

ПРОБЛЕМЫ ГЕОМЕТРИЧЕСКОЙ И ТЕОРЕТИКО-ПОЛЕВОЙ ПАРАДИГМ

DOI: 10.22363/2224-7580-2022-2-40-54

О ПАРАДОКСАХ, СВЯЗАННЫХ С ИЗМЕНЕНИЕМ СИСТЕМЫ ОТСЧЕТА

А.В. Белинский^{1*}, М.Х. Шульман^{2**}

¹ *Физический факультет Московского государственного университета
имени М.В. Ломоносова,*

Российская Федерация, 119991, Москва, Ленинские Горы, д. 1, стр. 2

² *Научно-практический центр специализированной
медицинской помощи детям имени В.Ф. Войно-Ясенецкого.
Российская Федерация, 119620, Москва, ул. Авиаторов, д. 38*

Аннотация. В 1905 г. вышла основополагающая статья Эйнштейна [1], были открыты фундаментальные законы теории относительности, в том числе парадокс часов. Эти открытия привели к революционным изменениям в физике, в том числе и в астрофизике. Мы показываем тесную взаимосвязь этой дисциплины с так называемой *квантовой нелокальностью*. Она проявляется в выделенной роли светового конуса, в концепциях предшествования и корреляции между удаленными событиями, в представлениях о дальнодействии и близкодействии, в парадоксах квантовых взаимодействий на расстоянии, в кажущихся нарушениях причинности при рождении черных дыр, в мгновенности возникновения сил инерции, возникающих в согласии с принципом Маха.

Ключевые слова: парадокс часов, квантовая запутанность, принцип неопределенности, световой конус, светоподобный интервал, близкодействие, дальнодействие, инерция, принцип Маха

Введение

Рассмотрим взаимосвязь между двумя замечательными феноменами, установленными теоретически и подтвержденными экспериментально в XX в.

* E-mail: belinsky@physics.msu.ru

** E-mail: shulman@dol.ru

Первый феномен – это так называемый парадокс часов, обнаруженный в рамках специальной теории относительности (СТО) Эйнштейна. Его суть состоит в том, что скорость и длительность движения являются не абсолютными (как это предполагалось в механике Ньютона), а относительными величинами, зависящими от выбора системы отсчета. Например, в неподвижной относительно наблюдателя системе отсчета все процессы у движущихся объектов замедляются [2]. Так, в опытах с мюонами (см., например, [3]) процесс распада летящих мюонов играет роль своеобразных движущихся часов. Постоянная времени полураспада мюона в состоянии покоя составляет 1,56 микросекунды, а в процессе распада падающих при большой скорости из космоса мюонов (98 % от скорости света) она возрастает до 7,8 мкс по часам наземного наблюдателя.

В рамках общей теории относительности (ОТО) можно описать не только относительное движение в двух инерциальных системах отсчета, но и такую ситуацию, когда в неподвижной системе отсчета движущееся тело сначала удаляется от неподвижного тела, а затем поворачивает и возвращается к нему¹ [4]. В этом случае парадокс часов проявляется поразительным и непосредственно измеряемым образом: длительность путешествия, определяемая по часам двигавшегося таким образом тела, действительно оказывается меньше, чем показывают неподвижные часы. Этот факт полностью подтверждается экспериментально, в частности полетами самолетов по и против направления вращения Земли [5], и учитывается в алгоритмах GPS и ГЛОНАСС.

Второй феномен – это так называемая *квантовая нелокальность*, которая проявляется в коррелированности («запутанности») процессов, разделенных сколь угодно большим пространственным (то есть 3-мерным) расстоянием. Впервые эта ситуация, которую Эйнштейн наименовал «мистическим действием на расстоянии (spooky action at a distance)», теоретически была описана в знаменитой статье Эйнштейна, Подольского и Розена [6] и получила в дальнейшем название парадокса ЭПР. В этом мысленном парадоксе, казалось бы, нарушается принцип неопределенности Гейзенберга: при наличии двух частиц, имеющих общее происхождение, якобы можно измерить состояние одной частицы и по нему предсказать состояние другой, над которой измерение ещё не производилось. На самом деле, принцип неопределенности, конечно, не нарушается, но его выполнение связано с мгновенным изменением квантового состояния одной частицы при измерении состояния другой. В результате точное измерение, скажем, импульса одной частицы, приводит к точному выявлению импульса другой, но при этом мгновенно появляется неопределенность по пространству (см. напр., [7]). Но даже если бы и удалось одновременно измерить импульс и координату, то и это бы не нарушило принцип неопределенности, так как само точное измерение еще не означает отсутствия неопределенности [8].

¹ В известном «парадоксе близнецов» такими объектами выступают два космонавта-близнеца, которые стареют по-разному в соответствии с тем, улетали ли они с Земли или нет.

Так или иначе, взаимосвязь между частицами является мгновенной [9; 10] и нелокальной в смысле независимости от расстояния между частицами. Джон Белл в статье [11] довел парадокс до количественного неравенства: если он реально существует, то должно экспериментально нарушаться некоторое статистическое неравенство. Это неравенство в 1980-х гг. было проверено, и подтверждено его нарушение в работах Аспэ и его сотрудников [12]. В дальнейшем подобные эксперименты повторялись множество раз в самых различных модификациях, и их результаты в настоящее время сомнений уже не вызывают, см., напр., [13] и цитируемую там литературу. Правда, вывод неравенства Белла связан с некими постулативными ограничениями. Попытки дать более общее доказательство квантовой нелокальности были предприняты в работах [14–16]. Ниже представлен анализ соответствующего круга проблем, позволяющий, с нашей точки зрения, преодолеть трудности понимания физической сути явления нелокальности.

1. Светоподобные интервалы и нелокальность

В СТО пространство-время Минковского *локально* описывается диаграммой, приведенной на рис. 1а. В выбранной инерциальной системе отсчета текущее событие помещается в начало системы координат, через которое проходит «световой конус» (показан пунктиром) *абсолютного* прошлого и *абсолютного* будущего, которые включают причинно связанные между собой 4-события. Вне конуса лежат «абсолютно удаленные» области пространства-времени, точки (4-события) которого не могут быть достигнуты при движении из начала координат с досветовой или световой скоростью. Интервал ds в пространстве-времени Минковского описывается соотношением

$$ds^2 = -c^2 dt^2 + dx^2 + dy^2 + dz^2,$$

то есть оно является *псевдоевклидовым* по определению.

Глобальное пространственно-временное описание для *геометрически замкнутой* модели (расширяющейся) Вселенной в теории относительности может быть представлено семейством кривых («изохрон») на рис. 1б, каждая из которых удалена на одну и ту же величину интервала ds от последующей и предшествующей². В геометрически замкнутой модели Вселенной образующие светового конуса сначала расходятся (подобно меридианам $+45^\circ$ и -45° , проходящим через один полюс), а затем начинают сходиться (после пересечения соответствующих «параллелей» и «экватора») к другому полюсу, так что изохроны верхней полуплоскости рисунка непрерывно переходят в изохроны нижней полуплоскости, то есть окончательно сходятся в начале координат (см. рис. 1б).

² Наклонные линии, проходящие через начало координат, соответствуют различным скоростям движения.

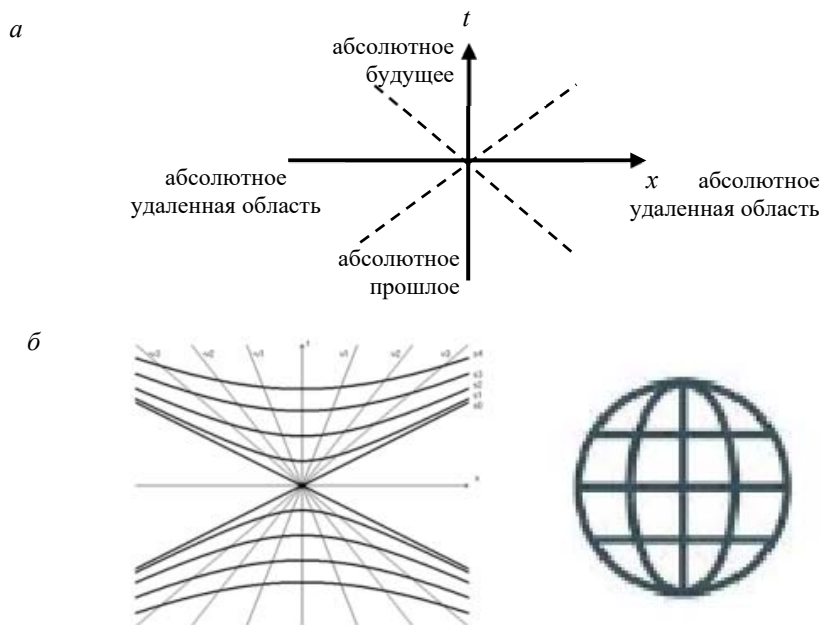


Рис. 1. Описание времени в теории относительности:

а – диаграмма «прошлое – будущее» в СТО; *б* – глобальное изображение изохрон

Если некоторое 4-событие лежит *внутри* светового конуса, то оно может быть связано с начальным 4-событием причинно-следственной связью, поскольку одно из них *предшествует* другому в *любой* инерциальной системе отсчета. Часто этот случай объединяют с граничной ситуацией, когда оба 4-события принадлежат общему световому конусу. 4-интервал между такими двумя событиями равен нулю, это *светоподобный* интервал. Если одно из событий состоит в испускании быстро движущейся частицы, а второе – в ее поглощении, то в связанной с этой частицей «собственной» системе отсчета длительность движения частицы будет в пределе стремиться к *нулю* по мере приближения к скорости света c в вакууме. В этом пределе уже нельзя утверждать, что излучение частицы *предшествует* (в указанной системе отсчета) ее поглощению; разделенные светоподобным интервалом события оказываются связанными не причинно-следственной, а в общем случае корреляционной связью. К этому и сводится интерпретация феномена нелокальности.

2. Астрофизические парадоксы

2.1. Парадокс Тетроде

Замечательное описание рассматриваемой ситуации было дано в работе [17] Хьюго Мартина Тетроде (1895–1931) – голландского физика, работавшего в области статистической физики и квантовой теории:

«Солнце не излучало бы, если бы где-либо не нашлось тела, способного поглотить это излучение... . Например, если я вчера наблюдал с помощью телескопа звезду, удаленную, скажем, на 100 световых лет, то не только я

знаю, что испущенный ею 100 лет назад свет достиг моего глаза, но также и звезда или ее отдельные атомы уже 100 лет назад знали, что я, который даже еще не существовал тогда, вчера вечером увижу этот свет в такое время. Но как удаленная звезда может «знать», где и когда в будущем будет зарегистрирован испущенный ею фотон?»

Наш ответ на вопрос Тетроде состоит в том, что фотон, долетевший до наблюдателя от далекой звезды, испускается (по «собственным» часам) в тот же момент времени, что и поглощается глазом наблюдателя, и эти часы объективно обладают приоритетом относительно всех прочих часов.

2.2. «Галактический» парадокс Уилера

Уилер предложил [18] такой мысленный эксперимент (рис. 2). Пусть удаленный квазар испускает фотон, миллиарды лет летящий к Земле. По дороге этот фотон огибает огромную галактику, которая и является причиной искривления пути фотона. В конечном счете свет попадает на вход установленного на Земле телескопа, снабженного интерферометром Маха–Цендера.

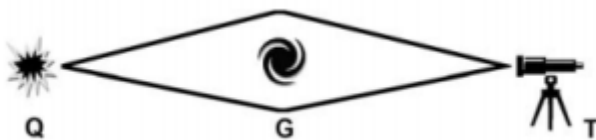


Рис. 2. Свет от удаленного квазара Q огибает массивную галактику G и попадает на вход установленного на Земле телескопа T, снабженного интерферометром Маха–Цендера

На входе телескопа помещают интерферометр Маха–Цендера, в котором можно убирать (или не убирать) входной 50 % светоделитель, в результате чего не будет (или будет) наблюдаться интерференция³. Во втором случае нет способа выяснить, по какому именно пути прошли фотоны огибая галактику, то есть они будут интерферировать; в первом – информация о выборе фотонами одной из возможных траекторий не пропадает, и интерференция исчезнет. Суть парадокса состоит в том, что выбор между интерферирующим и неинтерферирующим поведением осуществляется в самое последнее мгновение, когда фотон уже пролетел отведенные ему миллиарды лет путешествия. Этот эффект вполне можно рассматривать как проявление нелокальности – как может излучаемый фотон заранее «знать», будет ли введен светоделитель? Ответ тот же, что и в предыдущем случае: «часы» излученного фотона объективно обладают приоритетом относительно всех прочих часов.

Тут, правда, можно возразить, что фотон распространяется одновременно по всем возможным траекториям, так что введение светоделителя лишь определяет, как он себя проявит при регистрации – волной или частицей. Но

³ Вводимый светоделитель играет роль «квантового ластика», так как после его прохождения фотоном принципиально нет возможности определить путь, который фотон проделал до этого.

и в этом случае парадоксальность ситуации не снимается. Ведь как может неделимый квант «разделиться» на несколько пространственно разделенных траекторий? И в этом тоже можно усмотреть явление нелокальности.

2.3. Парадокс рождения черной дыры

При рождении черной дыры (ЧД) в ходе гравитационного коллапса звезды вначале горизонт событий⁴ формируется в центре звезды и представляет собой всего лишь одну точку [19]. Поверхность сжимающейся звезды за конечное собственное время достигает сферы Шварцшильда. Затем вещество стремительно стягивается в сингулярность, причем длительность этого процесса составляет $1,54 \times 10^{-5} M/M_{\odot}$, где M – масса коллапсирующей звезды, M_{\odot} – масса Солнца [20]. В результате внутри сферы Шварцшильда возникает ЧД – пространственно-временная область, из которой никакие сигналы не уходят на пространственную бесконечность.

Принято считать [19], что имеет место следующий парадокс: расширение горизонта событий начинается (момент t_1) до того, как ЧД поглощает оболочку. Он расширяется в ожидании поглощения оболочки, сразу после этого приходит в состояние покоя (момент t_2) и выходит на поверхность звезды точно в тот момент, когда поверхность сжимается до критического предела. Иными словами, когда вещество падает внутрь ЧД, горизонт начинает расти (следствие) до того, как вещество достигает ЧД (причина). В философской терминологии это – телеологический парадокс.

Согласно общепринятой в настоящее время точке зрения, положение горизонта событий для ЧД в данный момент времени зависит от всей последующей эволюции системы. Если, например, образование горизонта событий начинается в момент t_1 , а в момент t (где $t_1 < t < t_2$) произойдет взрыв коллапсирующей звезды, то это может привести к тому, что горизонт событий не образуется вовсе [19]. Вообще, «структура областей внутри ЧД решающим образом зависит от судьбы ЧД в бесконечном будущем внешнего наблюдателя, от конечного состояния испарения ЧД, от возможных столкновений ЧД с другими ЧД и от судьбы самой Вселенной. Ясно, что теоретики чувствуют себя весьма неуютно в таких обстоятельствах» [21].

С нашей точки зрения, вышеописанный «телеологический парадокс» имеет следующее разрешение: горизонт событий – это светоподобная область, любые два события которой не могут предшествовать (то есть принадлежать будущему) одно относительно другого, излучение и поглощение фотона одновременны в приоритетной системе отсчета. Поэтому образование горизонта событий с началом в момент t_1 и взрыв коллапсирующей звезды в момент t (где $t_1 < t < t_2$) следует рассматривать как два физически альтернативных (несовместных) процесса.

⁴ Горизонт событий – граница между событиями, от которых еще могут распространяться сигналы во внешнюю Вселенную, и событиями, которые уже не могут послать никаких сигналов во внешнюю Вселенную.

2.4. Квантовая телепортация

Под квантовой телепортацией обычно понимают (мгновенную) передачу квантового состояния на произвольное расстояние [22]. Это осуществляется при помощи пары квантово «запутанных» частиц, причем исходное состояние разрушается, а конечное состояние (копия исходного) возникает в точке приёма. *Мгновенность* передачи, как и в вышеописанных ситуациях, кажется несовместимой с классическими представлениями. Однако этот феномен нашел многократные экспериментальные подтверждения. Так, в сентябре 2015 г. учёным из Национального института стандартов и технологий США удалось телепортировать фотоны по оптоволокну на расстояние свыше 100 км [23]. В июне 2017 г. китайские учёные осуществили квантовую телепортацию на расстояние свыше 1200 километров [24]. Согласно нашей концепции, *мгновенность* переноса информации о состоянии соответствует представлению о нулевой продолжительности между событиями ее отправления и приёму в приоритетной системе отсчета.

Телепортация, однако, реализуется не только с помощью фотонов, не обладающих, как известно, массой. С первого взгляда кажется, что для массивных квантовых частиц (например, электронов) все сделанные выше утверждения неприменимы. На самом деле удивительным образом оказывается, что и в случае квантовых частиц с *ненулевой* массой в некотором смысле можно (и нужно) говорить о световых скоростях распространения [25].

Действительно, массивные квантовые частицы (в частности электроны) обладают не только корпускулярными, но и волновыми свойствами. Так, для электрона Дираком в 1928 г. было получено [26] релятивистское описание четырех спинорных величин, где одна пара отвечает положительной, а вторая пара – отрицательной энергии электрона, и в каждой паре одна из величин отвечает одному направлению спина, а другая – противоположному. При этом операторы для составляющих скорости электрона не коммутируют между собой, а собственные значения каждого из них в результате измерения обязательно должны быть равны по абсолютной величине скорости света, но иметь противоположные знаки. Такой парадоксальный результат Шрёдингер в 1930 г. объяснил [27] наличием у электрона двух компонент скорости – обычной (*медленной*) и *быстро осциллирующей* с частотой, отвечающей периоду *волны де Бройля* для электрона. Сходные представления о реальном электроне, «состоящем» из двух *безмассовых* компонент «zig» и «zag», описаны в книге Пенроуза [28]. Наконец, в работе [29] еще более ясно сформулировано, что «дрожательному» движению соответствует представление стационарного состояния электрона в виде *суперпозиции* двух собственных состояний оператора скорости с собственными значениями $+c$ и $-c$. Именно *среднее* значение скорости определяется значением *реально измеряемого* импульса частицы.

Как отмечали авторы [6], рассматривая две взаимно удаляющиеся запутанные между собой частицы с *ненулевой* массой покоя, у одной из которых измеряется координата, а у другой импульс, следует иметь в виду, что сколь

угодно точное измерение обеих величин при сохранении взаимной корреляции противоречило бы, как они думали, соотношению неопределенностей Гейзенберга в лабораторной системе отсчета. Однако в реальности запутанные квантовые частицы *нельзя* считать автономными, не имеющими никакой постоянной связи.

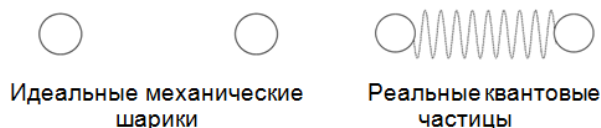


Рис. 3. Классические и квантовые представления о паре запутанных частиц в символической форме

Таким образом, рассматривая, скажем, спины запутанных между собой электронов, мы обязательно сталкиваемся с нетривиальным волновым (колебательным) процессом, в котором взаимодействие компонент (не связанное с реально наблюдаемым движением электронов) осуществляется со скоростью света. При этом две *запутанные* частицы не могут рассматриваться в виде двух *независимых* механических шариков, а должны восприниматься как компоненты нелокального волнового процесса (рис. 3), простирающегося (в лабораторной системе отсчета) между его начальной и финальной точками. В то же время в системе отсчета движущейся квантовой частицы вся эта область просто стремится к стягиванию в одну точку.

3. Дальнодействие и близкодействие

В рамках обсуждаемой темы естественно рассмотреть концепции близкодействия и дальнодействия в физике [30].

В классической физике основоположниками концепции близкодействия обычно считают Декарта и Фарадея. При этом подразумевается, что

- взаимодействия передаются через особых материальных посредников;
- такие взаимодействия осуществляются с конечной скоростью.

Напротив, принято считать, что, согласно концепции дальнодействия, тела должны действовать друг на друга:

- без материальных посредников (через «пустоту») на любом расстоянии;
- такие взаимодействия осуществляются с бесконечно большой скоростью.

К настоящему времени теоретические исследования выявили определенные сложности в теориях, использующих концепцию дальнодействия, поэтому современные подходы чаще основываются на парадигме близкодействия.

С нашей точки зрения, противопоставление двух упомянутых концепций не имеет под собой незыблемого основания. В самом деле, когда говорят о взаимно удаленных телах, имеют в виду наличие произвольно большого разделяющего их 3-мерного расстояния. Однако, как нами уже было отмечено,

такая мера удаленности имеет относительный характер – эта мера может стать сколь угодно малой, если рассматривать эту же конфигурацию двух тел не в лабораторной, а в быстро движущейся системе отсчета.

В классической электродинамике, как известно, однозначно определяются электрическое \vec{E} и магнитное \vec{B} поля, для которых формулируются представления об электрическом скалярном потенциале φ и магнитном вектор-потенциале \vec{A} . Векторы электрического и магнитного поля можно разделить на две компоненты – *продольную* (безвихревую) с равным нулю ротором и *поперечную* (соленоидальную) с равной нулю дивергенцией.

Как отмечается в [31], из уравнений Максвелла следует, что продольная компонента магнитного поля $\vec{B}_{\parallel} = 0$, тогда как продольная компонента электрического поля $\vec{E}_{\parallel}(\vec{r}, t)$ есть *электростатическое* (то есть *дальнодействующее*) поле, созданное соответствующим распределением заряда. Преобразованные так уравнения поля позволяют вполне законным образом оперировать *мгновенным* взаимодействием, то есть использовать концепцию дальнодействия (см. также [32]).

В 1945 г. выдающиеся американские физики Дж. Уилер и Р. Фейнман развили теорию прямого (непосредственного и *мгновенного*) межчастичного взаимодействия между заряженными частицами [33], в которой исходили, в частности, из того, что:

- поле, действующее на данную частицу, обусловлено только *непосредственным* действием других частиц;
- это поле излучения описывается полусуммой опережающего и запаздывающего решений Лиенарта–Вихерта уравнений Максвелла, симметричной по отношению к прошлому и будущему. При этом авторы [33] исходили из представления о полной обратимости, лежащей в основании унифицированной теории действия на расстоянии.

Возмущение, создаваемое ускоряемым *зарядом*, приводит к движению каждой частицы *поглотителя*, которая из-за этого генерирует поле – полусумму опережающего и запаздывающего членов. Сумма опережающих воздействий всех частиц поглотителя, определенная в пробной точке вблизи от исходного заряда, дает результирующее поле. Оно воздействует на источник возмущения с силой, которая является конечной, *одновременной с моментом возмущения* и точно соответствующей по величине и направлению той силе, которая отвечает передаче энергии от источника к окружающей среде.

Таким образом, в теории Уилера – Фейнмана также возникает парадигма дальнодействия, то есть мгновенного действия на произвольном расстоянии. Эта теория не только предсказывает те же результаты, что и стандартное решение системы уравнения Максвелла, но и эффективно описывает эффект так называемого *радиационного трения*.

Заметим, что выкладки Уилера – Фейнмана, связанные с использованием опережающих и запаздывающих потенциалов, весьма громоздки. С нашей точки зрения, чтобы обосновать дальнодействие электрических зарядов, достаточно учесть равенство нулю «собственной» длительности обмена

носителями электромагнитного поля (фотонами, движущимися со скоростью света), то есть нелокальность поля.

4. Нелокальность и инерция

Согласно принципу Маха, инерция объекта определяется его взаимодействием с остальной Вселенной: тело испытывает силу инерции, когда оно ускоряется относительно центра масс всей Вселенной [34].

В работе Сиамы [35] отмечается:

«Если вся остальная Вселенная определяет инерциальные системы отсчета, то отсюда следует, что инерция не является внутренним свойством материи, но возникает как результат взаимодействия материи с остальной материей во Вселенной. Это непосредственно порождает проблему – как законы движения Ньютона могут быть столь точны, несмотря на их полную несвязанность с физическими свойствами Вселенной, в частности с количеством содержащейся в ней материи. Одним из требований теории инерции, совместимой с принципом Маха, был учет наглядной независимости от свойств Вселенной».

В статье [35] представлена нерелятивистская упрощенная модель гомогенной расширяющейся Вселенной, причем потенциал гравитационного поля описывается вектором, а не тензором. В ней описывается теория гравитации, приписывающая инерцию индуктивному влиянию удаленной материи. Эта теория, в частности, отличается от ОТО тем, что принцип эквивалентности оказывается следствием теории, а не начальной аксиомой. Позже, в работе [36], была предложена модель с модифицированным тензорным гравитационным потенциалом, «в которой материя влияет на метрику не только непосредственно, но и через дополнительно введенное скалярное поле» [37].

В [37] сделано очень важное замечание:

«В конечном счете принцип Маха оказался не совместим с общей теорией относительности. В этой теории информация об окружающих тело объектах может распространяться только с конечной скоростью (не быстрее скорости света), то есть инертные свойства тела не могут определяться всеми другими телами Вселенной».

В самом деле, если гравитационное поле всей Вселенной является источником инерции, то оно должно характеризоваться *мгновенной*, а не запаздывающей реакцией на движение любого пробного тела (как это и имеет место в действительности). В предшествующем разделе мы уже рассмотрели концепцию нелокальности и дальнего действия применительно к электромагнитному полю. Она основана на идее сведения локального взаимодействия между частицами к глобальному взаимодействию частицы с окружающей Вселенной и восходит к идее Фоккера, согласно которой обычный *вектор-потенциал* электромагнитного поля представляет собой не что иное, как *сумму «мгновенных» влияний* на пробный заряд со стороны всех остальных зарядов Вселенной. Эту идею вполне естественно попытаться рас-

пространить на гравитационное поле. Подобная попытка описана, в частности, в [38]. Однако ее автор, следуя принципу Маха, пытался в виде аналогичной суммы представить *массу* пробной частицы, так что величина массы при этом оказалась бы зависящей от состава Вселенной.

Подобный подход наталкивается на методические трудности, так как *вектор-потенциал* играет роль, аналогичную удельному (на единицу заряда) *импульсу* (а не массе). Чтобы увидеть это, рассмотрим описание электрически заряженной частицы в электромагнитном поле (см. [2]).

Действие для системы «частица + поле» содержит три слагаемых. Первое слагаемое отвечает механическому движению частицы в отсутствие поля, второе слагаемое – взаимодействию заряженной частицы с полем, а третье зависит только от самого поля. Если не учитывать вклад третьего слагаемого, то влияние поля на инерциальные свойства движения частицы приводит к тому, что к энергии частицы алгебраически добавляется слагаемое $e\varphi$ (e – заряд, φ – скалярный электрический потенциал поля), а вместо механического импульса $\vec{p} = m\vec{v}$ следует ввести обобщенный импульс, то есть производную от функции Лагранжа по скорости $\vec{P} = \vec{p} + e\vec{A}/c$ (где \vec{A} – вектор-потенциал поля, c – скорость света).

Таким образом, выражение для *обобщенного импульса* содержит *два равноправных* слагаемых, одно из которых обусловлено *механической* компонентой инерции, а другое – *электромагнитной* компонентой. Учитывая, что вектор-потенциал есть величина, ротор которой равен вектору магнитного поля, мы видим прямое подтверждение тому, что поток магнитного поля электрической системы играет роль, аналогичную механическому импульсу частицы.

Если рассматривать именно вектор-потенциал в качестве суммы влияний на пробный заряд всех остальных зарядов Вселенной и если вектор-потенциал и механический импульс частицы равноправным образом суммируются в соответствующих физических уравнениях, то и *механический импульс частицы следует рассматривать как сумму механических влияний на пробную частицу всех остальных частиц Вселенной!* Эта идея – вполне в духе принципа Маха – оказывается тривиально верной, поскольку обобщенный импульс пробной частицы в сумме с импульсом всех остальных частиц Вселенной всегда дает одну и ту же сохраняющуюся величину (если Вселенную рассматривать как замкнутую систему), то есть непосредственно выражается через эту сумму.

При таком подходе в сумме, представляющей обобщенный импульс $\vec{P} = m\vec{v} + e\vec{A}/c$, роль вектор-потенциала \vec{A} (деленного на скорость света), как нетрудно заметить, оказывается вполне аналогичной роли вектора скорости частицы \vec{v} , а роль электрического заряда e – роли гравитационного заряда m . Симметричная роль гравитационного и электрического зарядов в феномене инерции подтверждается и полной аналогией в выражениях для напряженности поля от заряда, вытекающих из закона Кулона и закона всемирного тяготения.

Можно думать, что именно сохранение обобщенного импульса и является обоснованием представления Фоккера о вектор-потенциале как о сумме вкладов отдельных взаимодействий.

Для другой модели, часто рассматриваемой при обсуждении принципа Маха, то есть модели Вселенной, содержащей только одну частицу (с электрическим зарядом или без него), следствие закона сохранения обобщенного импульса особенно ясно, а изменение импульса частицы – просто запрещено, так как взаимодействовать одинокой частице не с чем.

Вместе с тем электромагнитное взаимодействие ограничено в пространстве из-за взаимной компенсации электрических зарядов противоположного знака, тогда как силы тяготения действуют не только в пределах звездных систем и Галактик, но и в масштабе Метагалактики. Современные космологические модели прямо учитывают это обстоятельство, оперируя радиусом кривизны Вселенной, который связывается со средней плотностью материи в ней [39; 40].

Заключение

Все вышеизложенное приводит нас к твердому убеждению, что представление о «локальности» нашей Вселенной препятствует ясному пониманию ее истинной природы. Мы видим, что все основные астрофизические процессы (распространение света, рождение ЧД, квантовая телепортация) неразрывно связаны с проявлениями нелокальности в 4-мерном пространстве-времени.

Более того, в явлениях «земного» масштаба все эффекты нелокальности (например, в экспериментах с отложенным выбором) проявляются с той же неизбежностью, а их учет позволяет предложить ясное и надежное описание (см. работы [25; 41–44]).

И наконец, предлагаемый подход проливает ясный свет на известную концепцию квантовых интегралов по траекториям. Как отмечает Р. Фейнман [45], классический принцип наименьшего действия для фотона можно вывести, рассматривая сумму комплексных вероятностей переходов по *всем* возможным путям движения фотонов во Вселенной. Тем самым фактически допускается, что все эти переходы представляют собой *мгновенные и одно-временные* события, а это возможно как раз при справедливости изложенной нами точки зрения.

Литература

1. *Einstein A.* Zur Elektrodynamik der bewegter Korper // Ann. Phys. 1905. 17. P. 891–921. [Эйнштейн А. К электродинамике движущихся тел (1905): собрание научных трудов. Т. 1. М.: Наука, 1965. С. 7–35.]
2. *Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М.* Теория поля (изд. 8). М.: Физматлит, 2003. 536 с.
3. *Nave R.* Nuclear Binding Energy. Hyperphysics. GSU, Atlanta, 2010. URL: <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/hph.html>
4. *Tolman R. C.* Relativity, Thermodynamics And Cosmology. Oxford: Clarendon Press, 1934. [Толман Р. Ч. Относительность, термодинамика и космология. Москва: Наука, 1974.]

5. *Hafele J. C., Keating R. E.* Around-the-World Atomic Clocks // *Science*. 14 Jul. 1972. Vol. 177. P. 166–168. <https://doi.org/10.1126/science.177.4044.166>
6. *Einstein A., Podolsky B., Rosen N.* Can Quantum-Mechanical Description of Physical Reality Be Considered Complete? // *Physical Review*. May 1935. Vol. 47. P. 777–780. [*Эйнштейн А., Подольский Б., Розен Н.* Можно ли считать, что квантово-механическое описание физической реальности является полным? // *УФН*. 1936. Т. XVI. С. 436–457.]
7. *Белинский А. В., Клышко Д. Н.* Интерференция света и теорема Белла // *УФН*. 1993. Т. 163, № 8. С. 1–46.
8. *Белинский А. В., Ланин В. Б.* Принцип неопределенностей и точность измерений // *УФН*. 2017. Т. 187, № 3. С. 349–350.
9. *Gisin N.* Quantum Chance. Nonlocality, Teleportation and Other Quantum Marvels. Springer International Publishing Switzerland, 2014. [*Жизан Николая.* Квантовая случайность. Нелокальность, телепортация и другие квантовые чудеса. М.: Альпина нон-фикшн, 2016.]
10. *Salart D., Baas A., Branciard C., Gisin N., Zbinden H.* Testing the speed of ‘spooky action at a distance’ // *Nature*. 14 August 2008. 454. P. 61–864. <https://doi.org/10.1038/nature07121>
11. *Bell J.S.* On the Einstein-Podolsky-Rosen Paradox // *Physics*. 1964. 1. P. 195.
12. *Aspect A.* Bell’s theorem : the naive view of an experimentalist. Institut d’Optique Theorique et Appliquee // «Quantum [Un]speakables – From Bell to Quantum information», eds. R. A. Bertlmann, A. Zeilinger. Springer, 2002. URL: <https://arxiv.org/ftp/quant-ph/papers/0402/0402001.pdf>
13. *Ma X., Kofler J., Zeilinger A.* Delayed-choice gedanken experiments and their realizations // *Rev. Mod. Phys.* 2016. 88. P. 015005.
14. *Leggett A. J.* Nonlocal Hidden-Variable Theories and Quantum Mechanics: An Incompatibility Theorem // *Found. Phys.* 2003. 33. P. 1469–1493. <http://dx.doi.org/10.1023/a:1026096313729>
15. *Aspelmeyer M., Zeilinger A.* A quantum renaissance // *Phys. World*. 2008. 21 (7). P. 22.
16. *Белинский А. В., Клевцов А. А.* Нелокальный классический «реализм» и квантовая суперпозиция как отсутствие определённых значений физических величин до момента измерения // *УФН*. 2018. Т. 188, № 3. С. 335–342.
17. *Tetrode H.* Über den Wirkungszusammenhang der Welt. Eine Erweiterung der klassischen Dynamik // *Z. Physik*. 1922. 10. S. 317–328.
18. *Wheeler J. A.* Quantum Theory and Measurement / ed. J.A. Wheeler and W.H. Zurek. Princeton University Press, 1984.
19. *Новиков И. Д., Фролов В. П.* Физика черных дыр. М.: Наука. Главная редакция физико-математической литературы, 1986. С. 328.
20. *Misner C. W., Thorn K. S.* Gravitation. Vol. 3. San-Fransisco, 1973. [*Мизнер Ч., Торн К., Уилер Дж.* Гравитация. Т. 3. М.: Мир, 1977.]
21. *Новиков И. Д., Фролов В. П.* Черные дыры во Вселенной // *УФН*. 2001. Т. 171, № 3. С. 307–324.
22. *Bennett C. H., Brassard G., Crépeau C., Jozsa R., Peres A., Wootters W.* Teleporting an unknown quantum state via dual classical and Einstein-Podolsky-Rosen channels // *Phys. Rev. Lett.* American Physical Society, 1993. Vol. 70, Iss. 13. P. 1895–1899.
23. *Ji-Gang Ren et al.* Ground-to-satellite quantum teleportation. URL: <https://arxiv.org/ftp/arxiv/papers/1707/1707.00934.pdf>
24. *Juan Yin et al.* Satellite-based entanglement distribution over 1200 kilometers // *Science*. 16 Jun 2017. Vol. 356, Issue 6343. P. 1140–1144. URL: <https://arxiv.org/ftp/arxiv/papers/1707/1707.01339.pdf>
25. *Belinsky A. V., Shulman M. H.* A possible origin of quantum correlations // *Journal of Russian Laser Research*. 2017. Vol. 38. P. 230. URL: http://www.timeorigin21.narod.ru/rus_quantum/A_possible_origin_of_quantum_correlations_rus.pdf

26. *Dirac P. A. M.* The Quantum Theory of the Electron. Proceedings of the Royal Society // A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences. 1928. 117 (778).
27. *Schrödinger E.* Über die kräftefreie Bewegung in der relativistischen Quantenmechanik («On the free movement in relativistic quantum mechanics»). Berliner Ber, 1930. S. 418–428; Zur Quantendynamik des Elektrons. Berliner Ber, 1931. S. 63–72.
28. *Penrose R.* The Road to Reality: A Complete Guide to the Laws of the Universe. USA: Alfred A. Knopf, 2004. 1136 p. [*Пенроуз Р.* Путь к реальности, или Законы, управляющие Вселенной. Москва–Ижевск: R & C Dynamics, 2007. С. 911.]
29. *Вонсовский С. В., Свирский М. С.* Проблемы теоретической физики: сб. статей памяти И.Е. Тамма. М.: Наука, 1972. С. 389.
30. *Белинский А. В., Шульман М. Х.* Концепция дальнего действия и квантовая запутанность состояний // Электронный философский журнал Vox. Вып. 24 (июнь 2018). URL: <https://vox-journal.org/content/Vox%2024/Vox24-11-Belinsky-Shulman.pdf>
31. *Messiah A.* Quantum Mechanics. Vol. II. North Holland Publishing Company 1965. [*Мессиа А.* Квантовая механика. Т. 2. М.: Наука, Главная редакция физико-математической литературы, 1979. С. 584.]
32. *Chubykalo A., Espinoza A., Flores R. A.* Maxwell equations without gauge transformations // Phys. Scr. 2011 84. 015009 (6 p.)
33. *Wheeler J.A., Feynman R.P.* Interaction with the Absorber as the Mechanism of Radiation // Reviews of Modern Physics. 1945. 17. P. 156.
34. *Tianxi Zhang.* A new cosmological model: black hole universe // Progress in physics. July, 2009. Vol. 3. P. 3–11.
35. *Sciama D. W.* On the origin of inertia // MNRAS. 1953. Vol. 113. P. 34–42.
36. *Brans C., Dicke R. H.* Mach's Principle and a Relativistic Theory of Gravitation // Phys. Rev. 1 November 1961. 124. P. 925.
37. *Трунин Д.* Ведро Ньютона, принцип Маха и существование пространства-времени. Интернет-издание «N+1». URL: <https://nplus1.ru/blog/2017/12/28/bucket-argument>
38. *Нарликар Дж. В.* Инерция и космология в теории относительности Эйнштейна / пер. с англ. // Астрофизика, кванты и теория относительности. М.: Мир, 1982. С. 498–534.
39. *Засов А. В., Постнов К. А.* Общая Астрофизика. Фрязино: Век 2, 2006. С. 421–432.
40. *Горбунов Д. С., Рубаков В. А.* Введение в теорию ранней Вселенной: Теория горячего Большого взрыва. М.: ЛКИ, 2008. С. 45–80.
41. *Белинский А. В.* О нарушении причинности в квантовых экспериментах // Вестник Московского университета. Серия 3: Физика, астрономия. 2018. № 3. С. 14–25.
42. *Белинский А. В.* О возможном нарушении причинности как альтернативе информационной интерпретации квантовой теории // Ученые Записки Физического факультета МГУ. 2017. № 3. С. 173001-1-173001-6.
43. *Белинский А. В.* О нарушении причинности // Пространство, время и фундаментальные взаимодействия. 2017. № 3 (20). С. 68–75.
44. *Белинский А. В.* О нарушении причинности в экспериментах с фотонами // Метафизика. 2017. № 3 (25). С. 71–93.
45. *Фейнман Р., Лейтон Р., Сэндс М.* Фейнмановские лекции по физике. Т. 3. М.: Мир, 1976.

ON THE PARADOXES ASSOCIATED WITH A CHANGE IN THE REFERENCE SYSTEM

A.V. Belinsky^{1*}, M.H. Shulman^{2**}

*¹Faculty of Physics, Lomonosov Moscow State University
2 build., 1 Leninskiye Gory, Moscow, 119991, Russian Federation*

²Scientific and Practical Center for Specialized Medical Care for Children.

V.F. Voyno

38 Aviators St, Yassenetsky, Moscow, 119620, Russian Federation

Abstract. In 1905, Einstein's fundamental article [1] was published, the fundamental laws of the theory of relativity were discovered, including the clock paradox. These discoveries led to revolutionary changes in physics, including astrophysics. We show the close relationship of this discipline with the so-called quantum nonlocality. It manifests itself in the highlighted role of the light cone, in the concepts of precedence and correlation between distant events, in the ideas of long-range and short-range interactions, in the paradoxes of quantum interactions at a distance, in apparent violations of causality during the birth of black holes, in the instantaneous occurrence of inertial forces arising in accordance with Mach's principle.

Keywords: clock paradox, quantum entanglement, uncertainty principle, light cone, light-like interval, short range, long range, inertia, Mach principle

* E-mail: belinsky@physics.msu.ru

** E-mail: shulman@dol.ru