

# Ревизия теоретических основ релятивистской электродинамики

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

## Часть 5. Лагранжиан взаимодействия двух зарядов

Рассмотрено содержание понятия «взаимодействие» и классический принцип относительности. Показано различие классического принципа относительности и релятивистского. Приведена классификация физических законов. Построен лагранжиан для двух взаимодействующих зарядов.

### 1. Понятие «взаимодействие»

Прежде, чем перейти к описанию взаимодействия зарядов, токов и т.д., мы должны разобраться с понятием «взаимодействие» и познакомиться с классификацией физических законов. Понятие «взаимодействие» играет в физике фундаментальную роль. Мы не сможем обнаружить объект до тех пор, пока он не взаимодействует с каким-либо другим объектом. В Большой Советской энциклопедии о взаимодействии можно прочесть следующее:

«Было **доказано** (выделено нами – *авторы*), что взаимодействие электрически заряженных частиц осуществляется не мгновенно и перемещение одной заряженной частицы приводит к изменению сил, действующих на другие частицы, не в тот же момент времени, а лишь спустя конечное время. В пространстве между частицами происходит некоторый процесс, который распространяется с конечной скоростью. Соответственно существует «посредник», осуществляющий взаимодействие между заряженными частицами. Этот посредник был назван электромагнитной волной»

Мы нигде не встретили в литературе подобных «доказательств». Этот предрассудок, «соединяющий» поля зарядов и поля электромагнитных волн в единое целое без учета различия их свойств, широко распространен в современной физике. Причин этому много и, как об этом писалось в [1], одна из них в том, что ученые «не заметили» возможность нарушения единственности решения волнового уравнения. Другая – ревизия понятия «причинность», хотя физики пользуются мгновенно действующими потенциалами, даже не подозревая этого [1]. Напомним некоторые положения физики, касающиеся принципа относительности.

1. Принцип относительности Галилея: «Прямолинейное и равномерное движение системы отсчета не влияет на ход **механических** процессов в системе».
2. Принцип относительности Галилея – Пуанкаре [2]: «**Все физические** процессы при одинаковых условиях протекают одинаково во всех инерциальных системах отсчета».

Вторую формулировку можно рассматривать как оправданное обобщение принципа относительности Галилея на **любые** процессы в природе. Мы говорим «можно» по той причине, что правильность обобщения зависит не только от правильности формулировки, но и от правильности **реализации** этого обобщения. Примером может служить **правильное** утверждение о наличии у заряда электромагнитной массы и **неправильная реализация**, опиравшаяся на использование вектора Пойнтинга за пределами его применимости.

Эйнштейн реализовал этот принцип следующим способом. Он взял за основу уравнения Максвелла (в калибровке Лоренца), а в качестве преобразования использовал преобразование Лоренца, относительно которого уравнения Максвелла были инвариантны. Интерпретация классической механики была «подправлена» так, чтобы не возникало противоречий между классической и релятивистской механиками при объяснении явлений. Преобразование Лоренца было распространено **на все без исключения процессы** в природе. Однако это обобщение привело к трудностям:

1. Из теории познания известно, что любое конкретное физическое положение (теория, уравнение, закон и т.д.) всегда имеет границы применимости, за которыми оно теряет свою силу. Это положение касается как преобразования Лоренца, так и преобразования Галилея. Каждое преобразование отвечает за **свою область** описания явлений.
2. Математический формализм релятивистской механики оказался некорректным. Релятивистский вариационный принцип не позволял однозначно найти уравнение движения частиц и поля в электродинамике [3], [4].
3. Релятивистская механика сразу же столкнулась с трудностями в объяснении физических явлений (например, «парадокс рычага»). Она внесла массу **гносеологических ошибок** в ньютоновскую механику. Понятие «взаимодействие» подверглось существенной ревизии.

Содержание этого понятия мы сейчас и обсудим. Рассмотрим два объекта, которые взаимодействуют между собой. Это взаимодействие могут наблюдать несколько наблюдателей, находящихся в различных инерциальных системах отсчета. Зависит ли само взаимодействие от того, какую систему отсчета выбрал себе любой из этих наблюдателей?

Правильный ответ на этот вопрос означает **правильность реализации** принципа относительности и его обобщения на **любые** процессы. Разумеется, сами наблюдатели **не могут влиять** на процессы, сопровождающие взаимодействие. Следовательно, взаимодействие **инвариантно** по отношению к выбору наблюдателями систем отсчета. Именно это положение лежало в основе ранней **классической** механики.

Итак, механика Ньютона (изначально) отвечала на этот вопрос **отрицательно**. Взаимодействие тел протекает объективно, независимо от числа наблюдателей и от их выбора инерциальных систем отсчета. Силы взаимодействия и работа, как характеристики взаимодействия, не зависят от выбора системы отсчета наблюдателем.

Напротив, релятивистская механика дает положительный ответ: взаимодействие **зависит** от такого выбора. Как сила, действующая на заряд, так и работа, совершаемая зарядом, зависят от выбора наблюдателем системы отсчета. Как мы видим, содержательная сторона отношения «наблюдатель – взаимодействующие объекты» в этих механиках принципиально **различна**.

Если взаимодействие **действительно** имеет объективный характер (не зависит от волевого выбора инерциальной системы отсчета наблюдателем), тогда релятивистская механика оказывается гносеологически **несостоятельной** теорией, т.е. **неверной** реализацией и неверным обобщением принципа относительности Галилея-Пуанкаре.

Отсюда следует, что иллюстрация, приведенная в БСЭ, некорректна по многим причинам. Автор статьи лукавит или же не понимает суть своего «доказательства». На самом деле, если рассмотреть пример из БСЭ детально, то обнаружим, что фактически имеют место **два** независимых взаимодействия и, по меньшей мере, **четыре** объекта.

**Первое** взаимодействие есть взаимодействие заряда 1 с неким неизвестным объектом, который вызвал ускорение заряда 1 и излучение электромагнитной волны (кулоновским взаимодействием пренебрегаем, хотя оно существует!).

**Второе** взаимодействие есть воздействие электромагнитной волны, рожденной зарядом 1, на заряд 2.

**Объекты:**

- объект, вызвавший ускорение заряда и излучение электромагнитной волны;
- первый заряд;
- электромагнитная волна;
- второй заряд.

Этот некорректный пример был необходим для «обоснования» существования так называемой **предельной скорости** распространения взаимодействий. Подобная скорость есть пред-  
рассудок.

## 2. О принципе относительности

Мы уделяем этому вопросу много внимания только потому, что в современных представлениях постулат о существовании предельной скорости распространения взаимодействий превратился в «закостенелый» предрассудок, для преодоления которого потребуется немало усилий.

Классическая механика Ньютона, в отличие от релятивистской механики, основывается на двух своих главных принципах

- принцип симметрии;
- классический принцип относительности.

Равенство действия противодействию (Третий закон Ньютона) является одним из важных проявлений принципа симметрии. Нарушение этого принципа ведет к нарушению законов сохранения, к самоускоренному поступательному или вращательному движению, к созданию «вечного двигателя».

Классический принцип относительности существенно отличается от соответствующего релятивистского принципа. Поясним сказанное примером.

Рассмотрим два заряда, покоящихся в системе отсчета наблюдателя. Между ними действуют кулоновские силы, которые уравниваются некоторыми механическими силами. Система зарядов устойчива. Перейдем теперь в другую инерциальную систему отсчета. В ней эти заряды будут двигаться относительно наблюдателя с постоянной скоростью  $V$ .

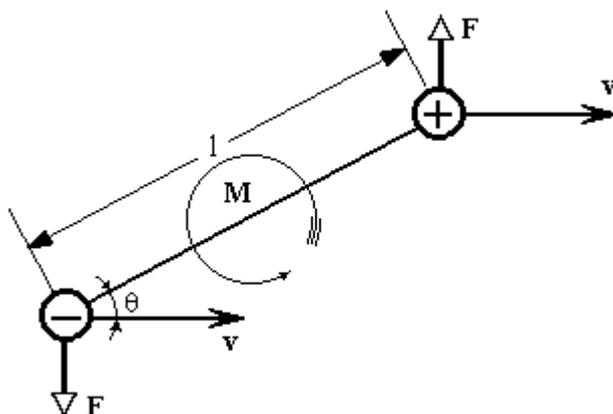


Рис 2. Взаимодействие зарядов

Движущиеся заряды создают свои магнитные поля. Согласно современным представлениям релятивистской механики и «испорченным» ею современным классическим представлениям на один заряд, летящий в магнитном поле, созданном другим зарядом, должна действовать сила со стороны этого магнитного поля. Имеется такое же воздействие поля первого заряда на второй. Следовательно, в новой системе отсчета на уравновешенную систему зарядов должен действовать вращающий момент.

Возникает проблема: действительно ли система зарядов должна повернуться или же она останется в покое? Современная механика не смогла справиться с этим противоречием (эксперимент Траутона и Нобла [5]). В релятивистском исполнении эта проблема получила название «конвективный потенциал» [5].

Причина в том, что нарушен классический принцип относительности. В рамках классической механики силы взаимодействия тел через поля остаются **инвариантными**, независимыми от выбора инерциальной системы отсчета. Это реализуется благодаря тому, что лагранжиан взаимодействия в рамках классической механики зависит только от **относительного** расстояния между взаимодействующими телами и от **относительной** скорости их движения. А эти величины **инвариантны** относительно преобразования Галилея.

Поэтому в рамках классической механики магнитное взаимодействие между такими зарядами будет отсутствовать в любой инерциальной системе отсчета (нет **относительного** движения зарядов). В четвертом параграфе мы вернемся к этому примеру и приведем соответствующие формулы.

### 3. Классификация физических законов

Здесь полезно привести классификацию физических законов [6], хотя бы без обоснования (для справки).

В соответствии с принципом относительности мы можем утверждать, что законы природы **не зависят** от выбора наблюдателем инерциальной системы отсчета. Как следствие форма уравнений (математические операторы) также не должна зависеть от такого выбора.

Но принцип относительности ничего не говорит о **переменных**, на которые действуют инвариантные (пространственно-временные) операторы. Некоторые переменные могут **зависеть** от выбора системы отсчета. Это характеристики явлений. Другие **не зависят** от этого выбора. Они – характеристики сущности. Классификация законов опирается на это различие [7].

1. **Уравнения непрерывности.** Форма закона (уравнения) остается **неизменной** относительно преобразования координат и времени, т.е. не зависит от выбора инерциальной системы отсчета. Но сами переменные, входящие в уравнения (например, потенциалы), зависят от него. Имеет место **отображение** (проецирование, иногда с «искажениями») этих переменных из системы отсчета источника, создающего поля и потенциалы, в систему отсчета, связанную с **наблюдателем**. Примером могут служить уравнение непрерывности для тока, уравнение непрерывности для скалярного потенциала (условие калибровки Лоренца), уравнения Максвелла, инвариантные относительно преобразования Лоренца и т.д.
2. **Уравнения взаимодействия.** Как мы выяснили, взаимодействие есть объективный процесс, не зависящий от выбора наблюдателем инерциальной системы отсчета. Следовательно, форма уравнений сохраняется **неизменной**. Она не преобразуется при переходе наблюдателя из одной системы отсчета в другую. Слагаемые, входящие в уравнения взаимодействия, должны зависеть только от **относительных** расстояний и **относительных** скоростей взаимодействующих объектов. Эта зависимость должна быть таковой, что при переходе наблюдателя из одной инерциальной системы в другую эти относительные величины должны сохраняться **неизменными**, независимыми от выбора инерциальной системы отсчета. Примером могут служить уравнения Ньютона в классической механике.

К двум указанным видам уравнений можно добавить еще два вырожденных вида:

3. **Уравнения статики**, описываемые операторами, зависящими только от координат. Время в них вырождено (отсутствует).
4. **Топологические уравнения.** В этих законах вырождено пространство. Примером топологических уравнений могут служить законы теории электрических цепей (законы Кирхгофа, например).

Именно по этой причине законы **взаимодействия** в приведенной выше классификации **не зависят** от выбора инерциальной системы отсчета.

Дадим определения:

1. Магнитное поле зарядов, порождается движением зарядов и обладает силовыми и энергетическими свойствами; оно может воздействовать на проводник с током с некоторой силой и совершать работу по перемещению этого проводника с током.
2. Индукция магнитного поля в данной точке пространства (силовая характеристика магнитного поля) численно равна силе, действующей на **неподвижный** проводник с током в 1 ампер, длиной 1 метр, расположенный перпендикулярно силовым линиям магнитного поля.

С позиции определения всегда нужно иметь в виду термин «**неподвижный**». С позиции этого определения и с точки зрения классической механики «магнитное» воздействие со стороны движущегося заряда **всегда существует** даже в том случае, если заряд (на который действует поле второго, движущегося заряда) **покоится** в системе отсчета наблюдателя (есть **относительное** движение зарядов!). Но оно всегда **отсутствует**, если нет относительного движения зарядов. Мы говорим о «магнитном» взаимодействии, хотя более правильно было бы говорить о взаимодействии посредством векторного потенциала  $\mathbf{A}$ .

Повторим еще раз для закрепления. Взаимодействие через векторный потенциал  $\mathbf{A}$  отсутствует только тогда, когда нет **относительного** движения зарядов, а вовсе не тогда, когда заряд **покоится** в системе отсчета наблюдателя. Оно возникает всегда, когда есть **относительное** движение взаимодействующих объектов. Если второй заряд движется относительно другого, он создает дополнительное электрическое поле  $\mathbf{E} = -\partial\mathbf{A}/\partial t$  в точке, где покоится первый заряд. Именно оно определяет величину силы воздействия.

В специальной теории относительности «все наоборот». На неподвижный заряд поле векторного потенциала  $\mathbf{A}$ , создаваемое движущимся зарядом, воздействовать не должно, а на движущийся – должно, хотя относительное движение зарядов может **отсутствовать!!!**

Заметим, что взаимодействие зарядов имеет «**пространственный**» характер (действие на расстоянии через поля). Взаимодействие электромагнитной волны с зарядом имеет «**контактный**» характер. Это взаимодействие существует тогда, когда электромагнитная волна «**контактирует**» с зарядом. Здесь мы также усматриваем принципиальное различие.

Итак, классический принцип относительности выражается в независимости взаимодействия зарядов от выбора наблюдателем инерциальной системы отсчета. Это гарантируется тем, что взаимодействие зависит от относительных расстояний между частицами и их относительных скоростей. Классическое описание взаимодействия носит **объективный** характер, в отличие от релятивистского.

#### 4. Релятивистский подход

В работе [8] приводится следующий интеграл действия для взаимодействия заряда с полем (например, с полем другого заряда)

$$S = \int (-mcds + eA_i dx_i) = \int (-mc + eA_i u_i) ds$$

Нас будет интересовать содержание второго члена в подынтегральном выражении. Рассмотрим его.

Обозначим индексом «1» величины, относящиеся к первому заряду, а индексом «2» – ко второму. Для малых скоростей мы получим следующее «красивое» выражение. Оно справедливо только тогда, когда скорости зарядов малы и параллельны друг другу (колинеарны).

$$e_1 u_i^{(1)} A_i^{(2)} = e_1 \phi_2 u_i^{(1)} u_i^{(2)} = -\frac{e_1 \phi_2}{\sqrt{1 - \frac{V_{12}^2}{c^2}}} \approx -e_1 \phi_2 \left[ 1 + \frac{(\mathbf{V}_1 - \mathbf{V}_2)^2}{2c^2} \right] = -\frac{e_1 e_2}{4\pi\epsilon r_{12}} \left[ 1 + \frac{(\mathbf{V}_1 - \mathbf{V}_2)^2}{2c^2} \right] \quad (5.4.1)$$

где  $\mathbf{V}_{12} = \frac{\mathbf{V}_1 - \mathbf{V}_2}{1 - \mathbf{V}_1 \mathbf{V}_2 / c^2}$  – относительная скорость движения зарядов, определяемая формулой сложения скоростей.

Если же скорости зарядов в системе отсчета наблюдателя не колинеарны, то релятивистское выражение получается громоздким и неудобным для анализа. Мы ставим кавычки, говоря о взаимодействии «магнитного» характера, поскольку это взаимодействие определяется векторным потенциалом  $\mathbf{A}$  и «магнитные» силы зависят от  $\text{rot}\mathbf{A}$ ,  $\text{div}\mathbf{A}$  и  $-\partial\mathbf{A}/\partial t$ .

Как следует из формулы, взаимодействие «магнитного» характера определяется **относительным** движением зарядов. Это ведь хорошая «подсказка», которой релятивисты так и не удосужились воспользоваться. Сама природа предоставляла им этот шанс.

Следует заметить, что никаких «запаздываний» в полученном результате нет. Относительная скорость не «запаздывает», да и относительное расстояние, являясь истинным скаляром, сохраняется неизменным в любой инерциальной системе отсчета. Никаких «запаздываний» не будет и в выражении для сил взаимодействия. Так что говорить о волновом (запаздывающем) характере полей зарядов нет оснований. Здесь правильнее говорить о мгновенном взаимном действии симметричного характера. Однако воспользоваться формализмом преобразований Лоренца невозможно по рассмотренным ранее причинам.

Вернемся к объяснению взаимодействия зарядов, рассмотренному в предыдущем параграфе. Если наблюдатель видит два заряда, которые движутся параллельно в одном направлении с одинаковыми скоростями, он регистрирует магнитные поля, создаваемые этими зарядами. Но будет ли влиять магнитное поле одного заряда на движение другого? Очевидно, **нет!** Как следует из (5.4.1) взаимодействие «магнитного» характера выпадает из функции Лагранжа при равенстве скоростей. Взаимодействие будет осуществляться только через электростатическое поле.

Теперь полезно рассмотреть функцию Гамильтона, используемую в современной физике [8]. В классической механике малых скоростей ( $V \ll c$ ) функция Лагранжа для заряда в электромагнитном поле равна:

$$L = \frac{m\mathbf{V}^2}{2} + e\mathbf{V}\mathbf{A} - e\phi \quad (5.4.2)$$

В современной электродинамике вводится обобщенный импульс

$$\mathbf{P} = m\mathbf{V} + e\mathbf{A} = \mathbf{p} + e\mathbf{A}$$

В этом приближении импульс частицы можно выразить через обобщенный

$$\mathbf{p} = m\mathbf{V} = \mathbf{P} - e\mathbf{A} \quad (5.4.3)$$

Опираясь на выражение (5.4.3) функцию Гамильтона записывают в следующей искусственной форме

$$H = \frac{1}{2m}(\mathbf{P} - e\mathbf{A})^2 + e\phi \quad (5.4.4)$$

Такой гамильтониан широко используется в современной физике. Из выражения (5.4.4) с учетом (5.4.3)

следует, что **фактическая** функция  $H$  есть

$$H = \mathbf{V} \frac{\partial L}{\partial \mathbf{V}} - L = \frac{m\mathbf{V}^2}{2} + e\phi = \frac{\mathbf{p}^2}{2m} + e\phi \quad (5.4.5)$$

и в нее **не входит** векторный потенциал  $\mathbf{A}$ .

Итак, векторный потенциал  $\mathbf{A}$  исчезает из выражения (5.4.4) и мы имеем (5.4.5). Мы не отрицаем того, что введение обобщенного импульса в механике бывает полезно. Но вопрос в том, как корректно, не нарушая математической логики, ввести этот импульс. В данном случае мы имеем дело с **фальсификацией**.

Теперь обратимся к выражению (5.4.1). Запишем функцию Лагранжа для двух взаимодействующих зарядов.

$$L = \frac{m_1 V_1^2}{2} - \frac{e_1 e_2}{4\pi\epsilon r_{12}} \left(1 + \frac{(\mathbf{V}_1 - \mathbf{V}_2)^2}{2c^2}\right) + \frac{m_2 V_2^2}{2} \quad (5.4.6)$$

Теперь мы получаем следующее выражение для функции Гамильтона.

$$H = \frac{m_1 V_1^2}{2} + \frac{e_1 e_2}{4\pi\epsilon r_{12}} - \frac{e_1 e_2}{4\pi\epsilon r_{12}} \frac{(\mathbf{V}_1 - \mathbf{V}_2)^2}{2c^2} + \frac{m_2 V_2^2}{2} \quad (5.4.7)$$

Здесь нет необходимости применять некорректные приемы. Более того, опираясь на (5.4.7) можно сделать ряд интересных выводов.

**Во-первых**, как и следовало ожидать, энергия взаимодействия зарядов через электростатическое поле **положительна**. Одноименные заряды отталкиваются, а разноименные – притягиваются.

**Во вторых**, энергия «магнитного» взаимодействия, определяемая третьим членом в правой части (5.4.7), **отрицательна**. А это означает, что параллельные токи одного направления притягиваются, а противоположных направлений отталкиваются. Однако при этом, не следует упускать из внимания, что должна существовать **относительная** скорость движения зарядов. При этом не важно, покоится ли один из зарядов в системе отсчета наблюдателя или же движется. Важно лишь **относительное** перемещение зарядов. Наблюдатель как бы «выпадает» из процесса взаимодействия. Это очевидно, поскольку он не влияет на процесс взаимодействия (см. классификацию физических законов).

Например, если два одноименных заряда **приближаются** друг к другу (или **разлетаются**), то помимо сил электростатического расталкивания будут возникать силы «магнитного» **расталкивания**, увеличивающие кулоновские силы. Но если векторы скоростей зарядов **равны** (нет относительного движения), то «магнитных» сил не будет. Заметим, что Третий принцип Ньютона всегда выполняется!

Теперь становится ясным также и другое. «Вывод» тензора энергии-импульса для полей электромагнитной волны, исходя из «тензора электромагнитного поля»  $F_{ik}$ , **некорректен**. Тензор  $F_{ik}$  не содержит запаздывающих потенциалов. В то же время этот тензор используется для того, чтобы получить плотность функции Лагранжа и тензор энергии-импульса для полей запаздывающих потенциалов волны и для описания их энергетических характеристик. Это весьма нелогично.

*(Окончание следует)*

#### Источники информации:

1. Кулигин В.А., Кулигина Г.А., Корнева М.В. Проблемы волновой электродинамики. НиТ, 2002. <http://n-t.ru/tp/ns/pve.htm>.
2. Кулигин В.А., Кулигина Г.А., Корнева М.В. Новое объяснение релятивистских явлений. НиТ, 2002. <http://n-t.ru/tp/ns/no.htm>.
3. Кулигин В.А.. Интеграл действия релятивистской механики./ Проблемы пространства, времени, тяготения. – С.-Петербург.: Политехника, 1997.
4. Кулигин В.А., Кулигина Г.А., Корнева М.В. Кризис релятивистских теорий, часть 4. (Вариационный принцип релятивистских теорий). НиТ, 2001. (<http://n-t.ru/tp/ns/krt.htm>).
5. Пановски В., Филипс М.. Классическая электродинамика. М., ГИФФМЛ, 1968.
6. Кулигин В.А., Кулигина Г.А., Корнева М.В. Проблемы квазистатической электродинамики. НиТ, 2003. (<http://n-t.ru/tp/ns/pke.htm>).
7. Кулигин В.А., Кулигина Г.А., Корнева М.В. Физика и философия физики. НиТ, 2001. (<http://n-t.ru/tp/ns/fff.htm>).
8. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Теория поля. – М.: «ФИЗМАТГИЗ», 1963.

**Дата публикации:**

29 декабря 2004 года

**Электронная версия:**

© «Наука и техника», [www.n-t.org](http://www.n-t.org)