

СЕЧЕНИЯ И СКОРОСТИ ИОНИЗАЦИИ МНОГОЗАРЯДНЫХ
ИОНОВ ЭЛЕКТРОННЫМ УДАРОМ

Л. А. Вайнштейн, В. П. Шевелько

УДК 539.186.3

В борн-кулоновском приближении с учетом обмена вычислены эффективные сечения σ и скорости $\langle v\sigma \rangle$ ионизации многозарядных ионов электронами. Результаты представлены в виде таблицы аппроксимационных параметров σ и $\langle v\sigma \rangle$ для ионов изоэлектронных последовательностей от H до Ca.

Современные методы диагностики высокотемпературной плазмы предъявляют высокие требования к определению элементарных атомных характеристик, в частности, к сечениям ионизации электронами. Интерпретация рентгеновских спектров такой плазмы в ряде случаев связана с определением интенсивностей линий многозарядных ионов (в том числе сателлитов), концентрация которых пропорциональна произведению нескольких сечений ионизации, т.е. весьма чувствительна к точности определения этих сечений.

Экспериментальные методы нахождения сечений σ и скоростей $\langle v\sigma \rangle$ ионизации электронами многозарядных ионов чрезвычайно сложны, а соответствующие данные немногочисленны (см., например, /1/). Поэтому теоретические расчеты, дающие универсальные (скалярные) значения σ и $\langle v\sigma \rangle$, приобретают особый интерес. Достаточно надежным методом расчета σ , обеспечивающим точность в пределах 50%, является метод Борна - Кулона (БК) с обменом /2,3/, однако имеющаяся совокупность данных по σ и $\langle v\sigma \rangle$ для отдельных ионов не позволяет использовать их для описания широкого круга переходов ионов требуемых изоэлектронных последовательностей.

В настоящей работе проведен расчет сечений ионизации методом БК с обменом и соответствующих величин $\langle v\sigma \rangle$ для многозарядных ионов изоэлектронных рядов от H до Ca, включая ионизацию внутренних оболочек. На основе точных расчетов получены параметры аппроксимаций σ и $\langle v\sigma \rangle$, позволяющие определять величины сечений и скоростей ионизации без использования ЭВМ.

Сечение ионизации электрона из оболочки nl^q вычислялось по формуле

$$\sigma(E) = q \sum_l \int_0^{\epsilon_m} \sigma(nl - \epsilon l', E) d\epsilon, \quad \epsilon_m = (E - E_{nl})/2, \quad (1)$$

где E - энергия налетающего электрона, E_{nl} - энергия связи оболочки nl^q , ϵ, l' - энергия и момент выбитого электрона. В представлении парциальных волн сечение $\sigma(nl - \epsilon l', E)$ равно (подробнее см. /4/, § 5):

$$\begin{aligned} \sigma(nl - \epsilon l', E) &= \sum_{\lambda \lambda'} \sigma_{\lambda \lambda'}(nl \lambda - \epsilon l' \lambda', E) = \\ &= \frac{4\pi a_0^2}{(2l+1)k^2} \sum_{\lambda \lambda'} \left[R_{\lambda \lambda'}^d (R_{\lambda \lambda'}^d - R_{\lambda \lambda'}^e) + (R_{\lambda \lambda'}^e)^2 \right], \end{aligned} \quad (2)$$

где $k^2 = E/Ry$, $R_{\lambda \lambda'}^d$ и $R_{\lambda \lambda'}^e$ - прямой и обменный радиальные интегралы, λ, λ' - моменты парциальных волн налетающего и рассеянного электронов. В расчетах использовалось одно (минимальное) значение мультипольности обменного взаимодействия λ'' . Кроме того кулоново поле и обмен учитывались только для $\lambda \leq 3$ и ограниченного набора $\lambda \lambda'$. Остальные члены суммы по $\lambda \lambda'$ вычислялись в борновском приближении. Сечения $\sigma(E)$ и скорости ионизации $\langle v\sigma \rangle$ (усреднение по максвелловскому распределению скоростей электронов) для оболочки nl^q аппроксимировались формулами:

$$\sigma = \frac{q}{Z^4 (2l+1)} \left(\frac{Z^2 Ry}{E_{nl}} \right)^2 \frac{u}{u+1} \frac{c}{u+\varphi} [\pi a_0^2], \quad u = \frac{E}{E_{nl}} - 1, \quad (3)$$

$$\langle v\sigma \rangle = \frac{10^{-8} q}{Z^3(2l+1)} \left(\frac{Z^2 R_Y}{E_{nl}} \right)^{3/2} \frac{e^{-\beta}}{\sqrt{\beta}} g(\beta) [\text{см}^3 \cdot \text{с}^{-1}], \quad \beta = \frac{E_{nl}}{T}, \quad (4)$$

$$g(\beta) = A/(1 + \chi/\beta), \quad (5)$$

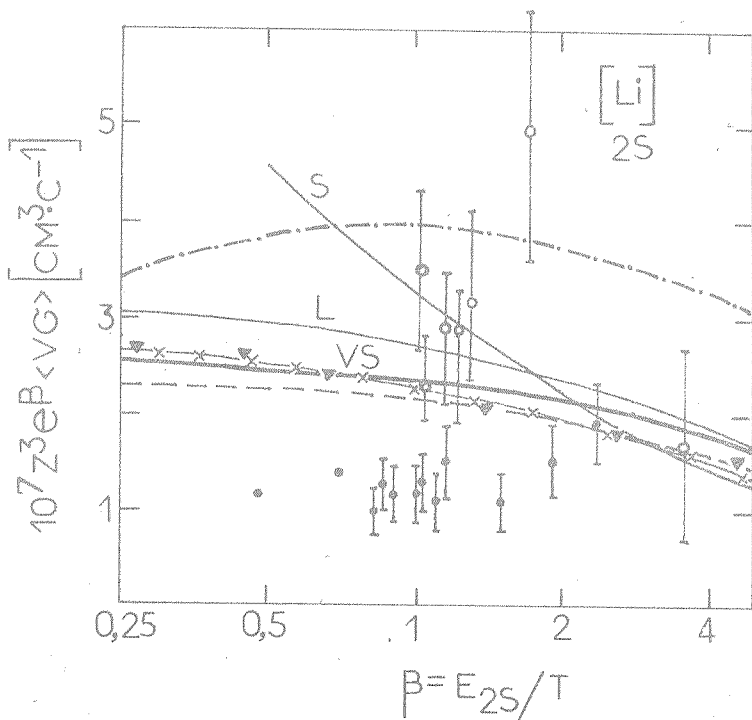
где c , φ , A , χ - параметры аппроксимации, T - температура электронов, Z - спектроскопический символ иона мишени ($Z = Z_n - N + I$, Z_n - заряд ядра, N - число электронов). Точность аппроксимации формулами (3) - (5) не хуже 10%. Фактически формулы (3) - (5) определяют закон скалирования σ и $\langle v\sigma \rangle$ по заряду Z , так как величина $E_{nl}/Z^2 R_Y$ для данного изоэлектронного ряда слабо зависят от Z .

Таблица I.

Аппроксимационные параметры (формулы (3-5)) для сечений и скоростей ионизации многозарядных ионов электронным ударом (для ионов с зарядом $Z \geq Z_n/2$).

Внешние оболочки					Внутренние оболочки				
оболочка	c	φ	A	χ	оболочка	c	φ	A	χ
1s ^q	8,26	3,30	5,08	0,447	1s ²	9,15	3,91	4,81	0,393
2s ^q	6,19	2,37	5,23	0,594	2s ²	6,49	2,56	5,13	0,562
2p ^q	18,4	1,95	18,7	0,697	2p ⁶	19,7	2,07	19,0	0,666
3s ^q	5,29	2,26	4,85	0,640	3s ²	5,33	2,22	4,98	0,652
3p ^q	14,6	1,84	16,0	0,738	3p ⁶	14,7	1,86	16,0	0,734
4s ^q	4,00	1,97	4,15	0,720					

Численные расчеты проводились для ионов с зарядом ядра $Z_n = 99$ и $Z = 80 - 99$ для ионизации внешних оболочек (от 1s до 4s²) и с $Z = 80$ для внутренних оболочек (от 1s² до 3p⁶). При этом, как показали расчеты, параметры c , φ , A , χ для данных значений nl слабо зависят от q и Z при $Z \geq Z_n/2$. Параметры c , φ , A , χ приведены в табл. I. На рис. I сравняются результаты расчетов $\langle v\sigma \rangle$ для li-подобных ионов с



Р и с. 1. Скалированная скорость ионизации $\langle v \sigma \rangle$ Li-подобных ионов. Расчет: Ne VIII: L - формулы (4), (6), S - (4), (7), --- (4), (8), ∇ - приближение БК с обменом /3/. Настоящая работа: VS - формулы (1), (2) для $Z_n = 99$, $Z = 97$; --- (1), (2) для Ne VIII. Эксперимент: \circ - $\langle v \sigma \rangle$ для N Y, O VI, Ne VIII, Al XI, Si XII по данным в θ -пинче и стеллараторе /5,6/; \times - \times для O VI в пучках /1/

экспериментальными данными, полученными в пучках /1/ и в лабораторной плазме /5,6/. Результаты сравниваются также с

роко используемой формулой Лотца /7/ (см (4)) *)

$$\varepsilon_L(\beta)/(21 + 1) = E_1(-\beta) \quad (6)$$

и формулой Ситона /8/

$$\varepsilon_S(\beta)/(21 + 1) = 4,3, \quad (7)$$

а также с моделью /4/

$$\sigma = \sigma^B \sqrt{(u + 1)/u}, \quad (8)$$

где σ^B - борновское сечение ионизации.

Поступила в редакцию
28 мая 1982 г.

Л и т е р а т у р а

1. D. H. Crandall, Phys. Scripta, 23, 153 (1981).
2. S. M. Younger, Comments At. Mol. Phys., XIV, 193 (1982).
3. H. Jakubowicz, D. L. Moores, J. Phys. B14, 3733 (1981).
4. Л. А. Вайнштейн, И. И. Собельман, Е. А. Кков, Возбуждение атомов и уширение спектральных линий, "Наука", М., 1979 г.
5. P. Greve et al., Phys. Rev., A24, 429 (1981).
6. P. Greve, Thesis, Bochum, BRD (1981).
7. W. Lotz, Z. Phys., 232, 101 (1970).
8. M. J. Seaton, Planet. Space Sci., 12, 55 (1964).

*) Наличие статвеса $21 + 1$ в формулах (6), (7) не противоречит формуле (5), поскольку фактор $21 + 1$ содержится в константах А и С в неявном виде (см. табл. I).