Ревизия теоретических основ релятивистской электродинамики

Виктор КУЛИГИН, Галина КУЛИГИНА, Мария КОРНЕВА
Исследовательская группа «Анализ», http://n-t.org/ac/iga/

Часть 1. Тензор энергии-импульса электромагнитного поля

Показано, что существующий способ построения тензора энергии-импульса электромагнитного поля имеет недостатки. Предлагается альтернативный способ построения тензора энергии-импульса электромагнитного поля. 4-дивергенция этого тензора позволяет получить новые законы сохранения плотности потока и плотности энергии электромагнитного поля.

Введение

Современная физика полна парадоксов и противоречий. Об этом свидетельствуют многочисленные критические статьи и статьи с новыми гипотезами, постоянно появляющиеся на сайтах и в электронных журналах Интернета. Критикуются теория относительности, электродинамика, квантовые теории.

Анализируя опубликованные критические работы, мы пришли к заключению, что корни трудностей существующих теорий лежат именно в **классической** электродинамике. Что бы вы ни взяли: квантовую теорию поля, теорию относительности (любую), релятивистскую механику и т.д. – везде вы натолкнетесь на нерешенные проблемы электродинамики.

Трудности квантовых теорий обусловлены электродинамикой. Теория относительности также опирается на электродинамику («порождена» ею). Релятивистская механика основывается на теории относительности, т.е. также «привязана» к электродинамике и т.д. И, тем не менее, работ посвященных анализу основ электродинамики очень мало, если не сказать: «нет».

Это имеет свое объяснение. Кажется, что электродинамика «досконально» подтверждена с экспериментальной точки зрения. На ее основе строятся ускорители элементарных частиц, генераторы СВЧ сигналов, антенные системы и т.д. Кажется, что нет оснований для сомнений в правильности ее теоретических основ.

Но это только на первый взгляд. На самом деле, тщательно анализируя теоретические основы электродинамики, мы постоянно сталкивались с противоречивым, не всегда последовательным изложением основ электродинамики, со стремлением вопреки логике «подогнать» доказательства под заранее заданный результат.

Мы поставили целью не только строго проанализировать основы этой теории, но также провести все альтернативные выкладки без «подгонок» и без гипотез, честно и последовательно, независимо от того, согласуются ли они с современными воззрениями или же им противоречат. Эти результаты изложены в 6-ти частях этой статьи.

В качестве источника анализа основ электродинамики мы выбрали книгу Л.Д. Ландау и Е.М. Лифшица «Теория поля» [1]. Это обусловлено тем, что книга [1] рекомендована в качестве учебного пособия для университетов.

На первый взгляд кажется, что теоретические основы теории электромагнитного поля изложены изящно и логично. Но это только на первый взгляд. Мы считаем, что изложение имеет недостатки, достойные пересмотра. Например (см. параграфы 23 – 33):

– исходный тензор энергии-импульса электромагнитного поля **несимметричен**, поэтому к нему добавляется еще «нулевой» тензор $\partial A_i F_{kl} / \partial(4\pi x_l)$;

– энергия поля скалярного потенциала исходного несимметричного тензора **отрицательна**, но благодаря «нулевому» тензору отрицательная энергия как бы «исчезает»;
– эта отрицательная энергия поля скалярного потенциала («как шило из мешка») вновь «вылезает», но уже в квантовой теории поля;
– одновременно в квантовой теории поля появляются **продольные волны**, что вызывает необходимость использовать кулоновскую калибровку вместо калибровки Лоренца;
– из тензора энергии-импульса электромагнитного поля **не вытекают законы** сохранения и, в силу этого, закон Пойнтинга выводится «дедовским» методом и т.д.

Необходимость анализа созрела уже давно. Остается удивляться, почему сих пор не было проведено ревизии основ классической электродинамики.

1. Плотность функции Лагранжа электромагнитного поля

В учебнике [1] построение теоретических основ электродинамики идет от функции Лагранжа для заряда. Затем получают тензор электромагнитного поля F_{kl}. От него идут к тензору энергии-импульса электромагнитного поля, к уравнениям Максвелла и теореме Пойнтинга.

Мы будем проводить анализ в обратной последовательности и начнем с плотности функции Лагранжа для электромагнитного поля, продвигаясь к полям заряда. В современной теории плотность функции Лагранжа определяется через тензор электромагнитного поля

$$F_{ik}= [\partial A_k/\partial x_i - \partial A_i/\partial x_k]$$

Запишем это выражение для плотности функции Лагранжа

$$\begin{aligned}\Lambda &= [-(F_{ik})^2/4 + \mu j_i A_i\,]/\,\mu = \\ &= -[(\partial A_k/\partial x_i)^2 - 2\partial A_i/\partial x_k\cdot\partial A_k/\partial x_i + (\partial A_i/\partial x_k)^2]/4\mu + j_iA_i/\mu \end{aligned} \qquad (1.1.1)$$

Поскольку функция Лагранжа определена неоднозначно, преобразуем выражение (1.1.1) и придадим ему иную форму, используя интеграл действия

$$S = \int \Lambda d\Omega = \int \frac{1}{\mu}[-\frac{1}{4}(F_{ik})^2 + \mu j_i A_i]\, d\Omega \qquad (1.1.2)$$

где: $d\Omega = dx_1\, dx_2\, dx_3\, dx_4$; $j_k = c\rho u_k$ – 4-вектор плотности тока; $u_k= dx_k/ds$ – 4-вектор скорости; ρ – плотность пространственного заряда. Напомним уравнения непрерывности $\partial A_k/\partial x_k = 0$ и $\partial j_k/\partial x_k = 0$, которые являются самостоятельными условиями, наложенными на поля.

Раскроем подынтегральное выражение, преобразуем и проинтегрируем по частям

$$\begin{aligned} S &= \int \frac{1}{\mu}[-\frac{1}{2}(\frac{\partial A_i}{\partial x_k})^2 + \frac{1}{2}\frac{\partial}{\partial x_k}(A_i\frac{\partial A_k}{\partial x_i}) + \mu j_i A_i]d\Omega = \\ &= \int \frac{1}{\mu}[-\frac{1}{2}(\frac{\partial A_i}{\partial x_k})^2 + \mu j_i A_i]d\Omega + \int \frac{1}{2\mu} A_i \frac{\partial A_k}{\partial x_i} dS_k \end{aligned} \qquad (1.1.3)$$

Во втором интеграле конечного выражения (1.1.3) пределами интегрирования является бесконечность, где при интегрировании по координатам поле исчезает. При интегрировании по времени начальные и конечные точки варьирования фиксированы и там вариация интеграла равна нулю. Следовательно, последний интеграл в выражении (1.1.3) обращается в нуль. Таким образом, получаем новое выражение для плотности функции Лагранжа

$$\Lambda = -(\partial A_i/\partial x_k)^2/2\mu + j_iA_i \qquad (1.1.4)$$

Выражение (1.1.4) полностью **эквивалентно** выражению (1.1.1).

2. Уравнения движения

Теперь мы можем получить «уравнения движения», т.е. уравнения для нахождения потенциалов электромагнитного поля, порожденных 4-вектором тока j_k. Для этого запишем выражение для интеграла действия, которое будем варьировать.

$$\delta S == \int [-\frac{1}{\mu}\frac{\partial A_i}{\partial x_k}\frac{\partial \delta A_i}{\partial x_k} + j_i \delta A_i] d\Omega \tag{1.2.1}$$

Интегрируя по частям, получим

$$\delta S = -\frac{1}{\mu}\int (\frac{\partial A_i}{\partial x_k}\delta A_i) dS_k + \int \frac{1}{\mu}[\frac{\partial^2 A_i}{\partial x_k^2} + \mu j_i]\delta A_i d\Omega = 0 \tag{1.2.2}$$

Первый интеграл по гиперповерхности S_k обращается в нуль по тем же причинам, что и последний интеграл в выражении (1.1.3). Таким образом, мы получаем окончательное выражение для уравнений движения

$$\frac{\partial^2 A_i}{\partial x_k^2} = -\mu j_i ; \tag{1.2.3}$$

к которым следует добавить, как уже говорилось, уравнения непрерывности для 4-потенциала поля и 4-плотности тока:

$$\partial A_i/\partial x_i = 0; \qquad \partial j_i/\partial x_i = 0.$$

Система уравнений представляет собой уравнения Максвелла в калибровке Лоренца.

$$\begin{aligned} &\frac{\partial^2 \mathbf{A}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \mathbf{A}}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \mathbf{A}}{\partial z^2} - \frac{\partial^2 \mathbf{A}}{\partial (ct)^2} = -\mu \mathbf{j}; \qquad \frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial z^2} - \frac{\partial^2 \phi}{\partial (ct)^2} = -\frac{\rho}{\varepsilon}; \\ &\mathrm{div}\mathbf{A} + \frac{1}{c^2}\frac{\partial \phi}{\partial t} = 0; \qquad \mathrm{div}\mathbf{j} + \frac{\partial \rho}{\partial t} = 0 \end{aligned} \tag{1.2.4}$$

Таким образом, новое выражение для плотности лагранжиана приводит **к правильным** уравнениям электродинамики (уравнения Максвелла в калибровке Лоренца).

3. Тензор энергии-импульса и законы сохранения

Теперь нам необходимо записать тензор энергии-импульса электромагнитного поля T_{ik}. Общий вывод формулы для вычисления тензора энергии-импульса, получаемой из плотности лагранжиана, приведен в [1]. Эта формула имеет вид

$$T_{ik} = \delta_{ik}\Lambda - \sum_l \frac{\partial A_l}{\partial x_i}\frac{\partial \Lambda}{\dfrac{\partial A_l}{\partial x_k}}, \tag{1.3.1}$$

где $\Lambda = -(\partial A_l/\partial x_k)^2/2\mu$

Вычисления дают следующий результат

$$T_{ik} = \frac{1}{\mu}\frac{\partial A_l}{\partial x_i}\frac{\partial A_l}{\partial x_k} - \frac{1}{2\mu}\delta_{ik}(\frac{\partial A_l}{\partial x_i})^2 \tag{1.3.2}$$

Он совпадает с тензором энергии-импульса в [2]. Для полноты описания к этому тензору можно было бы добавить тензор взаимодействия 4-вектора тока с 4-потенциалом $j_i A_k$. Здесь мы ограничимся рассмотрением полей в свободном пространстве и не будем этого делать.

Нетрудно заметить, что тензор энергии-импульса симметричен $T_{ik} = T_{ki}$.

Известно, что 4-дивергенция этого тензора для свободного пространства (когда поля рассматриваются за пределами источников) равна нулю $\partial T_{ik}/\partial x_k = 0$. Из этого выражения должны вытекать законы сохранения энергии и импульса (в нашем случае мы должны получить выражения для закона сохранения плотности электромагнитной энергии и закона сохранения плотности импульса) в свободном пространстве.

Эти законы, вытекающие из дивергенции тензора энергии-импульса T_{ik}, в общей форме имеют следующий вид:

1. Закон сохранения плотности потока **S** электромагнитного поля

$$\frac{\partial \mathbf{S}}{\partial t} + \frac{1}{c^2}\operatorname{grad} w = 0 \tag{1.3.3}$$

2. Закон сохранения плотности энергии w электромагнитного поля

$$\operatorname{div}\mathbf{S} + \frac{\partial w}{\partial t} = 0 \tag{1.3.4}$$

где:

$$\mathbf{S} = -\frac{1}{\mu}\frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t}\operatorname{div}\mathbf{A} - \frac{1}{\mu}\frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t}\times\operatorname{rot}\mathbf{A} + \varepsilon(\operatorname{grad}\phi\frac{\partial \phi}{\partial t})\,; \tag{1.3.5}$$

$$w = \frac{1}{2\mu}[(\operatorname{div}\mathbf{A})^2 + (\operatorname{rot}\mathbf{A})^2 + (\frac{\partial \mathbf{A}}{\partial ct})^2] - \frac{\varepsilon}{2}[(\operatorname{grad}\phi)^2 + (\frac{\partial \phi}{\partial ct})^2] \tag{1.3.6}$$

Из полученных соотношений следуют весьма интересные выводы.

Во-первых, в общем случае уравнения Максвелла в калибровке Лоренца описывают три различных вида потоков. Первый поток энергии есть известный поток поперечных электромагнитных волн, описываемый вектором Пойнтинга. Его плотность равна

$$\mathbf{S}_1 = -\frac{1}{\mu}\frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t}\times\operatorname{rot}\mathbf{A}\,;$$

Второй поток – поток продольных электрических волн векторного потенциала **A**. Его плотность равна

$$\mathbf{S}_2 = -\frac{1}{\mu}\frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t}\operatorname{div}\mathbf{A}$$

Третий поток – поток продольных волн, образованный скалярным потенциалом φ.

$$\mathbf{S}_3 = \varepsilon\frac{\partial \phi}{\partial t}\operatorname{grad}\phi$$

Во вторых, плотность энергии и плотность потоков $\mathbf{S}_1$ и $\mathbf{S}_2$, образованных векторным потенциалом **A, положительны**, а плотность энергии и плотность потока $\mathbf{S}_3$, созданного скалярным потенциалом φ, **отрицательны**. Это отнюдь не новый факт. Об этом знают специалисты по квантовой теории поля (см., например, [2]) но он, как обычно, **малоизвестен физикам**, которые специализируются в других направлениях.

В третьих, из выражений (1.3.3) и (1.3.4) вытекает новое интересное следствие. В свободном пространстве плотности потоков и плотности энергий должны удовлетворять **волновому** уравнению, т.е. плотность потока и плотность энергии тоже являются запаздывающими, подобно потенциалам полей электромагнитной волны.

$$\frac{\partial^2 \mathbf{S}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \mathbf{S}}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \mathbf{S}}{\partial z^2} - \frac{\partial^2 \mathbf{S}}{\partial (ct)^2} = 0; \qquad \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} - \frac{\partial^2 w}{\partial (ct)^2} = 0 \tag{1.3.7}$$

Это означает, что решение некоторых задач, например, по дифракции волн, связанных с решением векторных волновых уравнений можно свести к тем же задачам, но описываемых волновым уравнением для скалярной плотности энергии w. Иными словами, в принципе возможно уменьшение громоздкости вычислений при решении подобных задач.

В четвертых, полученные результаты нетрудно распространить на любые волновые процессы, описываемые волновым уравнением.

4. О чем не написано в учебнике

Взяв для анализа книгу [1], мы вовсе не собираемся критиковать ее авторов. Они выполнили свою задачу, тщательно, продуманно и добросовестно изложив все то, что было сделано до них другими учеными. Сейчас трудно сказать, чем руководствовались **первопроходцы** теоретической электродинамики в условиях известного «кризиса физики». По крайней мере, очевидны следующие факты.

1. Прежде всего, отметим тот факт, что энергия поля скалярного потенциала оказалась **отрицательной.** Как следствие, отрицательной должна быть электромагнитная масса заряда, а это находится в противоречии с существующими представлениями квазистатической электродинамики. Отрицательная энергия ведет к изменению формулировки закона Кулона. Нетрудно показать, что при **отрицательной** энергии поля скалярного потенциала одноименные заряды должны **притягиваться**, а разноименные – **отталкиваться**. А это нонсенс. Эту трудность было необходимо каким-либо способом «обойти». И это было «сделано».
2. Отсюда становится также понятыми причины следующих утверждений, например, «потенциалы электромагнитных полей не имеют физического смысла, так как они определены с точностью до постоянной величины», «в физике имеют физический смысл только поля **E** и **H,** а потенциалы не имеют физического смысла, т.к. они «не наблюдаемы»» и тому подобные выражения. Все эти высказывания отражают стремление завуалировать трудности, с которыми сталкивается современная электродинамика, и подспудное желание подавить стремление досконально разобраться в проблемах.
3. Как известно, в природе не было обнаружено **продольных** электромагнитных волн, хотя, как мы убедились, теория предсказывает их существование. Проблема продольных волн до сих пор остается открытой не только в классической, но и в квантовой электродинамике.

Мы вовсе не хотим упрекнуть ученых, которые старались преподнести свои взгляды доходчиво и логично. От ошибок не застрахован никто. Мы упрекаем тех, кто возвел эти не совсем корректные представления в **абсолют,** догматически защищает их, прикрываясь авторитетами этих ученых, и, игнорируя объективную истину, тщательно охраняет их от критики.

В «те далекие времена», когда мы только начинали постигать основы теории познания, нам пришлось познакомиться с интересной книгой Марио Бунге «Философия физики». Он писал, что прекрасный многотомный «Курс теоретической физики» Ландау и Лифшица написан в духе **раннего логического позитивизма**. Тогда это было для нас не очень понятно, но фраза запомнилась.

Теперь можно «расшифровать» это высказывание. Оказывается, ранний логический позитивизм ставил своей целью дать логически последовательное, непротиворечивое изложение существующих физических теорий. Кажется, что цель достойна похвалы. Однако какой ценой она достигалась?

Ради логического совершенства формы изложения авторы учебников пытались скрыть внутренние противоречия в теориях, математический формализм теории излагался в ущерб математической корректности, во многих случаях «физический смысл» либо не рассматривался, либо давался «по минимуму». И все это только из-за того, чтобы в красивую упаковку засунуть противоречивый (не всегда качественный) «продукт».

Возьмите упомянутые интересные и содержательные тома теоретической физики Ландау и Лифшица. Там упоминается иногда о внутренних нерешенных проблемах. Но как? Либо как о задачах, не имеющих для данного момента принципиального значения, либо как о задачах, решение которых возлагается на квантовые теории. Факт отрицательности энергии поля скалярного потенциала, например, завуалирован, скрыт от студентов и тех, кто сам преподает классическую электродинамику. Об этом исследователь может узнать только в квантовой теории поля.

Подобным свойством страдают практически все исключения физические учебники. В них традиции логического позитивизма продолжаются [3]. В результате, студенты (и будущие преподаватели) воспринимают научные теории как **абсолютно надежные**. У них не возникает тени сомнения в правильности научных теорий и желания проверить основы научного знания (догматизм). Как следствие вырабатывается вера в авторитеты и атрофия самостоятельного мышления. А ведь лозунг науки хорошо известен: «Сомневайся! Не принимай ничего на веру! Проверяй!».

Мы же будем продолжать исследования, и посмотрим, к каким результатам приведет последовательное применение методов аналитической механики к электромагнетизму.

(*Продолжение следует*)

Источники информации

1. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Теория поля. М.: «ФИЗМАТГИЗ», 1963.
2. Ахиезер А.И., Берестецкий В.Б. Квантовая электродинамика. М.:, «Наука», 1969.
3. Кулигин В.А. Вавилонская башня вульгарного позитивизма (http://n-t.ru/tp/ns/vb.htm). НиТ, 2004.

Дата публикации:

27 декабря 2004 года

Электронная версия: