

ГЛОБАЛЬНАЯ ЭНЕРГИЯ В КЛАССИЧЕСКОЙ ЭЛЕКТРОДИНАМИКЕ. ФИЗИЧЕСКАЯ АКУСТИКА ЭФИРА

Электромагнитная масса и Электромагнитная Гравитация электронов и других частиц

Шаляпин А.Л. <http://osh9.narod.ru/egrav.pdf>

РЕЗЮМЕ

Электрон в полной мере участвует в Гравитации со своей энергией электрического поля и массой (электромагнитной инерцией) наравне со всеми другими частицами и телами согласно очень точному **ПРИНЦИПУ ЭКВИВАЛЕНТНОСТИ ГАЛИЛЕЯ**. Это поможет разгадать механизм возникновения гравитационной силы, как для электронов, так и для остального материального мира. Очень точный **ПРИНЦИП ЭКВИВАЛЕНТНОСТИ ГАЛИЛЕЯ** наводит на мысль, что и все остальные частицы, а не только электроны, имеют электромагнитную массу (инерцию) и электромагнитную Гравитацию. В противном случае, очень точный **ПРИНЦИП ЭКВИВАЛЕНТНОСТИ** просто бы нарушился.

Полезно ознакомиться с некоторыми взглядами на массы частиц в современной квазифизике видного теоретика Окуня Л.Б. [1].

БЛУЖДЕНИЕ ВОКРУГ МАССЫ ЭЛЕКТРОНА В СОВРЕМЕННОЙ АБСТРАКТНОЙ КВАЗИФИЗИКЕ

"Масса – физическая величина, одна из основных характеристик материи, определяющая инерционные и гравитационные свойства объектов [1]. Понятие массы было введено в механику И. Ньютоном в определении импульса (количества движения) тела – импульс p пропорционален скорости свободного движения тела v : $p = m v$, где коэффициент пропорциональности m - постоянная в обычной механике величина, его масса.

Эквивалентное определение массы получается из уравнения движения классической механики Ньютона: $F = m a$, где F – действующая на тело сила и a - ускорение, с которым движется тело. Определенная таким образом масса характеризует инерцию тела и называется инертной массой.

В теории гравитации Ньютона (в законе всемирного тяготения) масса тел выступает как источник поля тяготения (так называемая гравитационная масса).

В принципе, ни из какой современной теории не следует, что масса, создающая поле тяготения, определяет и инерцию того же тела".

Далее ознакомимся с представлениями о массе микрочастиц видного теоретика, специалиста по микрочастицам Окуня Л.Б. [1].

"Природа массы — вопрос № 1 современной физики.

За последние десятилетия произошел большой прогресс в понимании свойств элементарных частиц. Была построена квантовая электродинамика—теория взаимодействия электронов с фотонами, заложены основы квантовой хромодинамики — теории взаимодействия кварков с глюонами и теории электрослабого взаимодействия. Во всех этих теориях частицами переносчиками взаимодействий являются так называемые векторные бозоны — частицы, имеющие спин, равный единице: фотон, глюоны, W и Z бозоны.

Что касается масс частиц, то здесь достижения гораздо более скромные. На рубеже XIX и XX столетий существовала вера, что масса может иметь чисто электромагнитное происхождение, по крайней мере, для электрона. Сегодня мы знаем (?), что электромагнитная доля массы электрона составляет малую долю его полной массы. Мы знаем (?), что основной вклад в массы протонов и нейтронов дают сильные взаимодействия, обусловленные глюонами, а не массы кварков, входящих в состав протонов и нейтронов.

Но мы совершенно ничего не знаем (!!!) о том, чем обусловлены массы шести лептонов (электрона, нейтрино и еще четырех аналогичных им частиц) и шести кварков (из которых три первых существенно легче протона, четвертый — немного, а пятый в пять раз тяжелее протона, а шестой настолько массивен, что его пока не удалось создать и обнаружить)".

«Формула $E = mc^2$ появилась в 1900 г., до создания теории относительности. Написал ее А. Пуанкаре, который исходил из того, что плоская световая волна, несущая энергию E , несет импульс p , абсолютная величина которого, в соответствии с теоремой Умова-Пойнтинга, равна E/c .

Используя нерелятивистскую формулу Ньютона для импульса $p = mv$ и, учитывая, что для света $p = mc$, Пуанкаре [2] пришел к выводу, что фотон должен обладать инертной массой $m = E/c^2$.»

Примечательно в данной задаче то, что электромагнитная инерция или масса электрона строго пропорциональна гравитационной массе частицы, что

было неоднократно выявлено точнейшими измерениями. Это называется **Принципом эквивалентности Галилея**, открытым им в 1609 году. Обратимся к энциклопедическим источникам [3].

«В принципе ниоткуда не следует, что масса, создающая поле тяготения, определяет и инерцию того же тела. Однако опыт показал, что инертная и гравитационная массы пропорциональны друг другу (а при обычном выборе единиц измерения численно равны). Этот фундаментальный закон природы называется **ПРИНЦИПОМ ЭКВИВАЛЕНТНОСТИ**.

Этот факт был установлен опытным путем итальянским ученым Г. Галилеем (принцип эквивалентности Галилея – авт.) и может быть сформулирован как принцип строгой пропорциональности гравитационной, или тяжелой, массы m_T , определяющей взаимодействие тела с полем тяготения и входящей в закон всемирного тяготения Ньютона, и инертной массы m_u , определяющей сопротивление тела действующей на него силе и входящей во второй закон механики Ньютона. Экспериментально принцип эквивалентности Галилея установлен с очень большой точностью – до 10^{-12} (в 1971).

Природа массы – одна из важнейших еще не решенных задач физики. Принято считать, что масса элементарной частицы определяется полями, которые с ней связаны (электромагнитным, ядерным и др.) ***(Это предположение является наиболее вероятным – автор)***. Однако количественная теория массы еще не создана. Не существует также теории, объясняющей, почему массы элементарных частиц образуют дискретный спектр значений, и тем более позволяющей определить этот спектр [3]».

Тем не менее, механизм формирования инертной (полевой) массы электрона и электромагнитной инерции силовых полей достаточно успешно решается в рамках Классической электродинамики [4].

Все это указывает на то, что имеется очень тесная связь между электрическим и гравитационным полями электрона. Остается установить, как из электрического поля электрона выделяется гравитационная составляющая силы взаимодействия.

ФАКТЫ, УКАЗЫВАЮЩИЕ НА ЭЛЕКТРОМАГНИТНУЮ ПРИРОДУ ГРАВИТАЦИИ

Хорошо известно, что электрон подвержен воздействию так называемых «нулевых» колебаний физического вакуума-эфира [5]. При этом он «дрожит», рассеивая вокруг себя сферические продольные волны, преобразованные из

«нулевых» колебаний вакуума. Поток этих сферических волн как раз и образует электрическое поле электрона [4].

Из-за того, что электрон «дрожит», силовые поля, которые он формирует вокруг себя, испытывают малые флуктуации (тоже «дрожат»). Похожий процесс «дрожания» происходит и с позитроном. Но если электрические поля у электрона и позитрона имеют разную полярность (т.е. разную фазу рассеянных волн), то их флуктуации являются одинаковыми и при усреднении во времени не зависят от полярности частицы.

Это еще раз указывает на их прямую причастность к гравитации, которая не зависит от полярности частиц. Поэтому Гравитация обладает эффектом «накопления» силы по большому числу частиц независимо от их полярности.

Механизмы формирования силовых полей электронов и позитронов достаточно подробно рассмотрены в научной монографии – учебнике по фундаментальной физике [4]. Дополнительным доказательством очень тесной связи между электрическим полем и гравитационным полем частиц является тот факт, что на больших скоростях электронов и позитронов энергия их электрического поля увеличивается в соответствии с преобразованиями Лоренца в γ раз [4, 6]. Во столько же раз увеличивается их электромагнитная инерция (масса) и гравитационная масса.

У Природы не так уж много вариантов формирования силовых полей. Подобными механизмами начинал заниматься Н.А. Умов в своей докторской диссертации и установил очень тесную связь между электромагнитными полями и упругими волнами в эфире.

В завершение этого пункта следует отметить, что **принцип эквивалентности Галилея** (равенство инерционной и гравитационной масс) выполняется экспериментально с высокой степенью точности для всех объектов природы, а также учесть дискретный спектр масс (и тем более, механических моментов) для многих тяжелых частиц. Отсюда можно сделать предположение, что в состав всех тяжелых частиц входят электроны и позитроны, которые и формируют гравитационные волны по единому механизму, рассмотренному выше.

МЕХАНИЗМ ФОРМИРОВАНИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ (ИНЕРЦИОННОЙ) МАССЫ ЭЛЕКТРОНОВ

Сама по себе идея решения этой задачи очень проста и всем хорошо известна. Поскольку электрическое поле электрона способно производить механическую работу и обладает энергией, то это поле должно обладать и определенной инерцией по аналогии с инерцией электромагнитных волн и света.

В свою очередь, в рамках Классической электродинамики плотность энергии электрического поля $W_{эл}$ определяется квадратом напряженности электрического поля E . Таким образом, остается всего лишь проинтегрировать величину $\epsilon_0 E^2 / 2$ по всему объему электрического поля, окружающего электрон.

Такую задачу пытается решать и Фейнман [2] и приводит следующий результат:

$$W_{эл} = \int \epsilon_0 E^2 / 2 dV = e^2 / 8\pi \epsilon_0 r_0, \quad (1)$$

где r_0 - некоторый эффективный радиус электрона.

Однако здесь у подавляющего большинства физиков-теоретиков возникают непреодолимые трудности: до какого, все же, предела вблизи электрона следует брать интеграл?

Фейнман приходит к таким неутешительным выводам: «Все идет хорошо до тех пор, пока мы не переходим к точечному электрону, ... где и начинаются все наши беды, ... поскольку интеграл по объему становится расходящимся, а количество энергии, окружающей точечный электрон, оказывается бесконечным».

Более сорока лет потратил Фейнман на борьбу с этими бесконечностями энергии для электронов, однако эта проблема так и не нашла удовлетворительного решения.

Подобная ситуация с электронами должна была, естественным образом, навести всех физиков на мысль, что здесь допускается элементарная логическая ошибка по поводу точечного электрона.

Более реалистичную позицию по этому поводу занимает А.Л. Шаляпин [3-6]: «принятие электрона точечной частицей является всего лишь идеализацией и логической ошибкой, поскольку в природе вряд ли смогут существовать точечные объекты, проявляя себя вполне реально и активно взаимодействуя с окружающими объектами. Более того, мы даже уже научились вместе с Фейнманом и со студентами учитывать неточечность электронов при нахождении запаздывающих потенциалов Льенара-Вихерта, а также напряженностей силовых полей частиц [2-6]. И во всех этих случаях ни о каких бесконечностях не могло быть и речи».

Кроме всего этого, следует обратить внимание еще на одну весьма интересную тонкость.

Из-за того, что электрон все время совершает "как бы броуновское" движение, т.е. «дрожит» под действием "нулевых" - квазиупругих колебаний

физического вакуума-эфира, его электрическое поле в среднем не является центральным.

Поэтому в реальности он выглядит как светящийся (в электрическом смысле) шарик с некоторым эффективным радиусом r_0 . По этой причине электрическое поле электрона нельзя интегрировать до нуля, чтобы не возникали разного рода необоснованные бесконечности в силовых полях электронов.

Как показано Фейнманом, в результате прямого вычисления запаздывающих потенциалов и напряженностей полей движущегося электрона [2], при движении электрона со скоростью v в вакууме-эфире его электрическое поле увеличивается на множитель $\gamma = (1 - v^2 / c^2)^{-1/2}$.

Силовые поля E и B электрона определяются по обычным правилам дифференцирования, исходя из силовых запаздывающих потенциалов, которые были подробно рассмотрены нами в работах [3-6].

$$E = \nabla \varphi - \partial A / \partial t, \quad B = \text{rot } A. \quad (2)$$

Опуская детальные расчеты, которые были проделаны Фейнманом в работе [2], приведем сразу наиболее важные результаты.

Для электрона, движущегося с постоянной скоростью v вдоль оси x , для скалярного запаздывающего потенциала получено

$$\varphi(x, y, z, t) = \gamma e / 4\pi \epsilon_0 r', \quad (3)$$

где $\gamma = (1 - v^2 / c^2)^{-1/2}$, $x' = \gamma(x - vt)$, $r' = (x'^2 + y^2 + z^2)^{1/2}$.

Совершенно аналогичным образом вычисляется и так называемый векторный потенциал движущегося электрона в тех же условиях

$$A = \varphi v / c^2. \quad (4)$$

Подчеркнем, что данные потенциалы были получены совершенно вне зависимости от наличия или знания уравнений Максвелла.

Выражение (3) напоминает значение потенциала для статического случая, т.е. когда электрон неподвижен, только появился множитель γ и вместо r стоит r' . Преобразования для x' и r' соответствуют хорошо известным преобразованиям Лоренца. При помощи преобразований Лоренца динамическую задачу можно, действительно, полностью свести к статической

задаче, если одновременно произвести преобразование и для переменной времени t [3-6].

После дифференцирования силовых потенциалов по формулам (2) получаются следующие результаты для проекций напряженности электрического поля [2]

$$\begin{aligned} E_x &= \gamma e (x - vt) / 4\pi \epsilon_0 r'^{3/2}, \quad E_y = \gamma ey / 4\pi \epsilon_0 r'^{3/2}, \\ E_z &= \gamma ez / 4\pi \epsilon_0 r'^{3/2}. \end{aligned} \quad (5)$$

А теперь вместе с Фейнманом посмотрим, как выглядит электрическое поле движущегося электрона (рис. 1) [2].

Анализируя компоненты электрического поля, можно показать, что электрическое поле движущегося электрона является радиальным, и силовые линии расходятся от электрона так же, как и в стационарном случае.

Конечно, вследствие наличия дополнительного коэффициента γ поле не будет тем же самым, что в стационарном случае. Но здесь мы можем увидеть нечто очень интересное. Дело обстоит так, как будто мы записываем закон Кулона в особой системе координат, «сжатой» вдоль оси x множителем γ . Если это представить графически, то силовые линии впереди и позади движущегося электрона станут реже, а по бокам сгустятся (рис.1).

Это означает, что электрическое поле впереди и сзади электрона ослабевает, но зато по бокам становится во столько же раз сильнее в полном соответствии с рассмотренными уравнениями классической электродинамики.

Но если электрон движется со скоростью, очень близкой к скорости света, а это достигается очень легко в ускорителях, то поле перед электроном сильно уменьшается, а поле сбоку электрона чудовищно возрастает. Эту особенность всегда следует иметь в виду при рассмотрении взаимодействия очень быстрых частиц. При этом магнитное взаимодействие частиц сравнивается с электрическим, а силовые линии вектора \mathbf{B} будут представлять окружности вокруг линии движения электрона [2].

Остается подставить $E^2 = E_x^2 + E_y^2 + E_z^2$ в выражение для плотности энергии электрического поля электрона (1) и проинтегрировать по указанному выше объему. За счет бокового увеличения электрического поля движущегося электрона в γ раз его собственная электрическая энергия могла бы возрасти в γ^2 раз, однако за счет ослабления поля вдоль оси x в γ раз результирующая энергия электрона возрастет ровно в γ раз. При этом масса электрона, которая по своей природе является электромагнитной, увеличивается во столько же раз.

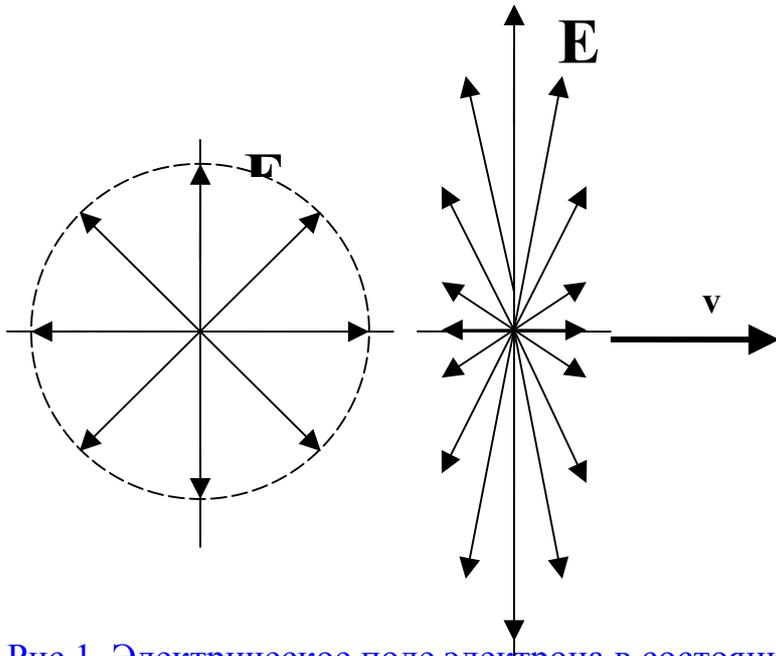


Рис.1. Электрическое поле электрона в состоянии покоя и при его движении со скоростью $v = 0,9 c$.

Детальные вычисления показали, что при интегрировании плотности энергии электрического поля электрона по объему в соответствии с формулой (1) мы получаем увеличение этой энергии, а, следовательно, и инерции (массы) электрона также в γ раз. Это с огромной степенью точности согласуется с экспериментом.

ЗАВИСИМОСТЬ ЭФФЕКТИВНОЙ МАССЫ ЭЛЕКТРОНА ОТ ДВИЖЕНИЯ СОСЕДНИХ ЧАСТИЦ

В классической электродинамике показывается, что инерция электрона определяется не только собственным электрическим полем, но также и присутствием соседних движущихся электронов.

Этот случай является очень примечательным, но иногда ускользает от внимания исследователей.

В электрическом поле с напряженностью E на электрон действует ускоряющая сила F , равная

$$F = eE = -e(\nabla\varphi + \partial A/\partial t). \quad (6)$$

Оказывается, что второе слагаемое в скобках (6) придает электрону дополнительные инерционные свойства.

Рассмотрим поведение частицы, движущейся с малой скоростью вдали от других частиц. В работе [6] показано, что в свободном пространстве частную

производную в (1) можно заменить полной производной по времени. Тогда уравнение (6) можно записать в виде

$$\mathbf{F} = d(m\mathbf{v}) / dt = -e \nabla\varphi - e d\mathbf{A} / dt, \quad (7)$$

или после соответствующей перегруппировки слагаемых

$$d/dt (m\mathbf{v} + e\mathbf{A}) = -e \nabla\varphi. \quad (8)$$

Следовательно, частица в электростатическом поле с потенциалом φ при наличии векторного потенциала \mathbf{A} ведет себя таким необычным образом, как будто ее импульс не $m\mathbf{v}$, а некоторый эффективный импульс, равный

$$\mathbf{p}_{\text{эфф}} = m\mathbf{v} + e\mathbf{A}, \quad (9)$$

т.е. зависит также от характера движения посторонних частиц, формирующих векторный потенциал \mathbf{A} . Наиболее ярко данный эффект значительного увеличения инерционности электронов наблюдается в катушках индуктивности.

Наличие в (9) дополнительного слагаемого $e\mathbf{A}$ может привести к появлению дополнительной инерционности для сложных частиц (например, ядер, атомов и молекул). Рассмотрим этот вопрос подробнее.

В качестве примера возьмем один из простейших вариантов движения, а именно, систему, состоящую из двух электрических частиц, например, атом водорода. Поскольку протон намного массивнее электрона, то в первом приближении влиянием электрона на движение протона можно пренебречь.

Пусть атом водорода движется со скоростью \mathbf{v} в направлении оси Ox . Тогда импульс протона с массой M и импульс электрона с массой m соответственно равны

$$\begin{aligned} p_p &= Mv, \\ p_e &= mv + qA_x, \end{aligned} \quad (10)$$

где запаздывающий потенциал A_x создается за счет движения массивного протона. Здесь мы пренебрегаем орбитальным движением электрона, поскольку при усреднении проекция орбитального импульса на ось Ox даст нулевой вклад.

С учетом того, что

$$\mathbf{A} = \varphi \mathbf{v} / c^2, \quad (11)$$

суммарный эффективный импульс атома водорода принимает вид

$$p_{эфф} = p_p + p_e = (M + m + e\phi/c^2)v = (M + m + U/c^2)v, \quad (12)$$

где $U = e\phi$ - потенциальная электростатическая энергия взаимодействия электрона и протона.

Соотношение (12) можно записать коротко

$$p_{эфф} = m_{эфф} v,$$

где
$$m_{эфф} = M + m + U/c^2. \quad (13)$$

Поскольку в случае атома водорода $U < 0$, то эффективная масса $m_{эфф}$ становится меньше, чем сумма масс составляющих частиц. Появился недостаток (дефект) массы Δm , обусловленный электромагнитным взаимодействием электрона и протона

$$\Delta m = U/c^2. \quad (14)$$

При образовании атома водорода избыток энергии $\Delta E = -U$, а, следовательно, и массы Δm был излучен электроном в виде электромагнитных волн, в результате чего полная энергия системы протон + электрон уменьшилась на величину ΔE по сравнению со свободными частицами, и мы получаем

$$\Delta E = c^2 \Delta m. \quad (15)$$

В наиболее яркой форме данный эффект проявляется в ядерных реакциях, где благодаря большим энергиям электромагнитного взаимодействия разницу в эффективных массах ядер до и после реакции можно достаточно надежно измерить.

В работе [7] приводится пример с зеркальными ядрами изотопов B^{11} и C^{11} , разница между которыми состоит лишь в замене нейтрона на протон в изотопе углерода. Примечательно, что подобная замена очень мало отражается на свойствах данных ядер (например, на схеме уровней возбуждения). Характерной особенностью данных ядер является то, что изотоп C^{11} тяжелее изотопа B^{11} на величину электрической энергии протона в ядре, деленной на c^2 , с учетом разницы масс нейтрона и протона,

т.е. в соответствии с формулой (15). Эти данные говорят о том, что электромагнитные (в частности электрические) силы играют существенную роль в образовании ядер и в ядерных реакциях. Учитывая то обстоятельство, что простые классические соотношения, рассмотренные в данном разделе, выполняются с очень высокой точностью для всех атомов и ядер (при сравнении эффективных масс элементов), можно предположить, что электромагнитные силы являются основными силами, участвующими в формировании не только атомов, но также и ядер.

ПОЧЕМУ ГРАВИТАЦИЯ НА МНОГО-МНОГО ПОРЯДКОВ СЛАБЕЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ

Из простых школьных вычислений известно, что электрическое взаимодействие электронов примерно на 43 порядка сильнее их гравитационного. Это фантастическое число трудно поддается осмыслению для обычных физиков-теоретиков. Для них совершенно немислимо построить такую теорию, которая смогла бы осилить это фантастическое число. Однако не будем раньше времени отчаиваться.

Оказывается, что в рамках Классической электродинамики можно вполне объяснить столь огромную разницу в этих силовых взаимодействиях. Достаточно вспомнить, как легко поглощается свет тонкой алюминиевой фольгой и как глубоко проникают рентгеновские и гамма-лучи сквозь алюминий. Недаром жесткое (очень высокочастотное) гамма-излучение называется проникающим излучением, которое можно задержать лишь толстыми свинцовыми пластинами, а алюминий для них вообще не преграда.

Это объясняется тем, что рассеяние жесткого гамма-излучения на свободных электронах на много порядков слабее света, т.е. очень низкочастотного электромагнитного излучения. В алюминии электроны слабо связаны в атомах, и для жесткого гамма-излучения они оказываются почти свободными электронами.

Согласно очень точному Принципу эквивалентности Галилея – строгой пропорциональности электромагнитной и гравитационной масс частиц, электроны являются полноправными участниками гравитации, как и ядра атомов. Это наводит на мысль, что гравитация имеет электромагнитное происхождение. Разносторонний анализ этого явления позволяет предположить, что гравитация электронов и позитронов формируется за счет очень высокочастотных флуктуаций электромагнитных полей, которыми связаны электроны в атомах, ядрах и других сложных частицах. Поскольку флуктуация силовых полей не зависит от их полярности, то гравитация действует одинаково как для электронов, так и для позитронов независимо от их полярности.

Для сверхвысокочастотных флуктуаций полей взаимодействие этих колебаний с электронами и позитронами необычайно мало, чем и объясняется необычайная слабость гравитационного взаимодействия по сравнению с электрическим. Хотя и остается жесткая привязка гравитации к электромагнитным полям и электромагнитным массам частиц, что и обеспечивает Принцип эквивалентности Галилея с высочайшей точностью. Разумеется, что для количественной оценки гравитационного взаимодействия необходимо знать спектр частот флуктуаций электромагнитных полей для электронов и позитронов, а также частотную зависимость эффективного рассеяния волн на электронах и позитронах. Возможно, что со временем физики-теоретики будут располагать этими расчетными величинами.

ЛИТЕРАТУРА

1. Окунь Л.Б. ПОНЯТИЕ МАССЫ (Масса, энергия, относительность)
Л. Б. Окунь (Институт теоретической и экспериментальной физики, Москва)
УСПЕХИ ФИЗИЧЕСКИХ НАУК. МЕТОДИЧЕСКИЕ ЗАМЕТКИ. Июль 1989 г. Том 158, вып. 3
2. P o i n c a r e Н.//Lorentz Festschrift.—Archieve Neerland, 1900.—V. 5. P. 252.
3. Физический энциклопедический словарь / Ред. Прохоров А.М. М.: Сов. энциклопедия, 1984. С. 392-393. 773.
4. Шаляпин А.Л., Стукалов В.И. Введение в классическую электродинамику и атомную физику. Второе издание, переработанное и дополненное. Екатеринбург, Изд-во Учебно-метод. Центр УПИ, 2006, 490 с.
5. Соколов А.А., Тернов И.М., Жуковский В.Ч. Квантовая механика. – М.: Наука, 1979. С. 338. Электромагнитный вакуум.
6. Фейнман Р., Лэйтон Р., Сэндс М. Фейнмановские лекции по физике. Электродинамика. -М.: Мир, 1977. Вып. 6. С. 265,306.
7. Шаляпин А.Л. О динамике частиц и механизме формирования электромагнитных полей / Урал. политехн. ин-т. Свердловск, 1989. Деп. в ВИНТИ, 1989. N 118 - В89.
8. Шаляпин А.Л. О природе дефекта масс связанных частиц и релятивистском движении / Урал. политехн. ин-т. Свердловск, 1986. Деп. в ВИНТИ, 1986, N 8246.
9. Фейнман Р., Лэйтон Р., Сэндс М. Фейнмановские лекции по физике. Электродинамика. – М.: Мир, 1977. Вып.5. С. 9-11.