Релятивизм ближе чем нам кажется

Халецкий М. Б.

Израиль, г.HADERA 2024

hal123mih@gmail.com

Аннотация

Теория и решение задач на лобовое столкновение электронов с применением формул Элементарной теории относительности(ЭТО). Элементарная теория принципиально отличается от Специальной теории относительности Эйнштейна.

Ключевые слова: импульс, энергия, скорость, столкновение, расстояние, радиус, теория, задачи.

Содержание

Тема 1. Краткая информация по теории ЭТО.

1. Скорости элементарных частиц делятся на три основных диапазона:

a) нерелятивистские $0 \leq v < 1.095 \cdot 10^6\ ms^{-1}$;

b) релятивистские $1{,}095 \cdot 10^6 \leq v \leq 10 \cdot 10^6\ ms^{-1}$;

c) ультрарелятивистские $10 \cdot 10^6 \leq v \leq 299.972 \cdot 10^6\ ms^{-1}$.

2. В нерелятивистском диапазоне, элементарные частицы подчиняются законам классической механики Ньютона (импульс, кинетическая энергия):

$$\vec{p} = m\vec{v}\ ; \qquad E_k = \frac{mv^2}{2}.$$

В релятивистское состояние частица переходит скачком на скорости движения 1.095$\cdot\ 10^6\ ms^{-1}$.

3. В релятивистских диапазонах, движение частицы происходит под действием двух механических импульсов: классического и релятивистского. Релятивистская составляющая связана с собственным кручением частицы [1]. Такой импульс называется обобщенным:

$$\vec{p} = m\vec{v} + \frac{m\vec{v}}{\sqrt{1+\frac{v^2}{c^2}}} + \frac{\alpha^2}{8}\frac{m\vec{v}}{\sqrt{1+\frac{v^2}{c^2}}}\ ; \qquad (1)$$

$$\vec{p} = \vec{p}_s + \vec{p}_r + \vec{p}_h\ .$$

Здесь: $\vec{p}_s -$ импульс поступательного движения;

$\vec{p}_r -$ линейный аналог импульса собственного кручения;

$\vec{p}_h -$ импульс прецессии собственного кручения;

$\alpha -$ постоянная тонкой структуры (7,297 352 569 $\cdot\ 10^{-3}$).

При решении задач, импульсом прецессии $\vec{p}_h$ пренебрегают, он много меньше $\vec{p}_s$. Запись полной кинетической энергии релятивистской частицы имеет следующий вид:

$$E_k = \frac{mv^2}{2} + \left(mc^2 - \frac{mc^2}{\sqrt{1+\frac{v^2}{c^2}}}\right) - \frac{\alpha^2}{8}\frac{mc^2}{\sqrt{1+\frac{v^2}{c^2}}}\ ; \qquad (2)$$

$$E_k = E_s + E_r - E_h\ .$$

Здесь: $E_s -$ энергия поступательного движения;

$E_r -$ энергия релятивистского кручения;

$E_h -$ энергия прецессии кручения.

4. В релятивистском интервале скоростей, **на примере свободного электрона,** формулы (1) и (2) можно упростить исходя из приближенных соотношений.

$$|\vec{p}_r| \cong |\vec{p}_s| = |m\vec{v}| \,;$$

$$mc^2 - \frac{mc^2}{\sqrt{1+\frac{v^2}{c^2}}} \approx \frac{mv^2}{2} \,;$$

$$\frac{\alpha^2}{8}\frac{mc^2}{\sqrt{1+\frac{v^2}{c^2}}} \approx 3.4\ eV.$$

После упрощения, запись обобщенного импульса и кинетической энергии одного электрона выглядит следующим образом:

$$\vec{p} = 2m\vec{v} \,;$$

$$E_k = mv^2 - 3.4\ eV.$$

Энергия прецессии выражается в электрона-вольтах (eV). Поглощение фотонов в вакууме не происходит. Столкновение частиц надо считать упругими. Выполняются **законы сохранения обобщенного механического импульса и полной энергии системы** взаимодействующих частиц**.** Механическая система считается замкнутой.

$$\vec{p} = \sum_i 2m\vec{v}_i = const. \,;$$

$$W = \sum_i \left(mv_i^2 - 3.4\ eV\right) + W_p = const \,.$$

Для электронов все частицы одинаковые по массе и заряду. $W -$ суммарная энергия системы зарядов. $W_p -$ потенциальная энергия взаимодействия заряженных частиц. При решении задач в лабораторной системе отсчета, выбирают удобную систему координат.

5. Зависимость скорости движения электрона от ускоряющего напряжения, в первом приближении, определяется по формулам:

$v = 594\sqrt{U}\ -$ классическая механика, $km \cdot s^{-1}$;

$v = 420\sqrt{U + 3{,}4\ V}\ -$ релятивистская механика, $km \cdot s^{-1}$.

Здесь U, разность потенциалов ускоряющего (внешнего) электрического поля на бесконечности. Для релятивистского интервала скоростей значение U находится в диапазоне от $3.4\,V$ до $600\,V$. Для ультрарелятивистского интервала формула зависимости скорости от напряжения имеет сложный вид:

$Ue = \frac{mv^2}{2} + mc^2 - \frac{mc^2}{\sqrt{1+\frac{v^2}{c^2}}};\ -$ ультрарелятивистский интервал.

Энергией прецессии пренебрегают. Ускоряющее напряжение доходит до 400 тыс. вольт. Скорость электрона приближается к скорости света. Разница характеристик движения нерелятивистских и релятивистских электронов показана на Рисунке 1.

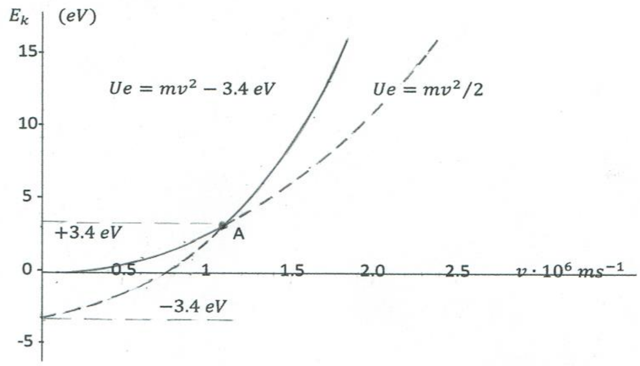


Рис. 1

Для решения задач интересна только начальная часть характеристик. В точке А электрон переходит из классического состояния в релятивистское. Работа выхода электронов из металлов, как правило, больше $3.4\,eV$ (например торий). Есть металлы с работой выхода меньше $3.4\,eV$ (например цезий). Но такие металлы редкое исключение из правила. На основании сравнения характеристик можно полагать, что в идеальном вакууме все электроны релятивистские. Электроны не стоят на месте, они непрерывно двигаются. Минимальная скорость движения за пределами вещества $v = 1.095 \cdot 10^6\ ms^{-1}$. Внутри вещества скорость теплового движения электронов на порядок меньше, $v \approx 10^5\ ms^{-1}$.

6. Радиус волновой сферы релятивистских и ультрарелятивистских электронов зависит от скорости поступательного движения [2]. Чем больше скорость, тем меньше радиус. График зависимости $r_n = f(v_n)$ приведен на Рисунке 2. Минимальный радиус при $v \to c$, $r_{min} = 0.0101$ Å, максимальный $-$ 2,12Å при $v = 1.095 \cdot 10^6\ ms^{-1}$.

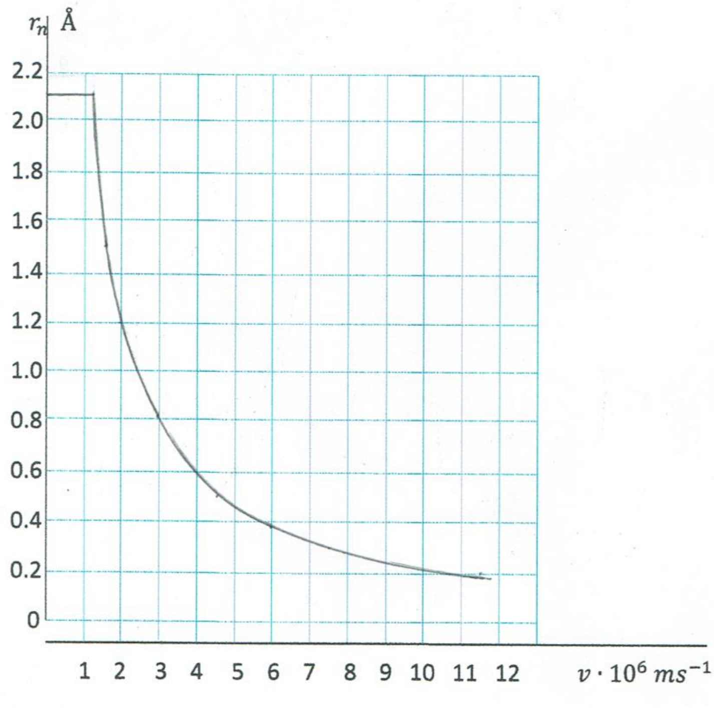


Рис. 2 , $1 Å = 10^{-10}\ m$.

Вопрос, почему рассматриваются только лобовые столкновения. Ответ, чтобы не учитывать силу Лоренца от взаимодействия налетающего электрона с магнитным полем противоположной частицы. Учет силы Лоренца приводит к необходимости определять прицельное расстояние и эффективное сечение взаимодействия. Данные параметры определяют вероятность прямого столкновения. Вероятность такого события очень низкая, возможно одно на миллиард последовательных столкновений. Эта проблема решается в ускорителях заряженных частиц на встречных пучках. Чем больше заряженных частиц в пучке, тем больше вероятность зафиксировать результаты события прямого столкновения.

В классическом представлении, электроны упруго сталкиваются как твердые заряженные частицы и разлетаются без разрушений в противоположных направлениях.

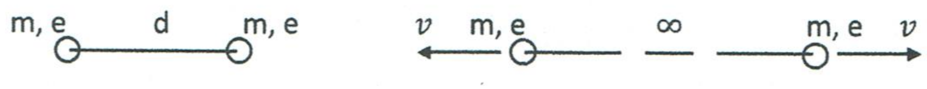
В релятивистском представлении, электроны преодолевают потенциальный барьер, пересекаются в волновом виде и разлетаются в противоположных направлениях без разрушений.

В задачах №1; 2; 3; используется классическое представление электронов. В задачах №4; 5; 6; 7; используется релятивистское представление.

Задача №1

Два электрона в связанном состоянии находятся на расстоянии **d** друг от друга. При обрыве связи на электроны действуют расталкивающие силы Кулона. Определить расстояние **d,** если в свободном состоянии электроны приобретают на бесконечности минимальную релятивистскую скорость, $v = 1.095 \cdot 10^6\ ms^{-1}$. Сравнить полученное расстояние с размерами волновой окружности электрона и сферой Комптона.

Решение: [Связь обрывается, электроны ускоренно разлетаются по прямой линии. На бесконечности силы Кулона практически не действуют. Частицы двигаются по инерции с постоянной скоростью. Скорости одинаковые].



Состояние 1 Состояние 2

В состоянии 1, кинетическая энергия системы двух электронов равна нулю. Сумма импульсов равна нулю. Существует только потенциальная энергия электрического взаимодействия пары заряженных частиц, W_p.

$$\sum_1 p_i = 0; \quad \sum_1 E_{ki} = 0; \quad W_p = k\frac{e^2}{d}.$$

Здесь: $k -$ коэффициент пропорциональности в законе Кулона, $9 \cdot 10^9\ Nm^2C^{-2}$ **;**

е – элементарный заряд электрона, $1{,}6022 \cdot 10^{-19}$ C .

В состоянии 2, на бесконечности, потенциальная энергия электрического поля равна нулю. Существует только кинетическая энергия двух электронов. Геометрическая сумма импульсов равна нулю.

$$\sum_2 p_i = 2mv_1 - 2mv_2 = 0;\ v_1 = v_2 = v;$$

$$W_p = 0;$$

$$\sum_2 E_{ki} = 2(mv^2 - 3.4\ eV).$$

Определяем расстояние $\boldsymbol{d}$. Выполняются законы сохранения механического импульса и полной энергии системы зарядов : $\sum_1 p_i = \sum_2 p_i = 0;\ W_1 = W_2$.

$$v_1 = v_2 = v = 1.095 \cdot 10^6\ ms^{-1};$$

$$k\frac{e^2}{d} = 2(mv^2 - 3.4\ eV);$$

$$d = k\frac{e^2}{2(mv^2 - 3.4\ eV)}.$$

Подставляем числовые значения параметров. Масса электрона $m = 9.11 \cdot 10^{-31}\ kg$. Электрон-вольты переводим в джоули, $3{,}4 \cdot 1{,}6022 \cdot 10^{-19}\ J$. Получаем:

$$d = 9 \cdot 10^9 \frac{1.6022^2 \cdot 10^{-38}}{2(9.11 \cdot 10^{-31} \cdot 1.095^2 \cdot 10^{12} - 3.4 \cdot 1.6022 \cdot 10^{-19})} = 2.11\ \text{Å}.$$

Радиус волновой окружности электрона в состоянии относительного покоя равен, $r_{n\,max} = 2{,}12\ \text{Å}$. Радиус сферы Комптона равен, $r_c = 0{,}00386\ \text{Å}$. Находим отношения:

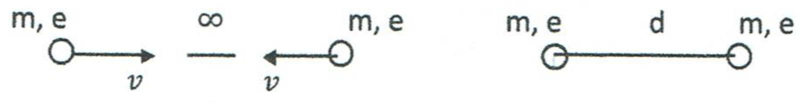
$$\frac{d}{r_{n\,max}} = \frac{2{,}11\ \text{Å}}{2{,}12\ \text{Å}} \approx 1; \quad \frac{d}{r_c} = \frac{2.11\ \text{Å}}{0.00386\ \text{Å}} \approx 547.$$

Справедливо обратное утверждение. Если электроны двигаются из бесконечности навстречу друг другу, с минимальной релятивистской скоростью, то расстояние минимального сближения частиц равно максимальному радиусу электрона. Чтобы электрон стал релятивистским, его работа выхода из вещества должны превышать $3.4\ eV$. При взаимном столкновении релятивистских электронов, сферы Комптона не пересекаются. Задача решена.

Задача №2

Два электрона из бесконечности вылетают навстречу друг другу с одинаковой скоростью $v = 10 \cdot 10^6\ ms^{-1}$**.** Сферические волновые оболочки электронов не являются твердой поверхностью. Вопрос, на какое минимальное расстояние сблизятся частицы. Определить отношение минимального расстояния к радиусу сферы Комптона.

Решение. [Электроны под действием сил Кулона будут тормозится, теряя скорость. Вся кинетическая энергия переходит в энергию электрического взаимодействия. Суммарный **геометрический** импульс двух частиц сохраняется автоматически. Электроны избегают лобового столкновения и разлетаются в противоположных направлениях].



Состояние 1 Состояние 2

Используем закон сохранения энергии в замкнутой системе двух заряженных частиц. Геометрическая сумма импульсов в обоих состояниях равна нулю.

В состоянии 1, система обладает только кинетической энергией. Потенциальная электрическая энергия равна нулю.

$$W_p = 0; \qquad W_1 = \sum_1 E_{ki} = 2(mv^2 - 3.4\ eV).$$

В состоянии 2, система обладает только потенциальной электрической энергией взаимодействия. Кинетическая энергия равна нулю. Частицы на мгновение останавливаются, затем разбегаются в противоположные стороны.

$$W_p = k\frac{e^2}{d}\ ; \quad W_2 = W_p.$$

Выполняется закон сохранения энергии в замкнутой системе двух частиц:

$$2(mv^2 - 3.4\ eV) = k\frac{e^2}{d}\,.$$

Определяем расстояние минимального сближения электронов:

$$d = k\frac{e^2}{2(mv^2 - 3.4\ eV)}\,.$$

Подставляем числовые значения параметров:

$$d = 9 \cdot 10^9 \frac{1.6022^2 \cdot 10^{-38}}{2(9.11 \cdot 10^{-31} \cdot 10^2 \cdot 10^{12} - 3.4 \cdot 1.6022 \cdot 10^{-19})} = 0.01276\ \text{Å}\,.$$

Отношение расстояния **d** к радиусу сферы Комптона:

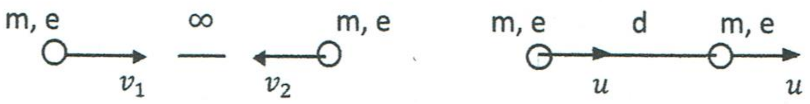
$$\frac{d}{r_c} = \frac{0.01276\ \text{Å}}{0.00386\ \text{Å}} = 3{,}306.$$

Сферы Комптона не пересекаются. Задача решена.

Задача №3

Из бесконечности навстречу друг другу летят два электрона с начальными скоростями: $v_1 = 8 \cdot 10^6\ ms^{-1}$ и $v_2 = 3 \cdot 10^6\ ms^{-1}$. Определить минимальное расстояние, на которое сблизятся частицы и его отношение к радиусу сферы Комптона.

Решение. [Под действием сил электростатического отталкивания частицы будут терять скорость. В какой-то момент времени, та частица, у которой модуль первоначального импульса меньше, остановится, развернется и начнет двигаться в обратную сторону. Обе частицы замедлятся и будут двигаться в одну сторону с одинаковой скоростью. Частицы сблизятся на минимальное расстояние].



Состояние 1 Состояние 2

Используем законы сохранения энергии и обобщенного механического импульса в замкнутой системе двух заряженных частиц.

В состоянии 1, система обладает только кинетической энергией. Потенциальная энергия электрического взаимодействия равна нулю.

$$\sum_1 p_i = 2mv_1 - 2mv_2;$$

$$W_1 = \sum_1 E_{ki} = 2(mv_1^2 - 3.4\ eV).$$

В состоянии 2, система обладает кинетической энергией и потенциальной электрической энергией.

$$\sum_2 p_i = 2mu + 2mu = 4mu;$$

$$W_2 = 2(mu^2 - 3.4\ eV) + k\frac{e^2}{d}.$$

Из законов сохранения имеем: $\sum_1 p_i = \sum_2 p_i$; $W_1 = W_2$.

$$2mv_1 - 2mv_2 = 4mu;$$

$$mv_1^2 + mv_2^2 - 6.8\ eV = 2(mu^2 - 3.4\ eV) + k\frac{e^2}{d}.$$

Ось x направлена вдоль траектории движения. Выразим из первого уравнения скорость u:

$$u = \frac{v_1 - v_2}{2}.$$

Подставим скорость $\boldsymbol{u}$ во второе уравнение. Постоянные члены уравнения $6.8\ eV$ сократятся. Получаем:

$$mv_1^2 + mv_2^2 = 2m\left(\frac{v_1 - v_2}{2}\right)^2 + k\frac{e^2}{d}.$$

Делаем не сложные преобразования и определяем минимальное расстояние между частицами:

$$d = 2k\frac{e^2}{m(v_1+v_2)^2} = 2 \cdot 9 \cdot 10^9 \frac{1.6022^2 \cdot 10^{-38}}{9.11 \cdot 10^{-31}(8+3)^2 \cdot 10^{12}} = 0.04192\ \text{Å}.$$

Определяем отношение расстояния $\boldsymbol{d}$ к радиусу сферы Комптона:

$$\frac{d}{r_c} = \frac{0.04192\ \text{Å}}{0.00386\ \text{Å}} = 10.86.$$

Минимальное расстояние много больше сферы Комптона. Задача решена.

Тема 2. Релятивистская поправка к закону Кулона

1. Запишем формулы Кулона для силы и напряженности электрического взаимодействия пары заряженных частиц:

$$F_c = k\frac{q_1 q_2}{r^2}; \quad E_1 = \frac{F_c}{q_2} = k\frac{q_1}{r^2}.$$

Все электрическое поле между частицами присваивают первому заряду. Вторая частица обезличивается, т.е. не имеет поля. Так принято действовать в классической электростатике. В состоянии покоя и на малых скоростях движения такой подход себя оправдывает. В электродинамике и особенно в релятивистской механике этот подход вызывает затруднения. Каждый заряд должен проявлять себя самостоятельно. Однако ситуацию с разными зарядами можно свести к ситуации с одинаковыми (эквивалентными) зарядами. Определим напряженность поля отдельно для каждой частицы, расстояние между частицами сохраняется:

$$E_1 = \frac{F_c}{q_2} = k\frac{q_1}{r^2}; \quad E_2 = \frac{F_c}{q_1} = k\frac{q_2}{r^2}.$$

Найдем произведение напряженностей и обозначим его как E^2:

$$E^2 = E_1 E_2 = k^2\frac{q_1 q_2}{r^4}.$$

Тогда:

$$E = k\frac{\sqrt{q_1 q_2}}{r^2} = k\frac{q}{r^2}; \quad q = \sqrt{q_1 q_2} -$$ эквивалентный заряд.

Работы по перемещению физического или эквивалентного заряда из точки 1 в точку 2 совпадают:

$$A = \int_1^2 Eq\,dr = kq^2\int_1^2 \frac{dr}{r^2} = kq^2\left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2}\right);$$

$$A = kq_1 q_2\left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2}\right).$$

Все энергетические характеристики зарядов выполняются автоматически.

2. Классический электрон, в связанном состоянии, внутри вещества, имеет форму заряженного кольца. **Собственное магнитное поле** открыто для взаимодействия с другими частицами и полями. Вдоль кольца существуют стоячие продольные колебания **постоянной массы** и электрического заряда. Сфера Комптона отсутствует.

В релятивистском состоянии($v \geq 1.095 \cdot 10^6\ ms^{-1}$), за пределами вещества, электрон меняет свою структуру. Электронное кольцо начинает вращаться в поперечном направлении. Образуется внешняя волновая сфера со сферой Комптона внутри. Радиус волновой сферы уменьшается при увеличении скорости поступательного движения. На поверхности сферы находится отрицательный заряд. **Постоянная масса электрона** располагается во внутренней сфере Комптона. Между сферами пульсируют стоячие радиальные колебания релятивистской массы и энергии. **Эффективная масса равна сумме постоянной и релятивистской**. Как предположение, на поверхности сферы Комптона имеется небольшой положительный заряд, такой что, $q_2 - q_1 = -e$. Он обеспечивает устойчивость внешней волновой сферы. **Собственное магнитное поле** циркулирует между сферами, экранируется ими и практически не выходит наружу. Будем полагать, что вместо внешней сферы вращается сфера Комптона. Такое описание электрона упрощает понимание собственного кручения частицы во вращающихся системах отсчета. Исходя из простых соображений баланса сил вращения и сил Кулона для противоположных частиц можно записать:

$$E_1 \propto \frac{m\omega_1^2}{qr_c}; \;\; E_2 \propto \frac{m\omega_2^2}{qr_c}; \quad E^2 = E_1E_2 \propto \frac{m^2\omega_1^2\omega_2^2}{q^2r_c^2} \propto \omega_1^2\omega_2^2.$$

Здесь: $\omega_1 -$ циклическая частота вращения первого электрона;

$\omega_2 -$ циклическая частота вращения второго электрона;

$r_c -$ радиус сферы Комптона.

3. Два электрона разгоняются на бесконечности, внешними электрическими полями, до одинаковых ультрарелятивистских скоростей. Радиус волновой сферы каждого электрона уменьшается. Растет фотонная нагрузка между наружной и внутренней сферой электронов. Затем частицы, по инерции, летят навстречу друг другу. Плотность энергии суммарного поля вдоль линии взаимодействия равна:

$$w_e = \frac{\varepsilon_0 E^2}{2} = \frac{\varepsilon_0}{2}\left(E_0\frac{\omega^2}{\omega_0^2}\right)^2.$$

Здесь:

$E_0 -$ напряженность электрического поля электрона в классическом виде;

$\omega_0 -$ начальная частота вращения сферы Комптона при $v \approx 1.095 \cdot 10^6\ ms^{-1}$;

$\omega -$ текущая частота вращения сферы Комптона при $v \geq 10 \cdot 10^6\ ms^{-1}$.

Происходит торможение, скорости частиц уменьшаются. Кинетическая энергия каждого электрона переходит в энергию суммарного электрического поля двух частиц. Внешняя волновая сфера электронов увеличивается. Снижается фотонная нагрузка внутри каждого электрона. При быстром торможении ультрарелятивистских электронов в материальной среде, они излучают фотоны электромагнитной энергии. В данной статье излучение не рассматривается. Электроны плавно тормозятся в противоположных полях. Суммарная энергия системы двух электронов сохраняется. Электрические поля имеют волновую структуру. Должен выполнятся нормальный эффект Доплера. В зависимости от скорости, один электрон воспринимает другой электрон как частицу с повышенным зарядом.

$$\frac{\omega}{\omega_0} = \frac{1+\beta}{1-\beta}; \quad \beta = \frac{v}{c}; \quad w_e = \frac{\varepsilon_0 E_0^2}{2}\left(\frac{1+\beta}{1-\beta}\right)^4; \ c - \text{ скорость света.}$$

Основной закон Кулона и потенциальную энергию, для сближающихся электронов, можно записать в релятивистской форме:

$$F_c = k\frac{q^2}{d^2}\left(\frac{1+\beta}{1-\beta}\right)^4; \quad W_p = k\frac{q^2}{d}\left(\frac{1+\beta}{1-\beta}\right)^4.$$

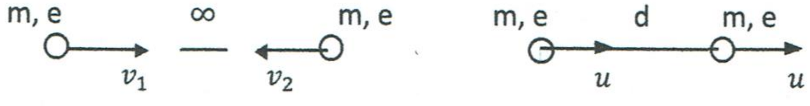
Здесь d , расстояние сближения электронов по прямой линии.

При замедлении движения, классические электроны должны достигать в вакууме нулевой скорости. В действительности этого не происходит. Они пересекаются или расходятся, по параллельным, винтовым и гиперболическим траекториям. На минимальной релятивистской скорости, электроны меняют свое агрегатное состояние. Превращаются в волну (волновая окружность). В таком состоянии электроны пересекаются без повреждений как в атомах. Набирают скорость и опять превращаются в релятивистские частицы. Проявляется двойственная природа электрона. Расстояние минимального сближения $\boldsymbol{d}$, это область переходных процессов и предмет исследования теоретической физики. Однако, при любых переходных процессах должны выполнятся основные законы сохранения энергии и импульса. Так автор статьи видит физику свободных электронов в вакууме. Теоретическая основа релятивистской поправки приведена в сокращенном виде. **Задачи решаются в рамках формальной логики**.

Задача №4

Два электрона из бесконечности вылетают навстречу друг другу, с разными ультрарелятивистскими скоростями: $v_1 = 250 \cdot 10^6\ ms^{-1}$; $v_2 = 200 \cdot 10^6\ ms^{-1}$. Определить минимальное расстояние, на которое сблизятся частицы в ультрарелятивистском виде.

Решение. [Под действием сил электростатического отталкивания, в некоторый момент времени, обе частицы начинают терять скорость. В течении переходного процесса вторая частица развернется и оба электрона будут двигаться в одну сторону, с одинаковой скоростью $\boldsymbol{u}$].



Состояние 1 Состояние 2

На ультрарелятивистских скоростях надо использовать полные выражения для импульса и кинетической энергии. Закон Кулона записывается в релятивистской форме. Импульсом и энергией прецессии пренебрегают.

В состоянии 1, в рамках формальной логики, система обладает только кинетической энергией. Определяем численные значения импульсов. Значение скорости света принимаем $c = 300 \cdot 10^6\ ms^{-1}$.

$$p_1 = mv_1 + \frac{mv_1}{\sqrt{1+\beta_1^2}}; \quad \beta_1 = \frac{v_1}{c} = \frac{250}{300} = 0.8333\ ;$$

$$p_2 = mv_2 + \frac{mv_2}{\sqrt{1+\beta_2^2}}; \quad \beta_2 = \frac{v_2}{c} = \frac{200}{300} = 0.6667\ ;$$

$$p_1 = 4027 \cdot 10^{-25}\ gms^{-1}; \quad p_2 = 3338 \cdot 10^{-25}\ gms^{-1}.$$

Суммарный геометрический импульс с учетом направления скорости:

$$\sum\nolimits_1 (p_1 - p_2) = 689 \cdot 10^{-25}\ gms^{-1} \Longrightarrow \frac{\sum_1 (p_1 - p_2)}{mc} = 0.2521 = 2a\ .$$

Здесь $\boldsymbol{2a}$, суммарный импульс в безразмерном виде.

В состоянии 2, система обладает механическим импульсом и потенциальной энергией электрического поля. Столкновение считается упругим. Импульсы после столкновения одинаковые и совпадают по направлению.

$$\frac{\sum_2 (p_u + p_u)}{mc} = \frac{2p_u}{mc} = 2\left(\beta_u + \frac{\beta_u}{\sqrt{1+\beta_u^2}}\right) = 2a; \quad \beta_u = \frac{u}{c}\ ;$$

$$\beta_u + \frac{\beta_u}{\sqrt{1+\beta_u^2}} = a = \frac{0.2521}{2} = 0.12605\ .$$

Последнее уравнение приводится к полному уравнению четвертой степени с постоянными коэффициентами:

$$\beta_u^4 - 2a\beta_u^3 + a^2\beta_u^2 - 2a\beta_u + a^2 = 0\ ;$$

или в численном виде,

$$\beta_u^4 - 0{,}2521\beta_u^3 + 0{,}01589\beta_u^2 - 0{,}2521\beta_u + 0{,}01589 = 0\ .$$

Решение уравнения в Online калькуляторе дает два вещественных значения. Комплексные значения игнорируются.

$$\beta_{u1} = 0.698913; \quad u_1 = \beta_{u1} c \approx 210 \cdot 10^6\ ms^{-1}\ ;$$

$$\beta_{u2} = 0.063093; \quad u_2 = \beta_{u2} c \approx 19 \cdot 10^6\ ms^{-1}\ .$$

Применяется только первое решение (β_{u1}). Оно ближе по величине к обобщенной относительной скорости $\triangle = \sqrt{v_1 v_2} = 223.6\ ms^{-1}$[1] . Надо учитывать округление скорости света и неточность вычислений. Второе решение имеет право на существование, но при условии испускания фотонов в окружающую среду. Такой вариант не рассматривается.

В состоянии 1, рассчитаем суммарную кинетическую энергию двух частиц:

$$E_{k1} = \frac{mv_1^2}{2} + mc^2 - \frac{mc^2}{\sqrt{1+\beta_1^2}};$$

$$E_{k2} = \frac{mv_2^2}{2} + mc^2 - \frac{mc^2}{\sqrt{1+\beta_2^2}};$$

$$E_{k1} = 9.11 \cdot 10^{-31} \left(\frac{250^2}{2} + 300^2 - \frac{300^2}{\sqrt{1+0.8333^2}}\right) 10^{12} = 474\,712.55 \cdot 10^{-19} J;$$

$$E_{k1} = 9.11 \cdot 10^{-31} \left(\frac{200^2}{2} + 300^2 - \frac{300^2}{\sqrt{1+0.6667^2}}\right) 10^{12} = 319\,912.46 \cdot 10^{-19} J;$$

$$\textstyle\sum_1 (E_{k1} + E_{k2}) = 794\,625 \cdot 10^{-19} J.$$

В состоянии 2, рассчитаем конечную кинетическую энергию двух частиц:

$$2E_{ku} = 2\left[9.11 \cdot 10^{-31} \left(\frac{210^2}{2} + 300^2 - \frac{300^2}{\sqrt{1+0.698913^2}}\right) 10^{12}\right] = 698\,172 \cdot 10^{-19}\, J.$$

Запишем баланс энергий в двух состояниях, с учетом потенциальной энергии электрического взаимодействия:

$$W_1 = \textstyle\sum_1 (E_{k1} + E_{k2}) = 794\,625 \cdot 10^{-19}\, J;$$

$$W_2 = 2E_{ku} + W_p = 698\,172 \cdot 10^{-19} + k\frac{e^2}{d}\left(\frac{1+\beta_u}{1-\beta_u}\right)^4;$$

$$W_1 = W_2;$$

$$(794\,625 - 698\,172)10^{-19} = 9 \cdot 10^9 \frac{1.6022^2 \cdot 10^{-38}}{d}\left(\frac{1+0.698913}{1-0.695913}\right)^4.$$

Определяем минимальное расстояние сближения частиц при встречном движении, на ультрарелятивистских скоростях:

$$d = 9 \cdot 10^9 \frac{1.6022^2 \cdot 10^{-38}}{96\,453 \cdot 10^{-19}} \cdot 1014 = 0.24288\,\text{Å}.$$

Определяем отношение $\boldsymbol{d}$ к радиусу сферы Комптона:

$$\frac{d}{r_c} = \frac{0.24288\,\text{Å}}{0.00386\,\text{Å}} = 63.$$

Сферы Комптона не пересекаются. Задача решена.

Задача №5

Электрон двигается по прямой линии со скоростью близкой к скорости света. Требуется определить минимальный радиус волновой сферы электрона.

Решение. [Найдем этот радиус из следующих соображений. В статье [3] приводится вывод формулы релятивистской энергии через отношение размеров волновой сферы и сферы Комптона].

Запишем формулу связи релятивистской энергии с размером электрона:

$$E_r = 2mc^2 \frac{r_c^2}{r_n^2}.$$

Здесь: r_c – радиус сферы Комптона (0,00386 Å);

r_n – текущий радиус внешней волновой сферы электрона.

Устремим скорость электрона к скорости света, $v \to c$.

Тогда:

$$E_k = E_s + E_r = \frac{mc^2}{2} + 2mc^2 \frac{r_c^2}{r_n^2};$$

или $$2E_k = mc^2 + 4mc^2 \frac{r_c^2}{r_n^2}.$$

С другой стороны, прямой расчет энергии по формуле (2) настоящей статьи дает выражение:

$$E_k = \frac{mc^2}{2} + mc^2 - \frac{mc^2}{\sqrt{2}} = \frac{1}{2} mc^2\left(3 - \sqrt{2}\right); \quad \beta = \frac{v}{c} = 1;$$

или $$2E_k = 1{,}5858mc^2.$$

Получаем тождество:

$$1.5858mc^2 \equiv mc^2 + 4mc^2 \frac{r_c^2}{r_n^2}.$$

Выполняем сокращение на mc^2. Определяем минимальный радиус волновой сферы электрона:

$$r_{n\,min} = 2 \cdot 0.00386 \sqrt{\frac{1}{0.5858}} = 0.0101 \text{ Å};$$

$$\frac{r_{n\,min}}{r_c} = 2.59.$$

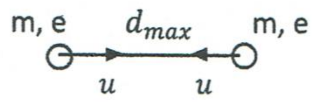
Задача решена. Для справки, в классической электродинамике, радиус электрона определяется как постоянная величина равная 0,000028 Å .

Задача №6

Два электрона из бесконечности вылетают навстречу друг другу со скоростью света. Определить расстояние минимального сближения. **Формальная логика не работает**, сумма импульсов постоянно равна нулю. Такие задачи напрямую не решаются.

Изменим условие задачи. Надо определить скорость частиц на расстоянии двух максимальных радиусов волновой сферы электрона.

Решение. [Максимальный радиус волновых сфер соответствует минимальной релятивистской скорости электронов, $d_{max} = 2r_{n\,max} = 4{,}24\ \text{Å}$. Кинетической энергией при минимальной скорости пренебрегаем. Она очень мала по сравнению с начальными энергиями частиц на скорости света. После пересечения электроны разлетаются на бесконечность].



Состояние 1 Состояние 2

Используем результаты решения предыдущей задачи №5. Запишем баланс кинетической и потенциальной электрической энергии двух электронов в ультрарелятивистском виде:

$$2E_k = k\frac{e^2}{d_{max}}\left(\frac{1+\beta_u}{1-\beta_u}\right)^4;$$

или $$1.5858mc^2 = k\frac{e^2}{d_{max}}\left(\frac{1+\beta_u}{1-\beta_u}\right)^4.$$

Найдем относительную скорость на расстоянии d_{max} :

$$\left(\frac{1+\beta_u}{1-\beta_u}\right)^4 = \frac{1.5858mc^2 d_{max}}{ke^2};$$

$$\left(\frac{1+\beta_u}{1-\beta_u}\right)^4 = \frac{1.5858\cdot 9.11\cdot 10^{-31}\cdot 300^2\cdot 10^{12}\cdot 4.24\cdot 10^{-10}}{9\cdot 10^9\cdot 1.6022^2\cdot 10^{-38}} = 238\,616;$$

$$\frac{1+\beta_u}{1-\beta_u} \approx 22.1\,.$$

Находим значение действующей скорости электронов на расстоянии d_{max} :

$$23.1\beta_u = 21.1 \quad \Rightarrow \quad \beta_u = 0.91342\,;$$

$$u = 300\cdot 10^6\cdot 0.91342 = 274\cdot 10^6\ ms^{-1}.$$

Что происходит дальше? Электроны на короткое время упираются в потенциальный барьер с наклонными стенками. При подъеме на барьер скорости снижаются до минимальных значений, $u = 1.095\cdot 10^6\ ms^{-1}$. Растет плотность электрической энергии барьера. На верхушке барьера электроны меняют свое агрегатное состояние. Волновые сферы и сферы Комптона переходят в состояние волновых окружностей. Пересекаются без разрушений, как в атомах. Скатываются с барьера и снова набирают скорость. Действуют расталкивающие силы Кулона. Происходит процесс разбегания электронов без изменения направлений. Скорости восстанавливаются до около световых значений, Рисунок 3.

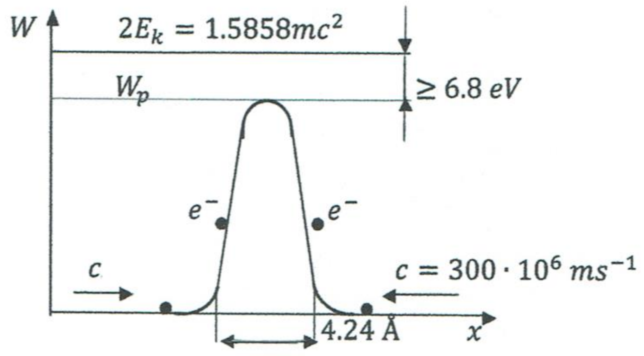


Рис. 3

Переходной процесс столкновения электронов в вакууме происходит в виде волны. Кванты энергии (фотоны) не излучаются. В общем виде задача решена. Точное решение такой задачи определяется уравнениями квантовой механики.

Задача №7

Свободный электрон налетает на поверхность неподвижной металлической мишени в вакууме, со скоростью близкой к скорости света. Определить максимальный квант энергии, которую он излучает при столкновении с мишенью.

Решение. [Полная кинетическая энергия электрона представляется в виде суммы ряда отдельных порций релятивистской энергии, $\boldsymbol{E_k = \sum_{i=1}^{i=n-1} E_{ri} + E_{r,n}}$. Ряд меняется от минимальных до максимальных значений. Здесь $\boldsymbol{E_{r,n}}$, порция релятивистской энергии собственного вращения электрона в данный момент времени. Остальная энергия ряда аккумулирована в виде кинетической энергии поступательного движения. Потеря релятивистской энергии на **тормозное излучение** пополняется из оставшегося ряда.] [5]

Устремим скорость электрона к скорости света. Радиус внешней волновой сферы стремится к минимуму. Сфера Комптона остается без изменений. Растет фотонная нагрузка между сферами. Запишем баланс электромагнитной энергии тормозного излучения и кванта релятивисткой энергии электрона при скорости света, (смотреть задачу №5):

$$E_{rn} = \hbar\omega_n = hf_n\ ;$$

$$E_{r\,max} = 2mc^2\,\frac{r_c^2}{r_{n\,min}^2} = hf_{n\,max}\ .$$

Здесь: $h-$ постоянная Планка, $6.626 \cdot 10^{-34}\ J \cdot s$;

f_n- частота излучения электромагнитной волны фотона, Hz .

Максимальная энергия тормозного фотона:

$$E_{r\,max} = 2 \cdot 9.11 \cdot 10^{-31} \cdot 300^2 \cdot 10^{12} \left(\frac{0.00386\ \text{Å}}{0.0101\ \text{Å}}\right)^2 = 239\,509 \cdot 10^{-19}\ J;$$

$$E_{r\,max} = 149.487\ keV.$$

Максимальная частота электромагнитной энергии тормозного фотона:

$$f_{n\,max} = \frac{239\ 509 \cdot 10^{-19}}{6.626 \cdot 10^{-34}} = 3.62 \cdot 10^{19}\ Hz$$

Если толщина мишени достаточно большая, то электрон излучает последовательно весь ряд квантов релятивистской энергии [5]. Тормозное излучение прекращается при $E_k \geq 3.4\ eV$. **Внутри вещества, на атомном уровне, релятивизм отсутствует.** Однако существует характеристическое излучение энергии, переход электронов в атоме с одного энергетического уровня на другой. Такими переходами занимается атомная физика. В общем виде задача решена.

Обращение к читателям

Для объяснения любого физического процесса нужна теория и понятный математический аппарат. Теорий может быть много и математика разная. Чем проще математика, тем легче объяснить физический процесс. На примерах столкновения двух свободных электронов в вакууме, автор статьи показывает и доказывает применимость Элементарной теории относительности (ЭТО) к решению задач физики микромира. Используется только неподвижная, лабораторная система отсчета. В теории соблюдаются все три закона Ньютона и законы сохранения обобщенного импульса и полной энергии в замкнутой механической системе. Искать истину, прыгая из неподвижной системы отсчета в подвижную, на ультрарелятивистских скоростях, занятие неблагодарное. Похоже Ньютон был прав, когда признавал наличие в природе абсолютной неподвижной системы отсчета.

Существует много критических статей в адрес Специальной теории относительности Эйнштейна. Автор хорошо знаком с ними и понимает их обоснованность. Развитие любой теории начинается с парадоксов и противоречий. Развитие Специальной теории тянется уже больше 100 лет. Мешает этому процессу высокий имидж Эйнштейна, как знаменитого физика. Но когда квантовой механике надо прикрыть или объяснить собственные противоречия, она охотно использует релятивистские эффекты. С тем, что Специальная теория относительности требует доработки и обновления автор согласен полностью. Но однозначно отказываться от релятивизма нельзя. В нем заложен глубокий физический и философский смысл.

Автор уверен, релятивизм в природе существует. Релятивистская масса существует, как добавка к постоянной массе. Задача специалистов физиков разработать математический аппарат для описания релятивизма без парадоксов и противоречий. Преобразования координат Лоренца в этом деле не помогают, их множество, включая квадратичные преобразования.

Элементарная теория относительности является попыткой создать непротиворечивый, понятный математический аппарат релятивистской механики. Насколько эта попытка удалась или не удалась судите сами дорогие читатели.

Источники

1. М.Б. Халецкий., “ВЕРСИЯ Элементарной теории относительности (ЭТО)”., 2019г., https://halmich.ru ., публикации.
2. М.Б. Халецкий., “Размер свободного электрона”., 2023г., https://halmich.ru ., публикации.
3. М.Б. Халецкий., “О структуре релятивистского электрона”., 2022г., https://halmich.ru ., публикации.
4. Халецкий Михаил., Сборка Элементарной теории относительности., Издательский сервис Ridero, 24 апрель, 2024. https://ridero.ru/books/sborka_elementarnoi_teorii_otnositelnosti/?srsltid=AfmBOoqRpl5pJP9d3G1bXL4KgLdoubDb4XojiNqz0GxGusaMW9Ba8ZWd
5. М.Б. Халецкий., Тормозное излучение и квантовая механика электрона., https://halmich.ru ., публикации.