

О СТРУКТУРЕ ЭЛЕКТРОНА И ДРУГИХ ЗАРЯЖЕННЫХ ЛЕПТОНОВ

М. Е.Шульман

Рассматривается гипотетическая модель электрона на основе классических представлений, позволяющая получить его массу, спин и магнитный момент. Электрон представляется в виде сферы классического радиуса (протоэлектрона) с нулевой массой покоя, вращающегося со скоростью света без потерь на излучение по орбите, радиусом которой служит приведенное значение комптоновской длины волны электрона. Отношение радиуса сферы к радиусу орбиты равно постоянной тонкой структуры. Сфера обладает единичным зарядом, распределённым по её поверхности. За счет взаимотталкивания частей заряда сфера приобретает массу, равную половине массы покоя электрона. Вращение механической массы протоэлектрона по орбите обеспечивает электрону его характерный спин $\frac{1}{2}$ и кинетическую энергию, создающую $\frac{1}{4}$ массы покоя. Вращение заряда, аналогичное кольцевому току, создает магнитный момент, равный магнетону Бора и магнитную энергию, создающую $\frac{1}{4}$ массы покоя электрона. Полная энергия электрона является суммой его электростатической, магнитной и кинетической энергии. Соответственно полная масса электрона является суммой масс электростатического, магнитного и кинетического происхождения. Модель оказывается применима к мюону и тау-лептону. Правильные соотношения между

массой, спином и магнитным моментом для них так же обеспечиваются при соотношении радиуса заряженной сферы к радиусу орбиты, равном постоянной тонкой структуры.

Нашему сознанию трудно примириться с принципиальной непредставимостью свойств электрона. Наличие у электрона конечной массы противоречит представлению об электроне как о материальной точке. Наличие спина и магнитного момента свидетельствуют о вращении некой заряженной массы. Соотношения неопределенностей координат и импульса, размерность постоянной Планка, простые соотношения между этой величиной и свойствами электрона наверняка приводили многих исследователей к попыткам построения на этой основе различных моделей структуры этой частицы. Любой физик, даже оперируя сложнейшей математикой, сознательно или подсознательно представляет себе какую-либо модель объекта или процесса, даже если она его не полностью устраивает. Ниже представлены аналогичные попытки автора с использованием представлений классической физики. Автора тоже не всё устраивает в предлагаемой им гипотезе, о чём непременно будет упомянуто ниже. Вероятно, большинство читателей, встретив положения, противоречащие сложившимся стереотипам, например, отличные от точечных размеры электрона и т. п., откажутся от дальнейшего чтения этой гипотезы. Но я предлагаю взглянуть на это с другой стороны. Ведь мы, сделав некоторые допущения, пытаемся понять внутренние свойства фундаментальной частицы, которые, возможно, определяют свойства нашего мира. В работе использованы значения фундаментальных физических констант, согласование которых произведено Р.Козном и Б. Тэйлором в 1986

г (Р. Н. Фаустов. Фундаментальные физические константы. Физическая энциклопедия. www.femto.com.ua). Все расчёты производились в системе СИ.

Из формулы для комптоновской длины волны электрона [1]

$$\lambda = \frac{h}{m_e c}$$

где λ - комптоновская длина волны электрона, h – постоянная Планка, m_e – масса покоя электрона, c – скорость света, следует, что

$$h = m_e \lambda c$$

Из формулы

$$\tilde{\lambda} = \frac{\lambda}{2\pi}$$

можно предположить, что λ есть длина окружности, радиус которой равен $\tilde{\lambda}$. Назовём его комптоновским радиусом электрона

$$R_{ce} = \tilde{\lambda}.$$

Развёрнутая форма постоянной Планка приобретает следующий вид:

$$h = m_e 2\pi R_{ce} c$$

$$\hbar = \frac{h}{2\pi} = m_e R_{ce} c.$$

Откуда значение комптоновского радиуса

$$R_{ce} = \frac{\hbar}{m_e c} = \frac{1.05457266(63) \cdot 10^{-34}}{9.1093897(54) \cdot 10^{-31} \cdot 2.99792458 \cdot 10^8} = 3.86159322 \cdot 10^{-13}.$$

Более 35 лет назад автором было замечено, что отношение классического радиуса электрона r_e к комптоновскому равно постоянной тонкой структуры α :

$$\frac{r_e}{R_{ce}} = \frac{2.81794092(38) \cdot 10^{-15}}{3.86159322 \cdot 10^{-13}} = 7.2973530 \cdot 10^{-3} = \frac{1}{137.03599} = \alpha$$

Долгое время неясно было, как можно связать эти величины и главным образом из-за того, что спин электрона требовал, чтобы масса электрона была вдвое меньше известного значения и вращалась со скоростью света по орбите комптоновского радиуса. Исследование этой модели подтвердило, что таким образом можно получить не только спин, но и магнитный момент электрона, а в дальнейшем и оставшуюся половину массы. Эта модель в июне 2009 года была выложена автором в интернет в виде статьи «Структура электрона»

<http://new-idea.kulichki.net/pubfiles/090627010440.pdf>. Хотя самому автору эта идея представлялась тогда излишне смелой и фантастической. Первым подтверждением явилось высказывание Г. В. Николаева [2]: *«В современной электродинамике до настоящего времени не разрешены противоречия с природой массы покоя m_0 и заряда e электрона. Если полной энергии W_0 электрона соответствует масса покоя электрона $m_0 = \frac{W_0}{c^2}$, то энергии электрического поля W_E электрона соответствует масса $m_E = \frac{1}{2} m_0$ »*. Следующим шагом явилось встреченное у Л.Д. Ландау и Е.М. Лившица [3] утверждение: *«...выражение для энергии системы зарядов:*

$$U = \frac{1}{2} \int \rho \phi dV .»$$

И, наконец, полностью убедило подробное разъяснение Р.Фейнмана с соавторами [5], заслуживающее чтобы привести его полностью: *«Представьте, что мы взяли простейшую модель электрона, когда весь его заряд q равномерно распределен по поверхности сферы радиусом a ...[...]. Теперь вычислим энергию электромагнитного поля. Если заряд неподвижен, то никакого магнитного поля вокруг нет, и энергия в единице объема будет*

пропорциональна квадрату напряженности электрического поля.

Величина же напряженности электрического поля равна $\frac{q}{4\pi\epsilon_0 r^2}$, поэтому плотность энергии

$$u = \frac{\epsilon_0}{2} E^2 = \frac{q^2}{32\pi^2 \epsilon_0 r^4}$$

Чтобы получить полную энергию, нужно эту плотность проинтегрировать по всему пространству. Используя элемент объема $4\pi r^2 dr$, найдем полную энергию, которую мы обозначим через $U_{эл}$:

$$U_{эл} = \int \frac{q^2}{8\pi\epsilon_0 r^2} dr .$$

Это выражение интегрируется очень просто. Нижний предел интегрирования равен a , а верхний — бесконечности, поэтому

$$U_{эл} = \frac{1}{2} \frac{q^2}{4\pi\epsilon_0 a} .$$

И далее: «Величина

$$r_0 = \frac{e^2}{m_e c^2}$$

называется «классическим радиусом электрона» и равна она $2,82 \times 10^{-13}$ см, т. е. одной стотысячной диаметра атома. [...]

Вместо того чтобы спорить, какое распределение правильно, а какое нет, было решено взять в качестве «номинального» радиуса величину r_0 . А разные теории приписывают к ней свой коэффициент.»

При отнесении энергии к материальной точке величина энергии становится бесконечно большой и требуется искусственный приём перенормировки массы.

Таким образом, есть достаточно оснований считать, что сфера классического радиуса с зарядом электрона обладает массой, равной половине массы электрона и имеющей электростатическое

происхождение. Предположим, что такая частица - назовем её протоэлектроном – существует. Тогда при вращении её с скоростью света по орбите комптоновского радиуса её момент вращения будет равен характерному фермионному спину электрона:

$$s = \frac{1}{2} m_e R_{ce} c = \frac{\hbar}{2}.$$

Частота ν , или, проще говоря, число оборотов в секунду равно частному от деления линейной скорости на длину окружности:

$$\nu = \frac{c}{\lambda} = 1,2359 \cdot 10^{20} \text{ c}^{-1}.$$

Обратная величина, период обращения T равен:

$$T = \frac{1}{\nu} = 8,093 \cdot 10^{-21} \text{ c}.$$

При таком понимании частоты для покоящегося электрона обращается в тождество известная формула:

$$h \nu = m \lambda c \cdot \frac{c}{\lambda} = m c^2.$$

Одновременно возникает следующая трудность: массивная частица при вращении со скоростью света приобретёт бесконечно большую массу, которую тут же израсходует на излучение. Однако нам известен пример фотона, движущегося со скоростью света и имеющего при этом импульс, а следовательно и массу. Будем считать, что протоэлектрон в какой-то мере подобен фотону. Как и фотон протоэлектрон имеет нулевую массу покоя и подобно тому, как фотону свойственно прямолинейное распространение, так и протоэлектроны свойственно вращение по орбите. Вращение электронов по определённым орбитам или нахождение на определенных энергетических уровнях без излучения не является необычным для квантовой механики. Попутно отметим, что

отношение комптоновского радиуса электрона к радиусу первой боровской орбиты так же равно постоянной Зоммерфельда.

Очередная трудность этой модели состоит в том, что экспериментально не удастся установить размер электрона вплоть до 10^{-18} - 10^{-20} м. Возможно это связано с тем, что орбита протоэлектрона удалена на 137 его радиусов от центра вращения, но возможно также и то, что для неподвижного наблюдателя сфера в результате лоренцева сокращения превращается в диск нулевой толщины.

Проверим, можно ли в этой модели получить другие известные свойства электрона. Магнитный момент по определению равен произведению тока на площадь, охватываемую контуром с током [5]. Вращающийся со скоростью света по орбите заряд эквивалентен кольцевому току:

$$I = \frac{ec}{\lambda} = \frac{ec}{2\pi R_{ce}} = 19.796339 \text{ А.}$$

Магнитный момент электрона μ :

$$\mu = \frac{ec}{2\pi R_{ce}} \pi R_{ce}^2 = \frac{ecR_{ce}}{2} = 0.92739 \cdot 10^{-23} \text{ Дж} \cdot \text{Тл}^{-1}$$

Полученный магнитный момент численно равен магнетону Бора, для которого известна теоретическая формула [1]. Эта формула (в системе СИ) легко может быть получена, учитывая, что

$$R_{ce} = \frac{h}{2\pi \cdot m_e c}$$

Тогда

$$\mu = \frac{ec}{2\pi \left(\frac{h}{2\pi \cdot m_e c}\right)} \cdot \pi \left(\frac{h}{2\pi \cdot m_e c}\right)^2 = \frac{eh}{4\pi \cdot m_e} = \mu_B$$

Аномальный магнитный момент здесь не рассматривается.

Попытаемся выяснить происхождение второй половины массы электрона. Некоторая часть массы электрона обязана своим происхождением магнитной энергии вращающегося по орбите заряда, эквивалентного кольцевому току. Проведем следующий мысленный опыт: представим себе стопку из 10^{15} таких колец, что равносильно соленоиду из $N = 10^{15}$ витков площадью $S = \pi R_{ce}^2$, длиной $l = 2 \cdot 2.81794091(38) \text{ м}$ с током $I = 19.796339 \text{ А}$. Соленоид достаточно длинный, чтобы считать коэффициент размагничивания равным 1. Индуктивность такого соленоида [4] L равна:

$$L = \frac{\mu_0 N^2 S}{l} = 104,452554 \cdot 10^{-3} \text{ Гн},$$

где $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ Гн} \cdot \text{м}^{-1}$ – магнитная постоянная, или магнитная проницаемость вакуума.

Энергия этого соленоида

$$W = \frac{LI^2}{2} = 20.467219 \text{ Дж}.$$

Магнитная энергия одного витка, т.е. электрона:

$$E_m = \frac{W}{N} = 20.47 \cdot 10^{-15} \text{ Дж} = 0.127764 \text{ МэВ}$$

Полная энергия электрона равна 0.510995 МэВ , следовательно, магнитная энергия составляет $\frac{1}{4}$ этой величины. Здесь мы неявно предположили принадлежность всей магнитной энергии кольцу с током, без учета рассеяния магнитной энергии в пространстве, связанной с соотношением l/S .

Магнитную энергию считают кинетической энергией движения заряда. Но есть ещё кинетическая энергия вращения собственно массы протоэлектрона. На её долю осталось всего $\frac{1}{4}$ полной энергии электрона. Действительно, она оказывается равной

$$E_k = \frac{pv}{2} = \frac{m_{pe}c^2}{2} = \frac{m_e c^2}{4} = 20.47 \cdot 10^{-15} \text{ Дж} = 0.127764 \text{ МэВ}$$

Полная энергия электрона равна сумме кулоновской, магнитной и кинетической энергий:

$$E = E_{pe} + E_m + E_k = \frac{m_e \cdot c^2}{2} + 2 \cdot \frac{m_e \cdot c^2}{4} = m_e \cdot c^2$$

Здесь m_{pe} и E_{pe} означают массу и энергию протоэлектрона.

Соответственно, половину массы электрона составляет кулоновская масса и по $\frac{1}{4}$ приходится на магнитную и кинетическую массы.

Данная гипотеза, как и всякая другая, нуждается в проверке. Особую ценность приобретает гипотеза, описывающая или объясняющая целый класс явлений или объектов и обладающая предсказательной способностью. В данном случае нам, можно сказать, повезло – проверочные опыты не требуются. Известны частицы, относящиеся к тому же классу лептонов, что и электрон (позитрон). Это мюон и тау-лептон с соответствующими античастицами. Свойства их изучены. Поэтому попытаемся проверить приложимость к ним предлагаемой модели и на её основе вычислить какие-либо свойства по другим, известным. Итак, рассмотрим мюон. Это нестабильная частица со временем жизни около $2.2 \cdot 10^{-6}$ с, распадающаяся на электрон, электронное антинейтрино и мюонное нейтрино. Заряд мюона равен заряду электрона, спин $\frac{\hbar}{2}$, античастицей является антимюон с положительным зарядом, распадающийся на электронное нейтрино и мюонное антинейтрино. Масса покоя мюона $m_\mu = 0.1134289256 \text{ А.Е.М.} = 105.6583668 \text{ МэВ}$ (<http://pdg.lbl.gov/2011/listings/rpp/2011-list-muon.pdf>), что равно $1.883532656 \cdot 10^{-28} \text{ кг}$. По аналогии с вышеописанной моделью электрона представим себе мюон в виде

протомюона - сферы радиуса $r_{p\mu}$, вращающейся по орбите комптоновского радиуса мюона $R_{c\mu}$.

Соответственно радиус протомюона:

$$r_{p\mu} = \frac{1}{2} \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 \frac{1}{2} m_\mu c^2} = 1.362849858 \cdot 10^{-17} \text{ м}.$$

Комптоновский радиус мюона:

$$R_{c\mu} = \frac{\hbar}{m_\mu c} = 1.867594789 \cdot 10^{-15} \text{ м}.$$

Отношение радиуса протомюона к радиусу его орбиты:

$$\frac{r_{p\mu}}{R_{c\mu}} = 7.297353308 \cdot 10^{-3} = \frac{1}{137.0359895} = \alpha.$$

Магнетон мюона:

$$\mu_\mu = \frac{ecR_{c\mu}}{2} = \frac{e\hbar}{2m_\mu} = 4.485222007 \cdot 10^{-26} \text{ Дж} \cdot \text{Тл}^{-1}.$$

Эквивалентный кольцевой ток:

$$I_\mu = \frac{ec}{2\pi R_{c\mu}} = 4093.254658954 \text{ А}.$$

Магнитная энергия мюона:

$$E_{m\mu} = \frac{\mu_0 \cdot \pi R_{c\mu}^2}{2r_{p\mu}} \cdot \frac{I^2}{2} = 4.232086822 \cdot 10^{-12} \text{ Дж} = 26.414596746 \text{ МэВ}.$$

Магнитная масса мюона:

$$m_{m\mu} = 0.470890515 \cdot 10^{-28} \text{ кг} \approx \frac{1}{4} m_\mu.$$

Расхождения в 5 знаке связаны с накоплением погрешностей входящих в вычисление величин. Кинетическая энергия мюона:

$$E_{k\mu} = \frac{p_{p\mu} \cdot c}{2} = \frac{m_\mu \cdot c^2}{2} = \frac{1}{4} m_\mu \cdot c^2.$$

Понятно, что часть массы мюона, связанная с кинетической энергией вращения протомюона по орбите, также равна четверти полной массы.

Наиболее тяжёлый из заряженных лептонов, тау-лептон [6,7] имеет массу покоя 1776.89 МэВ (<http://pdg.lbl.gov/2006/listings/s035.pdf>), что соответствует $3.167644982 \cdot 10^{-27} \text{ кг}$, время жизни $290.6 \cdot 10^{-15} \text{ с}$ и распадается на электрон с электронным антинейтрино и тау-нейтрино (17.84%), мюон с мюонным антинейтрино и тау-нейтрино (17,36%), а также на π - и K -мезоны (более 50%). Заряд тау-лептона -1, спин 1/2. Предполагая структуру тау-лептона аналогичной электрону и мюону, проделаем вычисления, аналогичные вышеприведенным.

$$r_{p\tau} = \frac{1}{2} \cdot \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 \frac{1}{2} m_\tau c^2} = 8.103724462 \cdot 10^{-19} \text{ м} ;$$

$$R_{c\tau} = \frac{\hbar}{m_\tau c} = 1.1105019 \cdot 10^{-16} \text{ м} ;$$

$$\frac{r_{p\tau}}{R_{c\tau}} = 7.29735308 = \frac{1}{137.0359895} = \alpha ;$$

$$\mu_\tau = \frac{ecR_{c\tau}}{2} = \frac{e\hbar}{2m_\tau} = 2.666985146 \cdot 10^{-27} \text{ Дж} \cdot \text{Тл}^{-1} ;$$

$$I_\tau = \frac{ec}{2\pi R_{c\tau}} = 68838.613163235 \text{ А} ;$$

$$E_{m\tau} = \frac{\mu_0 \cdot \pi R_{c\tau}^2}{2r_{p\tau}} \cdot \frac{I^2}{2} = 7.117343329 \cdot 10^{-11} \text{ Дж} = 444.229435412 \text{ МэВ} ;$$

$$m_{m\tau} = 0.791923609 \cdot 10^{-27} \text{ кг} \approx \frac{1}{4} m_\tau ;$$

$$E_{k\tau} = \frac{m_\tau c^2}{4} = \frac{1}{4} m_\tau \cdot c^2 .$$

Как видим, тау-лептон полностью аналогичен по структуре и свойствам электрону и мюону. Причем, следует отметить, что данные по массе тау от 2011 г не отвечают определяющему уравнению для постоянной тонкой структуры, тогда как данные от 2006 г, отличающиеся всего на 0,07 МэВ полностью соответствуют ему.

Логарифмы масс и радиусов протолептонов, как и любых обратнопропорциональных величин, образуют прямую зависимость с коэффициентом пропорциональности -1.

Зависимость имеет вид:

$$\log_a m_i = b(a) - \log_a r_i,$$

где a - основание логарифмов, m_i и r_i - масса и радиус протолептона, i означает протоэлектрон, протомюон или прототаон. В случае десятичных логарифмов (рис. 1)

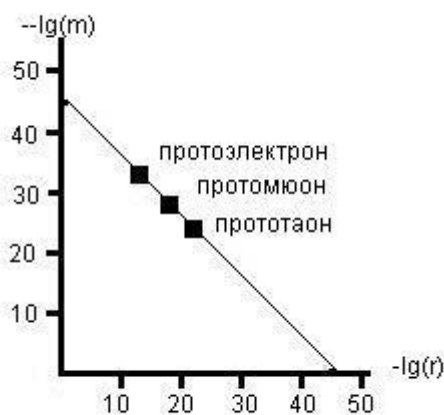


Рис. 1. Зависимость между логарифмами масс и радиусов протолептонов.

$b = -44.91608227732785$. Естественно, подобные соотношения выполняются для кратных величин: полных масс лептонов, комптоновских радиусов и т. п.

Подведём итог вышесказанному. Электрон можно представить в виде заряженной сферы классического радиуса,

вращающегося со скоростью света без потерь на излучение по орбите комптоновского радиуса. Масса сферы, обязанная своим происхождением кулоновской энергии заряда, составляет половину массы покоя электрона, по $\frac{1}{4}$ массы вносят магнитная энергия вращения заряда и кинетическая энергия вращения массы.

Такой электрон обладает спином $\frac{\hbar}{2}$ и магнитным моментом,

равным магнетону Бора. Ясный физический смысл приобретает постоянная Зоммерфельда как отношение радиуса сферы к радиусу орбиты. Комптоновская длина волны электрона это длина окружности орбиты. Постоянная Планка – произведение 3-х величин: массы покоя электрона, длины орбиты и скорости света. Совершенно аналогично построены позитрон и короткоживущие

заряженные лептоны – мюон и тау-лептон, а также их античастицы. Но их проточастицы имеют при том же заряде меньший радиус, соответственно уменьшается радиус орбиты, но возрастают энергия и масса. Возможно, это связано с присутствием в структуре нейтрино.

В натурфилософском плане намечается неожиданная иерархия понятий: субстанция – заряд – энергия – масса. Пройдем мысленно по этой цепочке. Итак, некая субстанция обладает свойствами: 1) быть; 2) существовать только в движении; 3) иметь электрический заряд одного из 2 видов – положительный или отрицательный. Благодаря взаимоотталкиванию частей заряда возникает большая часть внутренней потенциальной энергии частицы. Что такое заряд, что удерживает части заряда от разлетания, чем обусловлено движение заряженной проточастицы по окружности - мы не знаем, это приходится принять как свойства, подлежащие дальнейшему исследованию. С энергией неразрывно связана масса, определяющая инерционные и гравитационные свойства. Масса, образно выражаясь, это что-то вроде «сухого остатка» от суммы положительных энергий: отталкивания, кинетической, магнитной и др. после деления её на c^2 . Сама масса, кроме свойства инертности, обладает свойством создавать отрицательную энергию тяготения. Далее эта частица субстанции (материи) имеет возможность по-разному «распорядиться» своей энергией: либо истратить её на притяжение противоположной по знаку античастицы, превратившись в безмассовую, бесспиновую и безынерционную вакуум-пару и тем самым лишиться большинства способов проявиться в нашем мире, либо двигаться самостоятельно, приобретая при этом дополнительно кинетическую и магнитную энергию, т. е. увеличивая свою массу. Следует заметить, что указанные

соотношения между материей, зарядом, энергией и массой основаны только на предлагаемой гипотезе о строении заряженных лептонов. Возможно, они справедливы и для других заряженных частиц, но совершенно не применимы к частицам без заряда – нейтрино. Далеко не ясны противоречия между точечным представлением электрона в общепринятой теории [2] и конечными размерами его в предлагаемой гипотезе, а так же противоречия между современными опытами и данными томсоновского и комптоновского рассеяния фотонов на электроне, в которых явно фигурируют классический и комптоновский радиусы. Неизвестным остается и “механизм” взаимодействия зарядов. Как классическая, так и квантовая электродинамика являются феноменологическими теориями, обеспечивающими в большинстве случаев хорошую сходимость расчётов с практическими результатами. Первая пользуется понятием электромагнитного поля, природа которого остаётся загадочной, вторая все взаимодействия рассматривает как предполагаемые обмены предполагаемыми фотонами, - то ли частицами, то ли волнами того же поля. Это проблемы представляют беспредельные возможности для развития физики.

Параллельно с написанием данной статьи автор занимался поисками аналогичных разработок. В литературе упоминаний найдено не было. В интернете довольно близкие идеи встречены в работах проф. Ф.М. Канарёва (<http://www.ikar.udm.ru/sb28-2.htm>), В.В. Ерохина (<http://sciteclibrary.ru/texts/rus/stat/st2439.pdf>), Е.М. Старовойтова (liga-ivanovo.narod.ru/starov.htm) и С.Б. Алеманова (alemanov.narod.ru). Канарёв, в отличие от автора, в качестве радиуса электрона принимает комптоновскую длину волны, Ерохин для одних свойств считает приемлемым классический, для других комптоновский радиус. Работа Старовойтова интересна

использованием постоянной тонкой структуры. Алеманов разрабатывает волновую модель строения частиц. Очень близко к рассматриваемой модели подошёл А. Кирьяко [8]. Идея использования комптоновских параметров носится в воздухе. Наверное, есть и другие работы на эту тему. Автор считает предложенную модель одним из возможных вариантов, который может быть полезен при физической интерпретации безусловно впечатляющих успехов квантовой механики и её дальнейших разработок. Автор выражает благодарность В.И. Востротюкову, В.В. Ерохину, доктору физико-математических наук Б.А. Кулику, кандидатам физико-математических наук С.А. Старцеву, А.В. Скрипкину, В.Ф. Борулько за помощь в работе, ценные замечания и советы.

ЛИТЕРАТУРА

1. Н.И. Карякин, К.Н. Быстров, П.С. Киреев. Краткий справочник по физике. Издание 3-е. «Высшая школа», Москва (1969).
2. Г.В. Николаев. Современная электродинамика и причины её парадоксальности. Перспективы построения непротиворечивой электродинамики. Теории, эксперименты, парадоксы. Изд. 2, доп. Изд-во н.-т. лит-ры, Томск (2003).
- 3.Л.Д. Ландау, Е.М. Лившиц. Теория поля. Изд. 5, испр. и доп. «Наука», Москва (1967).
4. Р. Фейнман, Р. Лейтон, М. Сэндс. Фейнмановские лекции по физике. Т.6. Электродинамика.
5. Б. М. Яворский, А.А. Детлаф. Справочник по физике. Для инженеров и студентов ВУЗов. Издание 3-е, исправленное. «Наука», Москва (1965).

6. Я.И. Азимов. Современный статус тау-лептона. УФН, т. 132, вып. 2 (1980).
7. М. Перл. Открытие новой элементарной частицы – тяжелого тау-лептона. УФН, т. 129, вып. 4 (1979).
8. А. Кирьяко. Электромагнитная парадигма квантовой теории поля. Лебедь, №11 (2005).

© М.Е.Шульман, Днепропетровск,2011