

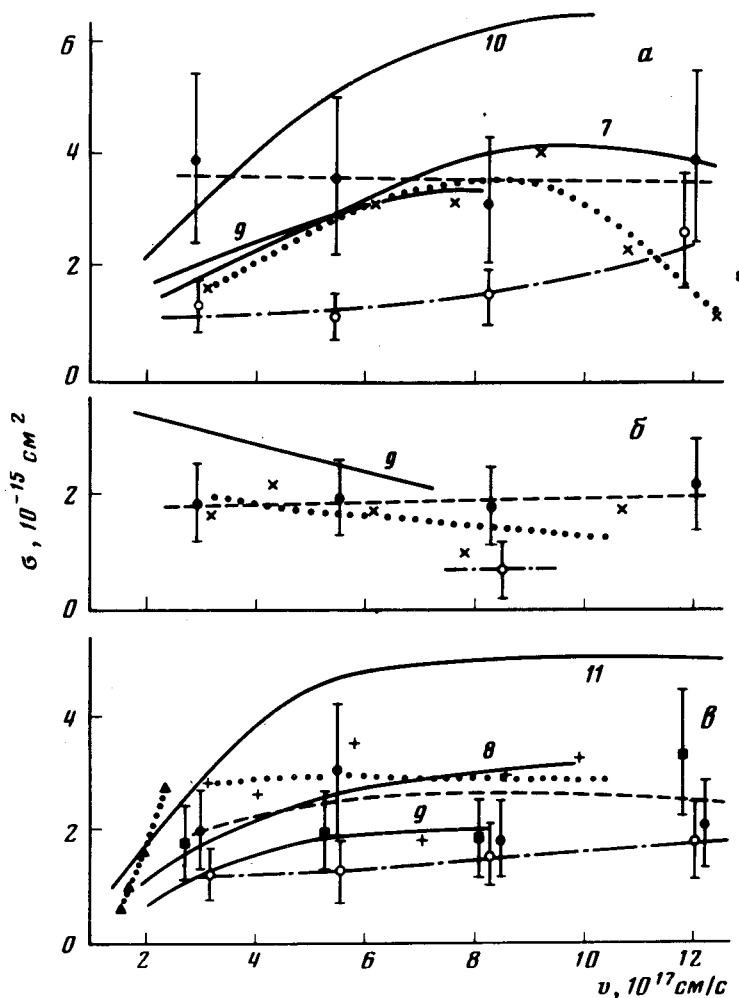
СЕЧЕНИЯ ЭМИССИИ ХАРАКТЕРИСТИЧЕСКОГО РЕНТГЕНОВСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ПРИ СТОЛКНОВЕНИЯХ ИОНОВ C^{6+} , N^{6+} , N^{7+} , O^{8+} С АТОМАМИ ВОДОРОДА

*В.В.Афросимов, Е.Д.Донец, А.Н.Зиновьев,
С.Ю.Овчинников, М.Н.Панов*

Измерены сечения эмиссии рентгеновского излучения для переходов $\sum_n n p - 1s$ и $2p - 1s$ при распаде возбужденных состояний, образующихся в столкновениях C^{6+} , N^{6+} , N^{7+} , O^{8+} – H при скоростях соударения $(3 \div 12) \cdot 10^7$ см/с. Величины сечений для переходов $\sum(n p - 1s)$ близки к полным сечениям захвата электрона.

При столкновениях многозарядных ионов с атомами захват электрона происходит в высоко возбужденные состояния образующегося при перезарядке иона с меньшим зарядом. Последующий каскад радиационных переходов заканчивается эмиссией характеристического рентгеновского излучения. Этот процесс вносит вклад в ионизационный баланс ионов и излучение высокотемпературной плазмы, где всегда присутствуют примеси ядер легких элементов и атомы водорода, поступающие со стенки или образующиеся при фоторекомбинации. Тот же процесс оказывается весьма важным при инъекции мощных пучков атомов водорода в плазму для ее нагрева, когда столкновения с ионами примесей приводят к ионизации атомов пучка и их захвату на границе плазмы и, как следствие, к снижению эффективности нагрева центральной области плазмы¹. Наличие сведений о сечениях эмиссии излучения опреде-

ляет также возможность применения методов локальной диагностики содержания примесей в плазме, использующих излучение этих ионов, возникающее при инъекции в плазму пучка атомов².



Суммарное сечение эмиссии рентгеновского излучения σ_{Σ} и сечение эмиссии линии $2p-1s$ $\sigma(2p-1s)$ при захвате электрона у атома водорода многозарядным ионом. v – скорость соударения. Цифры у сплошных кривых соответствуют номерам ссылок на теоретические расчеты. Данные настоящей работы ϕ и ϕ – сечения σ_{Σ} и $\sigma(2p-1s)$ для случаев (а) – $O^{8+} - H$, (б) – $N^{7+} - H$, (в) – $C^{6+} - H$, \ddagger – сечение σ_{Σ} для столкновений $N^{6+} - H$ (в). Пунктирной и штрих-пунктирной линиями указаны усредненные зависимости сечений σ_{Σ} и $\sigma(2p-1s)$ соответственно. Данные о сечениях захвата электрона из работы⁵: $\dots \times \dots$ для случаев $O^{8+} - H$ (а), $N^{7+} - H$ (б) и $\dots + \dots$ – $N^{6+} - H$ (в); из работы⁶: $\dots \blacktriangle \dots$ – случай $C^{6+} - H$ (в)

В настоящей работе впервые измерены сечения эмиссии рентгеновского излучения при столкновениях ионов C^{6+} , N^{6+} , N^{7+} , O^{8+} с атомами водорода при скоростях соударения $(3 \div 12) \cdot 10^7$ см/с, соответствующих скоростям частиц в плазме современных установок УТС. Для получения пучка многозарядных ионов использовался источник „Крион-2”, разработанный в ОИЯИ³. Пучок ионов нужной зарядности, выделенный магнитным масс-монитором, направлялся в камеру, где пересекал струйную мишень атомов водорода. Для получения струи атомов применялось истечение в вакуум термически диссоциированного водорода из капилляра, нагретого до температуры 2700 К. Использование струи атомов в ка-

честве мишени связано с необходимостью удаления горячих поверхностей от области регистрации излучения. Средняя по области наблюдения излучения степень диссоциации H_2 в камере столкновений определялась масс-спектроскопическим методом и составляла $m = n_{H^+} / (n_{H^+} + n_{H_2}) = 0,53 \pm 0,02$, где n_H и n_{H_2} — соответственно концентрации атомов и молекул водорода. Концентрация атомов водорода в области соударений составляла $n_H = 1,5 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-3}$. Излучение, связанное с распадом возбужденных состояний многозарядных ионов, образованных при захвате электрона у атома водорода, выделялось с помощью поглощающих фильтров и детектировалось вторично-эмиссионным детектором с фотокатодом из CsJ. Суммарное сечение эмиссии рентгеновского излучения $\sigma_{\Sigma} = \sum_n \sigma(np - 1s)$ измерялось с помощью фильтра из алюминия. Сечения эмиссии для перехода $2p - 1s$ $\sigma(2p - 1s)$ в ионах C^{5+} и O^{7+} определялись с помощью фильтров из скандия и фторопласта соответственно. Абсолютная калибровка сечений проводилась по измеренным нами ранее сечениям эмиссии рентгеновского излучения при столкновениях ядер с молекулами водорода⁴. Абсолютные ошибки настоящих измерений составляют 40%, относительные ошибки — 25%.

Суммарные сечения эмиссии рентгеновского излучения в изучаемых столкновениях (рисунок) весьма велики и практически не зависят от скорости соударения. На рисунке представлены также полные сечения захвата электрона, измеренные в работах^{5,6} методом анализа зарядового состава пучка, прошедшего газовую мишень, и результаты теоретических расчетов⁷⁻¹¹. Имеется удовлетворительное согласие с данными экспериментов^{5,6}. Из теоретических работ наилучшее согласие достигается с расчетами по методу сильной связи^{7,8}. Близость экспериментальных сечений захвата электрона⁵ и эмиссии рентгеновского излучения подтверждает вывод о том, что захват электрона происходит, в основном, в возбужденные состояния. При столкновениях ионов с одинаковым зарядом C^{6+} и N^{6+} сечения σ_{Σ} оказываются близкими, что указывает на слабое влияние наличия К-электрона на процесс захвата в возбужденные состояния. При столкновениях $C^{6+} - H$ помимо сечений $\sigma(2p - 1s)$ и σ_{Σ} нами измерялась также эмиссия излучения в ультрафиолетовом диапазоне (сумма сечений для переходов $4l - 3l'$, $4l - 2l'$ и $3l - 2l'$), что позволило сделать заключение о том, что в данном случае заселяются состояния с главным квантовым числом $n = 3$ и $n = 4$, причем относительное заселение этих уровней практически не зависит от скорости соударения и составляет $\sigma(4) / (\sigma(3) + \sigma(4)) = 0,7 \pm 0,15$.

Сравнение величин сечения $\sigma(2p - 1s)$ и суммарного сечения в случае $C^{6+} - H$ говорит о том, что состояния с большими орбитальными моментами l заселяются более эффективно, чем при захвате электрона у молекулы H_2 ⁴. Имеется тенденция к росту заселения состояний с большими l с увеличением скорости соударения (случаи $C^{6+} - H$ и $O^{8+} - H$).

В заключение авторы выражают благодарность академику А.М.Балдину за поддержку настоящих исследований, А.А.Басалаеву и Д.Б.Хребтукову за помощь в разработке струйной мишени атомов водорода, В.В.Воейкову, А.А.Короткову и В.В.Сальникову за помощь в проведении экспериментов и Ю.С.Гордееву за многочисленные и полезные обсуждения.

Литература

1. Крупин В.А., Марченко В.С., Яковленко С.И. Письма в ЖЭТФ, 1979, 29, 353.
2. Афросимов В.В., Гордеев Ю.С., Зиновьев А.Н., Коротков А.А. Письма в ЖЭТФ, 1978, 28, 540.
3. Донец Е.Д., Овсянников В.П. Сообщение ОИЯИ, Р7-10780, 1977, Дубна.
4. Афросимов В.В., Басалиев А.А., Гордеев Ю.С., Донец Е.Д., Зиновьев А.Н., Овчинников С.Ю., Панов М.Н. Письма в ЖЭТФ, 1981, 34, 332.
5. Афросимов В.В., Басалаев А.А., Донец Е.Д., Зиновьев А.Н., Ложкин К.О., Панов М.Н. Письма в ЖЭТФ, 1982, 37, 21.
6. Phaneuf R.A., Alvarez L., Meyer F.W., Crandall D.H. Phys. Rev., 1982, A26, 1892.
7. Harel C., Salin A. J. Phys., 1977, B10, 3511.

8. *Vaaben J., Briggs J.S.* J. Phys., 1977, B10, L521.
9. *Salop A., Olson R.E.* Phys. Rev., 1977, A16, 1811; 1979, A19, 1921.
10. *Казанский А.К., Комаров И.В.* ЖТФ, 1982, 52, 1734.
11. *Green T.A., Shipsey E.J., Browne J.C.* Phys. Rev., 1982, A25, 1364.

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

Поступила в редакцию
7 июня 1983 г.
