

УДК 533.9;539.18

## СКОРОСТИ ПЕРЕХОДОВ МЕЖДУ КОМПОНЕНТАМИ ТОНКОЙ СТРУКТУРЫ В He И He-ПОДОБНЫХ ИОНАХ ПРИ СТОЛКНОВЕНИЯХ С ПРОТОНАМИ

Д. А. Кондратьев<sup>1,2\*</sup>, И. Л. Бейгман<sup>1,2</sup>

*Рассмотрены скорости переходов между компонентами тонкой структуры триплетных уровней с  $n = 2, 3$  в He и He-подобных ионах при столкновении с протонами. Специфика задачи состоит в присутствии виртуального уровня, связанного с компонентами мультиплета дипольно-разрешенными переходами. В результате в зависимости скорости перехода от температуры плазмы возникает широкий пик. Расчеты проведены для переходов внутри термов  $2^3P$ ,  $3^3P$  и  $3^3D$  в He,  $C^{4+}$  и  $Fe^{24+}$ .*

**Ключевые слова:** скорость переходов, He-подобные ионы, столкновение с протонами.

1. Переходы в атомах и ионах при столкновениях с тяжелыми частицами (протонами, дейтронами,  $\alpha$ -частицами и т.п.) играют существенную роль в распределении населенностей уровней и интенсивности спектральных линий в плазме. Для переходов между компонентами тонкой структуры (когда уровни близки по энергии) соответствующие скорости переходов могут быть сравнимы и даже больше, чем для переходов, вызванных столкновениями с электронами. Обзор расчетов методом сильной связи представлен в [1]. Переходы между компонентами тонкой структуры возбужденных состояний водородоподобных ионов с  $n = 2$  были рассмотрены в [2] с помощью уравнений сильной связи. Специфика рассматриваемой в данной статье проблемы состоит в присутствии виртуального уровня, связанного с компонентами мультиплета дипольно-разрешенными переходами.

Целью настоящей работы является получение атомных данных для использования в кинетических расчетах, а также определение области температур плазмы, в которой возбуждение протонным ударом превалирует над электронным возбуждением. В

<sup>1</sup> Московский физико-технический институт, 141704 Московская область, г. Долгопрудный.

<sup>2</sup> Учреждение Российской академии наук Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, Ленинский проспект 53, 119991 Москва.

\* E-mail: dkondr@sci.lebedev.ru

работе рассматриваются скорости переходов между компонентами тонкой структуры триплетных уровней с  $n = 2, 3$  в He и He-подобных ионах  $C^{4+}$ ,  $Fe^{24+}$  при столкновениях с протонами. В расчетах используются сечения, полученные в работе [3] в рамках метода сильной связи в представлении параметра столкновения [4]. В зависимости скоростей переходов от температуры плазмы имеется широкий максимум вследствие наличия виртуального уровня, связанного дипольными переходами с исследуемыми компонентами мультиплета. При вычислениях использовалась программа АТСС, являющаяся дополнением к программе АТОМ [5].

2. *Основные формулы.* Для того чтобы характеризовать столкновительные процессы в плазме с температурой  $T$ , используются усредненные по распределению скоростей величины  $\langle v\sigma \rangle$  (скорости переходов). В данной статье предполагается максвелловское распределение скоростей частиц. Скорости перехода могут быть вычислены по формуле

$$\langle v\sigma \rangle = \int_{\Delta E}^{\infty} v\sigma(E) f(E) dE, \quad f(E) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \frac{\sqrt{E}}{(kT)^{3/2}} e^{-\frac{E}{kT}}, \quad E = \frac{\mu v^2}{2}. \quad (1)$$

Здесь  $E$  – энергия столкновения,  $\sigma(E)$  – сечение перехода,  $\Delta E$  – разница между энергиями начального и конечного состояний мишени,  $\mu$  – приведенная масса системы (выраженная в массах электрона). Если энергия  $E$  и температура  $kT$  измеряются в  $Ry$ , а сечение – в единицах  $\pi a_0^2$ , то, выполняя замену переменных, запишем скорость перехода в удобной для расчетов форме:

$$\langle v\sigma \rangle = \frac{C^M}{\sqrt{\mu}} e^{-\frac{\Delta E}{kT}} \int_0^{\infty} \frac{E + \Delta E}{(kT)^{3/2}} \sigma(E + \Delta E) e^{-\frac{E}{kT}} dE, \quad (2)$$

$$C^M = 2\sqrt{\pi} \frac{e^2 a_0^2}{\hbar} = 2.17 \cdot 10^{-8} \text{ [см}^3/\text{с]}.$$

Для расчета сечений использовался метод уравнений сильной связи [6, 7] в представлении параметра столкновения. Атом или ион (“мишень”) рассматривается как квантовая система, а налетающий протон – как точечный заряд,двигающийся по классической траектории. Возмущением является электростатическое взаимодействие  $\hat{V} = e^2 / |\mathbf{R} - \mathbf{r}|$  между оптическим электроном атома или иона и налетающим протоном. Здесь  $\mathbf{R}$  и  $\mathbf{r}$  – радиус-вектор протона и атомного электрона соответственно. Траектория протона  $\mathbf{R}(t)$  при расчетах предполагается прямолинейной:  $\mathbf{R}(t) = \boldsymbol{\rho} + \mathbf{v}t$ , где  $\mathbf{v}$  – скорость частицы,  $\boldsymbol{\rho}$  – параметр столкновения. Сечение  $\sigma$ , вероятность  $W$  и амплитуда  $a$  перехода  $0 \rightarrow 1$

связаны соотношением

$$\sigma_{01}(v) = 2\pi \int_0^{\infty} W_{01}(\rho, v) \rho d\rho, \quad W_{01}(\rho, v) = \lim_{t \rightarrow \infty} |a_{01}(t)|^2. \quad (3)$$

В борновском приближении

$$W_{01}^B(\rho, v) = \left| \int_{-\infty}^{\infty} V_{01}(\mathbf{R}(t)) \exp(i\omega t) dt \right|^2, \quad (4)$$

где  $V_{01}(t)$  и  $\omega = (E_0 - E_1)/\hbar$  – матричный элемент взаимодействия и частота перехода между невозмущенными уровнями энергии соответственно.

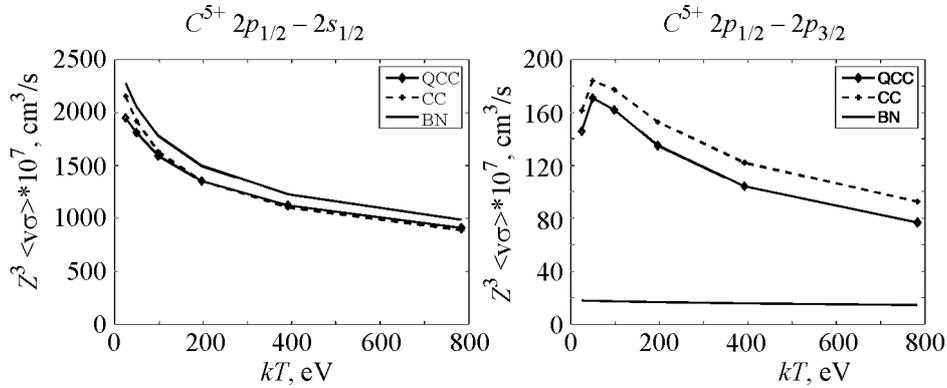


Рис. 1: Скорости переходов  $2p_{1/2} - 2s_{1/2}$ ,  $2p_{1/2} - 2p_{3/2}$  в  $C^{5+}$  при столкновении с протонами. QCC – квантовый метод сильной связи [2], CC – метод сильной связи в представлении параметра столкновения, BN – борновское приближение (с нормировкой).

Для иллюстрации мы приводим сравнение скоростей переходов  $2p_{1/2} - 2s_{1/2}$ ,  $2p_{1/2} - 2p_{3/2}$  в ионе  $C^{5+}$ , вычисленных методом квантовой сильной связи [2] и сильной связи в представлении параметра столкновения. Как видно из рис. 1, результаты расчетов находятся в удовлетворительном согласии. Скорости переходов, полученные из нормированных борновских сечений, качественно правильно описывают ситуацию с разрешенными переходами и дают заниженный результат для квадрупольных переходов.

3. *Результаты и обсуждение.* Целью работы является исследование скоростей переходов между компонентами тонкой структуры возбужденных состояний при наличии близкого виртуального уровня, дипольно связанного с компонентами рассматриваемого мультиплета. Рассмотрение проводится на примере переходов внутри каждого из термов  $2^3P$ ,  $3^3P$  и  $3^3D$  атома He и He-подобных ионов  $C^{4+}$  и  $Fe^{24+}$ . При решении уравнений

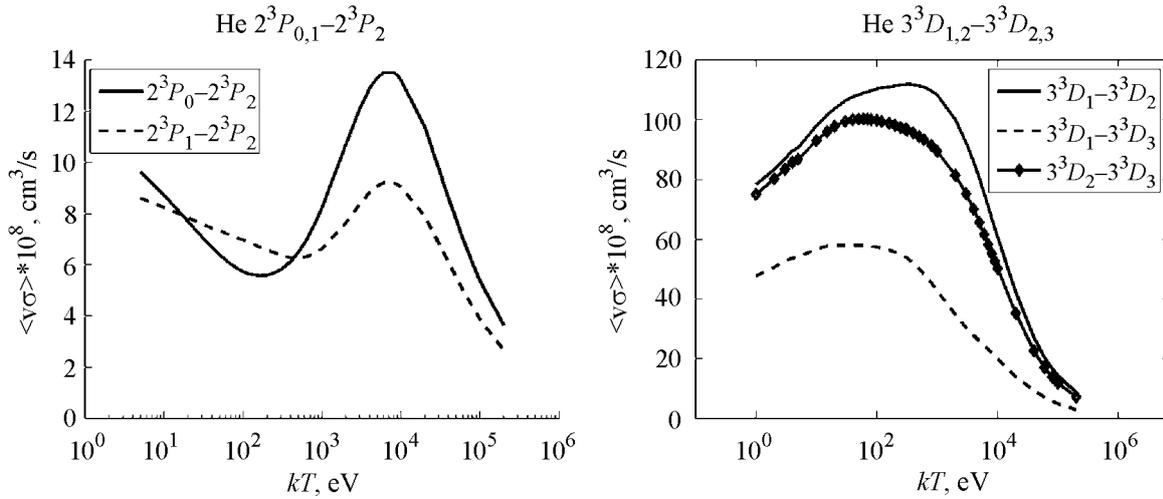


Рис. 2: Скорости переходов  $2^3P_{0,1} - 2^3P_2$  и  $3^3D_{1,2} - 3^3D_{2,3}$  в He при столкновении с протонами.

сильной связи в качестве базиса для расчетов выбирались системы уровней  $2^3S - 2^3P_{0,1,2}$  и  $3^3S - 3^3P_{0,1,2} - 3^3D_{1,2,3}$ . Дипольные переходы между компонентами тонкой структуры запрещены по четности, однако возможны квадрупольные переходы. Переходы  $2^3P_0 - 2^3P_1$ ,  $3^3P_0 - 3^3P_1$  запрещены в первом порядке теории возмущений (борновское приближение) правилами отбора. Учет ступенчатого механизма позволяет получить ненулевые сечения, а следовательно, и скорости этих переходов, которые, естественно, оказываются малы.

*3.1. Общий характер зависимости скоростей перехода от температуры.* Характер зависимости определяется наличием виртуального уровня, дипольно связанного с остальными. В отличие от расчетов [1, 2], дающих зависимость с одним максимумом, учет дипольных каналов  $2^3S - 2^3P$ ,  $3^3S - 3^3P$  и  $3^3P - 3^3D$  приводит к появлению дополнительного пика в сечениях, который, в свою очередь, даёт широкий пик в зависимости скорости перехода от температуры. В качестве иллюстрации на рис. 2 приведены величины  $Z^3 \langle v\sigma \rangle \cdot 10^8$  ( $Z$  – спектроскопический символ) для переходов  $2^3P_{0,1} - 2^3P_2$  и  $3^3D_{1,2} - 3^3D_{2,3}$  в He при столкновениях с протонами в зависимости от температуры плазмы. Положение максимума оказывается различным для разных термов: для переходов  $2^3P_{0,1} - 2^3P_2$  и  $3^3P_{0,1} - 3^3P_2$  максимум находится в области температур  $kT \sim 10$  кэВ, а для переходов  $3^3D_{1,2} - 3^3D_{2,3}$  в области  $kT \sim 1$  кэВ. При больших температурах сечения описываются борновским приближением, а скорости перехода – соответствующими борновскими значениями  $\langle v\sigma \rangle$ .

Т а б л и ц а 1

Температуры (в eV), начиная с которых возбуждение протонами доминирует над электронным возбуждением

	He	C <sup>4+</sup>	Fe <sup>24+</sup>
$2^3P_0 - 2^3P_2$	~50	~60	< 30
$2^3P_1 - 2^3P_2$	~12	~15	< 30
$3^3P_0 - 3^3P_2$	~35	~60	~16
$3^3P_1 - 3^3P_2$	~50	~55	~16
$3^3D_1 - 3^3D_2$	~3	~5	~17
$3^3D_1 - 3^3D_3$	< 1	< 5	< 10
$3^3D_2 - 3^3D_3$	~2	< 5	~12

3.2. Зависимость от  $Z$ . На рис. 3 приведены величины  $g_0 Z^2 \langle v\sigma \rangle \cdot 10^8$  ( $g_0$  – статистический вес начального состояния) в зависимости от температуры плазмы для He, C<sup>4+</sup> и Fe<sup>24+</sup>. В отличие от обычно встречающегося закона  $\langle v\sigma \rangle \sim 1/Z^3$  здесь в среднем выполняется зависимость  $\langle v\sigma \rangle \sim 1/Z^2$  (как для силы столкновения). Положение максимума зависимости скорости перехода от температуры слабо зависит от  $Z$ . Переход от C<sup>4+</sup> к Fe<sup>24+</sup> неожиданно даёт большее отличие, чем переход от нейтрального He к C<sup>4+</sup>.

3.3. Скорости возбуждения протонами и электронами. Для физических приложений важно знать область температур, в которой скорости переходов, индуцированных протонами, порядка или больше соответствующих скоростей переходов, вызванных электронным ударом. Отметим, что в стационарной плазме, представляющей особый интерес, максимум обилия ионов с потенциалом ионизации  $I$  обычно приходится на область температур  $kT \sim \left(\frac{1}{20} - \frac{1}{3}\right) I$ . В табл. 1 приведены значения температур, начиная с которых скорость переходов из-за столкновений с протонами превышает соответствующую скорость из-за столкновений с электронами. Как следует из приведенных данных, для He протоны играют роль только для переходов внутри терма  $3^3D$ , а для ионов C<sup>4+</sup> и Fe<sup>24+</sup> – для всех рассматриваемых термов  $2^3P$ ,  $3^3P$ ,  $3^3D$ . При этом для стационарной плазмы He и C<sup>4+</sup> (в отличие от Fe<sup>24+</sup>) столкновения с протонами дают заметный, но не доминирующий вклад в полную скорость перехода. На рис. 4 приведены скорости переходов при возбуждении электронным и протонным ударом для переходов  $3^3D_2 - 3^3D_3$  в He и  $3^3P_0 - 3^3P_2$  в C<sup>4+</sup>. Видно, что с ростом температуры вклад протонов в полную скорость перехода возрастает.

Т а б л и ц а 2

Скорости переходов между компонентами тонкой структуры уровней  $2^3P$ ,  $3^3P$ ,  $3^3D$  в He при столкновениях с протонами

$T$ , эВ	5.00+0	1.00+1	1.50+1	2.00+1	3.00+1	4.00+1	5.00+1	6.00+1	7.00+1
Переходы									
2p $3P_1-3P_3$	1.19+0	1.22+0	1.20+0	1.17+0	1.12+0	1.09+0	1.05+0	1.02+0	9.84-1
$3P_1-3P_5$	9.64+0	8.71+0	8.12+0	7.69+0	7.09+0	6.69+0	6.40+0	6.18+0	6.02+0
$3P_3-3P_5$	2.58+1	2.47+1	2.40+1	2.35+1	2.28+1	2.23+1	2.20+1	2.17+1	2.14+1
3p $3P_1-3P_3$	3.46+0	3.07+0	2.82+0	2.65+0	2.43+0	2.30+0	2.22+0	2.16+0	2.12+0
$3P_1-3P_5$	6.91+1	6.90+1	6.83+1	6.75+1	6.62+1	6.53+1	6.48+1	6.46+1	6.47+1
$3P_3-3P_5$	1.28+2	1.23+2	1.21+2	1.20+2	1.20+2	1.21+2	1.22+2	1.23+2	1.24+2
3d $3D_3-3D_5$	2.72+2	2.94+2	3.05+2	3.11+2	3.19+2	3.23+2	3.25+2	3.27+2	3.28+2
$3D_3-3D_7$	1.62+2	1.70+2	1.73+2	1.74+2	1.74+2	1.74+2	1.74+2	1.74+2	1.73+2
$3D_5-3D_7$	4.34+2	4.65+2	4.80+2	4.89+2	4.97+2	5.00+2	5.01+2	5.01+2	5.01+2
$T$ , эВ	1.00+2	2.00+2	3.00+2	5.00+2	8.00+2	1.00+3	2.00+3	3.00+3	4.00+3
Переходы									
2p $3P_1-3P_3$	8.95-1	7.04-1	6.11-1	5.31-1	4.63-1	4.31-1	3.12-1	2.38-1	1.89-1
$3P_1-3P_5$	5.73+0	5.60+0	5.82+0	6.48+0	7.57+0	8.24+0	1.07+1	1.21+1	1.29+1
$3P_3-3P_5$	2.09+1	1.97+1	1.91+1	1.88+1	1.93+1	1.99+1	2.29+1	2.51+1	2.65+1
3p $3P_1-3P_3$	2.00+0	1.65+0	1.42+0	1.11+0	8.83-1	7.77-1	4.73-1	3.28-1	2.46-1
$3P_1-3P_5$	6.58+1	7.20+1	7.78+1	8.58+1	9.25+1	9.52+1	1.02+2	1.05+2	1.06+2
$3P_3-3P_5$	1.29+2	1.45+2	1.59+2	1.79+2	1.96+2	2.03+2	2.21+2	2.28+2	2.32+2
3d $3D_3-3D_5$	3.31+2	3.34+2	3.35+2	3.34+2	3.29+2	3.25+2	3.00+2	2.77+2	2.58+2
$3D_3-3D_7$	1.72+2	1.67+2	1.62+2	1.50+2	1.36+2	1.28+2	1.04+2	9.12+1	8.33+1
$3D_5-3D_7$	4.99+2	4.91+2	4.84+2	4.72+2	4.57+2	4.47+2	4.07+2	3.76+2	3.50+2
$T$ , эВ	6.00+3	7.00+3	8.00+3	9.00+3	1.00+4	2.00+4	4.00+4	8.00+4	1.00+5
Переходы									
2p $3P_1-3P_3$	1.31-1	1.13-1	9.85-2	8.71-2	7.79-2	6.32-2	2.51-2	9.64-3	7.05-3
$3P_1-3P_5$	1.35+1	1.35+1	1.35+1	1.34+1	1.32+1	1.14+1	8.61+0	6.07+0	5.37+0
$3P_3-3P_5$	2.76+1	2.77+1	2.76+1	2.74+1	2.71+1	2.37+1	1.83+1	1.31+1	1.16+1
3p $3P_1-3P_3$	1.58-1	1.32-1	1.13-1	9.77-2	8.58-2	1.11-1	4.10-2	1.50-2	1.08-2
$3P_1-3P_5$	1.07+2	1.06+2	1.06+2	1.05+2	1.04+2	9.14+1	7.19+1	5.12+1	4.52+1
$3P_3-3P_5$	2.34+2	2.33+2	2.32+2	2.30+2	2.28+2	2.02+2	1.59+2	1.13+2	1.00+2
3d $3D_3-3D_5$	2.26+2	2.13+2	2.01+2	1.91+2	1.82+2	1.27+2	8.14+1	5.01+1	4.28+1
$3D_3-3D_7$	7.29+1	6.90+1	6.56+1	6.27+1	6.00+1	4.17+1	2.79+1	1.73+1	1.48+1
$3D_5-3D_7$	3.08+2	2.91+2	2.76+2	2.63+2	2.51+2	1.76+2	1.13+2	6.95+1	5.92+1

Т а б л и ц а 3

Скорости переходов между компонентами тонкой структуры уровней  $2^3P$ ,  $3^3P$ ,  $3^3D$  в  $C^{4+}$  при столкновениях с протонами. Приведены величины  $g_0 Z^3 \langle v\sigma \rangle \cdot 10^8$  [см<sup>3</sup>/с] в форме мантиссы и десятичного порядка

T, эВ	1.00+1	1.50+1	2.00+1	3.00+1	4.00+1	6.00+1	8.00+1	1.20+2	1.60+2
Переходы									
2p 3P1-3P3	9.20+0	7.76+0	5.98+0	5.82+0	5.64+0	5.27+0	4.94+0	4.38+0	3.96+0
3P1-3P5	4.34+1	4.00+1	3.74+1	3.42+1	3.22+1	2.99+1	2.87+1	2.77+1	2.76+1
3P3-3P5	1.30+2	1.23+2	1.17+2	1.13+2	1.10+2	1.07+2	1.05+2	1.03+2	1.01+2
3p 3P1-3P3	2.00+1	1.92+1	1.87+1	1.80+1	1.77+1	1.74+1	1.72+1	1.65+1	1.57+1
3P1-3P5	2.62+2	2.52+2	2.47+2	2.42+2	2.41+2	2.45+2	2.50+2	2.65+2	2.81+2
3P3-3P5	6.52+2	6.27+2	6.15+2	6.04+2	6.02+2	6.03+2	6.08+2	6.22+2	6.42+2
3d 3D3-3D5	9.95+2	1.04+3	1.06+3	1.10+3	1.13+3	1.15+3	1.17+3	1.18+3	1.18+3
3D3-3D7	6.11+2	6.28+2	6.40+2	6.55+2	6.66+2	6.81+2	6.92+2	7.06+2	7.14+2
3D5-3D7	1.65+3	1.71+3	1.75+3	1.80+3	1.83+3	1.87+3	1.88+3	1.89+3	1.88+3
T, эВ	2.50+2	3.20+2	1.00+3	2.00+3	3.00+3	1.00+4	2.00+4	3.00+4	1.00+5
Переходы									
2p 3P1-3P3	3.35+0	3.03+0	2.23+0	1.67+0	1.30+0	4.41-1	2.04-1	1.25-1	2.64-2
3P1-3P5	2.86+1	2.90+1	4.14+1	5.43+1	6.22+1	7.01+1	6.04+1	5.22+1	2.88+1
3P3-3P5	9.83+1	9.60+1	1.01+2	1.17+2	1.29+2	1.43+2	1.26+2	1.10+2	6.24+1
3p 3P1-3P3	1.39+1	1.27+1	6.92+0	4.12+0	2.85+0	7.48-1	3.09-1	1.79-1	3.37-2
3P1-3P5	3.15+2	3.40+2	4.72+2	5.36+2	5.62+2	5.77+2	5.12+2	4.51+2	2.53+2
3P3-3P5	6.96+2	7.40+2	1.01+3	1.15+3	1.21+3	1.25+3	1.12+3	9.89+2	5.60+2
3d 3D3-3D5	1.18+3	1.18+3	1.20+3	1.20+3	1.17+3	8.80+2	6.41+2	5.10+2	2.32+2
3D3-3D7	7.18+2	7.14+2	6.09+2	5.08+2	4.52+2	3.07+2	2.24+2	1.79+2	8.01+1
3D5-3D7	1.86+3	1.84+3	1.77+3	1.70+3	1.63+3	1.22+3	8.93+2	7.11+2	3.20+2

Т а б л и ц а 4

Скорости переходов между компонентами тонкой структуры уровней  $2^3P$ ,  $3^3P$ ,  $3^3D$  в  $Fe^{24+}$  при столкновениях с протонами. Приведены величины  $g_0 Z^3 \langle v\sigma \rangle \cdot 10^8$  [см<sup>3</sup>/с] в форме мантиссы и десятичного порядка

T, эВ	1.00+2	1.20+2	1.60+2	2.00+2	2.50+2	3.00+2	3.20+2	5.00+2	8.00+2
Переходы									
2p 3P1-3P3	1.45+1	1.38+1	1.25+1	1.13+1	1.00+1	9.14+0	1.11+1	7.49+0	6.67+0
3P1-3P5	2.82+2	2.83+2	2.87+2	2.90+2	2.92+2	2.91+2	2.85+2	2.75+2	2.48+2
3P3-3P5	6.64+2	6.85+2	7.22+2	7.47+2	7.67+2	7.76+2	7.66+2	7.44+2	6.81+2
3p 3P1-3P3	2.74+1	2.60+1	2.46+1	2.40+1	2.38+1	2.37+1	2.37+1	2.12+1	2.03+1
3P1-3P5	2.05+3	1.98+3	1.85+3	1.74+3	1.64+3	1.57+3	1.55+3	1.45+3	1.49+3
3P3-3P5	4.62+3	4.50+3	4.29+3	4.11+3	3.94+3	3.81+3	3.77+3	3.56+3	3.56+3
3d 3D3-3D5	4.20+3	4.35+3	4.55+3	4.67+3	4.78+3	4.86+3	4.88+3	5.03+3	5.19+3
3D3-3D7	2.60+3	2.72+3	2.89+3	3.02+3	3.12+3	3.18+3	3.17+3	3.22+3	3.07+3
3D5-3D7	6.83+3	7.06+3	7.39+3	7.59+3	7.76+3	7.87+3	7.88+3	8.01+3	8.05+3
T, эВ	2.00+3	3.00+3	6.00+3	1.00+4	2.00+4	3.00+4	6.00+4	1.00+5	2.00+5
Переходы									
2p 3P1-3P3	5.58+0	4.62+0	2.66+0	1.85+0	9.06-1	5.71-1	2.37-1	1.26-1	4.91-2
3P1-3P5	2.05+2	2.05+2	2.31+2	2.32+2	2.19+2	2.00+2	1.59+2	1.28+2	9.19+1
3P3-3P5	5.44+2	5.14+2	5.19+2	5.03+2	4.67+2	4.27+2	3.43+2	2.78+2	2.02+2
3p 3P1-3P3	1.39+1	1.00+1	5.71+0	2.84+0	1.21+0	7.13-1	3.03-1	1.39-1	5.23-2
3P1-3P5	1.80+3	1.94+3	2.13+3	2.22+3	2.10+3	1.91+3	1.49+3	1.17+3	7.99+2
3P3-3P5	3.97+3	4.23+3	4.61+3	4.83+3	4.58+3	4.18+3	3.27+3	2.58+3	1.77+3
3d 3D3-3D5	5.32+3	5.25+3	4.75+3	4.12+3	3.07+3	2.47+3	1.62+3	1.16+3	7.25+2
3D3-3D7	2.47+3	2.19+3	1.81+3	1.47+3	1.08+3	8.65+2	5.62+2	3.94+2	2.39+2
3D5-3D7	7.77+3	7.51+3	6.69+3	5.76+3	4.28+3	3.44+3	2.24+3	1.59+3	9.85+2

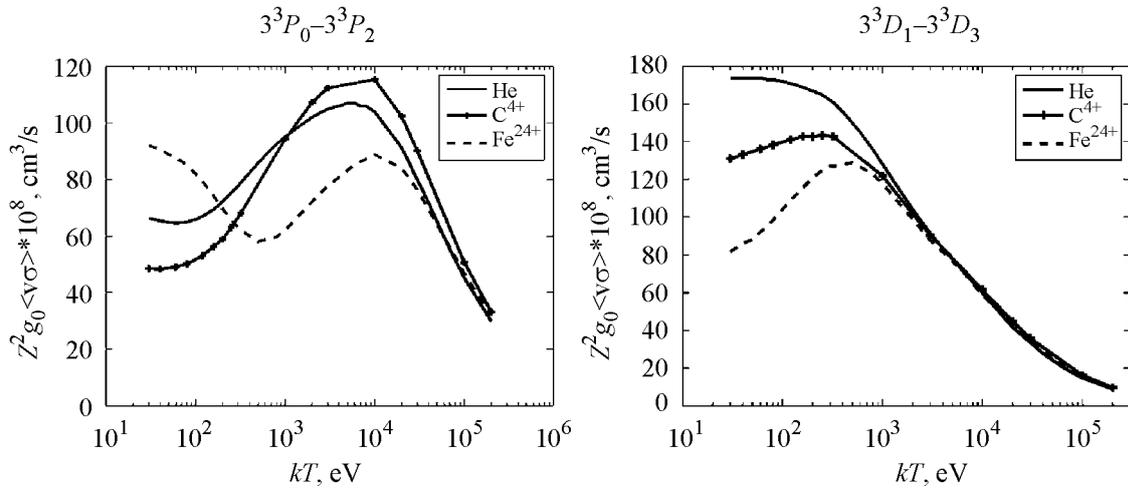


Рис. 3: Скорости переходов  $3^3P_0-3^3P_2$  и  $3^3D_1-3^3D_3$  в He,  $C^{4+}$  и  $Fe^{24+}$  при столкновении с протонами.

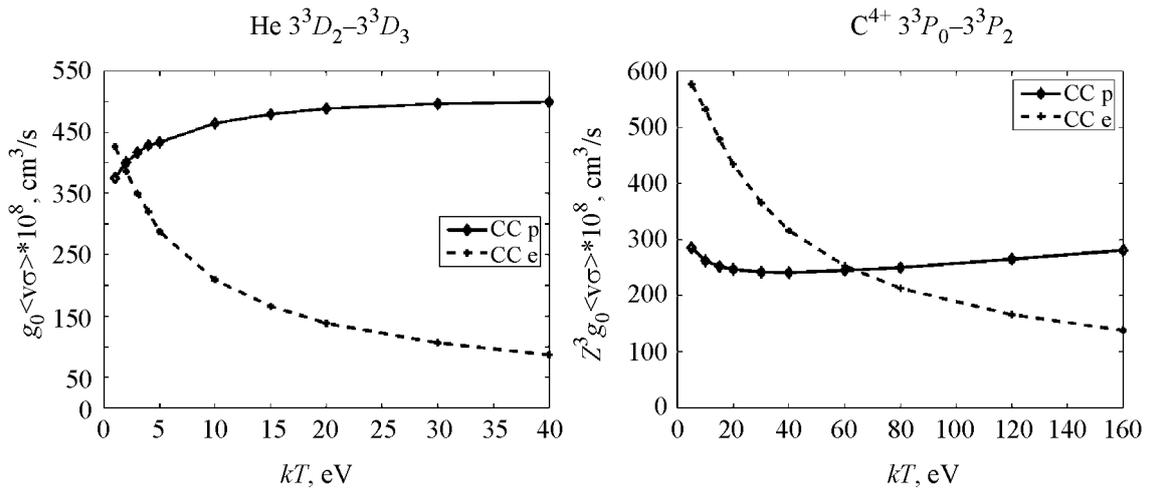


Рис. 4: Скорости переходов  $3^3D_2-3^3D_3$  в He и  $3^3P_0-3^3P_2$  в  $C^{4+}$  при столкновении с протонами и электронами.

3.4. *Результаты.* В табл. 2–4 приведены величины  $g_0 Z^3 \langle v\sigma \rangle \cdot 10^8$  для переходов  $nlSLJ \rightarrow n'l'SL'J'$  в He,  $C^{4+}$  и  $Fe^{24+}$  для  $n = 2, 3$  при столкновении с протонами. В таблицах уровни обозначены в следующем виде:  $nl g_S L g_J$ , где  $g_S = 2S + 1$ ,  $g_J = 2J + 1$ . Например, состояние  $2p^3P_0$  будет записано как 2р 3P1. Для записи чисел принята форма в виде мантиссы и десятичного порядка, например,  $1.58 - 2 = 1.58 \times 10^{-2}$ .

4. *Заключение.* Рассмотрены скорости переходов между компонентами тонкой структуры возбужденных уровней при наличии виртуального уровня, дипольно связанного

с компонентами рассматриваемого мультиплета. Приведены таблицы скоростей переходов в He, C<sup>4+</sup> и Fe<sup>24+</sup> в зависимости от температуры. Определены области температур, в которых столкновения с протонами доминируют над столкновениями с электронами. Исследована зависимость скоростей переходов от заряда иона  $Z$ .

Авторы выражают благодарность Л. А. Вайнштейну за обсуждение работы.

#### Л И Т Е Р А Т У Р А

- [1] R.H.G. Reid, *Advances in Atomic and Molecular Physics* **25**, 251 (1989).
- [2] B. Zygelman and A. Dalgarno, *Phys. Rev. A* **35**, 4085 (1987).
- [3] Д. А. Кондратьев, И. Л. Бейгман, *ЖЭТФ* **138** (в печати) (2010).
- [4] D. Borodin, I. Beigman, L. Vainshtein and A. Pospieszczyk, *Phys. Scripta* **74**, 464 (2006).
- [5] V. P. Shevelko and L. A. Vainshtein, *Atomic Physics for Hot Plasmas* (IOP, Bristol, 1993).
- [6] I. C. Percival, in: *Atoms in Astrophysics*. Ed by P. G. Burke, W. B. Eissner, D. G. Hummer (Plenum, New York, 1983), Chap. 3.
- [7] I. I. Sobelman, L. A. Vainshtein, and E. A. Yukov, *Excitation of Atoms and Broadening of Spectral Lines* (Springer, New York, 1995).
- [8] NIST Atomic Database online at <http://physics.nist.gov/>.

Поступила в редакцию 9 апреля 2010 г.