \right], \quad (3)$$

для электрона мишени пропадает потенциальный барьер между потенциальными ямами атома мишени и многозарядного иона, и переходы электрона из одной ямы в другую становятся классически разрешенными. Мы полагали, что в области  $R < R_{кр}$  вероятность захвата электрона многозарядным ионом равна единице (модель "поглощающей сферы"), и полное сечение захвата электрона определяется выражением:

$$\sigma^{z, z-1} = K\sigma_{L-3}^{z, z-1} + \pi R_{кр}^2. \quad (4)$$

При этом оказалось, что вклад первого и второго слагаемых примерно одинаков (для пары  $Ar^{+18} - H_2$  оценка сечения не проводилась ввиду наличия двух квазипересечений, дающих вклад в сечение одноэлектронного захвата). На рис. 1, а и 1, б пунктирными линиями показаны результаты оценок сечений  $\sigma^{z, z-1}$  согласно выражению (4). Следует отметить хорошее соответствие оценок и экспериментальных величин сечений для  $C^{+6}$ ,  $N^{+7}$ ,  $O^{+8}$ ,  $Ne^{+10} - H_2$  и  $O^{+6}$ ,  $N^{+7} - He$ . Наблюдаемое

некоторое расхождение хода кривых для пар  $N^{+7} - H_2$ , He и различие в два раза величин сечений для пары  $O^{+8} - He$  не является неожиданным для такой методики оценок сечений, которая в целом дает удовлетворительное согласие с экспериментом.

Полученные данные о сечениях  $\sigma^{z, z-1}$  указывают, что процесс захвата электрона многозарядными ионами происходит на значительных межъядерных расстояниях  $R \sim 10$  ат. ед. и величины сечений могут превышать  $10^{-14}$  см<sup>2</sup> (пара  $Ar^{+18} - H_2$ ). Немонотонная зависимость сечения захвата от заряда налетающего иона, наблюдаемая при низких энергиях, становится регулярной с увеличением кинетической энергии  $E$ . В исследованной области энергий  $E$  зависимость величин сечений от заряда налетающего иона  $z$  близка к линейной, как указывалось ранее в работе Чибисова [5] и нашей работе [6]. Удовлетворительное согласие оценок сечений с экспериментальными данными позволяет сделать вывод, что при скоростях сближения частиц 0,14 – 0,6 ат. ед. процесс одноэлектронного захвата достаточно хорошо описывается переходами между термами квазимолекулярной системы, а для оценок может быть использована модель Ландау – Зинера для параметров удара  $R > R_{кр}$  и модель поглощающей сферы при  $R < R_{кр}$ .

Авторы выражают благодарность А.М.Балдину за создание благоприятных условий для постановки работы и А.И.Пикину и В.В.Сальникову за непосредственную помощь при проведении эксперимента.

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

Поступила в редакцию  
19 июня 1981 г.

## Литература

- [1] Olson R.E., Salop A. Phys. Rev., 1976, A14, 579.
- [2] Moiseiwitsch B.L. "Meteors". Spec. Supl. to J. Atm. Terr. Phys., 1955, 2, 23.
- [3] Овчинникова М.Я. ЖЭТФ, 1973, 64, 125.
- [4] Комаров И.В., Пономарев Л.И., Славянов С.Ю. Сфероидальные и кулоновские функции. М., изд. Наука, 1976.
- [5] Чибисов М.И. Письма в ЖЭТФ, 1976, 24, 56.
- [6] Афросимов В.В., Басалаев А.А., Донец Е.Д., Панов М.Н. Письма в ЖЭТФ, 1980, 31, 635.