

## СКЭЙЛИНГ ДЛЯ ВЕРОЯТНОСТЕЙ ЗАСЕЛЕНИЯ ВЫСОКОВОЗБУЖДЕННЫХ СОСТОЯНИЙ ИОНОВ В РЕАКЦИИ ПЕРЕЗАРЯДКИ С АТОМАМИ ВОДОРОДА И СЕЧЕНИЯ ЭМИССИИ ОПТИЧЕСКИХ ЛИНИЙ ДЛЯ ДИАГНОСТИКИ ПРИМЕСЕЙ В ПЛАЗМЕ

А.Н. Зиновьев, А.А. Коротков

Предложен скэйлинг для вероятностей заселения высоковозбужденных  $nl$ -состояний при захвате электрона многозарядным ионом у атомов водорода в основном и возбужденных состояниях. Рассчитаны сечения эмиссии оптических линий ионов  $\text{He}^+$  и  $\text{C}^{4+}$ , удобных для диагностики примесей в плазме с помощью пучков атомов водорода.

При столкновениях многозарядных ионов с атомами водорода в результате реакции перезарядки происходит заселение высоковозбужденных состояний ионов с последующей эмиссией характеристического излучения. Данный процесс широко используется в корпускулярно-спектроскопической диагностике для определения концентрации примесей, ионной температуры, скорости вращения и других параметров плазмы<sup>1</sup>. Важнейшей характеристикой реакции перезарядки, определяющей интенсивности излучения линий, является схема заселения возбужденных состояний ионов. Надежные численные расчеты сечений заселения  $nl$ -состояний имеются для ограниченного круга ионов (особенно для перезарядки из возбужденных состояний атомов), а данные приводятся для отдельных значений относительной скорости частиц. В настоящей работе предлагается скэйлинг, который позволяет определять схему заселения возбужденных состояний различных ионов в реакции перезарядки в широкой области скоростей соударений.

Как известно, при столкновениях  $A^{z+} - H(n_0)$  с максимальной вероятностью заселяется уровень иона с  $n = n_m = n_0 Z^{0,75}$ . Будем описывать заселение уровней с разными  $n$  с помощью функции  $F(t, s)$ , представляющей собой отношение населенности уровня иона с данным  $n$  к населенности уровня с  $n = n_m$  ( $F(t = 1, s) = 1$ ). Здесь  $t = n/n_m$ ,  $s = Vn_0/Z^{0,25}$  – отношение скорости соударения  $V$  к орбитальной скорости электрона на уровне иона с  $n = n_m$ . При фиксированных значениях функции  $F$  зависимость параметра  $t$  от переменной  $s$  оказывается универсальной. Эти зависимости построены на рис. 1а при использовании известных авторам теоретических расчетов  $n$ -заселения уровней для захвата электрона из основного и возбужденных состояний атомов водорода. Данные рис. 1а относятся к области скоростей вблизи максимума сечения, когда во взаимодействие вовлечено большое число состояний, что, по-видимому, и объясняет наблюдаемую универсальность. При меньших скоростях должны сказываться детали квазимолекулярной картины термов и связи между ними, а при больших  $V$  нужно изменять зависимость параметров функции  $F$  от  $Z$ . В качестве примера использования найденного скэйлинга на рис. 1б приводится функция  $F(t, s = 0,84)$  иона  $\text{He}^+$  для столкновения  $\text{He}^{2+} - H(n_0 = 1)$ ,  $E = 25$  кэВ/нукл., которая хорошо согласуется с результатами расчетов по методу сильной связи<sup>8</sup>. Чтобы определить сечения заселения  $n$ -состояний нужно умножить функцию  $F$  на полное сечение перезарядки  $\sigma_{cx}$ . Значение  $\sigma_{cx}$  можно получить из универсальной зависимости приведенного сечения  $\tilde{\sigma}$  от приведенной скорости соударения  $\tilde{V}$  из работы<sup>9</sup>, если положить  $\tilde{\sigma} = \sigma_{cx} / (Z^{1,07} n_0^4)$ ,  $\tilde{V} = s$ .

В области  $V \gtrsim 1$ , обычно представляющей интерес для диагностики плазмы, для заселения  $l$ -состояний можно использовать зависимость, аппроксимирующую результаты классических численных расчетов<sup>10</sup>:  $P(n, l) = \frac{3}{\tilde{n}} \frac{l^2 + 1,7l + 1,1}{\tilde{n}^2 + 1,05\tilde{n} + 1,25}$ , где  $\tilde{n} = n$ , если  $n \leq n_m$ , и  $\tilde{n} = n_m + 1$ , если  $n > n_m$ ,  $l \leq n_m$ ,  $P(n, l) = 0$ , если  $n > n_m$ ,  $l > n_m$ ,  $\sum_l P(n, l) = 1$ . Следует отметить, что столк-

новения возбужденных ионов с дейтронами при достаточной плотности плазмы могут приводить к статистическому заселению  $l$ -состояний внутри уровня с данным  $n$  и вид начального (перезарядочного) заселения  $l$ -состояний оказывается не существенным для интенсивности излучения линий. Оценки показывают, что это происходит при плотности плазмы  $n_D^* = 4 \cdot 10^{14} \frac{Z^6 \sqrt{T}}{n^7 (n^2 - 4)} \ln \left( \frac{n^3 - n}{2} \right)$ , где  $T$  – температура плазмы в эВ. Для оптических линий ионов  $\text{He}^+$  и  $\text{C}^{5+}$  имеем  $n_D^* \approx 10^{13} \text{ см}^{-3}$  и  $\approx 10^{14} \text{ см}^{-3}$  соответственно.

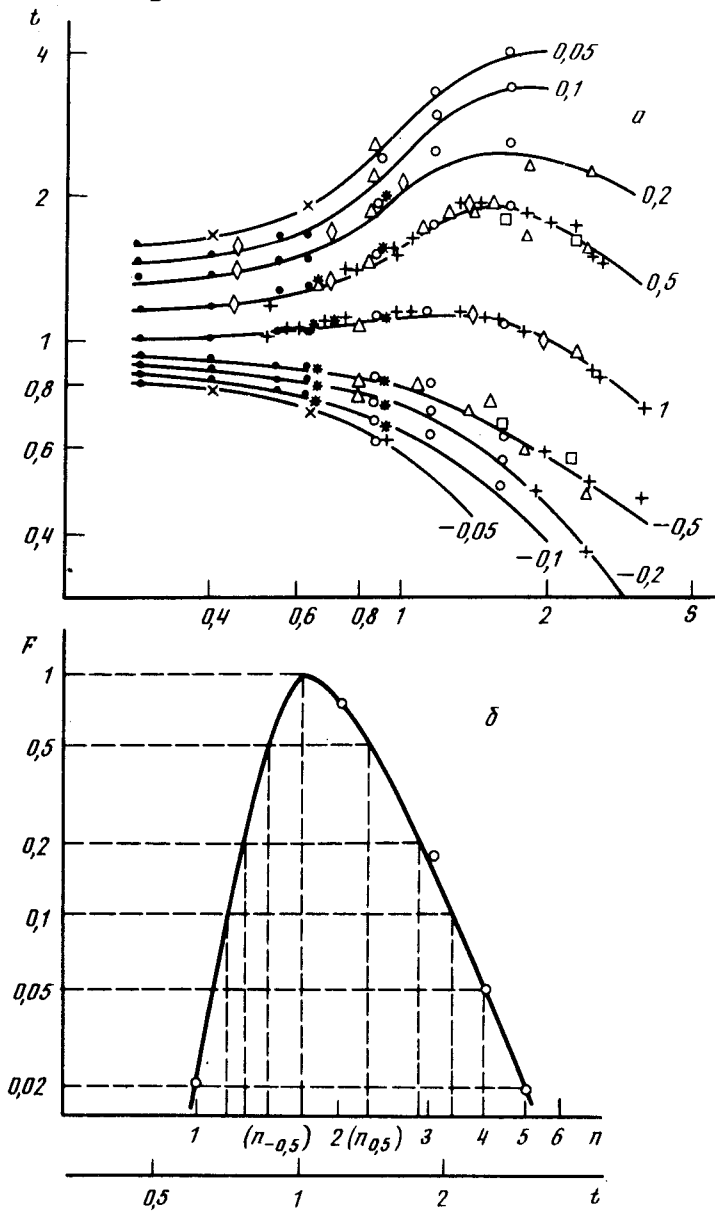


Рис. 1. а – Универсальные зависимости параметра  $t = n_k / n_m$  от приведенной скорости  $s$ , где  $n_k$  – главное квантовое число состояния иона, для которого  $F(t, s) = |k|$ , построенные по результатам численных расчетов сечений перезарядки ядер элементов с атомами водорода в основном состоянии: ● –  $Z = 6$  (2), × –  $Z = 2, 4 - 8$  (3), + –  $Z = 2 - 6, 8, 9$  (4), ◊ –  $Z = 3 - 5$  (5), \* –  $Z = 2, 6, 8$  (6); и возбужденных состояниях (7): ◦ –  $Z = 6, n_0 = 2$ , ▲ –  $Z = 6, n_0 = 3$ , Δ –  $Z = 8, n_0 = 2$ , ■ –  $Z = 8, n_0 = 3$  (цифры у кривых – значения функции  $F = |k|$ ,  $k < 0$  для  $n < n_m$ ,  $k > 0$  для  $n > n_m$ ). б – Нормированное заселение  $n$ -состояний иона  $\text{He}^+$  в реакции  $\text{He}^{2+} - \text{H}(n_0 = 1)$ , построенное по данным рис. 1а, точки – результаты расчета (8).  $E = 25 \text{ кэВ/нукл}$

Найденный скэйлинг использовался для определения начального (перезарядочного) заселения  $nl$ -состояний ионов  $\text{He}^+$  и  $\text{C}^{5+}$  в реакции перезарядки  $\alpha$ -частиц и ядер углерода с быстрыми атомами водорода в плазме в расчетах сечений эмиссии оптических линий ионов  $\sigma_\lambda$ , перспективных для диагностики  $\alpha$ -частиц и углеродной примеси. Поскольку в плазме радиационные времена жизни возбужденных состояний ионов, соответствующих оптическим переходам, и атомов обычно сравнимы со столкновительными, решалась система уравнений столкновительно-излучательной модели для населенностей ( $nlj$ )-состояний как для ионов плазмы, так и для атомов диагностического пучка ( $n, n_0 \leq 12$ )<sup>11,12</sup>. Рассматривалась плазма в магнитном поле, состоящая из дейтронов и электронов.

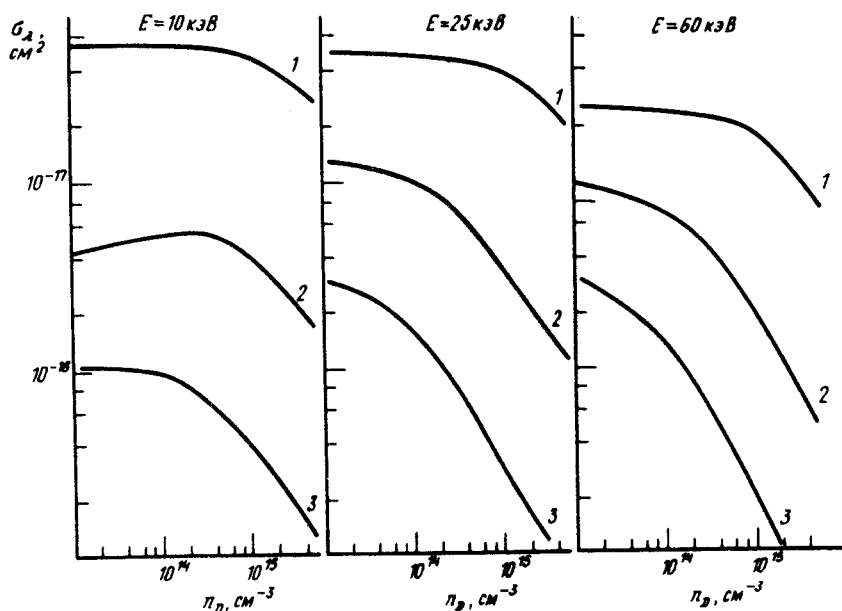


Рис. 2. Эффективные сечения эмиссии линий иона  $\text{He}^+$  в реакции перезарядки  $\alpha$ -частиц с атомами водорода в зависимости от плотности плазмы: 1 —  $\lambda = 1640 \text{ \AA}$  ( $n = 3 \rightarrow 2$ ), 2 —  $\lambda = 4685 \text{ \AA}$  ( $n = 4 \rightarrow 3$ ), 3 —  $\lambda = 3203 \text{ \AA}$  ( $n = 5 \rightarrow 3$ ).  $T^e = 1 \text{ кэВ}$ ,  $H = 22 \text{ кЭ}$ .

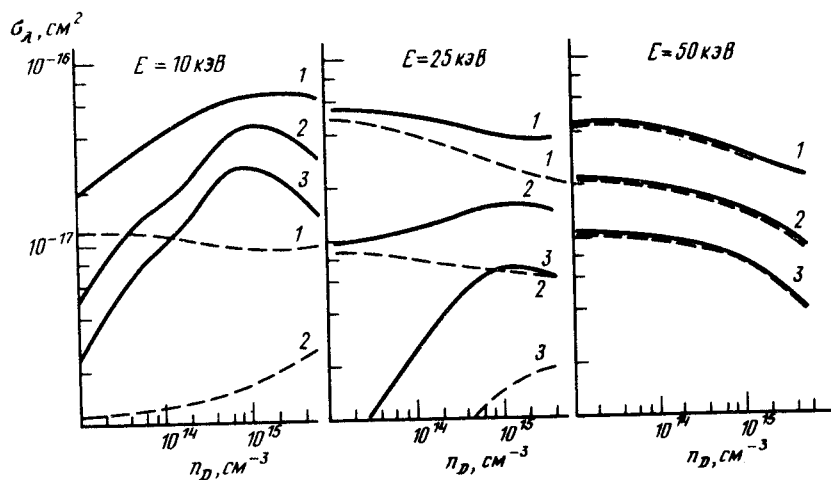


Рис. 3. Эффективные сечения эмиссии линий иона  $\text{C}^{5+}$  в реакции перезарядки ядер углерода с атомами водорода в зависимости от плотности плазмы: 1 —  $\lambda = 3434 \text{ \AA}$  ( $n = 7 \rightarrow 6$ ), 2 —  $\lambda = 5291 \text{ \AA}$ , ( $n = 8 \rightarrow 7$ ), 3 —  $\lambda = 7717 \text{ \AA}$  ( $n = 9 \rightarrow 8$ ). Пунктир — без учета возбужденных атомов в диагностическом пучке.  $T^e = 1 \text{ кэВ}$ ,  $H = 22 \text{ кЭ}$ .

Рассчитанные сечения  $\sigma_\lambda$ , представленные на рис. 2 и 3, демонстрируют значительное (до порядка величины) увеличение интенсивности оптических линий ионов из-за возбужденных атомов диагностического пучка при  $E \leq 25$  кэВ/нукл (рис. 3). Причем при  $E = 10$  кэВ/нукл существенным оказывается вклад состояний с  $n_0 \geq 3$ . Роль этого эффекта повышается с увеличением заряда ядра иона, поэтому вид зависимостей  $\sigma_\lambda$  от  $n_D$  для ионов  $\text{He}^+$  и  $\text{C}^{5+}$  при  $E \leq 25$  кэВ/нукл различен. Во втором случае рост населенностей возбужденных состояний атомов водорода с увеличением  $n_D$  приводит к росту  $\sigma_\lambda$ , в первом случае более заметна роль тушащих столкновений.

Обнаруженное значительное увеличение интенсивности оптических линий ионов при невысоких энергиях атомов позволяет использовать для экспериментов сравнительно простые диагностические инжекторы. При этом наиболее перспективным является использование этих линий для измерения ионной температуры и скорости вращения плазмы. Для измерения концентрации ионов целесообразно использовать энергии атомов  $E \gtrsim 50$  кэВ/нукл, когда зависимость  $\sigma_\lambda$  от количества возбужденных атомов в диагностическом пучке отсутствует.

#### Литература

1. Isler R.C. *Physica Scripta*, 1987, 35, 650.
2. Green T.A. et al. *Phys. Rev. A*, 1982, 25, 1364.
3. Fritsch W., Lin C.D. *Phys. Rev. A*, 1984, 29, 3039.
4. Ryufuku H. Japanese Atomic Energy Research Institute Report JAERI-M 82-031, 1982.
5. Bransden B.H. et al. *J. Phys. B*, 1980, 13, 4245.
6. Hardie D.J.B., Olson R.E. *J. Phys. B*, 1983, 16, 1983.
7. Isler R.C., Olson R.E. *Phys. Rev. A*, 1988, 37, 3399.
8. Fritsch W. *Phys. Rev. A*, 1988, 38, 2664.
9. Ryufuku H., Watanabe T. *Phys. Rev. A*, 1979, 20, 1828.
10. Olson R.E. *Phys. Rev. A*, 1981, 24, 1726.
11. Коротков А.А., Зиновьев А.Н. *Физика плазмы*, 1989, 15, 233.
12. Korotkov A.A. IPP Report III/142. Max-Planck-Institut für Plasmaphysik, 1989.

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

Поступила в редакцию  
21 августа 1989 г.