

Резонансы в эндоэдральных атомах и их проявления в фотоионизации и рассеянии быстрых электронов

М. Я. Амусья

Институт физики им. Дж. Рака, Еврейский университет, Иерусалим, Израиль
Физико-технический институт им. А. Ф. Иоффе РАН, С.-Петербург, Россия

Эндоэдраны есть сложные объекты, представляющие собой фуллерен C_N , состоящий из N атомов углерода, и «начинённый» внутри почти любым элементом таблицы Менделеева A или даже простой молекулой. Фуллерен представляет собой двумерную замкнутую оболочку, составленную из атомов углерода. В C_N четыре электрона от каждого C передаются в коллектив обобществлённых электронов. Фуллерен C_{60} почти идеально сферичен.

Эндоэдраны обозначаются как $A@C_N$. Эти объекты представляют большой научный и технологический интерес — как красивая и сложная многочастичная система с нетривиальной симметрией, и как «переносчик» других элементов, и как «строительный материал» новых веществ.

Целью этой лекции является изучение абсолютных и дифференциальных по углу вылетевшего электрона сечений поглощения фотонов и рассеяния быстрых заряженных частиц эндоэдралами. В этих сечениях проявляются интересные особенности, такие, как резонансы пленения [1,2], индуцированные резонансы [3,4], резонансы поляризации [5,6] и гигантские эндоэдральные резонансы [7]. Резонансы пленения возникают из-за отражения оболочкой фуллерена фотоэлектронной волны идущей из внутреннего атома A . Индуцированные резонансы возникают под влиянием резонансов пленения во внутренней оболочке, которые воздействуют на наружную оболочку в атоме A .

Пучок входящих фотонов существенно деформирует, поляризует электронную оболочку фуллерена C_N , что приводит к дополнительным резонансам поляризации. Их сочетание с резонансами пленения в наружных оболочках приводит к резкому увеличению сечений. Соответствующие максимумы называются гигантскими эндоэдральными резонансами. Их полное сечение превышает соответствующие чистые атомарные значения примерно на два-три порядка.

С теоретической точки зрения эндоэдраны предстают собой огромные атомы, в которых роль ядра играет помещённый внутрь атом A . Сложная структура эндоэдралов препятствует надёжному расчёту их свойств, исходя из «первых принципов». По сути, то, что нами применяется при их изучении делается в рамках приближения случайных фаз с обменом (ПСФО), хорошо зарекомендовавшего себя при рассмотрении изолированных атомов. Для

упрощения учитывается, что радиус фуллера C_N много больше, чем у атома A , а толщина оболочки фуллера порядка атомного радиуса. В этом приближении воздействие C_N на ионизацию атома A сводится к двум эффектам. Во-первых, к статическому потенциалу нулевой толщины, отражающему и преломляющему (но не поглощающему) электроны, удаляемые из атома A , т.е. действующему как резонатор. Во-вторых, к деформации или поляризации электронной оболочки фуллера под действием потока налетающих электронов, меняющих, притом, при определённых частотах весьма существенно, силу поля, действующего на атом A . В этом случае фуллереновая оболочка ведёт себя как резонатор, точнее — как усилитель.

В качестве конкретных примеров рассматриваются атомы благородных газов, помещённые внутрь почти сферически-симметричной оболочки C_{60} . Расчёты сечений фотоионизации и рассеяния быстрых электронов выполняются в рамках приближения случайных фаз с обменом (ПСФО), которое приобрело хорошую репутацию в исследованиях изолированных атомов. В наших расчётах мы заменяем фуллереновую оболочку потенциалом нулевой толщины. Поляризуемость C_{60} , которая дисперсионным соотношением связана с экспериментально наблюдаемым сечением фотоионизации C_{60} , определяет модификацию входящего пучка фотонов и, тем самым, структуру поляризационных резонансов.

Справедливость используемого нами подхода основывается не только на его внутренней теоретической согласованности. Важно и то, что предсказание полного уничтожения атомного гигантского $4d$ резонанса под действием C_{60} оболочки, мы сделали в рамках описанного выше подхода [2]. Наши результаты, в отличие от, на первый взгляд, более аккуратных, были подтверждены недавними измерениями [8].

Для неупругого рассеяния быстрых электронов результаты будут представлены для сечений и угловых параметров анизотропии, как дипольных, так и недипольных, для $3p$ и $3s$ Ar и $5p$, $5s$ и $4d$ Xe подоболочек [9,10]. Будет показано, что параметры анизотропии для фотоионизации и рассеяния быстрых электронов существенно отличаются, и объяснены физические причины этого эффекта.

Обсуждаемые резонансы проявляются и в распаде вакансий, образующихся при фотоионизации и неупругом электронном рассеянии [11]. Их учёт резко усиливает дополнительные каналы распада, открываемые за счёт присутствия фуллереновой оболочки и влияет вполне заметно даже на чисто атомные.

Определённого внимания заслуживают и так называемые «луковичные» эндоэдры со структурой, которая обозначается как $A@C_{60}@C_{240}$, т.е. «мат-

решечного» типа [12].

Литература

- [1] J.-P. Connerade, V. V. Dolmatov, and S. T. Manson, *J. Phys B: At. Mol. Opt. Phys.* **33**, 2279, (2000).
- [2] M. Ya. Amusia, A. C. Baltenkov, L. V. Chernysheva, *et al.* *J. Phys.: At. Mol. Opt. Phys. B* **38**, L169, (2005).
- [3] M. Ya. Amusia, L. V. Chernysheva and V. K. Dolmatov, on line, *Phys. Rev. A*, accepted, (2011).
- [4] M. Ya. Amusia and L. V. Chernysheva, *Pis'ma v ZhETP*, **95**, 2, 80, (2012).
- [5] M. Ya. Amusia and A. S. Baltenkov, *Phys. Rev. A* **73**, 062723, (2006).
- [6] M. Ya. Amusia and A. S. Baltenkov, *Phys. Lett. A* **360**, 294, (2006).
- [7] M. Ya. Amusia, A. S. Baltenkov, and L. V. Chernysheva), *JETP Lett.*, **87**, 4, 230-233, (2008).
- [8] A. Kilcoyne, A. Aguilar, A. Moller, *et al.* *Phys. Rev. Lett.* **105**, 213001, (2010).
- [9] M. Ya. Amusia, L. V. Chernysheva, and E. Z. Liverts, *Pis'ma v ZhETF*, **94**, 6, 466; *JETP Letters*, **94**, 6, 431, (2011).
- [10] M. Ya. Amusia, L. V. Chernysheva and E. Z. Liverts, on line 2011, *Phys. Rev. A*, submitted, 2012.
- [11] M. Ya. Amusia and A. S. Baltenkov, *Phys. Rev. A* **73**, 063206, (2006).
- [12] M. Ya. Amusia, L. V. Chernysheva and E. Z. Liverts, *Phys. Rev. A*, **80**, 032503-1-12, (2009).