

Тормозное излучение и квантовая механика электрона

Халецкий Михаил Борисович

Израиль, г. HADERA, 2023 г.

hal123mih@gmail.com

тл.+972 523298930, (0523298930)

Аннотация

Предлагается принципиально новый подход к квантованию кинетической энергии электрона в релятивистской механике. Основная идея статьи – учёт собственного вращения материальной точки.

Ключевые слова: кванты; фотоны; скорость; импульс; релятивизм; постоянная Планка; рекомбинация энергии.

Содержание

- П.1 Обобщённый импульс движения
- П.2 Моделирование реальности
- П.3 Квантовая физика
- П.4 Непрерывное изменение энергии
- П.5 Квантовое изменение энергии
- П.6 Рекомбинация энергии
- П.7 Рекомбинация импульса
- П.8 Выводы

Принятые сокращения

СТО – Специальная теория относительности (Special Theory of Relativity)

ЭТО – Элементарная теория относительности (Elementary Theory of Relativity)

ВЕРСИЯ – версия Элементарной теории относительности (VERSIY)

ИСО – Инерциальная система отсчёта (Inertial frame of reference)

П.1 Обобщённый импульс движения.

В классической механике, для случая абсолютно твёрдого тела, существует формула полной кинетической энергии движения

$$T = \frac{mv_1^2}{2} + I \frac{\omega^2}{2}, \quad (1)$$

где: m – суммарная масса всех точек тела, (kg) ;

v_1 – поступательная скорость тела вдоль траектории движения, (m/s) ;

I – момент инерции центра масс относительно оси вращения, $(kg * m^2)$;

ω – угловая скорость центра масс относительно оси вращения, (s^{-1}) .

Если вся масса тела приведена к центру масс и определён радиус инерции относительно мгновенной оси вращения, то формулу (1) можно переписать в следующем виде:

$$T = \frac{mv_1^2}{2} + \frac{mv_2^2}{2} = T_1 + T_2; \quad (2)$$

где, v_2 – скорость вращения материальной точки вокруг оси (m/s) .

В такой записи направление вектора угловой скорости ω не имеет принципиального значения. Ось вращения может проходить и через собственный центр масс тела, радиус инерции условный параметр. Твёрдое тело ассоциируется с материальной точкой, Fig. 1.

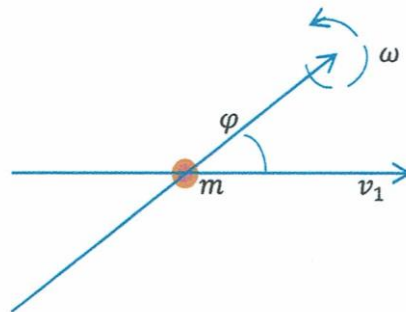


Figure 1: Собственное вращение.

Если между скоростями поступательного и вращательного движения существует функциональная связь $v_2 = f(v_1)$, то можно говорить об обобщённом механическом импульсе движения.

Определим обобщённый импульс точки как производную полной кинетической энергии по обобщённой скорости. В качестве обобщённой скорости выберем скорость поступательного движения, в качестве обобщённой координаты – траекторию движения.

Фактически материальная точка двигается по прямой линии или замкнутой окружности без поперечных сдвигов. Тогда,

$$p = \frac{\partial T}{\partial v_1} = \frac{\partial}{\partial v_1} \left(\frac{mv_1^2}{2} + \frac{mv_2^2}{2} \right) = mv_1 + mv_1 \left(\frac{v_2}{v_1} \frac{\partial v_2}{\partial v_1} \right). \quad (3)$$

При $v_2 = v_1$, $p = 2mv_1$.

Следовательно, обобщённый импульс можно рассматривать как сумму составляющих классического импульса и импульса вращения ориентированного вдоль траектории движения. Если функциональная связь между v_1 и v_2 отсутствует, что наблюдается на малых скоростях движения ($v_1 \ll c$, $v_2 \ll c$), то применимы только формулы энергии в виде (1) или (2). Импульсы определяются по составляющим энергии отдельно:

$$\partial T_1 = mv_1 \partial v_1; \quad \partial T_2 = mv_2 \partial v_2; \quad (4)$$

$$dT = \partial T_1 + \partial T_2 = p_1 \partial v_1 + p_2 \partial v_2.$$

Отношение разных теорий к собственному вращению элементарных частиц:

1. В механике Специальной теории относительности (Special Relativity) фигурирует только скорость поступательного движения v_1 в лабораторной ИСО. При переходе в подвижную систему отсчёта собственное вращение частицы не учитывается.[2][3];

2. В механике Элементарной теории относительности скорость собственного вращения при переходе в параллельную ИСО учитывается через суммарную скорость $V_{\text{пл}}$. В лабораторной ИСО частица движется вдоль траектории по винтовой линии.[6];

3. Квантовая механика на основе уравнений Шредингера, скорость собственного вращения частиц учитывает в комплексном виде. Волновые решения этих уравнений имеют сложный математический аппарат. По сути, вместо физики, учёным предлагают заниматься анализом математических операторов и квантовых чисел. Однако, на сегодняшний день это единственная теория, которая способна каким-то образом объяснить результаты многих физических экспериментов.[4];

4. В физике элементарных частиц часто используют смешанный подход на основе квантовой механики и СТО. В описании эффекта Комптона (Compton effect) такой подход даёт положительные результаты и понятные объяснения. Применение ВЕРСИИ в эффекте Комптона приводит к аналогичным выводам.[7].

П.2 Моделирование реальности

Находясь в рамках классической механики, получить достоверную запись формул кинетической энергии и импульса для скоростей сравнимых со скоростью света невозможно. Законы Ньютона основаны на практическом опыте малых скоростей движения. Различные теории релятивизма, основанные на физических постулатах, переносят действие с материальной точкой из реального пространства лабораторной ИСО

в эфемерную математическую модель альтернативной ИСО. В рамках модели ищут новые формы записи энергии и импульса, которые должны удовлетворять принципу соответствия классической механики на малых скоростях движения. Эти формы записи возвращают в лабораторную ИСО и пытаются проверить на практике. Принимать математическую модель за реальную физику, без конкретных доказательств, преждевременно. Так альтернативные модели в СТО и ЭТО, это плоские параллельные миры, где обобщённая координата точки совпадает с траекторией движения, а вращение собственного центра массы не очевидно. Если использовать для описания относительного движения неверные постулаты, то можно получить эвристические модели, изобилующие парадоксами и нестыковками с реальным миром. Какие-то части модели в экспериментах будут работать, а какие-то нет. **Любая модель мироздания требует комплексной проверки всех её параметров, а не отдельно взятых соотношений.** Модель, прошедшая такую проверку, может с большой осторожностью приниматься за описание физической реальности во всём диапазоне возможных скоростей.

П.3 Квантовая физика

Всё началось с Макса Планка [1]. Изучая спектр излучения абсолютно чёрного тела, он обнаружил необходимость делить энергию на отдельные порции (кванты). Он не сразу осознал полученные результаты, искал другие доказательства и объяснения спектра в рамках классической электродинамики. Не найдя других объяснений, Планк озвучил 14 декабря 1900г. своё предположение о квантовании энергии излучения как Гипотезу. Идея о квантовании энергии оказалась настолько успешной, что привела к эволюции физики элементарных частиц. Усилиями многих известных учёных Гипотеза переросла в полноценный аппарат квантовой механики, основанной на идеях Планка и уравнении Шредингера. На фоне новых идей релятивистская механика (СТО Эйнштейна) немного потускнела, но отдельные её элементы продолжают использоваться и в квантовой механике. **Основная проблема Специальной теории относительности заключается в полном отсутствии предпосылок к квантованию энергии.** ВЕРСИЯ Элементарной теории относительности, предлагаемая автором статьи, попытается восполнить этот недостаток.

Основные формулы записи полной кинетической энергии и обобщённых импульсов двух теорий:

<p>Special Relativity:</p> $p = \frac{mv}{\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}};$ $E_k = \frac{mc^2}{\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}} - mc^2.$	<p>VERSIYA:</p> $p = mv + \frac{mv}{\sqrt{1+\frac{v^2}{c^2}}};$ $E_k = \frac{mv^2}{2} + mc^2 - \frac{mc^2}{\sqrt{1+\frac{v^2}{c^2}}}.$
---	--

1. Из рассмотрений формул СТО видно, что на их основе выделение квантов энергии предвидеть невозможно. Уравнения сильно детерминированы и имеют однозначное толкование будущих событий.

2. Из рассмотрения формул ВЕРСИИ видно, что релятивистская составляющая энергии,

$$E_r = mc^2 - \frac{mc^2}{\sqrt{1+\frac{v^2}{c^2}}} \text{ (энергия вращения собственного центра масс), } \quad (5)$$

ограниченная переменная величина. В эффекте Комптона (см. <https://halmich.ru>) это выражение равно потенциальной энергии ионизации атома. Следовательно, выражение (5) можно ассоциировать с квантом энергии.

В последующих разделах приводятся расчёты и графики изменения энергии релятивистского электрона при торможении его в однородном электростатическом поле, в непрерывном и квантовом режиме.

П.4 Непрерывное изменение энергии.

Рассмотрим единичный акт торможения ультрарелятивистского свободного электрона в однородном электростатическом поле. В процессе торможения вся кинетическая энергия электрона переходит в электромагнитное излучение. Уравнение полной энергии движения электрона в вакууме:

$$E_k = \frac{m_e v^2}{2} + m_e c^2 - \frac{m_e c^2}{\sqrt{1+\frac{v^2}{c^2}}} = E_s + E_r . \quad (6)$$

Где: m_e – масса электрона, $9,1 * 10^{-31}$ (kg);

v – линейная скорость электрона, (m/s);

c – скорость света, $30 * 10^7$, (m/s);

E_s – классическая составляющая энергии, (J) или (eV);

E_r – релятивистская составляющая энергии (J) или (eV).

Запись формулы (6) в численном виде:

$$E_k = \frac{9.1 * 10^{-31} * v^2}{2} + 8190 * 10^{-17} - \frac{8190 * 10^{-17}}{\sqrt{1 + \left(\frac{v}{30 * 10^7}\right)^2}} \text{ (J) ;}$$

Связь единиц измерения энергии, $1eV = 1,602 * 10^{-19} J$.

Аналогично СТО, в ВЕРСИИ действует постулат: **в лабораторной системе отсчёта скорость поступательного движения электрона в вакууме не превышает скорости света; $v \leq c$.** Знак равенства, это чисто гипотетическая ситуация предельного состояния

электрона, т.е. $v \sim c$. В качестве независимой переменной используется относительный параметр $\beta = v/c$. Процесс торможения происходит в системе отсчёта лабораторной ИСО, **масса инвариантная величина**. Вектор линейной скорости электрона коллинеарный вектору напряжённости тормозящего поля. Ниже приводятся графики изменения энергий E_k и E_r в зависимости от скорости перехода электрона из ультрарелятивистского состояния ($v \approx c$) в состояние относительного покоя ($v \approx 0$). Предположим, электрон проходит потенциальный барьер, в **точности** соответствующий полной кинетической энергии движения.

$$E_k - Q = 0, \quad Q = eU,$$

где: Q – энергия потенциального барьера, $\langle eV \rangle$;

e – электрический заряд электрона, $1,602 * 10^{-19} \langle C \rangle$;

U – разность эл. потенциалов на границах барьера, $\langle V \rangle$.

Согласно требований квантовой электродинамики, ультрарелятивистский электрон должен излучить по формуле (6) один фотон с максимальной энергией,

$$h\nu_{max} = E_{kmax} = 6494 * 10^{-17} J (405,4 keV).$$

Где: h – постоянная Планка, $6,626 * 10^{-34} \langle J * s \rangle$;

ν – частота излучения, $\langle Hz \rangle$.

Максимальная частота излучения,

$$\nu_{max} = \frac{E_{kmax}}{h} = \frac{6494 * 10^{-17}}{6,626 * 10^{-34}} = 9,80 * 10^{19} Hz.$$

Минимальная длина волны,

$$\lambda_{min} = \frac{c}{\nu_{max}} = \frac{30 * 10^7}{9,80 * 10^{19}} = 3,061 * 10^{-12} m = 3,061 * 10^{-3} nm.$$

Минимальный период колебаний,

$$T_{min} = \frac{1}{\nu_{max}} = \frac{1}{9,80 * 10^{19}} = 0,1020 * 10^{-19} s.$$

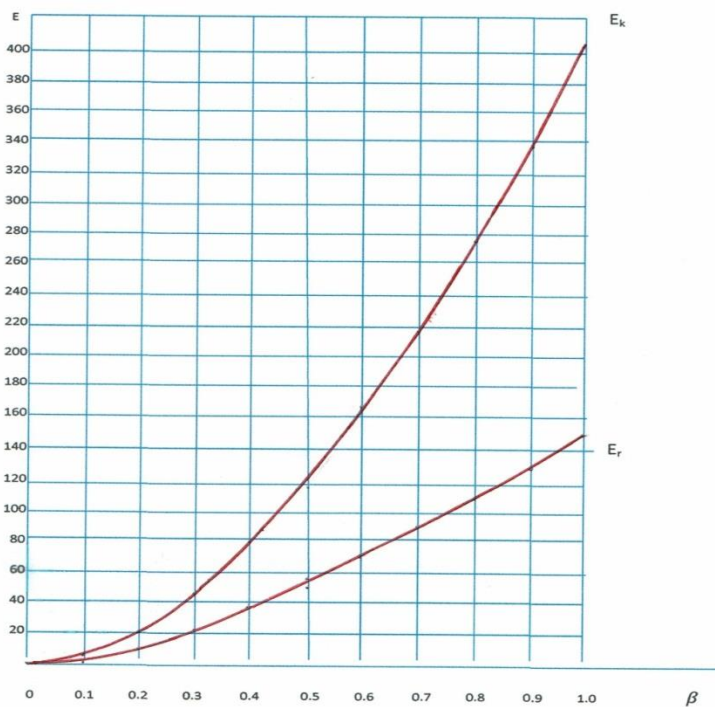


Figure 2: Непрерывное изменение энергий E_k and E_r , keV.

Диапазон частот рентгеновского излучения от $3 \cdot 10^{16} \text{ Hz}$ до $3 \cdot 10^{19} \text{ Hz}$. [8] Излученный фотон значительно превышает верхний порог рентгеновских частот и фактически относится к гамма-квантам. Излучение сконцентрировано в направлении движения электрона и должен наблюдаться линейчатый спектр распределения интенсивности по частоте. **Такое изменение энергии нехарактерно для тормозного излучения**, [9]. Следовательно, процесс торможения ультра - релятивистского электрона имеет более сложный характер и отличается от однофотонного преобразования энергии.

П.5 Квантовое изменение энергии

ВЕРСИЯ полагает – **излучение и поглощение фотонов веществом связано с квантованием кинетической энергии движения элементарных частиц.**

Для тормозного излучения, энергия рентгеновского фотона в точности равна релятивистской составляющей энергии вращения электрона. Проходя последовательно ряд задерживающих потенциальных барьеров, электрон излучает определённый ряд тормозных фотонов. Частота, энергия и количество испущенных фотонов зависят от энергетической ширины барьера и подлётной скорости электрона. В **единичном** акте торможения энергия фотона равна:

$$h\nu_1 = E_{r1} \leq eU \quad \text{или} \quad h\nu_1 = m_e c^2 - \frac{m_e c^2}{\sqrt{1 + \frac{v_1^2}{c^2}}} \leq eU; \quad (7)$$

где: U – разность электрических потенциалов на границах барьера;

v_1 – подлётная скорость электрона.

Рассмотрим движение ультрарелятивистского свободного электрона через ограниченный однородный потенциальный барьер, Fig.3.

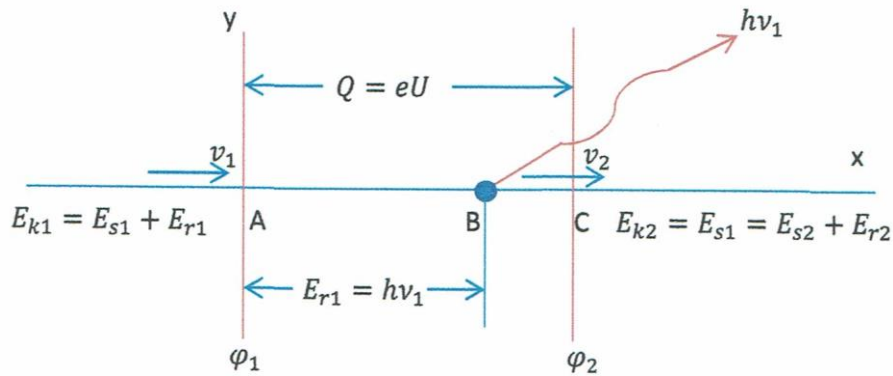


Figure 3: Q – энергетическая ширина барьера.

За начало координат принимается точка входа А на передней границе барьера. Барьер на Fig.3 обозначен красными вертикальными линиями. Внутри барьера электрон постоянно сравнивает собственную релятивистскую энергию E_r с энергией сопротивления барьера. Когда энергия сопротивления достигает значения E_{r1} (точка В), Электрон сбрасывает первичный квант электромагнитной энергии $h\nu_1$. Протяжённый барьер, ширина которого $eU \gg E_{r1}$, всегда можно разделить на ряд последовательных барьеров. Полная энергия движения E_k делится на ряд последовательных квантов $E_{r1} > E_{r2} > E_{r3} > \dots > E_{ri}$. В зависимости от энергетической ширины барьера возможны три принципиальных случая:

1. Туннельный эффект. Электрон проходит через узкий потенциальный барьер без потери энергии и скорости. Излучение фотонов отсутствует.

$$eU < E_{r1}. \quad (8)$$

2. Однофотонное излучение. Излучается первичный квант энергии в виде одного фотона.

$$eU \geq E_{r1}, \quad eU - h\nu_1 < E_{r2}. \quad (9)$$

3. Многофотонное излучение. Излучается ряд квантов энергии в виде множества фотонов.

$$eU \geq \sum E_{ri}, \quad eU - \sum h\nu_i < E_{r(i+1)}. \quad (10)$$

Энергия, импульс и скорость движения электрона изменяются скачками.

П.6 Рекомбинация энергии

После каждого акта излучения рентгеновского фотона происходит процесс восстановления формы записи кинетической энергии и механического импульса релятивистского электрона, т.е. **рекомбинация**.

На основании **закона сохранения энергии**, рекомбинация после излучения первичного фотона ($h\nu_1 = E_{r1}$) описывается соотношением:

$$E_{s1} = E_{k2}, \text{ или } \frac{m_e v_1^2}{2} = \frac{m_e v_2^2}{2} + m_e c^2 - \frac{m_e c^2}{\sqrt{1 + \frac{v_2^2}{c^2}}}; \quad (11)$$

где: v_1 – скорость движения электрона на входе в потенциальный барьер;

v_2 – скорость электрона после излучения первичного фотона.

Полная энергия движения электрона после рекомбинации равна классической кинетической составляющей энергии до рекомбинации.

Преобразования выражения (11) относительно скорости v_2 в относительных единицах приводят к уравнению,

$$x_2^3 + x_2^2(5 - 2x_1) + x_2(8 - 6x_1 + x_1^2) - (4x_1 - x_1^2) = 0, \quad (12)$$

где: $x_1 = \frac{v_1^2}{c^2}$; $x_2 = \frac{v_2^2}{c^2}$; – соответствующие квадраты относительных скоростей.

Считая, что начальная скорость ультрарелятивистского электрона $v_1 \cong c$ и $x_1 = 1$, первое уравнение рекомбинации принимает вид

$$x_2^3 + 3x_2^2 + 3x_2 - 3 = 0. \quad (13)$$

Корни уравнения: $x_1 = 0,59$; $x_1 = -1,79 + 1,37i$; $x_1 = -1,79 - 1,37i$.

Скорость электрона после первичной рекомбинации:

$$\frac{v_2^2}{c^2} = 0,59; \quad \frac{v_2}{c} = 0,7681; \quad v_2 \approx 23,0 * 10^7 \text{ m/s}.$$

Реализуется однофотонное излучение с энергией $E_{r1} = 149,80 \text{ keV}$, частотой $\nu_1 = 3,62 * 10^{19} \text{ Hz}$, длиной волны $\lambda_1 = 8,29 * 10^{-3} \text{ nm}$ при подлётной скорости электрона $v_1 = 30 * 10^7 \text{ m/s}$. Испущенный квант электромагнитной энергии имеет частоту колебаний на уровне верхней границы рентгеновского диапазона волн. **В общем случае подлётная скорость электрона не равна скорости света.**

Если энергетическая ширина потенциального барьера $eU \gg E_{r1}$, то реализуется многофотонное излучение. Уравнение (12) запишется в следующем виде:

$$x_{i+1}^3 + x_{i+1}^2(5 - 2x_i) + x_{i+1}(8 - 6x_i + x_i^2) - (4x_i - x_i^2) = 0, \quad (14)$$

где $i = 1, 2, 3, \dots, n$ – порядковый номер кванта энергии.

От фотона к фотону, от рекомбинации к рекомбинации, решение каждого предыдущего уравнения типа (14) является начальным условием по скорости для решения последующего уравнения. Ниже приводится расчёт параметров последовательного излучения фотонов для первых 11 шагов рекомбинации кинетической энергии ультрарелятивистского электрона.

Таблица 1

v_i * $10^7 m/s$	$\beta_i = \frac{v_i}{c}$	$x_i = \left(\frac{v_i}{c}\right)^2$	E_{ki} keV	$E_{ri} = hv_i$ keV	ν_i * $10^{19} Hz$	λ_i * $10^{-3} nm$	T_i * $10^{-19} s$
v_1 30.00	1.0000	1,000000	405,4	149,80	3,62	8,29	0,276
v_2 23.00	0,7664	0,587401	255,7	105,50	2,55	11,76	0,392
v_3 17.10	0,5700	0,324934	150,1	67,10	1,62	18,49	0,617
v_4 12.45	0,4160	0,172199	83,0	39,00	0,94	31,91	1,064
v_5 8.94	0,2981	0,088857	44,0	21,30	0,51	58,29	1,923
v_6 6.38	0,2125	0,045166	22,3	11,20	0,27	111,1	3,704
v_7 4.53	0,1509	0,022774	11,6	5,72	0,138	217,4	7,246
v_8 3.21	0,1069	0,011436	5,81	2,90	0,070	428,0	14,286
v_9 2.27	0,0756	0,005730	2,92	1,46	0,035	857,0	28,571
v_{10} 1.61	0,0536	0,002868	1,47	0,735	0,0177	1695,0	56,500
v_{11} 1.14	0,0379	0,001435	1,105	0,368	0,00834	3597,1	119,904

Ниже уровня скорости $v < 10^7 m/s$ электрон может вернуться на свободную орбиту ионизированного атома без релятивистских составляющих энергии и импульса (эффект Комптона)[6]. **В квантовом режиме, отдав последний возможный фотон излучения, электрон скачком теряет релятивистские свойства.** В таком случае:

$$E_k = \frac{m_e v^2}{2}; \quad p_e = m_e v.$$

На возможность такого окончания рекомбинации указывает существование красной границы внешнего фотоэффекта. Для последнего кванта энергии должно выполняться соотношение

$$E_{rmin} = m_e c^2 - \frac{m_e c^2}{\sqrt{1 + \frac{v_{min}^2}{c^2}}} = h\nu_{min}, \quad (15)$$

где: E_{rmin} – минимальный порог квантования энергии;

v_{min} – минимальная скорость рекомбинации.

Должно оставаться то минимальное количество кинетической энергии, которое необходимо для возвращения электрона на стационарную орбиту атома. В какой момент заканчивается рекомбинация энергии и начинается классическая физика автор статьи, не знает. Но существует интересный факт, для скорости электрона на первой

орбите атома Бора $v = 0,219 * 10^7 \text{ m/s}$, квант релятивистской энергии точно равен $E_r = 13,6 \text{ eV}$ [1]. Это минимальная порция энергии необходимая для ионизации атома водорода. Ниже в статье, красным цветом, приведён рекомбинационный график квантования энергии электрона на основании данных Таблицы 1, Fig.4.

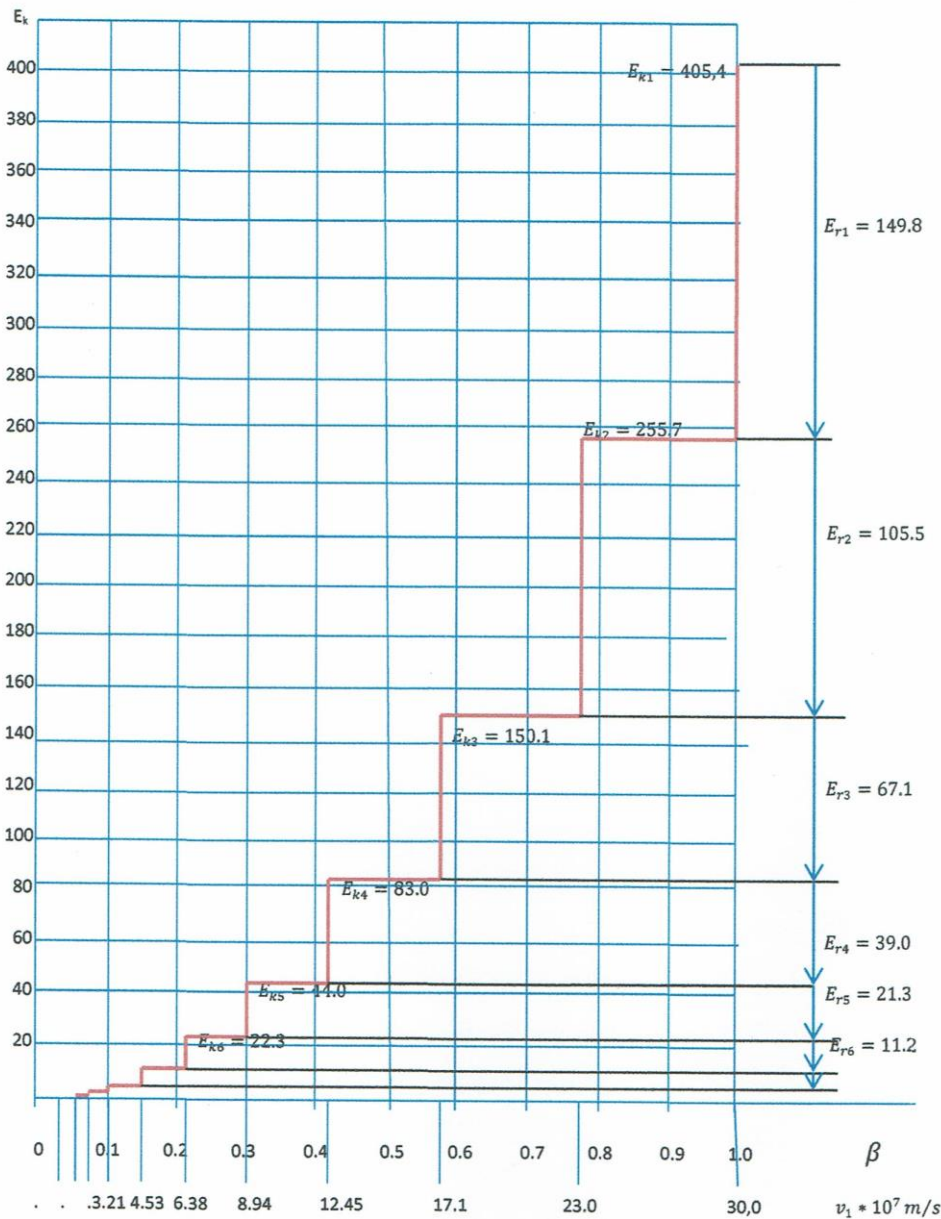


Figure 4: Квантовое изменение энергий E_k and E_r , keV.

П.7 Рекомбинация импульса

Запись **обобщённого** механического импульса **свободного** электрона имеет вид:

$$p_e = m_e v + \frac{m_e v}{\sqrt{1 + \frac{v^2}{c^2}}}. \quad (16)$$

Обобщенный импульс условно ориентируют вдоль траектории движения. Энергию собственного вращения и поступательного движения частицы суммируют арифметически.

Такая форма записи импульса хорошо работает при определении энергетических характеристик элементарных частиц. Однако направления взаимного движения электрона и тормозного фотона данная формула описать не может. Необходимо разделять обобщённый импульс на самостоятельные геометрические части, классический импульс (\vec{p}_{si}) и релятивистский (\vec{p}_{ri}). **При каждом акте рекомбинации энергии должен выполняться закон сохранения суммарного геометрического импульса системы в векторной форме, Fig.5.** Импульсы связаны соотношениями:

$$\vec{p}_i = \vec{p}_{si} + \vec{p}_{ri} ; \quad (17)$$

$$\vec{p}_{\gamma i} = \vec{p}_{si} - \vec{p}_{ri} .$$

Где: \vec{p}_i – вектор суммарного геометрического импульса электрона;

$\vec{p}_{\gamma i}$ – вектор электромагнитного импульса тормозного фотона.

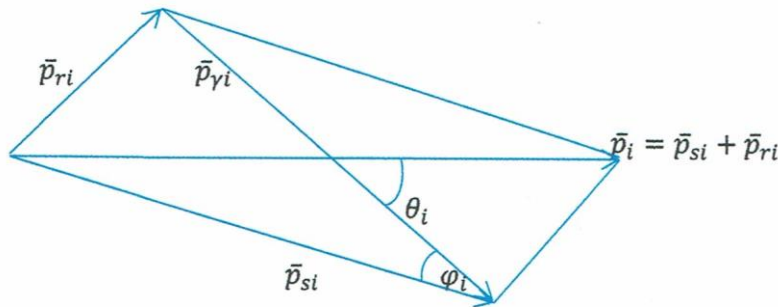


Figure 5: Диаграмма импульсов.

Из векторных соотношений (17) и формулы (16) получаем аналитическую запись соотношений импульсов для произвольного кванта энергии:

$$p_i p_{\gamma i} \cos \theta_i = p_{si}^2 - p_{ri}^2 ;$$

$$p_{si} = m_e v_i ;$$

$$p_i^2 = 2p_{si}^2 + 2p_{ri}^2 - p_{\gamma i}^2 ; \quad (18)$$

$$p_{\gamma i} = \frac{c}{v_i} (p_{si} - p_{ri}) ;$$

$$p_{ri} = \frac{m_e v_i}{\sqrt{1 + \frac{v_i^2}{c^2}}} ;$$

$$\frac{h v_i}{c} = p_{\gamma i} .$$

Ниже приводится Таблица 2 расчёта геометрии импульсов тормозного фотона и релятивистского электрона для первых 11 шагов рекомбинации кинетической энергии.

Подлётная скорость электрона к потенциальному барьеру принимается равной скорости света. В процессе движения через потенциальный барьер электрон осциллирует, выпуская фотоны разной энергии. Угол пересечения θ_i между векторами \vec{p}_i и $\vec{p}_{\gamma i}$ это не реальный угол, под которым наблюдатель регистрирует рентгеновские лучи относительно потока электронов. Реальный угол наблюдения определяется выражением:

$$\cos \varphi_i = \frac{p_{si}^2 - p_{ri}^2 + p_{\gamma i}^2}{2p_{si} * p_{\gamma i}} = \cos(\vec{p}_{si}; \vec{p}_{\gamma i}) . \quad (19)$$

Если полагать $\angle \vec{p}_{si}; \vec{p}_{ri} = 90^0$, то $\varphi_i = \theta_i/2$. Тормозные фотоны излучаются в конусе с угловым раствором $\varphi_i \leq 45^0$ по ходу движения электрона.

Релятивистские частицы совершают поступательное и вращательное движение одновременно. Полная энергия движения равна арифметической сумме энергий каждого вида. С помощью **обобщённого импульса**, энергию собственного вращения центра масс искусственно укладывают вдоль траектории движения. При этом положение оси вращения не имеет принципиального значения. Для пространственной ориентации движения используют **векторную диаграмму** импульсов. Последняя колонка Таблицы 2 соответствует расчёту обобщенного импульса электрона по формуле (16).

Таблица 2

$v_i *$ 10^7 m/s	$p_{si} *$ $10^{-24} \frac{\text{kg*m}}{\text{s}}$	$p_{ri} *$ $10^{-24} \frac{\text{kg*m}}{\text{s}}$	$p_i *$ $10^{-24} \frac{\text{kg*m}}{\text{s}}$	$p_{\gamma i} *$ $10^{-24} \frac{\text{kg*m}}{\text{s}}$	θ_i^0 degree	$p_{ei} *$ $10^{-24} \frac{\text{kg*m}}{\text{s}}$
$v_1 - 30,00$	273,00	193,00	466,00	80,00	0,00	466,00
$v_2 - 23,00$	209,30	166,10	373,65	56,35	39,63	375,40
$v_3 - 17,10$	155,61	135,19	289,30	35,82	55,04	290,80
$v_4 - 12,45$	113,30	104,64	217,11	20,87	65,38	217,94
$v_5 - 8,94$	81,35	77,97	158,95	11,34	72,62	159,32
$v_6 - 6,38$	58,06	56,79	114,70	5,97	77,70	114,85
$v_7 - 4,53$	41,22	40,76	81,92	3,05	81,32	81,98
$v_8 - 3,21$	29,21	29,05	58,24	1,55	83,85	58,26
$v_9 - 2,27$	20,66	20,60	41,25	0,78	85,66	41,26
$v_{10} - 1,61$	14,651	14,630	29,278	0,391	86,92	29,281
$v_{11} - 1,14$	10,374	10,367	20,740	0,184	87,80	20,741

В качестве тормозного поля, как правило, выступают многослойные электронные оболочки атомов. Спектр излучаемых фотонов напрямую зависит от рода вещества, в котором тормозится электрон. В рентгеновских трубках, это материал, из которого изготавливают анод. Тормозное излучение не включает в себя характеристическое рентгеновское излучение, которое возникает внутри атома при переходе электрона с одного энергетического уровня на другой. Как может рекомбинация кинетической энергии описать перемещение электронов внутри атома, автор статьи пока не знает. На этот вопрос должна ответить квантовая физика. В статье приведена упрощённая схема квантования энергии и импульса. Такие вопросы как: влияние угла входа электрона в потенциальный барьер; спектр распределения энергии излучения по частоте; зависимость

процесса рекомбинации от температуры; и т.п. в статье не рассматриваются. Все эти вопросы не должны заслонять собой основного механизма квантования энергии.

П.8 Выводы

1. В основе квантования электромагнитной энергии лежит **квантование кинетической энергии** электрона или другой заряженной частицы.

2. Существует **минимальная** скорость движения (v_{min}), при которой рекомбинация кинетической энергии прекращается скачком. Частица теряет релятивистские свойства. Эта скорость зависит от вида материала, в котором происходит торможение частицы и подлётной скорости. В эффекте Комптона, **на орбите атома**, электрон релятивистскими свойствами не обладает[6].

3. В диапазоне скоростей $v_{min} < v < 30 * 10^7 m/s$, полная энергия движения свободной частицы определяется на основании записи **обобщённого импульса** механической системы:

$$p = mv + \frac{mv}{\sqrt{1+\frac{v^2}{c^2}}} = |\vec{p}_s| + |\vec{p}_r|; \quad E_k = \frac{mv^2}{2} + mc^2 - \frac{mc^2}{\sqrt{1+\frac{v^2}{c^2}}}.$$

Дискретность решений уравнения (14) по скорости, не допускает приближений в данных выражениях. Векторы импульсов \vec{p}_s и \vec{p}_r , это разные по своей природе вектора*. Энергия вращения складывается с энергией поступательного движения арифметически. Для скоростей электрона $v < v_{min}$ обобщённый импульс равен:

$$p_e = p_s = m_e v; \quad p_r = 0.$$

Согласно модели Бора, данные скорости соответствуют нахождению электрона на стационарных орбитах атома, он постоянно находится в движении. Действуют законы классической механики. Вращение относительно собственного центра массы отсутствует.

4. На релятивистских скоростях движения **суммарный геометрический вектор** механических импульсов не является достоверным носителем информации об энергии квантовой системы. Он необходим только при определении взаимного положения электрона и тормозного фотона в пространстве.

5. Вращение частицы относительно собственного центра массы в квантовой механике характеризуется термином СПИН. Это квантовое число $s = \pm \frac{1}{2}$. Роль спина в ВЕРСИИ играет **релятивистская составляющая** обобщённого импульса свободной частицы. Составляющая записывается в обобщённом виде,

$$p_r = \pm \frac{mv}{\sqrt{1+\frac{v^2}{c^2}}}, \quad \text{различие в знаке называется когерентностью.}$$

Для отдельно взятой частицы знак когерентности всегда положительный. **Понятие отрицательной когерентности имеет физический смысл только при парном взаимодействии однотипных частиц с противоположными спинами.**

б. Точность решений уравнений (14) по скорости, это исключительно математическая задача. То, что удалось автору статьи просчитать отражено ниже в таблице 3.

№ quantum	1	2	3	4	5	6	7	8
$v, * 10^7 \text{ m/s}$	30,000	23,000	17,100	12,450	8,940	6,380	4,530	3,210
№ quantum	9	10	11	12	13	14	15	16
$v, * \text{ m/s}$	2,270	1,610	1,140	0,804	0,5684	0,4025	0,2846	0,2012

Скорость v на 16-ом. шаге рекомбинации энергии близка к скорости вращения электрона на первой орбите атома Бора.

* П Р И М Е Ч А Н И Е: Выражение $v/\sqrt{1 + \frac{v^2}{c^2}}$ является **обобщённой относительной скоростью** (Δ). Относительная скорость ортогональна вектору линейной скорости v в лабораторной ИСО. Соответственно импульсы \vec{p}_s и \vec{p}_r при определении энергии условно располагают под углом 90^0 . Релятивистская частица находится в двух системах отсчёта одновременно и движется вдоль траектории по винтовой линии бесконечно малого радиуса вращения, (ВЕРСИЯ, <https://halmich.ru>).

Литература:

1. Фейнман Р., Лейтон Р., Сэндс, Фейнмановские лекции по физике. Том 3: Излучение. Волны. Кванты. Перевод с английского (издание 4). – Эдиториал УРСС. – ISBN 5-354-00702-Х.
2. Л. Д. Ландау, Е. М. Лифшиц, ТЕОРИЯ ПОЛЯ, издание шестое, издательство «НАУКА», 1973г.
3. А. Д. Гладун, Элементы релятивистской механики – 2-е изд. – М.; МФТИ, 2012, 37с. УДК 53.
4. Г.А. Розман, Р649 Лекции по квантовой механике – Псков: ПГПИ. 2003. – 156с, ISBN 5-87854-214-5
5. С.В. Морозов., « Релятивистская квантовая механика на кончике карандаша», 29.10.2012г, <http://www.ras.ru> , PDF.
6. М.Б. Халецкий, ВЕРСИЯ Элементарной теории относительности, 2019г., <https://halmich.ru/> , PDF.
7. М.Б. Халецкий, Эффект Комптона (ВЕРСИЯ), 2020г., <https://halmich.ru/> , PDF.
8. Google, X – ray frequency range, COSMOS - The SAO Encyclopedia of Astronomy, <https://astronomy.swin.edu.au/cosmos/X/X-rays>.

9. Тормозное излучение (Bremsstrahlung Radiation).

<http://nuclphys.sinp.msu.ru/enc/e166.htm>