

МЕТАФИЗИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ РЕЛЯЦИОННОЙ ПАРАДИГМЫ

DOI: 10.22363/2224-7580-2023-1-40-56

АНАЛОГИЯ МЕЖДУ ПРИНЦИПОМ ЭКВИВАЛЕНТНОСТИ И РЕЛЯЦИОННЫМ ПРИНЦИПОМ ПОЛНОГО ПОГЛОЩЕНИЯ*

А.Г. Жилкин**

*Институт астрономии РАН
Российская Федерация, 119017, Москва, ул. Пятницкая, д. 48*

Аннотация. В работе проведен анализ аналогии между принципом полного поглощения в реляционной теории и принципом эквивалентности в общей теории относительности. Использование формулировки этих принципов в метафизических терминах позволяет сделать вывод о том, что сверхкатегория реляционных частиц проявляется в динамике, как самосогласованный абсолютный поглотитель. Рассмотрены вопросы интерпретации опережающих воздействий в теории прямого межчастичного взаимодействия. Показано, что строгая симметрия действия Фоккера по отношению к запаздывающим и опережающим воздействиям может нарушаться при учете процессов рождения и уничтожения частиц.

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

Введение

Соображения метафизического характера позволяют выделить в теоретической физике три типа парадигм: *триалистические*, *дуалистические* и *монистические* [1]. В триалистических парадигмах используются непосредственно три базовые категории: *частиц*, *пространства-времени* и *поля*, которые рассматриваются как самостоятельные и независимые. К таким теориям относятся механика, теория электромагнитного поля и специальная теория относительности (СТО). С точки зрения метафизики базовая категория частиц соответствует материальному началу, категория пространства-времени – идеальному началу, а категория поля – духовному началу.

* Автор выражает благодарность М.Ю. Ромашке за полезные обсуждения.

** E-mail: zhilkin@inasan.ru

Если физическую реальность изобразить в виде равностороннего треугольника, то базовым категориям удобно соотнести его вершины (рис. 1). На такой схеме данной триалистической парадигме будет соответствовать взгляд на физическую реальность со стороны одной из вершин метафизического треугольника. Например, механике соответствует взгляд со стороны вершины, изображающей базовую категорию частиц. В дуалистической парадигме для построения физической теории необходимо опереться уже не на три, а всего лишь на две категории. При этом одна категория в дуалистической парадигме является одной из базовых категорий, а вторая – строится на основе оставшихся двух базовых категорий как некая обобщенная категория или *сверхкатегория*. Этим сверхкатегориям удобно соотнести стороны метафизического треугольника (рис. 1). Поэтому дуалистическим парадигмам соответствует взгляд на физическую реальность с точки зрения одной из сторон треугольника. Примерами теорий подобного типа являются общая теория относительности (ОТО) и квантовая теория.

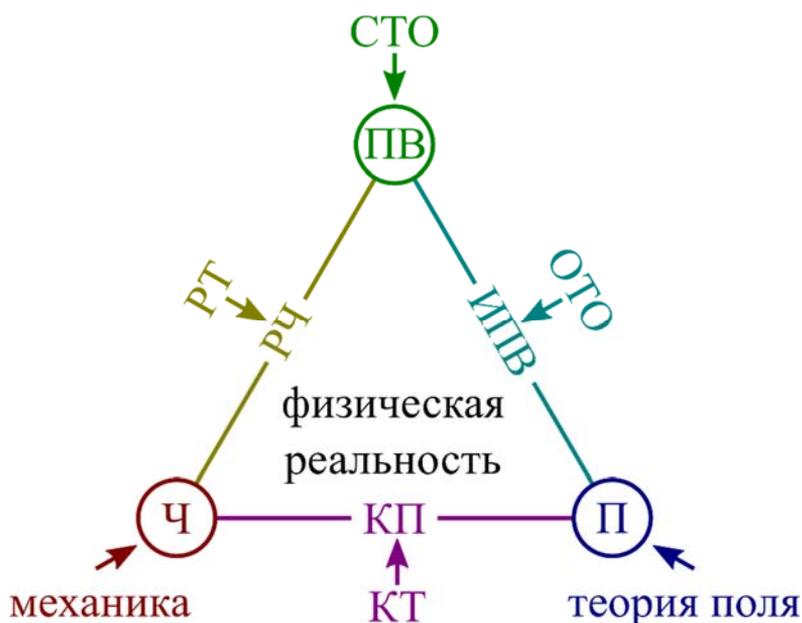


Рис. 1. Схематическое изображение основных категорий теоретической физики и соответствующих способов описания физической реальности:

Ч – частицы, ПВ – пространство-время, П – поле,

ИПВ – искривленное пространство-время, КП – квантовое поле, РЧ – реляционные частицы, СТО – специальная теория относительности, ОТО – общая теория относительности, КТ – квантовая теория, РТ – реляционная теория

В ОТО используются базовая категория частиц и сверхкатегория *искривленного пространства-времени* (ИПВ), объединяющая исходные категории пространства-времени и поля. Квантовая теория строится на основе базовой категории пространства-времени и сверхкатегории *квантового поля* (КП), объединяющей в себе исходные категории поля и частиц. Анализ структуры сверхкатегории (на примере ОТО и квантовой теории) позволяет выделить

следующие ее элементы (рис. 2) [2]. Сверхкатегория имеет *базисную* и *надстроечную* части. Базисная часть сверхкатегории содержит или наследует определяющие признаки одной из исходных базовых категорий, на основе которых она строится. Надстроечная часть содержит качественно новые признаки, отсутствующие у исходной базовой категории. Таким образом, одна из двух базовых категорий, на основе которых строится сверхкатегория, является ее *базисом*. В эту базовую категорию данная сверхкатегория переходит в случае отсутствия надстройки. Вторая базовая категория является *пределом*, в который надстройка сверхкатегории переходит в некотором нетривиальном приближении. В общем случае категория предела в явном виде не присутствует и поэтому можно сказать, что она является своего рода иллюзией. Физическое значение имеют только категория базиса и надстройка. Например, в сверхкатегории ИПВ базисом является базовая категория пространства-времени, надстройкой – свойство кривизны, а пределом – базовая категория поля (в данном случае гравитационного). Если кривизна (надстройка) отсутствует, то ИПВ естественным образом переходит в плоское пространство-время (категория базиса). В случае очень слабой кривизны ИПВ можно представить, как ньютоновское гравитационное поле (категория предела), распределенное в плоском пространстве-времени (категория базиса).



Рис. 2. Структура, функция и взаимоотношения категорий в дуалистической парадигме

В основе любой дуалистической парадигмы теоретической физики лежит некое динамическое уравнение, описывающее эволюцию физической системы. При этом в процессе эволюции участвуют две сущности. Первая из них связана с одной из трех исходных базовых категорий (частицы, пространство-время или поле). Вторая сущность определяется соответствующей

сверхкатегорией. При этом первых сущностей может быть сколь угодно много, а вторая сущность имеется только одна. Иначе говоря, данная рассматриваемая сверхкатегория фактически описывает некую мировую *субстанцию*. Сущности первого типа играют роль *субстрата*, распределенного внутри мировой субстанции. С точки зрения динамики субстрат всегда представляет собой активное начало и служит источником (причиной) движения, а субстанция, наоборот, является пассивной. Любые изменения субстанции возникают в результате воздействия на нее субстрата. Такая ситуация схематически изображена на рис. 2. В метафизических терминах динамический закон в любой дуалистической парадигме можно выразить следующим образом: *субстрат изменяет субстанцию* [3. С. 140]. Например, в ОТО такой мировой субстанцией является ИПВ. Оно универсальное (для всех тел одно и то же) и находится повсюду. Роль субстрата выполняют тела или частицы. Их множество и они распределены внутри ИПВ. Динамика в ОТО описывается уравнением Эйнштейна [4], которое определяет взаимосвязь между распределением частиц в пространстве-времени и его свойствами (кривизной).

Из метафизической схемы, приведенной на рис. 1, следует, что помимо двух хорошо известных дуалистических теорий (ОТО и квантовая теория) должна существовать еще третья дуалистическая теория, которую можно условно назвать реляционной теорией [5; 6]. Данная теория опирается на базовую категорию поля и некую новую сверхкатегорию (*реляционные частицы*), объединяющую в себе базовые категории частиц и пространства-времени. При этом роль базиса в ней выполняет категория частиц, а категория пространства-времени выполняет роль предела. Основной задачей реляционной теории является изучение природы пространства-времени как физического феномена [6; 7].

В данной работе обсуждаются некоторые вопросы, касающиеся возможной природы и свойств надстройки сверхкатегории реляционных частиц. Можно предположить, что основным физическим принципом в реляционной теории является принцип полного поглощения [8; 9], впервые рассмотренный в работе Уилера и Фейнмана [10]. Поэтому представляется уместным проследить аналогию между этим принципом и принципом эквивалентности в ОТО.

1. Принцип эквивалентности и принцип полного поглощения

В теориях, основанных на дуалистической парадигме, важную роль играет физический принцип, определяющий согласованность сверхкатегории с базисом. В общей теории относительности эту роль выполняет принцип эквивалентности. В квантовой теории таким принципом является принцип корпускулярно-волнового дуализма. Аналогичный принцип должен присутствовать и в реляционной теории. В одной из работ автора [8] было предложено в качестве такого принципа использовать принцип полного поглощения, введенный ещё Уилером и Фейнманом в 1945 году [10]. Его физическое содержание сводится к тому, что совокупность всех частиц мира представляет собой полный (абсолютный) поглотитель. Любые излучения, исходящие от

него, будут в нём же и поглощены. Иначе говоря, наличие полного поглощения в системе 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. Поэтому проявление полного поглотителя в системе взаимодействующих частиц в экспериментах ничем не отличается от проявления пространства в системе частиц, взаимодействующих посредством электромагнитного поля.

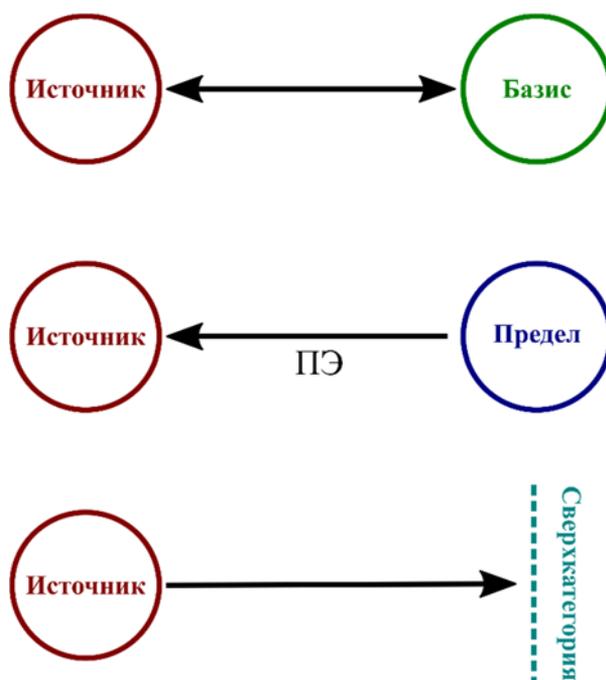


Рис. 3. Схема, поясняющая роль принципа эквивалентности (ПЭ) и его аналогов в дуалистических теориях

Роль принципа эквивалентности и его аналогов в метафизических терминах можно выразить в виде схемы, представленной на рис. 3. На этой схеме представлено три основных этапа рассуждений, приводящих к пониманию природы сверхкатегории в данной дуалистической парадигме. На первом этапе (верхняя часть рисунка) рассматриваются теории, описывающие динамику категории источника, а также динамику (или структуру) категории базиса, но без использования в явном виде категории предела. На втором этапе привлекается физический принцип эквивалентности (или его аналог), определяющий условия, при которых вся теория остается справедливой и при наличии категории предела. Наконец, на третьем этапе осуществляется переход к сверхкатегории, поскольку для согласования категорий базиса и предела в рамках одной и той же теории необходима некоторая надстройка над базисом.

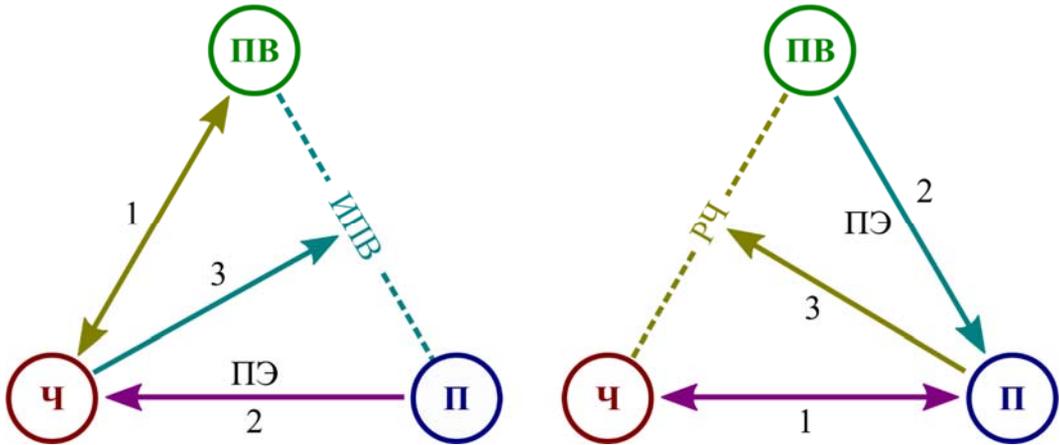


Рис. 4. Схема, демонстрирующая роль принципа эквивалентности (ПЭ) в ОТО (слева) и принципа полного поглощения в реляционной теории (справа)

В ОТО категориями источника, базиса и предела являются соответственно категории частиц, пространства-времени и поля (рис. 4). На первом этапе описанной выше схемы мы имеем механику свободных частиц (динамика источника) и специальную теорию относительности (СТО, структура базиса). Уравнение движения свободной частицы одновременно описывает и времени-подобные геодезические в плоском пространстве-времени:

$$mc \left(\frac{du^\mu}{ds} + \Gamma_{\alpha\beta}^\mu u^\alpha u^\beta \right) = 0, \quad (1)$$

где m – масса частицы; c – скорость света; u^μ – компоненты четырехмерного вектора скорости; $\Gamma_{\alpha\beta}^\mu$ – символы Кристоффеля. Основным уравнением СТО можно считать выражение для квадрата интервала, описывающее структуру категории базиса,

$$ds^2 = g_{\mu\nu} dx^\mu dx^\nu, \quad (2)$$

где $g_{\mu\nu}$ – компоненты метрического тензора.

На втором этапе привлекается принцип эквивалентности, который утверждает, что уравнение движения частицы (1) при наличии гравитационного поля (предел) точно такое же, как и для свободной частицы (то есть в отсутствие предела). Следовательно, с точки зрения частиц гравитационные поля локально неотличимы от полей сил инерции. На третьем этапе проводится обобщение понятия пространства-времени и рассматривается вопрос о том, можно ли при наличии гравитационного поля коэффициенты $g_{\mu\nu}$ трактовать по-прежнему как метрический тензор. В итоге приходим к концепции искривленного пространства-времени (сверхкатегория).

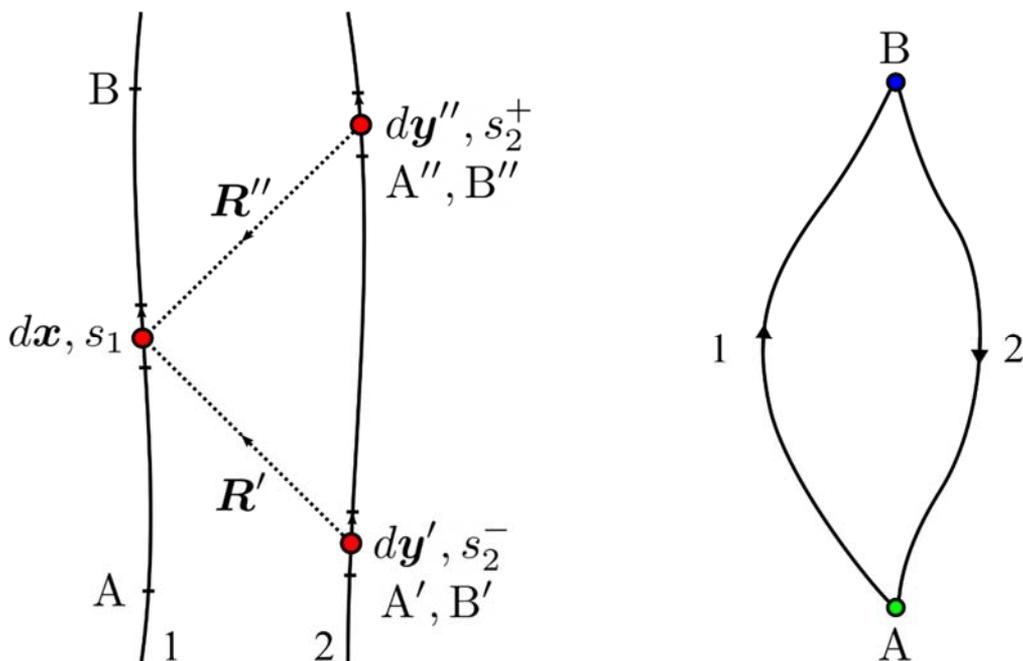


Рис 5. Мировые линии двух взаимодействующих частиц 1 и 2 (слева).

Пунктирными линиями показана поверхность светового конуса

с вершиной в точке текущего положения частицы 1. Обозначения описаны в тексте.

Справа показана замкнутая мировая линия частицы

Подобные рассуждения можно провести и в рамках реляционной дуалистической парадигмы. В этом случае в качестве категорий источника, базиса и предела выступают соответственно категории поля, частиц и пространства-времени. На первом этапе следует рассмотреть динамику поля с учетом частиц, но без явного включения категории пространства-времени. Этому требованию удовлетворяет теория прямого межчастичного взаимодействия (ТПМВ), в основе которой лежит вариационный принцип Фоккера [11]:

$$S_{\text{int}}(1,2) = -\frac{q_1 q_2}{c} \int ds_1 \int ds_2 \mathbf{u}_1 \cdot \mathbf{u}_2 \delta(s_{12}^2). \quad (3)$$

Здесь $S_{\text{int}}(1,2)$ – действие взаимодействия двух частиц 1 и 2, q_1, q_2 – заряды, $\mathbf{u}_1, \mathbf{u}_2$ – скорости, s_{12} – интервал между частицами (см. левую панель рис. 5). Из самого вида действия Фоккера (3) можно получить потенциалы электромагнитного поля и найти уравнения, которым они удовлетворяют. По своему виду они совпадают с уравнениями Максвелла. Однако эти уравнения содержат не только запаздывающие, но и опережающие воздействия. Категория пространства-времени в эту теорию напрямую не входит, поскольку вся геометрия описывается метрическими отношениями (квадратами интервалов) между частицами. Путем варьирования действия Фоккера (с учетом действий свободных частиц) можно получить уравнения движения частиц (динамика базиса). Впрочем, при этом возникает определенная *дилемма* [9], рассмотрение которой обычно опускают, переходя к изучению динамики выделенной частицы.

Дилемма Фоккера обусловлена двумя взаимоисключающими свойствами действия взаимодействия (3). Однако выполнение этих свойств крайне желательно, если мы хотим рассматривать одновременно все частицы, как единую самосогласованную систему. Напомним еще раз эти важные свойства.

1. Действие (3), как функционал, должно быть конечной величиной. Это означает, что интегралы в нем должны вычисляться по конечным пределам. В противном случае вариационная задача теряет смысл.

2. Действие (3) должно быть симметричным относительно перенумерации частиц (1 и 2). Это необходимо для того, чтобы вариационный принцип Фоккера был универсальным для всей совокупности частиц.

Эти два свойства кажутся совершенно естественными и в точности выполняются в нерелятивистском случае. Однако простой анализ показывает, что для релятивистского действия (3) из-за запаздывающего и опережающего характера взаимодействий одновременно удовлетворить этим двум требованиям оказывается невозможным. Причина, из-за которой это происходит, состоит в том, что для выполнения второго свойства (симметрия по частицам) необходимо рассматривать бесконечные интервалы интегрирования. Но тогда действие становится бесконечной величиной и, следовательно, нет никакого смысла находить его минимальное значение. Дилемма носит принципиальный характер, и ее невозможно преодолеть, оставаясь в рамках классических представлений. Один из возможных вариантов преодоления дилеммы Фоккера предложен в недавней работе автора [9]. В этом варианте предполагается, что мировые линии всех частиц являются замкнутыми (см. правую панель рис. 5). Части мировой линии, соответствующие движению вперед во времени, трактуются как мировые линии обычных частиц. Те же части, которые соответствуют попятному движению во времени, трактуются как мировые линии античастиц. Такой подход позволяет все интегралы в действии Фоккера представить в виде определенных интегралов с конечными пределами, которые определяются актами рождения и уничтожения частиц. Актам рождения и уничтожения на правой панели рис. 5 соответствуют события *A* и *B*. Эти процессы не являются произвольными и поэтому их невозможно стянуть к малому интервалу. Следовательно, вся теория оказывается нелокальной во времени.

Для преодоления дилеммы Фоккера можно рассматривать и другие идеи. Например, можно попытаться модифицировать (обобщить) вариационную задачу [12] или перейти к концепции дискретного времени, подразумевающей формирование глобальной причинной сети [5].

Вернемся, однако, к рассматриваемой нами аналогии с принципом эквивалентности. На втором этапе мы должны утверждать, что уравнения движения частиц остаются справедливыми и при наличии пространства-времени (предел). Если ограничиться динамикой только некоторой выделенной частицы, то из вариации действия Фоккера можно получить уравнение Уилера – Фейнмана [10]:

$$mc \frac{d\mathbf{u}}{ds} = \frac{q}{c} \hat{\mathbf{F}} \cdot \mathbf{u}, \quad (4)$$

где $\hat{\mathbf{F}}$ – тензор электромагнитного поля (его компоненты $F_{\mu\nu}$). Утверждение сводится к тому, что уравнение (4) должно давать те же решения, что и в классической электродинамике. Этого можно добиться, вводя *абсолютный поглотитель*. Иными словами, количество частиц во Вселенной должно быть достаточно большим для того, чтобы полностью поглотить излучение любого источника. При этом условии экспериментатор не сможет обнаружить разницу в описании динамики частиц в рамках ТПМВ и в рамках классической электродинамики. Поэтому в экспериментах нельзя будет распознать, 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 и абсолютный поглотитель. Любые излучения, исходящие от него, будут в нём же и поглощены. С точки зрения поля пространство-время проявляется в локальных процессах в виде отдельных парных взаимодействий между частицами. Поэтому принцип полного поглощения в реляционной теории является аналогом принципа эквивалентности в ОТО.

На третьем этапе осуществляется переход к сверхкатегории реляционных частиц. Наличие абсолютного поглотителя означает, что частицы не являются независимыми. Они составляют единую связанную систему, возникающую за счет их парных взаимодействий. Вместе с тем в теории Уилера – Фейнмана [10] абсолютный поглотитель рассматривался как некая внешняя сущность, свойства которой заданы. Выделенная частица на него никак не влияла. С точки зрения реляционной теории это неправильно, поскольку всю систему нужно рассматривать самосогласованно. Свойства поглотителя должны возникать в динамике всей реляционной системы. Отсюда следует, что сверхкатегория реляционных частиц может проявляться как *реальный поглотитель*, который является абсолютным, но неполным поглотителем. Разница между этими понятиями будет определена ниже.

В квантовой теории аналогом принципа эквивалентности является принцип корпускулярно-волнового дуализма. Очевидно, что его можно проанализировать в рамках такой же схемы рассуждений.

2. Интерпретация опережающего воздействия

Могут возникать определенные затруднения при попытках осмыслить природу опережающих воздействий в теории Фоккера. В самом деле, опережающий характер воздействий как бы подразумевает передачу некоторой информации о состоянии системы в будущем. Сразу при этом возникает сомнение в справедливости принципа причинности. Однако в действительности дело тут вовсе не в опережающих воздействиях, а в форме представления действия Фоккера.

В вариационном принципе Фоккера взаимодействие между частицами определяется полусуммой запаздывающего и опережающего воздействий.

Следуя оригинальной работе Фоккера [11], действие взаимодействия для двух частиц 1 и 2 запишем в виде (см. левую панель рис. 5):

$$S_{\text{int}}(1,2) = -\frac{q_1 q_2}{2c} \int_A^B ds_1 \frac{\mathbf{u}_1 \cdot \mathbf{u}'_2}{\mathbf{R}' \cdot \mathbf{u}'_2} - \frac{q_1 q_2}{2c} \int_A^B ds_1 \frac{\mathbf{u}_1 \cdot \mathbf{u}''_2}{\mathbf{R}'' \cdot \mathbf{u}''_2}. \quad (5)$$

Здесь одним штрихом обозначены величины, относящиеся к запаздывающему моменту времени (частица 2 находится на световом конусе прошлого частицы 1), а двумя штрихами – величины, относящиеся к опережающему моменту времени (частица 2 находится на световом конусе будущего частицы 1). Вектор \mathbf{R} проведен из частицы 2 в частицу 1. В выражении (5) первое слагаемое в правой части определяет запаздывающее воздействие от частицы 2 к частице 1, а второе слагаемое – опережающее воздействие.

Нетрудно видеть, однако, что это действие можно переписать исключительно в терминах запаздывающих воздействий. Заметим, что

$$\int_A^B ds_1 \frac{\mathbf{u}_1 \cdot \mathbf{u}''_2}{\mathbf{R}'' \cdot \mathbf{u}''_2} = \int_A^B \frac{d\mathbf{x} \cdot d\mathbf{y}''}{\mathbf{R}'' \cdot d\mathbf{y}''}, \quad (6)$$

где $d\mathbf{x}$ и $d\mathbf{y}$ – элементы мировых линий частиц 1 и 2. Поскольку $\mathbf{R}'' \cdot d\mathbf{y}'' = \mathbf{R}'' \cdot d\mathbf{x}$, то получаем

$$\int_A^B \frac{d\mathbf{x} \cdot d\mathbf{y}''}{\mathbf{R}'' \cdot d\mathbf{y}''} = \int_A^B \frac{d\mathbf{x} \cdot d\mathbf{y}''}{\mathbf{R}'' \cdot d\mathbf{x}} = \int_{A''}^{B''} \frac{d\mathbf{y}'' \cdot d\mathbf{x}}{\mathbf{R}'' \cdot d\mathbf{x}}. \quad (7)$$

В последнем интеграле интегрирование проводится по переменной s_2 вдоль мировой линии частицы 2 по ассоциированному интервалу, который определяется событиями A'' и B'' . Таким образом,

$$\int_A^B ds_1 \frac{\mathbf{u}_1 \cdot \mathbf{u}''_2}{\mathbf{R}'' \cdot \mathbf{u}''_2} = \int_{A''}^{B''} ds_2 \frac{\mathbf{u}''_2 \cdot \mathbf{u}_1}{\mathbf{R}'' \cdot \mathbf{u}_1}, \quad (8)$$

действие (5) принимает вид

$$S_{\text{int}}(1,2) = -\frac{q_1 q_2}{2c} \int_A^B ds_1 \frac{\mathbf{u}_1 \cdot \mathbf{u}'_2}{\mathbf{R}' \cdot \mathbf{u}'_2} - \frac{q_1 q_2}{2c} \int_{A''}^{B''} ds_2 \frac{\mathbf{u}''_2 \cdot \mathbf{u}_1}{\mathbf{R}'' \cdot \mathbf{u}_1}. \quad (9)$$

Теперь оно вообще не содержит опережающих воздействий, а только запаздывающие. Поэтому очевидно, что никакой информации из будущего не приходит и принцип причинности не нарушается.

Эти простые соображения показывают, что в ТПМВ никаких трудностей при интерпретации опережающих воздействий не возникает. Любые опережающие воздействия всегда можно интерпретировать в терминах запаздывающих воздействий. Тем не менее действие (9) по своему виду отличается от соответствующего действия в классической электродинамике. Классическое действие определяется, как удвоенное первое слагаемое в правой части (9).

Действие (9) (или его исходный вариант (5)) обладает строгой симметрией между прошлым и будущим. Поэтому эти две теории в одних и тех же ситуациях будут давать, вообще говоря, разные результаты.

Заметим, что действие (9), выраженное в терминах запаздывающих воздействий, соответствует методике радиолокации, лежащей в основе хроногеометрии. В самом деле, схема взаимодействия на левой панели рис. 5 описывает посылку сигнала от частицы 2 к частице 1, а затем прием частицей 2 отраженного сигнала. На мировой линии частицы 2 собственное время $\tau_2 = s_2/c$ изменяется монотонно. Моментам излучения и приема сигнала соответствуют значения τ_2' и τ_2'' . В момент времени $\tau_2 = (\tau_2' + \tau_2'')/2$ расстояние между частицами будет равно $l_{12} = c(\tau_2'' - \tau_2')/2$.

3. Нарушение временной симметрии

В оригинальном варианте вариационного принципа Фоккера [11] запаздывающие и опережающие воздействия входят с одинаковым весом. Это подразумевает симметрию во времени: любой процесс может протекать как в прямом, так и в обратном направлении во времени. Стрела времени в общем случае никак не задана. Она определяется некими внешними условиями. Однако могут возникать ситуации, когда эта строгая симметрия нарушается. Поясним это утверждение на примере процессов рождения и уничтожения пар частица–античастица.

В случае классических частиц 1 и 2 действие взаимодействия определяется выражением (3). Функция $f(s_2) = s_{12}^2$ имеет два корня $s_2^\pm = s_2^\pm(s_1)$. Это позволяет разложить дельта-функцию на два слагаемых, соответствующих двум корням, и прийти к эквивалентному выражению (5). Этот результат удастся получить при условии наличия двух корней уравнения $s_{12}^2 = 0$.

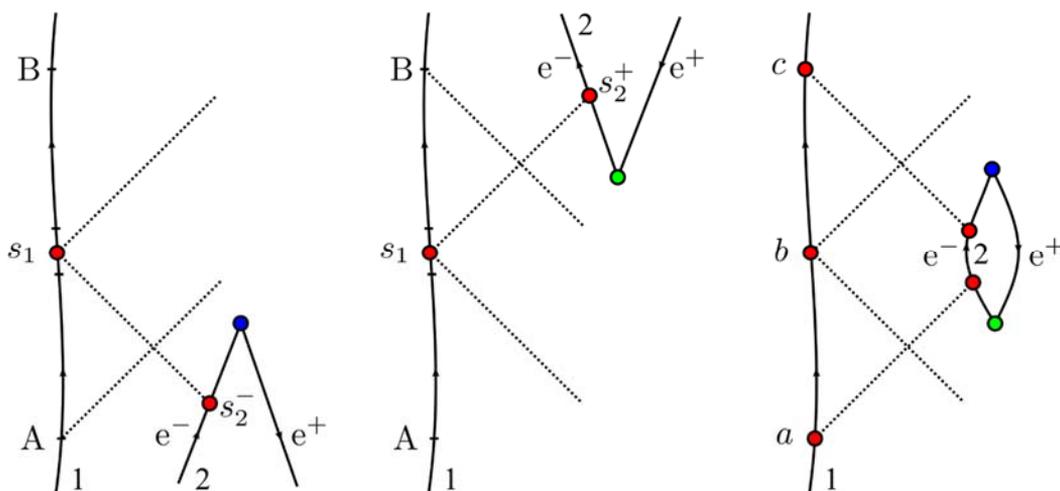


Рис. 6. Взаимодействие частицы 1 с частицей 2, входящей в пару частица–античастица

Рассмотрим ситуацию, изображенную на левой панели рис. 6. Здесь частица 1 взаимодействует с электроном (частица 2), который вскоре аннигилирует с позитроном и исчезает. Поэтому на световом конусе будущего частицы 1 его уже нет. Уравнение $s_{12}^2 = 0$ в данном случае имеет только один корень s_2^- , соответствующий запаздывающему моменту времени. Если эта ситуация реализуется на всем промежутке интегрирования от A до B , то, очевидно, вместо формулы (5) мы получим

$$S_{\text{int}}(1, 2) = -\frac{q_1 q_2}{2c} \int_A^B ds_1 \frac{\mathbf{u}_1 \cdot \mathbf{u}'_2}{\mathbf{R}' \cdot \mathbf{u}'_2}. \quad (10)$$

Действие оказывается неполным, поскольку содержит только запаздывающую часть.

Другая подобная ситуация изображена на средней панели рис. 6. Здесь частица 1 взаимодействует с электроном, который недавно родился в паре с позитроном. Поэтому на световом конусе прошлого частицы 1 этого электрона еще нет. Уравнение $s_{12}^2 = 0$, так же как и в предыдущем случае, содержит только один корень s_2^+ , но теперь он соответствует опережающему моменту времени. Если эта ситуация реализуется на всем интервале интегрирования от A до B , то вместо формулы (5) будем иметь

$$S_{\text{int}}(1, 2) = -\frac{q_1 q_2}{2c} \int_A^B ds_1 \frac{\mathbf{u}_1 \cdot \mathbf{u}''_2}{\mathbf{R}'' \cdot \mathbf{u}''_2}. \quad (11)$$

Действие снова оказывается неполным, но в данном случае оно содержит уже только опережающую часть.

Очевидно, что в двух рассмотренных ситуациях интервалы интегрирования A и B можно выбрать такими, что у уравнения $s_{12}^2 = 0$ корней не будет вообще. Тогда действие взаимодействие $S_{\text{int}}(1, 2)$ будет равно нулю, несмотря на присутствие частиц.

Рассмотрим более сложную конфигурацию (см. правую панель рис. 6), когда частица 2 (электрон) является частью электронно-позитронной пары (позитроний), существующей конечное время между моментами своего рождения и аннигиляции. Тогда в различных точках мировой линии частицы 1 уравнение $s_{12}^2 = 0$ может иметь два корня, один корень или не иметь корней вообще. Например, в точке a имеется один корень s_2^+ , соответствующий опережающему времени. В точке b это уравнение корней не имеет. В точке c имеется один корень s_2^- , соответствующий запаздывающему времени. Если расстояние между частицами 1 и 2 достаточно мало, то в точке b могут быть сразу два корня s_2^- и s_2^+ . В более ранние моменты времени на мировой линии частицы 1, а также в более поздние – корней тоже нет.

Эти примеры приводят к выводу о том, что запись (3) выражения для действия взаимодействия через дельта-функцию является более общей, чем запись вида (5). Это обусловлено тем, что вид (3) корректно учитывает все случаи с различным числом корней уравнения $s_{12}^2 = 0$. Выражение (5) явным образом использует условие обязательного наличия двух корней s_2^- и s_2^+ . Такая ситуация может реализовываться только для классических частиц, мировые линии которых идут из бесконечности ($t \rightarrow -\infty$) и уходят в бесконечность ($t \rightarrow +\infty$). Процессы с участием частиц и античастиц нарушают симметрию между запаздывающими и опережающими воздействиями в ТПМВ. Это приводит к нарушению временной симметрии. Заметим, что выражение для действия взаимодействия в форме (3) было предложено в работе Тетроде [12]. Действие в форме (5) рассматривалось в работе Фоккера [11].

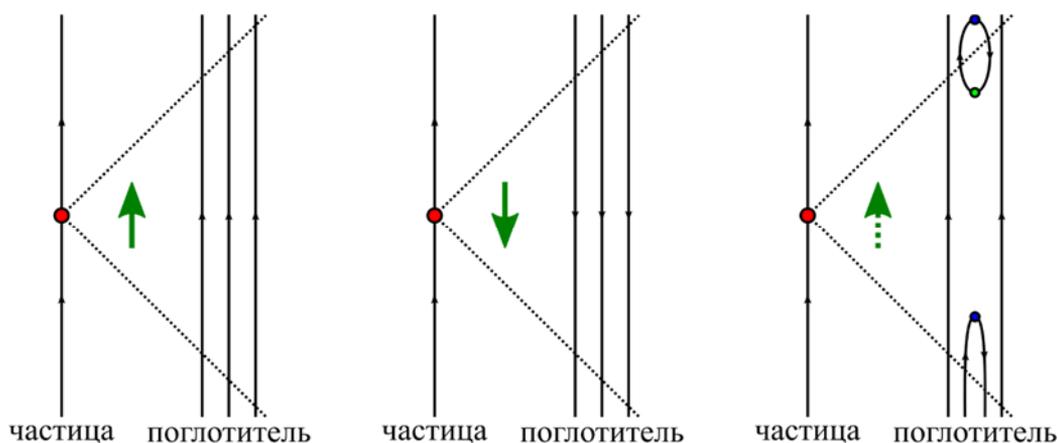


Рис. 7. Взаимодействие выделенной частицы с поглотителем.
Стрелка указывает направление стрелы времени

Посмотрим, к чему могут приводить нарушения симметрии во времени с точки зрения соответствия с классической теорией. На рис. 7 показана некоторая выделенная частица, для которой исследуется характер движения на фоне внешнего поглотителя. Уточним, что выделенная частица и внешний поглотитель в совокупности представляют абсолютный поглотитель. На левой панели поглотитель состоит только из частиц, а на средней панели – только из античастиц. В первом случае стрелу времени следует выбрать в направлении вперед (по движению выделенной частицы), а во втором случае – назад. Пространство-время в классическом смысле (при согласовании ТПМВ с классической электродинамикой) в обоих случаях будет представлять собой пространство Минковского. Однако стрела времени в каждом из них будет иметь разное направление, поскольку она определяется внешним поглотителем, а не одной какой-либо выделенной частицей.

Если же поглотитель состоит из частиц и античастиц, то стрела времени уже, очевидно, не будет иметь четко определенного направления. В предельном случае зарядовой симметрии поглотителя (число частиц в каждый

момент времени в точности равно числу античастиц) стрела времени будет совершенно неопределенной. Мы не сможем выбрать, какому из двух вариантов пространства Минковского отдать предпочтение.

На правой панели рис. 7 показана ситуация, когда в поглотителе могут происходить процессы рождения и уничтожения частиц и античастиц. В этом случае при взаимодействии частицы с поглотителем точная временная симметрия (симметрия между запаздывающими и опережающими воздействиями) нарушается. В результате свойства поглотителя будут уже неидеальными. С точки зрения классической электродинамики это означает, что выделенный заряд движется не в пространстве-времени Минковского, а в некотором другом пространстве-времени с другими свойствами.

Подчеркнем, что речь в данном случае не идет о нарушении принципа полного поглощения. Все взаимодействия по-прежнему носят парный характер, и, следовательно, любое излучение будет обязательно поглощено. Речь идет о том, что при наличии процессов рождения и уничтожения частиц нарушается точная симметрия поглотителя по отношению к запаздывающим и опережающим воздействиям. Условие, выражающее согласование ТПМВ с классической электродинамикой, можно записать в виде [10]

$$\sum_a \left[F'_{\mu\nu}(1, a) - F''_{\mu\nu}(1, a) \right] = 0, \quad (12)$$

где суммирование проводится по всем частицам, в том числе и с учетом выделенной частицы 1. Поглотитель, удовлетворяющий такому условию, назовем для определенности *полным поглотителем*. Теперь в нашем случае для некоторых частиц будут отсутствовать опережающие воздействия $F''_{\mu\nu}(1, a)$, а для других могут отсутствовать запаздывающие воздействия $F'_{\mu\nu}(1, a)$. Поэтому точное соотношение (12) уже, по видимому, удовлетворяться не будет.

Это можно пояснить на примере частного случая, когда поглотитель состоит из выделенной частицы 1 и одного-единственного позитрония (электронно-позитронная пара). Предполагая, что поглотитель является абсолютным, для некоторой тестовой частицы k можно записать

$$\sum_a \left[\frac{1}{2} F'_{\mu\nu}(k, a) + \frac{1}{2} F''_{\mu\nu}(k, a) \right] = 0, \quad (13)$$

где суммирование проводится по частицам поглотителя (выделенная частица 1, электрон и позитрон). Повторяя рассуждения Уилера и Фейнмана [10], приходим к соотношению

$$\sum_a \left[\frac{1}{2} F'_{\mu\nu}(k, a) - \frac{1}{2} F''_{\mu\nu}(k, a) \right] = 0. \quad (14)$$

Для доказательства (12) Уилером и Фейнманом использовался тот факт, что отдельные выражения в квадратных скобках (14) представляют собой

свободное электромагнитное поле (решение уравнений Максвелла в отсутствие источников) и, следовательно, оно нигде не содержит особенностей. Поэтому оно должно выполняться и внутри поглотителя, то есть когда вместо пробной частицы k мы берем, например, выделенную частицу 1.

Однако для рассматриваемой нами системы такой переход может не сработать. Поместим пробную частицу k в точку, для которой на световом конусе будущего электрона и позитрона уже нет. Они к этому времени уже успели аннигилировать. Тогда для такой пробной частицы соотношение (14) примет вид

$$\frac{1}{2} F'_{\mu\nu}(k, 1) - \frac{1}{2} F''_{\mu\nu}(k, 1) + \frac{1}{2} F'_{\mu\nu}(k, e^-) + \frac{1}{2} F'_{\mu\nu}(k, e^+) = 0. \quad (15)$$

Здесь первые два слагаемых дают поле излучения частицы 1, которое не содержит особенности. Оставшиеся слагаемые описывают половины запаздывающих полей электрона и позитрона. Они не описывают какие-либо свободные электромагнитные поля и обладают особенностями в точках расположения этих частиц. Следовательно, это соотношение уже нельзя переносить на частицы поглотителя. Равенство (12) удовлетворяться не будет. Иначе говоря, такой поглотитель является абсолютным (соотношение (13) выполняется), но неполным (соотношение (12) не выполняется).

Заключение

Основным физическим принципом дуалистической реляционной теории [2; 5], определяющим согласованность сверхкатегории (реляционные частицы) с базисом (частицы) предположительно является принцип полного поглощения, который был введен в работе Уилера и Фейнмана в 1945 году [10]. Он имеет простой смысл и сводится к тому, что Вселенная состоит из достаточно большого числа частиц, чтобы полностью поглотить излучение любого источника. Это означает, что Вселенная проявляет себя, как абсолютный поглотитель, полностью поглощая любые производимые ей излучения. В данной работе проведен анализ аналогии между этим принципом и принципом эквивалентности, играющим ту же роль в ОТО.

Идея заключается в том, чтобы роль принципа эквивалентности в ОТО переформулировать в метафизических терминах, используя понятия категорий источника, базиса и предела. Дальнейший переход к искривленному пространству-времени также можно переформулировать в терминах сверхкатегории и ее характеристик. Используя общую формулировку, можно попытаться применить ее в случае реляционной теории с точки зрения принципа полного поглощения. Представленный в работе соответствующий анализ позволяет приблизиться к более четкому пониманию сверхкатегории реляционных частиц в реляционной теории.

Поскольку в реляционной теории пространство-время проявляется как абсолютный поглотитель, то совершенно естественно связать сверхкатегорию реляционных частиц именно с ним. Классическое пространство-время

определяется некими идеальными свойствами поглотителя, которые никак не изменяются при воздействии на него выделенных частиц. Если же все частицы рассматривать как согласованную систему, то поглотитель нельзя уже считать идеальным и его свойства должны возникать в динамике. Сверхкатегория реляционных частиц, возможно, и проявляется как такой самосогласованный (реальный) поглотитель.

В работе также рассмотрены вопросы интерпретации опережающих воздействий в теории прямого межчастичного взаимодействия. Показано, что опережающие воздействия всегда можно трактовать с помощью запаздывающих воздействий по аналогии с методикой радиолокации, лежащей в основе хроногеометрии. Однако даже с учетом этого получаемое действие взаимодействия по своему виду будет отличаться от соответствующего действия, используемого в классической электродинамике.

Строгая симметрия действия Фоккера по отношению к запаздывающим и опережающим воздействиям реализуется только для классических частиц, которые существуют бесконечно долго. Если же учесть процессы рождения и уничтожения частиц (например, рождение и аннигиляция электронно-позитронных пар), то эта симметрия будет нарушена. В статье приведены некоторые простые примеры таких ситуаций, которые показывают, что форма действия взаимодействия с дельта-функцией является наиболее общей, поскольку учитывает возможное наличие неполного количества корней уравнения $s_{12}^2 = 0$. Присутствие процессов рождения и уничтожения частиц в поглотителе может не только приводить к возмущениям стрелы времени, но и к поправкам в уравнении движения заряда, связанным со свойствами поглотителя.

Электромагнитная сила, действующая на выделенную частицу в уравнении движения, помимо силы реакции излучения будет теперь определяться тензором $\bar{F}_{\mu\nu} = F'_{\mu\nu} + \delta F_{\mu\nu}$, где $\delta F_{\mu\nu}$ возникает вследствие нарушений временной симметрии в поглотителе. Из-за этих возмущений поля мы, например, в любой электрической цепи будем наблюдать неустранимые электромагнитные шумы. Однако с точки зрения классической электродинамики тензор $\bar{F}_{\mu\nu}$ мы должны интерпретировать как некоторое запаздывающее поле. Это приводит к необходимости трактовать наблюдаемые шумы как флуктуации расстояний между частицами, а также как флуктуации соответствующих временных интервалов.

Если нарушения симметрии вызваны актами рождения и уничтожения частиц, то наибольший эффект (анизотропия свойств шума) должен проявляться в тех направлениях в пространстве, где ожидаются большие скопления пар частиц и античастиц. Главными кандидатами на эту роль являются окрестности (магнитосферы) активных астрофизических объектов, где сосредоточены поля высокой интенсивности. В первую очередь, следует обратить внимание на центр нашей Галактики, где предположительно находится сверхмассивная черная дыра. Некоторые указания на наличие таких эффектов приведены в монографии [13].

Литература

1. Владимиров Ю. С. Метафизика. М.: БИНОМ, 2000, 2009.
2. Жилкин А. Г. Реляционная физика с точки зрения метафизики // Метафизика. 2014. № 2 (12). С. 49–67.
3. Жилкин А. Г. Феноменология Сверхличности. М.: Янус-К, 2019.
4. Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М. Теория поля. М.: Физматлит, 2006.
5. Жилкин А. Г. Базовые категории и принципы реляционной физики // Вестник Челябинского государственного университета. 2013. № 25 (316). Физика. Вып. 18. С. 80–92.
6. Жилкин А. Г. О динамике реляционных систем: нерелятивистский случай // Челяб. физ.-мат. журн. 2017. Т. 2 (1). С. 99–112.
7. Жилкин А. Г., Курбатов Е. П. О динамике реляционных систем: релятивистский случай // Челяб. физ.-мат. журн. 2017. Т. 2 (1). С. 113–127.
8. Жилкин А. Г., Курбатов Е. П. Принцип полного поглощения в реляционной физике // Челяб. физ.-мат. журн. 2017. Т. 2 (3). С. 344–357.
9. Жилкин А. Г. Реляционный принцип полного поглощения // Метафизика. 2020. № 2 (36). С. 34–49.
10. Wheeler J. A., Feynman R. P. Interaction with the absorber as the mechanism of radiation // Reviews of modern physics. 1945. Vol. 17 (2–3). P. 157–181.
11. Fokker A. D. Ein invarianter Variationssatz für die Bewegung mehrerer elektrischer Massenteilchen // Zs. Phys. 1929. Vol. 58. P. 386–393.
12. Tetrode H. Über den Wirkungszusammenhang der Welt. Eine Erweiterung der klassischen Dynamik // Zs. Phys. 1922. Vol. 10. P. 317–328.
13. Шноль С. Э. Космофизические факторы в случайных процессах. Стокгольм: Svenska fysikarkivet, 2009.

ANALOGY BETWEEN THE PRINCIPLE OF EQUIVALENCE AND THE RELATIONAL PRINCIPLE OF COMPLETE SUPPLY*

A.G. Zhilkin**

*Institute of Astronomy RAS
48 Pyatnitskaya St, Moscow, 119017, Russian Federation*

Abstract. The paper analyzes the analogy between the principle of total absorption in the relational theory and the principle of equivalence in the general theory of relativity. Using the formulation of these principles in metaphysical terms allows us to conclude that the supercategory of relational particles manifests itself in dynamics as a self-consistent absolute absorber. Questions of interpretation of leading actions in the theory of direct interparticle interaction are considered. It is shown that the strict symmetry of the Fokker action with respect to retarded and advanced actions can be violated when the processes of particle creation and annihilation are taken into account.

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

* The author expresses gratitude to M. Yu. Romashka for useful discussions.

** E-mail: zhilkin@inasan.ru