

Интернет-журнал «Мир науки» ISSN 2309-4265 <http://mir-nauki.com/>
2016, Том 4, номер 1 (январь - февраль) <http://mir-nauki.com/vol4-1.html>
URL статьи: <http://mir-nauki.com/PDF/03PDMN116.pdf>
Статья опубликована 04.02.2016.

Ссылка для цитирования этой статьи:

Кочетков А.В., Федотов П.В. О классической релятивистской электродинамике (необходимость преподавания спецкурса по физике) // Интернет-журнал «Мир науки» 2016, Том 4, номер 1
<http://mir-nauki.com/PDF/03PDMN116.pdf> (доступ свободный). Загл. с экрана. Яз. рус., англ.

УДК 530.1

Кочетков Андрей Викторович¹

ФГБОУ ВПО «Пермский национальный исследовательский политехнический университет», Россия, г. Пермь
Доктор технических наук, профессор
E-mail: soni.81@mail.ru

Федотов Петр Викторович

ООО «Научно-исследовательский центр технического регулирования», Россия, г. Саратов
Инженер
E-mail: klk50@mail.ru

О классической релятивистской электродинамике (необходимость преподавания спецкурса по физике)

Аннотация. В программу обучения студентов прикладных специальностей, требующих знаний по релятивистской электродинамике, входит обязательный курс изучения специальной теории относительности. Это объясняется тем, что знания специальной теории относительности являются базовыми для изучения электродинамики. Тем более, что релятивистская электродинамика базируется на выводах, следующих из специальной теории относительности.

На самом деле это не так. Релятивистская электродинамика базируется на понятии единого электромагнитного поля и конечности скорости электромагнитных взаимодействий. И, как следствие, существования преобразований Лоренца для всех электромагнитных взаимодействий на субсветовых скоростях. Для обоснования этих постулатов, подтвержденных многочисленными экспериментами, совершенно не требуется обращение к специальной теории относительности, в которой эти постулаты, хотя и присутствуют, тем не менее, они не подтверждены экспериментально для движения макроскопических объектов, не взаимодействующих посредством электромагнитного поля.

Ключевые слова: специальная теория относительности; релятивистская электродинамика; теория поля; электромагнетизм; тензоры; уравнения Максвелла; эксперимент; преобразования Лоренца; субсветовые скорости; предельная скорость взаимодействия

¹ 410022, г. Саратов, ул. Азина, д. 38 «В», кв. 4

Введение

При изучении релятивистской электродинамики (РЭД) наблюдается методический парадокс. Прежде чем начать изучение непосредственно электродинамики в релятивистских (четырёхмерных) обозначениях предварительно вводится отдельный курс специальной теории относительности (СТО), например, в [2, 3, 4, 7, 8, 9 и др.].

Сущность парадокса в методике преподавания состоит в двух моментах.

«Электромагнитное поле по своей природе является предельно релятивистским объектом: оно распространяется в пространстве со скоростью света. Уравнения поля ковариантны по отношению преобразованиям Лоренца, т.е. сохраняют одну и ту же форму написания во всех инерциальных системах отсчета. Это обстоятельство не является очевидным, ибо уравнения Максвелла обычно используются в трехмерной форме, тогда как для ковариантной записи им следует придать четырехмерную форму.

Вышеизложенный материал² не требовал анализа релятивистских особенностей уравнений поля, релятивистской природы законов электромагнетизма. Однако эти вопросы имеют принципиальное значение, и для них отводится специальная тема курса. При изучении данной темы требуется знание основ СТО» [3, с. 131].

Первый момент состоит в том, что СТО – это релятивистская кинематика, т.е. учение о движении макроскопических объектах с околосветовыми скоростями. Кинематика, независимо от того, классическая (ньютоновская) или релятивистская (эйнштейновская) оперирует макроскопическими понятиями: размеры, масса, координаты, скорости. А электродинамика оперирует понятиями полей: электрического и магнитного.

Следует согласиться, что использование уравнений Максвелла в трехмерной форме, и как следствие, использование терминов электрического и магнитного полей, как отдельных физических сущностей, делает не очевидным четырехмерную форму записи уравнений электродинамики, предполагающую единое понятие «электромагнитного» поля.

С другой стороны, в релятивистской кинематике (СТО) ситуация не лучше. Точно также изучение механики вообще, и кинематики в частности, в виде трехмерной механики Ньютона, и времени, как отдельной сущности от координат, делает неочевидными четырехмерные уравнения СТО, предполагающими существование общего континуума в виде пространства-времени.

Кажется, что ситуация в обоих разделах науки одинаковая, однако это совсем не так. Все дело в экспериментальной проверке. Так для релятивистской кинематики (СТО) не поставлен ни один эксперимент, реализующий движение макроскопических объектов с субсветовыми скоростями³. В тоже время, в электродинамике эксперименты, подтверждающие релятивистские эффекты известны до рождения СТО.

Постановка проблемы

При более внимательном изучении вопроса с экспериментальными подтверждениями ситуация обостряется еще больше.

² Электродинамика Максвелла. Прим. Авт.

³ Рекорд скорости космических аппаратов ≈ 67 км/с установлен в 1976 г. автоматическим зондом [5], для пилотируемых космических аппаратов скорости намного ниже, причем, не достигает даже 3-й космической скорости, равной 16,65 км/с.

Любая релятивистская теория, не важно, в кинематике или в электродинамике, опирается на два постулата: предельности скорости взаимодействия и применении преобразований Лоренца.

Опять, в релятивистской электродинамике скорость взаимодействия равна скорости света и легитимность применения преобразований Лоренца – твердо установленные факты, подтверждаемые многочисленными экспериментами.

Напротив, в релятивистской кинематике **макроскопических** тел – это чисто теоретические заявления, не подтвержденные ни одним экспериментом. Например, первый же постулат об ограничении скорости **всех** взаимодействий, включая и гравитационные, слабые, ядерные и т.д., нуждается в опытной проверке, предоставить которую пока невозможно. Тоже касается и вопроса о применимости преобразований Лоренца во всех случаях движения **любых** объектов с субсветовыми скоростями.

Многочисленные споры об СТО, зародившиеся вместе с появлением СТО и не утихающие до сих пор, связаны именно с отсутствием прямых экспериментальных доказательств.

Мы не обсуждаем вопрос об истинности СТО, опытная проверка основных положений и выводов СТО дело далекого будущего, но считаем, что внедрение обязательного спецкурса, вызывающего такие споры, в качестве основания для изучения релятивистской электродинамики методически неверным.

И уж тем более, «ставить телегу впереди лошади и утверждать, что телега тащит лошадь»⁴.

Второе, чем отличается релятивистская кинематика (СТО) от релятивистской электродинамики (РЭД) – это применяемый математический аппарат.

Приведем основные уравнения для релятивистской кинематики:

4-координаты — точка в псевдоевклидовом пространстве-времени: $x^\alpha = (ct, x, y, z)$,

4-скорость: $u^\alpha = (c, u_x, u_y, u_z)$,

4-импульс (энергия-импульс): $mu^\alpha = \frac{dm x^\alpha}{d\tau} = (E/c, mu_x, mu_y, mu_z)$.

Аналогичным образом можно определить:

4-ускорение: $w^\alpha = \frac{du^\alpha}{d\tau}$,

4-силу: $F^\alpha = \frac{dm u^\alpha}{d\tau}$.

Здесь x, y, z – пространственные координаты; t – временная координата. Индекс α принимает значения 0, 1, 2, 3.

И уравнения релятивистской электродинамики:

4-потенциал: $A_\mu = (\varphi, A_x, A_y, A_z)$,

⁴ Имеется в виду утверждение Фейнмана, что для изучения релятивистской электродинамики требуется обязательное знание СТО [8, с. 241].

4-ток: $J^\mu = (c, j_x, j_y, j_z)$,

4-тензор электромагнитного поля: $F_{\mu\nu} = \frac{\partial A_\nu}{\partial x^\mu} - \frac{\partial A_\mu}{\partial x^\nu} = \nabla_\mu A_\nu - \nabla_\nu A_\mu$,

компоненты 4-тензора электромагнитного поля представляют собой компоненты $E_x, E_y, E_z, B_x, B_y, B_z$,

4-тензор энергии-импульса электромагнитного поля:

$$T_{\mu\nu} = E_\mu D_\nu + B_\mu H_\nu - \frac{1}{2} \delta_{\mu\nu} (E \cdot D + B \cdot H) = E_\mu D_\nu + B_\mu H_\nu - \delta_{\mu\nu} T_{00}.$$

Компоненты тензора T_{ij} :

$$T_{00} = \frac{1}{2} (E \cdot D + B \cdot H); (T_{01} \quad T_{02} \quad T_{03}) = (T_{10} \quad T_{20} \quad T_{30}) = \frac{1}{c} [E \times H].$$

Пространственные компоненты T_{ij} образуют трехмерный тензор, который называют *максвелловским тензором напряжений* [2, с. 115] или *тензором натяжений Максвелла* [6, с. 32]:

$$T_{\alpha\beta} = \left[E_\alpha E_\beta + H_\alpha H_\beta - \frac{1}{2} \delta_{\alpha\beta} (E^2 + H^2) \right],$$

здесь φ – скалярный потенциал электрического поля, $A = (A_x, A_y, A_z)$ – векторный потенциал; c – скорость света, $j = (j_x, j_y, j_z)$ – вектор плотности тока; $E = (E_x, E_y, E_z)$ – вектор напряженности электрического поля; $D = (D_x, D_y, D_z)$ – вектор индукции электрического поля, $B = (B_x, B_y, B_z)$ – вектор магнитной индукции; $H = (H_x, H_y, H_z)$ – вектор напряженности магнитного поля.

Особенности терминологии

Уточним, индексы μ, ν принимают значения 0, 1, 2, 3. Индексы α, β принимают значения 1, 2, 3. Здесь используется общепринятое правило, что индексы, написанные греческими символами, принимают четыре значения, а латинские – три (в физике и математике это используется по умолчанию, без раскрытия).

Аналитическая часть

Что можно сказать из сравнения приведенных формул, это то, что в уравнения кинематики и в уравнения электромагнитного поля входят разные величины, и не только по названию, а главное разные, в сущности. В уравнения релятивистской кинематики входят пространственные компоненты (и время) пространственно-временного континуума. А в уравнения релятивистской электродинамики входят проекции векторных электрических величин на пространственные координаты, а вместо времени входят скалярные электрические величины.

Кажется, что внешняя форма уравнений релятивистской кинематики и релятивистской электродинамики совпадает. Т.к., индексы μ и ν принимают одинаковые значения (0, 1, 2, 3).

Но это только формальное сходство. Принципиальное различие состоит в том, что в релятивистской кинематике все уравнения векторные, а в релятивистской электродинамике – тензорные.

Разница происходит оттого, что в уравнения электродинамики компоненты электрического и магнитного поля входят в виде векторного произведения. Чего не наблюдается в релятивистской кинематике. А «векторное произведение, по существу, есть не вектор, а антисимметричный тензор второго ранга» [1, с. 30].

Принципиальные различия легко видеть, если сравнить компоненты в тензорной форме⁵ 4-координат, в виде симметричного тензора второго ранга:

$$\begin{pmatrix} t & 0 & 0 & 0 \\ 0 & x & 0 & 0 \\ 0 & 0 & y & 0 \\ 0 & 0 & 0 & z \end{pmatrix}.$$

Ковариантные компоненты тензора электромагнитного поля имеют вид:

$$\begin{pmatrix} 0 & E_x & E_y & E_z \\ -E_x & 0 & -B_z & B_y \\ -E_y & B_z & 0 & -B_x \\ -E_z & -B_y & B_x & 0 \end{pmatrix}.$$

Легко видеть, что для симметричного тензора (вектора) не равны нулю только диагональные элементы, а для антисимметричного тензора – наоборот. Из различия симметричных (в релятивистской кинематике) и антисимметричных (в релятивистской электродинамике) тензоров приводят к различным правилам преобразований.

Так в релятивистской кинематике, если выбрать направление движения в качестве оси \mathcal{X} (то есть так, чтобы система S' двигалась равномерно и прямолинейно со скоростью \mathcal{V} относительно S вдоль оси \mathcal{X}), то преобразования Лоренца примут вид:

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

где c – скорость света.

В случае антисимметричного тензора второго порядка (в релятивистской электродинамике), те же самые преобразования Лоренца при переходе в систему отсчета, движущуюся со скоростью V вдоль оси X , примут вид, например, как для тензора электромагнитного поля:

$$E_x = E'_x, \quad E_y = \frac{E'_y + \frac{v}{c}B'_z}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}, \quad E_z = \frac{E'_z - \frac{v}{c}B'_y}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}},$$

⁵ Любой вектор можно представить в тензорном виде, если умножить его на символ Кронекера, δ_{ij} (Прим. Авт.)

$$B_x = B'_x, \quad B_y = \frac{B'_y - \frac{v}{c} E'_z}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}, \quad B_z = \frac{B'_z + \frac{v}{c} E'_y}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}.$$

В релятивистской кинематике преобразуются только четыре диагональных компонента, а в релятивистской электродинамике преобразуются уже двенадцать компонент, кроме диагональных⁶.

При этом необходимо отметить, что некоторые параметры релятивистской электродинамики можно представить в виде векторов, или в виде симметричных тензоров, например 4-ток. Линейные преобразования симметричных тензоров, хотя и не совпадают полностью, тем не менее, похожи на линейные преобразования векторов.

Поэтому возникает мысль, что причина предварительного изучения СТО (релятивистской кинематики) в том, что векторные уравнения похожи на тензорные. Но при этом существенно проще, когда дело доходит до линейных преобразований. А преобразования Лоренца относятся именно к линейным преобразованиям.

Это мнение ошибочное, т.к., как показано выше, линейные преобразования тензоров подобны линейным преобразованиям векторов только для симметричных тензоров, а для антисимметричных тензоров различия принципиальные.

Обсуждение результатов

Вводить отдельный спецкурс по физике (именно по физике, а не по математике) только из-за формального сходства векторов и тензоров, или потому, что некоторые уравнения можно представить в виде векторных уравнений – весьма сомнительно.

Представляется намного продуктивнее ввести отдельный спецкурс по изучению тензоров (в рамках обязательной математической подготовки), и затем преподавать релятивистскую электродинамику безо всяких ссылок на релятивистскую кинематику (СТО).

К чему приводят сомнительные методики основания релятивистской электродинамики на релятивистской кинематике можно проиллюстрировать на примере ставшего уже классическим Фейнмановского курса лекций.

Так в самом начале главы «Электродинамика в релятивистских обозначениях» Фейнман утверждает «В этой главе мы рассмотрим применение⁷ специальной теории относительности к электродинамике. Мы изучали теорию относительности довольно давно (гл. 15-17, вып. 2), поэтому я здесь коротко напомним основные идеи» [8, с. 241]. И показывает, как 4-векторы логично применяются для описания потенциалов электрического и магнитного полей. Но, уже в следующей главе вынужден признать «Вы можете подумать, что у каждого вектора есть нечто, дополняющее его до четырехвектора, так что, например, с вектором **E** можно связать некую величину, которая сделает его четырехвектором. То же самое относится и к **B**. Увы, это не так. Все оказывается непохожим на то, что можно было ожидать» [8, с. 267].

Далее: «то, что мы нашли, можно сформулировать так: в природе существуют шесть величин, которые представляют различные стороны чего-то одного. Электрическое и

⁶ Нужно помнить, что указанные различия касаются линейных преобразований для антисимметричных тензоров (Прим. Авт.).

⁷ Применяя выражение «применение специальной теории относительности», Фейнман как бы утверждает, что СТО является базовой теорией, а релятивистская электродинамика – как бы одним из приложений (Прим. Авт.)

магнитное поля, которые в нашем обычном медленно движущемся мире (где нас не беспокоит конечность скорости света) рассматривались как отдельные векторы, в четырехмерном пространстве уже не будут ими. Они – часть некоторой новой «штуки». Наше физическое «поле» на самом деле шестикомпонентный объект $F_{\mu\nu}$ [8, с. 269].

Фактически Фейнман подводит к понятию «тензора», но не называет впрямую полученную конструкцию тензором, а называет это «штукой», как будто у полученного шестикомпонентного объекта нет определенного названия. Причем, то, что Фейнман начинает рассмотрение электродинамики с 4-векторов СТО, а заканчивает введением понятия тензора (пусть даже не упоминая слово «тензоры»), не имеющего аналогов в СТО, показывает, что релятивистская электродинамика (РЭД) требует более общей теории тензоров, по сравнению с СТО в которой достаточно теории векторов. А если пытаться обойтись без введения в тензорный анализ, то все равно получится внедрение тензоров, но под неким другим названием, например «шестимерной штуки».

Выводы

1. Релятивистская электродинамика не является частным случаем релятивистской кинематики макроскопических тел (СТО). Поэтому утверждения, что для понимания релятивистской электродинамики необходимо обязательно предварительно изучить СТО – не соответствуют действительности.
2. Для понимания релятивистской электродинамики необходимо обязательное изучение математического курса тензорного анализа, знания лишь векторного анализа не достаточно.
3. Основаниями релятивистской электродинамики являются не выводы из СТО о четырехмерности пространства и ограничения скорости любых взаимодействий не выше скорости света, а экспериментальные факты, что скорость электромагнитных взаимодействий равна скорости света и также подтвержденный экспериментами факт о преобразованиях Лоренца при релятивистских скоростях электромагнитных взаимодействиях.
4. Т.о. основанием для релятивистской электродинамики являются два необходимых постулата: об ограничении скорости электромагнитных взаимодействий и наличие преобразований Лоренца электрического и магнитного полей при субсветовых скоростях, что говорит не только об отсутствии электрического и магнитного полей как отдельных сущностей, а о существовании единого электромагнитного поля.
5. Апеллирование к выводам, следующим из СТО, методически неверно, т.к. ни основные положения, ни выводы, следующие из СТО, экспериментально не проверены по объективным обстоятельствам. В тоже время основные положения релятивистской электродинамики многократно подтверждены экспериментами.
6. **Основной вывод:** преподавание релятивистской электродинамики, особенно для инженерных специальностей вузов, вполне может проводиться без обращения к релятивистской кинематике (СТО), которую достаточно заменить на математический курс тензорного анализа.

ЛИТЕРАТУРА

1. Бухгольц Н.Н. Основной курс теоретической механики. Ч. 1. - М.: Наука. 1965. 468 с.
2. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Теория поля. Изд. 7-е, испр. - М.: Наука, 1988. С. 115. («Теоретическая физика», том II).
3. Мултановский В.В. Курс теоретической физики. Том 2. Классическая электродинамика. - М.: Просвещение. 1990. 272 с.
4. Пановский В., Филипс М. Классическая электродинамика. - М.: Физматгиз. 1963. 432 с.
5. Рекорды в науке и технике. Ракеты и космические корабли, космические полеты // Интернет-ресурс <http://n-t.ru/tp/it/rnt08.htm>.
6. Степановский Ю.П. Максвелла тензор натяжений // Физическая энциклопедия / Гл. ред. А.М. Прохоров. - М.: Большая Российская энциклопедия, 1992. Т. 3. Магнитоплазменный компрессор. Пойнтинга теорема. С. 32-33. 672 с.
7. Терлецкий Я.П., Рыбаков Ю.П. Электродинамика. - М.: Высшая школа. 1990. 352 с.
8. Фейнман Р., Лейтон Р., Сэндс М. Фейнмановские лекции по физике. Вып. 6. Электродинамика. - М.: Мир. 1966. 340 с.
9. Яковлев В.И. Классическая электродинамика: Уч. пособ. - Новосибирск. Новосиб. гос. ун-т. 2014. 176 с.

Kochetkov Andrey Viktorovich

Perm national research polytechnical university, Russia, Perm
E-mail: soni.81@mail.ru

Fedotov Petr Viktorovich

JSC Research Center of Technical Regulation, Russia, Saratov
E-mail: klk50@mail.ru

About classical relativistic electrodynamics (need of teaching a special course on physics)

Abstract. The program of training of students of applied specialties demanding knowledge of relativistic electrodynamics includes an obligatory course of studying of the special theory of relativity. This results from the fact that knowledge of the special theory of relativity is basic for studying of electrodynamics. Especially as relativistic electrodynamics is based on the conclusions following from special theory of relativity.

Actually it not so. Relativistic electrodynamics is based on concept of a uniform electromagnetic field and an extremity of speed of electromagnetic interactions. And, as a result, existence of transformations of Lorentz for all electromagnetic interactions at sublight speeds. To justify these postulates confirmed with numerous experiments doesn't require at all appeal to special theory of relativity in which these postulates, though are present, nevertheless, they aren't confirmed experimentally for movement of the macroscopic objects which aren't interacting by means of an electromagnetic field.

Keywords: special theory of relativity; relativistic electrodynamics; theory of a field; electromagnetism; tensors; Maxwell's equations; experiment; Lorentz's transformations; sublight speeds; speed limit of interaction

REFERENCES

1. Bukhgal'ts N.N. Osnovnoy kurs teoreticheskoy mekhaniki. Ch. 1. - M.: Nauka. 1965. 468 s.
2. Landau L.D., Lifshits E.M. Teoriya polya. Izd. 7-e, ispr. - M.: Nauka, 1988. S. 115. («Teoreticheskaya fizika», tom II).
3. Multanovskiy V.V. Kurs teoreticheskoy fiziki. Tom 2. Klassicheskaya elektrodinamika. - M.: Prosveshchenie. 1990. 272 s.
4. Panovskiy V., Filips M. Klassicheskaya elektrodinamika. - M.: Fizmatgiz. 1963. 432 s.
5. Rekordy v nauke i tekhnike. Rakety i kosmicheskie korabli, kosmicheskie polety // Internet-resurs <http://n-t.ru/tp/it/rnt08.htm>.
6. Stepanovskiy Yu.P. Maksvella tenzor natyazheniy // Fizicheskaya entsiklopediya / Gl. red. A.M. Prokhorov. - M.: Bol'shaya Rossiyskaya entsiklopediya, 1992. T. 3. Magnitoplazmennyy kompressor. Poyntinga teorema. S. 32-33. 672 s.
7. Terletskiy Ya.P., Rybakov Yu.P. Elektrodinamika. - M.: Vysshaya shkola. 1990. 352 s.
8. Feynman R., Leyton R., Sands M. Feynmanovskie lektsii po fizike. Vyp. 6. Elektrodinamika. - M.: Mir. 1966. 340 s.
9. Yakovlev V.I. Klassicheskaya elektrodinamika: Uch. posob. - Novosibirsk. Novosib. gos. un-t. 2014. 176 s.