

О ПЕРЕЗАРЯДКЕ ПРОТОНОВ НА АТОМАХ ЩЕЛОЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

А.В.Виноградов, Л.П.Пресняков, В.П.Шевелько

В последние годы были измерены эффективные сечения перезарядки протонов на атомах (реакция $H^+ + A \rightarrow H(n, \ell) + A^+$, где n, ℓ – главное и орбитальное квантовые числа) в состояниях с различными значениями n и ℓ . Характерной особенностью перезарядки в возбужденное состояние при малых энергиях (1 – 10 кэВ) является наличие нескольких максимумов на кривой зависимости сечения от энергии [1]. Возникновение дополнительных максимумов может быть качественно объяснено переходом через промежуточный уровень [2]. С увеличением энергии столкновения названный эффект перестает играть роль, и как правило, сечение удовлетворительно описывается первым приближением теории возмущений, которое дает закон убывания $\sigma \sim E^{-6} + E^{-7}$ (E – энергия протона). Однако измеренные недавно сечения [3] перезарядки протонов на атомах щелочных элементов с образованием возбужденных атомов водорода обнаружили чрезвычайно слабую зависимость от энергии в области 20 + 40 кэВ. В настоящей работе показано, что такая зависимость связана с возможностью захвата электронов из внутренних оболочек.

Для анализа имеющегося экспериментального материала, необходимо учитывать зависимость сечения от орбитального квантового числа ℓ образующегося атома. Однако даже в простейшей модификации первого порядка теории возмущений – приближении Бринкмана–Крамерса (БК) – обозримые аналитические результаты могут быть получены только для сечений, просуммированных по всем значениям орбитального момента ℓ (при данном n) [4]. Поэтому решение поставленной задачи требует численного расчета.

Эффективное сечение перезарядки протона на атоме с образованием атома водорода в состоянии $n\ell$ в приближении БК имеет вид (используется атомная система единиц):

$$\sigma = \pi a_0^2 \frac{8N}{v^2} (2\ell + 1) \int_{\frac{\omega}{v} + \frac{v}{2}}^{\infty} y dy \left[\int_0^{\infty} R_{n\ell}(r) i_{\ell}(yr) r^2 dr \int_0^{\infty} R_{n_0\ell_0}(r) i_{\ell_0}(\sqrt{y^2 - 2\omega} r) \times \right. \\ \left. \times \zeta(r) r^2 dr \right]^2.$$

Здесь N – число эквивалентных электронов оболочки атома, с которой происходит захват, ω – дефект резонанса, v – относительная ско-

рость, n_{0l_0} – квантовые числа электрона атома-мишени, R_{nl} – радиальная волновая функция [5], $i_l(r)$ – сферическая функция Бесселя, $\zeta(r)$ – эффективное поле атомного остатка [5].

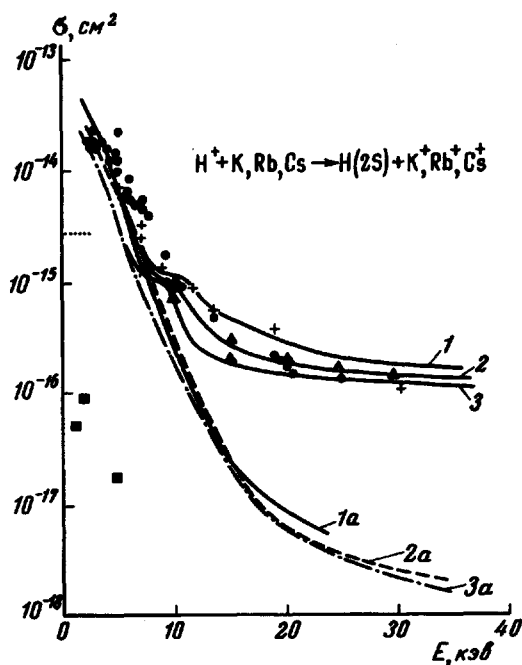


Рис. 1. Кривые 1, 2, 3 – сечения захвата электрона в состоянии 2s при перезарядке протонов на атомах Cs, Rb, K соответственно; 1a, 2a, 3a – те же величины, вычисленные лишь при учете внешней оболочки: экспериментальные данные: ● Cs, + Rb, ▲ K [3] ■ Cs [6], ●●● Cs [7]

Расчет производился на ЭВМ М-20 по универсальной программе, позволяющей вычислить сечения перезарядки протонов на любом атоме с учетом вклада всех электронных оболочек атома-мишени. Последнее существенно, поскольку в настоящее время основные закономерности перезарядки при больших энергиях исследованы на примере захвата оптического электрона. Однако захват электрона из внутренней оболочки является также процессом первого порядка, и его вообще говоря, следует учитывать одновременно с захватом оптического электрона.

Сказанное иллюстрируется на рис.1, где результаты расчета сопоставляются с экспериментальными данными [3,6,7]. При перезарядке

протонов на атомах щелочных элементов сечение захвата оптического электрона на два порядка меньше экспериментального. Большая величина экспериментальных сечений и их аномально медленное убывание при энергиях больше 20 кэв объясняются тем, что в этой области основную роль играет перезарядка из внутренних оболочек. Так, в случае атома Cs вклад оболочки $5p^6$ составляет 70%, и оболочки $5s^2$ – 30% при энергиях 20–40 кэв. Аналогично для атома Rb необходимо учитывать оболочки $4p^6$ (90%) и $4s^2$ (10%); для атома K – оболочки $3p^6$ (90%) и $3s^2$ (10%).

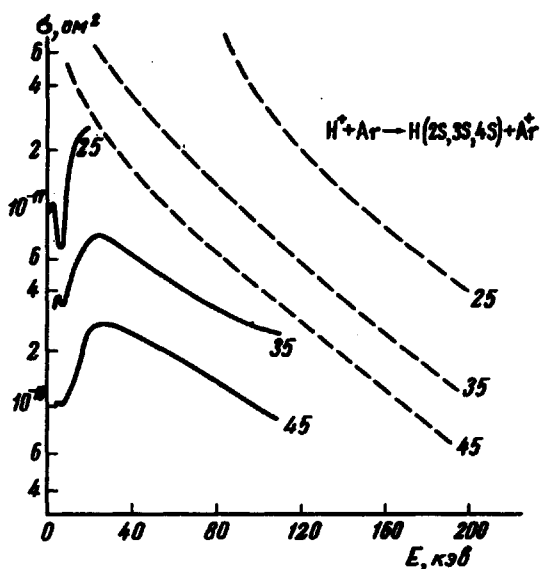


Рис. 2. Сечения реакций $H^+ + Ar \rightarrow H(2s, 3s, 4s) + Ar^+$. Сплошные кривые – эксперимент [8], пунктирные кривые – расчет по формуле (1)

Полученные результаты можно объяснить спецификой строения электронных оболочек атомов щелочных элементов и малым дефектом резонанса реакции. Следует отметить, что существенный вклад внутренних оболочек возможен и в других реакциях, сопровождающихся перераспределением частиц, например, при ионизации атомов щелочных элементов электронами и ионами.

При перезарядке протонов на атомах инертных газов вследствие большого дефекта резонанса электроны внутренних оболочек не играют роли вплоть до энергии столкновения $E \sim 200 + 300$ кэв. На рис.2 в качестве примера приведены сечения перезарядки на атоме Ar. Захват оптического электрона описывает экспериментальные данные

[8] с погрешностью, стандартной для приближения БК.

Авторы признательны Л.А.Вайнштейну за полезные обсуждения.

Физический институт
им. П.Н.Лебедева
Академии наук СССР

Поступило в редакцию
22 июля 1968 г.

Литература

- [1] D.J.Jaecks, B.van. Zyl, R.Geballe. *Phys. Rev.*, 137, A340, 1965.
- [2] И.А.Полуэктов, Л.П.Пресняков. *ЖЭТФ*, 54, 121, 1968.
- [3] I.A.Sellin, L.Granoff. *Phys. Lett.*, 25A, 484, 1967.
- [4] В.С.Николаев. *ЖЭТФ*, 51, 1263, 1966.
- [5] Л.А.Вайнштейн. *Оптика и спектроскопия*, 3, 313, 1957.
- [6] B.Donnally, T.Chapp, W.Sawyer, M.Shultz. *Phys. Rev. Lett.*, 12, 502, 1964.
- [7] A.Cesatty, F.Cristofori, L.Milazzo Colli, P.G.Sona. *Energia Nucleare* 13, 649, 1966.
- [8] R.H.Hughes, H.R.Dawson, B.M.Doughty, D.B.Kay, G.A.Stigers. *Phys. Rev.*, 146, 53, 1966; R.H.Hughes, H.R.Dawson, B.M.Doughty. *Phys. Rev.*, 164, 166, 1967.