

## Ионизация и фрагментация фуллеренов в столкновениях с ионами при различных параметрах удара

© В.В. Афросимов, А.А. Басалаев, К.В. Кашников, М.Н. Панов

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук,  
194021 Санкт-Петербург, Россия

E-mail: A.Basalaev@pop.ioffe.rssi.ru

Впервые измерены дифференциальные по углу рассеяния налетающей частицы сечения различных элементарных процессов, сопровождающих захват электронов у молекулы фуллерена ионами  $H^+$  и  $He^{2+}$  keV-энергий. Оценка параметра удара по углу рассеяния иона при поляризационном взаимодействии с молекулой фуллерена показывает, что процессы захвата, захвата с дополнительной ионизацией и фрагментацией фуллеренов происходят преимущественно при параметрах удара, значительно превышающих радиус фуллерена.

Работа поддержана Российской исследовательской программой "Фуллерены и атомные кластеры: создание физико-химических основ материаловедения углеродных кластеров".

В ряде работ было экспериментально установлено, что при столкновении ионов с фуллеренами могут образовываться многозарядные нефрагментированные ионы  $C_{60}^{q+}$  с зарядностью до  $q = 7$  (см., например, [1]); процессы, связанные с фрагментацией иона фуллерена, осуществляются по двум каналам. Во-первых, как отрыв легких нейтральных фрагментов с массой, кратной массе двух атомов углерода  $C_{2k}$  ( $k = 1, 2, \dots$ ), и, во-вторых, как полный распад фуллерена на несколько легких, сравнимых по массе осколков [1–3].

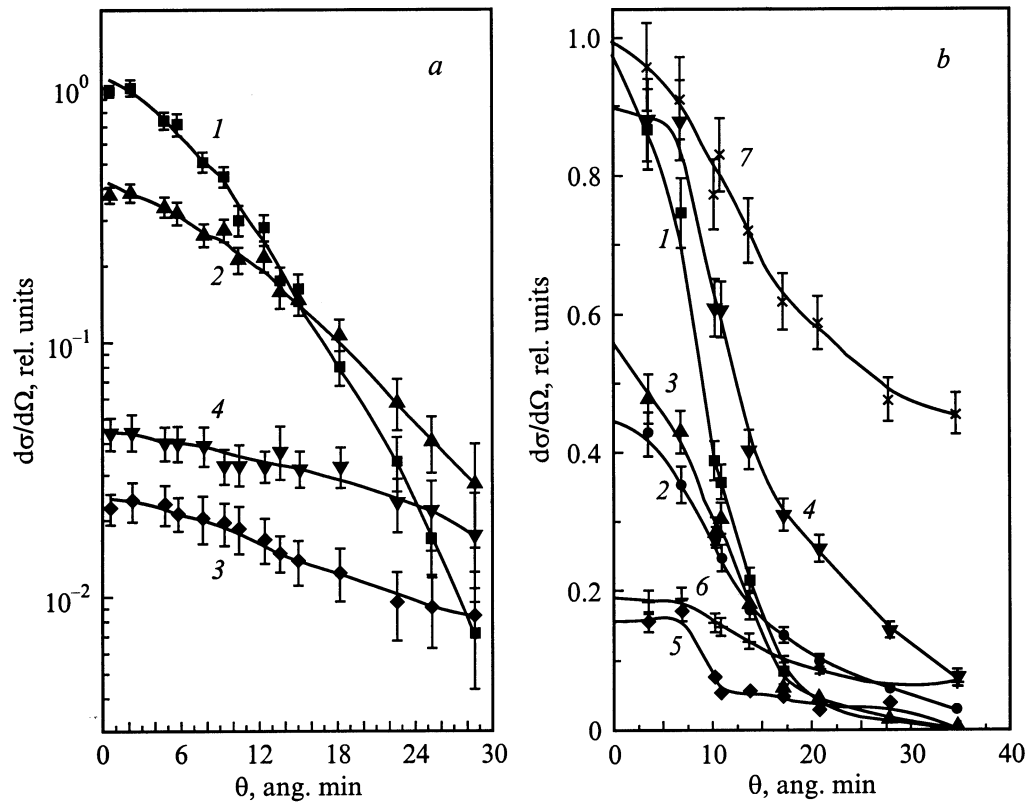
При столкновении фуллерена с медленными ионами (диапазон keV-энергий), так же как и при столкновении ионов с атомами, доминирующими по величине сечения, проявляются процессы, сопровождающиеся захватом электронов налетающим ионом (перезарядка). Наиболее развитым теоретическим подходом, используемым для описания процессов захвата электронов, которые происходят при больших параметрах удара  $\rho$ , превышающих радиус фуллерена  $R_f$ , и не сопровождаются ни возбуждением фуллерена, потерявшего электроны, ни его фрагментацией, является модель классических надбарьерных переходов [4,5]. С другой стороны, процессы, которые происходят при параметрах удара  $\rho < R_f$ , соответствующих проникновению налетающей частицы в молекулу, и ведут к многократной ионизации и фрагментации, рассматриваются в рамках модели электронного торможения иона [6,7].

Наиболее прямым методом экспериментальной проверки зависимости различных процессов от параметра удара является измерение дифференциальных сечений углового рассеяния налетающей частицы. Как было показано ранее [3,8], в keV-диапазоне столкновений при захвате одного электрона различными ионами фрагментации фуллерена практически не происходит, а при захвате двух электронов ионом  $He^{2+}$  процесс фрагментации на несколько легких осколков наиболее вероятен. Поэтому для исследования зависимости от параметра

удара были выбраны элементарные процессы, происходящие при захвате одного электрона ионом  $H^+$  и двух электронов ионом  $He^{2+}$ . Экспериментальная установка, описанная в работе [9], обладала угловым разрешением  $\Delta\theta \approx 0.08^\circ$  и обеспечивала исследование рассеяния быстрых атомов, образовавшихся в процессе захвата электронов, в диапазоне углов  $\theta = \pm 3^\circ$ . Массовое и зарядовое состояния ионов отдачи, возникающих из молекулы фуллерена, анализировались по времени пролета. Выделение конкретного элементарного процесса осуществлялось методом регистрации совпадений между быстрой налетающей частицей, рассеянной на определенный угол, и ионами отдачи, образовавшимися в том же столкновении.

При захвате электрона ионом  $H^+$  наблюдаются четыре элементарных процесса (см. рисунок, *a*). Дифференциальное сечение захвата одного электрона — процесса, имеющего самое большое полное сечение [9], — быстро убывает с уменьшением угла рассеяния быстрой частицы, что хорошо согласуется с данными работы [10]. При захвате двух электронов ионом  $He^{2+}$  наблюдается уже семь элементарных процессов (см. рисунок, *b*), основным из которых по величине полного сечения является процесс фрагментации молекулы на несколько заряженных осколков.

В области малых углов рассеяния определение соответствующих параметров удара производилось с учетом того, что при межъядерных расстояниях больше радиуса фуллерена взаимодействие налетающего иона и фуллерена обуславливается поляризационным притяжением, которое после захвата электрона существенно ослабляется из-за малой поляризуемости образующегося атома по сравнению с поляризуемостью фуллерена. Захват определяется переходами Ландау–Зинера в области пересечения термов образующейся квазимолекулярной системы. При нахождении точек пересечения термов учитывалась возможность захвата электронов фуллерена с энергиями связи 7.44, 9.3, 12, 12.33 eV.



Дифференциальные по углу рассеяния сечения элементарных процессов. *a)*  $\text{H}^+ + \text{C}_{60} \rightarrow \text{H}^0 + \{\text{C}_{60}\}^+$ , энергия столкновения  $E = 4.4 \text{ keV}$ : 1 — захват одного электрона ( $\text{C}_{60}^+$ ), 2 — захват электрона с ионизацией ( $\text{C}_{60}^{2+}$ ), 3 — захват электрона с двукратной ионизацией ( $\text{C}_{60}^{3+}$ ), 4 — захват электрона с ионизацией и отрывом  $k$  фрагментов  $\text{C}_2$  ( $\text{C}_{60-2k}^{2+}$ ). *b)*  $\text{He}^{2+} + \text{C}_{60} \rightarrow \text{He}^0 + \{\text{C}_{60}\}^{2+}$ , энергия столкновения  $E = 8.8 \text{ keV}$ : 1 — захват двух электронов ( $\text{C}_{60}^{2+}$ ), 2 — захват двух электронов с отрывом  $k$  фрагментов  $\text{C}_2$  ( $\text{C}_{60-2k}^{2+}$ ), 3 — захват двух электронов с ионизацией ( $\text{C}_{60}^{3+}$ ), 4 — захват двух электронов с ионизацией и отрывом  $k$  фрагментов  $\text{C}_2$  ( $\text{C}_{60-2k}^{3+}$ ), 5 — захват двух электронов с двукратной ионизацией ( $\text{C}_{60}^{4+}$ ), 6 — захват двух электронов с двукратной ионизацией и отрывом  $k$  фрагментов  $\text{C}_2$  ( $\text{C}_{60-2k}^{4+}$ ), 7 — захват двух электронов с фрагментацией иона фуллерена на несколько легких осколков ( $\Sigma \text{C}_n^{m+}$ ,  $n/m = 3-11$ ).

Проведенный анализ показывает, что процессы многократной ионизации и фрагментации при столкновениях ионов с фуллеренами происходят преимущественно при параметрах удара  $\rho > R_f$ . Определяющую роль в осуществлении ионизации и фрагментации фуллерена, сопровождающих захват электронов налетающими ионами, играет не передача кинетической энергии, а структура электронных уровней, заселяемых при столкновении, и энергия электронного возбуждения образующегося иона фуллерена.

- [6] T. Bergen, A. Brenac, F. Chandezon, C. Guet, H. Lebius, A. Pesnelle, B.A. Huber. *Eur. Phys. J.* **D14**, 317 (2001).
- [7] H. Tsuchida, A. Itoh, K. Miyabe, Y. Bitoh, N. Imanishi. *J. Phys. B: At. Mol. Opt. Phys.* **32**, 5289 (1999).
- [8] V.V. Afrosimov, A.A. Basalaev, V.P. Belik, Yu.V. Maidl, M.N. Panov, O.V. Smirnov. *Mol. Mat.* **11**, 125 (1998).
- [9] V.V. Afrosimov, A.A. Basalaev, V.P. Belik, Yu.V. Majdl, M.N. Panov, O.V. Smirnov. *Fullerene Sci. Technol.* **6**, 3, 393 (1998).
- [10] B. Walch, U. Thumm, M. Stockli, C.L. Cocke, S. Klawikowski. *Phys. Rev.* **A58**, 1261 (1998).

## Список литературы

- [1] S. Martin, L. Chen, A. Denis, J. Desesquelles. *Phys. Rev.* **A59**, R1734 (1999).
- [2] B. Walch, C.L. Cocke, R. Voelpel, E. Salzborn. *Phys. Rev. Lett.* **72**, 1439 (1994).
- [3] В.В. Афросимов, А.А. Басалаев, В.П. Белик, Ю.В. Майдль, М.Н. Панов, О.В. Смирнов. *ЖФТ* **68**, 12 (1998).
- [4] U. Thumm. *J. Phys. B: At. Mol. Opt. Phys.* **27**, 3515 (1994).
- [5] A. Barany, C.J. Setterling. *NIM Phys. Res.* **B98**, 184 (1995).