

СЕЧЕНИЯ ЗАХВАТА ЭЛЕКТРОНОВ ИОНАМИ БОРА В ГАЗОВЫХ СРЕДАХ

И. С. Дмитриев, Я. А. Теплова, Ю. А. Белкова, Ю. А. Файнберг*

*Научно-исследовательский институт ядерной физики им. Д. В. Скобельцына
Московского государственного университета им. М. В. Ломоносова
119899, Москва, Россия*

Поступила в редакцию 3 декабря 2003 г.

Исследованы сечения $\sigma_{i,i-1}$, $\sigma_{i,i-2}$ и $\sigma_{i,i-3}$ захвата одного, двух и трех электронов ионами бора с зарядами $i = 1-5$ и скоростями $V = (1.83-5.50)V_0$ в газовых средах с атомными номерами от $Z_t = 1$ до $Z_t = 54$. Подтвержден осцилляционный характер зависимости сечений захвата электрона ионами бора от Z_t , установленный ранее для более легких ионов.

PACS: 34.50.Fa, 34.50.Gb, 34.70.+e

1. ВВЕДЕНИЕ

Теоретические оценки сечений захвата электронов $\sigma_{i,i-1}$ различными ионами легких элементов, основанные на статистической модели Томаса–Ферми, показали, что сечения возрастают монотонно при увеличении ядерного заряда атомов среды Z_t [1, 2]. Анализ экспериментальных данных в области относительно малых скоростей $V = (1-2)V_0$ ($V_0 = 2.19 \cdot 10^8$ см/с), при которых сечения захвата электрона достигают максимума, свидетельствуют также о том, что сечения $\sigma_{i,i-1}$ в среднем монотонно возрастают пропорционально $Z_t^{1/3}$ [2]. Однако дальнейшие экспериментальные исследования позволили установить некоторые нарушения такого характера зависимости $\sigma_{i,i-1}$ от Z_t . Определенные на основе экспериментальных данных сечения захвата электрона ионами бора, имеющими скорость $V = 1.83V_0$, в неоне в 1.5–2 раза меньше соответствующих величин в азоте [3]. Аналогичные отклонения наблюдаются и в области более высоких скоростей ионов. Исследования сечений захвата электрона ионами азота и неона при $V = 3.65V_0$ указали на то, что соответствующие сечения в неоне существенно больше, чем в азоте и аргоне [4, 5]. Изучение сечений захвата электрона ионами водорода и гелия в разных средах в широком диапазоне скоростей ионов показали, что изменение величины сечений $\sigma_{i,i-1}$ при возраста-

нии Z_t имеет вид осцилляций [6, 7]. Таким образом, можно считать, что реальная зависимость сечений захвата электрона легкими ионами от Z_t в области скоростей $V > 2V_0$ существенно отличается от монотонной, что, по-видимому, связано с оболочечным строением атомов среды.

В настоящей работе с целью исследования влияния структурных особенностей атомов среды на сечения захвата электронов $\sigma_{i,i-1}$ проведены измерения сечений для ионов бора с зарядами $i = 1-5$ при скоростях $V = (1.83-5.50)V_0$ в газах H_2 , He, N_2 , Ne, Ar, Kr и Xe, а также теоретические вычисления сечений захвата электрона теми же ионами в средах с $Z_t = 1-54$. Данная работа является продолжением исследований с ионами бора, опубликованных ранее в работе [3]. В дальнейшем изложении скорости ионов V даны в атомных единицах V_0 .

2. МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Эксперименты с ионами бора проводились на установке, описанной в работах [3, 8]. Выведенные из ускорителя ионы бора ^{11}B с зарядами $i = 1, 2, 3$ и скоростями $V = 1.83, 2.74, 3.65, 5.50$ после прохождения перезарядного устройства, где первичные ионы преобразовывались в пучки ионов бора B^{i+} с зарядами $i = 1-5$, направлялись в камеру столкновений. Распределение ионов бора по зарядам после прохождения камеры столкновений измерялось

*E-mail: teplova@anna19.npi.msu.su

с помощью системы регистрации, состоящей из магнитного анализатора и блока идентичных счетчиков. Из полученных зарядовых распределений методом, приведенным в работе [9], были найдены величины сечений $\sigma_{i,i-m}$ захвата одного, двух и трех электронов, где $m = 1, 2, 3$. Ошибки при определении сечений складывались, главным образом, из погрешностей в оценке толщины слоя газа в камере столкновений ($\sim 10\%$) и статистического разброса результатов нескольких серий измерений, что составило в среднем 10–15% для сечений захвата одного электрона, 20–30% для сечений захвата двух электронов и 50–70% для сечений захвата трех электронов. Сечения захвата электронов ионами бора при всех перечисленных скоростях в атомарном и молекулярном водороде [10] и в He, N₂, Ar, а также в Kr были измерены ранее [9, 11]. Все сечения $\sigma_{i,i-m}$ для ионов бора в Ne и Xe определены впервые в данной работе. Величины сечений $\sigma_{i,i-m}$ для скоростей ионов $V = 2.74, 3.65, 5.50$ приведены в таблице. Поскольку полученные в настоящих исследованиях и в работах [9, 11] величины сечений совпали в пределах 20–30%, в таблице приведены усредненные значения сечений.

3. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ РАСЧЕТА СЕЧЕНИЙ ЗАХВАТА ЭЛЕКТРОНА

В соответствии с анализом, проведенным в работе [3], полное сечение захвата электрона ионом, имеющим заряд i и скорость $V \sim 1-2$, пропорционально количеству вакансий $p_{i-1}(n)$ в ближайшей к ядру незаполненной электронной оболочке с главным квантовым числом n :

$$\sigma_{i,i-1} = p_{i-1}(n) \pi a_0^2 \frac{I_{i-1}}{I_0} Z_t^{1/3} V^{-3}, \quad (1)$$

где I_{i-1} — энергия связи захватываемого электрона, $I_0 = 13.6$ эВ, $a_0 = 5.29 \cdot 10^{-9}$ см.

Для ионов бора значения $p_{i-1}(n)$ уменьшаются от $p_2(2) = 8$ для ионов B³⁺ до $p_0(2) = 6$ для ионов B⁺. При дальнейшем возрастании скорости ионов до $V \sim 3-5$ величины сечений $\sigma_{i,i-1}$ могут быть оценены по формуле Бора для сечений захвата электрона легкими ионами в средах с $Z_t \geq 2$ [1, 2, 12]:

$$\sigma_{i,i-1} = 4\pi a_0^2 i^3 Z_t^{1/3} V^{-5}. \quad (2)$$

В случае захвата электрона быстрым ионом из заполненной оболочки атома среды n_t в оболочку иона n_f парциальное сечение $\sigma_{i,i-1}(n_t \rightarrow n_f)$

может быть рассчитано в приближении Оппенгеймера–Бринкмана–Крамерса (ОВК) [13, 14]. Расчеты $\sigma_{i,i-1}^{OBK}$ проведены для сечений захвата электрона ионами бора с зарядами $i = 1-5$ и скоростями $V = 1.83, 2.74, 3.65, 5.50$ в средах с $Z_t = 1-54$. Методика расчета сечений аналогична предложенной в работе [6] для ионов гелия.

Основным недостатком приближения ОВК является существенное завышение вычисленных сечений захвата электрона по сравнению с экспериментальными значениями. В связи с этим расчетные величины сечений захвата были нормированы на экспериментальные данные для ионов бора при указанных выше скоростях в азоте. Коэффициент нормировки

$$R(V, Z) = \frac{\sigma_{i,i-1}^{exp}}{\sigma_{i,i-1}^{OBK}}$$

при скоростях $V = 1.83, 2.74, 3.65, 5.50$ для ионов бора равен соответственно $R(V, 5) = 0.03, 0.06, 0.09, 0.15$. Из предшествующих работ известно, что значение $R(V, 1)$ для водорода ($Z = 1$) изменяется от 0.13 при $V = 3.65$ до 0.18 при $V = 5.50$ [6]. Для ионов гелия ($Z = 2$) величина $R(V, 2)$ возрастает от 0.04 при $V = 1.2$ до 0.18 при $V = 3.65-10$ [7]. Перечисленные данные позволили представить нормировочный коэффициент в виде эмпирического выражения:

$$R(V, Z) = 0.295 [(0.54V/Z)^{-1.6} + 1]^{-1}. \quad (3)$$

Значения $R(V, Z)$, определенные по формуле (3), в пределах $\pm 30\%$ согласуются с большинством приведенных выше величин $R(V, Z)$. Формула (3) представляет собой модификацию аналогичного выражения из работы [14].

4. АНАЛИЗ ПОЛУЧЕННЫХ ДАННЫХ

На рис. 1 представлены величины сечений захвата электрона $\sigma_{i,i-1}$ в зависимости от Z_t , полученные в экспериментальных исследованиях и рассчитанные с использованием различных приближений. При скорости $V = 1.83$ сечения $\sigma_{i,i-1}$ для ионов бора с зарядами $i = 2, 3$ возрастают с ростом Z_t пропорционально $Z_t^{1/3}$. Определенные по формуле (1) величины сечений удовлетворительно согласуются с данными эксперимента. Заметное отклонение от указанной зависимости наблюдается только для сечений захвата электрона ионами B²⁺ в азоте и неоне. Расчеты в приближении ОВК для сечений захвата электрона приводят к качественно иной зависимости, которая не является монотонной, а имеет вид чередующихся максимумов и минимумов при общем

Сечения $\sigma_{i,i-m}$ захвата электронов (в единицах 10^{-16} см²/ат.)

$i, i-m$	H ₂	He	N ₂	Ne	Ar	Kr	Xe
$V = 2.75$							
1, 0	0.018	0.09	0.04	0.19	0.10		
2, 1	0.08	0.36	0.43	0.85	0.63	0.9	
2, 0		0.0036	0.3	0.018	0.004		
3, 2	0.29	0.8	1.0	1.60	1.7	2.3	
3, 1	0.0017	0.04	0.04	0.07	0.05	0.1	
4, 3	0.54	2.0	2.1	3.6	4.0		
4, 2		0.05	0.1	0.24	0.22		
4, 1				0.02	0.01		
$V = 3.65$							
1, 0			0.012				0.03
2, 1	0.008	0.05	0.09	0.18	0.10	0.13	0.16
2, 0			0.01				0.01
3, 2	0.016	0.12	0.24	0.5	0.35	0.50	0.80
3, 1		0.003	0.012	0.007		0.015	0.03
4, 3	0.05	0.40	0.80	1.9	1.0	1.60	2.4
4, 2		0.03	0.03	0.09	0.063	0.14	0.2
4, 1			0.005	0.01		0.03	0.012
5, 4	0.12	0.70	1.4	3.0	1.80	2.1	3.0
5, 3		0.2	0.16	0.35	0.30	0.60	0.71
5, 2			0.03	0.04		0.1	0.1
$V = 5.50$							
3, 2	0.002	0.008	0.03	0.13	0.035		
3, 1				0.001			
4, 3	0.0043	0.03	0.13	0.30	0.35	0.48	
4, 2		0.0002	0.0035	0.004	0.016	0.027	
5, 4	0.009	0.07	0.25	0.70	0.50	0.83	
5, 3	0.0006	0.0012	0.045	0.055	0.18		
5, 2			0.0008	0.006	0.014		

среднем возрастании величины $\sigma_{i,i-1}$ с увеличением Z_t как $Z_t^{1/3}$. Проведенные расчеты в приближении ОВК позволяют описать отклонение сечений захвата электрона от рассчитанных по формуле (1) в азоте и неоне (см. рис. 1а). При возрастании скорости ионов зависимость сечений захвата электрона от Z_t становится явно немонотонной. Увеличивается отклонение экспериментальных данных относительно рассчитанных по формуле (2) для скоростей ионов $V = 3.65$, особенно при увеличении заряда иона.

Применимость ОВК-приближения при увеличении скорости ионов более оправдана [6], и на рис. 1б, в при $V = 5.5$ видно улучшение соответствия расчетных значений сечений захвата электрона экспериментальным данным.

Результаты настоящего исследования показывают, что из-за оболочечного строения атомов среды и резонансного характера процесса захвата электронов в зависимости полных сечений $\sigma_{i,i-1}$ от Z_t образуются максимумы, каждый из которых соответ-

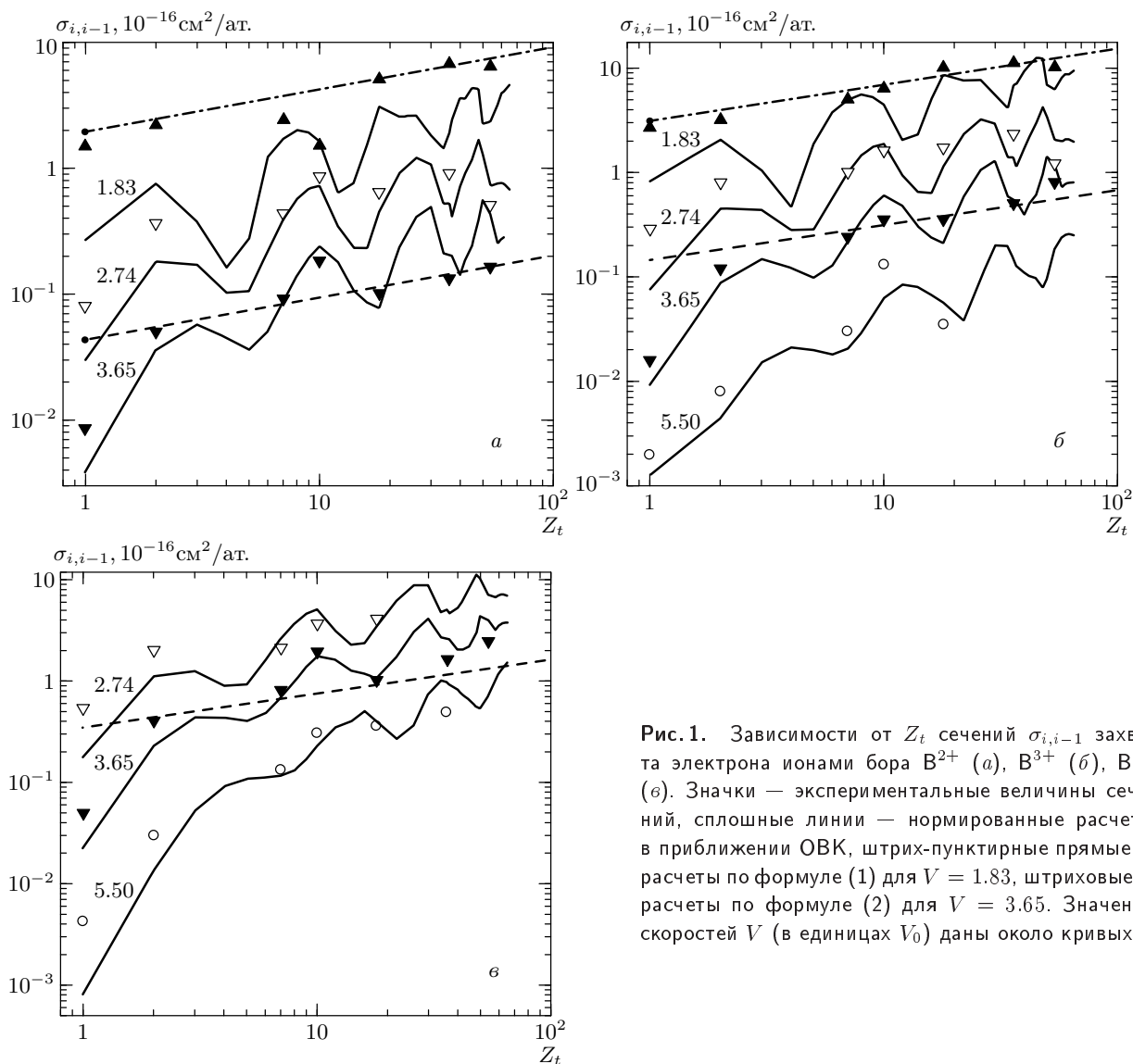


Рис. 1. Зависимости от Z_t сечений $\sigma_{i,i-1}$ захвата электрона ионами бора B^{2+} (а), B^{3+} (б), B^{4+} (в). Значки — экспериментальные величины сечений, сплошные линии — нормированные расчеты в приближении ОВК, штрих-пунктирные — расчеты по формуле (1) для $V = 1.83$, штриховые — расчеты по формуле (2) для $V = 3.65$. Значения скоростей V (в единицах V_0) даны около кривых

ствует максимальному вкладу парциальных сечений захвата электронов из отдельных атомных оболочек K , L и M среды. Представленные на рис. 1 результаты подтверждают это для ионов бора. В рамках приближения ОВК можно объяснить и тот факт, что с увеличением скорости ионов максимумы сдвигаются в сторону больших Z_t . Действительно, сечения ОВК достигают максимальных значений, когда энергия связи электрона в одной из оболочек атома среды становится равной $I_t = (I_V + 2I_{ion})/3$, где I_t и I_{ion} — соответственно, энергии связи электрона в атоме мишени и быстром ионе, $I_V = \mu V^2/2$ — переносная энергия электрона [6, 7]. При увеличении скорости иона значение I_t , при котором сечение захвата

электрона максимально, возрастает, что приводит к соответствующему увеличению Z_t , при котором данный максимум наблюдается.

Появление осцилляций в зависимости сечений захвата электрона от Z_t вызывается, главным образом, усилением влияния внутренней и внешней экранировки на среднюю орбитальную скорость и энергию связи электронов внешних оболочек атомов среды при увеличении их главного квантового числа n . Это приводит к возрастанию относительной разницы между сечениями для состояний с соседними значениями n . Неполное заполнение внешних электронных оболочек приводит к углублению минимумов в зависимости сечений $\sigma_{i,i-1}$ от Z_t . Из приведен-

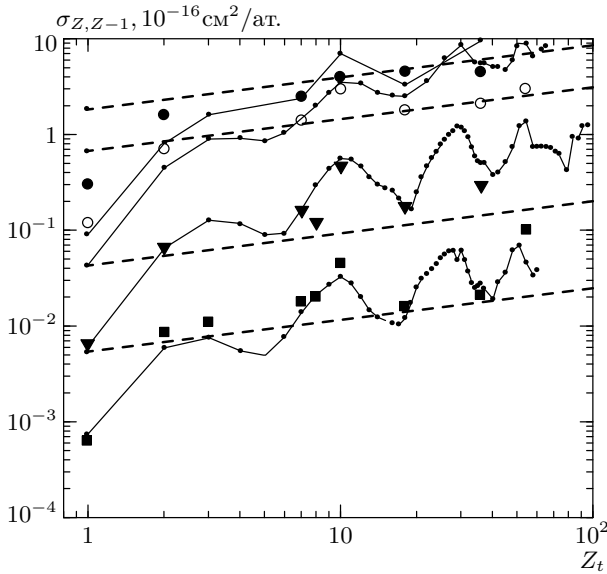


Рис. 2. Зависимости от Z_t сечений $\sigma_{Z,Z-1}$ захвата электрона ядрами водорода, гелия, бора и азота при скорости $V = 3.65$. Экспериментальные данные: \blacksquare — H^+ [4], \blacktriangledown — He^{2+} [3], \circ — B^{5+} , настоящая работа, \bullet — N^{7+} [5]. Сплошные линии — нормированные расчеты в приближении ОВК, штриховые прямые — расчеты по формуле (2)

ных результатов видно, что наибольшая амплитуда осцилляций (т. е. разность между максимальными и минимальными величинами сечений) для ионов бора в области $Z_t = 7-18$ (N, Ne, Ar) наблюдается при скорости частиц $V = 3.65$. При этом амплитуда осцилляций уменьшается с увеличением заряда ионов бора и становится наименьшей для ядер B^{5+} (рис. 1, 2). При дальнейшем увеличении скорости ионов осцилляционная зависимость сечений от Z_t постепенно ослабевает и при $V > 20$ эта зависимость становится практически опять монотонной [6].

На рис. 2 представлены для сравнения известные экспериментальные и теоретические величины сечений $\sigma_{Z,Z-1}$ захвата электрона ядрами водорода H^+ [6], гелия He^{2+} [7], бора B^{5+} и азота N^{7+} [5] при скорости $V = 3.65$ в различных средах. В интервале $Z_t = 2-54$ величины $\sigma_{Z,Z-1}$ возрастают в среднем как $Z_t^{1/3}$, что приблизительно согласуется с расчетами, проведенными по формуле Бора (2). Однако на рисунке видны отклонения экспериментальных данных от указанной зависимости. Так, для $Z_t = 1$ значения сечений $\sigma_{Z,Z-1}$ для рассмотренных ядер отличаются от рассчитанных по формуле (2) примерно в 10 раз. В отличие от модели независимых электронов расчеты в приближении ОВК качествен-

но совпадают с экспериментальной зависимостью сечений $\sigma_{Z,Z-1}$ от Z_t , в том числе и для $Z_t = 1$. Приведенные результаты показывают, что для рассмотренных ядер в зависимости сечений захвата электрона от Z_t имеют место осцилляции, амплитуда которых убывает с увеличением заряда ядра иона Z .

При рассмотрении сечений захвата двух электронов были использованы также экспериментальные данные для ионов бора при скоростях $V = 1.19, 1.82$. Проведен расчет отношений сечений захвата двух электронов к сечениям захвата одного электрона ионами бора, $\eta_2 = \sigma_{i,i-2}/\sigma_{i,i-1}$. Указанные отношения в пределах точности экспериментальных измерений остаются постоянными для сечений захвата электронов во всех рассмотренных газовых средах, за исключением криптона и ксенона. Это позволило усреднить η_2 по различным средам, в результате чего минимальное значение $\eta_2 = 0.004 \pm 0.001$ получено для случая захвата двух электронов ионами B^+ с образованием отрицательных ионов B^- . Для ионов бора с зарядами $i = 2-5$ отношение $\eta_2 = 0.09 \pm 0.05$.

Сечение $\sigma_{i,i-3}$ захвата трех электронов в 3-5 раз меньше сечений захвата двух электронов $\sigma_{i,i-2}$. Отношения $\eta_3 = \sigma_{i,i-3}/\sigma_{i,i-1}$ для захвата трех электронов получены только при скоростях ионов бора $V = 3.65, 5.50$ и приближенно равны $\eta_3 \approx 0.02 \pm 0.01$.

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Установлено, что величины сечений $\sigma_{i,i-1}$, полученные на основе экспериментальных данных, в среднем возрастают с ростом Z_t как $Z_t^{1/3}$ и удовлетворительно описываются моделью независимых электронов в области малых скоростей. Однако из анализа экспериментальных данных выявлено нарушение монотонности в зависимости $\sigma_{i,i-1}$ от Z_t : в области малых скоростей сечения в неоне в 2-3 раза меньше соответствующих величин в азоте и аргоне. При увеличении скорости ионов зависимость сечений захвата электрона от Z_t становится явно немонотонной.

Проведенные в приближении ОВК расчеты удовлетворительно описывают осцилляции, имеющие место в зависимости сечений $\sigma_{i,i-1}$ от Z_t . Для нормировки сечений захвата электронов $\sigma_{i,i-1}$, вычисленных в приближении ОВК, предложена единая для различных ионов легких элементов эмпирическая формула.

Результаты проведенных расчетов позволяют проанализировать изменение осцилляций сечений в зависимости от скоростей и зарядов ионов. С уве-

личением V положение экстремумов в зависимости сечений $\sigma_{i,i-1}$ от Z_t смещается в сторону больших Z_t . Амплитуда осцилляций зависит как от ионного заряда i , так и от заряда ядра иона Z . Увеличение ионного заряда приводит к уменьшению амплитуды осцилляций, которая становится минимальной для ядер. При возрастании заряда ядра иона амплитуда осцилляций также уменьшается, если рассматривать сечения захвата электрона ядрами элементов, при этом для случая захвата электрона ионами зависимость сечений от Z более сложная. Анализ зависимости амплитуды осцилляций от скорости V позволяет определить интервал скоростей, в котором учет осцилляций в зависимости $\sigma_{i,i-1}$ от Z_t является необходимым.

Таким образом, можно считать установленным, что при скоростях ионов $V = 2-10$ сечения захвата электрона ионами легких элементов ($Z = 1-7$) испытывают осцилляции в зависимости от Z_t , и это связано с особенностями оболочечного строения атомов среды.

ЛИТЕРАТУРА

1. В. С. Николаев, УФН **85**, 678 (1965).
2. Н. Бор, *Проложение атомных частиц через вещество*, Изд-во иностр. лит., Москва (1950).
3. И. С. Дмитриев, Я. А. Теплова, Ю. А. Файнберг, ЖЭТФ **116**, 1539 (1999).
4. И. С. Дмитриев, Ю. А. Ташаев, В. С. Николаев и др., ЖЭТФ **73**, 1684 (1977).
5. И. С. Дмитриев, Я. А. Теплова, Ю. А. Файнберг, ЖЭТФ **108**, 75 (1995).
6. И. С. Дмитриев, Н. Ф. Воробьев, Ж. М. Коновалова и др., ЖЭТФ **84**, 1987 (1983).
7. В. С. Николаев, И. С. Дмитриев, Я. А. Теплова, Ю. А. Файнберг, Вестник МГУ, сер. 3, физика, астрон. **86**, № 5, 21 (1994).
8. Я. А. Теплова, И. С. Дмитриев, в сб. *Развитие научных исследований по ядерной и атомной физике в НИИЯФ МГУ*, изд-во МГУ, Москва (1994), с. 132.
9. В. С. Николаев, И. С. Дмитриев, Л. Н. Фатеева, Я. А. Теплова, ЖЭТФ **40**, 989 (1961).
10. T. V. Goffe, M. V. Shah, and H. V. Gilbody, J. Phys. B **12**, 3763 (1979).
11. В. С. Николаев, Л. Н. Фатеева, И. С. Дмитриев, Я. А. Теплова, ЖЭТФ **41**, 89 (1961).
12. N. Bohr and J. Lindhard, Dan. Mat. Fys. Medd. **28**, 1 (1957).
13. M. C. Brinkman and H. A. Kramers, Proc. Acad. Sci. Amsterdam **33**, 973 (1930).
14. В. С. Николаев, ЖЭТФ **51**, 1263 (1966).