

УДК 539.186, 537.534.7, 533.92

ПЕРЕЗАРЯДКА В СТОЛКНОВЕНИЯХ ДВУХ МНОГОЗАРЯДНЫХ ИОНОВ

А. А. Нарич, Ч. Намба¹, Р. К. Янев², Л. П. Пресняков

Разработана теория перезарядки мало- и средне заряженных ионов на чрезвычайно высоко заряженных при скоростях столкновений, соответствующих адиабатическим условиям ($v \leq 1$ ат.ед. = $2.19 \cdot 10^8$ см/с). Динамическая часть задачи решена на основе распадной модели. Вычислены сечения реакции $A^{(q-1)+} + B^{Z+} \rightarrow A^{q+} + B^{(Z-1)+}$ при следующих значениях зарядов ионов: $Z = 80, 85, 90$ и $q = 2, 4, 6, 8, 10$. Полученные сечения слабо зависят от скорости в области средних скоростей и резко спадают при $v < 0.2$ ат.ед.

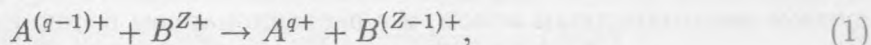
1. Процессы, происходящие в столкновениях чрезвычайно высоко заряженных ионов (Extremely Highly Charged Ions, EHCI) с зарядом $Z > 50$ и многозарядных ионов, обладающих меньшим зарядом $q < 30$, представляют интерес для атомной и ядерной физики. Рост интереса к процессам с участием EHCI стимулируется фундаментальными и практическими аспектами, связанными с изучением термоядерного синтеза, ионных источников, рентгеновской и УФ-спектроскопии лабораторной и астрофизической плазмы и т.д. В большинстве случаев кулоновское отталкивание играет существенную роль и определяет порядки величины вероятностей и сечений изучаемых процессов. Зачастую эти вероятности и сечения довольно малы, как, например, в случаях α -распада [1] и множественного возбуждения ядер в ядерных столкновениях [2]. В этих процессах основной вклад в вероятности вносят малые межъядерные расстояния, при которых порядок величины скорости реакции определяется хорошо известным фактором Гамова [1]. В

¹Национальный Институт управляемого синтеза, Ороши-чо, 509-5292 Токио, Япония.

²Македонская Академия Наук и Искусств, ПО 428, 1000 Скопие, Македония.

случае ион-ионных столкновений резонансная и квазирезонансная перезарядка и другие процессы с перераспределением частиц могут происходить на сравнительно больших расстояниях между ионами. Это приводит к большим в сравнении с “геометрическими” размерами ионов величинам сечений, быстро спадающим при малых скоростях относительного движения. Некоторые теоретические методы изучения указанных процессов приведены в работах [3] и [4]. Позднее были получены экспериментальные данные, хорошо согласующиеся с теориями, основанными на использовании метода сильной связи [5–9]. Во всех указанных работах [3–9] заряды ионов не превышали восьми и столкновения между ЕНСІ и многозарядными ионами не рассматривались.

Целью данной работы является теоретическое исследование столкновений, сопровождающихся перераспределением частиц



при средних и малых скоростях межъядерного движения. Мы будем рассматривать многозарядные водородоподобные ионы с зарядом $q \leq 10$ и ЕНСІ с зарядом $Z \geq 80$. В разделе 2 будут приведены основные уравнения используемой теории; в разделе 3 – результаты вычислений и выводы.

В работе используются атомные единицы.

2. Барьерное прохождение и распадная модель

В дальнейшем мы будем рассматривать одноэлектронную перезарядку как прохождение электрона через квазистационарный барьер, разделяющий ионные коры многозарядного иона и ЕНСІ. Модельное одноэлектронное нестационарное уравнение Шредингера гласит

$$i \frac{\partial \Psi}{\partial t} = \hat{H} \Psi, \quad \hat{H} = -\frac{1}{2} \nabla_r^2 - \frac{q}{r} - \frac{Z}{|\vec{R} - \vec{r}|} + \frac{qZ}{R}, \quad (2)$$

где q и Z – заряды многозарядного иона и ЕНСІ соответственно, \vec{r} – электронная координата и $R = R(t)$ – межъядерное расстояние. При $Z \gg q$ наиболее важную роль играет та часть конфигурационного пространства, в которой $R \approx (Z/q)^{1/2} \gg r/q$. Кулоновское взаимодействие между электроном и ЕНСІ может быть разложено по мультиполям

$$\frac{Z}{|\vec{R} - \vec{r}|} = \frac{Z}{R} + \frac{Z\vec{r}\vec{R}}{R^3} - \dots, \quad (3)$$

и члены, не зависящие от электронной переменной \vec{r} , а именно $-Z/R$ и qZ/R могут быть исключены из правой части нестационарного уравнения (2) с помощью простого фазового преобразования:

$$\Psi = \Phi \exp \left\{ -i \int^t \left(\frac{qZ}{R(\tau)} - \frac{Z}{R(\tau)} \right) d\tau \right\}, \quad (4)$$

что приводит к следующему уравнению:

$$i \frac{\partial \Phi}{\partial t} = \left[-\frac{1}{2} \nabla_r^2 - \frac{q}{r} - \vec{F}(t) \cdot \vec{r} \right] \Phi(\vec{r}, t), \quad (5)$$

$$\vec{F}(t) = Z\vec{R}(t)/R^3(t). \quad (6)$$

Уравнение (5) описывает движение электрона в кулоновском поле заряда q , образуемом многозарядным ионом, и в нестационарном потенциале $\vec{r}\vec{F}(t)$, представляющем собой второй член разложения кулоновского взаимодействия между электроном и ЕНСИ в соответствии с уравнением (3). Анализ нестационарного уравнения (5), выполненный Пресняковым и Усковым [10] на основе метода Келдыша [11], а также Кондорским и Пресняковым [12] с помощью метода сильной связи, подтвердил основные выводы теорий, предложенных Чибисовым [13], а также Гроздановым и Яневым [14]. В соответствии с теориями [13, 14] (см. также [4]), вероятность того, что в единицу времени электрон покинет основное состояние водородоподобного иона $A^{(q-1)+}(1s)$ под действием кулоновского поля иона B^{Z+} при расстоянии $R(t)$ равна

$$W(R(t)) = \frac{4q^2}{F(t)} \exp \left\{ -\frac{2}{3} \frac{q^3}{F(t)} \right\}, \quad (7)$$

$$F(t) = Z/R^2(t). \quad (8)$$

Это выражение совпадает с вероятностью распада (в единицу времени) основного состояния водородоподобного иона в постоянном электрическом поле F [15]. В более общем случае "одноэлектронного" иона $A^{(q-1)+}(n, l, m)$, где l и m – орбитальные и магнитные квантовые числа, и $n = q/(2I)^{1/2}$ (I – потенциал ионизации), выражение для вероятности распада принимает вид

$$W(R) = q^2 A^2 \left(\frac{n}{2} \right)^2 \frac{(2l+1)(l+m)!}{m!(l-m)!} \left(\frac{4q^3 R^2}{Zn^3} \right)^{2n-i-m} \exp \left\{ -\frac{2}{3} \frac{q^3 R^2}{n^3 Z} \right\}, \quad (9)$$

$$n(2Z)^{1/2} q^{-1} \ll R \ll 2n^2 Z q^{-1}. \quad (10)$$

Здесь величина A определяется из уравнения

$$u_{HF}(r)|_{r=r_0} = Aq^{3/2}(qr)^{n-1} \exp(-qr/n)|_{r=r_0}, \quad (11)$$

где $u_{HF}(r)$ – радиальная часть волновой функции активного электрона в приближении Хартри–Фока и r_0 – расстояние, при котором функция $u_{HF}(r)$ выходит на асимптотическое поведение, но при этом достаточно точно описывает электронное движение.

В адиабатической области скоростей вероятность перезарядки связана с вероятностью распада следующим соотношением

$$P = 1 - \exp \left\{ - \int_{-\infty}^{+\infty} W(R(t)) dt \right\}, \quad (12)$$

где $R = R(t)$ – классическая траектория межъядерного движения. Удобно использовать параметрическое представление отталкивательного кулоновского поля

$$t = \frac{a}{v}(\epsilon \sinh \xi + \xi), \quad R = a(\epsilon \cosh \xi + 1), \quad (13)$$

$$a = qZ/Mv^2, \quad \epsilon = (1 + (b/a)^2)^{1/2}. \quad (14)$$

Здесь v – скорость относительного движения на бесконечности, M – приведенная масса системы и b – прицельный параметр. Сечение имеет стандартную форму

$$\sigma = 2\pi \int_0^{\infty} b db P(b/v, Z, q, M). \quad (15)$$

Все дальнейшие вычисления выполнялись численно.

3. Полученные результаты и выводы

Были выполнены расчеты сечений при следующих значениях параметров: $0.05 \leq (v/v_0) \leq 1.0$ ($v_0 = 2.19 \cdot 10^{-8}$ см/с – атомная единица скорости), $2 \leq q \leq 110$ и $Z = 80, 85, 90$. Мы использовали значения масс ионов в форме

$$M(ENCI) = 2Zm_p, \quad M(MCI) = 2qm_p, \quad (16)$$

где m_p – масса протона. Результаты представлены на рис. 1, а также собраны в таблицах 1а – 1е. В рассматриваемой области скоростей сечения близки к константе при средних скоростях и резко спадают при малых значениях v . Чем меньше значение q , тем быстрее спадают сечения. При $v/v_0 \approx 1$ величины сечений выходят на значения, определяемые формулой Бринкмана–Крамерса.

В условиях, когда сечения ведут себя как плато, их значения можно представить в следующем виде

$$\sigma = AZq^{-3}f(Z, q), \quad (17)$$

где A – константа, равная 76 ат.ед. , а функция $f(Z, q)$ слабо зависит от своих аргументов.

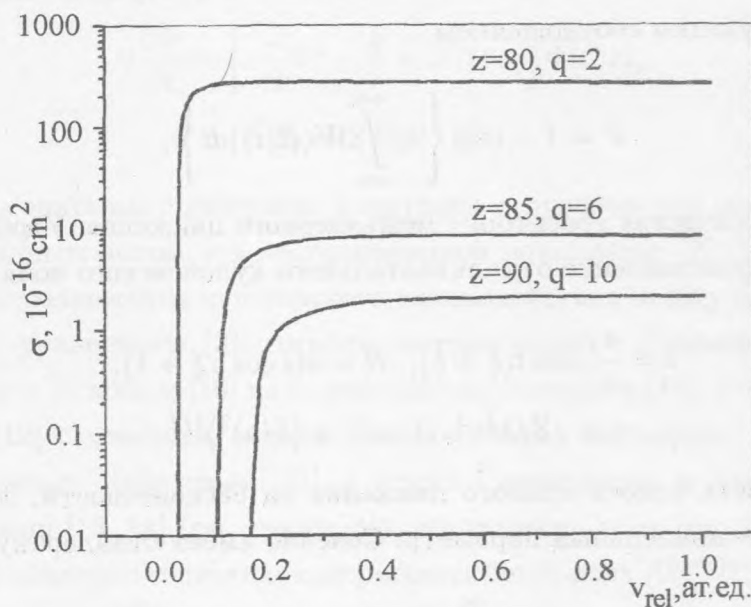


Рис. 1. Зависимости сечений перезарядки (1) от скорости относительного движения в трех случаях: $q = 2, Z = 80$; $q = 6, Z = 85$ и $q = 10, Z = 90$.

В таблицах сечения представлены в зависимости от энергии столкновения в системе центра масс. Из полученных результатов следует, что сечения перезарядки между многозарядными ионами и ЕНСИ могут быть достаточно большими даже при сравнительно малых энергиях. В условиях, когда сечения ведут себя как плато, перезарядка в основном заселяет возбужденные состояния ЕНСИ. Распределение продуктов реакции по главным и орбитальным квантовым числам представляет интерес для многих спектроскопических приложений и будет рассмотрено в других работах.

Т а б л и ц а 1а

Сечения реакции $A^{(q-1)+} + B^{Z+} \rightarrow A^{q+} + B^{(Z-1)+}$ в зависимости от энергии в системе ц.м. E при величинах зарядов $q = 2, Z = 80, 85, 90$

$E(\text{кэВ})$	Сечения, 10^{-16} см^2			$E(\text{кэВ})$	Сечения, 10^{-16} см^2		
	$Z = 80$	$Z = 85$	$Z = 90$		$Z = 80$	$Z = 85$	$Z = 90$
0.1	0.0045	0.0011	0.0003	3.0	277.0	309.4	326.9
0.125	22.28	16.76	13.82	5.0	277.4	310.7	328.4
0.15	69.97	70.82	71.93	7.5	276.3	310.6	327.8
0.2	128.8	137.3	144.0	10.0	275.8	309.9	326.8
0.3	186.5	206.1	214.7	15.0	273.9	307.8	324.8
0.5	230.0	252.0	269.2	20.0	272.3	306.2	323.1
0.75	250.1	278.5	295.1	30.0	268.9	303.1	320.3
1.0	261.0	289.8	308.3	50.0	266.4	299.6	316.6
1.5	270.3	300.3	318.0	75.0	263.6	296.8	313.5
2.0	274.2	306.7	323.2	100.0	261.5	294.7	311.8

Т а б л и ц а 1б

Сечения реакции $A^{(q-1)+} + B^{Z+} \rightarrow A^{q+} + B^{(Z-1)+}$ в зависимости от энергии в системе ц.м. E при величинах зарядов $q = 4, Z = 80, 85, 90$

$E(\text{кэВ})$	Сечения, 10^{-16} см^2			$E(\text{кэВ})$	Сечения, 10^{-16} см^2		
	$Z = 80$	$Z = 85$	$Z = 90$		$Z = 80$	$Z = 85$	$Z = 90$
1.0	0.008	0.016	0.014	10.0	27.81	30.43	31.88
1.25	3.83	3.90	4.11	12.5	28.26	30.98	32.47
1.5	9.56	9.61	9.67	15.0	28.52	30.28	32.81
1.75	13.20	13.49	13.64	20.0	22.81	30.60	33.15
2.0	15.26	15.96	16.58	30.0	28.94	30.80	33.40
2.5	18.62	19.27	20.64	50.0	28.86	30.74	33.36
3.0	20.81	21.95	23.30	75.0	28.65	30.72	33.14
4.0	23.64	25.29	26.52	100.0	28.47	30.54	32.965
5.0	25.00	27.34	28.44	150.0	28.17	30.22	32.63
7.5	26.90	29.42	30.79	200.0	27.91	29.95	32.37

Т а б л и ц а 1с

Сечения реакции $A^{(q-1)+} + B^{Z+} \rightarrow A^{q+} + B^{(Z-1)+}$ в зависимости от энергии в системе ц.м. E при величинах зарядов $q = 6$, $Z = 80, 85, 90$

$E(\text{кэВ})$	Сечения, 10^{-16} см^2			$E(\text{кэВ})$	Сечения, 10^{-16} см^2		
	$Z = 80$	$Z = 85$	$Z = 90$		$Z = 80$	$Z = 85$	$Z = 90$
3.0	0.007	0.003	0.001	25.0	7.5	7.93	8.45
3.5	0.42	0.252	0.14	30.0	7.63	8.13	8.65
4.0	1.49	1.355	1.20	35.0	7.72	8.22	8.765
4.5	2.34	2.29	2.22	40.0	7.78	8.30	8.83
5.0	3.01	3.03	3.03	50.0	7.87	8.39	8.95
6.0	4.01	4.13	4.23	75.0	7.94	8.49	9.025
7.5	4.95	5.20	5.43	100.0	7.95	8.485	9.05
10.0	5.94	6.25	6.56	125.0	7.93	8.48	9.03
12.5	6.50	6.81	7.28	150.0	7.92	8.45	9.02
15.0	6.83	7.27	7.67	200.0	7.87	8.39	8.97
17.5	7.08	7.52	7.98	250.0	7.80	8.35	8.94
20.0	7.27	7.73	8.19	300.0	7.75	8.29	8.87

Т а б л и ц а 1d

Сечения реакции $A^{(q-1)+} + B^{Z+} \rightarrow A^{q+} + B^{(Z-1)+}$ в зависимости от энергии в системе ц.м. E при величинах зарядов $q = 8$, $Z = 80, 85, 90$

$E(\text{кэВ})$	Сечения, 10^{-16} см^2			$E(\text{кэВ})$	Сечения, 10^{-16} см^2		
	$Z = 80$	$Z = 85$	$Z = 90$		$Z = 80$	$Z = 85$	$Z = 90$
6.0	0.00018	0.00014	0.00011	25.0	2.89	3.05	3.12
6.5	0.12	0.0026	0.0012	30.0	3.05	3.25	3.36
7.0	0.085	0.022	0.015	40.0	3.25	3.47	3.59
7.5	0.291	0.122	0.091	50.0	3.35	3.63	3.77
8.0	0.528	0.411	0.354	75.0	3.50	3.75	3.90
9.0	0.926	0.918	0.910	100.0	3.55	3.80	3.96
10.0	1.24	1.25	1.26	150.0	3.57	3.83	4.01
12.0	1.71	1.75	1.78	200.0	3.58	3.84	4.03
14.0	2.04	2.17	2.22	250.0	3.56	3.835	4.035
16.0	2.29	2.39	2.48	300.0	3.57	3.83	4.01
20.0	2.63	2.78	2.86	400.0	3.54	3.80	3.99

Т а б л и ц а 1 e

Сечения реакции $A^{(q-1)+} + B^{Z+} \rightarrow A^{q+} + B^{(Z-1)+}$ в зависимости от энергии в системе ц.м. E при величинах зарядов $q = 10$, $Z = 80, 85, 90$

$E(\text{кэВ})$	Сечения, 10^{-16} см^2			$E(\text{кэВ})$	Сечения, 10^{-16} см^2		
	$Z = 80$	$Z = 85$	$Z = 90$		$Z = 80$	$Z = 85$	$Z = 90$
10.0	0.001	0.000	0.000	75.0	1.74	1.80	1.88
12.5	0.06	0.03	0.0146	100.0	1.81	1.88	1.97
15.0	0.40	0.36	0.315	125.0	1.84	1.95	2.05
17.5	0.66	0.57	0.53	150.0	1.855	1.96	2.06
20.0	0.83	0.84	0.85	175.0	1.870	1.975	2.08
25.0	1.09	1.01	0.97	200.0	1.882	1.99	2.09
30.0	1.263	1.32	1.37	250.0	1.890	2.00	2.098
35.0	1.38	1.45	1.48	300.0	1.898	2.02	2.11
40.0	1.47	1.57	1.615	350.0	1.887	2.03	2.12
45.0	1.53	1.61	1.68	400.0	1.888	2.04	2.11
50.0	1.597	1.71	1.77	450.0	1.89	2.03	2.10
60.0	1.655	1.75	1.82	500.0	1.883	2.02	2.088

Р. К. Янев и Л. П. Пресняков выражают благодарность Национальному институту управляемого синтеза (Токио, Япония), где в рамках программы международного сотрудничества была выполнена существенная часть данной работы. А. А. Нарич и Л. П. Пресняков благодарны Российскому фонду фундаментальных исследований (грант N 02-02-16274), а также Российской федеральной программе "Интеграция" за частичную поддержку работы.

Л И Т Е Р А Т У Р А

- [1] Gamow G. Zs. f. Phys., **51**, 204 (1928).
- [2] Adler K., Bohr A., Huis T., and Mottelson B. Rev. Mod. Phys., **28**, 432 (1956).
- [3] Janev R. K. and Belic D. C. J. Phys., **B15**, 3479 (1982).
- [4] Janev R. K., Presnyakov L. P., and Shevelko V. P. Physics of Highly Charged Ions (Springer, Berlin-Heidelberg, 1985).

- [5] Brandau C., Melchert F., Krudener S., et al. J. Phys., **B28**, L579 (1995).
- [6] Krudener S., Melchert F., Diemar K. V., et al. Phys. Rev. Lett., **79**, 1002 (1997).
- [7] Presnyakov L. P., Salzborn E., and Tawara H. Rearrangement Reactions in Ion-Ion Interactions, Chapter XVI in: Atomic Physics with Heavy Ions (eds. H. F. Beyer and V. P. Shevelko) (Springer, Berlin-Heidelberg, 1999, p. 349).
- [8] Melchert F. Ion-Ion Collisions, Chapter XV Ibid, p. 321.
- [9] Braeuning H., Trassl R., Diehl A., et al. Phys. Rev. Lett., **91**, 168301 (2003).
- [10] Presnyakov L. P. and Uskov D. B. Sov. Phys. – JETP, **59**, 515 (1984).
- [11] Keldysh L. V. Sov. Phys. – JETP, **20**, 1307 (1965).
- [12] Kondorskiy A. D. and Presnyakov L. P. JETP, **88**, 658 (1999).
- [13] Chibisov M. I. JETP Lett., **24**, 46 (1976).
- [14] Grozdanov T. P. and Janev R. K. Phys. Rev., **A17**, 880 (1978).
- [15] Landau L. D. and Lifshitz E. M. Quantum Mechanics (Pergamon, Oxford, 1995).

Поступила в редакцию 12 октября 2004 г.