

ОБНАРУЖЕНИЕ НОВОГО ТИПА ОЖЕ-ПЕРЕХОДОВ В АТОМАХ С ДВУМЯ ВНУТРЕННИМИ ВАКАНСИЯМИ

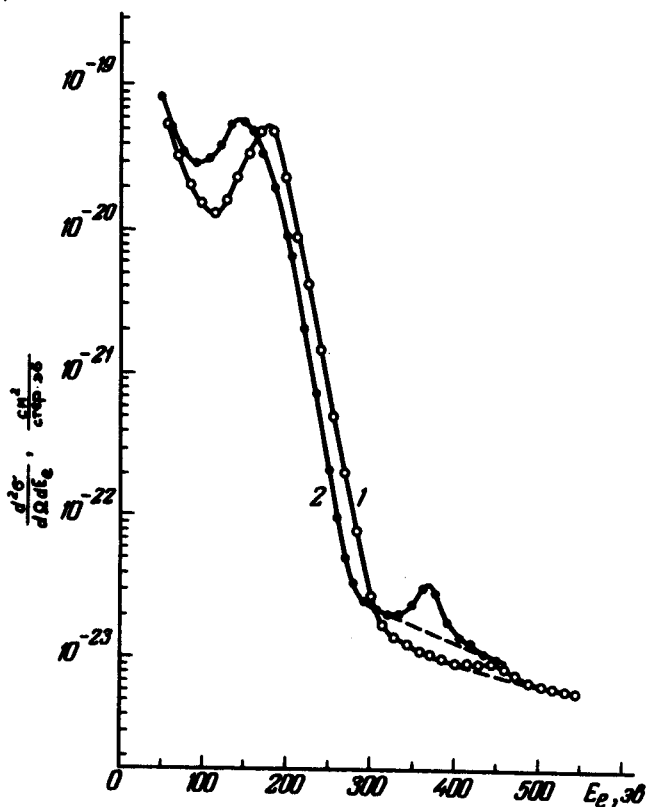
*В.В.Афросимов, Ю.С.Гордеев, А.Н.Зиновьев,
Д.Х.Расулов, А.П.Шергин*

В настоящей работе обнаружены и исследованы трехэлектронные оже-переходы типа LL-МММ. При таких переходах две внутренние вакансии в атоме одновременно заполняются двумя наружными электронами, а всю высвобождающуюся энергию уносит третий наружный электрон.

Вопрос о возможности трехэлектронных оже-переходов обсуждается уже в течение ряда лет. В работе [1] сообщалось об обнаружении в спектре электронов, образующихся при столкновениях $Ag^+ - Ag$, пика, отвечающего энергии $E_e \approx 500$ эв. Эти электроны были приписаны переходам LL-МММ. Однако в последующих экспериментах [2] было показано, что пик, наблюдавшийся в [1], является следствием приборного эффекта. Его не удалось наблюдать даже при чувствительности методики, позволявшей измерять в области $E_e \approx 500$ эв сечения, на 3 ÷ 4 порядка величины меньшие указанных в [1].

В настоящей работе изучались энергетические спектры электронов, образующихся в столкновениях ионов N^+ , N_2^+ , Ar^+ и Cl^+ с атомами Ar при энергиях падающих ионов $E_0 = 25$ и 50 кэВ. Методика измерений кратко описана в [3]. Угол вылета электронов составлял 125° относительно направления первичного пучка. Энергетическое разрешение анализатора электронов $\Delta E_e / E_e = 4\%$, светосила $\Delta\Omega = 0,05$ стерад. Величина минимального измеряемого сечения $d^2\sigma/d\Omega dE_e$ составляла $\sim 10^{-25}$ см²/стерад·эВ, что на один – два порядка величины выше чувствительности, использованной в [2].

Измерения неупругих потерь энергии и ионизации при глубоких атомных столкновениях [4] показали, что в случае $Cl^+ - Ar$ с высокой вероятностью образуются две $L_{2,3}$ -вакансии в ионе Cl , а в остальных исследованных случаях – две $L_{2,3}$ -вакансии в Ar . С подавляющей вероятностью эти две вакансии заполняются в результате двух обычных оже-переходов типа $L-MM$, когда каждый электрон уносит энергию перехода на одну вакансию.



Энергетические спектры освобожденных электронов :
 1 – $Ar^+ - Ar$, 50 кэВ; 2 – $Cl^+ - Ar$, 50 кэВ

На рисунке приведены спектры электронов, образующихся при столкновениях $Ar^+ - Ar$ и $Cl^+ - Ar$. Интенсивные пики электронов с энергиями 180 эВ в случае $Ar^+ - Ar$ и 140 эВ в случае $Cl^+ - Ar$ отвечают обычным переходам $L-MM$. Пики при энергиях 445 эВ для $Ar^+ - Ar$ и 370 эВ для $Cl^+ - Ar$ отвечают трехэлектронным переходам $LL-MMM$. Погреш-

ность относительных измерений сечений $d^2\sigma/d\Omega dE_e$ составляла $10 \pm 20\%$. Абсолютные значения сечений получены путем калибровки по данным [5] для столкновений $\text{Ar}^+ - \text{Ar}$, 50 кэВ.

Энергии электронов E_e при трехэлектронных переходах для случая $\text{Ar}^+ - \text{Ar}$ могут быть рассчитаны, исходя из энергий различных электронных конфигураций иона Ar , приведенных в работе Ларкинса [6]. Известно [4], что, когда в системе $\text{Ar}^+ - \text{Ar}$ образуются две $L_{2,3}$ -вакансии, одновременно из наружной оболочки каждой из частиц в среднем удаляется по два электрона. Поэтому "средней" исходной конфигурацией для трехэлектронных оже-переходов является $2p^4 3s^2 3p^4$. Вычисленная для этой конфигурации энергия оже-электронов составляет 440 эВ, что очень хорошо согласуется с экспериментальными значениями. Изменение энергии оже-электронов в случае $\text{Cl}^+ - \text{Ar}$ полностью соответствует изменению энергии связи $L_{2,3}$ -электронов при переходе от Ar к Cl .

В таблице для различных исследованных случаев представлены энергии E_e и сечения обычных $\sigma(L\text{-}MM)$ и трехэлектронных $\sigma(LL\text{-}MMM)$ переходов, а также сечения образования двух $L_{2,3}$ -вакансий в одной частице $\sigma(LL)$.

Пара	E_0 кэВ	$L_{2,3}\text{-}MM$		$L_{2,3}L_{2,3}\text{-}MMM$		$\sigma(LL\text{-}MMM)$	$\sigma(LL)$	$\sigma(LL\text{-}MMM)$
		E_e эВ	$\sigma, 10^{-18}$ см ²	E_e эВ	$\sigma, 10^{-22}$ см ²	$\sigma(L\text{-}MM)$ 10 ⁻⁵	10 ⁻¹⁸ см ²	$\sigma(LL)$ 10 ⁻⁴
$\text{Ar}^+ - \text{Ar}$	50	175	32,0	445	11,0	$3,3 \pm 0,6$	2,8	3,8
$\text{Ar}^+ - \text{Ar}$	25	180	27,0	445	10,0	$3,7 \pm 0,7$	2,7	3,7
$\text{Cl}^+ - \text{Ar}$	50	140	36,0	370	99,0	27 ± 5	16,0	6,2
$\text{N}^+ - \text{Ar}$	50	180	7,1	470	16,0	23 ± 5	1,7	9,7
$\text{N}_2^+ - \text{Ar}$	50	185	5,9	465	9,3	16 ± 3	1,3	7,2
$\text{N}_2^+ - \text{Ar}$	25	185	3,7	470	6,7	18 ± 4	0,7	9,6

Сечения $\sigma(LL)$ определены на основе предшествующих исследований рассеяния и неупругих потерь энергии [4]. В работе [4] для случаев $\text{N}^+ - \text{Ar}$ и $\text{Cl}^+ - \text{Ar}$ изучена вероятность образования двух $L_{2,3}$ -вакансий W , как функция межъядерного расстояния r_0 . Используя данные о $W(r_0)$, можно найти зависимость W от параметра удара p для каждой энергии E_0 и определить сечения $\sigma(LL) = 2\pi \int_0^\infty p W(p) dp$. В случае $\text{Ar}^+ - \text{Ar}$ дело обстоит несколько сложнее, так как две $L_{2,3}$ -вакансии могут распределяться между партнерами столкновения или оказаться в одной из частиц. Для определения $\sigma(LL)$ были использованы оценки вероятности образования двух L -вакансий в одном ионе, полученные в работах [4,7] на основе анализа данных о распределении вероятности конечных зарядовых состояний сталкивающихся частиц.

Из таблицы видно, что отношения $\sigma(LL-MMM)/\sigma(L-MM)$ в случае $Ag^+ - Ag$ отличаются от остальных случаев почти на порядок величины. Очевидно, это связано с различной вероятностью образования двух вакансий в одной частице при столкновениях одинаковых и различных частиц. В то же время отношения $\sigma(LL-MM)/\sigma(LL)$, характеризующие относительную вероятность трехэлектронного перехода, для всех исследованных случаев различаются мало. Отклонение в случае $Ag^+ - Ag$ вполне может быть обусловлено оценочным характером $\sigma(LL)$ для этих столкновений. Большая разница величин отношений $\sigma(LL-MMM)/\sigma(L-MM)$ при постоянстве $\sigma(LL-MMM)/\sigma(LL)$ свидетельствует о том, что рассматриваемые пики действительно связаны с образованием двух вакансий в одной частице, а не являются приборными сателлитами интенсивного $L-MM$ пика.

Вероятности трехэлектронных переходов не должны существенным образом зависеть от скорости столкновения, если переходы осуществляются в изолированных атомах. Зависимость вероятности от начальной энергии E_0 была исследована в столкновениях N^+ и $N_2^+ - Ag$. Молекулярная структура иона N_2^+ не влияет на процессы во внутренних оболочках, поэтому ион N_2^+ можно рассматривать как две независимые атомные частицы. Как видно из таблицы, отношение $\sigma(LL-MMM)/\sigma(LL)$ действительно остается практически постоянным при изменении E_0 в 4 раза — от 50 кэВ в случае $N^+ - Ag$ до 12,5 кэВ на один налетающий атом в случае $N_2^+ - Ag$, 25 кэВ.

Обнаруженные трехэлектронные переходы являются следствием многоэлектронных корреляций в атоме. Измеренные отношения $\sigma(LL-MMM)/\sigma(LL)$ лежат в интервале $10^{-3} + 10^{-4}$. Если полагать, что время жизни состояния с двумя L -вакансиями по отношению к обычному $L-MM$ переходу имеет тот же порядок величины, что и в атоме с одной L -вакансией, т. е. $\sim 10^{-14} + 10^{-15}$ сек, то время жизни по отношению к трехэлектронному переходу должно быть $\sim 10^{-10} + 10^{-12}$ сек. Представляет интерес изучение влияния числа электронов в наружной оболочке атома на вероятность трехэлектронного перехода. Можно ожидать, что при уменьшении числа наружных электронов вследствие уменьшения роли корреляционных эффектов вероятность трехэлектронного перехода $\sigma(LL-MMM)/\sigma(LL)$ должна уменьшаться. Естественно, что при наличии только двух внешних электронов этот переход вообще невозможен.

Физико-технический институт
им. А.Ф.Иоффе
Академии наук СССР

Поступила в редакцию
25 марта 1975 г.

Литература

- [1] Г.Н.Огурцов, И.П.Флакс, С.В.Авакян. ЖТФ, **40**, 2124, 1970.
[2] M.E.Rudd, B.Fastrup, P.Dahl, F.D.Schowengerdt. Phys. Rev., **A8**, 220, 1973.

- [3] В.В.Афросимов, Ю.С.Гордеев, А.Н.Зиновьев, Д.Х.Расулов, А.П.Шергин. Письма в ЖЭТФ, 21, 26, 1975.
- [4] В.В.Афросимов, Ю.С.Гордеев, А.М.Полянский, А.П.Шергин. ЖЭТФ, 63, 799, 1972.
- [5] R.K.Sacak, T.Jorgensen, Jr., M.E.Rudd. D.Thesis. Lincoln, Nebraska, 1969.
- [6] F.P.Larkins. J.Phys. B. Atom. Molec.. Phys. 4, 1, 1971.
- [7] R.S.Thoe, W.W.Smith. Phys. Rev. Lett., 30, 525, 1973.
-