

освещенного района. Солетта может быть изготовлена из веземных материалов [5], например из никелистого железа, которого много на близких к Земле астероидах. Для ее постройки, например, в течение 20 лет нужно создать на астероиде автоматическое производство металла, фольги и металлических ферм, не превышающее 0,3% их производства в СССР в начале 90-х годов. Доставка фрагментов солетты с астероида на нужную орбиту осуществляется с помощью светового давления за счет парусности самих этих элементов. На рабочей орбите при необходимости фрагменты могут состыковываться.

Производство на астероиде нужно начать с создания модулей затеняющего экрана [7], чтобы поток тепла от солетты не нарушил общего теплового баланса Земли.

Отметим также, что дополнительное облучение верхней атмосферы солнечным светом, включая ультрафиолет, будет способствовать сохранению и восстановлению озонового слоя в северных областях.

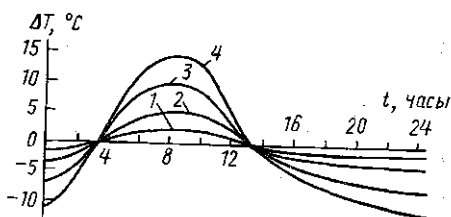


Рис. 4. Суточные колебания температуры: ΔT — отклонения температуры от среднесуточной, кривые 1, 2, 3 и 4 соответствуют значениям $N_0 = 100, 200, 400$ и 600 Вт/м^2

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Лукьянов А. В. Деп. ВИНТИ № 4530-В91. М., 1991. [2] Лукьянов А. В. Деп. ВИНТИ № 1311-69. М., 1969. [3] Лукьянов А. В. Плечные отражатели в космосе. М., 1977. [4] Лукьянов А. В. Деп. ВИНТИ № 1352-78. М.; № 1353-78. М.; № 2163-78. М., 1978. [5] Ванке В. А., Лесков Л. В., Лукьянов А. В. Космические энергосистемы. М., 1990. [6] Тихонов А. Н., Самарский А. А. Уравнения математической физики. М., 1966. [7] Лукьянов А. В. // Космич. исслед. 1992. 30, № 1. С. 127.

Поступила в редакцию
01.10.93

ВЕСТН. МОСК. УН-ТА. СЕР. 3, ФИЗИКА. АСТРОНОМИЯ. 1994. Т. 35, № 5

АТОМНАЯ И ЯДЕРНАЯ ФИЗИКА

УДК 539.186

О СТРУКТУРНЫХ ЭФФЕКТАХ В СЕЧЕНИЯХ ПЕРЕЗАРЯДКИ ПРОТОНОВ. АНАЛИЗ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ

В. С. Николаев, И. С. Дмитриев, Я. А. Теплова, Ю. А. Файнберг

(НИИЯФ)

Рассмотрены экспериментальные сечения перезарядки протонов в различных средах при энергии $E = 0,025 \div 10$ МэВ. Показано, что с увеличением E до 10 МэВ отношения сечений перезарядки протонов в азоте, неоне и аргоне изменяются в 5—8 раз немонотонно. Установлено, что возрастание или уменьшение отношения этих сечений при увеличении энергии E обусловлено аналогичным поведением отношения плотностей электронных импульсов в атомах рассматриваемых сред, когда значения импульсов близки к минимальному, передаваемому захватываемому электрону от атома среды.

Введение

В предыдущих работах [1—4] было установлено, что из-за оболочечного строения атомов зависимость сечений перезарядки быстрых ионов от заряда ядер атомов среды Z_t имеет максимумы, сдвигающиеся с ростом скорости ионов v в сторону более тяжелых сред. Поэтому соотношения между сечениями перезарядки в различных средах сильно и немонотонно зависят от скорости частиц. Было показано также [5], что сечения перезарядки протонов в аргоне из-за неполного заполнения M -оболочки в атомах аргона (отсутствие $3d$ -электронов) в 2—3 раза уменьшаются при скоростях столкновений $v=3,5$ а. е.

Для исследования структурных эффектов в сечениях перезарядки протонов были проведены измерения этих сечений в различных газах при энергиях протонов $E=0,3$ и $0,7$ МэВ [6]. Результаты [6] подтверждают осцилляционный характер зависимости сечений от Z_t и указывают на существование значительных структурных эффектов и в энергетической зависимости сечений перезарядки протонов. В связи с этим в настоящей работе рассмотрены соотношения между экспериментальными сечениями перезарядки протонов в азоте, неоне и аргоне в интервале энергий $E=0,025 \div 10$ МэВ (что соответствует скоростям протонов $v=1 \div 20$ а. е.) и прослежена их связь с конкретными особенностями электронных оболочек атомов указанных газов. Экспериментальные результаты сравниваются с рассчитанными в приближении Оппенгеймера—Бринкмана—Крамерса (ОБК). Скорость протонов, энергия и импульс электронов даются ниже в атомных единицах.

Описание и анализ экспериментальных результатов

Из результатов [6] следует, что при энергиях $E=0,3$ и $0,7$ МэВ изменение скорости протонов v в 1,5 раза приводит к изменению соотношений между экспериментальными сечениями перезарядки протонов σ в азоте, неоне и аргоне в 1,5—3 раза. Значительные и столь же быстрые изменения в соотношениях между этими сечениями происходят и за пределами интервала скоростей $v=3,5 \div 5,3$. Если при $v=3,5$ сечение σ_{Ne} в неоне в 2,1 \div 2,4 раза больше сечений σ_N и σ_{Ar} в азоте и аргоне, то при $v=1 \div 1,5$ сечения σ_{Ne} в неоне в 2—3 раза меньше, чем в азоте и аргоне, а при $v=8 \div 13$ сечения в указанных средах практически монотонно возрастают с увеличением заряда Z_t ядер атомов среды (рис. 1).

Во всем рассматриваемом здесь интервале скоростей $v=1 \div 20$ зависимость экспериментальных сечений перезарядки протонов от Z_t качественно правильно описывается приближением Оппенгеймера—Бринкмана—Крамерса (см. рис. 1), хотя сечения $\sigma^{ОБК}$, вычисленные в этом приближении, существенно больше экспериментальных σ . Для того чтобы показать близость зависимостей этих сечений от Z_t , на рис. 1 представлены сечения, вычисленные по методу, указанному в [3], с нормировкой на экспериментальные сечения перезарядки в азоте, а именно $\bar{\sigma}^{ОБК} = \sigma^{ОБК}/k$, где величины $k = \sigma_N^{ОБК}/\sigma_N = 12; 7,6; 5,7$ и $5,0$ при скоростях соответственно $v=1; 3,46; 5,3$ и $14,1$.

Учет искажения волновой функции захватываемого электрона из-за взаимодействия его с налетающим ионом в начальном состоянии и с атомным остатком в конечном состоянии улучшает согласие расчетов с экспериментом [12—15]. (Для примера на рис. 1 даны вычисленные в [12] сечения захвата протонами K -электрона из атомов с $Z_t=2, 3, 6$

и 10.) Однако такие расчеты чрезвычайно громоздки и выполнены только для наиболее простых случаев. Использование лучшей волновой функции невозмущенного атома, как, например, в [16], не ведет к большим изменениям сечений [5]. В то же время это простое и физически прозрачное приближение, как будет видно из дальнейшего, оказывается весьма удобным и вполне достаточным инструментом в работе по обнаружению и установлению природы структурных эффектов в сечениях перезарядки протонов.

Из сечений, вычисленных в приближении ОБК, следует, что при $v \ll 6$ в области $Z_t \geq 0,3v$ зависимость сечений перезарядки от Z_t является осцилляционной и быстрые изменения в соотношениях между сечениями перезарядки протонов на различных атомах при увеличении скорости протонов v обусловлены перемещением экстремумов в зависимости сечений от Z_t при изменении v . (В области $Z_t \leq 0,5v$, когда захват электрона осуществляется практически только из K -оболочки атомов

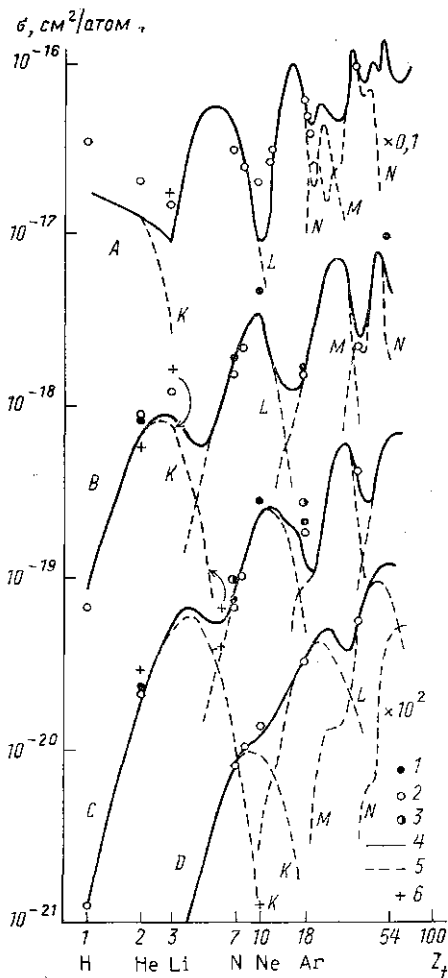


Рис. 1. Зависимость сечений перезарядки протонов σ от заряда ядер атомов среды Z_t при энергиях протонов $E=0,025$ А); 0,3 (В); 0,7 (С) и 5 МэВ (D). Экспериментальные данные, полученные: 1 — из [6]; 2 — из [7] при $E=0,025$ МэВ, из [7—9] при $E=0,3$ МэВ, из [8] при $E=0,7$ МэВ, из [10, 11] при $E=5$ МэВ; 3 — из [10] при $E=0,7$ МэВ; 4 и 5 — полные и парциальные сечения перезарядки в приближении ОБК, нормированные на экспериментальные сечения захвата K -электрона атомов среды, вычисленные в [12]

среды, сечения пропорциональны Z_t^{4+5} .) Это перемещение максимумов прямо следует из формулы Бринкмана—Крамерса [1, 5] для парциальных сечений $\sigma(n \rightarrow n_f)$ захвата ядрами электрона из полностью заполненной n -оболочки атомов среды в состоянии быстрых водородоподобных частиц с определенным значением главного квантового числа n_f . Эта формула может быть записана в виде

$$\sigma(n \rightarrow n_f) = (2^{17}/5) \pi a_0^2 n_f^2 \varepsilon_f^{5/2} \varepsilon_i^{5/2} \varepsilon_v^4 [\varepsilon_v^2 + 2\varepsilon_v(\varepsilon_f + \varepsilon_i) + (\varepsilon_f - \varepsilon_i)^2]^{-5}, \quad (1)$$

где ε_i и ε_f — энергия связи электронов в начальном и конечном состояниях соответственно, $\varepsilon_v = v^2/2$ — переносная энергия электрона, a_0 — атомная единица длины. (При перезарядке протонов имеем $\varepsilon_f = 1/(2n_f^2)$.) Из (1) следует, что при заданных скоростях столкновения и сечения достигают максимума, когда энергия связи электронов в начальных состояниях становится равной $\varepsilon_{i \max}$, где

$$\varepsilon_{i \max} = (1/3) [2 \sqrt{\varepsilon_f^2 + \varepsilon_f \varepsilon_v + \varepsilon_v^2} + \varepsilon_f - \varepsilon_v]. \quad (2)$$

Отсюда при скоростях $v \geq 1$ с точностью не хуже 15% получаем:

$$\varepsilon_{i \max} = (1/3) (v^2/2 + 1/n_f^2), \quad (2a)$$

т. е. с увеличением v энергия связи $\varepsilon_{i \max}$ электронов, которые захватываются с наибольшей вероятностью, возрастает (приблизительно пропорционально энергии протонов, если $v \geq 3$).

Энергия связи электронов ε_i , находящихся в атомах среды в состоянии с заданным значением главного квантового числа n , возрастает с увеличением заряда ядер среды Z_i , и поэтому при увеличении скорости столкновения v максимумы в зависимости сечений σ от Z_i в соответствии с (2a) смещаются в сторону больших значений Z_i . Образование глубоких минимумов в зависимости σ от Z_i обусловлено быстрым уменьшением сечений при увеличении отклонения величин ε_i от $\varepsilon_{i \max}$. Из рис. 1 видно, что возрастание отношения $R_{\text{Ne}/\text{N}} = \sigma_{\text{Ne}}/\sigma_{\text{N}}$ сечений перезарядки протонов в неоне и азоте от 0,6 до 4 при увеличении скорости протонов v от 1 до 5 вызвано более высокой энергией связи L -электронов в атомах неона, а понижение этого отношения до 1,6 при увеличении v от 5 до 14 обусловлено переходом к преимущественному захвату электронов из K -оболочек атомов азота и неона.

Для более полного представления об изменении отношений сечений перезарядки в различных средах при изменении скорости протонов v на рис. 2 приведены экспериментальные значения отношений $R_{\text{Ne}/\text{N}} = \sigma_{\text{Ne}}/\sigma_{\text{N}}$ и $R_{\text{Ar}/\text{Ne}} = \sigma_{\text{Ar}}/\sigma_{\text{Ne}}$ при $v=1 \div 20$ в зависимости от v . Анализ показывает, что эти отношения (а также не приведенные на рисунке экспериментальные отношения $R_{\text{Ar}/\text{N}} = \sigma_{\text{Ar}}/\sigma_{\text{N}}$) при изменении v от 1 до 20 изменяются немонотонно, их зависимости от скорости

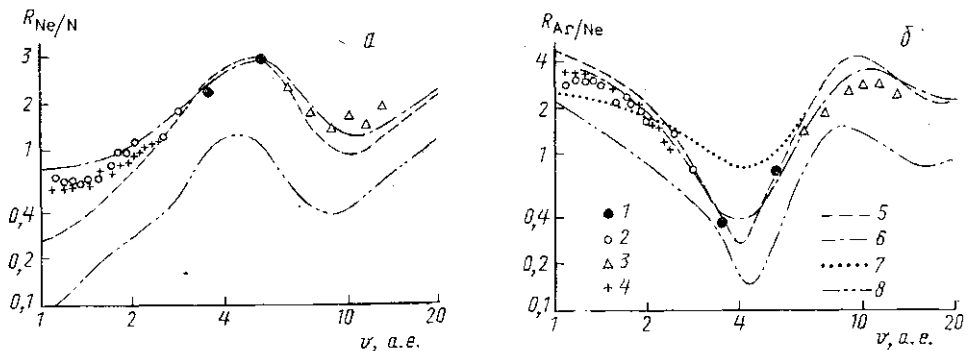


Рис. 2. Отношения сечений перезарядки протонов в двух средах: $R_{\text{Ne}/\text{N}} = \sigma_{\text{Ne}}/\sigma_{\text{N}}$ (a) и $R_{\text{Ar}/\text{Ne}} = \sigma_{\text{Ar}}/\sigma_{\text{Ne}}$ (б) — в зависимости от скорости столкновения v . Экспериментальные данные, полученные: 1 — из [6], 2 — из [8], 3 — из [11], 4 — из [17]. Расчеты: 5 — в приближении ОБК, 6 — с помощью полуэмпирического метода из [5]. 7 — значения $\bar{R}_{\text{Ar}/\text{Ne}}^{\text{ОБК}}$ с импульсным распределением M -электронов, соответствующим заполненной n -оболочке атомов аргона, 8 — отношения импульсных распределений, умноженные на 0,4, т. е. величины $0,4 S_{\text{Ne}/\text{N}}$ и $0,4 S_{\text{Ar}/\text{Ne}}$

имеют два экстремума; при этом отношения $R_{\text{Ne}/\text{N}}$ и $R_{\text{Ar}/\text{N}}$ изменяются в 5—6 раз, а отношения $R_{\text{Ar}/\text{Ne}}$ — в 8 раз. Из рис. 2 также следует, что в области скоростей $v=2 \div 20$ соотношения между сечениями в азоте, неоне и аргоне близки к рассчитанным в приближении ОБК, хотя при скоростях $v \sim 1$ отношения сечений, вычисленных в этом приближении, к экспериментальным довольно быстро меняются при изменении скорости столкновения v (примерно пропорционально $1/v$) [5]. Близость

экспериментальных и теоретических значений $R_{A/B}(v) = \sigma_A(v)/\sigma_B(v)$ для рассматриваемой пары сред A и B позволяет понять конкретные причины изменений величин $R_{A/B}$ при изменении скорости протонов v .

В рассматриваемых случаях протоны захватывают электроны главным образом в основное состояние атомов водорода [5, 13]. Сечения такой перезарядки протонов в столкновениях с атомами среды A в приближении ОБК пропорциональны сумме интегралов [5]

$$I_A = \sum_{nl} \int |\Phi_{Anl}(p)|^2 (p^2 + 2\varepsilon_{Anl})^2 dp^2, \quad (3)$$

где $|\Phi_{Anl}(p)|^2$ — радиальная плотность импульсного распределения nl электронов в атомах среды A , ε_{Anl} — энергия их связи. Интегрирование в (3) производится по области значений квадрата импульсов $p^2 \gg \geq q_{Anl}^2$, где q_{Anl} — абсолютное значение минимального импульса, который передается захватываемому электрону от атома среды A . Из закона сохранения энергии и импульса следует, что

$$q_{Anl} = |v/2 + (\varepsilon_f - \varepsilon_{Anl})/v|. \quad (4)$$

Поскольку при $p^2 \gg 2\varepsilon_{Anl}$ подынтегральная функция в (3) быстро уменьшается с увеличением p^2 , сечения перезарядки в большой степени зависят от плотности импульсного распределения электронов $\rho_A(p) =$

$= \sum_{nl} |\Phi_{Anl}(p)|^2$ в атомах среды A при импульсах p , близких к минимальным значениям переданных импульсов q_{Anl} . Поэтому отношения $R_{A/B}(v)$ сечений перезарядки протонов в двух средах A и B , равные отношениям сумм интегралов $I_A(v)/I_B(v)$, должны быть близки к отношениям $S_{A/B}(v) = \rho_A[q_{Anl}(v)]/\rho_B[q_{Bnl}(v)]$ плотностей соответствующих импульсных распределений электронов

$$\rho_A[q_{Anl}(v)] = \sum_{nl} |\Phi_{Anl}[q_{Anl}(v)]|^2 \text{ и } \rho_B[q_{Bnl}(v)] = \sum_{nl} |\Phi_{Bnl}[q_{Bnl}(v)]|^2$$

в атомах A и B .

В связи с этим на рис. 2 наряду с отношениями $R_{Ne/N}$ и $R_{Ar/Ne}$ представлены отношения $S_{A/B}(v)$ плотностей распределения импульсов электронов $\rho(p)$ в соответствующих атомах A и B при $p = q_{nl}(v)$ для случаев захвата электрона в основное состояние атома водорода. Из рис. 2 видно, что при $v \gg 2$ зависимость сечений $R_{A/B}$ для рассматриваемых сред A и B качественно полностью повторяет зависимость от v отношений импульсных распределений электронов $S_{A/B}$ при импульсах $p_A = q_{Anl}(v)$ и $p_B = q_{Bnl}(v)$. Это обстоятельство существенно облегчает установление конкретных причин изменения величин $R_{A/B}$ при увеличении скорости протонов v , так как для этого теперь достаточно выяснить причины соответствующих изменений в отношении электронных плотностей $S_{A/B}(v)$.

Из анализа величин $S_{Ne/N}$ следует, что увеличение отношения $R_{Ne/N}$ при возрастании скорости протонов v от 1,3 до 5 вызвано главным образом более высокими значениями средней орбитальной скорости и энергии связи L -электронов в атомах неона, а последующее уменьшение и затем возрастание этого отношения при увеличении v до 20 вызваны возрастанием роли захвата K -электронов сначала из атомов азота, а затем — неона. Уменьшение отношений $R_{Ar/Ne}$ от 3 при $v=1$ до 0,4 при $v=4$ обусловлено двумя причинами: 1) меньшими значениями средней орбитальной скорости и энергии связи M -электронов в атомах аргона по сравнению с аналогичными величинами для L -электронов

атомов неона и 2) резким понижением плотности $3p$ -электронов в атомах аргона при $p \sim 2-3$ из-за узла в функции $\Phi_{3p}(p)$ при $p=2,5$. (В полностью заполненной M -оболочке это понижение плотности $3p$ -электронов компенсируется большим вкладом $3d$ -электронов в суммарную плотность M -электронов $\sum_i |\Phi_{3i}(p)|^2$ при $p \sim 2-3$.) Возрастане отношений $R_{Ar/Ne}$ до 3 при увеличении скорости протонов до $v=12$ объясняется возрастанием вклада L -электронов атомов аргона в сечение σ_{Ar} , а понижение этих величин при дальнейшем увеличении скорости соударения — увеличением вклада K -электронов атомов неона в сечение σ_{Ne} .

Для демонстрации влияния узла функции $\Phi_{3p}(p)$ на величину $R_{Ar/Ne}$ на рис. 2 точечной линией показаны значения $R_{Ar/Ne}^{ОБК}$, вычисленные в приближении ОБК в предположении, что форма распределения импульсов M -электронов в атомах аргона является такой же, как в любой полностью заполненной n -оболочке. В этом случае, как видно из рис. 2, при увеличении v от 1,5 до 3,5 значения $R_{Ar/Ne}$ в 3 раза меньше, чем в действительности. Таким образом, отсутствие $3d$ -электронов в атомах аргона является единственной причиной значительного понижения величин $R_{Ar/Ne}$ при увеличении v от 1 до 3,5.

Заключение

В работе показано, что оболочечное строение атомов среды и особенности импульсного распределения электронов незаполненных n -оболочек атомов приводят к изменениям в соотношениях между сечениями перезарядки протонов в азоте, неоне и аргоне при увеличении скорости протонов v во всем рассмотренном интервале скоростей v от 1 до 20. При $v=2-20$ эти изменения неплохо описываются в приближении Опленгеймера—Бринкмана—Крамерса. Отсутствие $3d$ -электронов в атомах аргона является основной причиной уменьшения сечений перезарядки протонов в аргоне в области $v \approx 3-5$ а.е.

Настоящая 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., Теллова А. Я. //Физика электронных и атомных столкновений: Лекции IV Всесоюз. школы. М. (МГУ). 1978. С. 139. [3] Дмитриев И. С., Воробьев Н. Ф., Коновалова Ж. М. и др. //ЖЭТФ. 1983. 84. С. 1987. [4] Дмитриев И. С., Воробьев Н. Ф., Николаев В. С. и др. //Тез. докл. IX Всесоюз. конф. по физ. электронных и атомных столкновений. Рига, 1984. Т. 1. С. 12. [5] Николаев В. С. //ЖЭТФ. 1966. 51. С. 1263. [6] Николаев В. С., Дмитриев И. С., Теллова Я. А., Файнберг Ю. А. //Вестн. Моск. ун-та. Физ. Астрон. 1994. 35, № 3. С. 84. [7] Tawara H., Russek A. //Rev. Mod. Phys. 1973. 45. P. 178. [8] Barnett C. F., Reynolds H. K. //Phys. Rev. 1958. 109. P. 355. [9] Toburen L. H., Nakai M. Y., Longley 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] Schryber U. //Helv. Phys. Acta. 1967. 40. P. 1023. [12] Шурыгина Ю. А., Сенашенко В. С., Теллова Я. А. //ЖТФ. 1986. 56, № 8. С. 1513. [13] Belkić D., Gayet R., Salin A. //Phys. Rep. 1979. 56. P. 279. [14] Macek J., Alston S. //Phys. Rev. 1982. A26. P. 250. [15] Miraglia J. E. //Phys. Rev. 1984. A30. P. 1721. [16] Mapleton R. A. //Phys. Rev. 1963. 130. P. 1829. [17] Heer F. J. de, Schutten J., Mustafa H. //Physica. 1966. 32. P. 1768.

Поступила в редакцию
18.08.93
После переработки
14.01.94