

АВТОИОНИЗАЦИЯ БЫСТРЫХ ЛИТИЕПОДОБНЫХ ИОНОВ
АЗОТА И КИСЛОРОДА ПОСЛЕ ПРОХОЖДЕНИЯ ЧЕРЕЗ
ТВЕРДОЕ ВЕЩЕСТВО

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

При прохождении быстрых атомных частиц через вещество в ионном пучке должны появляться возбужденные ионы с повышенной вероятностью потери электрона в соударениях с атомами среды [1,2]. Кроме того, может происходить самопроизвольный вылет электрона из возбужденных частиц [1] (эффект Оже). Для обнаружения повышенной вероятности потери электрона прошедшими через вещество быстрыми ионами были поставлены описываемые ниже опыты.

Пучки ускоренных в 72-сантиметровом циклотроне ионов азота и кислорода фокусировались на расстоянии 8 м от циклотрона (рис.1). Вблизи фокуса в различных местах на пути пучка помещались мишени -

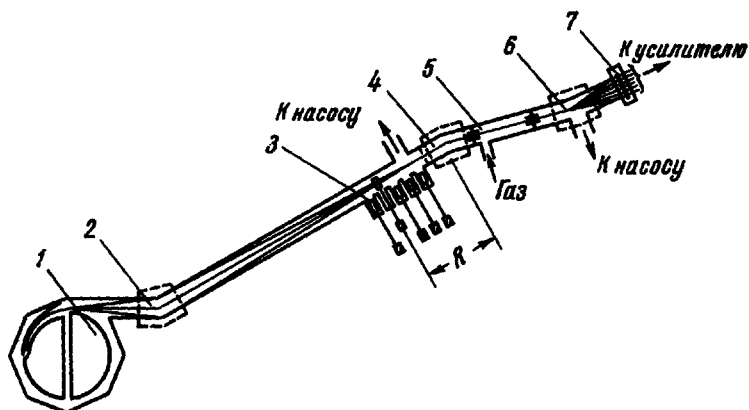


Рис.1. Схема экспериментальной установки:
 1 - циклотрон, 2 - фокусирующий магнит, 3 - мишени,
 4 - масс-монохроматор, 5 - камера перезарядки,
 6 - анализатор, 7 - детекторы

тонкие целлюлозные пленки толщиной $\sim 2 \text{ мкг/см}^2$ (т.е. $\sim 10^{17}$ атомов/см²). После прохождения мишени в пучке образовывались ионы с различными зарядами. Ионы с определенным зарядом i с помощью магнитного масс-монохроматора направлялись в камеру перезарядки длиной $\sim 0,5 \text{ м}$, в которой в результате соударения с атомами газа и спонтанного выброса электронов часть ионов с зарядом i превращалась в ионы с другими зарядами. Магнитный анализатор с системой пропорциональных счетчиков, каждый из которых регистрировал ионы с одним определенным зарядом [3], позволял определять зарядовый состав пучка, прошедшего камеру перезарядки, т.е. относительное количество Φ_j - ионов с различными зарядами j ($\sum_j \Phi_j = 1$).

Относительное количество Φ_{i+1} -ионов с зарядом $i+1$ зависит от эффективных сечений процессов изменения заряда для возбужденных и невозбужденных частиц σ_{ij}^* и σ_{ij} (первый и второй индексы i и j указывают, соответственно, начальный и конечный заряд ионов), от числа атомов в 1 см^3 в камере перезарядки n , длины камеры перезарядки l , вероятности спонтанной потери электрона возбужденными ио-

нами α_i , вероятности радиационного снятия возбуждения τ_i , скорости ионов v и доли ионов с зарядом i , находящихся в возбужденных состояниях, α_i . При обычно выполняемых условиях $\sigma_{ij} nL \ll 1$ (для любых i и j) и $K_i^* \gg \sum_j' \sigma_{ij} n$, где $K_i^* = \sum_j' \sigma_{ij}^* n + (\alpha_i + \tau_i) v^{-1}$, справедливо следующее соотношение:

$$\text{где } \Phi_{i+1} = \sigma_{i,i+1} nL + \beta_i \Delta \sigma_{i,i+1}^* nL + \beta_i \alpha_i L/v, \quad (I)$$

$$\beta_i = \alpha_i [1 - \exp(-K_i^* L)] (K_i^* L)^{-1}, \quad \Delta \sigma_{i,i+1}^* = \sigma_{ij+1}^* - \sigma_{ij+1}$$

Количество возбужденных ионов, дошедших до камеры перезарядки, зависит от расстояния R между мишенью и центром магнитного поля масс-монохроматора: $\alpha_i(R) = \alpha_i(0) \exp(-q_i^* R)$, где $q_i^* = \sum_j' \sigma_{ij}^* n' + (\alpha_i + \tau_i) v^{-1}$, n' - число атомов в 1 см^3 на пути частиц между мишенью и масс-монохроматором.

Эксперимент заключался в определении относительного числа ионов с зарядом $i+1$, образовавшихся в камере перезарядки из выделенных масс-монохроматором ионов с зарядом i , при различных расстояниях R между мишенью и центром магнитного поля масс-монохроматора. Измерения производились с ионами азота с зарядами $i = 2-5$ и ионами кислорода с зарядами $i = 3-5$.

Для большинства ионов значения Φ_{i+1} , так же как и определявшиеся одновременно с ними для контроля значения Φ_{i-1} , не зависели от R . В опытах же с ионами N^{+4} и O^{+5} относительное количество Φ_{i+1} пятизарядных ионов азота и шестизарядных ионов кислорода существенно возрастало при уменьшении R (рис.2). Во время этих измерений во всех частях экспериментальной установки, через которые проходил пучок, давление было $\sim 10^{-5}$ мм рт.ст. При десятикратном увеличении давления на пути пучка от мишени до масс-монохроматора величины $\Delta \Phi_{i+1}(R) = \Phi_{i+1}(R) - \Phi_{i+1}(R_{\max})$ не изменялись. Это означает, что соударения с атомами остаточного газа практически не оказывали никакого влияния на процессы уменьшения числа возбужденных ионов, ответственных за повышение значений Φ_{i+1} при уменьшении R , т.е. $\sum_j' \sigma_{ij}^* n' \ll (\alpha_i + \tau_i)/v$ и $q_i^* = (q_i + \tau_i)/v$.

При увеличении давления в камере перезарядки величины $\Phi_{i+1}(R)$ в соответствии с формулой (I) возрастали, значения же $\Delta\Phi_{i+1}(R) = \Phi_{i+1}(R) - \Phi_{i+1}(R_{max})$ не зависели от давления (рис.2). Согласно (I), $\Delta\Phi_{i+1}(R) = [\alpha_i(R) - \alpha_i(R_{max})] [1 - \exp(-K_i^*L)] (K_i^*L)^{-1} (\Delta\sigma_{i,i+1}^* n + a_i/v)L$, где $K_i^* = q_i^* = (a_i + z_i) v^{-2}$, поэтому отсутствие зависимости величин $\Delta\Phi_{i+1}(R)$ от n означает, что наблюдаемое увеличение числа пятизарядных ионов азота и шестизарядных ионов кислорода при

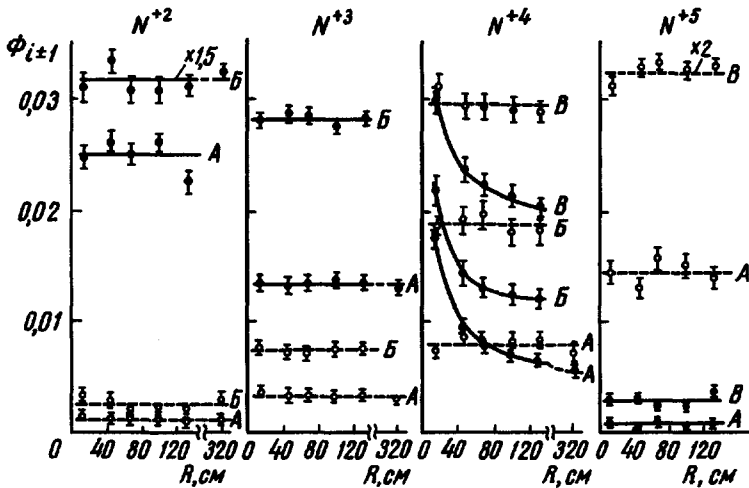


Рис. 2. Относительное количество $\Phi_{i\pm 1}$ быстрых ионов азота, образовавшихся в камере перезарядки, в зависимости от R . Ионы с зарядом i , выделяемые масс-монохроматором, указаны в верхней части рисунка. Светлые и темные точки дают, соответственно, относительное число ионов Φ_{i-1} и Φ_{i+1} , захвативших и потерявших один электрон. Кривые А, Б и В соответствуют различным толщинам $t = nL$ газовой мишени в камере перезарядки: $t = 1, 4; 3, 6$ и $6 \cdot 10^{14}$ атомов/см²

приближении мишени к масс-монохроматору не может быть объяснено повышением сечений потери электрона в соударениях возбужденных ионов с атомами среды ($\Delta\sigma_{i,i+1}^* n \ll a_i v^{-2}$). Поскольку, как показали контрольные опыты, значения $\Delta\Phi_{i+1}(R)$ не зависят от размеров диафрагм, через которые проходил пучок, то наблюдаемый эффект не связан и с взаимодействием ионов с поверхностью диафрагм. Таким образом, остается считать, что это явление происходит в результате спонтанного выброса электрона ионами N^{+4} и O^{+5} , т.е. в результате автоионизации этих частиц.

Из экспериментальных значений q_i^* , характеризующих зависимость величин $\Delta\Phi_{i+1}$ от R , определяется среднее время жизни $\tau = 1/(a_i + z_i)$ автоионизационных состояний. Поскольку $\sum_j' b_{ij} n' \ll \ll (a_i + z_i)v^{-1}$, то $\tau = 1/q_i^* v$. Автоионизация ионов N^{+q} наблюдалась при скорости ионов v от 4 до $12 \cdot 10^8$ см/сек, т.е. при энергии частиц от ~ 1 до 10 Мэв. Для всех этих энергий $\tau = (5,5 \pm 2) \cdot 10^{-8}$ сек. Приблизительно такое же время жизни $\tau = (4 \pm 2) \cdot 10^{-8}$ сек получено и для ионов O^{+5} (при $v = 8 \cdot 10^8$ см/сек).

Во всех случаях величина $\Delta\Phi_{i+1} \sim \alpha_i a_i / (a_i + z_i)$ была порядка 1%. Отсюда для доли ионов, находящихся в автоионизационных состояниях с указанным выше временем жизни, имеет следующую оценку: $\alpha_i \gtrsim 1\%$. При увеличении толщины мишеней от ~ 2 до 20 мкг/см² число таких ионов, по-видимому, существенно не изменяется, так как величина $\Delta\Phi_{i+1}$ при этом (для $v = 8 \cdot 10^8$ см/сек) возрастает всего на 20%. В газовой мишени толщиной $\sim 10^{15}$ атомов/см², которая помещалась на пути пучка вместо целлюлоидной пленки, такие ионы практически не образовались.

Время жизни возбужденных состояний, подверженных автоионизационному распаду, составляет обычно $10^{-13} - 10^{-14}$ сек [4]. Однако для отрицательных ионов гелия He^- и атомов лития известны метастабильные автоионизационные состояния ($1s2s2p$)^{4p}_{5/2} со временем жизни $\tau \sim 10^{-8}$ сек для ионов He^- и $\tau \approx 5 \cdot 10^{-6}$ сек для атомов лития [5,6]. К такому же типу состояний с максимально возможными значениями полного и спинового момента относятся, по-видимому, и обнаруженные нами метастабильные автоионизационные состояния литиеподобных ионов азота и кислорода.

Поскольку возбужденных состояний ионов с меньшими временами жизни должно быть значительно больше, чем метастабильных состояний с $\tau \sim 10^{-8}$ сек, то из полученных результатов следует, что сразу же после выхода из твердой мишени значительная часть быстрых многозарядных ионов теряет электрон и увеличивает заряд в результате автоионизации.

Авторы благодарны С.Е.Куприянову и Г.А.Аскарьяну за ценное обсуждение результатов настоящей работы.

Научно-исследовательский
институт ядерной физики
Московского
государственного университета

Московский
инженерно-физический институт

Поступило в редакцию
16 ноября 1965г.

Литература

- [1] N.Bohr, I.Lindhard. Danske Mat.-Fys.medd., 28, 7, 1954.
- [2] В.С.Николаев. УФН, 85, 679, 1965.
- [3] В.С.Николаев, И.С.Дмитриев, Л.Н.Фатеева, Я.А.Теплова, ЖЭТФ, 40, 989, 1961.
- [4] E.H.S.Burhop. The Auger Effect and other Radiation less Transitions. Camb. Univ. press, 1952.
- [5] J.Pietenpol. Phys.Rev. Lett., 7, 64, 1961.
- [6] P.Feldman, R.Novick. Phys.Rev. Lett., 11, 278, 1963.