

РЕЛЯЦИОННЫЙ ПРИНЦИП ПОЛНОГО ПОГЛОЩЕНИЯ

А.Г. Жилкин¹

Институт астрономии Российской академии наук

В работе обсуждается принцип полного поглощения, играющий в реляционной теории такую же роль, как принцип эквивалентности в общей теории относительности и принцип корпускулярно-волнового дуализма в квантовой теории. Физическая суть этого принципа сводится к тому, что во Вселенной должно присутствовать достаточно большое количество частиц для того, чтобы было возможно полное поглощение излучения любого источника. Отсюда следует полная эквивалентность с точки зрения эксперимента прямого межчастичного взаимодействия и взаимодействия, переносимого локальным полем в пространстве-времени. Отмечено, что в своей классической трактовке вариационный принцип Фоккера, на котором основана теория прямого межчастичного взаимодействия, содержит дилемму, обусловленную двумя взаимно противоречивыми необходимыми свойствами действия взаимодействия. Предложен один из вариантов преодоления этой дилеммы.

Ключевые слова: реляционная теория, пространство-время, электромагнитное поле, прямое межчастичное взаимодействие.

Введение

В теоретической физике с помощью соображений метафизического характера можно выделить три типа парадигм: *триалистические*, *дуалистические* и *монистические* [1]. Теории, основанные на триалистических парадигмах, опираются на три базовые категории: *частиц*, *пространства-времени* и *поля*, которые рассматриваются как самостоятельные и независимые. Общая теория относительности и квантовая теория являются теориями, основанными уже на дуалистической парадигме. Это означает, что в основе каждой из них лежат не три, а всего лишь две категории теоретической физики. Поэтому они представляют собой следующий, более глубокий уровень описания физической реальности, в котором предполагается, что базовые категории частиц, пространства-времени и поля, вообще говоря, уже не являются отдельными и независимыми. Поэтому в этих теориях одних только базовых категорий уже оказывается недостаточно и для описания взаимодействия необходимо привлечь более глубокие и сложные понятия, основанные на соответствующих *сверхкатегориях*. В общей теории относительности используется сверхкатегория *искривленного пространства-времени*, а в квантовой теории – сверхкатегория *квантового поля*. Однако отсюда следует, что

¹ Эл. адрес: zhilkin@inasan.ru

в теоретической физике должна существовать ещё и третья теория, которая соответствует реляционной физике [2; 3]. Основной задачей реляционной теории является изучение природы пространства-времени как физического феномена [4; 5].

Основные принципы реляционной физики, её задачи, а также некоторые идеи, связанные с ней были изложены в работе автора [2]. В работе [4] была предложена программа последовательного построения реляционной теории. В работе [5] обсуждался первый этап реализации этой программы. Было показано, что динамические уравнения реляционной теории в пределе должны переходить в уравнения, описывающие динамику трёхмерной пространственной гиперповерхности, составленной из непрерывного континуума произвольным образом движущихся частиц и соответствующей равному значению их собственного времени. С целью последующего перехода к сверхкатегории *реляционных частиц* (второй этап программы) обсуждался также вопрос об интерпретации метрики динамически изменяющейся пространственной гиперповерхности в случае дискретного множества частиц. Такой подход позволяет в динамических уравнениях выразить величины, относящиеся к базовой категории пространства, через подходящие величины, относящиеся к базовой категории частиц. Например, метрика пространственной гиперповерхности может быть выражена через метрические отношения (парные корреляции) между частицами.

В данной работе обсуждается основной физический принцип реляционной теории, играющий в ней роль, аналогичную роли принципа эквивалентности в общей теории относительности и принципа корпускулярно-волнового дуализма в квантовой теории. С метафизической точки зрения он обеспечивает согласованность сверхкатегории реляционных частиц с её базисом – категорией частиц. Физическая суть этого принципа сводится к тому, что во Вселенной должно присутствовать достаточно большое количество частиц для обеспечения возможности полного поглощения излучения от любого источника.

1. Вариационный принцип Фоккера

Для описания электромагнитного взаимодействия наряду с классической электродинамикой, основанной на уравнениях Максвелла – Лоренца, развивался и альтернативный подход. Он получил название теории прямого межчастичного взаимодействия. Исходная идея была высказана Тетроде [6], вариационный принцип был сформулирован Фоккером [7], а в наиболее развитой своей форме эта теория изложена в работах Уилера и Фейнмана [8; 9].

Прежде чем переходить к описанию релятивистского принципа Фоккера, проанализируем сначала более простой случай нерелятивистского движения [10]. Рассмотрим две частицы с массами m_1 , m_2 и зарядами q_1 , q_2 . Их радиусы-векторы обозначим как \mathbf{r}_1 , \mathbf{r}_2 , а \mathbf{r}_{12} – вектор, проведенный из частицы 1 в частицу 2, $\mathbf{r}_{12} = \mathbf{r}_2 - \mathbf{r}_1$. Полное действие для этой системы частиц можно записать в виде

$$S = \int_{t_1}^{t_2} \left(\frac{m_1 \dot{\mathbf{r}}_1^2}{2} + \frac{m_2 \dot{\mathbf{r}}_2^2}{2} + \frac{q_1 q_2}{r_{12}} \right) dt. \quad (1)$$

Здесь первые два слагаемые в подынтегральном выражении определяют свободные действия частиц, а последнее слагаемое – действие взаимодействия, которое связано с кулоновской энергией $U_{12} = -q_1 q_2 / r_{12}$.

Отметим важное обстоятельство: действие взаимодействия, как и полное действие (1), обладают симметрией относительно перенумерации частиц. Иными словами, если первую частицу обозначить индексом 2, а вторую – индексом 1, то выражение (1) при этом не изменится. Это обстоятельство позволяет из вариационного принципа получать как уравнение движения для отдельной (избранной) частицы, так и полную систему уравнений сразу для всей совокупности частиц. В самом деле, если мы будем считать движение частицы 2 известным и варьировать только траекторию частицы 1, то мы получим уравнение движения частицы 1. Это уравнение определяет ускорение $\ddot{\mathbf{r}}_1$ частицы 1 под действием кулоновской силы от частицы 2, $\mathbf{F}_{12} = -(q_1 q_2 / r_{12}^3) \mathbf{r}_{12}$. Аналогичную операцию можно проделать и с частицей 2, получив соответствующее уравнение движения. При этом сила, действующая на частицу 2 со стороны частицы 1, оказывается равной $\mathbf{F}_{21} = -\mathbf{F}_{12}$ в соответствии с третьим законом Ньютона. Однако симметрия действия относительно перенумерации частиц позволяет нам варьировать траектории всех частиц одновременно и, считая эти вариации независимыми, получить уравнения движения сразу для всей системы. Очевидно, что все эти рассуждения можно обобщить на произвольное количество частиц.

Фоккер в 1929 года показал [7], что релятивистским обобщением формулы (1) является выражение

$$S = -m_1 c \int ds_1 - m_2 c \int ds_2 - \frac{q_1 q_2}{c} \int ds_1 \int ds_2 \mathbf{u}_1 \cdot \mathbf{u}_2 \delta(s_{12}^2), \quad (2)$$

где ds_1 и ds_2 – элементы мировых линий частиц, $\mathbf{u}_1(s_1)$, $\mathbf{u}_2(s_2)$ – четырехмерные векторы скоростей частиц, а $s_{12}^2 = s_{12}^2(s_1, s_2)$ – квадрат интервала между частицами. Первые два члена в правой части описывают свободные действия для частиц 1 и 2, а последнее слагаемое определяет действие взаимодействия. Замечательной особенностью действия взаимодействия в (2) является то, что оно содержит полусумму запаздывающего и опережающего воздействия (см. левую диаграмму на рис. 1). Иными словами, запаздывающие и опережающие потенциалы входят в теорию симметричным образом.

Введем векторный потенциал

$$\mathbf{A}(1, 2) = q_2 \int ds_2 \mathbf{u}_2 \delta(s_{12}^2). \quad (3)$$

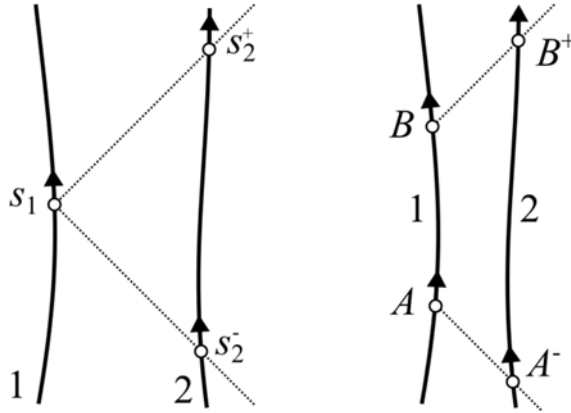


Рис. 1. Мировые линии двух взаимодействующих частиц 1 и 2 (слева). Пунктирным линиям соответствует поверхность светового конуса, вершина которого расположена в точке текущего положения частицы 1. Справа показана соответствующая диаграмма для конечного интервала мировой линии частицы 1

Он определяет электромагнитное поле, создаваемое частицей 2 и действующее на частицу 1. Будем варьировать траекторию частицы 1, считая траекторию частицы 2 заданной. Тогда вариацию действия (2) можно представить в следующем виде:

$$\delta S = \delta \left\{ -mc \int_A^B ds - \frac{q}{c} \int_A^B ds \mathbf{u} \cdot \mathbf{A} \right\}. \quad (4)$$

Номера частиц в этом выражении можно уже не писать, поскольку оно записано для выделенной частицы. В точках A и B положение частицы считается фиксированным. Вычисляя вариацию по обычным правилам и используя принцип наименьшего действия, находим уравнение движения [9]:

$$mc \frac{d\mathbf{u}}{ds} = \frac{q}{c} \hat{\mathbf{F}} \cdot \mathbf{u}, \quad (5)$$

где $\hat{\mathbf{F}}$ – тензор электромагнитного поля, компоненты которого определяются выражениями

$$F_{\mu\nu}(1) = \frac{\partial}{\partial x_1^\mu} A_\nu(1,2) - \frac{\partial}{\partial x_1^\nu} A_\mu(1,2). \quad (6)$$

В 1945 году Уилер и Фейнман показали [8], что уравнение (5) не противоречит эксперименту, если во Вселенной имеется *абсолютный поглотитель*. С точки зрения дуалистической реляционной теории такой вывод связан с физическим принципом, определяющим согласованность свёрхкатегории (реляционные частицы) с базисом (частицы). Его можно назвать *принципом полного поглощения* [11]. Этот принцип в реляционной физике играет такую же роль, какую играют принцип эквивалентности в общей теории отно-

сительности и принцип корпускулярно-волнового дуализма в квантовой теории. Физическое содержание принципа полного поглощения сводится к тому, что количество частиц в мире должно быть достаточно большим для того, чтобы полностью поглотить излучение любого источника. В математической форме этот принцип выражается равенством

$$\sum_b \left[F_{\mu\nu}^{\text{ret}}(a, b) - F_{\mu\nu}^{\text{adv}}(a, b) \right] = 0. \quad (7)$$

Здесь индексы a и b нумеруют частицы, $F_{\mu\nu}(a, b)$ – тензор электромагнитного поля, создаваемого частицей b в точке нахождения частицы a , а символы *ret* и *adv* определяют запаздывающие и опережающие потенциалы. Суммирование проводится по всем частицам, в том числе и с учетом частицы a .

В работе [8] показано, что при условии точного выполнения этого равенства экспериментатор не сможет обнаружить разницу в описании динамики системы парно взаимодействующих заряженных частиц в рамках теории прямого межчастичного взаимодействия и в рамках классической электродинамики [12]. Иначе говоря, в экспериментах нельзя будет узнать, взаимодействуют ли частицы между собой напрямую без каких-либо посредников или же процесс происходит в пространстве, а все взаимодействия передаются электромагнитным полем, динамика которого определяется уравнениями Максвелла. Совокупность всех частиц мира представляет собой полный поглотитель. Любые излучения, исходящие от него, будут в нём же и поглощены.

Таким образом, наличие полного поглощения в системе парно взаимодействующих частиц будет с точки зрения эксперимента эквивалентно тому, что весь процесс происходит в пространстве, а все взаимодействия передаются электромагнитным полем, динамика которого определяется уравнениями Максвелла. Иными словами, проявление полного поглотителя в системе парно взаимодействующих дискретных частиц в экспериментах ничем не отличается от проявления пространства в системе частиц, взаимодействующих посредством электромагнитного поля [11].

Напомним, что в общей теории относительности принцип эквивалентности носит локальный характер, поскольку он формулируется для малой окрестности данной точки пространства-времени. Принцип эквивалентности позволяет из чисто логических рассуждений прийти к выводу о том, что гравитационное поле необходимо описывать на основе сверхкатегории искривленного пространства-времени. В реляционной теории сформулированный выше принцип полного поглощения, напротив, носит не локальный, а глобальный характер. Он формулируется для всей совокупности частиц Вселенной. Как и в случае общей теории относительности, этот принцип позволяет прийти к необходимости новой дуалистической сверхкатегории. В самом деле, поскольку характер движения данной частицы определяется состоянием всех остальных частиц Вселенной (абсолютный поглотитель), в общем случае мы уже не можем рассматривать частицы как самостоятельные и независимые объекты. Они формируют единую связанную систему, которую

следует рассматривать как нечто цельное. Эту систему и нужно ассоциировать со сверхкатегорией реляционных частиц. Очевидно, что для описания такой системы одних только классических представлений будет недостаточно. Необходимо привлекать какие-то новые неклассические подходы.

2. Дилемма Фоккера

Напомним, что нерелятивистское действие (1) обладает свойством симметрии относительно перенумерации частиц. Действие Фоккера (2) на первый взгляд также выглядит симметрично относительно такой операции. Однако более детальный анализ показывает, что это не так. Если попытаться проварьировать действие Фоккера (2) сразу по траекториям обеих частиц, как для нерелятивистского действия (1), то мы столкнемся со следующей проблемой. Дело в том, что, если ограничить траекторию первой частицы пределами A и B , как в формуле (4), то во внутреннем интеграле в третьем слагаемом в правой части (2) этот интервал придется расширить до некоторых пределов A^- и B^+ , поскольку влияние второй частицы учитывается с запаздыванием или опережением во времени. Эта ситуация поясняется на правой диаграмме рис. 1. Очевидно, что в таком случае действие взаимодействия (а значит, и полное действие (2)) уже не будет обладать симметрией относительно перестановок номеров частиц, поскольку интегралы по элементам ds_1 и ds_2 берутся по разным интервалам. Эта проблема усугубляется еще больше, если мы будем рассматривать действие (2) для произвольного количества частиц.

Таким образом, у нас возникает *дилемма*, обусловленная двумя взаимно-противоречивыми необходимыми свойствами действия Фоккера (2). С одной стороны, это действие, как функционал, должно быть конечной величиной. Это означает, что интегралы в (2) должны вычисляться по конечным пределам. С другой стороны, действие (2) должно быть симметричным относительно перенумерации частиц. Это необходимо для того, чтобы вариационный принцип Фоккера был универсальным для всей совокупности частиц. Заметим, что эти два свойства удовлетворяются одновременно в нерелятивистском случае в выражении (1). В релятивистском случае из-за запаздывающего и опережающего характера воздействий частиц одновременно удовлетворить этим двум свойствам оказывается невозможным. Это обусловлено тем, что для выполнения второго свойства (симметрия по частицам) фактически необходимо рассматривать бесконечные интервалы интегрирования. Но в этом случае действие становится бесконечной величиной и, следовательно, условие его минимума теряет смысл.

С точки зрения реляционной теории бесконечные пределы интегрирования, при которых восстанавливается полная симметрия действия по частицам, по-видимому, обусловлены бесконечным во времени характером пространства Минковского, в котором временная координата изменяется от $-\infty$ до $+\infty$. Мировые линии частиц в таком пространстве, действительно, будут простирались во времени от $-\infty$ до $+\infty$. Поэтому с точки зрения категории реляционных частиц требование бесконечных интервалов интегрирования

автоматически означает бесконечное во времени пространство-время. И наоборот, если интервалы интегрирования каким-либо образом удастся ограничить, то это будет означать конечное во времени пространство-время. В этом случае пространство Минковского будет всего лишь некоторым приближением для описания структуры реального пространства-времени.

Второй важный момент заключается в следующем. Если мы в действии используем произвольный интервал времени от момента A до момента B , то его всегда при желании можно стянуть в бесконечно малый интервал, когда $B = A + \Delta A$. Это приводит к тому, что соответствующая теория оказывается локальной по времени, то есть в ней состояние системы в данный момент времени полностью определяется непосредственным (бесконечно близким) прошлым состоянием. В частности, при использовании квантового формализма Фейнмана [13] суммирования фазовых вкладов по траекториям и вычисления соответствующей амплитуды перехода из состояния A в состояние B получается уравнение Шредингера, которое также является локальным по времени.

Если же у нас интервал интегрирования является бесконечным или не является произвольным, то мы принципиально не сможем стянуть его в бесконечно малый интервал. В этом случае у нас получится теория нелокальная по времени. Иначе говоря, состояние системы в данный момент времени будет определяться всеми ее состояниями в прошлом (запаздывающие потенциалы) и в будущем (опережающие потенциалы). Соответственно, при использовании формализма Фейнмана суммирования по траекториям (если его, вообще, окажется возможным применять) у нас также должно возникнуть уравнение (аналог уравнения Шредингера) нелокальное по времени.

Важно понять, что сформулированная дилемма носит принципиальный характер. Поэтому ее невозможно преодолеть, оставаясь в рамках классических представлений. Наличие этой дилеммы указывает на некие неклассические свойства категории реляционных частиц. Это означает, что и свойства пространства-времени в реляционной теории должны существенно отличаться от классических.

3. Возможный вариант преодоления дилеммы

Рассмотрим замкнутую мировую линию частицы массой m_1 и зарядом q_1 . Эта ситуация изображена на левой диаграмме рис. 2. В точках A и B характер движения частицы меняется на попятный. В точке A частица изменяет обратное движение во времени на прямое. В точке B все происходит наоборот – до этой точки частица движется вперед во времени, а после этой точки начинает двигаться в обратном направлении во времени.

Для того чтобы не нарушался принцип причинности, необходимо положить, что в вершинах A и B мировая линия испытывает излом. Иначе говоря, в этих точках линии слева и справа сходятся внутри светового конуса (то есть под острым углом). Поэтому взаимодействие происходит только на участках 1 и 2, лежащих между точками A и B . Например, световой конус с вершиной, расположенной в точке B , нигде не пересекает мировую линию

(см. правую диаграмму на рис. 3). Поэтому (если не принимать во внимание наличие других частиц) частица, находящаяся в точке B своей мировой линии, ни с чем не взаимодействует. Следовательно, мы можем рассматривать такую ситуацию как две отдельные частицы 1 и 2, движущиеся между точками A и B . Но при этом частица 1 движется вперед во времени, а частица 2 – назад.

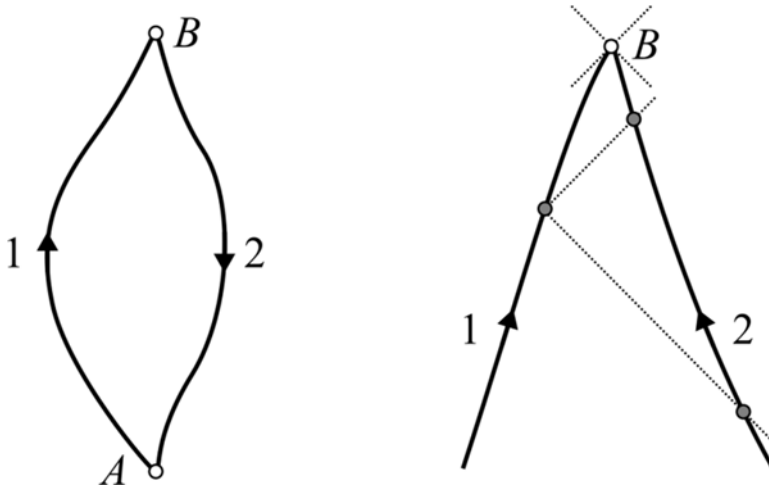


Рис. 2. Замкнутая мировая линия частицы (слева).
Свойства мировой линии вблизи вершины B (справа)

Согласно идее Фейнмана [13], частицу 2 следует интерпретировать, как *античастицу*, движущуюся вперед во времени. Если частица 1 имеет инертную массу m_1 и заряд q_1 , то античастица 2 имеет такую же инертную массу m_1 , но противоположный заряд $-q_1$. Поэтому в теории Фоккера мы можем описать данную ситуацию классическим образом на основе взаимодействия частицы и античастицы, которые существуют с момента рождения пары (точка A) и вплоть до момента их аннигиляции (точка B).

Может возникнуть вопрос о том, следует ли нам вообще учитывать взаимодействие таких частиц. Ведь с точки зрения нашего подхода это одна и та же частица, но изменяющая направление своего движения во времени. Напомним, что в теории Фоккера взаимодействие частицы с самой собой (самодействие) не учитывается. Действие взаимодействия в принципе Фоккера описывает только парное взаимодействие разных частиц. Однако необходимость учета в теории самодействия частицы на участках 1 и 2 замкнутых мировых линий подтверждается многочисленными непосредственными экспериментами. В качестве примера укажем на наблюдаемые свойства *позитрония* [14. С. 390]. Это система, состоящая из электрона и позитрона, которая является аналогом атома водорода. Однако в позитронии роль протона играет позитрон. Уровни энергии позитрония, которые можно рассчитать теоретически из уравнения Шредингера, подтверждаются экспериментом. Это, в частности, означает, что позитроний представляет собой

связанную систему, то есть электрон и позитрон в этой системе взаимодействуют между собой, как электрон и протон в атоме водорода. Вместе с тем хорошо известно, что время жизни позитрония конечно. Для парапозитрония (спины электрона и позитрона направлены в одну сторону) время жизни равно 0,125 нс. Для ортопозитрония (спины электрона и позитрона направлены в противоположные стороны) время жизни составляет 143 нс. После этого происходит аннигиляция электрона и позитрона. Но это означает, что позитроний состоит из одной и той же частицы, которая в момент аннигиляции изменила характер своего движения во времени на обратный. Таким образом, частица (электрон) в позитронии на участках 1 и 2 своей мировой линии вплоть до точки B , соответствующей моменту аннигиляции, взаимодействует сама с собой. Поэтому такое взаимодействие мы должны учитывать.

Запишем классические свободные действия для частицы 1 и античастицы 2, движущихся вперед во времени:

$$S_{\text{free}}(1) = -m_1 c \int_A^B ds_1, \quad (8)$$

$$S_{\text{free}}(2) = -m_1 c \int_A^B ds_2. \quad (9)$$

Перепишем действие (9) для античастицы, движущейся вперед во времени, в виде действия для частицы, движущейся назад во времени:

$$S_{\text{free}}(2) = -m_1 c \int_B^A d\tilde{s}_2, \quad (10)$$

где произведена замена переменной: $\tilde{s}_2 = -s_2$. Обратим внимание на перемену местами пределов интегрирования в (10) по сравнению с выражением (9). Теперь для частицы 2 точка B является началом, а точка A – концом траектории. Для наглядности действие (8) также можно переписать аналогичным образом:

$$S_{\text{free}}(1) = -m_1 c \int_A^B d\tilde{s}_1, \quad (11)$$

где $\tilde{s}_1 = s_1$. Имеется в виду, что в выражениях (11) и (10) в отличие от (8) и (9) элементы интегрирования $d\tilde{s}_1$ и $d\tilde{s}_2$ ориентированы вдоль стрелок.

Действие взаимодействия для частицы 1 и античастицы 2, движущихся вперед во времени, имеет вид

$$S_{\text{int}}(1, 2) = \frac{q_1^2}{c} \int_A^B ds_1 \int_A^B ds_2 \mathbf{u}_1 \cdot \mathbf{u}_2 \delta(s_{12}^2). \quad (12)$$

Переходя к обозначениям для частиц, движущихся вдоль стрелок, получим

$$S_{\text{int}}(1, 2) = -\frac{q_1^2}{c} \int_A^B d\tilde{s}_1 \int_B^A d\tilde{s}_2 \tilde{\mathbf{u}}_1 \cdot \tilde{\mathbf{u}}_2 \delta(s_{12}^2). \quad (13)$$

Знак «минус» перед интегралом в этом выражении возник из-за того, что мы три раза изменили знак: замена $\tilde{s}_2 = -s_2$, перемена мест пределов интегрирования во внутреннем интеграле и замена знака у скорости $\tilde{\mathbf{u}}_2 = -\mathbf{u}_2$.

Таким образом, полное действие для частицы, движущейся по замкнутой мировой линии, имеет следующий вид:

$$S = -m_1 c \int_A^B d\tilde{s}_1 - m_1 c \int_B^A d\tilde{s}_2 - \frac{q_1^2}{c} \int_A^B d\tilde{s}_1 \int_B^A d\tilde{s}_2 \tilde{\mathbf{u}}_1 \cdot \tilde{\mathbf{u}}_2 \delta(s_{12}^2). \quad (14)$$

Здесь все интегралы вычисляются по конечным интервалам. В третьем слагаемом в правой части интегралы можно менять местами и поэтому действие симметрично относительно перенумерации частиц. Если зафиксировать траекторию второй частицы, то вариация траектории первой частицы с учетом принципа наименьшего действия дает уравнение движения первой частицы в форме Уилера–Фейнмана (5). Обратное утверждение также верно. Если зафиксировать траекторию первой частицы, то вариация траектории второй частицы дает аналогичное уравнение ее движения. Однако в выражении (14) теперь можно независимо варьировать сразу обе траектории, фиксируя их только в точках A и B . В результате можно получить систему двух уравнений в форме Уилера–Фейнмана для частиц 1 и 2.

Заметим, что в данном примере точки A и B , как пределы интегрирования, не могут быть произвольными. Они соответствуют вполне конкретным физическим процессам. Точка A соответствует рождению пары частица–античастица. Точка B – аннигиляции этой пары. Поэтому, например, мы не можем стянуть пределы интегрирования к бесконечно-малому интервалу.

В общем случае каждая частица существует конечное время между рождением (в паре с античастицей) и уничтожением (в аннигиляции с античастицей). При этом, вообще говоря, конкретная частица необязательно должна рождаться и уничтожаться в паре с одной и той же античастицей. Она может родиться в паре с одной античастицей, а уничтожиться в паре с другой античастицей.

Для произвольных двух частиц действие взаимодействия на гладких участках их мировых линий (рис. 3) будет иметь вид

$$S_{\text{int}}(1, 2) = -\frac{q_1 q_2}{c} \int_{i_1}^{f_1} d\tilde{s}_1 \int_{i_2}^{f_2} d\tilde{s}_2 \tilde{\mathbf{u}}_1 \cdot \tilde{\mathbf{u}}_2 \delta(s_{12}^2), \quad (15)$$

где i_1, i_2 – начальные точки частиц, f_1, f_2 – конечные точки частиц, $\tilde{s} = s$, $\tilde{\mathbf{u}} = \mathbf{u}$, если частица движется вперед во времени, $\tilde{s} = -s$, $\tilde{\mathbf{u}} = -\mathbf{u}$, если частица движется назад во времени. Формально вид действия (15) точно такой же, как и у Фоккера для классических частиц, движущихся вперед во времени.

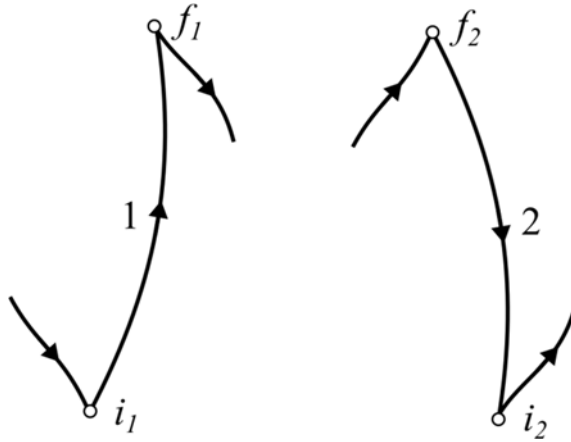


Рис. 3. Взаимодействие двух произвольных частиц на гладких участках их мировых линий

Поскольку начальные i и конечные f точки в любых выражениях вида (15) не являются произвольными, а определяются физическими процессами рождения и уничтожения частиц, пределы интегрирования так же, как и в случае отдельной замкнутой мировой линии, невозможно стягивать к бесконечно малому интервалу, когда конечные точки отличаются от начальных на бесконечно малую величину. Это означает, что теория будет нелокальной по времени и в общем случае, даже несмотря на то, что используются конечные интервалы, а не бесконечные, как в оригинальной трактовке Фоккера. В частности, при использовании формализма Фейнмана и суммирования по траекториям (если он окажется здесь применимым) также нельзя будет получить локальную по времени теорию. Соответствующее уравнение (аналог уравнения Шредингера) для амплитуды вероятности не будет локальным по времени.

4. Обсуждение и заключение

В данной работе проанализирован основной физический принцип дуалистической реляционной теории [2–5], определяющий согласованность сверхкатегории (реляционные частицы) с базисом (частицы). Этот принцип в реляционной физике играет такую же роль, какую играют принцип эквивалентности в общей теории относительности и принцип корпускулярно-волнового дуализма в квантовой теории. В качестве такого принципа в работе [11] предложено использовать принцип полного поглощения Уилера–Фейнмана [8]. Его суть сводится к тому, что количество частиц во Вселенной должно быть достаточно большим для того, чтобы полностью поглотить излучение любого

источника. Иными словами, система частиц должна вести себя как абсолютный поглотитель, полностью поглощая внутри себя любые производимые собой излучения.

В математической форме этот принцип выражается равенством (7). При условии точного выполнения этого равенства с точки зрения эксперимента нет никакой разницы в описании динамики системы парно взаимодействующих заряженных частиц в рамках теории прямого межчастичного взаимодействия и в рамках классической электродинамики. Это означает, что в экспериментах нельзя будет обнаружить какое-либо отличие между прямым взаимодействием частиц и их взаимодействием в пространстве посредством электромагнитного поля. В общей теории относительности согласно принципу эквивалентности мы можем сказать, что гравитационное поле локально проявляется в экспериментах точно так же, как и поля инерции. В реляционной теории согласно принципу полного поглощения мы можем сказать, что пространство глобально проявляется в экспериментах точно так же, как и полный поглотитель. Если выражаться совсем кратко, можно сказать, что глобально пространство эквивалентно абсолютному поглотителю.

Принцип полного поглощения сформулирован для электромагнитного взаимодействия на основе теории Фоккера. В основе этой теории лежит соответствующий вариационный принцип. В данной работе отмечено, что действие Фоккера (2) содержит дилемму, суть которой сводится к следующему. С одной стороны, это действие, как функционал, должно быть конечной величиной. В противном случае условие минимума этого функционала теряет смысл. С другой стороны, действие должно быть симметричным относительно перенумерации частиц. В противном случае какие-то частицы неминуемо окажутся выделенными. Анализ показывает, что сформулированная дилемма имеет принципиальный характер и ее, по-видимому, невозможно преодолеть, оставаясь в рамках классических представлений. Скорее всего, она указывает на некие неклассические свойства категории реляционных частиц.

В качестве одного из способов преодоления этой дилеммы в работе предложено рассматривать участки мировых линий частиц между актами рождения и уничтожения. В этих актах всегда участвуют пары, состоящие из частицы и античастицы. Поэтому в простейшем случае мы будем иметь замкнутую мировую линию частицы. На участке с прямым движением во времени мы должны интерпретировать ее как обычную частицу. На участке с попятным движением во времени мы должны интерпретировать ее как соответствующую античастицу, движущуюся вперед во времени. Такой подход позволяет записать все интегралы в действии Фоккера в виде определенных интегралов с конечными пределами. Однако эти пределы интегрирования не являются произвольными, а определяются физическими процессами рождения и уничтожения частиц. Поэтому их невозможно стянуть к бесконечно малому интервалу и, следовательно, теория будет нелокальной по времени.

Следует, однако, отметить, что при использовании такого подхода появляются как минимум две трудности, которые, впрочем, являются

трудностями совершенного другого рода и связаны не с самой реляционной теорией, а с проблемами более общего характера. Первая проблема касается того, что при приближении к точкам A и B замкнутой мировой линии (см. левую диаграмму на рис. 2), где происходит смена режима движения, сходятся в одной точке частица и античастица. Поэтому в этих точках энергия электромагнитного взаимодействия частицы и античастицы становится бесконечной. Следовательно, если мы будем вычислять действие взаимодействия для замкнутой мировой линии, то, даже несмотря на конечные интервалы интегрирования, соответствующие интегралы окажутся все равно расходящимися. Фактически это означает, что в точках A и B мы должны учитывать бесконечную собственную электромагнитную энергию частицы, которая, как известно из классической электродинамики [12], является бесконечной. В классической электродинамике считается, что на расстояниях порядка классического радиуса частицы $R = q^2 / mc^2$ теория становится внутренне противоречивой. Для электрона эта величина равна примерно 10^{-13} см. Следует заметить, что квантовые эффекты начинают играть существенную роль уже на расстояниях порядка 10^{-10} см, которые соответствуют собственной длине волны электрона $\lambda = 2\pi\hbar / mc$.

В квантовой электродинамике [14] считается, что вблизи электрона (на расстояниях порядка его классического радиуса) напряженность электрического поля настолько велика, что его энергии хватает на формирование электронно-позитронных пар. Эти пары в электрическом поле электрона поляризуются и частично экранируют его. Исходное поле электрона в экспериментах наблюдать невозможно, поскольку этот электрон всегда окружен облаком виртуальных электронно-позитронных пар. В квантовой теории поля [15] при использовании диаграмм Фейнмана такая проблема также встречается. В частности, при рассмотрении взаимодействия двух частиц могут возникать диаграммы, содержащие внутренние замкнутые петли, описывающие виртуальные пары частица–античастица. Поскольку в такой петле курсирующий в ней импульс может иметь произвольную величину, соответствующие интегралы также оказываются расходящимися. Для устранения подобных расходимостей в квантовой теории поля применяется метод перенормировок, который сводится к систематическому переупорядочиванию всех расходящихся членов и последующему переопределению соответствующей константы связи, которая после этого объявляется наблюдаемой величиной. Таким образом, упомянутая проблема бесконечной энергии взаимодействия частиц присутствует как в классической электродинамике, так и в квантовой электродинамике. Поэтому не следует удивляться, что она остается и в реляционной теории. Заметим, что подобные проблемы имеются и в общей теории относительности (сингулярность метрики). Возможно, что появление расходимостей, связанных с бесконечной энергией взаимодействия, является общим свойством всех дуалистических теорий.

Вторая проблема, которая возникает при использовании описанного выше подхода для преодоления дилеммы Фоккера, обусловлена необходимой для этого строгой *зарядовой симметрией*. Это означает, что в такой теории в

каждый момент времени число частиц должно быть строго равно числу античастиц. В самом деле, с точки зрения реляционной теории Вселенная может состоять из одной большой замкнутой мировой линии, в которой частица много раз меняет характер своего движения с прямого на попятное и обратно. В этом случае, например, все электроны и позитроны, которые мы наблюдаем, – это одна и та же частица (электрон), движущаяся по очень сложной замкнутой мировой линии. Либо во Вселенной присутствуют несколько или даже много таких замкнутых линий. В любом случае произвольный срез по времени всегда будет содержать одинаковое число частиц, движущихся вперед во времени, – *частицы* и движущихся назад во времени, – *античастицы*. Однако во Вселенной наблюдается зарядовая асимметрия или, как ее называют в космологии, барионная асимметрия [16]. Наблюдаемая Вселенная состоит в основном из вещества, а антивещества в ней содержится очень мало. Теоретическое объяснение этого наблюдательного факта является одной из проблем современной космологии. В реляционной теории эта проблема возникает совершенно в другом виде.

Вместе с тем при таком подходе, очевидно, что зарядовая асимметрия определяет наличие *стрелы времени*. Действительно, если Вселенная состоит в основном из частиц, которые движутся вперед во времени, то в такой Вселенной стрела времени будет четко выражена (прямая стрела времени). В противоположном варианте, когда Вселенная состоит в основном из античастиц, которые движутся назад во времени, стрела времени также будет четко выражена, но направлена уже в противоположную сторону (обратная стрела времени). Если же во Вселенной будет одинаковое число частиц и античастиц, равномерно распределенных в пространстве, то первые будут двигаться вперед во времени, а вторые – назад. Следовательно, в такой Вселенной стрелу времени выделить будет невозможно. Таким образом, решение этих вопросов, скорее всего, также выходит за рамки реляционной теории.

Следует заметить, что аналогичным образом можно рассмотреть и гравитационное взаимодействие в пределе слабого поля в рамках линеаризованной теории гравитации [17; 18]. Соответствующее действие взаимодействия частиц 1 и 2 имеет вид

$$S_{\text{int}}(1,2) = \frac{Gm_1m_2}{c} \int ds_1 \int ds_2 u_1^\mu u_2^\nu (\eta_{\mu\alpha} \eta_{\nu\beta} + \eta_{\mu\beta} \eta_{\nu\alpha} - 2\eta_{\mu\nu} \eta_{\alpha\beta}) u_2^\alpha u_2^\beta \delta(s_{12}^2), \quad (16)$$

где G – гравитационная постоянная, $\eta_{\mu\nu}$ – метрический тензор пространства Минковского. Для замкнутой мировой линии (см. левую диаграмму рис. 2) по аналогии с выражением (13) можно написать:

$$S_{\text{int}}(1,2) = \frac{Gm_1m_2}{c} \int_A^B d\tilde{s}_1 \int_B^A d\tilde{s}_2 \tilde{u}_1^\mu \tilde{u}_2^\nu (\eta_{\mu\alpha} \eta_{\nu\beta} + \eta_{\mu\beta} \eta_{\nu\alpha} - 2\eta_{\mu\nu} \eta_{\alpha\beta}) \tilde{u}_2^\alpha \tilde{u}_2^\beta \delta(s_{12}^2). \quad (17)$$

Правые части выражений (16) и (17) имеют одинаковые знаки, поскольку скорости частиц в них входят квадратичным образом. Отсюда следует, что, несмотря на различный характер движения во времени, гравитационное взаимодействие не различает частицы и античастицы, как это было в случае электромагнитного взаимодействия. В частности, это означает, что учетом гравитационного взаимодействия решить проблему зарядовой симметрии не удастся.

В конце статьи приведем любопытную цитату Фейнмана из его Нобелевской лекции по физике (1967 г.) [19. С. 36]: «Однажды мне позвонил в Принстонский университет Уилер. Наш разговор был побочным продуктом все тех же размышлений: “Фейнман, я знаю, почему у всех электронов одинаковый заряд и одинаковая масса”. “Почему?” “Потому что все они – это один и тот же электрон!”. И затем он объяснил по телефону: “Предположим, что мировые линии, которые мы ранее рассматривали обычно во времени и пространстве, не идут непрерывно по времени, а образуют огромный узел. Тогда, если мы разрежем этот узел плоскостью, на которой время постоянно, мы увидим очень много мировых линий, которые представляли бы собой множество электронов, если бы не одно интересное обстоятельство. Если в одном из сечений это – обычная мировая линия электрона, то в сечении, в котором эта линия поворачивается и идет назад из будущего, мы получим неверный знак собственного времени – собственных четырехмерных скоростей, а это эквивалентно изменению знака у заряда, и потому эта часть пути будет действовать подобно позитрону”. “Но, профессор, – сказал я, – ведь позитронов куда меньше, чем электронов.” “О, может быть, они запрятаны в протонах или где-то еще”, – ответил он. Я не воспринял серьезно его идею о том, что все электроны эквивалентны. Однако я ухватился за его мысль о том, что позитроны можно представлять просто как электроны, идущие из будущего в прошедшее в обратном сечении их мировых линий. Вот это я и присвоил».

ЛИТЕРАТУРА

1. *Владимиров Ю.С.* Метафизика. М.: БИНОМ, 2000, 2009.
2. *Жилкин А.Г.* Базовые категории и принципы реляционной физики // Вестник Челябинского государственного университета. 2013. № 25 (316). Физика. Вып. 18. С. 80–92.
3. *Жилкин А.Г.* Реляционная физика с точки зрения метафизики // Метафизика. 2014. № 2 (12). С. 49–67.
4. *Жилкин А.Г.* О динамике реляционных систем: нерелятивистский случай // Челяб. физ.-мат. журн. 2017. Т. 2 (1). С. 99–112.
5. *Жилкин А.Г., Курбатов Е.П.* О динамике реляционных систем: релятивистский случай // Челяб. физ.-мат. журн. 2017. Т. 2 (1). С. 113–127.
6. *Tetrode H.* Über den Wirkungszusammenhang der Welt. Eine Erweiterung der klassischen Dynamik // *Zs. Phys.* 1922. V. 10. P. 317–328.
7. *Fokker A.D.* Ein invarianter Variationssatz für die Bewegung mehrerer elektrischer Massenteilchen // *Zs. Phys.* 1929. V. 58. P. 386–393.
8. *Wheeler J.A., Feynman R.P.* Interaction with the absorber as the mechanism of radiation // *Reviews of modern physics.* 1945. V. 17 (2–3). P. 157–181.

9. *Wheeler J.A., Feynman R.P.* Classical electrodynamics in terms of direct interparticle action // *Reviews of modern physics*. 1949. V. 21 (3). P. 425–433.
10. *Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М.* Механика. М.: Физматлит, 2001.
11. *Жилкин А.Г., Курбатов Е.П.* Принцип полного поглощения в реляционной физике // *Челяб. физ.-мат. журн.* 2017. Т. 2 (3). С. 344–357.
12. *Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М.* Теория поля. М.: Физматлит, 2006.
13. *Фейнман Р., Хибс А.* Квантовая механика и интегралы по траекториям. М.: Мир, 1968.
14. *Берестецкий В.Б., Лифшиц Е.М., Питаевский Л.П.* Квантовая электродинамика. М.: Наука, 1989.
15. *Вайнберг С.* Квантовая теория поля: в 2 т. М.: Физматлит, 2003.
16. *Горбунов Д.С., Рубаков В.А.* Введение в теорию ранней Вселенной: Теория горячего Большого взрыва. М.: ЛКИ, 2008.
17. *Владимиров Ю.С.* Основания физики. М.: БИНОМ, 2008.
18. *Владимиров Ю.С., Турыгин А.Ю.* Теория прямого межчастичного взаимодействия. М.: Энергоиздат, 1986.
19. *Фейнман Р.* Развитие пространственно-временной трактовки квантовой электродинамики // *Успехи физических наук*. 1967. Т. 91 (1). С. 29–48.

RELATIVE PRINCIPLE OF FULL ABSORPTION

A.G. Zhilkin²

Institute of Astronomy, RAS

The paper discusses the principle of complete absorption, which plays the same role in relational theory as the principle of equivalence in general relativity and the principle of wave-particle duality in quantum theory. The physical essence of this principle boils down to the fact that a sufficiently large number of particles must be present in the Universe so that complete absorption of radiation from any source is possible. This implies complete equivalence, from the experimental point of view, of direct interparticle interaction and the interaction carried by a local field in space-time. It is noted that in its classical interpretation the Fokker variational principle, on which the theory of direct interparticle interaction is based, contains a dilemma caused by two mutually contradictory necessary properties of the interaction action. One of the options for overcoming this dilemma is proposed.

Keywords: relational theory, space-time, electromagnetic field, direct interparticle interaction.

² E-mail: zhilkin@inasan.ru