

Experiments on electron bremsstrahlung when passing through narrow slits and their interpretation in terms of inverse photoelectric effect

Эксперименты по тормозному излучению электронов при прохождении через узкие щели и их интерпретация в терминах обратного фотоэффекта

Демьянов В.В.

В специальных экспериментах торможения мягких электронов от энергии E_1 на входе узких отверстий до $E_2 < E_1$ на выходе сделан вывод о том, что источником тормозного излучения с энергией $\Delta E_{12} = E_1 - E_2$ в раскрытое узкое отверстие являются не пролетающие электроны, а излучение обратного фотоэффекта электронов стационарной атомной структуры границ отверстия. Доказательство построено на изучении пролёта через узкую щель (шириной < 0.2 мкм), только центрально-осевых электронов, возбуждающих кванты света с энергией ΔE_{12} от обратного фотоэффекта валентных электронов границ щели. Если с помощью внешних электродов внутри более широкой щели (> 2 мкм) создать поле с таким же тормозным потенциалом $\phi = \Delta E_{12}$, то, несмотря на такое же торможение в нём центрально-осевых пролётных электронов, выхода квантов света с энергией ΔE_{12} не наблюдается. Это позволяет по-иному интерпретировать механизм индуцированного излучения веществ при квантовых переходах в них частиц. Похоже, пролётные электроны выполняют роль возбудителей вокруг себя сферических зон нелинейности с радиусом ~ 0.2 мкм. Попадающие в эти зоны орбитали (с энергиями E_1 и $E_2 < E_1$) стационарных валентных электронов края узкого отверстия (шириной < 0.2 мкм) в соответствии с комбинационным принципом Ритца из разности термов $\nu_1 = E_1/h$ и $\nu_2 = E_2/h$ дают наблюдаемое в опытах монохроматичное излучение на частоте $\nu_{12} = \nu_1 - \nu_2$. Пролёт центрально-осевых электронов через более широкую щель (> 2 мкм) не захватывает зонами нелинейности орбиталей стационарных валентных электронов краёв отверстия, поэтому, несмотря на торможение внешним полем диафрагмы ($\phi = \Delta E_{12}$), пролётные электроны в этом случае не излучают на частоте $\nu_{12} = \Delta E_{12}/h$.

1. Традиционная интерпретация квантового перехода частицы

В микромодели перехода элементарной частицы со стационарного энергетического уровня E_1 на более низкий энергетический уровень E_2 считается, что именно она излучает электромагнитный (световой) квант с энергией $\Delta E_{12} = E_1 - E_2$ и частотой [1]:

$$\nu_{12} = (E_1 - E_2)/h = \Delta E_{12}/h. \quad (1)$$

Однако, окончательно-строгих доказательств того, что (1) является законом излучения самой движущейся частицы, нет. В схеме макроуровневого наблюдения возникающего излучения при торможении предварительно ускоренных частиц, равномерно движущихся при подлёте к узкой щели в непрозрачном экране, до сих пор дискутируется вопрос об источнике излучения. Одни считают, что излучают сами пролётные электроны в ходе торможения в узкой щели, другие связывают это излучение с электронами материала границ щели, возбуждаемых процессом торможения пролётных электронов [2]. В [2] особо подчёркивается, что по логике реализации реакции (1) равномерно движущаяся частица не излучает, но в случае пролёта через узкие щели с равномерной скоростью ($V_{B.ч} = \text{const.}) > c/n$ излучение (Вавилова-Черенкова) возникает. В выполненных мной опытах на более мягких электронах ($V_1 < V_{B.ч}$) уточняются условия, когда источником тормозного излучения, возбуждаемого центрально-осевыми пролётными электронами на частоте ν_{12} , является обратный фотоэффект с границ узкого отверстия (шириной < 0.2 мкм), электроны которых стационарно находятся на уровнях E_1 и E_2 . На основе обнаруженного нами факта отсутствия излучения с частотой ν_{12} при центрально-осевом пролёте электронов через щели шире 2 мкм даётся нетрадиционная [2] интерпретация процессов всякого индуцированного излучения, возникающего в "ближней" пролётной зоне замедленного, равномерного или ускоренного движений элементарной частицы.

2. Результаты экспериментов

В начале 1970-х годов, выполняя опыты по рассеянию мягких электронов с энергиями $0.3 \div 100$ эВ на узких щелях [3], я обнаружил эффект, согласно которому при центрально-осевом

пролёте электронов в узкой щели источником излучения оказываются не сами пролётные электроны, а электроны атомной структуры границ щели. Идея опыта представлена на рис. 1.

Ускоренный до энергии E_1 электрон движется в лабораторном вакууме с равномерной скоростью $V_1 = \text{const}$. При проходе через узкую щель с электродами на входе и на выходе, образующими двухэлектродную тормозную диафрагму (BD), электрон может терять (или приобретать, при обратном потенциале на электродах диафрагмы) часть кинетической энергии (до уровня $E_2 < E_1$). Далее он продолжает движение с уменьшенной (или увеличенной) равномерной скоростью $V_2 = \text{const}$ к визуализирующему экрану Э. Матрица полупроводниковых датчиков (MSS) фиксируют распределение плотности прихода электронов на плоскость этого экрана. Датчик центрально-осевых электронов (SCAE) в зоне максимума этого распределения выявляет электроны, проходящие через центр щели. Скорости V_1 и V_2 контролировались прямыми измерениями отношения $\Delta X / \Delta t_i$ (см. рис. 1а), в котором интервал Δt_i имел у нас при базах замера $0.2 \leq \Delta X \leq 2$ м наносекундный масштаб ($10 \leq \Delta t_i \leq 80$ нс) при разрешении ~ 5 нс.

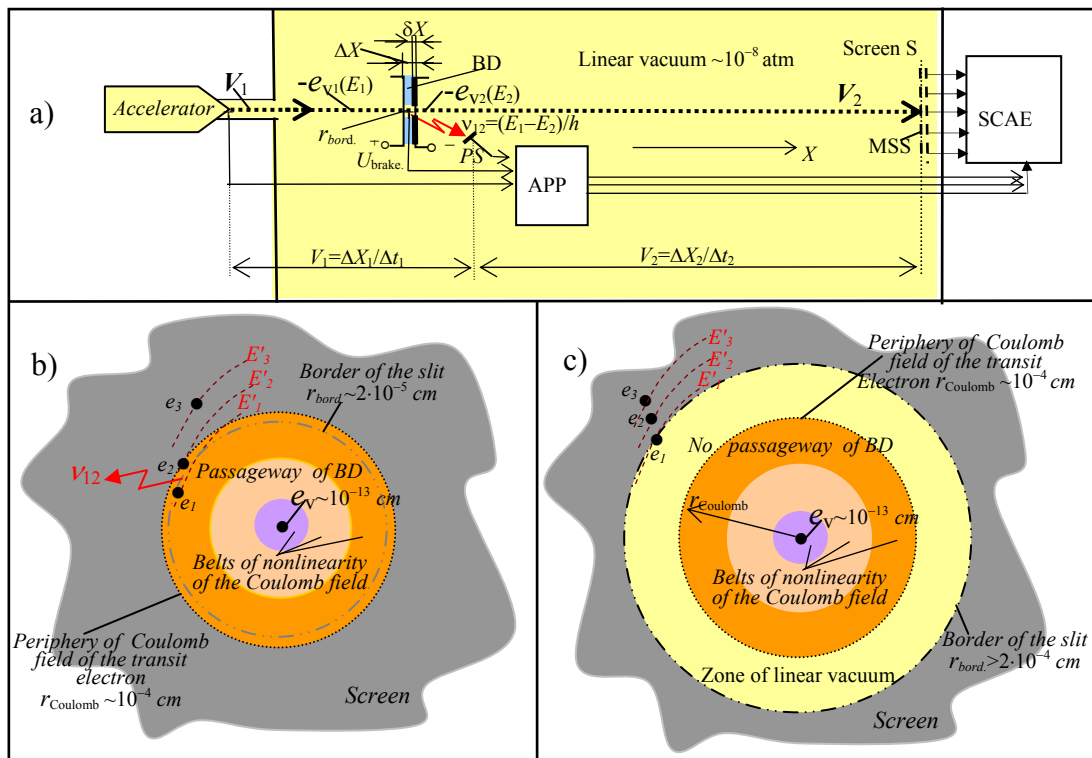


Рис.1. Схема прохождения мягких электронов (а) в экспериментах с узкими щелями, образованными отверстиями в правом электроде тормозной диафрагмы (BD). Этот электрод BD толщиной δX выполняет три функции: 1) щели с переменной (от 0,05 мкм до 10 мкм) шириной r_{bord} между границами; 2) "анализатора спектра" фотоимпульсов обратного фотоэффекта; 3) пластины конденсатора BD тормозного поля в зазоре ΔX . Используются следующие сокращения: APP – усилитель фото-импульсов от фото-сенсора (PS); SCAE – селектор центрально-осевых электронов, регистрируемых центральным датчиком матрицы полупроводниковых сенсоров (MSS). Энергии зон нелинейности вокруг электронов: $\bullet \sim 2 \div 3$ эВ; $\circ \sim 3 \div 5$ эВ; $\bullet \sim 5 \div 8$ эВ, выявляются с помощью правого электрода BD, изготавливаемого, соответственно, из CsAu, Ce, Ni.

На вставках b) и c) фиксируются два режима наблюдения:

- **наличие** излучения ЭМВ при пролёте электронов e_{v1} через центр "узких" (b) щелей (шириной < 0.2 мкм) в непрозрачном экране с BD (электрон не касается границ щели керном своего плотного тела, а действует на них только высокоэнергичной зоной своего нелинейного кулоновского поля, снижая при этом свою скорость на $\Delta V_{12} = V_1 - V_2$);
- **отсутствие** излучения ЭМВ при пролёте электронов e_{v1} через центр "широких" (c) щелей (шириной $\gg 1$ мкм) в непрозрачном экране, когда центрально-пролётный электрон не касается границ щели ни керном, ни высокоэнергичной зоной своего кулоновского поля, но тормозной потенциал конденсатора BD обеспечивает тот же уровень (ΔV_{12}) его замедления.

В описываемых экспериментах сконцентрировано внимание на двух причинах торможения электронов при пролёте узких щелей, снабжённых парой электродов тормозной

диафрагмы на входе и выходе (см. рис.1а). Первая причина связана с управляемым в эксперименте тормозным потенциалом на электродах BD. Вторая причина связана с электродинамическим взаимодействием пролётного электрона с границами пролётной щели и её следствиями являются только реакции торможения. Однако, выяснилось что при ускоряющем потенциале на BD реализуются режимы пролёта как с ускорением, так и замедлением, в зависимости от ширины щели (см. ниже).

Наблюдая за положительной разностью скоростей V_1-V_2 (т.е. положительной разностью энергий E_1-E_2) после пролёта каждым электроном зоны BD, процесс их торможения можно рассматривать как квантовый переход с уровня E_1 на более низкий уровень E_2 . Современная квантовая теория утверждает, что такой "тормозной" процесс (когда $E_2 < E_1$) всегда связан с излучением кванта света с частотой $\nu_{12}=(E_1-E_2)/h$. Как и следовало ожидать, в раскрыве отверстия я обнаружил излучение световых импульсов с частотой ν_{12} , определяемой (1). Световые импульсы фиксировались на выходе раскрыва узкого отверстия с помощью полупроводникового фотодатчика (рис.1а), который располагался на расстоянии ~ 10 мкм от края выходного отверстия BD и был подключён к усилителю фотоимпульсов (APP). Однако, выяснилось интересное обстоятельство.

Прохождение центрально-пролётных электронов через щель (когда отсутствует механический контакт электрона с границами щели) при одной и той же разности тормозных энергий E_1-E_2 световые импульсы на выходе раскрыва возникали только при очень узких щелях ($\delta X < 0.2$ мкм), и отсутствовали на выходе широких щелей ($\delta X > 2.0$ мкм).

С помощью этой схемы были выполнены специальные наблюдения возникновения световых вспышек, возбуждаемых только центрально-пролётными электронами, в зависимости от ширины щели в экране BD и от осевой длины δX тоннеля отверстия (т.е. от толщины стенок BD). В опытах были приняты все доступные в те годы меры идентификации связи возбуждения тормозных фото-импульсов частотой (1) именно с центрально-осевыми пролётными электронами, не имеющими механического kernового контакта с границей щели. Эта связь устанавливалась, в частности, с помощью контроля синхронного появления импульсов на селекторе центрально-осевых электронов (SCAE), приходящих от матрицы полупроводниковых датчиков (MSS) и усилителя фотоимпульсов (УФИ) на электронную схему совпадения с разрешением ~ 5 нс.

Итак, центрально-осевой пролёт электронов через "широкие" щели ($2 \text{ мкм} < \delta X < 50 \text{ мкм}$, рис.1с) в интервале тормозных потенциалов $1 < \Delta E_{12} < 100$ эВ на BD, не выявлял никакого излучения из раскрыва отверстия. При этом было видно, что электроны проходят тормозную зону BD за время $10^{-12} \text{ сек} \leq \tau_{\text{отв}} \leq 10^{-14} \text{ сек}$, теряя скорость $V_1-V_2=\Delta V_{12}$ и, соответственно, энергию $E_2 < E_1$ в указанном интервале $1 \text{ эВ} < \{(V_1^2-V_2^2) \cdot m/2\} < 100 \text{ эВ}$. С другой стороны, при центрально-осевом пролёте электронов через узкие щели ($\delta X \leq 0.2$ мкм, рис.1б) световые импульсы тормозного излучения аппаратура SCAC фиксировала всегда, причём, не только при наличии на обкладках конденсатора BD тормозного потенциала ($|-U_{\text{торм.}}| \neq 0$, рис.1а), но и при его отсутствии ($U_{\text{торм.}}=0$). Ведь в последнем случае центрально-осевой пролёт электронов должен иметь место с неизменной скоростью. Но даже при обращении знака тормозного потенциала ($+U_{\text{торм.}} \neq 0$), когда центрально-пролётные электроны должны ускоряться (т.е. не излучать, а поглощать кванты света), из раскрыва узких отверстий (критическим радиусом $r_{\text{кр.}} \leq 0.2$ мкм, рис.1б) аппаратура SCAC фиксирует такой же выход импульсов светового излучения спектрального состава (1), как и в случае ($U_{\text{торм.}}=0$).

В этих опытах мне удалось установить любопытную эмпирическую закономерность. Наблюдая фотоимпульсы на выходном отверстии BD с помощью аппаратуры SCAC (см.

рис.1а), я обнаружил пропадание излучения из раскрыва выходного отверстия с критическим радиусом $r_{кр.} \sim 0.2$ мкм при осевых длинах $\delta X_{кр.}$ тоннеля отверстия, становящихся длиннее следующей критической величины:

$$\delta X_{кр.} \geq r_{crit.} E_1 / \Delta E_{ф.э.}, \quad (2)$$

где $\Delta E_{ф.э.}$ – работа фотовыхода световых квантов из материала отверстия. Одно из следствий (2), зафиксированных в опытах, означает, что длина тоннеля $\delta X_{кр.}$ в BD, при которой на выходе отверстия прекращается образование фотоимпульсов со спектральной энергией $\Delta E_{ф.э.}$, во столько раз больше обнаруженной мной независимо величины $r_{Bord.} = r_{кр.}$, во сколько раз энергия E_1 ускоренных электронов на входе в отверстие BD больше энергии $\Delta E_{ф.э.}$ регистрируемых с помощью SCAE фотоимпульсов. Кроме роста E_1 пропорционально длине тоннеля $\delta X_{кр.}$ было обнаружено так же, что при смене ряда материалов: CsAu, Se и Ni для правого (по рис.1а) электрода BD величина $r_{crit.}$ уменьшалась от ~ 0.3 мкм до 0.1 мкм. Эти эмпирические закономерности могут быть полезными для дальнейших теоретических построений микромоделей комбинационно-тормозного излучения от обратного фотоэффекта с границ узких отверстий, бесконтактно (немеханически) возбуждаемых центрально-пролётными электронами.

Таким образом, анализ результатов этих экспериментов говорит о том, что при осевом пролёте электронов через широкие отверстия (радиусом > 2 мкм) с тормозным полем, создаваемым конденсатором BD (см. рис.1а), они хотя и тормозятся, теряя энергию $\Delta E_{12} > \Delta E_{ф.э.}$ своего движения за счёт торможения потенциалом $|-U_{торм.}| \neq 0$, но световых импульсов не излучают. Возникают вопросы, а правильно ли традиционное соображение [2], что свет излучает собственно частица, терпящая квантовый переход торможения, теряющая кинетическую энергию движения $E_1(V_1)$ до уровня $E_2(V_2) < E_1(V_1)$? Не является ли условием излучения света из раскрыва отверстия факт обязательного присутствия на расстояниях ≤ 200 нм края узкого отверстия (как в нашем опыте), или атомов любого другого вещества?

3. Обсуждение

Прямым следствием из проделанной серии экспериментов является доказательство *недостаточности* процесса энергетического перехода ("падения") свободного электрона с высокого энергетического уровня E_1 на более низкий $E_2 < E_1$ для того, чтобы этот электрон сам по себе мог излучать световой импульс с комбинационной частотой $\nu_{12} = (E_1 - E_2)/h$. Получается, что относительно свободный ускоренный электрон при отсутствии взаимодействия с электронами границ отверстия BD в радиусе < 0.2 мкм, сам по себе, при удалении от границ $>> 0.2$ мкм не излучает ничего в момент своего торможения (замедления) на резком полевом градиенте в вакууме.

Если принять этот результат к сведению, то традиционное представление о достаточности замедления движения электронов для возбуждения от них индуцированного излучения света требует такого уточнения, что неизбежна иная интерпретация процессов излучения. Речь идёт, прежде всего, об определённости реализаций комбинационного принципа Ритца для индуцированного излучения по (1). Дело в том, что разностные комбинации пар энергий E_1 и E_2 в этом принципе требуют определённости их значений в течение всего хода процесса излучения. Согласно (1), константность частоты ν_{12} в ходе излучения предполагает единовременную в течение $\Delta t = t_2 - t_1$ определённость разности $\Delta E_{12} = E_1 - E_2$.

Чтобы излучение кванта света самим пролётным электроном происходило по комбинационному правилу ($\Delta E_{12} = E_1 - E_2$) на единственной, как бы наперёд заданной моно-частоте (1), необходимо от начала $\{от t_1(E_1)\}$ и до конца $t_2(E_2)$ генерации излучения точное "знание" энергий E_1 и

E_2 , детерминистски, а не вероятностно привязанных к телу квантового осциллятора. Сам по себе замедляющийся электрон, вероятно, не может быть носителем сразу двух энергетических состояний и двух частот термов $\nu_1=E_1/h$ и $\nu_2=E_2/h$, из разности которых по правилу (1) комбинируется разностная частота $\nu_{12}=(E_1-E_2)/h$ генерируемого в ходе квантового перехода кванта света.

Индетерминизм проблемы унитарного излучателя был замечен учёными ещё в 1930-е годы и с тех пор дискуссии на эту тему сохраняют актуальность. Традиционное объяснение излучения кванта света собственно частицей, терпящей квантовый переход (падение) с энергетического уровня E_1 на уровень $E_2 < E_1$, требует объяснения невероятного явления. Именно, как замкнутая в себе частица может "знать" в течение всего времени квантового перехода точные значения энергий E_1 и E_2 (чтобы поддерживать разность $\Delta E_{12}=E_1-E_2=\text{const.}$, т.е. монохроматичность излучения)? Ведь во время перехода $\Delta t=t_2-t_1$ она уже покинула уровень E_1 , а проходя при торможении все значения E_i интервала энергий $E_1 > E_i > E_2$, ещё не пришла на уровень E_2 и вообще не ведает, на какой уровень упадёт. Описанные выше эксперименты показали, что сама по себе тормозящаяся частица в вакууме (в описанном выше отрыве далее чем на 0.2 мкм от взаимодействия с другими частицами границ отверстия) ничего не излучает. Существование монохроматического тормозного излучения из раскрыва узких отверстий и индуцированного накачкой излучения квантовых генераторов {с уровнем монохроматичности $\Delta\nu_{0.5}/(\nu_{12}) \sim 10^{-6} \div 10^{-8}$ [4]}, делает понятной реализуемость комбинационного излучения (1) только при определённости реализации бинарной комбинации $\Delta E_{12}=E_1-E_2=\text{const.}$ Это позволяет мне выдвинуть иную интерпретацию индуцированного излучения при квантовых переходах частиц.

Если, согласно описанному выше опыту, тормозящаяся полем широкого отверстия частица теряет энергию, переходя с уровня E_1 на $E_2 < E_1$, но сама по себе ничего не излучает, то, следовательно, эта энергия аккумулируется источником тормозного поля. В отсутствии же тормозного поля пребывающая в равномерном движении частица расходует свою энергию на возбуждение (поляризацию) вокруг себя нанометровой зоны нелинейности тонкой среды (физического вакуума, эфира). В физическом вакууме без частиц отдалённым нанокрестностям равномерно движущейся частицей импульс и энергия тот час возвращаются к ней полностью и она, шаг за шагом, далее движется равномерно по законам сохранения количества своего движения.

Таким образом, в ходе квантового перехода вокруг кинетически энергичных частиц, по-видимому, образуются возбуждённые зоны нелинейности физического вакуума радиусом до $\sim 100 \div 200$ нм. При вхождении такой частицы в зону взаимодействия радиусом $< 100 \div 200$ нм с атомами любой среды, все соответствующие пары стационарных частиц этой среды (с энергиями орбиталей $E_1=h\nu_1$ и $E_2=h\nu_2$, занятыми валентными электронами среды) начинают активно отбирать часть энергии этой поляризованной зоны на нелинейно-комбинационное преобразование частот термов ν_1 и ν_2 . Именно этот комбинационно-преобразовательный процесс тормозит ускоренную частицу, а не существование тормозного поля в вакууме, к которому равномерно движущаяся частица индифферентна как излучатель. В итоге нелинейно-комбинационного преобразования валентными электронами среды генерируются суммарно-разностные комбинации $\nu_{12}=\nu_1 \pm \nu_2$ и их гармоники [1]. Первые гармоники разностных колебаний $\nu_{12}=\nu_1-\nu_2$, во-первых, представляют собой "реализации комбинаций Ритца" и, во-вторых, являются наблюдаемыми нами в опытах световыми импульсами (квантами) излучения веществ (в моих опытах – от обратного фотоэффекта с границ отверстия), возбуждаемых комбинационно преобразовательным бесконтактным торможением пролётных электронов в среде. Можно полагать, что и в других известных способах накачки нелинейности среды, по-видимому, происходят аналогичные процессы генерации монохроматических

квантов излучения света не собственно пролётными нестационарными частицами, а частицами стационарных атомов среды, попадающих в зоны нелинейности, возбуждаемые процессами торможения заброшенных "накачкой" на верхний энергетический валентный уровень E_1 электронов.

Литература

- [1] Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. *Квантовая механика (нерелятивистская теория)* (М.: "Физматгиз", 1963) 654 с.
- [2] Гинзбург В.Л. Излучение равномерно движущихся источников (эффект Вавилова-Черенкова, переходное излучение и некоторые другие явления), УФН, т.171, №10, с.1097 (2003).
- [3] Демьянов В.В. *Эфиродинамический детерминизм Начал* (Новороссийск: НГМА, РИО, 2004) 568 с.;
Experiments performed in order to reveal fundamental differences between the diffraction and interference of waves and electrons, arXiv 1002.3880v1 (2010).
- [4] Tables of physical quantities, Handbook, edited by I.K.Kikoin, М.: "Atomizdat", 1976, p.634 (in Russian).

PACS

Bremsstrahlung, 03.50._z, 41.60._m, 78.70.Ck

41.60._m Radiation by moving charges

41.60.Dk Transition radiation

78.70._g Interactions of particles and
radiation with matter