

# Теории происхождения и генерации массы

А. Г. Кирьяко

Рассмотрены три гипотезы происхождения массы: теория массы электронной теории, механизм Хиггса Стандартной Модели и принцип генерации массы в НТЭЧ. Показаны достоинства и недостатки каждой из них, а также наличие тесных связей между ними.

## 1.0. Введение. «Мусор прошлого часто оказывается сокровищем настоящего (и наоборот)»

*«У нас нет лучшего средства для описания элементарных частиц, чем квантовая теория поля. Квантовое поле - это ансамбль бесконечного числа взаимодействующих гармонических осцилляторов...*

*Все это очень в духе XIX столетия, когда люди пытались строить механические модели всех явлений. Я не вижу в этом ничего плохого, поскольку любая нетривиальная идея в определенном смысле верна. Мусор прошлого часто оказывается сокровищем настоящего (и наоборот). Поэтому мы будем смело прибегать к различным аналогиям при обсуждении наших основных проблем»...*

*Имеющиеся в природе элементарные частицы очень похожи по своим свойствам на возбуждения некоторой сложно устроенной среды (эфира). Мы не знаем детальной структуры эфира, но мы выяснили многое об эффективных лагранжианах для их низкоэнергетических возбуждений».*

А.М. Поляков. Калибровочные поля и струны, 1987 (перевод 1999 г.)

Почему мы начали с этой цитаты, и какое отношение имеет к теории генерации масс элементарных частиц эфир, о котором говорит известный современный физик А. Поляков, и физический вакуум (ФВ), который он подразумевает?

До последнего времени были разработаны две теории генерации масс элементарных частиц. Одна была создана в рамках классической физики в 19-м веке, а другая – в рамках Стандартной Модели во второй половине 20-го века. первая теория тесно связана с, так называемым, электромагнитным эфиром (ЭМЭ), а вторая теория связана с, так называемым, физическим вакуумом Хиггса. Вопрос о происхождении масс элементарных частиц в этих теориях полностью не решен и продолжает быть актуальным. Но анализ показывает их близость.

В то же время, теория происхождения массы, предлагаемая в рамках нелинейной теории элементарных частиц (НТЭЧ), имеет тесные связи, как с первой, так и со второй теорией. Поэтому анализ существующих теорий генерации масс является полезным не только сам по себе, но и для дальнейшего развития этой темы в рамках нелинейной теории.

Для того, чтобы убедиться в том, что «Мусор прошлого часто оказывается сокровищем настоящего, и наоборот», мы сравним картины описания возникновения массы в классической физике и в современной, добавив к этому те выводы, которые следуют из НТЭЧ. Разумеется, при этом нужно учесть, что язык науки, как вообще язык человека, непрерывно меняется. Поэтому многие старые понятия мы сегодня называем по-новому. Пример, который приводит А. Поляков, о том, что прежний «эфир» очень мало отличается от современного физического вакуума, является одним из многих.

Судя по цитате, А. Поляков имеет в виду электромагнитный эфир, уравнениями которого в классической физике являются уравнения Максвелла без зарядов и токов (Lorentz, 1953 ; Bateman, 1915; etc). Такой эфир порождает преобразования Лорентца и по праву может называться «релятивистским эфиром». По указанной причине существование электромагнитного эфира не противоречит СТО, так как не может служить абсолютной системой отсчета.

С другой стороны, в физику (первоначально в рамках квантовой электромагнитной теории) для объяснения возникновения и поглощения фотонов была введена особая среда - физический вакуум. Дальнейшее использование этих идей в отношении всех других квантовых полей (элементарных частиц) было произведено по аналогии с этим случаем. Понятно, что ФВ является аналогом электромагнитного эфира, поскольку и та и другая среда предназначены для генерации материальных полей. (Разумеется, между физическим вакуумом и электромагнитным эфиром существует понятное различие, заключающееся в квантовании. Понятие ЭМЭ возникло в то время, когда принцип квантования электромагнитного излучения Планка еще не был высказан. Вместе с тем, нетрудно исправить это различие, вводя квантование ЭМ поля согласно соотношению Планка  $\varepsilon = \hbar\omega$ ).

Учитывая, что современные уравнения поля – уравнения Янга-Миллса – являются нелинейным обобщением теории Максвелла, произведенное далее сравнение позволяет утверждать, что проквантованный электромагнитный эфир незначительно отличается от физического вакуума современной Стандартной Модели.

Учитывая сказанное выше, нетрудно видеть множество параллелей между результатами классической физики и современной. Разумеется, мы знаем намного больше, чем знали физики 19-го века, и даже, чем физики первой половины 20-го века. Тем не менее, относиться с высокомерным пренебрежением к их достижениям было бы самонадеянно. В этом «мусоре» прошлого действительно немало блестящих идей, которые, фактически, были использованы и используются до сих пор для развития современной физики. К сожалению: *«Новые течения мысли в последние пятьдесят лет, сами по себе великие, важнейшие и неизбежные, обычно переоцениваются в сравнении с интеллектуальными достижениями прошедшего столетия. Это обусловленное временной перспективой непропорциональное преуменьшение предыдущих достижений, от которого зависит вся наша нынешняя просвещенность, доходит до нелепости по мере дальнейшего углубления в прошлое. Наряду с таким неуважением к историческим узам существует и тенденция забывать, что все естественные науки связаны с общечеловеческой культурой... Очень многие из наших образованных современников, не обладающие, однако, достаточным математическим уровнем для того, чтобы следить за тонкостями математической техники, все же проявляют глубокую заинтересованность во многих вопросах общего характера... Мы должны позаботиться о том, чтобы не затемнять и не искажать... проблемы... Наука представляет ценность только в рамках своего культурного окружения»* (из статьи 1952 г. в сб. (Шредингер, 1976)).

Для сравнения тех и других идей в частном вопросе происхождения массы, мы воспользуемся краткими цитатами из книг и статей той и другой стороны, сопроводив их небольшими комментариями. С дополнительными сведениями по затронутым вопросам подробнее можно познакомиться по книгам и публикациям в Интернете, указанным в библиографии к статье.

## **2.0. Физический вакуум квантовой теории поля и электромагнитный эфир**

Рассмотрим кратко основания для отождествления современного физического вакуума (ФВ) и электромагнитного эфира (ЭМЭ), которые имеет в виду А. Поляков. Действительно ли различия между ними несущественны?

К сожалению, наблюдать эфир или физический вакуум очень сложно по той причине, что они являются нижайшим энергетическим уровнем существования материи. Обладая минимумом энергии, это форма материи взаимодействует с обычной материей очень слабо, а законы их взаимодействия, фактически, гипотетичны. Экспериментальные результаты, которые можно использовать для подтверждения или отрицания каких-либо представлений о ФВ и ЭМЭ, косвенны и очень немногочисленны. Поэтому о реальной структуре и характеристиках этих объектов мы знаем очень мало. Учитывая эти замечания, перейдем к сопоставлению ФВ и ЭМЭ.

## 2.1. Физический вакуум

Существуют несколько способов введения ФВ, которые описаны во многих книгах.

Воспользуемся популярным изложением этого вопроса (Мартыненко, 2001).

«Рассмотрим электромагнитное (ЭМ) поле в пространстве  $\tau$  без зарядов. Энергия ЭМ поля, заключенного в этом пространстве

$$\varepsilon = \frac{1}{8\pi} \int_{\tau} (\vec{E}^2 + \vec{H}^2) d\tau, \quad (2.1)$$

где напряженности ЭМ поля  $\vec{E}, \vec{H}$  можно выразить через векторный потенциал  $\vec{A}$ :

$$\vec{E} = -\frac{1}{c} \frac{\partial \vec{A}}{\partial t} = -\frac{1}{c} \dot{\vec{A}}, \quad \vec{H} = \text{rot } \vec{A}, \quad (2.2)$$

Раскладывая векторный потенциал по плоским волнам

$$\vec{A} = \sum_k (\vec{A}_k e^{i\vec{k}\vec{r}} + \vec{A}_k^* e^{-i\vec{k}\vec{r}}), \quad (2.3)$$

(суммирование производится по волновому вектору  $\vec{k}$ , принимая  $\tau = 1$ ), для энергии ЭМ поля получаем следующее выражение:

$$\varepsilon = \sum_k \left( \frac{|\dot{\vec{A}}_k|^2}{8\pi c^2} + \frac{\vec{k}^2 |\vec{A}_k|^2}{8\pi} \right), \quad (2.4)$$

Таким образом, полная энергия ЭМ поля представима как сумма энергий гармонических осцилляторов. Величина  $\vec{A}_k$  играет здесь роль координаты,  $\dot{\vec{A}}_k$  - скорости,  $\frac{1}{4\pi c^2}$  -

массы гармонического осциллятора. Частота осциллятора  $\omega_k = \sqrt{\frac{\beta}{m}} = ck \left( \beta = \frac{k^2}{4\pi} \right)$ .

Первое слагаемое в (4) представляет собой кинетическую энергию электромагнитного поля, а второе - потенциальную.

Итак, ЭМ поля в пространстве без зарядов можно рассматривать как совокупность независимых гармонических осцилляторов со всеми возможными значениями волнового вектора  $\vec{k}$ . Применим теперь законы квантовой механики к рассматриваемой системе. В квантовой механике осциллятор может находиться только в состояниях с дискретными значениями энергии:

$$\varepsilon = \sum_k \left( n_k + \frac{1}{2} \right) \hbar \omega_k, \quad (2.5)$$

где  $n_k$  - число квантов ЭМ поля (фотонов) с волновым вектором  $\vec{k}$ . Основное (вакуумное) состояние ЭМ поля характеризуется отсутствием реальных фотонов  $n_k = 0$ . При этом энергия ЭМ поля оказывается бесконечно большой величиной:

$$\varepsilon_0 = \frac{\hbar}{2} \sum_k \omega_k, \quad (2.6)$$

В квантовой теории поля все наблюдаемые энергии отсчитываются от энергии вакуума  $\varepsilon_0$ , что на практике сводится к вычитанию  $\varepsilon_0$  из всех рассматриваемых величин. В частности, для вакуума ЭМ поля наблюдаемая энергия равна 0. Средние значения электрического и магнитного полей в вакуумном состоянии равны 0, но средние значения от квадратов этих величин отличны от нуля, что приводит к наблюдаемым на эксперименте следствиям. Это означает, что ЭМ поля в вакууме колеблется. Эти колебания и называют нулевыми колебаниями ЭМ поля.

Все сказанное свидетельствует в пользу вывода квантовой теории о том, что вакуум следует понимать как поле в одном из его состояний, то есть как некоторую материальную систему». (конец цитирования)

Остается добавить, что на таком представлении была построена теория вторичного квантования – квантовая теория поля, которая описывает единообразным способом рождение и уничтожение частиц. К сожалению, в учебниках и статьях встречается утверждение, что только описанным выше способом можно последовательно эти преобразования частиц. Это не так. Расчеты могут быть произведены и другими методами. К тому же, несмотря на математические достоинства, основания этого метода не являются последовательным.

Действительно, способ введения ФВ не является последовательным доказательством существования ФВ, а представляет собой более или менее разумным предположением о его существовании. В чем заключается процедура введения ФВ? ЭМ поле, представленное в виде ЭМ потенциалов, раскладывается в ряд Фурье по гармоникам и приводится к виду, в котором появляются члены, математически **подобные**, или, правильнее сказать, **похожие** на члены, описывающие энергию механического осциллятора. По сути дела, мы здесь приписываем электромагнитным потенциалам механические свойства. На этом основании, в дальнейшем с ЭМ полем обращаются как с совокупностью ЭМ осцилляторов.

Поскольку волновые поля любых частиц можно разложить в экспоненциальные суммы Фурье, это предположение было расширено, и был введен физический вакуум для всех частиц. Построенный математически аппарат оказался удачным, но вопрос о том, почему он работает, остался нерешенным.

Обратим внимание на то, что от напряженностей ЭМ полей уравнения (1) посредством соотношений (2) мы перешли к потенциалам. Это привело к тому, что форма волновой функции в виде потенциала утвердилась в теории поля как преимущественная. На самом деле примерно те же самые рассуждения можно произвести, пользуясь напряженностями полей (см., например, (Гольдштейн и Зернов, 1971))

Не углубляясь в эту проблему, вернемся к утверждению Полякова.

Во-первых, понятно, что ФВ служит в квантовой теории поля некоторой универсальной средой, которая порождает и в которой существуют элементарные частицы. Но именно так мыслился и электромагнитный эфир в классической теории.

Во-вторых, обратим внимание на то, что физический вакуум отождествляется именно с механической системой, и конкретно, с системой механических осцилляторов. Таким образом, здесь Поляков прав: универсальная среда может быть описана как чисто механическая система. Но и электромагнитный эфир (см. следующий параграф) можно представить в таком же виде.

В-третьих, эфир-вакуум Полякова не противоречит СТО: он не может быть абсолютной системой отсчета, иначе он не мог бы быть основой построения релятивистской теории – квантовой теории поля. Таким же свойством обладает и электромагнитный эфир, как мы убедимся ниже на основании математического анализа.

## 2.2. Электромагнитный эфир

Рассмотрим вкратце, что мы знаем об ЭМЭ. Конечно, можно повторить предыдущие рассуждения и ввести ЭМЭ тем же методом, что указан выше. Это полностью подтвердит слова Полякова. Но в рамках классической электродинамики имеется принципиальная трудность, которая делает этот способ совершенно нелогичным.

Со времен Максвелла считалось, что существование в природе уравнений, описывающих электромагнитное поле, является следствием существования некоторой среды - ЭМЭ, движения которой описываются уравнениями Максвелла. Пытаясь описать эфир на основе уравнений Максвелла, мы меняем местами причину и следствие: среда должна порождать уравнения, а не наоборот. Здесь нельзя ставить вопрос о выводе уравнений ЭМЭ из электродинамики Максвелла. Мы должны сначала описать среду - ЭМЭ, и на этом основании вывести уравнения Максвелла, как уравнения его движения. Именно это пытались сделать физики классической эпохи на протяжении 19-го века.

Но из уравнений Максвелла следует, что структура ЭМ поля очень сложна: здесь и вращения полей, взаимная перпендикулярность векторов поля, разнообразная поляризация и мн. др.. Среда, которой они должны удовлетворять, не существует среди всех известных нам классических сплошных сред (газ, жидкость, плазма, электролит, кристалл и т.п.). Поэтому подобрать среду, в которой могут «существовать» уравнения Максвелла, в то время не удалось. Наиболее подходящей оказалась гипотетическая **среда с вращательной упругостью**, предложенная МакКуллахом и затем конкретизированная Вильямом Томсоном (лордом Кельвином). Уравнения движения этой среды были тождественны уравнениям Максвелла. Но работы в этом направлении были остановлены после возникновения КМ. Поэтому до сегодняшнего дня у нас нет законченной теории среды, поддерживающей ЭМ волны и поля.

Одной из последних работ в этой области была книга Оливера Лоджа (Лодж, 1911), из которой мы позаимствовали цитаты, подводящие итоги этих поисков:

*«Вопрос о строении эфира и о том, как изменяются его части для образования атомов или других составных единиц обыкновенной материи еще не решен... Но вместе с тем не много существует физиков, которые были бы несогласны с мыслью Клерка Максвелла:*

*"Какие бы трудности нам не встретились при выработке подходящей идеи о строении эфира, все же нет никаких сомнений в том, что межпланетные и межзвездные пространства не пусты, а заняты материальным веществом или телом - без сомнения, наиболее громадным и, вероятно, наиболее однородным из всех тел, о которых у нас есть какие-либо сведения".*

*Возникает вопрос: как это возможно, чтобы материя состояла из эфира? Возможно ли, чтобы твердое тело было сделано из жидкости? Ответ состоит в том, что эти свойства может воспроизвести жидкость в движении; мы утверждаем это на основании результатов большей части трудов лорда Кельвина. Вихревое кольцо, выброшенное из эллиптического отверстия колеблется около устойчивой круговой формы совершенно так, как колебалось бы кольцо из резины...*

*Дальнейшим примером может быть модель пружинных весов, сделанная лордом Кельвином исключительно из не изменяющих своей формы твердых тел приведенных во вращательное движение. Приспособление это использует прецессионное движение уравновешенных гироскопов; они спрятаны в ящике и поддерживают книгу, имитируя таким образом действие спиральной пружины...*

*Заключение. В настоящей книге проводится мысль, что мировой эфир есть непрерывное, несжимаемое, недвижимое основное вещество или совершенная жидкость, обладающая свойством, эквивалентным коэффициенту инерции  $10^{12}$  г/см<sup>3</sup>; что материя составлена из ... мелких эфирных образований....; и что упругая твердость эфира и всякая потенциальная энергия происходят от чрезвычайно мелко раздробленной циркуляции в эфире, с внутренней кинетической энергией порядка  $10^{33}$  эрг/см<sup>3</sup>....*

Электрон, по предположению, состоит просто и исключительно из эфира, отсюда вытекает, что электрон не может представлять собой ни сгущения, ни разрежения эфира, а должен быть некоторой особенностью эфира. Возможно, например, что он представляет собой нечто аналогичное вихревому кольцу, отличаясь от остального эфира в кинетическом отношении, т.е. в силу своего вращательного движения, являясь центром натяжения или местом, где произошла деформация кручения.

Три взаимно-перпендикулярных вектора -  $E$ ,  $H$  и  $V$  - изображают собою самое основное соотношение между эфиром и материей и образуют связь между электричеством, магнетизмом и механикой».

Из этого отрывка нетрудно видеть, что среда, предлагаемая Кельвином и др. в качестве ЭМЭ, действительно состоит из несвязанных осцилляторов: вращающиеся элементы этой среды можно описать гармониками, которые можно считать механическими. Конечно, тут же возникает вопрос: не противоречит ли существование такой среды СТО Эйнштейна? Уже учеными 19-го века было показано, что существование такой среды не противоречит ни самой теории, ни любым следствиям из нее (Дж.Дж. Томсон, Г. А. Лорентц, Лармор и др.) Воспользуемся известными курсами истории физики (Кудрявцев, 1971) Спасский, 1977), чтобы кратко изложить основания для этого утверждения (см., в частности, главу «Электродинамика движущихся сред и электронная теория» Кудрявцева):

«В историю физики Лоренц вошел как создатель электронной теории, в которой синтезировал идеи теории поля и атомистики..

В 1892 г. Лоренц выступил с большой работой «Электромагнитная теория Максвелла и ее приложение к движущимся телам». В этой работе уже намечены основные контуры электронной теории. Мир состоит из вещества и эфира, причем Лоренц называет веществом «все то, что может принимать участие в электрических токах, электрических смещениях и электромагнитных движениях». «Все весомые тела состоят из множества положительно и отрицательно заряженных частиц, и электрические явления порождаются смещением этих частиц».

Однако об опыте Майкельсона и Морли Лоренц здесь ничего не говорит. Этому опыту он посвящает опубликованную в том же, 1892 г. заметку «Относительное движение Земли и эфира». В ней он описывает единственный, по его мнению, способ согласовать результат опыта с теорией Френеля, т. е. с теорией неподвижного эфира. Этот способ состоит в предположении, что линия, соединяющая две точки твердого тела, если она сначала была параллельна движению Земли, не сохраняет ту же самую длину, когда она затем поворачивается на  $90^\circ$ .

В своей статье Лоренц указывает, что его гипотеза не является невероятной и молекулярные силы, если они сводятся к электрическим, изменяются при движении тела через эфир так, что опыт Майкельсона становится объяснимым. Хотя Лоренц и понимает, что сведение молекулярных сил к электрическим является «чересчур смелым», он все же сохраняет гипотезу сокращения (далее мы остановимся на доказательстве этой гипотезы – А.К.).

Это очень существенный факт с исторической точки зрения. Если принять, что основной силой природы является сила Лоренца, к которой, за исключением тяготения, сводятся все известные в то время взаимодействия частиц, то вполне объяснимо сокращение размеров тел при движении, а тем самым и отрицательный результат опыта Майкельсона. Релятивистское изменение масштабов

$$l = l_0 \sqrt{1 - \beta^2},$$

где  $\beta = v/c$ , в теории Лоренца является следствием определенных физических предпосылок.

Заметим, что электродинамика дала и другой релятивистский результат: зависимость массы и энергии. Этот результат был получен в 1881 г. двадцатипятилетним Джозефом Джоном Томсоном (1856 - 1940) и опубликован в апреле

1881 г. в статье «Об электрическом и магнитном эффекте, обусловленном движением наэлектризованных тел».

Итак, в конце XIX в. были получены важнейшие результаты специальной теории относительности: сокращение длин, зависимость массы от скорости, связь массы и энергии (с точностью до постоянного множителя), предельное значение скорости света. Но эти результаты были получены в предположении электромагнитной картины мира. Мир — это эфир, в котором плавают заряженные частицы. Законы мира: законы электродинамики Максвелла и механики Ньютона.

В 1895 г. вышла фундаментальная работа Лоренца «Опыт теории электрических и оптических явлений в движущихся телах». В этой работе Лоренц дает систематическое изложение своей электронной теории. «Я принимаю, — пишет Лоренц, — что во всех телах находятся маленькие заряженные электричеством материальные частицы и что все электрические процессы основаны на конфигурации и движении этих «ионов».

Другое предположение Лоренца заключается в том, что эфир не принимает участия в движении этих частиц и, следовательно, материальных тел, он неподвижен. Эту гипотезу Лоренц возводит к Френелю. Лоренц подчеркивает, однако, что речь идет не об абсолютном покое эфира, такое выражение он считает бессмысленным, а о том, что части эфира покоятся друг относительно друга и что все действительные движения небесных тел являются движениями относительно эфира...

В вышедшей в 1900 г. книге «Эфир и материя» Лармор, так же как и Лоренц, рассматривает взаимоотношение материи и эфира. Так же как и у Лоренца, частицы материи у него «электрифицированы» и связь материальных частиц через эфир осуществляется электромагнитными силами. Но Лармор считает частицы материи особенностями в эфире, имеющими специфическую структуру. Ядро этого особого образования может двигаться в эфире, оставляя самый эфир неподвижным. Вместе с этим ядром движется и создаваемое им напряжение, характеризуемое вектором с компонентами  $f$ ,  $g$ ,  $h$ . Этот вектор не что иное, как вектор напряженности электрического поля. Другая особенность в эфире имеет вращательный характер и порождает вихревое поле, характеризуемое вектором с компонентами  $a$ ,  $b$ ,  $c$ , который представляет собой не что иное, как вектор магнитной индукции. Связь между обоими полями выражается уравнениями Максвелла. Лармор показывает, что форма этих уравнений остается неизменной и для движущейся системы, если связь между координатами движущейся и неподвижной систем определяется уравнениями:

$$x' = \frac{x - vt}{\sqrt{1 - \beta^2}}, \quad y' = y, \quad z' = z, \quad t' = \frac{t - \frac{v}{c^2}x}{\sqrt{1 - \beta^2}},$$

$$\beta = \frac{v}{c}.$$

Так в истории физики появляются преобразования, названные преобразованиями Лоренца. Лоренц их написал в 1904 г. и притом еще не совсем правильно. Лармор написал их именно в том виде, в котором они сегодня употребляются в специальной теории относительности.

Таким образом, Лармор полностью решил проблему электродинамики движущихся сред и объяснил все оптические эффекты: аберрацию, опыт Физо, опыт Майкельсона. Он, так же как и Лоренц, приходит к выводу, что движение материальной системы через эфир изменяет незначительно ее размеры...

Лоренц в 1904 г. выступил с основополагающей статьей «Электромагнитные явления в системе, движущейся со скоростью, меньшей скорости света». В своей работе Лоренц делает ряд допущений. Важнейшими из них, кроме гипотезы неподвижного эфира, являются следующие: гипотеза об уравнениях преобразования координат и времени, гипотеза о деформации электрона. Лоренц считал, что неподвижный электрон имеет форму равномерно заряженной сферы, при движении же электрона «размеры в

*направлении движения уменьшаются в  $kl$  раз, а размеры в перпендикулярном движению направлении — в  $l$  раз». Далее Лоренц считает, что силы, действующие между независимыми частицами, «подвергаются изменению точно таким же образом, как электрические силы электростатической системы». Отсюда получается сокращение Лоренца— Фицджеральда и объяснение опыта Майкельсона.*

*Движущийся электрон будет обладать инерцией. «В процессах, при которых возникает ускорение в направлении движения, электрон ведет себя так, как будто он имеет массу  $m_{1,2}$  а при ускорении в направлении, перпендикулярном к движению, так, как будто он обладает массой  $m_2$ . Величинам  $m_1$ , и  $m_2$  поэтому удобно дать название «продольной» и «поперечной» электромагнитной масс. Я полагаю, что, кроме этой, нет никакой «действительной» или «материальной» массы». Итак, масса, ньютоновское количество материи, стала электромагнитной, зависящей от скорости».*

Почему Лоренц, Лармор и др. говорят о допущениях и гипотезах там, где математические формулы показывали явно наличие соответствующих эффектов? Дело в том, что у них в то время не было экспериментальных доказательств того, что описанные математическими формулами явления реально наблюдаются в природе. Более того, у них не было доказательства основного допущения (гипотезы), лежащего в основе электронной теории, о том, что вся материя в природе является проявлением электромагнитного поля.

Можно ли в настоящее время обосновать или опровергнуть эти допущения экспериментально? Оказалось, что большинство эффектов (как сокращение длин, увеличение промежутков времени, деформация полей электрона, связь энергии с массой, изменение массы со скоростью, и т.д.) наблюдаются в эксперименте. Их можно трактовать просто как кинетические эффекты, возникающие благодаря относительному движению, но можно считать динамическими эффектами, присущими движущейся материи.

Более того, гипотеза Лоренца о том, что «*силы, действующие между независимыми частицами, «подвергаются изменению точно таким же образом, как электрические силы электростатической системы», являются сегодня доказанными. Другими словами, доказано, что все взаимодействия, связывающие атомы и молекулы в материальные тела, являются электромагнитными: (Готтфрид и Вайскопф, 1988; стр. 47): «Мы убеждены в том, что все межатомные и межмолекулярные силы, ...являются проявлениями электромагнитных взаимодействий между составными частями атомов, и среди них определяющую роль играет электростатическое притяжение или отталкивание (кулоновская сила). Поскольку почти все природные явления, с которыми мы сталкиваемся в наших земных условиях, обусловлены взаимодействиями атомов, можно заключить, что все эти явления представляют собой следствие электромагнитного взаимодействия ядер и электронов и объясняются квантовой механикой».*

Это означает, что противоречий между электромагнитной теорией материи Лоренца и СТО Эйнштейна нет. В теории Лоренца эфир является одной из инерциальных систем отсчета, которая не может быть выделена никакими экспериментами. В этом эфире происходят все те же эффекты, которые имеют место в СТО.

А. Эйнштейн (Эйнштейн, 1965) в своей речи «Эфир и «теория относительности» произнесенная 5 мая 1920 г. в Лейденском университете, подчеркивал предпосылки, при которых существование электромагнитного эфира не противоречит специальной теории относительности (мы, по понятной причине, приводим только ряд соответствующих цитат, отсылая читателя к полной статье)

*«В этом вопросе можно встать на следующую точку зрения. Эфира вообще не существует...*

*Между тем ближайшее рассмотрение показывает, что специальная теория относительности не требует безусловного отрицания эфира.*

*Специальная теория относительности запрещает считать эфир состоящим из частиц, поведение которых во времени можно наблюдать, но гипотеза о существовании*



*эфира не противоречит специальной теории относительности. Не следует только приписывать эфиру состояние движения...*

*Электромагнитное поле является первичной, ни к чему не сводимой реальностью, и поэтому совершенно излишне постулировать еще и существование однородного изотропного эфира и представлять себе поле как состояние этого эфира. С другой стороны, можно привести некоторый важный аргумент в пользу гипотезы об эфире. Отрицать эфир — это в конечном счете значит принимать, что пустое пространство не имеет никаких физических свойств...*

*Можно сказать еще и так: эфир общей теории относительности мы получаем из эфира Лорентца, релятивизируя последний.*

*...По нашим современным воззрениям, и элементарные частицы материи по своей природе представляют собой не что иное, как сгущения электромагнитного поля...».*

Очевидно, что А. Поляков понимает, указанный им эфир полностью удовлетворяет требованиям Эйнштейна.

В чем причина того, что эфир проявляет себя как обычная инерциальная система отсчета, является интересным вопросом. На него можно ответить так: если бы природа «выделила» эфир как особую систему, то законы сохранения в эфире были бы другими, чем в остальных инерциальных системах отсчета. Другими словами, в этом случае существовали бы две физики с различными законами: одна для эфира, а другая – для остального мира.

Гипотеза Лорентца-Лармора о том, что «частицы материи «электрифицированы» и связь материальных частиц через эфир осуществляется электромагнитными силами», и являются «особенностями в эфире, имеющими специфическую структуру; ядро этого особого образования может двигаться в эфире, оставляя самый эфир неподвижным», также не может вызвать возражений с точки зрения современной физики. Согласно Стандартной Модели элементарные частицы описываются теорией Янга-Миллса – нелинейной электромагнитной теорией, а, следовательно, являются электромагнитными частицами. Волновыми решениями нелинейных уравнений являются солитоны, которые способны передвигаться в неподвижной сплошной среде, как особые образования, не вызывающие движения этой среды.

Таким образом, слова А. Полякова о том, «Мусор прошлого часто оказывается сокровищем настоящего (и наоборот)» имеют глубокое основание: вышеприведенный анализ убеждает в том, что «Имеющиеся в природе элементарные частицы очень похожи по своим свойствам на возбуждения некоторой сложно устроенной среды (эфира).»

Как отмечает Кудрявцев (Кудрявцев, 1971), в рамках этих представлений была создана также теория происхождения и генерации массы. Пользуясь известными литературными источниками, мы рассмотрим механизм Томсона-Лорентца генерации масс. Затем кратко представим читателю особенности механизма Хиггса генерации масс элементарных частиц. Их сравнению мы посвятим следующий раздел. Последний раздел будет посвящен изложению теории генерации массы элементарных частиц в НТЭЧ.

### **3.0. Теория генерации массы в классической физике**

Масса была введена и используется в физике в качестве двух сущностей: 1) как мера инерции тел, и 2) как мера тяжести (притяжения) тел. Как мера инерции масса тела входит во второй закон Ньютона в качестве коэффициента при скорости в выражении механического импульса, в качестве меры тяжести масса входит в закон тяготения Ньютона. Причем опыты показали, что законы движения и гравитационного притяжения тел можно сформулировать так, что эти массы совпадают.

До возникновения теории электромагнитного поля масса воспринималась как экспериментальная характеристика тел, пока в 1881 г. Дж. Дж. Томсон не высказал гипотезу о том, что инертность заряженных тел объясняется их торможением в магнитном поле, которое они же сами создают при своем движении. Он же нашёл, что она зависит от

скорости. В 1889 г. понятие электромагнитной массы анализировал О. Хевисайд, затем М. Абрагам (1902 г.) и Лорентц.

Во-первых, было показано, что в выражении для импульса электромагнитного поля появляется величина, равнозначная массе. Во-вторых, было показано, что энергия электромагнитного поля также выражается через эту массу. Первоначальные выражения содержали неверные численные коэффициенты, поскольку не были полностью учтены требования инвариантности относительно преобразований Лорентца. Полученные позже в СТО Эйнштейна выражения для связи импульса и энергии с массой оказались теми же самими, но с правильными коэффициентами. Позже (Jackson, 1965) неточности в вычислениях электромагнитной массы Лорентцом и др. были исправлены Э. Ферми и др. (Fermi, 1922; Kwal, 1949; Wilson, 1936; Рорлих, 1960). Таким образом, никаких противоречий с СТО больше не существовало. Но идея электромагнитной массы в дальнейшем перестала пользоваться вниманием ученых в связи с тем, что электромагнитное поле перестали считать единым фундаментальным полем.

Отчасти это произошло из-за объективных трудностей. В 1932 г. было обнаружено существование нейтральных частиц - нейтронов, наличие массы ЭМ происхождения в этом случае трудно было объяснить. Но позже было обнаружено, что нейтрон имеет электромагнитную структуру, и это основание уже не может считаться убедительным.

Кроме того, всё больше данных появлялось о том, что элементарные частицы тесно связаны с электромагнитным полем. Тем не менее, многие вопросы так и остались нерешенными. Это дало право Фейнману (Фейнман, Лейтон, Сэндс, 1977) так подытожить этот вопрос:

«Итак, мы снова возвращаемся к первоначальной идее Лорентца, что масса электрона вполне может быть целиком электромагнитной, т.е. все его 0,511 МэВ обусловлены электродинамикой. Так это или нет? У нас нет теории и по сей день, поэтому мы ничего не можем сказать с уверенностью».

Считается также, что причина неудач применения такого «классического» взгляда к микромиру была найдена Гейзенбергом в 1925 г. Эта причина заключается в том, что, пользуясь классическим способом описания явлений, мы неминуемо должны высказываться о явлениях, происходящих внутри атома или электрона, такие утверждения, которые принципиально недоступны экспериментальной проверке. Речь идет о том, что элементарные частицы подчиняются принципу неопределенности.

В настоящее время, по-видимому, эта причина не может рассматриваться как основание для отделения классической физики от квантовой физики микромира. Уже в начальный период развития квантовой механики стало понятно, что все объекты микромира – элементарные частицы – являются своеобразными компактными волнами, для которых в первом приближении справедливо представление в виде классических волновых пакетов. Как известно, соотношения неопределенности справедливы для пакетов любых волн – электромагнитных, звуковых и всех прочих. Если раньше еще можно было сослаться на то, что пакеты, представляющие элементарные частицы, расплываются, то после создания теории Янга-Миллса, это довод тоже не может считаться решающим. Согласно этой теории, элементарные частицы можно представлять единичными волнами - солитонами, т.е. условно говоря, пакетами волн, которые не расплываются.

Таким образом, с точки зрения современной квантовой теории поля основные различия между классической и квантовой теорией заключаются в двух вещах: в нелинейности уравнений поля и квантовании характеристик элементарных частиц.

Следует помнить, что предметом классической электродинамики 19-века была только одна частица - электрон (другие частицы еще не были открыты). Но в силу сказанного, закономерности, справедливые для электрона должны могут быть распространены и на другие элементарные частицы.

Отметим также, что современная электромагнитная теория осталась совершенно той же, что была во времена Дж.Дж. Томсона и Г.А. Лорентца. Чтобы убедиться в этом,

достаточно сравнить содержание статей Томсона и книг того времени с современными учебниками; см., например, (Парселл, 1975; Глава 5. «Поля движущихся зарядов»). Поэтому «электромагнитные выражения» суть те же самые «релятивистские выражения», поскольку они инвариантны преобразованиям Лорентца. Другими словами, любая масса ведет себя также, как электромагнитная масса Томсона-Лорентца.

Далее мы не будем приводить подробные выкладки, а только проанализируем схемы вычислений.

## 4.0. Механизм Томсона-Лорентца возникновения массы

### 4.1. Импульс и энергия ЭМ поля

Вопрос об электромагнитной массе электрона был рассмотрен с различных точек зрения и с использованием различного математического аппарата. Поскольку все они приводят к одним и тем же результатам, мы рассмотрим только один из подходов (рекомендуемые книги: Лорентц, 1953; Беккер, 1936; Джексон, 1965)

Сравнивая эти представления с современными представлениями, мы не найдем существенных отличий, за исключением указанных выше нелинейности и квантования.

Математической основой электронной теории являются уравнения ЭМ поля Максвелла-Лорентца и уравнение для силы Лорентца (в связи с этим электромагнитный эфир, а также все материальные частицы полностью подчиняются преобразованиям Лорентца, что означает, что они не противоречат теории относительности). Речь идет о следующих четырех дифференциальных уравнениях для сплошных ЭМ сред, которые могут быть записаны кратко в векторной форме (Бредов, 1985; Джексон, 1965; Беккер, 1936):

$$\operatorname{rot}\vec{H} = \frac{4\pi}{c}\vec{j} + \frac{1}{c}\frac{\partial \vec{E}}{\partial t}, \quad (4.1)$$

$$\operatorname{rot}\vec{E} = -\frac{1}{c}\frac{\partial \vec{H}}{\partial t}, \quad (4.2)$$

$$\operatorname{div}\vec{E} = 4\pi\rho, \quad (4.3)$$

$$\operatorname{div}\vec{H} = 0, \quad (4.4)$$

Здесь:  $\vec{E}$  и  $\vec{H}$  - вектора напряженности электрического и магнитного микрополей,  $\rho$  - плотность заряда;  $\vec{j} = \rho\vec{v}$  - плотность тока;  $c$  - скорость света). Величины  $j_\mu = \{\vec{j}, i\rho\}$  (где  $\mu = 1,2,3,4$ ), в этих уравнениях являются функциями (точнее, функционалами) напряженностей  $\vec{E}$  и  $\vec{H}$  тех же самых полей, которые эти заряды и токи в значительной степени сами и определяют:  $j_\mu = j_\mu(\vec{E}, \vec{H})$ . При этом, в общем случае, задача сводится к решению нелинейных уравнений для отыскания самосогласованного ЭМ поля.

Плотность силы согласно Лорентцу:

$$\vec{f}_L = \rho\left(\vec{E} + \frac{1}{c}[\vec{E} \times \vec{H}]\right), \quad (4.5)$$

А сила, как понятно, равна интегралу от плотности силы по объему пространства, в котором она действует.

Характеристики ЭМ поля возникают из рассмотрения его механических действий.

Для вывода закона сохранения энергии рассмотрим работу силы (4.5), с которой поле действует на вещество (не забудем, что в электронной теории все вещество состоит из ЭМ поля, зарядов и токов). Работа, произведенная в элементе объема  $d\tau$  за время  $dt$ , равна  $(\vec{f}_L\vec{v})d\tau dt$ . Следовательно, полная работа, совершаемая в секунду в конечном объеме, составляет:

$$W = \iiint (\vec{f}_L \vec{v}) d\tau = \iiint \rho(\vec{E} \vec{v}) d\tau$$

Используя первое уравнение Максвелла-Лорентца для определения  $\rho$ , получим плотность работы, производимой силой Лорентца над зарядами и токами:

$$\rho(\vec{E} \vec{v}) = -\frac{1}{8\pi} (\vec{E}^2 + \vec{H}^2) - \frac{c}{4\pi} [\vec{E} \times \vec{H}]$$

Полная работа в единицу времени равна:

$$W = -\frac{d}{dt} \iiint \frac{1}{8\pi} (\vec{E}^2 + \vec{H}^2) d\tau - \iint \frac{c}{4\pi} [\vec{E} \times \vec{H}] ds,$$

Величины, входящие в эти выражения интерпретируются следующим образом:  $u = \frac{1}{8\pi} (\vec{E}^2 + \vec{H}^2)$  есть плотность энергии ЭМ поля, а  $\vec{S} = \frac{c}{4\pi} [\vec{E} \times \vec{H}]$  есть вектор Пойнтинга; вектор потока энергии, который оказывается взаимно-однозначно связан с импульсом ЭМ поля.

Для вывода закона сохранения импульса вычислим силу действующую на объем  $\tau$ :

$$\vec{F}_L = \iiint \vec{f}_L d\tau$$

Физический смысл вектор  $\vec{F}_L$  состоит в том, что он характеризует изменение количества движения материи в объеме  $\tau$  со временем:

$$\vec{F}_L = \frac{d}{dt} \vec{G}$$

Для вычисления силы подставим в (4.5) вместо  $\rho$  и  $\rho \vec{v}$ , их выражения:

$$\vec{f}_L = \frac{1}{4\pi} \vec{E} \cdot \text{div} \vec{E} + \frac{1}{4\pi} [\text{rot} \vec{H} \times \vec{H}] - \frac{1}{4\pi} \left[ \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} \times \vec{H} \right]$$

Математическое преобразование этого выражения приводит к выражению для каждой компоненты силы:

$$4\pi f_{Lx} = \frac{\partial}{\partial x} (E_x^2 + H_x^2) - \frac{1}{2} (\vec{E}^2 + \vec{H}^2) + \frac{\partial}{\partial y} (E_x E_y + H_x H_y) + \frac{\partial}{\partial z} (E_x E_z + H_x H_z) - \frac{1}{c} \frac{\partial}{\partial t} [\vec{E} \times \vec{H}]_x$$

и т. д. для остальных компонент. Более компактно можно выразить эти выражения, вводя так называемый «максвелловский тензор напряжений»  $T_{ij}$  (поскольку это не улучшает физическое понимание результатов, мы не будем пользоваться здесь этим математическим аппаратом).

В конечном счете, для плотности вектора импульса ЭМ поля можно ввести выражение:

$$\vec{g} = \frac{1}{4\pi c} [\vec{E} \times \vec{H}] = \frac{\vec{S}}{c^2}. \text{ Тогда вектора импульса ЭМ поля: } \vec{G} = \iiint \vec{g} d\tau$$

Соответствующие ЭМ выражения энергии и импульса служат основой для постановки вопроса о массе ЭМ поля и электрона. Но поскольку импульс связан со скоростью перемещения объекта, Лорентц обнаружил, что поля и параметры поля подчиняются преобразованиям Лорентца, которые определяют эту связь. Инвариантные относительно преобразований Лорентца математические выражения характеристик обнаруживают интересные физические свойства. Рассмотрим некоторые из них.

#### 4.2. Связь характеристик электромагнитного поля с движением заряженной частицы

Рассмотрим движение заряда, в частности, электрона, в некоторой неподвижной системе координат. Что происходит при этом с полем электрона? (Памятных, 2001):

«Вводя вектор  $\mathbf{R} = (x - Vt, y, z)$  (рис. 1), направленный от заряда в точку наблюдения и используя преобразования Лорентца для ЭМ поля нетрудно показать, что напряженности поля движущегося заряда (электрона) будут иметь вид:

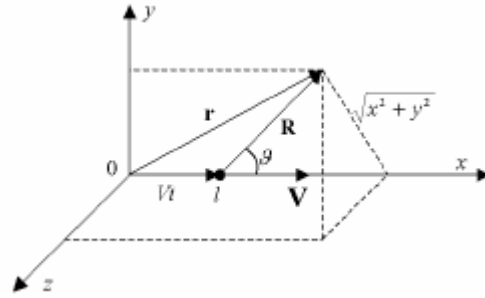


Рис. 1

$$\mathbf{E} = \frac{e\mathbf{R}}{R^3} \frac{1 - V^2/c^2}{(1 - (V^2/c^2)\sin^2\theta)^{3/2}} \quad \mathbf{H} = \frac{1}{c}[\mathbf{V} \times \mathbf{E}]$$

Отсюда следует, что при малых скоростях ( $V \ll c$ ) напряженность электрического поля примерно одинакова по всем направлениям и равна напряженности поля покоящегося заряда:

$$\mathbf{E} = \frac{e\mathbf{R}}{R^3}$$

Кроме того, появляется еще и магнитное поле  $\mathbf{H} = (1/c)[\mathbf{V} \times \mathbf{E}]$ .

При больших скоростях величина напряженности поля начинает зависеть от направления. В частности, вдоль и против направления движения поле  $\mathbf{E}$  уменьшается по сравнению со значением для покоящегося заряда:

$$E_{\parallel} = \frac{e}{R^2} \left(1 - \frac{V^2}{c^2}\right) < \frac{e}{R^2}$$

А в поперечном направлении, наоборот, возрастает:

$$E_{\perp} = \frac{e}{R^2} \frac{1}{\sqrt{1 - (V^2/c^2)}} > \frac{e}{R^2}$$

Таким образом, поле как бы «сплющивается» в направлении движения (рис. 2)

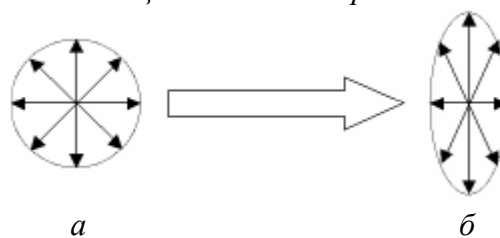


Рис. 2. «Сплющивание» поля движущегося заряда.

Длина стрелок изображает в условных единицах величину напряженности электрического поля в данном направлении.

Очевидно, что любые изменения - деформации - поля электрона можно рассматривать как деформации самого электрона. Благодаря этим деформациям обнаруживается своеобразие поведения электрических тел, и в частности, электрона, при движении их во времени и пространстве.

В таком случае, все тела при движении сжимаются в направлении движения и расширяются в перпендикулярном направлении. Следовательно, таким же изменениям должен подвергаться интерферометр Мейкельсона. Эти изменения были подсчитаны Лорентцем на основании преобразований Лорентца и показали, что отрицательный

результат эксперимента по обнаружению движения относительно эфира объясняется компенсацией длины интерферометра за счет его собственных деформаций.

Этот результат позже был объяснен Эйнштейном в рамках СТО, как следствие относительного движения тел. Математические результаты обеих интерпретаций полностью совпадают. Очевидно, оба объяснения равносильны и не могут служить основанием для отрицания или утверждения о существовании эфира. Это было ясно еще в начале 20 века. Вот что отмечает Эренфест в статье 1913 г. «Кризис в гипотезе о световом эфире», (Сб. переводов, 1972; стр. 19): *"Отрицающая эфир теория Эйнштейна требует того же, что и эфирная теория Лорентца. На этом основании наблюдатель должен по теории Эйнштейна наблюдать на движущихся мимо него мерах длины, часах и пр. те же сокращения, разности ходов и т.п., как и по теории Лорентца. Заметим при этом, что принципиально невозможен такой experimentum crucis, который решил бы спор в пользу той или другой теории"*.

Но из этого следует также, что результат опыта Майкельсона-Морли и ему подобных экспериментов не может быть доказательством отсутствия электромагнитного эфира. Этот и подобные ему эксперименты доказывают только, что движение относительно эфира обнаружить невозможно.

Другой результат оказался связан с происхождением и поведением массы. Как мы видели, изменение полей движущейся частицы оказалось в зависимости от скорости и направления движения. Благодаря этому импульс и энергия электромагнитного поля также обнаружили связь со скоростью, и, как следствие этого, с массой частиц.

#### 4.3. Изменение импульса при движении заряженных тел (Булгаков, 1911)

*«В теории электрона приходится отказаться от простого взгляда на массу, как на постоянную величину, не зависящую от скорости, и надо принять, что  $m$  есть функция от  $v$  и, кроме того, величина  $m$  зависит от направления действующей силы.*

*Положим, что сила имеет одно направление с импульсом (а следовательно, и со скоростью). Тогда она выражается производной  $\frac{dG}{dt}$  по времени. Проекция ускорения по направлению скорости равна  $\frac{dv}{dt}$ ; вместе с тем  $\frac{dG}{dt} = \frac{dG}{dv} \frac{dv}{dt}$ . Величина  $m_s = \frac{dG}{dv}$  носит название продольной массы.*

*Если величина импульса не меняется, а меняется только направление, то надо рассматривать геометрическое приращение импульса  $\Delta G = \alpha G$ , где  $\alpha$  - угол, на который повернулось направление  $G$ . С другой стороны мы знаем. Что ускорение, перпендикулярное к скорости, равно  $\frac{v^2}{\rho}$ , где  $\rho$  - радиус кривизны. Угол  $\alpha$ , на который поворачивается направление касательной в промежуток времени  $\Delta t$ , определяется равенством  $\alpha = \frac{v}{\rho} \Delta t$  (так как  $\rho = \lim \frac{\Delta s}{\alpha}$ , где  $\Delta s = v \Delta t$  - длина дуги).*

*Величина силы в рассматриваемом случае равна  $\frac{\Delta G}{\Delta t}$ . Но  $\Delta G = G \frac{v}{\rho} \Delta t$ . Следовательно,*

*величина силы равна  $G \frac{v}{\rho}$ ; эту величину можно представить в виде произведения*

$$\frac{G}{v} \cdot \frac{v^2}{\rho}.$$

*Множитель  $\frac{G}{v}$  при ускорении  $\frac{v^2}{\rho}$  носит название поперечной массы  $m_r = \frac{G}{v}$ .*

В простейшем случае материальной точки, рассматриваемом в механике, импульс  $G$  выражается произведением  $t\nu$ , где величина  $t$  постоянная. Тогда  $\frac{dG}{d\nu}$  и  $\frac{G}{\nu}$  равны и потому  $m_s = m_r = t$

Не то для электрона: в этом случае импульс  $G$  выражается более сложной функцией от  $\nu$  и продольная масса  $m_s$  не равна поперечной  $m_r$ .

Мы приведем в кратком виде соображения Эйнштейна, приводящие к принципу относительности, и далее к выражению  $G$ , согласно с теорией Лорентца...

Выведем выражение массы электрона, опираясь на принцип относительности. Учитывая, что при  $\nu = 0$   $m_s = m_r = m_0$  получим для продольной массы и для поперечной

$$\text{массы} \quad m_s = \frac{dG}{d\nu} = \frac{m_0}{\left(1 - \frac{\nu^2}{c^2}\right)^{3/2}} \quad \text{и} \quad m_r = \frac{G}{\nu} = \frac{m_0}{\sqrt{1 - \frac{\nu^2}{c^2}}}, \quad \text{соответственно.} \quad \text{Такую форму}$$

имеют выражения массы, выведенные из принципа относительности и согласные с теорией Лорентца».

Еще один вопрос, который был рассмотрен Томсоном и Лорентцем в рамках электромагнитной теории элементарных частиц касался связи массы и энергии: из электромагнитной теории следовало, что энергия электрона определялась его электромагнитной массой. Причем этот вопрос оказался связан с не менее серьезным вопросом об устойчивости электромагнитного электрона, который будет нами рассмотрен при развитии теории электрона).

#### 4.4. Связь массы с энергией и импульсом электрона (Беккер, 1936)

(Стр. 44-49) Воспользуемся нашими приближенными уравнениями для определения количества движения, связанного с движущимся электроном. Согласно общим выводам со всяким электромагнитным полем связана плотность количества движения, которая, на основании (7.8), выражается вектором  $\vec{g} = \frac{1}{4\pi c} [\vec{E} \times \vec{H}]$ .

Строго говоря, в качестве  $\vec{E}$  надо использовать значение поля движущегося заряда, которое даже в случае медленных движений отличается от статического поля добавочными членами, зависящими от скорости. Отсюда видно, что количество движения может быть пропорционально скорости только до тех пор, пока мы пренебрегаем этим изменением электростатического поля.

В случае шаровой симметрии в распределении зарядов в среднем будем иметь:

$$\vec{G}^{(e)} = \frac{4}{3} \frac{\varepsilon_0}{c^2} \vec{v}, \quad (4.5)$$

где  $\varepsilon_0 = \frac{1}{8\pi} \iiint \vec{E}^2 dx dy dz$  есть общая энергия поля покоящегося заряда. (Очевидно,

коэффициент при скорости можно назвать массой тела:  $m = \frac{4}{3} \frac{\varepsilon_0}{c^2}$  - А.К.).

Появление электромагнитного инерционного эффекта у заряженной частички можно легко пояснить следующим образом. Пусть электрон движется с постоянной скоростью. Он несет с собой магнитное поле, силовые линии которого окружают его путь. Результирующая сила, которая действует на электрон во время его движения, равна нулю. Если внезапно затормозить электрон, то при этом торможении магнитное поле, конечно, должно исчезнуть. Но такое исчезновение магнитного поля, согласно закону индукции, вызовет появление электрического поля. Легко убедиться, что вызванное таким образом электрическое поле имеет в точке нахождения электрона такое направление, что оно стремится ускорить тормозящийся электрон. Следовательно, сила

инерции, возникающая при торможении, равнозначна электрической силе  $e\vec{E}$ , где  $\vec{E}$  означает напряжение поля, которое вызывается согласно закону индукции при изменении скорости.

Обычно полагают, что для инертной массы не существует другой первопричины, кроме ЭМ поля, передвигающегося вместе с электроном. Однако следует отчетливо иметь виду, что непосредственного экспериментального подтверждения этого предположения не существует.

Второе замечание относится к специальному виду полученного выражения для инертной массы. Эту массу мы будем называть «массой покоя», так как она относится только к предельному случаю очень медленных (по сравнению со скоростью света) движений. Согласно (4.5), масса покоя, с точностью до численного коэффициента  $4/3$ , равна  $\frac{\varepsilon_0}{c^2}$ . Это выражение уже встречалось нам в § 7 в связи с рассмотрением светового

давления плоской волны. Там этим выражением определялась инертная масса, которую мы должны приписать волне, распространяющейся в определенном направлении. Это основное соотношение между энергией и инертной массой встретится нам в самом общем виде позже, в отделе, посвященном теории относительности.

Причина того, что это последнее соотношение при рассмотрении массы электронов подтвердилось не вполне точно, а только с точностью до численного коэффициента  $4/3$ , заключается в следующем: распределение заряда в присутствии одних только электрических сил вообще не стабильно. Отдельные заряженные электричеством одинакового знака элементы сферы испытывают взаимное отталкивание. Наше распределение зарядов тотчас же разлетелось бы на части, если бы его не удерживали силы другого рода. Роль таких сил могут играть, например, упругие силы, наподобие тех, которые действуют в случае заряженного мыльного пузыря. Поэтому при последовательном рассуждении такие механические напряжения обязательно должны быть приняты во внимание.

(стр. 365) Появление множителя  $4/3$  в формуле приводит также и всякая попытка построить в рамках классической (линейной) физики модель электрона: так как одноименные элементы заряда отталкиваются, то такая модель может быть устойчивой только в том случае, если существуют и другие силы, которые уравновешивают силы отталкивания. Эти силы мы будем описывать так, как будто бы мы имеем дело с механическими напряжениями: по отношению к преобразованию Лорентца они должны вести себя так же, как ЭМ силы, т.е. в движущейся системе они находятся с ними в равновесии, так же как в покоящейся».

Возникновение коэффициента  $4/3$  явно противоречило электромагнитной теории. Поскольку эта теория является релятивистской, то ее результаты должны были совпадать с результатами СТО Эйнштейна, а которой этот коэффициент равен 1. Анализ этого вопроса был произведен рядом известных ученых (Fermi, 1922; Kwal, 1949; Wilson, 1936; Порлих, 1960), которым удалось показать, что коэффициент  $4/3$  появляется из-за некоторой некорректности вычислений Томсона и Лорентца. Итоги этого подхода изложены в книге (Джексон, 1965; Стр. 651 «Ковариантное определение собственной электромагнитной энергии и импульса заряженной частицы») Не излагая вычислений, мы процитируем только идеи подхода (вычислительные подробности см. (Джексон, 1965)).

«В предыдущем рассмотрении имеется один странный момент. Классическая электродинамика является релятивистски ковариантной теорией. Поэтому правомерно ожидать, что при правильном вычислении любой величины требования, инвариантности относительно преобразований Лоренца не будут нарушаться. Тем не менее в модели Абрагама – Лоренца – Пуанкаре, по-видимому, имеется такое нарушение. Нековариантная электромагнитная часть собственной энергии и импульса заряженной частицы уравновешивается в этой модели нековариантной частью, обусловленной натяжениями Пуанкаре, так что результат остается релятивистски ковариантным.



*Можно, конечно, сказать, как и было сделано в § 5, что поскольку для обеспечения стабильной конфигурации ограниченного распределения заряда необходимы удерживающие силы неэлектромагнитного характера и соответствующие собственные поля, то лишь полные силы и натяжения имеют физический смысл. Тем не менее вполне законен вопрос, можно ли так определить чисто электромагнитную часть собственной энергии и импульса частицы, чтобы она была релятивистски ковариантной. Такое определение имело бы не только эстетическую ценность, но отделило бы, по крайней мере формально, вопрос об устойчивости от вопроса об инвариантности относительно преобразований Лоренца».*

#### **4.5. Гипотеза Томсона о причине зависимости массы от скорости**

Наиболее простое объяснение зависимости массы от скорости было дано Дж.Дж. Томсоном. К сожалению, как мы увидим, эта гипотеза до сих пор не проверена экспериментом. Тем не менее, она заслуживает серьезного внимания, поскольку и опровержения ее не существует.

Картина, даваемая Томсоном (Дж. Дж. Томсона «Электричество и материя»), очень проста и понятна. Со времени Фарадея в науку введено понятие о так называемых силовых линиях или силовых трубках. Фарадей приписывал этим линиям, реальное существование. Томсон в 1881 году высказал предположение, что эти линии представляют собой род вихревых нитей в электромагнитном эфире, которые при своем движении увлекают с собой часть окружающего их эфира, из которых в свою очередь они сами состоят.

Отметим, что силовыми линиями пользуются до сих пор для изучения полей и их визуализации. Связь их с потенциалами и напряжениями также известна. А характерное замечание Томсона: «фарадеевская трубка представляет замечательную аналогию с натянутой струной», заставляет вспомнить о попытках обобщения квантовой теории поля в теории струн.

Представим себе не заряженный шар, имеющий массу  $M$ . Для придания ему скорости,  $v$  необходимо затратить энергию  $Mv^2/2$ . Представим теперь, что мы зарядили электричеством тот же шар и снова заставили его двигаться с той же скоростью. Как впервые указал Томсон в 1881 году, нам придется в этом случае затратить больше энергии. В самом деле, движущийся электрический заряд проявляет все действия электрического тока: он будет, например, отклонять магнитные стрелки, мимо которых он пролетает, а на это требуется энергия.

Таким образом, приводя в движение заряженный шарик, мы должны сообщить ему больше энергии, поскольку мы должны одновременно "создавать" электромагнитное поле, обладающее энергией — электромагнитное поле движущегося заряда. Так как скорость будет по предположению та же, что и раньше, а энергия должна быть больше, то вместо  $Mv^2/2$  нам придется написать  $(M + m)v^2/2$ , Вот эта добавочная масса  $m$  и называется электромагнитной массой.

При движении с постоянной скоростью поле частицы не изменяется, а значит, масса остается постоянной. При ускорении частицы ее поле изменяется; благодаря чему меняется и масса. Этот процесс проанализирован Дж.Дж. Томсоном в Главе III. «Результаты ускорения фарадеевских трубок» (Дж. Дж. Томсона «Электричество и материя»).

Как мы видели, теория Максвелла показывает, что масса непостоянна и возрастает со скоростью движения; причем при приближении этой скорости к скорости света, электромагнитная масса растет беспредельно, стремясь к бесконечности.

Кроме того, оказывается, что масса, как мера инерции, зависит от направления приложения силы. Томсон предложил этому следующее объяснение. Если мы хотим ускорить летящий заряженный шар в том же направлении, в котором он движется, нам придется преодолеть инерцию масс  $M + m$ ; если же мы хотим его ускорить под прямым углом к его движению, то дело будет происходить так, как будто нам приходится

преодолевать инерцию не  $M + m$ , а  $M + m'$ , где  $m'$  называется «поперечной» электромагнитной массой, которая меньше "продольной" массы  $m$ .

Томсон предложил этому следующее наглядное объяснение. Проанализировав детально поведение полей, Томсон показал, что чем быстрее будет двигаться заряженный шарик или электрон, тем больше силовых линий соберется в области его экватора EQ (см. рис. 2а и 2б).

Чем быстрее движение, тем гуще в экваториальной области силовые линии, так как в таком положении они оказывают большее сопротивление движению. С другой стороны, чем гуще расположены силовые линии, тем больше вещества каждая из них захватывает с собой из окружающей среды.

Точно так же наглядно объясняется разница между продольной и поперечной массой. Представим себе, что мы сделаем попытку сообщить добавочную скорость в продольном направлении рис. 1б. Нам придется привести в движение гораздо больше вещества окружающей среды, чем, если мы попытаемся продвинуть нашу систему в перпендикулярном направлении, когда силовые линии, скопившиеся в области экватора, должны будут двигаться почти все торцом вперед.

Вопрос об энергии движущегося заряженного тела был также подробно разработан Томсоном. Мы видим, что густота силовых линий определяет количество захватываемой ими среды - эфира, т.е. того, что составляет движущуюся массу; но где гуще линии, там больше электрические силы - там больше энергия самого поля сил. Таким образом, если мы станем на точку зрения электромагнитной теории материи и будем рассматривать энергию положения частиц, составляющих атомы, как энергию электрического поля, то каждому изменению взаимного расположения частиц, сопровождающемуся изменением энергии, будут соответствовать изменения густоты распределения силовых линий, связывающих отдельные заряженные частицы, а отсюда изменяется и масса увлекаемого этим распределением эфира. Поскольку масса связана с энергией-импульсом, а последние, в свою очередь, определяются напряженностями электромагнитного поля, зависимость векторов поля от движения должны определять поведение массы при движении электрона.

Эти гипотезы Томсона не соответствовали, на первый взгляд, полученным впоследствии экспериментальным данным. В частности, существуют, две частицы – протон и нейтрон, поведение которых как-будто не укладывается в описанную картину. Протон является заряженной частицей, а нейтрон – нейтральной частицей, и обе частицы имеют приблизительно одинаковый размер. Тем не менее, их массы почти одинаковы (более того, масса нейтрона больше массы протона).

Но более поздние исследования показали, что объяснение Томсона можно распространить и на этот случай. Было обнаружено, что обе частицы можно считать электромагнитными. Единственное отличие в том, что нейтрон не имеет внешнего ЭМ поля, а протон имеет. Нетрудно показать, что энергия (а значит, и масса) поля вне протона составляет очень небольшую часть всего поля. Поэтому, если принять объяснение Томсона, деформация частиц при движении будет примерно одинаково влиять на поведение, как протона, так и нейтрона в ЭМЭ.

Разумеется, эти гипотезы Томсона не являются доказательством именно такого происхождения массы и ее зависимости от скорости. Но, как ни странно, эта наглядная картина часто используется для объяснения возникновения массы также и в Стандартной Модели.

## 5.0. Механизм Хиггса генерации массы

### 5.1. Введение. Основные принципы

1) Представление о том, что то, что мы обычно чувствуем как пустое место, есть фактически сложная среда, является глубокой и широко распространенной темой в современной физике. Эта невидимая неизбежная среда изменяет поведение материи, которую

мы действительно видим. Хотя понятие нарушающего симметрию эфира было чрезвычайно плодотворно (и было продемонстрировано косвенно разными способами), окончательная демонстрация его законности - очищение среды и восстановление первоначальной симметрии уравнений - никогда не достигались: по крайней мере, возможно, до сих пор...

Но что же такое эта основная симметрия природы, которая нарушается посредством эфира? Как она нарушается, и каким образом может быть восстановлена?

Франк Вилчек. Физика высокой энергии: Пустая пустота?  
Nature 435, 152-153 (12 May 2005)

В настоящее время основной теорией элементарных частиц является теория Стандартной Модели, основанная на уравнениях Янга-Миллса. Теория Янга-Миллса является нелинейным обобщением уравнений Максвелла. Таким образом, статус элементарных частиц, как электромагнитных образований, получил подтверждение. Тем не менее, в СМ масса вводится на основе другого механизма: механизма нарушения калибровочной инвариантности вакуума Хиггса, который нобелевский лауреат Франк Вилчек (см. эпиграф) тоже называет эфиром.

Но этот эфир – вакуум существенно отличается от ЭМС: новый вакуум состоит из очень тяжелых частиц с гипотетической массой порядка 150-160 ГэВ, так называемых, бозонов Хиггса, а также каких-то безмассовых виртуальных частиц – бозонов Гольдстоуна. (поиски всех этих бозонов до сих пор не подтвердили их наличие в природе, но продолжают).

Как хиггсовский вакуум (эфир, по Вилчеку) «генерирует» массу частиц? (Практикум, 2004). *«По современным теоретическим представлениям, хиггсовские бозоны имеют прямое отношение к концепции происхождения масс элементарных частиц — фундаментальному вопросу современной физики. Примечательно, что этот вопрос не поднимался до тех пор, пока не появилась Стандартная Модель. (Достоинно внимания, что современные теоретики забыли о существовании механизма генерации масс, созданной более чем 100 лет назад и весьма похожего на механизм Хиггса, как это будет видно ниже – А.К.)*

*Стандартная Модель предполагает, что существует еще одно поле, которое практически неотделимо от пустого пространства. Его принято называть полем Хиггса. Считается, что все пространство заполнено этим полем, и что частицы приобретают массу путем взаимодействия с ним. Те из них, которые сильно взаимодействуют с полем Хиггса, являются тяжелыми частицами, а слабо взаимодействующие - легкими. Этот эффект аналогичен эффекту движения тела в вязкой жидкости, когда оно за счет взаимодействия с жидкостью приобретает дополнительную эффективную массу. Еще один пример - электрон в кристалле. Из-за электромагнитного взаимодействия с атомами кристаллической решетки электрон приобретает эффективную массу, отличную от массы свободного электрона».*

Познакомимся с некоторыми подробностями этой теории (Иванов, 2007). *«Современная теория элементарных частиц опирается на определенную симметрию между электромагнитными и слабыми взаимодействиями — электрослабую симметрию. Считается, что эта симметрия была в ранней Вселенной и из-за нее частицы были поначалу безмассовы, но на каком-то этапе она самопроизвольно нарушилась, и частицы приобрели массу. В теории элементарных частиц для этого нарушения электрослабой симметрии был придуман хиггсовский механизм.*

*Для этого в эксперименте потребуется открыть хиггсовский бозон — частицу - отголосок хиггсовского механизма. Если этот бозон будет найден и изучен, физики узнают, как протекало нарушение симметрии, и даже, возможно, создадут новую, более*

глубокую теорию нашего мира. Если этот бозон не будет найден (ни в каком виде!), то потребуются серьезный пересмотр Стандартной модели элементарных частиц, поскольку без хиггсовского механизма она работать не может.

В основе ее лежит идея, что два таких, казалось бы, разных взаимодействия, как электромагнитное и слабое, на самом деле являются двумя сторонами «одной медали» — электрослабого взаимодействия.

В рамках этой теории получается так, что при высокой энергии между слабыми и электромагнитными взаимодействиями существует симметрия. Но электрослабая симметрия возможна только тогда, когда фундаментальные частицы безмассовы, а мы знаем из опыта, что в нашем мире эти частицы массивны. Значит, симметрия должна быть нарушена. Хиггсовский механизм как раз и является той движущей силой, которая нарушает эту симметрию. Можно сказать, что главная задача хиггсовского механизма — сделать частицы массивными.

Происходит это так. В квантовой теории все частицы — это вовсе не «твердые шарики», а кванты, колеблющиеся «кусочки» поля. Электроны — это колебания электронного поля, фотоны — колебания электромагнитного поля и т. д. У каждого поля есть состояние с самой низкой энергией — оно называется «вакуумом» этого поля. Для обычных частиц вакуум — это когда частицы отсутствуют, то есть когда их поле везде равно нулю. Если частицы присутствуют (то есть поле не везде равно нулю), то такое состояние поля обладает энергией больше, чем у вакуума.

А хиггсовское поле устроено особым образом — у него вакуум ненулевой. Иными словами, состояние с наименьшей энергией хиггсовского поля — это когда всё пространство пронизано хиггсовским полем определенной силы, на фоне которого движутся остальные частицы. Колебания хиггсовского поля относительно этого «вакуумного среднего» — это хиггсовские бозоны, кванты хиггсовского поля.

Вездесущее присутствие фонового хиггсовского поля сказывается на движении частиц строго определенным образом — оно затрудняет ускорение частиц, но не мешает их равномерному движению. Частицы становятся более инертными, под действием внешних сил они начинают двигаться как-то неохотно — иными словами, у них появляется масса. Эта масса тем больше, чем сильнее они «цепляются» за хиггсовское поле. Впрочем, некоторые частицы, например фотоны, не цепляются напрямую к хиггсовскому полю и остаются безмассовыми». (конец цитаты)

Математическая схема генерации массы согласно механизму Хиггса изложена во всех книгах по КТП (см. например, в Интернете (Замиралов, 2010; Dawson, 1999)). Мы изложим ее по недавнему обзору, содержащему в кратком изложении все элементы этой теории (Quigg, Chris, 2007).

## 5.2. Происхождение массы в Стандартной Модели

«Масса оставалась сущностью - частью природы вещей - больше двух столетий, пока Абрагам (1903) и Lorentz (1904) не попытались интерпретировать электронную массу как электромагнитную само-энергию (Резюме Лоренца см. [3]; современная перспектива имеется в [4]). Наша современная концепция массы имеет свои корни в глубоком вопросе Эйнштейна [5], “Зависит ли инерция тела от содержания его энергии?” и его наполненное глубокого смысла заключение: “Масса тела есть мера содержания его энергии; если энергия изменяется на  $L$ , масса изменяется в том же самом смысле на  $[L/c^2$ , где  $c$  - скорость света]. “Масса есть энергия покоя” (см. [6] и [7]). Среди достоинств идентификации массы как  $m = \varepsilon_0/c^2$ , где  $\varepsilon_0$  определяет энергию покоя тела, является то, так понимаемая масса, является Lorentz-инвариантной величиной, задаваемой в любой координатной системе как

$$m = \left(1/c^2\right) \sqrt{\varepsilon^2 - p^2 c^2}, \quad (5.1.)$$

Но мало того, что это - точное определение массы, оно побуждает нас рассматривать происхождение массы, как энергии покоя тела.

Мы строим стандартную модель физики частиц на ряде элементов, которые мы расцениваем временно как элементарные: кварки и лептоны, плюс некоторые (см. [20,21]), фундаментальные силы, полученные из калибровочных симметрий. Кварки подчиняются сильному взаимодействию, и несут, т.н., цвет, заряд сильного взаимодействия, тогда как лептоны не чувствуют сильного взаимодействия и являются бесцветными. Мы идеализируем кварки и лептоны как точечные, потому что они не обнаруживают внутренней структуры в текущем пределе нашего разрешения ( $r \leq 10^{-18}$  м). Заряженный ток слабого взаимодействия, ответственный за радиоактивный бета-распад и другие процессы, действует только на левосторонние фермионы. Отражает ли наблюдаемое нарушение четности фундаментальную асимметрию в законах Природы, или лево-правая симметрия скрыта данными условиями и могла бы быть восстановлена при более высоких энергиях, мы не знаем.

Электрослабая теория [22-25] (подобно QCD) является калибровочной теорией, в которой взаимодействия следуют из симметрий. Уже в 1930-ых годах, Ферми [31] и Klein [32] предложили описания слабого взаимодействия по аналогии с возникшей тогда теорией квантовой электродинамикой (КЭД). Корректная электрослабая калибровочная симметрия, которая объединяет  $SU(2)_L$  семью (слабый изоспин) симметрии, вводимую левосторонними дублетами с  $U(1)_Y$  слабым гиперзарядом фазовой симметрии, появилась методом проб и ошибок, направляемая экспериментом. Мы характеризуем  $SU(2)_L \otimes U(1)_Y$  теорию посредством левосторонних кварков

$$L_q^{(1)} = \begin{pmatrix} u \\ d \end{pmatrix}_L, L_q^{(2)} = \begin{pmatrix} c \\ s \end{pmatrix}_L, L_q^{(3)} = \begin{pmatrix} t \\ b \end{pmatrix}_L, \quad (5.2)$$

со слабым изоспином  $I = 1/2$  и слабым гиперзарядом  $Y(L_q) = 1/3$ ; их правосторонние слабые-изоскалярные двойники

$$R_u^{(1,2,3)} = u_R, c_R, t_R \text{ и } R_d^{(1,2,3)} = d_R, s_R, b_R \quad (5.3)$$

со слабыми гиперзарядами  $Y(R_u) = 4/3$  и  $Y(R_d) = -2/3$ ; левосторонние лептоны

$$L_e = \begin{pmatrix} \nu_e \\ e^- \end{pmatrix}_L, L_\mu = \begin{pmatrix} \nu_\mu \\ \mu^- \end{pmatrix}_L, L_\tau = \begin{pmatrix} \nu_\tau \\ \tau^- \end{pmatrix}_L \quad (5.4)$$

со слабым изоспином  $I = 1/2$  и слабым гиперзарядом  $Y(L_l) = -1$ ; и правосторонние слабые-изоскалярные заряженные лептоны

$$R_{e,\mu,\tau} = e_R, \mu_R, \tau_R, \quad (5.5)$$

со слабым гиперзарядом  $Y(R_l) = -2$ . (Слабый изоспин и слабый гиперзаряд связаны с электрическим зарядом посредством соотношения  $Q = I_3 + (1/2)Y$ . Здесь мы идеализировали нейтрино как безмассовое; мы затронем возможные источники массы нейтрино в параграфе 7.

$SU(2)_L \otimes U(1)_Y$  электрослабая калибровочная группа подразумевает два набора калибровочных полей: слабый изовектор  $\vec{b}_\mu$ , с константой связи  $g$ , и слабый изоскаляр  $A_\mu$ , с независимой константой связи  $g'$ . Калибровочные поля дают компенсацию изменений, вызванных калибровочными преобразованиями, при условии, что они подчиняются законам преобразования  $\vec{b}_\mu \rightarrow \vec{b}_\mu - \vec{\alpha} \times \vec{b}_\mu - (1/g)\partial_\mu \vec{\alpha}$  при бесконечно малом вращении слабого изоспина, произведенном посредством генератора  $G = 1 + (i/\vec{\alpha} \cdot \vec{\tau})$  (где  $\vec{\tau}$  - изоспиновые матрицы Паули), и  $A_\mu \rightarrow A_\mu - (1/g)\partial_\mu \alpha$  при бесконечно малом вращении

фазы гиперзаряда. Этим калибровочным полям соответствуют тензора напряженности поля

$$F_{\mu\nu}^l = \partial_\nu b_\mu^l - \partial_\mu b_\nu^l + g\varepsilon_{jkl} b_\mu^j b_\nu^k, \quad (5.6)$$

для симметрии слабого изоспина, и

$$f_{\mu\nu} = \partial_\nu A_\mu - \partial_\mu A_\nu, \quad (5.7)$$

для симметрии слабого гиперзаряда.

Мы можем суммировать взаимодействия посредством лагранжиана

$$L = L_{\text{gauge}} + L_{\text{leptons}} + L_{\text{quarks}}, \quad (5.8)$$

где

$$L_{\text{gauge}} = -\frac{1}{4} \bar{F}_{\mu\nu} \bar{F}^{\mu\nu} - \frac{1}{4} f_{\mu\nu} f^{\mu\nu}, \quad (5.9)$$

$$L_{\text{leptons}} = \bar{R}_l i\gamma^\mu \left( \partial_\mu + i\frac{g'}{2} A_\mu Y \right) R_l + \\ + \bar{L}_l i\gamma^\mu \left( \partial_\mu + i\frac{g'}{2} A_\mu Y + i\frac{g}{2} \vec{\tau} \cdot \vec{b}_\mu \right) L_l, \quad (5.10)$$

где  $l$  пробегает значения  $e, \mu, \tau$ , и

$$L_{\text{quarks}} = \bar{R}_u^{(n)} i\gamma^\mu \left( \partial_\mu + i\frac{g'}{2} A_\mu Y \right) R_u^{(n)} + \bar{R}_d^{(n)} i\gamma^\mu \left( \partial_\mu + i\frac{g'}{2} A_\mu Y \right) R_d^{(n)} + \\ + \bar{L}_q^{(n)} i\gamma^\mu \left( \partial_\mu + i\frac{g'}{2} A_\mu Y + i\frac{g}{2} \vec{\tau} \cdot \vec{b}_\mu \right) L_q^{(n)}, \quad (5.11)$$

где  $n$  пробегает значения 1, 2, 3.

Хотя слабые и электромагнитные взаимодействия имеют общее происхождение в  $SU(2)_L \otimes U(1)_Y$  калибровочной симметрии, их проявления совсем различны. Электромагнетизм - сила бесконечного диапазона действия, в то время как влияние заряженного тока слабого взаимодействия, ответственного за радиоактивный бета-распад, действует только на расстоянии менее, чем, приблизительно,  $10^{-15}$  см. Феноменология, таким образом, имеет разногласия с теорией, которую мы развили к этому моменту. Калибровочный лагранжиан (5.9) содержит четыре безмассовых калибровочных электрослабых бозона, а именно  $A_\mu, b_\mu^1, b_\mu^2, b_\mu^3$ , потому что массовый член типа  $\frac{1}{2} m^2 A_\mu A_\mu$  не является инвариантным при калибровочном преобразовании. Природа имеет безмассовый бозон, но один: фотон. Кроме того,  $SU(2)_L \otimes U(1)_Y$  калибровочная симметрия запрещает фермионные массовые члены  $m\bar{f}f = m(\bar{f}_R \bar{f}_L + \bar{f}_L \bar{f}_R)$  в (5.10) и (5.11), потому что лево- и правовращающиеся поля преобразовываются по-разному.

Чтобы дать массы калибровочным бозонам и конституентным фермионам, мы должны скрыть электрослабую симметрию, признавая, что симметрия законов Природы не подразумевает, что одна и та же симметрия будет проявляться в результатах тех законов. Вопрос о том, как электрослабая калибровочная симметрия спонтанно нарушается - становится скрытой - до  $U(1)_{em}$  симметрии фазы электромагнетизма, является одним из самых насущных и стимулирующих вопросов физики элементарных частиц.

Фазовый переход сверхпроводимости предлагает поучительную модель сокрытия электрослабой калибровочной симметрии. Чтобы дать массы промежуточным бозонам слабого взаимодействия, мы обращаемся к эффекту Мейсснера — эффекту выдавливания (исключения) магнитных полей из сверхпроводника, который соответствует появлению у

фотона массы, отличной от нуля в пределах среды сверхпроводимости. То, что называется механизмом Хиггса [35-40], является релятивистским обобщением феноменологии Гинзбурга-Ландау [41] теории сверхпроводимости [42-48]. Существенно понять, что теорема Гольдстоуна [49, 50] не работает, когда локальная калибровочная симметрия, в противоположность непрерывной глобальной симметрии, нарушена. Вместо этого удивительное взаимодействие между потенциальными гольдстоуновскими бозонами и нормально безмассовыми калибровочными бозонами обеспечивает калибровочные бозоны массой и удаляет из спектра безмассовые скаляры.

Давайте посмотрим, как непосредственно нарушение симметрии работает в электрослабой теории. Мы вводим комплексный дублет скалярных полей

$$\phi \equiv \begin{pmatrix} \phi^+ \\ \phi^0 \end{pmatrix}, \quad (5.12)$$

со слабым гиперзарядом  $Y_\phi = +1$ . Затем, мы добавляем к лагранжиану новые (калибровочно-инвариантные) члены для взаимодействия и распространения скаляров,

$$L_{scalar} = (D^\mu \phi)^\dagger (D_\mu \phi) - V(\phi^\dagger \phi), \quad (5.13)$$

где калибровочно-инвариантная производная

$$D_\mu = \partial_\mu + i \frac{g'}{2} A_\mu Y + i \frac{g}{2} \vec{\tau} \cdot \vec{b}_\mu, \quad (5.14)$$

а (иницированное Гинзбургом и Ландау) потенциальное взаимодействие имеет форму

$$V(\phi^\dagger \phi) = \mu^2 (\phi^\dagger \phi) + \lambda (\phi^\dagger \phi)^2, \quad (5.15)$$

Мы также свободны добавить калибровочно-инвариантные взаимодействия *Yukawa* между скалярными полями и лептонами ( $l$  пробегает, как прежде,  $e, \mu, \tau$ ),

$$L_{Yukawa-l} = -\zeta_l \left[ (\bar{L}_l \phi) R_l + \bar{R}_l (\phi^+ L_l) \right], \quad (5.16)$$

и аналогичные взаимодействия с кварками.

Мы тем самым устанавливаем их само-взаимодействия так, чтобы вакуумное состояние соответствовало решению нарушенной симметрии. Электрослабая симметрия спонтанно нарушается, если параметр  $\mu^2$  взят отрицательным. В таком случае, калибровочная инвариантность дает нам свободу выбрать состояние минимальной энергии — вакуумное состояние — которое соответствует вакуумному значению ожидаемого результата

$$\langle \phi \rangle = \begin{pmatrix} 0 \\ v/\sqrt{2} \end{pmatrix}, \quad (5.17)$$

где  $v = \sqrt{-\mu^2/|\lambda|}$ .

Давайте проверим, действительно ли вакуум (5.17) нарушает калибровочную симметрию желаемым образом  $SU(2)_L \otimes U(1)_Y \rightarrow U(1)_{em}$ . Вакуумное состояние является инвариантным при операции симметрии, соответствующей генератору  $G$ , при условии, что  $e^{i\alpha G} \langle \phi \rangle = \langle \phi \rangle$ , то есть если  $G \langle \phi \rangle = 0$ . Прямое вычисление показывает, что первоначальные четыре генератора все нарушены, но электрический заряд нет. Фотон остается невесомым, но другие три калибровочные бозона приобретают массы, поскольку вспомогательные скаляры принимают роль третьих (продольных) степеней свободы.

Вводя слабый угол смешивания  $\theta_W$  и определение  $g' = g \tan \theta_W$ , мы можем выразить фотон как линейную комбинацию  $A = A \cos \theta_W + b_3 \sin \theta_W$ . Мы идентифицируем силу

(чистый вектор) их связи с заряженными частицами  $gg'/\sqrt{g^2 + g'^2}$ , с электрическим зарядом  $e$ . Посредник заряженного тока слабого взаимодействия  $W^\pm = (b_1 \mp ib_2)/\sqrt{2}$ , приобретает массу  $M_W = gv/2 = ev/2\sin\theta_W$ .

Электрослабая калибровочная теория воспроизводит феноменологию низкоэнергетичной теории V-A слабых взаимодействий, если мы устанавливаем  $v = (G_F \sqrt{2})^{-1/2} 246 \text{ ГэВ}$ , где  $G_F = 1.16637(1) \times 10^{-5} \text{ GeV}^2$  является постоянной связи слабого взаимодействия Ферми. Из этого следует сразу  $M_W \approx 37.3 \text{ GeV}/\sin\theta_W$ . Комбинация  $I_3$  и калибровочных бозонов  $Y$ , ортогональная к фотону, является посредником нейтрального тока слабого взаимодействия  $Z = b_3 \cos\theta_W - A \sin\theta_W$ , который приобретает массу  $M_Z = M_W/\cos\theta_W$ . Слабое взаимодействие нейтрального тока не было известно до электрослабой теории. Его открытие в 1973 году [54, 55] отметило важную веху, также, как и наблюдение десятилетия спустя [56]  $W^\pm$  [57, 58] и  $Z^0$  [59, 60] бозонов.

Три десятилетия обширных исследований слабого нейтрального тока достигали высшей точки в экспериментах на фабриках  $e^+e^- \rightarrow Z$ . ALEPH, DELPHI, L3, и OPAL детекторы накопили 17 миллионов распадов  $Z$  в LEP, а датчик SLD, используя поляризованные пучки, сделал запись 600 тысяч распадов  $Z$  на Стэнфордском Линейном Коллайдере [61]. Широкая коллекция экспериментальных измерений и поддерживающих теоретических вычислений подняла электрослабую теорию до уровня закона природы, проверенному как квантовая теория поля на уровне одной части к тысяче [10, 62-64]. Масса нейтрального слабого бозона известна с внушительной точностью,  $M_Z = 91.1876 \pm 0.0021 \text{ ГэВ}$ , в то время как мировая средняя масса  $W$ -бозона -  $M_W = 80.398 \pm 0.025 \text{ GeV}$  [65]. Еще одно примечательное достижение – ясная проверка электрослабой калибровочной симметрии в реакции  $e^+e^- \rightarrow W^+W^-$  « в прекрасном согласии с теорией ».

## 6.0. Модельное представление механизмов Томсона-Лорентца и Хиггса.

### 6.1. Томсоновский механизм в аналогиях

Воспользуемся описанием моделей этого механизма, которое можно найти в трудах самого Томсона и его последователей.

#### 6.1.1. Движение сквозь реальную жидкость

Пусть у нас имеется твердый шар, который погружен в воду, и мы привели его в движение под водой, толкнув его в ту или другую сторону. Если бы вода удовлетворяла требованиям идеальной жидкости, — не имела следов вязкости, — то шар двигался бы по инерции с неизменной скоростью. Какую требуется сообщить энергию шару, чтобы заставить его двигаться в воде со скоростью  $v$ ? Оказывается, что к массе шара  $M$  при расчете энергии надо добавить некоторую массу окружающей его воды: получится  $(M + m)v^2/2$ . Почему?

Потому, что двигать шар в воде нельзя иначе, как двигая при этом воду. Шар будет толкать воду перед собой, и она струйками будет обтекать его, заполняя прежде занятое им место, а для того, чтобы привести в движение воду, нужна энергия. Итак, масса воды, увлекаемая движущимся шаром, является аналогией электромагнитной массе. Как мы увидим дальше, Томсон электромагнитную массу так и считает за массу увлекаемой электроном среды — эфира. Но аналогию можно провести еще и дальше.

#### 6.1.2. Полые шарики

Пусть шар у нас полый с очень легкими, но вместе с тем прочными стенками, а из полости пусть выкачан воздух самым совершенным из существующих насосов. Тогда мы приближаемся к случаю электрона, у которого вся масса — масса электромагнитная,



движущаяся масса практически сводится к массе воды, окружающей легкую шарообразную оболочку, а внутри шара будет пустое пространство.

Сравним вышеприведенное описание с модельным представлением хиггсовского механизма.

## **6.2. Хиггсовский механизм в аналогиях (Иванов, 2007а)**

*«Есть несколько способов пояснить на повседневном языке, как работает хиггсовский механизм. Надо сразу оговориться, что все они по-настоящему не объясняют его, а лишь наглядно иллюстрируют одну мысль — при движении частицы сквозь какую-то среду может появиться инертность.»*

### **6.2.1. Движение сквозь идеальную жидкость**

*Если тело движется с постоянной скоростью сквозь жидкость без вязкости и без турбулентности, то жидкость будет обтекать тело, не оказывая ему в целом никакого сопротивления (в гидродинамике это называется парадоксом Даламбера). Однако при попытке изменить скорость тела у него обнаружится некоторая дополнительная инертность, называемая присоединенной массой. Она появляется из-за того, что чем быстрее движется тело, тем быстрее оно заставляет жидкость расступаться и обтекать его. Именно эта*

### **6.2.2. Пенопластовые шарики**

*Можно предложить и более физическое, и вместе с тем наглядное объяснение. Возьмите кусок пенопласта и покрошите его на стол. Получившиеся маленькие пенопластовые шарики очень легкие. Если подуть на них — они разлетятся. Это аналогия безмассовых частиц, то есть частиц, у которых очень маленькая инертность.*

*Теперь аккуратно налейте на стол воды, покрошите сверху пенопласт и снова слегка подуйте на него. Вы увидите, что шарики отплывают, но уже неохотно. Если бы мы не видели воду, нам бы казалось, что у них появилась инертность, которой раньше не было. Эта инертность возникает из-за того, что им при движении приходится продираться сквозь воду.*

*Вода в этой аналогии играет роль вакуумного хиггсовского поля. Если же подуть на воду без пенопластовых шариков, то по ее поверхности побежит рябь — это будет аналог хиггсовских бозонов.*

*Неточность этой аналогии заключается в том, что вода мешает движению шариков, а хиггсовское вакуумное поле мешает ускорению частиц. На частицы, движущиеся равномерно и прямолинейно, оно не влияет...*

*Всё ли известно про хиггсовский механизм? Вовсе нет! Более того — про него известно очень, очень мало.*

*На все ли вопросы отвечает хиггсовский механизм? Опять же, нет. Хиггсовский механизм не объясняет всё, он лишь завершает Стандартную Модель». (конец цитирования).*

Из сравнения того и другого механизма обнаруживается, что «мусор прошлого» и в этом случае мог бы служить сокровищем настоящего.

## **7.0. Механизм генерации массы в НТЭЧ**

Генерация массы в НТЭЧ происходит согласно четвертому постулату этой теории (Кирьяко, 2010). А математическая сторона реализации этого механизма описана в книге (Кирьяко, 2009). Здесь мы отметим основные идеи и сравним их с механизмами Томсона-Лорентца и Хиггса.

1. НТЭЧ является теорией электромагнитного поля, как и теория Томсона-Лорентца, но она также является квантовой нелинейной теорией, эквивалентной теории Стандартной Модели.

2. В рамках НТЭЧ существует только одна безмассовая частица – фотон. Она же является фундаментальной частицей теории электромагнитного поля. Это полностью соответствует экспериментальным данным.

В то же время, в Стандартной Модели привлечены идеи теории Большого Взрыва (ТБВ), согласно которой на начальной стадии существования Вселенной все частицы были безмассовыми. Подтвердить экспериментально это предположение невозможно, но оно не противоречит следствиям из ТБВ. Насколько логично переносить гипотезы ТБВ в теорию элементарных частиц, вопрос остается открытым.

3. Таким образом, в рамках НТЭЧ появление масс всех остальных элементарных частиц, кроме фотона, должно быть связано с преобразованием фотона в массивные частицы. Эти частицы также являются электромагнитными полями, но нелинейными. Понятно, что взаимодействие между ними может приводить к возникновению других массивных частиц и фотонов.

4. В этом смысле, начальным основным вакуумом НТЭЧ является ЭМ фотонный физический вакуум (вакуум виртуальных фотонов). Очевидно, этот вакуум равносителен электромагнитному эфиру классической физики с учетом его квантования, а также и ЭМ физическому вакууму СМ.

5. Но поскольку массивные элементарные частицы тоже являются электромагнитными полями, можно предположить, что ЭМ физический вакуум (эфир) НТЭЧ, состоящий из виртуальных фотонов, содержит в себе как составные части физические вакуумы всех других частиц. В этом эфир-вакуум НТЭЧ и эфир-вакуум СМ полностью совпадают (в электронной теории, по понятным причинам, о существовании такого эфира не подозревали).

6. В СМ элементарные частицы считаются первоначально безмассовыми частицами. Затем в результате взаимодействия с вакуумом Хиггса эти безмассовые частицы приобретают массу за счет самодействия полей.

Вакуум НТЭЧ фотонный. Поэтому НТЭЧ не содержит массивных бозонов Хиггса вакуума Хиггса. Если масса возникает из-за взаимодействия с вакуумом-эфиром, то в НТЭЧ этим вакуумом служит ЭМ вакуум-эфир, а, значит, масса возникает согласно гипотезе Томсона.

Если говорить о математическом описании, то, подобно тому, как это происходит в СМ, массивные частицы рождаются в НТЭЧ благодаря самодействию полей фотона. При этом, также как и СМ, генерация проходит через промежуточную стадию, которая называется промежуточным бозоном.

Можно предположить, что в дальнейшем массивные частицы могут рождаться также из других массивных частиц путем их распадов и соединений. Многие из этих превращений могут происходить также через промежуточное состояние.

7. В модельном представлении можно условно сказать, что масса частиц рождается в результате «остановки» фотона. Под «остановкой» фотона подразумевается его переход в новое состояние промежуточного массивного фотона. При этом фотон движется в ограниченной области пространства. Этот переход материализуется благодаря движению (вращению) электромагнитных полей фотона в замкнутом объеме. При этом происходит превращение энергии в массу по формуле Эйнштейна, как это моделируется и в СМ.

В макромасштабе «остановка» фотонов может быть моделирована сосудом с зеркально отражающими стенками, в который запускают фотоны. После запуска фотонов, они оказываются ограничены в своем движении стенками сосуда. Сосуд приобретает дополнительную массу, равную сумме энергий фотонов, деленной на квадрат скорости света. В НТЭЧ фотон в поле ядра начинает самодействовать так, что ограничивает пространство своего движения. Это новое состояние фотона уже обладает массой покоя.

8. Математической основой возникновения массы в НТЭЧ является вращение (искривление) полей частицы. Это параллельно тому, что теория возникновения масс в СМ

косвенно связана на калибровочных преобразованиях, которые представляют собой вращение полей частицы.

Отметим, что вращение (в виде криволинейного движения) полей в НТЭЧ имеет отдаленное сходство также и с ОТО. Но здесь имеется также и существенное отличие: в ОТО масса-энергия гравитационного поля возникает за счет искривления не поля, а пространства-времени.

## Литература

### На русском языке

- Беккер, Р. (1936). Электронная теория. (перевод с немецкого) ОНТИ, Л-М, 1936;
- Бредов, М.М., и др. (1985). Классическая электродинамика. Наука, 1985
- Булгаков, Н. (1911). О природе электрона. Ж.Р.Ф.-Х.О. Физич. Отд. Том XLIII, вып. 8, 1911 год.
- Гольдштейн, Л.Д., Зернов, Н.В. (1971). Электромагнитные поля и волны. М., «Советское радио». 1971.
- Готтфрид, К., Вайскопф, В. (1988). Концепции физики элементарных частиц. (перевод). М., Мир.
- Джексон Дж. (1965). Классическая электродинамика. М.: Мир, 1965
- Замиралов, В.С. (2010). Основные понятия теории групп и их представлений и некоторые приложения к физике частиц. <http://nuclphys.sinp.msu.ru/thgr/>
- Иванов, И. (2007). Хиггсовский механизм нарушения электрослабой симметрии. [http://elementy.ru/LHC/HEP/higgs\\_theory](http://elementy.ru/LHC/HEP/higgs_theory)
- Иванов, И. (2007а). Хиггсовский механизм в аналогиях: [http://elementy.ru/LHC/HEP/higgs\\_theory/explanations](http://elementy.ru/LHC/HEP/higgs_theory/explanations)
- Кирьяко, А.Г. (2009). Нелинейная квантовая теория поля как обобщение стандартной модели. <http://kyriak.socionet.ru/files/2ndA4Kniga11pt.pdf>
- Кирьяко, А.Г. (2010). Аксиоматика и математический аппарат нелинейной квантовой теории поля. <http://kyriak.socionet.ru/files/AxiomaticAndMathematics.pdf>
- Кудрявцев П.С. (1971). История физики. (Часть III. Глава 1. Электродинамика движущихся сред и электронная теория). М.: Просвещение, 1971.
- Лодж, Оливер. (1911). Мировой эфир. Одесса, 1911
- Лорентц Г. А. (1953). Теория электронов и её применение к явлениям света и теплового излучения. М.: ГТТИ, 1953.
- Мартыненко, А.П. (2001). Вакуум в современной квантовой теории. СОЖ, т. 7, №5, 2001.
- Памятных, Е. А. (2001). Электродинамика: Специальная теория относительности. Теория электромагнитного поля. Издательство Уральского университета, 2001. [www.eunnet.net/metod\\_materials/pamyatnykh/003.pdf](http://www.eunnet.net/metod_materials/pamyatnykh/003.pdf)
- Парселл, Э. (1975). Электричество и магнетизм. М., Наука. 1975
- Поляков, А.М. (1999). Калибровочные поля и струны, 1999 (оригинал1987)
- Практикум, (2004). Практикум. Частицы и атомные ядра. МГУ, Москва, 2004. [http://nuclphys.sinp.msu.ru/p/zad\\_09.pdf](http://nuclphys.sinp.msu.ru/p/zad_09.pdf)
- Сб. переводов, (1972). Относительность, кванты, статистика, изд. Наука, М., 1972; (Эренфест, П. "Кризис в гипотезе о световом эфире", 1913 г)
- Спасский, Б.И. (1977). История физики. Т. 2. М., ВШ, 1977.
- Томсон, Дж. Дж. (2004). Электричество и магнетизм.. Пер.: М.-Л., 1928 г. Репр. изд.: РХД, Москва-Ижевск.).
- Фейнман, Р., Лейтон, Р., Сэндс, М. (1977). Фейнмановские лекции по физике. Т. 6. М., "Мир".
- Франк Вилчек. Физика высокой энергии: Пустая пустота? Nature 435, 152-153 (12 May 2005)
- Шредингер, Э. (1976). Избранные труды по квантовой механике. М., Наука, 1976. (см. статью: Schreudinger, E. Brit. J. Philos.. Sci., 3, 233, 1952)
- Эйнштейн, А. (1965). Эфир и теория относительности. Собр. науч. трудов. Т.1, М., Наука.

### На английском языке

- Bateman, H. (1915). The mathematical analysis of electrical and optical wave-motion on the basis of maxwell's equations. Cambridge, Printed by John Clay, M.A. at the university press 1915
- Dawson, S. (1999). Introduction to Electroweak Symmetry Breaking. <http://arxiv.org/abs/hep-ph/9901280>
- Fermi, E. (1922). Physik. Z., 23, 340 (1922), or Atti accad. nazl. Lincei Rend., 31, 184, 306 (1922).
- Kwal, B. (1949). J. phys. radium, 10, 103 (1949).
- Quigg, Chris. (2007) Spontaneous symmetry breaking as a basis of particle mass. Rep. Prog. Phys. 70 (2007) 1019-1053. <http://iopscience.iop.org/0034-4885/70/7/R01>
- Rohrlich, F. (1960). Am. J. Phys., 28, 639 (1960).
- Wilson, W. (1936). Proc. Phys. Soc. (London), A48, 376 (1936).