

УДК 539.186

**СЕЧЕНИЯ ПЕРЕЗАРЯДКИ ПРОТОНОВ. ЭКСПЕРИМЕНТ**

**В. С. Николаев, | И. С. Дмитриев, Я. А. Теплова, Ю. А. Файнберг**  
(НИИЯФ)

Определены сечения перезарядки протонов в гелии, азоте, неоне, аргоне и ксеноне при энергиях  $E=0,3$  и  $0,7$  МэВ. При  $E=0,3$  МэВ в соответствии с расчетами в приближении Оппенгеймера—Бринкмана—Крамерса (ОБК) сечения в неоне в  $\sim 2,5$  раза выше, чем в азоте и аргоне. Показано, что с увеличением энергии  $E$  от  $0,3$  до  $\sim 1$  МэВ отношения сечений перезарядки протонов в азоте, неоне и аргоне изменяются немонотонно.

Анализ экспериментальных и вычисленных в приближении Оппенгеймера—Бринкмана—Крамерса (ОБК) сечений перезарядки ряда ионов в различных средах показал [1—4], что из-за оболочечного строения атомов в зависимости сечений перезарядки  $\sigma$  от  $Z_i$  — заряда ядер атомов среды — образуются максимумы, каждый из которых обусловлен максимумом парциального сечения захвата электронов из атомных оболочек  $K, L, M$  или  $N$ . С увеличением скорости ионов  $v$  эти максимумы сдвигаются в сторону больших  $Z_i$ , в результате чего соотношения между сечениями перезарядки в рассматриваемых средах изменяются.

Для исследования указанных структурных эффектов в сечениях перезарядки протонов в настоящей работе выполнены измерения сечений перезарядки протонов в гелии, азоте, неоне и аргоне при энергиях  $E=0,3$  и  $0,7$  МэВ (при этих энергиях согласно [2, 3, 5] сечения в неоне должны быть больше, чем в азоте и аргоне) и в ксеноне при  $E=0,3$  МэВ. Экспериментальные результаты сравниваются с рассчитанными в приближении ОБК.

Измерения сечений проводились на экспериментальной установке, основные элементы которой и методика измерений были описаны ранее [6]. Из 72-см циклотрона выводились пучки молекулярных ионов  $H_2^+$  с энергией  $0,30 \pm 0,01$  и  $0,70 \pm \pm 0,03$  МэВ/а.е.м. Ионы  $H^+$  получались в результате диссоциации молекулярных ионов на остаточном газе в ионопроводе на пути между двумя магнитными анализаторами и направлялись последним из них в камеру столкновений длиной 24 см, в которую поступал исследуемый газ. Толщина проточной газовой мишени, которая образовывалась в камере столкновений, где осуществлялась перезарядка протонов, изменялась от  $\sim 5 \cdot 10^{13}$  атом/см<sup>2</sup> (при остаточном давлении) до  $\sim 10^{15}$  атом/см<sup>2</sup>. Затем с помощью магнитного анализатора и системы пропорциональных счетчиков определялось относительное количество быстрых атомов водорода в пучке частиц, прошедших через камеру столкновений. По результатам этих измерений при нескольких толщинах газовой мишени находились сечения перезарядки протонов. Ошибка полученных сечений определялась главным образом погрешностями при установлении толщины газовой мишени и статистическим разбросом отдельных измерений (при малой интенсивности) и не превышала 20%.

**Сечения перезарядки протонов при энергии  $E = 0,30 \pm 0,01$  и  $0,70 \pm 0,03$  МэВ, полученные в настоящей работе, в единицах  $10^{-18}$  см<sup>2</sup>/атом**

Среда	$E = 0,3$ МэВ	$E = 0,7$ МэВ
Гелий	$0,85 \pm 0,15$	$0,022 \pm 0,004$
Азот	$1,9 \pm 0,3$	$0,07 \pm 0,01$
Неон	$4,5 \pm 0,8$	$0,28 \pm 0,05$
Аргон	$1,6 \pm 0,3$	$0,21 \pm 0,04$
Ксенон	$10 \pm 2$	

Полученные величины сечений перезарядки  $\sigma$  для протонов в гелии, азоте, неоне, аргоне и ксеноне (таблица) вместе с экспериментальными значениями сечений для различных сред из работ [7—10] и вычисленными в приближении ОБК, сформулированном в [4], представлены на рисунке в зависимости от заряда ядер атомов среды  $Z_i$ . Поскольку приближение ОБК значительно завышает величину сечения, на рисунке приведены сечения, вычисленные в приближении ОБК с нормировкой их на экспериментальные значения  $\sigma$  при  $Z_i=7$  ( $\sigma_{OБК}^{\sigma_{OБК}}/\sigma_N=7,6$  и  $5,7$  при  $E=0,3$  и  $0,7$  МэВ соответственно). Видно, что найденные в настоящей работе величины сечений в гелии, азоте и аргоне при  $E=0,3$

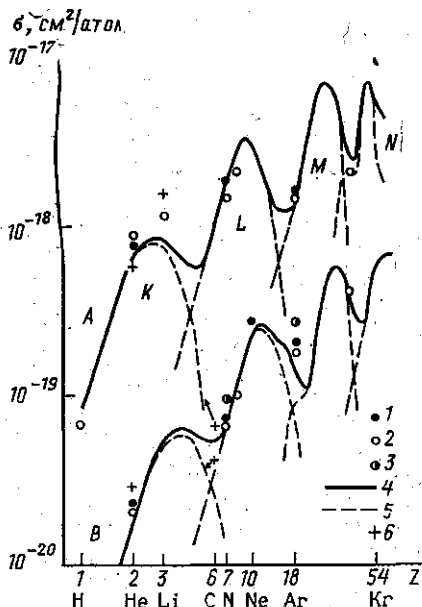
и  $0,7$  МэВ в пределах 10—15% совпадают с полученными в [7—9] (величины  $\sigma$  в неоне и ксеноне получены впервые).

Учет искажения волновой функции захватываемого электрона из-за взаимодействия его с налетающим ионом в начальном состоянии и с атомным остатком в ко-

нечном состоянии существенно улучшает согласие расчетов с экспериментом [11—14]. Однако такие расчеты оказываются более громоздкими и выполнены только для наиболее простых случаев. На рисунке приведены вычисленные в [14] сечения захвата электрона протонами из  $K$ -оболочки атомов с  $Z_1=2, 3, 6, 10$ .

Из рисунка следует, что при энергии протонов 0,3 МэВ сечение в неоне  $\sigma_{Ne}$  в 2,1—2,4 раза больше сечений в азоте  $\sigma_N$  и в аргоне  $\sigma_{Ar}$ . При увеличении энергии до 0,7 МэВ соотношение между сечениями перезарядки в азоте, неоне и аргоне изменяется: отношения сечений в неоне и аргоне к сечению в азоте ( $\sigma_{Ne}/\sigma_N$  и  $\sigma_{Ar}/\sigma_N$ ) увеличиваются соответственно в 1,7 и 3 раза, а отношение  $\sigma_{Ne}/\sigma_{Ar}$  уменьшается в 1,7 раза. Зависимость сечений  $\sigma$  от  $Z_1$  качественно правильно описывается приближением ОБК (см. рисунок). Из вычисленных в этом приближении сечений следует, что в области  $Z_1 > 2\sqrt{E}$  (МэВ) зависимость сечений перезарядки от  $Z_1$  является осцилляционной: быстрые изменения в соотношениях

Зависимость сечений перезарядки  $\sigma$  от заряда ядер атомов среды  $Z_1$  при энергии протонов  $E=0,3$  МэВ (A) и  $E=0,7$  МэВ (B). Экспериментальные данные: (1) — настоящая работа, (2) — [7—9], (3) — [10]. Полные (4) и парциальные (5) сечения захвата электрона в приближении ОБК, нормированные на экспериментальные сечения для  $Z_1=7$ . Парциальные сечения захвата  $K$ -электронов из атомов среды, вычисленные в [14] (6)



между сечениями перезарядки протонов на различных атомах при увеличении энергии протонов связаны со сдвигом экстремумов в осцилляционной зависимости сечений  $\sigma$  от  $Z_1$  при увеличении  $E$  и могут быть объяснены определенными особенностями электронных оболочек рассматриваемых атомов.

Работа выполнена при финансовой поддержке программы «Университеты России».

## ЛИТЕРАТУРА

- [1] Дмитриев И. С., Ташаев Ю. А., Николаев В. С. и др. //ЖЭТФ. 1977. 73. С. 1684. [2] Николаев В. С., Дмитриев И. С., Теплова Я. А. //Физика электронных и атомных столкновений: Лекции IV Всесоюз. школы. М., 1978. С. 139. [3] Дмитриев И. С., Воробьев Н. Ф., Николаев В. С. и др. //Тез. докл. на IX Всесоюз. конф. по физике электронных и атомных столкновений. Рига, 1984. Т. 1. С. 12. [4] Дмитриев И. С., Воробьев Н. Ф., Коновалова Ж. М. и др. //ЖЭТФ. 1983. 84. С. 1987. [5] Николаев В. С. //ЖЭТФ. 1966. 51. С. 1263. [6] Николаев В. С., Дмитриев И. С., Фатеева Л. Н., Теплова Я. А. //ЖЭТФ. 1961. 40. С. 989. [7] Tawara H., Russek A. //Rev. Mod. Phys. 1973. 45. P. 178. [8] Barnett S. F., Reynolds H. K. //Phys. Rev. 1958. 109. P. 355. [9] Toburen L. H., Nakai M. Y., Langley H. Preprint ORNL-TM-1988. USA, 1968. [10] Welsh L. M., Kaplan S. N., Paulikas G. A., Pyle R. V. //Phys. Rev. 1967. 158. P. 85. [11] Belkić D., Gayet R., Salin A. //Phys. Reports. 1979. 56. P. 279. [12] Maček J., Alston S. //Phys. Rev. 1982. A26. P. 250. [13] Miraglia J. E. //Phys. Rev. 1984. A30, N 4. P. 1721. [14] Шурыгина Ю. А., Сенашенко В. С., Теплова Я. А. //ЖТФ. 1986. 56, № 8. С. 1513.

Поступила в редакцию  
14.01.94