

## КРАТКИЕ СООБЩЕНИЯ

## АТОМНАЯ И ЯДЕРНАЯ ФИЗИКА

УДК 621.384.6

ПОЛЯРИЗАЦИОННОЕ ТОРМОЗНОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ КАК СРЕДСТВО  
ДИАГНОСТИКИ СТРУКТУРЫ ФУЛЛЕРЕНОВ

В. К. Гришин

(НИИЯФ)

E-mail: grishin@depni.sinp.msu.ru

**Рассматриваются свойства поляризационного тормозного излучения (ПТИ), возникающего в результате взаимодействия быстрых зарядов с атомными электронами, на фуллеренах. Показывается, что в этом случае ПТИ имеет ряд характерных особенностей (осцилляции интенсивности при высоких частотах излучения, резкий всплеск интенсивности при малых частотах), позволяющих идентифицировать фуллерены.**

В настоящее время активно обсуждаются возможности использования различных разновидностей поляризационного тормозного излучения (ПТИ) для диагностики структуры вещества [1]. Среди прочих особый интерес вызывают вещества, содержащие фуллерены, в связи с перспективами их широкого применения [2]. Обнаружение фуллеренов и особенности их структуры могут быть исследованы с помощью ПТИ ускоренных электронов. Действительно, свойства ПТИ, которое является результатом взаимодействия быстрых зарядов с атомными электронами вещества, напрямую зависят от особенностей распределения последних.

Как результат ПТИ отражает характер межатомного взаимодействия в веществе, в том числе реагирует на присутствие фуллеренов. Последние, представляющие собой «макро-микро» объекты, имеют шароподобную форму, составленную из нескольких десятков односортовых атомов, которые образуют одно- или многослойную поверхностную структуру. Размеры фуллерена существенно больше размеров отдельного атома (так, радиус фуллерена  $C_{60}$  равен 0.35 нм, а радиус атома углерода — менее 0.1 нм).

Наиболее интересные особенности ПТИ на фуллерене, позволяющие выделить это излучение на фоне ПТИ от окружающей среды, должны наблюдаться в области энергий фотонов ниже 3–5 кэВ. Следовательно, длины волн излучаемых фотонов превышают расстояния между атомами в структуре фуллерена, и в первом приближении фуллерен можно представить как сферу с фактически однородным распределением всех атомных электронов.

В этом представлении свойства ПТИ могут быть предсказаны исходя из следующих физических представлений. Пусть ПТИ быстрого электрона, пролетающего через фуллерен, наблюдается под некоторым углом по отношению к его траектории. Для фотонов высоких энергий интенсивность ПТИ равна сумме

интенсивностей, излучаемых на отдельных атомных электронах. Однако в указанной выше области фотонных энергий ПТИ приобретает когерентный характер, поскольку процесс излучения охватывает большое число атомных электронов. Поэтому интенсивность ПТИ резко возрастает пропорционально квадрату числа когерентных электронов.

Одновременно в ПТИ будут наблюдаться несколько новых интерференционных эффектов. Если разница фаз излучаемых в заданном направлении фотонов от различных участков фуллерена оказывается кратной  $\pi$ , то суммарная интенсивность излучения будет либо ослабляться, либо усиливаться. В результате в спектре ПТИ должны наблюдаться осцилляции интенсивности, причем амплитуда осцилляций будет нарастать по мере уменьшения энергии фотонов.

Наконец, в области энергий фотонов, когда длина их волны становится больше диаметра фуллерена (т.е. в районе 1–1.5 кэВ), процесс когерентного ПТИ будет охватывать весь фуллерен, что должно сопровождаться резким всплеском интенсивности излучения.

Для конкретных оценок здесь можно воспользоваться аналитическим описанием ПТИ как процессом рассеяния виртуальных фотонов электромагнитного поля налетающих электронов на атомных электронах вещества [2–5]. Таким путем можно получить оценку интенсивности ПТИ в виде [4, 5]:

$$\frac{d^2 W_\omega}{d\omega d\Omega} = C Z_{\text{eff}}^2, \quad (1)$$

где  $W_\omega$  — спектральная плотность излучения с частотой  $\omega$  в элемент телесного угла  $d\Omega$ ,  $C$  — константа, слабо зависящая от частоты и угла излучения. Формфактор

$$Z_{\text{eff}}^2 = \left\langle \left| \sum_{s=1}^Z \exp(-i\mathbf{q}_\omega \mathbf{r}_s) \right|^2 \right\rangle \quad (2)$$

представляет результат интерференции излучения всех электронов фуллера, усредненного по их позициям  $\mathbf{r}_s$ . Здесь  $Z$  — полное число электронов в фуллере, вектор  $\mathbf{q}_\omega = \mathbf{k}'_\omega - \mathbf{k}_\omega$ ,  $q_\omega \simeq 2(\omega/c) \sin(\psi/2)$ ,  $\psi$  — угол излучения,  $\mathbf{k}_\omega$  и  $\mathbf{k}'_\omega$  — волновые векторы падающих (виртуальных) и излучаемых (реальных) фотонов.

Именно формфактор и отражает основную зависимость интенсивности ПТИ от частоты излучения (т. е. энергии фотонов; очевидно,  $Z_{\text{eff}}^2 \rightarrow Z$  при  $q_\omega \rightarrow \infty$ , и  $Z_{\text{eff}}^2 \rightarrow Z^2$  при  $q_\omega \rightarrow 0$ ).

Отметим, что интенсивность ПТИ в отличие от традиционного тормозного излучения (ТИ) на атомных ядрах слабо зависит от угла излучения, что позволяет наблюдать ПТИ под большими углами в условиях пониженного фона (поэтому ТИ здесь не рассматривается).

Процедура усреднения, базирующаяся на том, что энергия рассеиваемых фотонов существенно превышает энергию связи атомных электронов, в конечном счете приводит к выражению (промежуточные выкладки опускаются, см. [5]):

$$Z_{\text{eff}}^2 = Z + \frac{(Z-1)}{Z} \left[ \int_0^\infty (\sin(q_\omega r)/q_\omega) \rho r dr \right]^2, \quad (3)$$

где  $\rho$  — плотность распределения электронов в фуллере (норма  $\rho$  равна  $Z$ ).

Некоторые результаты численных расчетов величины приведенного формфактора  $Z_{\text{eff}}^2/Z^2$  как функции энергии излучаемых фотонов представлены на рис. 1, 2. В качестве примера рассматривается фуллерен типа  $C_{60}$  ( $Z = 360$ , внешний радиус  $R_1 = 0.35$  нм) в приближении однородного распределения атомных электронов в поверхностном слое с внутренним радиусом  $R_2$ . Рис. 1 иллюстрирует зависимость величины приведенного формфактора от энергии фотонов при углах излучения  $\psi_1 = \pi/4$  и  $\psi_2 = \pi/2$  при  $R_2 \sim R_1$ . Рис. 2 представляет аналогичную зависимость при различных значениях внутреннего радиуса  $R_2$  для  $\psi = \pi/4$ .

В целом результаты оценок подтверждают исходные физические предположения. Полученные графики четко отражают структурные особенности фуллера. Так, уменьшение внутреннего радиуса фуллера приводит к высокочастотному смещению спектра ПТИ. Очевидно, увеличение внешнего радиуса (свойственное, например, многослойному фуллерену  $C_{60}@C_{240}@...$ ) сопровождается «покраснением» спектра. Может показаться, что максимальная амплитуда осцилляций величины приведенного формфактора весьма мала, судя по его максимальной величине, равной единице. Однако необходимо подчеркнуть, что здесь значение  $Z^2$  очень велико. Поэтому в реальных условиях величина интенсивности ПТИ в фуллере должна заметно превосходить сигнал от излучения на аморфном окружении.

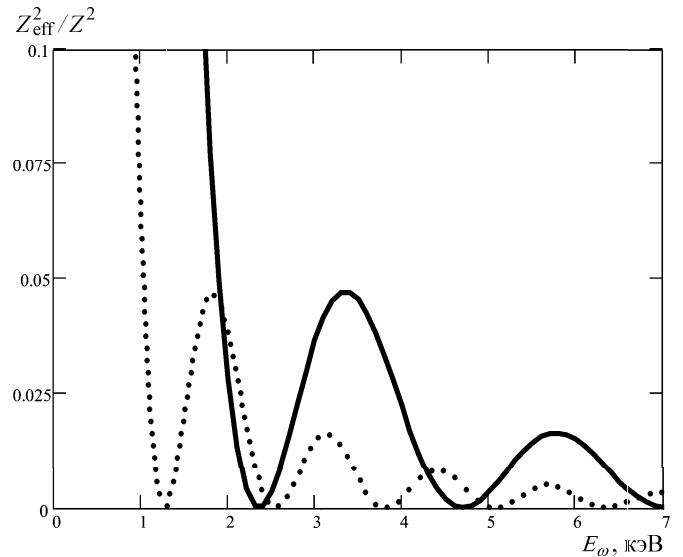


Рис. 1. Величина приведенного формфактора  $Z_{\text{eff}}^2/Z^2$  при различных энергиях и углах излучения фотонов в однослойном фуллере с радиусом  $R = 0.35$  нм,  $Z = 360$ . (1) —  $\psi = \pi/4$ ; (2) —  $\psi = \pi/2$

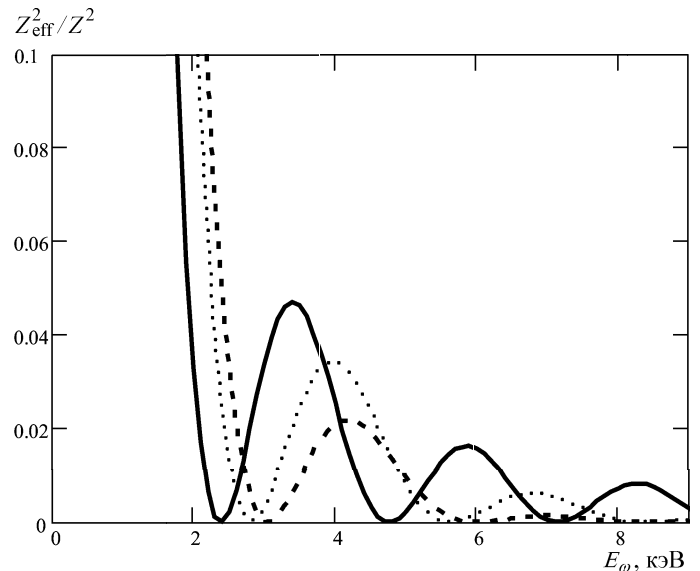


Рис. 2. Величина приведенного формфактора  $Z_{\text{eff}}^2/Z^2$  при различных энергиях излучаемых фотонов и толщинах поверхностного слоя фуллера; внешний радиус  $R_1 = 0.35$  нм,  $Z = 360$ ,  $\psi = \pi/4$ . (1) — внутренний радиус поверхностного слоя  $R_2 \sim R_1$ ; (2) —  $R_2 = 2R_1/3$ ; (3) —  $R_2 = R_1/2$

Это обстоятельство подчеркивает перспективность применения ПТИ для диагностики «макро-микро» структур, отличающихся большим разнообразием (упомянем, например, что в последнее время активно изучаются такие более общие нано-объекты, как гетерофуллерены, нанотрубки и др.)

Автор выражает искреннюю благодарность Н. Н. Насонову за обсуждение полученных результатов. Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (гранты 02-02-16941, 03-02-16587).

**Литература**

1. Елецкий А.В. // УФН. 2000. **167**, № 9. С. 945.
2. Ахиезер А.И., Берестецкий И.Б. Квантовая электродинамика. М., 1969. § 33.
3. *Amis'ia Ya., Vuimistrov V., Zon B.* et al. Polarization bremsstrahlung of particles and atoms. N. Y., 1992.
4. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Теория поля. М., 1960. § 80.
5. *Grishin V., Likhachev S.* // Phys. Lett. 2001. **A286**. P. 185.

Поступила в редакцию  
15.10.03