

Размер свободного электрона

Халецкий Михаил Борисович

Израиль, г. HADERA, 2023

hal123mih@gmail.com

Аннотация

Больше 100 лет прошло с момента открытия электрона – элементарной, неделимой частицы. Однако споры о его строении и размерах продолжаются и XXI веке.

Ключевые слова: частица, скорость, излучение, радиус, энергия, рекомбинация.

Содержание

П.1 Введение

П.2 Модели свободного электрона

П.3 Теоретическая часть

П.4 Специальная часть

П.5 Границы рентгеновского излучения

П.6 Обсуждение

П.7 Мнение автора

П.1 Введение

Больше 100 лет прошло с момента открытия электрона – элементарной, неделимой, заряженной частицы. Однако споры о его строении и размерах продолжаются и в XXI веке. Известные физики конца XIX и начала XX столетий Дж. Дж. Томсон, Э. Резерфорд, Н. Бор при разработке своих моделей атома вещества использовали точечное представление об электроне. Движения массы и заряда электрона считались неразделимыми процессами. Наличие скорости и момента импульса в планетарной модели атома являлись обязательными параметрами. Дж. Томсон даже определил классический радиус электрона, $r_0 = 2,8 * 10^{-15} \text{ m}$. Но метод его расчётов вызывает большие сомнения. Томсон рассматривал электрон в отрыве от собственного поля[1].

Отношение к электрону изменилось, когда у него обнаружили волновые свойства (дифракцию). На основании уравнения Э. Шредингера, была разработана волновая квантовая механика элементарных частиц. Скорость электрона стала неоднозначным параметром. Положение частицы в атоме определялось квантовыми числами. Точечная структура электрона потеряла физический смысл. Движение частицы вокруг ядра атома заменили на вероятность нахождения её в разрешённых энергетических состояниях. Строение одиночного свободного электрона, за пределами атома, не имело точного описания[2].

На сегодняшний день, начало XXI века, официальная наука[3, 4] утверждает – электрон не имеет внутренней структуры. В зависимости от ситуации его представляют в виде материальной точки, в виде облака, в лучшем случаи в виде стоячей механической волны. Точный размер электрона не определяется. Признание физиков, что электрон не имеет определённой структуры, это большое “достижение” современной науки. В таком случае любую бесструктурную частицу можно привести к эквивалентной физической модели.

П.2 Модели свободного электрона

В данной статье не стоит задача анализа атома водорода или любого другого вещества. Статья посвящена исключительно одному вопросу – как оценить возможные размеры электрона в свободном (несвязанном) состоянии. Рассматривается прямолинейное движение электрона в постоянном электрическом поле (Рис.1).

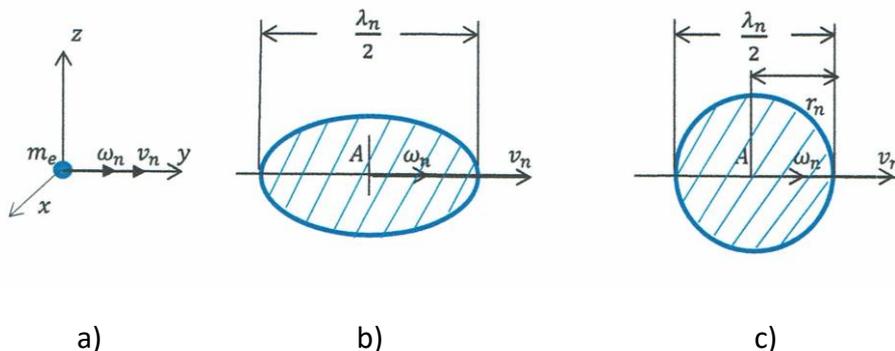


Рисунок 1.

Где:

m_e — масса электрона;

$\lambda_n/2$ — половина длины стоячей механической волны;

r_n — эффективный радиус электронного диска;

ω_n — механическая угловая скорость вращения;

v_n — линейная скорость поступательного движения.

Интерпретация электрона.

а) **Материальная точка** — масса и заряд электрона сосредоточены в бесконечно малом объёме трёхмерного пространства. Координаты точки x, y, z . Скорость поступательного движения v_n , собственная угловая скорость вращения ω_n .

в) **Эллипс** — электромеханическая плоская стоячая волна овальной формы в апогее. Масса равномерно распределена в области замкнутой конфигурации волны. Точные координаты в пространстве отсутствуют. Собственное вращение волны вокруг поперечной оси создаёт эффект визуального объёма.

с) **Диск** — разновидность стоячей плоской электромеханической волны правильной круговой формы в апогее. Эффективный радиус внешнего кольца $r_n \leq \lambda_n/2$. Скорость поступательного движения центра окружности v_n . Угловая скорость вращения диска относительно поперечной оси ω_n . Масса равномерно распределена по диску. Вращение относительно поперечной оси создаёт эффект визуального сферического облака.

При отсутствии тепловых потерь в окружающей среде, стоячие волны не переносят энергию в пространстве, но способны накапливать и выделять её квантами. Согласно волновой квантовой механике именно такие волны определяют природу и строение электрона. В научной литературе перечень моделей возможного строения электрона достаточно широкий [5]. Однако, с практической точки зрения, круговые модели наиболее удобны для оценки вероятных размеров частицы. Принимаем дисковую модель за основу дальнейшего анализа. Под эффективным радиусом электрона будем понимать приближенный размер электронного облака.

П.3 Теоретическая часть

Основное положение теории [6] — **источником тормозного электромагнитного излучения является механическая энергия собственного вращения электрона.**

Должно выполняться условие:

$$I_n \frac{\omega_n^2}{2} = \hbar \omega_e. \quad (1)$$

Здесь:

I_n – собственный момент инерции электрона;

\hbar – редуцированная постоянная Планка, $\hbar = h/2\pi$;

ω_n – собственная угловая скорость вращения электрона до излучения фотона;

ω_e – циклическая частота кванта электромагнитной энергии излучаемого фотона.

В результате излучения на электрон действует импульс отдачи улетающего фотона. Частица тормозится, вращение восстанавливается за счёт уменьшения энергии собственного поступательного движения. Происходит единичный акт рекомбинации полной кинетической энергии электрона.

$$E_{k1} = \frac{m_e v_1^2}{2} + I_1 \frac{\omega_1^2}{2}, \quad (2)$$

$$E_{k2} = \frac{m_e v_2^2}{2} + I_2 \frac{\omega_2^2}{2},$$

$$v_2 < v_1.$$

Здесь:

E_{k1} – кинетическая энергия электрона до излучения фотона;

E_{k2} – кинетическая энергия электрона после излучения фотона;

I_1, I_2 – моменты инерции до и после излучения;

v_1, v_2 – поступательная скорость электрона до и после излучения;

ω_1, ω_2 – угловая скорость электрона до и после излучения;

m_e – масса электрона, инвариант при любой скорости движения.

Запись уравнений единичной рекомбинации в классическом виде:

$$\frac{m_e v_1^2}{2} = \frac{m_e v_2^2}{2} + I_2 \frac{\omega_2^2}{2};$$

$$I_1 \frac{\omega_1^2}{2} = m_e c^2 - \frac{m_e c^2}{\sqrt{1 + \frac{v_1^2}{c^2}}} = \hbar \omega_e; \quad (3)$$

$$I_2 \frac{\omega_2^2}{2} = m_e c^2 - \frac{m_e c^2}{\sqrt{1 + \frac{v_2^2}{c^2}}}.$$

Линейная скорость, частота вращения и размеры электрона меняются скачками. Формулы (3) отражают общие принципы квантования полной кинетической энергии частицы. Эти принципы справедливы как для единичного акта рекомбинации, так и для

серии последовательных актов в непрерывном электростатическом поле. Частота квантов испускаемой электромагнитной энергии ω_e также меняется скачками.

П.4 Специальная часть

В формуле (1) угловая механическая скорость частицы до излучения фотона равна удвоенной частоте электромагнитного (рентгеновского) излучения в вакууме:

$$\omega_n = 2\omega_e. \quad (4)$$

На два оборота электронного диска приходится одна электромагнитная волна рентгеновского излучения. В электротехнике соотношение (4) определяет основную частоту электромагнитной вибрации. С учётом соотношения частот, формула (1) настоящей статьи преобразуется к виду, $L = I_n \omega_n = \hbar$ или

$$I_n \omega_e = \frac{1}{2} \hbar. \quad (5)$$

Собственный **угловой** момент импульса электрона постоянная величина. Для последующих преобразований используем известные выражения:

$$\begin{aligned} I_n &= m_e r_n^2 / 4, \text{ (твёрдый тонкий диск);} \\ \omega_e &= 2\pi \nu_e; \\ c &= \nu_e \lambda_e. \end{aligned} \quad (6)$$

Формула (5) преобразуется к виду:

$$m_e r_n^2 \frac{2\pi c}{\lambda_e} = \frac{\hbar}{\pi}. \quad (7)$$

Здесь:

r_n — эффективный радиус электрона до излучения фотона, nm [$1nm = 10^{-9}m$];

c — скорость света, $\approx 30 \cdot 10^7 \text{ ms}^{-1}$;

\hbar — постоянная Планка, $6,626 \cdot 10^{-34} \text{ Js}$;

λ_e — длина волны излученного фотона, nm ;

m_e — масса электрона, $9.11 \cdot 10^{-31} \text{ kg}$.

Эффективный радиус электрона:

$$r_n = \sqrt{\frac{\hbar}{m_e c} \frac{\lambda_e}{2\pi^2}}.$$

Длина волны Комптона,

$$\Lambda = \frac{h}{m_e c} = 2,42631 \cdot 10^{-3} \text{ nm}.$$

Рабочий вид формулы для радиуса,

$$r_n = \frac{1}{\pi} \sqrt{\frac{\Lambda * \lambda_e}{2}}. \quad (8)$$

Длина волны рентгеновского фотона несёт информацию о поперечных размерах своего родителя - электрона.

П.5 Границы рентгеновского излучения

1. Для определения нижней границы длин волн рентгеновского излучения воспользуемся формулами релятивистской механики. Энергия излученного фотона численно равна энергии собственного вращения электрона.

$$E_r = I_n \frac{\omega_n^2}{2} = h\nu_e = m_e c^2 - \frac{m_e c^2}{\sqrt{1 + \frac{v^2}{c^2}}} \quad (9)$$

Из соотношений (9) находим выражение, содержащее длину волны фотона,

$$\frac{hc}{\lambda_e} = h\nu_e = m_e c^2 \left(1 - \frac{1}{\sqrt{1 + \frac{v^2}{c^2}}} \right).$$

Длина электромагнитных волн через длину волны Комптона,

$$\lambda_e = \Lambda \left(1 - \frac{1}{\sqrt{1 + \frac{v^2}{c^2}}} \right)^{-1}. \quad (10)$$

Минимальная длина волны рентгеновского излучения при $v_{max} = c = 29.9792 \ 458 \cdot 10^7 \text{ ms}^{-1}$,

$$\lambda_e = 2,42631 \cdot 10^{-3} (1 - 1/\sqrt{2})^{-1} = 8,284 \cdot 10^{-3} \text{ nm}.$$

Минимальный радиус свободного электрона,

$$r_n = \frac{1}{\pi} \sqrt{\frac{\Lambda * \lambda_e}{2}} = \frac{1}{\pi} \sqrt{\frac{2.42631 * 8.284}{2}} \cdot 10^{-3} = 1,009 \cdot 10^{-3} \text{ nm} = 0,0101 \text{ \AA}.$$

Ниже длины волны $8,284 \cdot 10^{-3} \text{ nm}$ могут располагаться только волны гамма-излучения. Тормозной электрон не является источником гамма-лучей.

2. Для определения верхней границы длин волн рентгеновского излучения используем те же формулы релятивистской механики. В интервале скоростей $0 < v < 1 \cdot 10^7 \text{ m/s}^{-1}$ справедливо равенство,

$$h \frac{c}{\lambda_e} = m_e c^2 - \frac{m_e c^2}{\sqrt{1 + \frac{v^2}{c^2}}} \cong \frac{m_e v^2}{2}.$$

Длина электромагнитных волн через длину волны Комптона на малых скоростях движения,

$$\lambda_e = \frac{2hc}{m_e v^2} = 2\Lambda \frac{c^2}{v^2}. \quad (11)$$

Максимальная длина волны рентгеновского излучения при $v_{min} = 0.10946 \cdot 10^7 \text{ m/s}^{-1}$,

$$\lambda_e = 2\Lambda \frac{c^2}{v_{min}^2} = 2 \cdot 2.42631 \frac{(29.9792458)^2}{(0.10946)^2} * 10^{-3} = 364\,005 \cdot 10^{-3} \text{ nm}.$$

Максимальный радиус свободного электрона,

$$r_n = \frac{1}{\pi} \sqrt{\frac{\Lambda * \lambda_e}{2}} = \frac{1}{\pi} \sqrt{\frac{2.42631 * 364005}{2}} * 10^{-3} = 211,5 \cdot 10^{-3} \text{ nm} \approx 2,12 \text{ \AA}.$$

Формулу (8) для определения радиуса **свободного** электрона можно считать универсальной. Она не зависит от релятивистского статуса частицы. Максимальный радиус электронного облака сопоставим с размерами атомов вещества и почти точно соответствует второй орбите атома водорода Бора.

П.6 Обсуждение

1. Из приведённых выше расчётов видно, что размер свободного электрона переменная величина, которая зависит от скорости поступательного движения. Вероятные интервалы изменений скорости, радиуса электрона и длины волны рентгеновского излучения:

$$1.009 \cdot 10^{-3} \text{ nm} \leq r_n \leq 211,5 \cdot 10^{-3} \text{ nm};$$

$$8.284 \cdot 10^{-3} \text{ nm} \leq \lambda_e \leq 364\,005 \cdot 10^{-3} \text{ nm};$$

$$29.9792\,458 \cdot 10^7 \text{ m/s}^{-1} \geq v_n \geq 0.10946 \cdot 10^7 \text{ m/s}^{-1}.$$

2. Анализ тормозного излучения указывает на возможность дискретных изменений размеров и скорости электрона. Частные случаи расчёта, начиная с v_{max} или v_{min} в обратном порядке, представлены ниже.

Обоснование (расчёт)

2.1 Пороговые скорости электрона в сторону уменьшения, начиная с $v_n \leq 30 \cdot 10^7 \text{ m/s}^{-1}$, рассчитываются последовательно [6] как корни кубического уравнения,

$$x_{i+1}^3 + x_{i+1}^2(5 - 2x_i) + x_{i+1}(8 - 6x_i + x_i^2) - (4x_i - x_i^2 - \alpha^2) = 0. \quad (12)$$

Здесь: $x_i = \frac{v_i^2}{c^2}$; $x_{i+1} = \frac{v_{i+1}^2}{c^2}$ – соответствующие квадраты относительных скоростей до и после излучения фотона. Квадрат постоянной тонкой структуры не учитывается, $\alpha^2 \cong 0$. Начальные условия по скорости торможения: $v_1 = v_{max} \cong 30,0 \cdot 10^7$; $x_1 = 1$. Длина волны излучения определяется по формуле (10) настоящей статьи. Результаты расчётов приведены ниже, Таблица 1.

Скорость электрона $v_n \cdot 10^7 \text{ ms}^{-1}$	Длина волн фотона $\lambda_e \cdot 10^{-3} \text{ nm}$	Эффективный радиус электрона $r_n \cdot 10^{-3} \text{ nm} \leftrightarrow r_n \text{ \AA}$	
$v_1 = 30.00$	8.284	1.009	0.010
$v_2 = 23.00$	11.76	1.194	0.012
$v_3 = 17.1$	18.49	1.508	0.015
$v_4 = 12.45$	31.91	1.980	0.020
$v_5 = 8.94$	58.29	2.677	0.027
$v_6 = 6.38$	111.10	3.695	0.037
$v_7 = 4.53$	217.40	5.169	0.052
$v_8 = 3.21$	428.00	7.253	0.073
$v_9 = 2.27$	851.10	10.228	0.102
÷	÷	÷	÷

2.2 Пороговые скорости электрона в сторону увеличения, начиная с $v_{n \min} \geq 0,10946 \cdot 10^7 \text{ ms}^{-1}$, рассчитываются в **обратном порядке** [7] по формуле,

$$x_{i-1} = x_i + 2 - \sqrt{\frac{4-\alpha^2}{1+x_i}}. \quad (13)$$

Используется прямая подстановка полученного результата в исходное уравнение. Квадрат постоянной тонкой структуры равен $\alpha^2 = 0.532514 \cdot 10^{-4}$. Конечные условия по скорости торможения: $v_{16} = v_{min}$; $x_{16} = 0,133121 \cdot 10^{-4}$. Длина волны излучения определяется по формуле (11) настоящей статьи. Результаты расчётов приведены ниже, Таблица 2.

Скорость электрона $v_n \cdot 10^7 \text{ ms}^{-1}$	Длина волн фотона $\lambda_e \cdot 10^{-3} \text{ nm}$	Эффективный радиус электрона $r_n \cdot 10^{-3} \text{ nm} \leftrightarrow \text{ \AA}$	
$v_{16} = 0.10946$	364 005	211.50	2.12
$v_{15} = 0.18946$	121 502	122.21	1.22
$v_{14} = 0.28940$	52 074	80.01	0.80
$v_{13} = 0.42363$	24 302	54.65	0.55
$v_{12} = 0.60898$	11 760	38.02	0.38
$v_{11} = 0.86808$	5 788	26.67	0.27
$v_{10} = 1.23232$	2 872	18.79	0.19
$v_9 = 1.74564$	1 431	13.26	0.13
$v_8 = 2.46956$	715	9.37	0.09
÷	÷	÷	÷

2.3 Формулы (12) и (13) взаимнообратные математические выражения. Однако в физическом плане это неоднозначные преобразования. Результаты расчётов сильно зависят от начальных условий торможения и ограничений по скорости $v_{min} \leq v_n \leq v_{max}$. В ускорителях, из-за разницы скоростей в пучке электронов, спектр тормозного излучения имеет непрерывный характер.

2.4 В уравнении (12) настоящей статьи, при условии $v_n < v_{min}$, действительные корни кубического уравнения отсутствуют, свободный член равен нулю. Ниже скорости $0,10946 \cdot 10^7 \text{ m s}^{-1}$ надо полагать, что собственное вращение электрона прекращается, релятивистские свойства исчезают. Для поступательного движения в вакууме действуют законы классической механики. В тоже время свободный электрон, с максимальными размерами, активно проявляет волновые свойства в составе атома.

П.8 Мнение автора

Электрон, это стоячая электромеханическая волна, которая не имеет стабильных размеров. Максимальный радиус сопоставим с размерами атомов. Как следствие, классическое вращение электронов на орбитах атома Бора невозможно. В электронной микроскопии, чем больше скорость электрона, тем меньше его размер и выше проникающая способность микроскопа. Теоретический предел ускоряющих напряжений, когда дальнейшее уменьшение размера электрона невозможно, достигают порядка 400 тысяч вольт [6,8].

Ссылки

1. И. Мисюченко., “ Размер электрона и Томсоновское рассеяние” ., Санкт – Петербург, 14.02.2015г., Google.
2. В. А. Бедняков., “ ГДЕ У ОТДЕЛЬНО ВЗЯТРО ЭЛЕКТРОНА ВОЛНОВЫЕ СВОЙСТВА” ., Объединённый институт ядерных исследований, Дубна., Письма в ЭЧАЯ. 2021. Т.18, № 4(236). с. 321 – 346.
3. Google – “ О структуре электрона. Часть первая”, 15 февр. 2018г., <https://vk.com/@physics-o-structure-elektrona-chast-pervaya>
4. Электрон – Википедия, <https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%AD%D0%BB%D0%B5%D0%BA%D1%82%D1%80%D0%BE%D0%BD>.
5. Google – Тормозное излучение. Ядерная физика в интернете., НИИЯФ МГУ., <http://nuclphys.sinp.msu.ru>.
6. М. Б. Халецкий., “ Тормозное излучение и квантовая механика электрона”, журнал “ДНА”, выпуск №51, под редакцией С. И. Хмельник, 2021г., publisherdna@gmail.com .
7. М. Б. Халецкий., “Постоянная тонкой структуры”, журнал “ДНА”, выпуск №53, под редакцией С. И. Хмельник, 2021г., publisherdna@gmail.com .

8. Google – Высокразрешающий электронный микроскоп – СО РАН,
<https://www.isp.nsc.ru/ckp/pribornyj-park/vysokorazreshayushchij-elektronnyj-mikroskop>.