Краткие сообщения по физике № 8 август 1973

ВОЗБУЖДЕНИЕ МНОГОЗАРЯДНЫХ ИОНОВ ПРОТОНАМИ

Л. П. Пресняков, А. Д. Уланцев

УДК 539.186

В рамках метода сильной связи с учетом кулоновского отталкивания партнеров вычислены сечения возбуждения многозарядных ионов протонами и другими тяжелыми заряженными частицами. Сечения выражаются через универсальную функцию, приводятся таблицы функции для дипольных и квадрупольных переходов.

Ударное возбуждение многозарядных ионов протонами и другими ионами представляет интерес для спектроскопической диагностики горячей плазмы, в частности, в условиях солнечной короны /1/. Для вычисления эффективных сечений необходимо принять во внимание два эффекта: кулоновское отталкивание при сближении ионов с сильную связь начального и конечного состояний системы ион + протон. В такой постановке задача может быть решена в рамках параметрического метода. Для вычисления вероятности перехода можно использовать приближенное аналитическое решение системы двух связанных уравнений нестационарной теории возмущений /2/

$$w_{if} = \left| \int_{-\infty}^{\infty} V(R(t)) \exp\left\{ i \int^{t} \sqrt{\alpha^2(R(\tau)) + 4V^2(R(\tau))}\, d\tau \right\} dt \right|^2. \quad (1)$$

Здесь $\alpha = \Delta E_{if} + V_{ii} - V_{ff}$, $V = V_{if}$. Матричные элементы вычисляются с невозмущенными волновыми функциями ионов. Эффективное сечение есть интеграл по прицельному параметру

$$\sigma_{if}(v) = 2\pi \int_0^{\infty} \rho d\rho w_{if}(\rho, v), \quad (2)$$

где v – скорость относительного движения сталкивающихся частиц при бесконечно больших расстояниях между ними. В кулоновском поле отталкивания междуядерное расстояние R и время t связаны соотношениями

$$R = a(\varepsilon \operatorname{ch}\xi + 1), \quad t = (a/v)(\varepsilon \operatorname{sh}\xi + 1)$$
$$\varepsilon = \left[1 + (\rho/a)^2\right]^{1/2}, \quad a = Z_1 Z_2/Mv^2, \tag{3}$$

где Z_1, Z_2 – заряды сталкивающихся ионов, M – приведенная масса системы. В практически важном случае $V = QR^{-n}$, $|V_{ii} - V_{ff}| \ll |\Delta E_{if}|$ интеграл (I) может быть вычислен аналитически. Для сечения (2) получаем (используется атомная система единиц)

$$\sigma_{if}(v) = 2\pi \left|\frac{Q}{v}\right|^{2/(n-1)} \exp\left\{-2\sqrt{2^{2/n}\beta_n} \sin\frac{\pi}{2n}\right\} I_n(\beta_n,\gamma_n), \tag{4}$$

$$I_n(\beta_n,\gamma_n) = \int_0^\infty x dx \sin^2\left[\frac{C_n}{(\gamma_n^2 + x^2)^{(n-1)/2}}\right] \exp\left\{2\sqrt{2^{2/n}\beta_n} \sin\frac{\pi}{2n} - \right.$$
$$\left. - 2\sqrt{2^{2/n}\beta_n \sin^2\frac{2\pi}{2n} + \beta_n^{n/(n-1)}x^2} - \beta_n^{n/2(n-1)}\gamma_n \left|\pi - 2\operatorname{arctg}\left|\frac{\gamma_n}{x}\right|\right|\right\}, \tag{5}$$

$$\gamma_n = \left|\frac{v}{Q}\right|^{1/(n-1)} a, \quad \beta_n = \frac{Q^{2/n}}{v^2} \Delta E_{if}^{2(n-1)/n}, \quad C_n = \frac{\sqrt{\pi}\,\Gamma\left(\frac{n-1}{2}\right)}{\Gamma\left(\frac{n}{2}\right)} \tag{6}$$

Значения интеграла $I_n(\beta_n,\gamma_n)$ для $n = 2,3$ даны в таблицах I,2, что позволяет получать сечения возбуждения переходов, разрешенных в дипольном и квадрупольном излучении.

Сечение быстро (экспоненциально) убывает с ростом параметра $\pi a \Delta E/v$. Очевидно, что велики могут быть сечения переходов между компонентами тонкой структуры, излучательные (квадрупольные) переходы между которыми играют существенную роль в спектроскопической диагностике многозарядных ионов в лабораторных и астрофизических условиях /I,3/. Для вычисления сечений на основе формулы (4) и таблицы 2 даются значения констант Q и ΔE для ряда ионов с конфигурацией p^2, для переходов между ^3P_J уровнями (таблица 3). Константы Q вычислялись в приближении $L-S$ связи с волновыми функциями Вайнштейна.

В качестве примера для иона CaXV в таблице 4 даны скорости реакций $\langle\sigma v\rangle$, вычисленные с максвелловским распределением по скоростям в области температур 0,I–IO миллионов градусов. Переход 0 ⟶ I, запрещенный правилом $J_i + J_f \geq 2$, вычислялся как переход через промежуточный уровень в приближении $w_{01} = \frac{1}{4} w_{02} \times w_{21}$ /4/. Отметим, что при $T \geq 10^6$ °K скорости возбуждения протонами превосходят скорости возбуждения электронами, вычисленные методом Ситона /I/.

Таблица I $I_2(\beta,\gamma)$

β \ γ	0	0,064	0,I28	0,256	0,5I2	I,024	2,048
0,00	$\sim \ln 1/\beta$						
0,02	2I,6	2I,6	2I,5	2I,5	2I,5	2I,2	I9,3
0,04	I5,9	I5,9	I5,9	I5,9	I5,8	I5,5	I3,9
0,08	IO,7	IO,7	IO,7	IO,7	IO,5	IO,I	8,43
0,I6	6,25	6,24	6,23	6,20	6,06	5,60	3,96
0,32	2,94	2,93	2,92	2,88	2,73	2,29	I,I4
0,64	I,0I	I,0I	0,996	0,956	0,826	0,546	0,I26
I,28	0,268	0,264	0,253	0,2I7	0,I37	4,73(-2)	2,03(-3)
2,56	8,29(-2)	7,88(-2)	6,82(-2)	4,28(-2)	I,09(-2)	5,76(-4)	6,69(-7)
5,I2	2,73(-2)	2,29(-2)	I,52(-2)	4,92(-3)	2,42(-4)	I,44(-7)	8,5(-I4)
IO,24	8,83(-3)	5,I3(-3)	I,69(-3)	9,5I(-5)	I,47(-7)	I (-I4)	0

Таблица 2 $I_3(\beta,\gamma)$

β \ γ	0	0,064	0,I28	0,256	0,5I2	I,024	2,048
0,00	$\pi/2$	I,57	I,57	I,56	I,50	I,32	0,463
0,02	I,42	I,42	I,4I	I,40	I,34	I,II	0,324
0,04	I,32	I,3I	I,3I	I,30	I,22	0,984	0,255
0,08	I,I6	I,I6	I,I5	I,I4	I,06	0,803	0,I70
0,I6	0,954	0,95I	0,943	0,923	0,833	0,574	8,76(-2)
0,32	0,699	0,695	0,686	0,662	0,567	0,330	2,92(-2)
0,64	0,436	0,433	0,422	0,396	0,306	0,I32	4,72(-3)
I,28	0,224	0,220	0,2IO	0,I84	0,II5	2,92(-2)	2,28(-4)
2,56	9,80(-2)	9,4I(-2)	8,45(-2)	6,24(-2)	2,49(-2)	2,40(-3)	I,44(-6)
5,I2	4,24(-2)	3,84(-2)	3,0I(-2)	I,48(-2)	2,37(-3)	3,7I(-5)	2,94(-IO)

Обозначения: 4,73 (-2) = 4,73 . IO^{-2}.

Таблица 3

ИОН	$^3P_0 \to {}^3P_2$		$^3P_1 \to {}^3P_2$	
	ΔE (а.е.)	Q	ΔE (а.е.)	Q
O III	I,40.IO^{-3}	0,288	0,88.IO^{-3}	0,I73
Mg VII	I,34.IO^{-2}	8,95.IO^{-2}	0,83.IO^{-2}	5,39.IO^{-2}
Al VIII	2,02.IO^{-2}	7,27.IO^{-2}	I,23.IO^{-2}	4,36.IO^{-2}
Ca XV	0,I57	2,55.IO^{-2}	8,35.IO^{-2}	I,53.IO^{-2}

Таблица 4

Возбуждение Ca XV протонным ударом; <vб> $см^3.сек^{-I}$

T, 10^6 °K	$^3P_0 \to {}^3P_1$	$^3P_1 \to {}^3P_2$	$^3P_0 \to {}^3P_2$
0,I	< IO^{-I9}	2,56.IO^{-I8}	~ IO^{-I9}
0,2	~ IO^{-I9}	I,63.IO^{-I5}	2,I9.IO^{-I6}
0,3	3,06.IO^{-I7}	4,23.IO^{-I4}	8,5I.IO^{-I5}
0,4	4,76.IO^{-I6}	2,47.IO^{-I3}	6,8I.IO^{-I4}
0,5	2,86.IO^{-I5}	7,83.IO^{-I3}	2,73.IO^{-I3}
0,6	I,03.IO^{-I4}	I,80.IO^{-I2}	7,43.IO^{-I3}
0,7	2,68.IO^{-I4}	3,4I.IO^{-I2}	I,58.IO^{-I2}
0,8	5,67.IO^{-I4}	5,67.IO^{-I2}	2,87.IO^{-I2}
0,9	I,04.IO^{-I3}	8,59.IO^{-I2}	4,65.IO^{-I2}
I	I,72.IO^{-I3}	I,2I.IO^{-II}	6,94.IO^{-I2}
2	2,24.IO^{-I2}	7,59.IO^{-II}	5,58.IO^{-II}
3	5,72.IO^{-I2}	I,54.IO^{-IO}	I,24.IO^{-IO}
4	9,I8.IO^{-I2}	2,I8.IO^{-IO}	I,86.IO^{-IO}
5	I,24.IO^{-II}	2,68.IO^{-IO}	2,38.IO^{-IO}
6	I,54.IO^{-II}	3,07.IO^{-IO}	2,84.IO^{-IO}
7	I,82.IO^{-II}	3.40.IO^{-IO}	3,26.IO^{-IO}
8	2,08.IO^{-II}	3,69.IO^{-IO}	3,64.IO^{-IO}
9	2,33.IO^{-II}	3,94.IO^{-IO}	3,99.IO^{-IO}
IO	2,56.IO^{-II}	4,I7.IO^{-IO}	4.3I.IO^{-IO}

Выражаем благодарность В. П. Шевелько за проведение численных расчетов, использовавшихся в настоящей работе.

Поступила в редакцию
13 июня 1973 г.

Литература

1. R. A. Chevalier, D. L. Lambert. Solar Phys., 11, №2, 243 (1970).
2. Л. П. Пресняков. Труды ФИАН, 30, 235 (1964).
3. Н. Г. Басов, В. А. Бойко, Ю. П. Войнов, С. Ю. Кононов, С. Л. Мандельштам, Г. В. Склизков. Письма в ЖЭТФ, 6, 291 (1967).
4. И. А. Полуэктов, Л. П. Пресняков. Труды ФИАН, 51, 63 (1970).