

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНЫХ СЕЧЕНИЙ РАЗРУШЕНИЯ И ОБРАЗОВАНИЯ БЫСТРЫХ ОТРИЦАТЕЛЬНЫХ ИОНОВ В АТОМНЫХ СТОЛКНОВЕНИЯХ

И. С. Дмитриев, В. С. Николаев, Я. А. Теплова,
Б. М. Попов, Л. И. Виноградова

Измерены эффективные сечения потери одного, двух и трех электронов в гелии, азоте и аргоне для отрицательных ионов углерода, азота и кислорода, образованных в результате перезарядки положительных ионов, ускоренных в 72-сантиметровом циклотроне до скорости $v = 2,6 \cdot 10^8$ см/сек. Сечение одновременной потери двух электронов отрицательными ионами составляет около 50—70% от величины сечения потери одного электрона. Сравнение полученных данных с известными сечениями потери электронов другими отрицательными и положительными ионами показывает, что специфика отрицательных ионов, выражающаяся в слабой связи внешнего электрона с остовом иона, мало сказывается на рассмотренных характеристиках взаимодействия с веществом отрицательных ионов со скоростью $v = 2,6 \cdot 10^8$ см/сек.

Для углерода и кислорода получены данные о величинах сечений образования отрицательных ионов в результате захвата двух электронов положительными ионами и захвата одного электрона нейтральными атомами. Кроме того, получены равновесные значения Φ_{-1} доли отрицательных ионов углерода и кислорода в пучке, прошедшем достаточно толстый слой вещества. Максимальные значения Φ_{-1} получены в средах, где сечения образования отрицательных ионов при данной скорости достигают максимума.

1. Введение

Изучение процесса ионизации быстрых многозарядных ионов при столкновении их с атомами газа показало, что при фиксированной скорости сталкивающихся частиц $v \geq v_0 = 2,19 \cdot 10^8$ см/сек среднее сечение потери отдельного электрона из внешней оболочки иона σ_i определяется его ионизационным потенциалом I_i и не зависит от числа электронов в оболочке, причем с изменением I_i от 700 до 10 эв величина σ_i монотонно возрастает [1].

В какой степени аналогичные закономерности свойственны отрицательным ионам с величиной I_i на порядок меньшей, чем у положительных ионов, в настоящее время трудно предсказать из-за недостаточного количества экспериментальных данных. Действительно, в области скоростей $v \geq v_0$ процессы потери электронов изучались лишь для ионов H^- [2] и для ионов Li^- [2, 3]. В случае более тяжелых ионов аналогичные измерения производились только в области $v \ll v_0$ [4–6], где указанные закономерности не выявлялись.

Поэтому в настоящей работе были измерены сечения потери одного, двух и трех электронов ионами C^- , N^- , O^- в гелии, азоте и аргоне при скорости ионов $v = 2,6 \cdot 10^8$ см/сек (энергия ≈ 35 кэв/нуклон), при которой ранее были известны сечения потери электронов для большого числа положительных ионов [7]. Одновременно были получены данные о величинах сечений образования отрицательных ионов углерода и кислорода σ_{-1} в результате захвата двух электронов соответствующими однозарядными

положительными ионами, а также равновесные значения доли отрицательных ионов $\Phi_{-1, \infty}$ в пучке, прошедшем достаточно толстый слой вещества. Из экспериментальных данных по сечениям и равновесному распределению ионов по зарядам были вычислены величины сечений образования быстрых отрицательных ионов $\sigma_{0, -1}$ в результате захвата электронов нейтральными атомами. До сих пор были известны данные относительно величин $\sigma_{0, -1}$, $\sigma_{1, -1}$ и $\Phi_{-1, \infty}$ лишь в области скоростей $v \lesssim 1 \cdot 10^8$ см/сек [8-11].

2. Описание эксперимента

Экспериментальные измерения производились на масс-спектрометрической установке, схематически изображенной на рис. 1 и подробно описанной ранее [12]. Положительные однозарядные ионы ускорялись в 72-сантиметровом циклотроне при частоте ускоряющего электрического

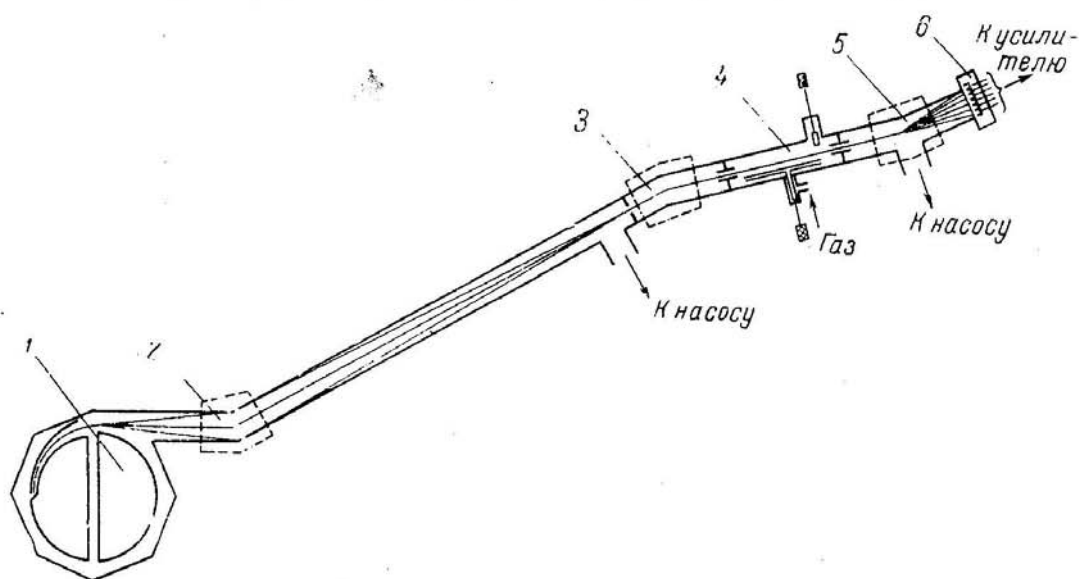


Рис. 1. Схема эксперимента. 1 — циклотрон, 2 — фокусирующий магнит, 3 — масс-монокроматор, 4 — камера столкновений, 5 — анализатор, 6 — детекторы

поля 4,2 МГц на так называемой «третьей гармонике» [13]. Интенсивность выведенных из циклотрона пучков ионов углерода $^{12}\text{C}^+$, азота $^{14}\text{N}^+$ и кислорода $^{16}\text{O}^+$ составляла 0,3—0,5 мка. Отрицательные ионы получались в процессе перезарядки положительных ионов на атомах остаточного газа на участке ионпровода между фокусирующим магнитом 2 и масс-монокроматором 3 (эквивалентная толщина мишени $\sim 10^{14}$ атомов/см²). Выделенный масс-монокроматором пучок отрицательных ионов направлялся в камеру столкновений 4, представлявшую собой проточную газовую мишень.

Зарядовый состав ионного пучка, прошедшего через камеру столкновений, определялся магнитным анализатором 5 с системой пропорциональных счетчиков 6. Во время измерения сечений потери электрона отрицательными ионами средняя плотность потока положительных ионов азота N^+ перед масс-монокроматором составляла $\sim 10^{11}$ частиц/см²·сек, ионов C^+ и O^+ была равна $\sim 10^{10}$ частиц/см²·сек, а отрицательных ионов в камере столкновений — $\sim 10^4$ частиц/см²·сек для $^{14}\text{N}^-$ и $\sim 10^5$ частиц/см²·сек для $^{12}\text{C}^-$ и $^{16}\text{O}^-$. При ускорении ионов азота ионный источник циклотрона работал в форсированном режиме, тогда как для ионов кислорода такой ток не являлся максимальным.

Изучение сечений образования отрицательных ионов $\sigma_{i,-1}$, а также равновесных долей отрицательных ионов в пучке $\Phi_{-1,\infty}$ производилось для ионов углерода $^{12}\text{C}^+$ и кислорода $^{16}\text{O}^+$. При исследовании равновесного распределения в газообразных веществах на пути пучка устанавливался узкий канал с газом; в твердом веществе равновесие достигалось в мишени — целлулоидной пленке толщиной $\sim 5 \text{ мкг/см}^2$.

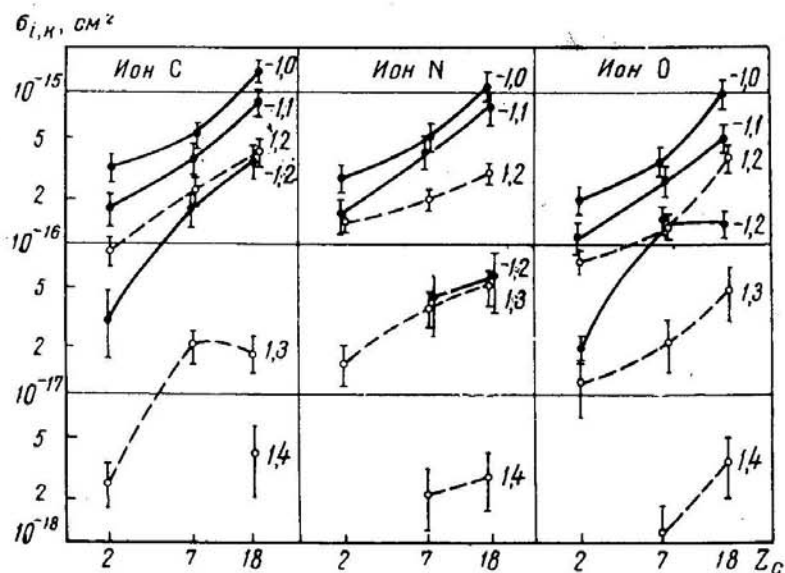


Рис. 2. Зависимость сечений потери одного, двух и трех электронов отрицательными ионами C^- , N^- и O^- (сплошные линии) и положительными ионами C^+ , N^+ и O^+ (пунктир) в зависимости от атомного номера мишени Z_c при скорости ионов $v = 2,6 \cdot 10^8 \text{ см/сек}$. Цифрами указаны начальный и конечный заряды иона

Величины сечений потери одного электрона $\sigma_{-1,0}$ были измерены с точностью около 20%, а сечения потери и захвата двух электронов $\sigma_{-1,1}$ и $\sigma_{1,-1}$ — с точностью $\sim 30\%$. Погрешность в измерении сечений потери трех электронов могла достигать до 50%.

4. Потеря электронов отрицательными ионами

Величины сечений потери электронов отрицательными ионами, рассчитанные на атом среды, представлены на рис. 2 и 3. Там же для сравнения приведены аналогичные данные для положительных ионов [7]. Как видно из рис. 2, при увеличении атомного номера мишени Z_c от 2 до 18 сечение потери электронов отрицательными ионами возрастает как $Z_c^{2/3}$, т. е. примерно таким же образом, как и сечение потери электрона положительными ионами. Максимальная величина сечений получена для ионов углерода $^{12}\text{C}^-$ и с увеличением заряда ядра ионов монотонно убывает.

При уменьшении заряда иона i от 3 до -1 (рис. 3) зависимость сечения удаления электронов $\sigma_{i,i+s}$ (где $s = 1, 2, 3$ — число удаляемых электронов) от i быстро ослабевает. В частности, при переходе от нейтральных частиц к отрицательным величина сечения $\sigma_{i,i+1}$ возрастает всего в 1,2—1,5 раза. Следовательно, существенное уменьшение ионизационного потенциала при переходе к отрицательным ионам не приводит к резкому изменению сечений потери электронов. С уменьшением исходного заряда иона i кривые $\sigma_{i,i+s}(v)$ для $s = 1, 2$ и 3 сближаются. В связи

с этим относительная вероятность одновременной потери двух электронов для отрицательных ионов оказывается большей, чем для положительных ионов. Для ионов $^{12}\text{C}^-$, $^{14}\text{N}^-$, $^{16}\text{O}^-$ отношение $\sigma_{-1,1}/\sigma_{-1,0}$ составляет величину порядка 0,6—0,7, в то время как для положительных ионов этих элементов соответствующее отношение $\sigma_{1,3}/\sigma_{1,2} \sim 0,1-0,2$ (однако для ионов H^- отношение $\sigma_{-1,1}/\sigma_{-1,0}$ значительно меньше и равно 0,07 в гелии и 0,2 в азоте [2]).

Таким образом, с добавлением очень слабо связанного электрона относительная вероятность процесса потери отдельного электрона не только не увеличивается, но даже несколько уменьшается. Следовательно, можно считать, что принятое для положительных ионов [7] выражение для величины среднего сечения потери отдельного электрона из внешней оболочки иона $\sigma_i = q^{-1} \sum s \sigma_{i,i+s}$ (i — начальный заряд иона, q — эффективное число электронов, участвующих в соударении) будет справедливым и для отрицательных ионов с тем отличием, что вклад в $q \sigma_i$ сечения потери одного электрона $\sigma_{i,i+1}$ уменьшается по сравнению с этой величиной для положительных ионов; если для положительных ионов величина $\sigma_{1,2}$ составляет $\sim 70\%$ от $q \sigma_i$, то для отрицательных ионов величина $\sigma_{-1,0}$ составляет всего $\sim 40\%$ от $q \sigma_i$. При расчете σ_i величина q выбиралась из двух предположений. В первом предположении q считалось равным q_L — числу L -электронов в ионах C^- , N^- и O^- , т. е. соответственно 5, 6, 7. Во втором $q = q_L - 2$, т. е. предполагалось, что $2s$ -электроны не дают заметного вклада в сечение потери электрона. Полученные значения σ_i для отрицательных ионов в гелии (включая данные для H^- и Li^- из [2, 3]) нанесены в зависимости от I_i на рис. 4. Там же приведены аналогичные данные для положительных ионов [7].

При $v = 2,6 \cdot 10^8$ см/сек борновское приближение для процесса потери электронов в гелии должно давать правильный результат только для ионов с $I_i = (15-30)I_0$ ($I_0 = 13,55$ эв) [14]. Однако сравнение с экспериментом показывает, что это приближение верно в более широком интервале I_i и с точностью 20% дает правильную величину сечения $\sigma_{i,i+1}$ вплоть до значения $I_i \sim 2I_0$. Поэтому в дополнение к экспериментальным точкам на рис. 4 представлена теоретическая кривая зависимости σ_i от I_i , полученная в борновском приближении [14]. В области $I_i \geq I_0$ эта кривая была вычислена для водородоподобных ионов. Однако, как показывают теория [14] и опыт [7], результаты расчета могут быть использованы и при оценке сечений потери электрона из L -оболочки. В области $I_i < I_0$ борновское приближение совпадает с приближением свободных столкновений, справедливым для потери электронов из любых оболочек [14].

Для отрицательных ионов зависимость σ_i от I_i не является монотонной. Однако экспериментальные точки в большинстве случаев лежат выше теоретической кривой, вычисленной в борновском приближении, и, как

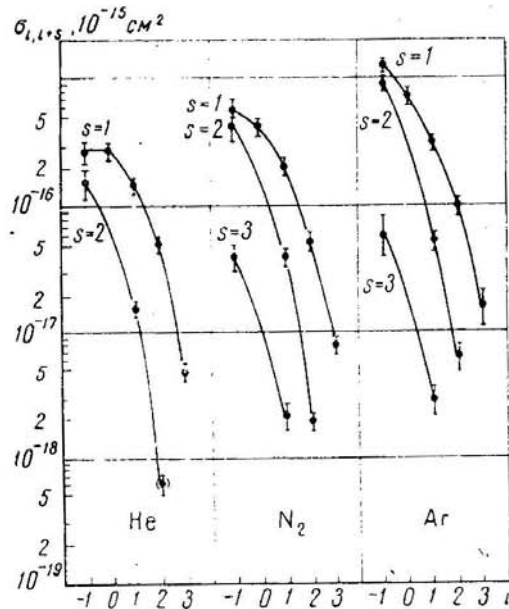


Рис. 3. Зависимость сечения потери одного ($s = 1$), двух ($s = 2$) и трех ($s = 3$) электронов ионами азота в зависимости от начального заряда иона i в гелии, азоте и аргоне

и следовало ожидать [15], не превышают полного сечения рассеяния свободного электрона со скоростью $v = 2,6 \cdot 10^8$ см/сек на атоме гелия $\sigma_e = 2,5 \cdot 10^{-16}$ см² [16]. Известно, что правильное значение сечения рассеяния электронов такой скорости получается лишь при учете поляризации атома. Можно думать, что при малых, приближающихся к нулю I_i правильное теоретическое значение сечения потери электрона будет полу-

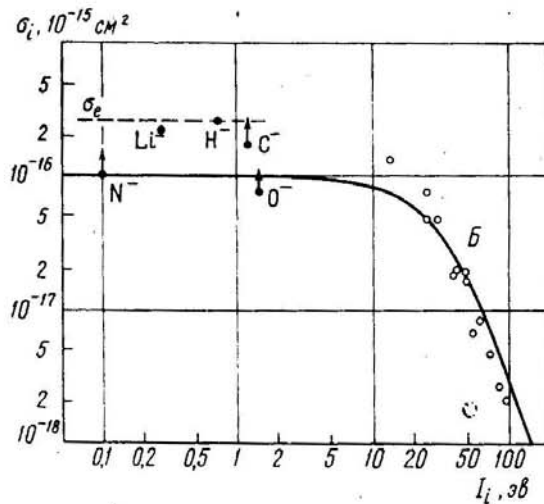


Рис. 4

Рис. 4. Сечение потери отдельного электрона σ_i в зависимости от I_i в гелии. Значения σ_i для отрицательных ионов обозначены черными точками с символом иона (при $q = q_L$) и стрелками (при $q = q_L - 2$) (см. текст). Значения σ_i в интервале $10 \text{ эВ} < I_i < 100 \text{ эВ}$ для положительных ионов [7] обозначены светлыми кружками. Б — (сплошная линия) — теоретическая кривая [14]. σ_e (пунктир) — экспериментальная величина сечения рассеяния электронов σ_e при $E_e = 20 \text{ эВ}$ [16]

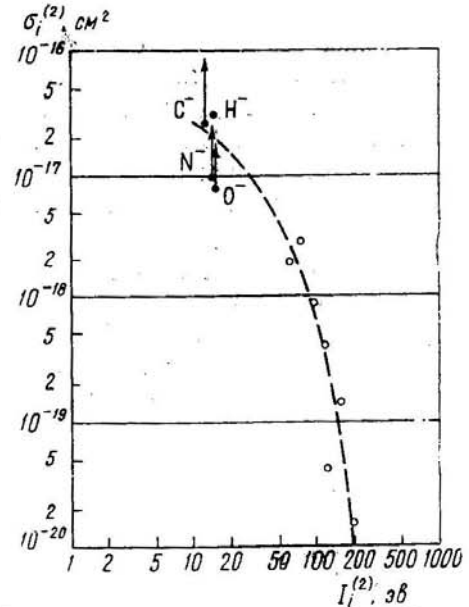


Рис. 5

Рис. 5. Сечение потери пары электронов $\sigma_i^{(2)}$ в зависимости от $I_i^{(2)} = I_i + I_{i+1}$ в гелии. Обозначения экспериментальных точек те же, что и на рис. 4

таться также только при учете поляризации. Возможно, что и обнаруженная на опыте немонотонная зависимость σ_i от I_i вызвана влиянием поляризации атомов, величина которой зависит от структурных особенностей соударяющихся частиц.

Кроме сечений потери отдельного электрона σ_i , из экспериментальных данных были вычислены сечения потери пары электронов [7]

$$\sigma_i^{(2)} = \frac{2}{q(q-1)} \sum \frac{s(s-1)}{2} \sigma_{i, i+s}.$$

Величины $\sigma_i^{(2)}$ в зависимости от $I_i^{(2)} = I_i + I_{i+1}$ — суммы энергий связи первого и второго удаляемых электронов представлены на рис. 5. На этом рисунке приведены значения $\sigma_i^{(2)}$ для положительных ионов [7] (светлые кружки). Как видно из рисунка, значения $\sigma_i^{(2)}$ для отрицательных ионов (черные точки) лежат на продолжении зависимости $\sigma_i^{(2)}$ от $I_i^{(2)}$, полученной для положительных ионов.

Следует отметить, что величины отношений

$$\sigma_i^{(2)} / \sigma_i \approx [2 / (q-1)] \sigma_{i, i+2} / \sigma_{i, i+1}$$

определяющие среднюю вероятность потери второго электрона [7], для всех отрицательных ионов (в том числе и для ионов H^-) близки к соответствующим величинам для положительных ионов, составляя величину порядка $-0,1 \div 0,2$ (в случае $q = Z_L$). Поэтому относительно большое сечение потери двух электронов $\sigma_{-1,1}$ ионами C^- , N^- и O^- по сравнению с H^- может быть объяснено увеличением числа электронов ($q-1$) в соответствующих нейтральных атомах.

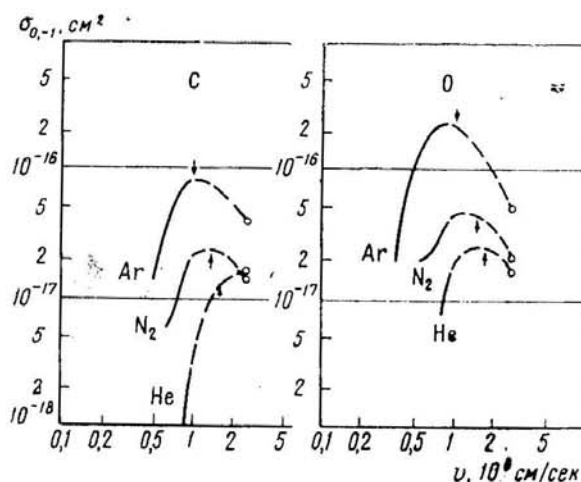


Рис. 6. Сечение захвата одного электрона $\sigma_{0,-1}$ атомами C и O в He, N_2 и Ar в зависимости от v . $\circ$ — значения $\sigma_{0,-1}$, полученные в настоящей работе; сплошные линии — результаты измерений из [10]. Стрелками указано ожидаемое положение максимума v_{max} .

В заключение можно сказать, что рассмотрение различных процессов взаимодействия отрицательных ионов с веществом при $v > v_0$ показало, что специфика отрицательных ионов, выражающаяся в слабой связи внешнего электрона с остовом иона, почти никак не сказывается на абсолютных и относительных величинах характеристик взаимодействия ионов с веществом.

4. Сечения образования отрицательных ионов и доля их в равновесном распределении ионов по зарядам

Полученные в настоящей работе экспериментальные данные относительно величин сечений потери и захвата электронов $\sigma_{i,-1}$, $\sigma_{-1,-1+s}$, а также $\Phi_{i,\infty}$ — доли ионов с зарядом i в равновесном распределении, позволили вычислить сечения образования отрицательных ионов $\sigma_{0,-1}$ из нейтральных атомов. Для этого использовалась формула

$$\sigma_{0,-1} = \frac{\Phi_{-1,\infty}}{\Phi_{0,\infty}} \sum \sigma_{-1,-1+s} - \frac{\Phi_{1,\infty}}{\Phi_{0,\infty}} \sigma_{1,-1}.$$

Полученные значения сечений $\sigma_{0,-1}$ и $\sigma_{1,-1}$ представлены на рис. 6 и 7. Там же приведены экспериментальные данные об аналогичных сечениях, полученные в работах Фогеля и др. [8-10]. Стрелками на рисунках показаны положения скоростей v_{max} , при которых величины $\sigma_{0,-1}$ и $\sigma_{1,-1}$ должны достигать максимальной величины. Значения v_{max} были оценены из известного соотношения $a|\Delta E|/h v_{max} = 1$ [17], в котором для случая захвата од-

ного электрона величина a равнялась $3 \text{ \AA}$ [10], а для захвата двух электронов — $1,5 \text{ \AA}$ [9]. Из рисунков видно, что результаты настоящей работы не противоречат данным в области меньших скоростей и выводам Фогеля о положении максимума в зависимостях сечений от скорости.

Полученные данные о сечениях захвата одного и двух электронов позволяют дать оценку роли этих процессов в образовании отрицательных

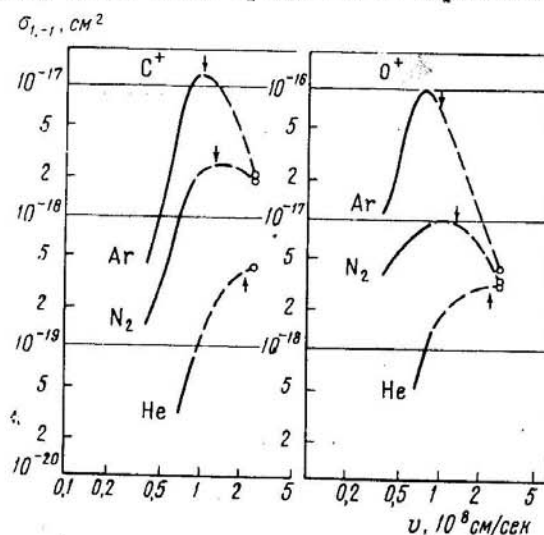


Рис. 7. Сечение захвата двух электронов $\sigma_{1,-1}$ ионами C^+ и O^+ в He, N_2 и Ar в зависимости от v . $\circ$ — значения $\sigma_{1,-1}$, полученные в настоящей работе; сплошные линии — результаты измерений из работ [8, 9]. Стрелками указано ожидаемое положение максимума v_{max} .

ионов $\Phi_{-1,\infty}$ в равновесном распределении по зарядам. Эта оценка показала, что при $v = 2,6 \cdot 10^8 \text{ см/сек}$ около $1/3$ отрицательных ионов образуется в результате одновременного захвата двух электронов положительными ионами.

Результаты измерений величин $\Phi_{-1,\infty}$ для ионов углерода и кислорода приведены в таблице с добавлением соответствующих данных для ионов водорода и лития [2, 3]. Видно, что с увеличением I_i значения $\Phi_{-1,\infty}$ для

Ион	$I_i,^{99}$	H_2	He	N_2	[Ar]	Целлулоид
H^-	0,75	0,014	0,010	0,006	—	0,004
Li^-	0,49	0,00035	0,00035	0,00015	—	—
C^-	1,25	—	0,007	0,003	0,0025	0,004
O^-	1,68	—	0,014	0,005	0,005	0,004

отрицательных ионов в большинстве случаев возрастают. Наибольшие значения $\Phi_{-1,\infty}$ получены для случаев прохождения ионов через легкие газы (водород и гелий), что, по-видимому, объясняется приближением к максимальному значению функций $\sigma_{0,-1}(v)$ и $\sigma_{1,-1}(v)$ при $v = 2,6 \cdot 10^8 \text{ см/сек}$ (см. рис. 6 и 7).

Максимум в сечениях образования отрицательных ионов в более тяжелых средах достигается при меньших скоростях. Соответственно должен смещаться и максимум в величине $\Phi_{-1,\infty}$. Действительно, согласно измерениям Фогеля и др. [11], при $v = 0,8 \cdot 10^8 \text{ см/сек}$ максимальное значение $\Phi_{-1,\infty}$ получено в аргоне для ионов кислорода. Поэтому, чтобы получить наибольший коэффициент преобразования положительных ионов в отри-

цательные, нужно пропускать пучок ионов через среду, в которой сечение образования отрицательных ионов при данной скорости достигает максимума.

Авторы выражают благодарность бригаде циклотрона во главе с Ю. П. Дивногорцевым и А. С. Кондратьевым, а также Ю. Дружинину и В. Калите за обеспечение работы циклотрона и экспериментальной аппаратуры.

Институт ядерной физики

Московского государственного университета

Поступила в редакцию

29 декабря 1965 г.

Литература

- [1] В. С. Николаев. УФН, 85, 679, 1965.
- [2] С. Аллисон, М. Гарсиа-Муньос. В кн. Атомные и молекулярные процессы, ред. Д. Бейтс, Изд. Мир, 1964, стр. 624.
- [3] S. K. Allison, J. Cuevas, M. Garcia-Munoz. Phys. Rev., 120, 1266, 1960.
- [4] В. М. Дукельский, Э. Я. Зандберг. ЖЭТФ, 21, 1270, 1951.
- [5] В. М. Дукельский, Н. В. Федоренко. ЖЭТФ, 29, 473, 1955.
- [6] J. V. Hasted. Proc. Roy. Soc., A212, 235, 1952; A222, 74, 1953.
- [7] И. С. Дмитриев, В. С. Николаев, Л. Н. Фатеева, Я. А. Теплова. ЖЭТФ, 42, 16, 1962; 43, 361, 1962.
- [8] Я. М. Фогель, Р. В. Митин, А. Г. Коваль. ЖЭТФ, 31, 397, 1956.
- [9] Я. М. Фогель, Р. В. Митин, В. Ф. Козлов, Н. Д. Ромашко. ЖЭТФ, 35, 565, 1958.
- [10] Я. М. Фогель, В. А. Анкудинов, Д. В. Пилипенко. ЖЭТФ, 35, 868, 1958.
- [11] Я. М. Фогель, Л. И. Крупник, А. Г. Коваль, Р. П. Слабоспицкий. ЖЭТФ, 37, 988, 1957.
- [12] В. С. Николаев, И. С. Дмитриев, Л. Н. Фатеева, Я. А. Теплова. ЖЭТФ, 40, 989, 1961.
- [13] В. С. Николаев, И. С. Дмитриев, Я. А. Теплова, Л. Н. Фатеева. В сб. Ускорители, Атомиздат, 1960, стр. 90.
- [14] И. С. Дмитриев, В. С. Николаев. ЖЭТФ, 44, 460, 1963; 49, 500, 1965.
- [15] R. M. May, S. T. Butler. Phys. Rev., 138, 1586, 1965.
- [16] Г. Мэсси, Е. Бархон. Электронные и ионные столкновения, ИИЛ, 1958.
- [17] H. S. W. Massey. Rep. Progr. Phys., 12, 248, 1948.

AN EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF THE EFFECTIVE CROSS SECTIONS FOR DESTRUCTION AND FORMATION OF FAST NEGATIVE IONS IN ATOMIC COLLISIONS

I. S. Dmitriev, V. S. Nikolayev, Ya. A. Teplova,
B. M. Popov, L. I. Vinogradova

The effective cross sections for loss of one, two or three electrons in helium, nitrogen or argon are measured for negative carbon, nitrogen and oxygen ions produced as a result of charge exchange of positive ions accelerated in a 72 centimeter cyclotron to a velocity $v = 2.6 \cdot 10^8$ cm/sec. The cross section for simultaneous loss of two electrons by negative ions is about 50—70% of the cross section for loss of a single electron. Comparison of the results obtained with the known cross sections for electron loss by other negative or positive ions shows that the specificity of negative ions expressed in the weak coupling of the outer electron with the ion frame, does not appreciably affect the interaction between the negative ions and matter at a velocity $v = 2.6 \cdot 10^8$ cm/sec.

Data on the cross sections for formation of negative ions as a result of capture of two electrons by positive ions or capture of an electron by neutral atoms are obtained for carbon and oxygen. Equilibrium values of the fraction of negative carbon or oxygen ions in a beam passing through a sufficiently thick layer of matter (Φ_{-1}) is obtained. Maximal values of Φ_{-1} obtain in media in which the cross sections for formation of negative ions with a given velocity attains maximum.