

ТЕОРИЯ И МЕТОДОЛОГИЯ НАУКИ И ТЕХНИКИ

И.А. Карпенко

Философская интерпретация современных подходов к созданию квантовой теории гравитации*

Карпенко Иван Александрович – кандидат философских наук, доцент. Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики». Российская Федерация, 101000, г. Москва, ул. Мясницкая, д. 20; e-mail: gobzev@hse.ru

В статье дается философская интерпретация подходов к созданию квантовой теории гравитации. Анализируются ключевые для данной задачи аспекты общей теории относительности и Стандартной модели, проясняется содержание соответствующих понятий (гравитация, частица, поле и др.). Устанавливаются причины проблематичности создания квантовой теории гравитации, предлагается интерпретация существующих проблем, в частности, обсуждается проблема несовместимости уравнений квантовой теории и общей теории относительности. Опираясь на философский анализ ряда современных результатов из области теоретической физики, автор указывает возможное направление для создания квантовой теории гравитации. Оно формируется путем совмещения следствий некоторых концепций струнной теории и голографического принципа со свойствами квантово-механической запутанности. Исторически считалось фактически аксиомой, что мир устроен локально, т. е. не может быть взаимодействий через пустое пространство. В теории гравитации Ньютона возникла проблема: сила тяготения распространялась мгновенно и без посредников. Сколь угодно удаленные тела взаимодействовали друг с другом нелокально. Это был математический вызов физике того времени. Впоследствии проблема получила позитивное решение: гравитационное взаимодействие распространяется с конечной скоростью – скоростью света. Так же решился и вопрос отсутствия посредников – ими стали гравитоны, правда, гипотетические. Однако современная квантовая теория поля не локальна (следствие запутанности), причем в обоих смыслах: для передачи взаимодействия не нужны как временные затраты, так и представление о физических посредниках. В самом сильном смысле речь идет о том, что само пространство не локально (при принятии многомерности). Показывается, что запутанность, по всей видимости, дуально связана с гравитацией, и нелокальность является свойством многомерного пространства. Проблема в том, что этот результат буквально не применим к нашей реальности и описывает возможные (с точки зрения возможного многообразия законов физики) миры. Обсуждается, может ли, несмотря на это, теория оставаться научной и являться хорошим приближением к наблюдаемой физической реальности.

* Статья подготовлена в ходе проведения исследования (грант № 17-01-0029) в рамках Программы «Научный фонд Национального исследовательского университета “Высшая школа экономики” (НИУ ВШЭ)» в 2017–2018 гг. и в рамках государственной поддержки ведущих университетов Российской Федерации «5-100».

Ключевые слова: философия науки, квантовая гравитация, космология, общая теория относительности, квантовая теория поля, голографический принцип, теория струн, AdS/CFT соответствие

Постановка проблемы. Как известно, проблема создания теории квантовой гравитации кроется в несовместимости двух главных теорий современной физики: общей теории относительности (ОТО) и квантовой теории поля (КТП). Последняя, по сути, представляет собой результат синтеза квантовой механики и специальной теории относительности (СТО). Поскольку в СТО нет гравитации, КТП ее также не включает. ОТО, напротив, – это теория гравитации, но она описывает макромир, мир, в котором проявления силы тяготения очевидны, наблюдаемы невооруженным глазом. КТП описывает микромир, в котором действие гравитации проявляется крайне слабо.

И. Ньютон показал, что сила гравитационного взаимодействия тел пропорциональна их массам и обратно пропорциональна квадрату расстояния между ними. С одной стороны, это означает, что чем ближе расположены тела, тем больше сила тяготения. С другой стороны, когда массы очень малы, обнаружить гравитационное взаимодействие трудно, а если речь идет о масштабах планковской длины¹, то наблюдение технически невозможно, хотя именно на этом масштабе должны фигурировать гравитоны – переносчики гравитационного взаимодействия.

Таким образом, в Стандартной модели, описывающей мир элементарных частиц, гравитации нет, и любые попытки включить ее в теорию до сих пор не увенчались успехом. При переходе к микромасштабам возрастают квантовые флуктуации, приводящие к бесконечным значениям в решениях совмещенных уравнений квантовой механики и СТО. Гравитационное поле перестает быть гладким: при заглядывании все дальше вглубь микромира, оно начинает сильно флуктуировать (Дж. Уилер назвал это состояние квантовой пеной) в соответствии с принципом неопределенности Гейзенберга.

С классической точки зрения сущность проблемы можно выразить следующим образом: квантовая теория гравитации должна учитывать квантование пространства-времени, поскольку в КТП физические величины квантуются (состоят из дискретных порций). Значит, и гравитационное поле должно квантоваться, однако в ОТО оно гладкое. И важнейший момент: квантовая механика линейна, в то время как ОТО – нет, и это серьезная проблема совместимости теорий.

С философской точки зрения проблему можно поставить так: нет ясности в вопросе о том, каким именно образом интерпретировать гравитацию. Классическим является представление о гравитационном поле, которое обеспечивает перенос взаимодействия. Можно говорить не о поле, а о частицах-переносчиках, но это по сути одно и то же – все дело в выборе словаря: возмущение поля мы называем частицами, отсутствие возмущений выглядит гладким «полем».

ОТО предлагает рассматривать гравитацию как искривление пространства-времени, вызванное массивными объектами. Чем больше масса (и плотность), тем сильнее искривление. Тела в пространстве, например, планеты

¹ $1,6 \cdot 10^{-35}$ метров – естественная единица длины, предполагаемый минимальный размер пространства, на котором работают известные законы.

Солнечной системы, движутся по геодезическим прямым. Искривление пространства, вызванное Солнцем, создает видимость того, что звезда «притягивает» планеты. Хотя правильнее сказать, что они падают к ее центру в результате кривизны пространства-времени. Подобная формулировка делает разговор о «притяжении» бессмысленным, т. к. ничто ничего не тянет. Более того, в теории Эйнштейна ускоренное движение и притяжение эквивалентны. Таким образом, гравитация может описываться как движение, специфика которого определена искривлением пространства-времени. Поэтому ОТО не нуждается в понятии гравитона (как некой самостоятельной физической сущности). В нем начинает нуждаться Стандартная модель, описывающая на данный момент все взаимодействия, кроме гравитационного, когда пытаются включить описание гравитационного взаимодействия.

Струнные теоретики формулируют проблему так: геометрически частицы в Стандартной модели не имеют минимальных размеров. Это точки, а точки могут быть бесконечно малы (меньше планковской длины). Соответственно, флуктуации пространства-времени по мере бесконечного продвижения вглубь становятся бесконечными и приводят к бесконечным энергиям. Теория суперструн предлагает ограничить минимальный размер частиц, что позволяет избежать бесконечностей в решениях уравнений. Эти частицы называются струнами (и бранами) и фигурируют (гипотетически) на масштабе порядка планковской длины.

Запутанность. Очевидно, что КТП и ОТО по-разному видят мир, строятся на разных принципах. При этом обе теории экспериментально подтверждены, их данные согласуются с опытом, а значит, нет оснований говорить, что все дело в том, что одна из теорий в действительности неверна. Ставить под сомнение ОТО мешает и то, что это первая эффективная теория гравитации, объясняющая ее природу. КТП в свою очередь предлагает механизмы, которые широко используются на практике – она «работает». Вместе с тем можно допустить, что эти теории являются неполными – не учитывают весь класс явлений, на описание которых претендуют. Это возможно: так, например, механика Ньютона, безусловно, работает и согласуется с экспериментом; ее расхождение с реальностью становится заметным только на очень больших или, наоборот, на очень маленьких масштабах.

Хорошо известно, что А. Эйнштейн считал квантовую механику неполной теорией в силу ее противоречия классическим физическим представлениям и здравому смыслу. Она как будто заставляет отказаться от привычного понятия реальности². Несмотря на свой авторитет, к середине XX в. Эйнштейн остался чуть ли не единственным, кто не принимал квантовую механику.

Эйнштейна не устраивало, в частности, то обстоятельство, что в соответствии с соотношением неопределенностей Гейзенберга положение и импульс частицы не могут быть измерены одновременно. Это проистекает из свойств корпускулярно-волнового дуализма квантовой механики (принцип дополненности). Поскольку частица, когда мы ее не наблюдаем, ведет себя как волна, для описания вероятности нахождения ее в том или ином месте используются волновые функции (амплитуды вероятности): с каждой частицей связана волновая функция. В тот момент, когда мы измеряем положение частицы,

² О проблеме реализма в квантовой механике см. [Севальников, 2016; Карпенко, 2015].

локализуем ее, реализуется какое-то ее вероятное положение (это называют коллапсом или редукцией волновой функции), а все остальные вероятности падают до нуля. Принципиально важно то, что до измерения частица не имела каких-то конкретных положений и импульсов.

В 1935 г. Эйнштейн вместе с Н. Подольским и Б. Розеном написал статью, в которой представил мысленный эксперимент (т. н. ЭПР-эксперимент), предполагавший измерение параметров микрообъекта без непосредственного воздействия на сам объект. Результат можно было интерпретировать таким образом, что определенные импульс и положение частицы – скрытые параметры – существуют до измерения, просто уравнения квантовой механики не позволяют их вычислить. И, значит, квантовая механика неполна.

Суть эксперимента такова. У нас есть две частицы А и В, которые мы получили в результате распада частицы С. В физике существует закон сохранения импульса, согласно которому суммарный импульс А и В равен исходному импульсу С. Значит, мы можем измерить импульс частицы А и рассчитать импульс частицы В, никаким образом не взаимодействуя с последней. Далее, уже зная импульс частицы В, измеряем ее координату и таким образом узнаем ее импульс и местоположение одновременно, нарушая принцип неопределенности Гейзенберга. Следовательно, этот принцип, заключает Эйнштейн с соавторами, лишь отражает неполноту наших знаний из-за неудовлетворительности квантовой теории – ее уравнения не совершенны и не позволяют узнать то, что имеет место на самом деле. Правда, можно сделать противоположный вывод: принцип Гейзенберга действительно работает, и квантовая механика объективно описывает реальность, а ЭПР-эксперимент показывает, что измерение параметров одной частицы мгновенно отражается на параметрах другой частицы, т. е. они как бы без затраты времени на передачу сигнала взаимодействуют³. Однако основной вопрос касался того, что же считать физической реальностью.

Парадокс Эйнштейна–Подольского–Розена (возможность нарушения принципа неопределенности) вызвал недоумение и породил споры в научном сообществе. Ситуация неясности сохранялась до 1964 г., когда Дж. Белл показал [Bell, 1964]⁴, что можно проверить, существуют ли на самом деле в квантовой теории скрытые параметры или нет. Его расчеты получили название «теорема Белла» (изначально «неравенства Белла»). В 1980–1982 гг. были поставлены убедительные эксперименты, в которых удалось проверить неравенства Белла⁵. Выяснилось, что волновая функция, лежащая в основе уравнения Шрёдингера, представляет собой полное описание поведения частиц (до измерения частицы не имеют конкретных параметров). Следовательно, ЭПР-эксперимент на самом деле показал, что измерение параметров одной частицы мгновенно отражается на другой частице. Для этого частицы, фигурирующие в мысленном эксперименте Эйнштейна–Подольского–Розена, должны быть запутанными: запутанные частицы скоррелированы, т. е.

³ Мгновенная передача сигнала запрещена: максимальная скорость распространения сигнала в пространстве равна скорости света (примерно 300 000 км/с).

⁴ Интерпретацию результата Белла см. в: [Аршинов, 1984].

⁵ Описание последних экспериментов, подтверждающих нарушение неравенств Белла, см. в [Giustina et al., 2015; Shalm et al., 2015].

результаты измерения одной из них сразу говорят о том, что такие же результаты будут у другой. Получение запутанных частиц реально осуществимая техническая задача. Принципиально важно, что до измерения неизвестно, каковы будут характеристики измеряемой частицы (чаще всего говорят о спине – момент импульса, который может быть по-разному ориентирован), они выбираются случайно. При измерении мы можем обнаружить и наименее вероятные параметры. Вероятность означает, что, проводя измерения 1000 раз, например, в 900 случаях мы обнаружим частицу с наиболее вероятными параметрами.

Это явление (мгновенное взаимодействие) называется нелокальностью и подрывает классические представления о том, как устроен мир. Согласно последним, мир устроен локально: чтобы попасть из точки А в точку Б, нужно преодолеть какое-то расстояние; чтобы нечто увидеть, нужно дождаться, пока отраженный свет долетит до нас, чтобы услышать – дождаться, пока дойдут колебания воздуха и т. д. Нелокальность же говорит о том, что существуют скоррелированные состояния – они всегда одинаковы, как бы далеко не были разнесены в пространстве запутанные частицы.

Нелокальность. Как возможна нелокальность? Исторически представление о том, что мир устроен локально, устанавливается в физике позднего Нового времени. Разумеется, всегда главенствовало мировоззрение, согласно которому для того чтобы попасть из А в Б, нужно преодолеть расстояние в пространстве. Нелокальность была невозможна, во всяком случае, в мире материальных явлений: чтобы с телами происходили какие-либо изменения, они должны взаимодействовать непосредственно. Другое дело мир духовных явлений, свободный от законов физики (существование такого мира явно полагали, например, Р. Декарт и Г. Лейбниц⁶).

Физика Ньютона не совсем локальна: английский ученый допускал особую природу гравитации, его не смущало, что она не локальна. Ньютон признавался, что не знает, что это за сила, но она действует мгновенно во всем космосе, ей не надо преодолевать расстояния. Только Эйнштейн показал, что это не так: гравитационное взаимодействие распространяется с конечной скоростью – скоростью света⁷.

Таким образом, нелокальность присутствовала в физике, но связывалась с силами, материальная природа которых отрицалась или была неясна.

Существовали другие подходы, согласно которым понятия локальности и нелокальности трактовались в качестве фиктивных. Так, И. Кант полагал пространство (так же как и время) априорной формой чувственности, тем самым указывая на его иллюзорность. Действительно, с подобной позиции, локальность и нелокальность – не сущностные характеристики реальности, а всего лишь возможные формы восприятия, обусловленные воспринимающим сознанием.

⁶ В принципе идея разделения идет от Платона и Аристотеля. У Платона мир делился на идеальный (мир идей) и некое подобие этого мира – мир теней, который обыденное сознание воспринимает как реальный, у Аристотеля – на подлунный и надлунный: надлунный есть квинтэссенция, область пятого элемента, где физика нижнего мира не работает.

⁷ Скорость света не является максимальной, инфляционное расширение нашей вселенной на удаленных рубежах происходит со скоростями, намного превышающими скорость света. Скорость света считается максимальной скоростью, с которой можно передавать информацию (в противном случае нарушается принцип причинности).

Но нас в данном случае интересуют не ментальные процессы, а физические, и с точки зрения квантовой механики, нелокальность физически реальна – она доказывается фактом запутанности удаленных частиц. Но что же означает нелокальность, каков ее смысл⁸? Очевидно только, что она связана с запутанностью.

Мысленный эксперимент. Попробуем разобраться, как работает запутанность на примере мысленного эксперимента. Допустим, что у нас есть два ящика (квантово-механически запутанные). Заглядывая внутрь, мы имеем шансы увидеть разное (в принципе, там может лежать все что угодно). С точки зрения квантовой механики до акта измерения (наблюдения) в них не находится что-то конкретное. То, что там находится, в реальности описывается суперпозицией – суммой вероятных состояний. Если есть вероятность обнаружить в ящике камень, бумагу, ножницы или ничто⁹, то до акта измерения в ящике находится все перечисленное, но в суперпозиции. В момент измерения случайным образом (т. е., что важно, непредсказуемо) определяется, что покажет первый ящик, и это мгновенно обуславливает то, что будет обнаружено во втором ящике. Например, состояние в ящиках запутано таким образом, что при появлении в первом бумаги во втором окажется ничто. Однако о конкретном характере запутывания – как именно связаны ящики – мы ничего не узнаем до тех пор, пока не сравним результаты, поэтому опять-таки передача физического сигнала со скоростью, превышающей скорость света невозможна: никакая информация со скоростью, превышающей скорость света, в нелокальных связях не передается.

Открытие ящика означает коллапс волновой функции и переход с микроуровня на макроуровень (можно сказать, что мы не наблюдаем суперпозиции камня, листа, ножниц и ничто из-за декогеренции – неизбежного смешения квантовых состояний с окружающей средой). Коллапс волновой функции всегда считался необратимым: если уж мы обнаружили в первом ящике бумагу (что, согласно предложенным условиям, вызывает появление ничто во втором ящике), то уже ничего не изменить. Допустим, мы очень хотели появления во втором ящике камня, но известно, что его вызывают ножницы в первом. Однако при открывании первого ящика мы не знаем и не можем знать, что в нем окажется.

В 2006 г. на основе теории слабых квантовых измерений [Korotkov, Jordan, 2006; Katz et al., 2008; Merali, 2008] был предложен метод, позволяющий сделать коллапс волновой функции обратимым [Aharonov, Albert, Vaidman, 1988; Hosten, Kwiat, 2008]. Суть слабых измерений в том, что измеряемая система «слабо» взаимодействует с измерительным прибором. Слабые измерения не

⁸ Существует объяснение нелокальности и запутанности, предложенное Дж. Крамером, – «транзакционная интерпретация» [Cramer, 1986]. Она основана на идее, что волны вероятности физически реальны: частицы испускают запаздывавшую волну (идущую вперед во времени) и наступающую (идущую назад во времени). Волны от разных источников гасят друг друга, в результате чего предел в скорости света не нарушается, но при этом связь происходит мгновенно. Свою концепцию Крамер основывает на теории временной симметрии Уилера–Фейнмана [Wheeler, Feynman, 1949]. Теория Крамера примечательна тем, что коллапс волновой функции, происходящий в процессе измерения, оказывается вневременным.

⁹ Конечно, в реальном эксперименте речь шла бы об элементарных частицах (хотя запутать можно и атомы).

пригодны для наблюдения одиночных частиц, но хорошо работают при наблюдении большого их числа в одинаковом квантовом состоянии. Суть метода в том, что, выражаясь образно, можно поглядеть в щелочку ящика, не открывая его совсем, и если там находится не то, что нам нужно, закрыть щелочку, и подождать, пока появится требуемое.

Здесь возникает проблема: чтобы иметь возможность ждать, нужно сохранять состояние запутанности между ящиками. Однако декогеренция со временем разрушает запутанность из-за неизбежного столкновения квантовых объектов с окружающей средой. По всей видимости, теоретически существует способ сохранения требуемого состояния длительное время, хотя технически такое средство пока не достигнуто [Rañada, 1990; Irvine, Bouwmeester, 2008]. Это означает, что запутанность могла бы использоваться как средство управления реальностью – путем подгонки микромира так, чтобы в макромире происходило то, что нам нужно.

Нелокальность и пространство. Одним из ключей к пониманию явления нелокальности может быть квантовая телепортация, которая без запутывания неосуществима¹⁰. Грубо говоря, под телепортацией понимается передача характеристик объекта из одного места в другое. Речь идет не о телепортации свойств макрообъектов, а о телепортации свойств отдельных частиц.

Рассмотрим квантовую телепортацию фотона. У нас есть три фотона 1, 2 и 3. Фотоны 2 и 3 запутаны. Задача состоит в том, чтобы передать квантовое состояние фотона 1 из точки А в точку Б. Невозможно измерить состояние фотона 1 (допустим речь идет о вероятности ориентации спина фотона) в точке А и передать результаты в точку Б, чтобы там другой фотон ориентировался так же. Измерение внесет изменения в фотон 1, и мы не будем знать, каким он был до измерения. Поэтому и нужны два запутанных фотона 2 и 3; номер 2 находится в точке А, номер 3 в точке Б. Технически возможно измерить общий спин двух фотонов относительно какой-нибудь из осей, что позволит получить информацию о том, как связаны спины фотонов 1 и 2 (их индивидуальные спины при этом неизвестны). Таким образом, состояние фотона 1 передается фотону 2 (они запутываются). Поскольку теперь известно, как фотон 1 связан с фотоном 2, и известно, что 2 и 3 запутаны, то можно вычислить, как связаны 1 и 3. Остается передать наблюдателям в точку Б информацию о связи 1 и 3. Зная эту связь, они могут совершить необходимые операции с фотоном 3, чтобы он стал идентичен 1.

Здесь необходимы пояснения. Конечно, измеряя связь спинов 1 и 2, я влияю на них и, таким образом, мне опять неизвестно их исходное состояние. Для этого и нужна пара запутанных фотонов 2 и 3 – меняя актом измерения состояние 1 и 2, я тем самым меняю состояние фотона 3, поскольку он связан с 2. То есть, например, в процессе измерения становится известно, что спины 1 и 2 одинаковые, значит, и у 3 он такой же. Следовательно, фотон 3 дает возможность узнать о влиянии измерения, и, располагая этой информацией, можно устранить вызванное нарушение, сделав фотон 3 таким, каким был 1 до измерения. Фотон 3 остается при этом единственным носителем того изначального состояния, в котором находился фотон 1, тогда как состояние фотона 1 измени-

¹⁰ Эксперименты по квантовой телепортации на сегодняшний день осуществлены многократно, см., например, [Takesue et al., 2015; Wang et al., 2015].

лось относительно первоначального. Описанная процедура подтверждает теорему о запрете квантового клонирования [Wootters, Zurek, 1982]: невозможно в точности воспроизвести (клонировать) неизвестное квантовое состояние.

Квантовая телепортация, как ясно из сказанного выше, не нарушает ограничение на скорость передачи сигнала: для передачи информации о связи 1 и 2 из точки А в Б потребуется время (процедура информирования будет осуществлена со скоростью меньшей, чем скорость света). То есть узнать об общих параметрах спутанных фотонов можно только после их сравнения.

Идея связи нелокальности и пространства получает свое развитие в теории суперструн. В этой теории предполагается (это побочное следствие принятия струн в качестве фундаментальных частиц¹¹) существование 10-мерного пространства-времени (9 пространственных и 1 временное)¹². Само по себе предположение о существовании дополнительных измерений не является чем-то экстраординарным, еще Эйнштейн, основываясь на работах Т. Калуцы и О. Клейна, предложивших 5-мерное пространство-время, допускал такую возможность в целях построения «теории всего». Клейн обосновал ненаблюдаемость четвертого пространственного измерения его компактностью. Так, дополнительные измерения оказываются в струнной теории свернутыми до планковских масштабов (компактифицированными), и потому они ненаблюдаемы в макромире, но играют важную роль в микромире, а значит, косвенно и в макромире (например, задавая свойства элементарных частиц).

По аналогии с тремя известными измерениями каждое новое измерение можно рассматривать как дополнительную возможность перемещения в пространстве. Эти дополнительные возможности могут означать нелокальные связи между точками в пространстве-времени¹³, т. е. мгновенное перемещение без затрат времени. Данная точка зрения интересна тем, что явление нелокальности экстраполируется со свойств связи запутанных частиц на свойства самого пространства, которое представляет собой арену действия полей и частиц (либо представляет собой сами поля и частицы). Это вполне правомерно, учитывая указанную выше эквивалентность частиц и полей. Предположение, что многомерность и нелокальность – две стороны одной медали, очень интересно и может открыть новую главу в создании теории квантовой гравитации. Но как, если это верно, связать запутанность с размерностью пространства?

Запутанность и гравитация. На помощь приходит результат, недавно, в 2015 г., полученный группой физиков. Перед тем, как применить его в наших теоретических построениях, внесем некоторые предварительные пояснения.

¹¹ Если говорить более точно, причина состоит в требовании согласованности с лоренц-ковариантностью, что в применении к физике означает неизменность вида уравнений при переходе к той или иной конкретной системе отсчета. Это важно, например, при преобразованиях в четырехмерном пространстве.

¹² В М-теории, обобщающей различные версии теории струн, 10 пространственных и 1 временное.

¹³ См., например, [Markopoulou, Smolin, 2007]. Л. Смолин с соавторами в ряде работ развивает идею квантовой петлевой гравитации, где между любыми точками пространства могут существовать нелокальные связи. Как раз именно это и можно интерпретировать как многомерность: в трехмерном пространстве у точки всего несколько непосредственных связей, в многомерном их число возрастает.

Г. 'т Хоофт продемонстрировал тот факт [’t Hooft, 1993]¹⁴, что вся информация о любом объекте содержится на площади его поверхности¹⁵. То есть информация исчерпывается не объемом объекта, а его поверхностью. Это открытие получило название голографического принципа¹⁶. По сути это означает, что 3-мерная реальность является голографической проекцией информации, закодированной на удаленной 2-мерной поверхности.

Ранее С. Хокинг, применив КТП к черным дырам, доказал факт излучения черных дыр (на основе работы Я. Бекенштейна), в процессе которого они теряют массу. Однако, поскольку за пределы горизонта событий черной дыры ничего вырваться не может (черная дыра поглощает свет), всякая информация, упавшая туда, исчезает. Таким образом, информация теряется – исходящее излучение не имеет ничего общего с попавшими ранее в дыру частицами. Потеря информации противоречит квантовой механике, т. к. такое преобразование является не унитарным, а квантовая механика основана на унитарных преобразованиях. На пути создания теории квантовой гравитации встает парадокс, получивший название «потери информации» (черные дыры предсказываются ОТО, но вступают в противоречие с квантовой механикой). Гравитация в черных дырах достигает максимальных значений, и, очевидно, именно она является проблемой для квантово-механического описания происходящего.

В 1997 г. струнным теоретиком Х. Малдасеной была предложена гипотеза о AdS/CFT-дуальности [Maldacena, 1999]. Суть гипотезы заключается в том, что квантовая гравитация в анти-де-ситтеровском 5-мерном пространстве дуальна конформной теории поля (вариант КТП) на 4-мерной поверхности этого мира¹⁷. Поскольку конформная теория поля унитарна, то дуальная ей теория квантовой гравитации тоже должна быть унитарной. Если так, то информация не теряется. Другими словами, вся информация о многомерном объекте зашифрована на объекте меньшей размерности, окружающем этот объект. Это означает, информация сохраняется, в случае излучения Хокинга она все-таки возвращается вместе с излучением.

Разумеется, наш мир, насколько нам известно, не является 5-мерным анти-де-ситтеровским. Последний, например, характеризуется постоянной отрицательной кривизной пространства и отрицательной космологической постоянной, в то время как наблюдаемый – положительной космологической постоянной. То есть результат Малдасены описывает какую-то иную реальность. Но, тем не менее, он очень важен, т. к. предоставляет математический аппарат, позволяющий осуществлять перевод с языка сложной многомерной теории на язык более простой теории с меньшим числом измерений. В частности, в применении к черным дырам это может означать, что происходящие «внутри» квантово-гравитационные процессы являются голографической проекцией

¹⁴ Для теории струн этот результат использовал Л. Сасскинд [Susskind, 1995].

¹⁵ Точнее, полная информация об объекте пропорциональна площади его поверхности, а не его объему – в этом специфика квантовой голограммы.

¹⁶ Своеобразной предтечей голографического принципа является «Миф о пещере» Платона. Мир идей «проецирует» наш трехмерный мир (в таком случае мир идей должен быть двумерным).

¹⁷ Отсюда следует, что очень сложные, практически невычислимые вещи оказывается возможным вычислять в более простом математическом аппарате другой теории, дуальной по отношению к первой.

скопления частиц на их поверхности. Следовательно, возможно адекватное описание макроскопических объектов и гравитационных эффектов, типичных для ОТО, с помощью квантово-механических инструментов.

В 2015 г. Д. Лин, М. Марколли, Х. Оогури и Б. Стойка [Lin, Marcolli, Ooguri, Stoica, 2015], используя математику голографической дуальности¹⁸, получили результат, который можно интерпретировать как доказательство связи между квантовой запутанностью и гравитацией. Используя информацию о квантовой запутанности в 2-мерном пространстве (в конформной теории поля – вариации КТП), они вычислили плотность энергии, которая в пространстве большой размерности рассматривается как источник гравитационных взаимодействий. Вернее, следует выразиться так: квантовая запутанность является условием плотности энергии, и это условие должно удовлетворять будущей теории квантовой гравитации.

Таким образом, запутанность и гравитация оказываются дуально связанными: то, что проявляется в виде квантовой запутанности в пространстве малой размерности, становится гравитационным взаимодействием в пространстве большей размерности. Если данная интерпретация верна, то значительный шаг в сторону создания квантовой теории гравитации сделан.

Закключение. Предложенный в статье подход предполагает, что новая теория гравитации должна основываться на синтезе ОТО, КТП, голографического принципа (физика черных дыр) и теории струн. Ключевым моментом оказывается связь квантово-механической запутанности (и проистекающей из нее нелокальности) со свойствами пространства-времени. Используя голографический принцип, становится возможным показать, что гравитация и запутанность дуально связаны, т. е. как бы являются выражением одного и того же, но в мирах разной размерности. Таким образом, решается проблема квантования: плотность энергии, которая оказывается источником гравитации в мире большей размерности, квантуется – энергия дискретна. В то же время это согласуется в полной мере и с ОТО – в пространстве-времени возникает гравитация в результате его искривления массивными объектами. Однако как мы знаем из известного уравнения Эйнштейна, масса и энергия связаны, это практически одно и то же (учитывая коэффициент – скорость света в квадрате). Если гладкое пространство-время ОТО не квантуется, то для энергии такого ограничения нет.

Но есть серьезное возражение, которое было уже кратко упомянуто. Ключевые указанные здесь результаты описывают не нашу физическую реальность, а одну (или несколько) из множества возможных. Проблема в том, что ландшафт теории струн допускает 10 500 возможных миров, и не существует никакого способа узнать, какой из них наш, – в струнной математике нет такого инструмента.

При этом рабочие теории суперструн описывают суперсимметричные миры, в которых у бозонов и фермионов есть суперпартнеры, идентичные им по всем характеристикам, кроме спина. Таким образом, бозонное и фермионное поля преобразуются друг в друга. Например, для электрона должен быть

¹⁸ Они использовали, в частности, результат [Ryu, Takayanagi, 2006]. Также по теме связи квантовой гравитации и запутанности см. новейшие исследования: [De Boer, Heller, Myers, Neiman, 2016; Chen-Te Ma, 2016].

суперпартнер сэлэктрон, а для фотона – фотино. Вместе с тем, можно считать установленным, что наш мир не суперсимметричен. Во-первых, суперпартнеры до сих пор не обнаружены (если они и есть, то они не точно симметричны, а намного массивнее). Далее, в суперсимметричном мире космологическая постоянная в точности равно нулю. Но это мир, в котором невозможна обычная химия, а значит, не должно быть и нас, людей.

Таким образом, современные теории оказываются удобными приближениями к нашему миру, математика суперсимметричных теорий – удобным инструментом, позволяющем описывать миры, «лежащие поблизости» от нашего в струнном ландшафте. Но остается вопрос, настолько ли хороши эти приближения, чтобы их результаты переносить на наблюдаемую реальность? Есть ли гарантия, что указанный результат, связывающий гравитацию с запутанностью, верен для нашей конкретной физической действительности или это просто математическая игра? Таких гарантий нет, есть только определенная вероятность. Разрешить данный вопрос мог бы эксперимент, но на нынешний момент нет технической возможности для его проведения.

Список литературы

Аршинов, 1984 – *Аршинов В.И.* Проблема интерпретации квантовой механики и теорема Белла // Теоретическое и эмпирическое в современном физическом познании. URL: <http://www.ihst.ru/~apech/arshinov.pdf> (дата обращения: 19.02.2017).

Карпенко, 2015 – *Карпенко А.С.* В поисках реальности: Исчезновение // Философия науки. 2015. Т. 20. С. 36–72.

Севальников, 2016 – *Севальников А.Ю.* Физика и философия: старые проблемы и новые решения // Филос. журн. 2016. № 1(9). С. 42–60.

Aharonov, Albert, Vaidman, 1988 – *Aharonov Y., Albert D.Z., Vaidman L.* How the result of a measurement of a component of the spin of a spin-1/2 particle can turn out to be 100 // Physical Review Letters. 1988. Vol. 60. No. 14. URL: <http://johnboccio.com/research/quantum/notes/aav.pdf> (дата обращения: 19.02.2017).

Bell, 1964 – *Bell J.S.* On the Einstein Podolsky Rosen Paradox // Physics. 1964. Vol. 1. No. 3. P. 195–200.

Chen-Te Ma, 2016 – *Chen-Te Ma.* Discussion of the Entanglement Entropy in Quantum Gravity. 2016. URL: <https://arxiv.org/pdf/1609.03651.pdf> (дата обращения: 19.02.2017).

Cramer 1986 – *Cramer J.G.* The transactional interpretation of quantum mechanics // Reviews of Modern Physics. 1986. Vol. 58. No. 3. P. 647–688.

De Boer, Heller, Myers, Neiman 2016 – *De Boer J., Heller M., Myers R., Neiman Y.* Holographic de Sitter Geometry from Entanglement in Conformal Field Theory // Physical Review Letters. 2016. Vol. 116. No. 2. URL: <https://arxiv.org/pdf/1509.00113.pdf> (дата обращения: 19.02.2017).

Giustina et al., 2015 – *Giustina, M. et al.* Significant-Loophole-Free Test of Bell's Theorem with Entangled Photons // Physical Review Letters. 2015. Vol. 115. No. 25. URL: <http://journals.aps.org/prl/abstract/10.1103/PhysRevLett.115.250401> (дата обращения: 19.02.2017).

Hosten, Kwiat, 2008 – *Hosten O., Kwiat P.* Observation of the spin Hall effect of light via weak measurements // Science. 2008. Vol. 319. No. 5864. P. 787–790.

Irvine, 2008 – *Irvine W., Bouwmeester D.* Linked and knotted beams of light // Nature Physics. 2008. Vol. 4. P. 716–720.

Katz et al., 2008 – *Katz N. et al.* Reversal of the Weak Measurement of a Quantum State in a Superconducting Phase Qubit // *Physical Review Letters*. 2008. Vol. 101. No. 20. URL: <http://www.engr.ucr.edu/~korotkov/papers/PRL-101-200401-2008.pdf> (дата обращения: 19.02.2017).

Korotkov, Jordan, 2006 – *Korotkov A.N., Jordan A.N.* Undoing a Weak Quantum Measurement of a Solid-State Qubit // *Physical Review Letters*. 2006. Vol. 97. No. 16. URL: <https://arxiv.org/pdf/cond-mat/0606713.pdf> (дата обращения: 19.02.2017).

Lin, Marcolli, Ooguri, Stoica, 2015 – *Lin J., Marcolli M., Ooguri H., Stoica B.* Locality of Gravitational Systems from Entanglement of Conformal Field Theories // *Physical Review Letters*. 2015. Vol. 114. No. 22. URL: <http://authors.library.caltech.edu/58294/1/PhysRevLett.114.221601.pdf> (дата обращения: 19.02.2017).

Maldacena, 1999 – *Maldacena J.* The Large N Limit of Superconformal Field Theories and Supergravity // *International Journal of Theoretical Physics*. 1999. Vol. 38. No. 4. P. 1113–1133.

Markopoulou, Smolin, 2007 – *Markopoulou F., Smolin L.* Disordered Locality in Loop Quantum Gravity States // *Classical and Quantum Gravity*. 2007. Vol. 24. No. 15. P. 3813–3824.

Merali, 2008 – *Merali Z.* Reincarnation can save Schrödinger’s cat // *Nature*. 2008. Vol. 454. URL: <http://www.ee.ucr.edu/~korotkov/news/Reincarnation.pdf> (дата обращения: 19.02.2017).

Rañada, 1990 – *Rañada A. F.* Knotted solutions of the Maxwell equations in vacuum // *Journal of Physics A: Mathematical and General*. 1990. Vol. 23. No. 16. P. 815–820

Ryu, Takayanagi, 2006 – *Ryu S., Takayanagi T.* Holographic derivation of entanglement entropy from AdS/CFT // *Physical Review Letters*. 2006. Vol. 96. No. 18. URL: <https://arxiv.org/pdf/hep-th/0603001.pdf> (дата обращения: 19.02.2017).

Shalm et al., 2015 – *Shalm L.K. et al.* Strong Loophole-Free Test of Local Realism // *Physical Review Letters*. 2015. Vol. 115. No. 25. URL: <http://journals.aps.org/prl/pdf/10.1103/PhysRevLett.115.250402> (дата обращения: 19.02.2017).

Susskind, 1995 – *Susskind L.* The World as a Hologram // *Journal of Mathematical Physics*. 1995. Vol. 36. No. 11. P. 6377–6396.

‘t Hooft, 1993 – *‘t Hooft G.* Dimensional Reduction in Quantum Gravity. 1993. URL: <https://arxiv.org/pdf/gr-qc/9310026v2.pdf> (дата обращения: 19.02.2017).

Takesue et al., 2015 – *Takesue H. et al.* Quantum teleportation over 100 km of fiber using highly efficient superconducting nanowire single-photon detectors // *Optica*. 2015. Vol. 2. No. 10. P. 832–835.

Wang et al., 2015 – *Wang X.-L. et al.* Quantum teleportation of multiple degrees of freedom of a single photon // *Nature*. 2015. Vol. 518. P. 516–519.

Wheeler, Feynman, 1949 – *Wheeler J.A., Feynman R.P.* Classical Electrodynamics in Terms of Direct Interparticle Action // *Reviews of Modern Physics*. 1949. Vol. 21. No. 3. P. 425–433.

Wootters, Zurek, 1982 – *Wootters W.K., Zurek W.H.* A Single Quantum Cannot be Cloned // *Nature*. 1982. Vol. 299. P. 802–803.

The philosophical interpretation of modern approaches to creating the quantum theory of gravity

Ivan A. Karpenko

National Research University Higher School of Economics. 20 Myasnitskaya Str., Moscow, 101000, Russian Federation; e-mail: gobzev@hse.ru

The article is devoted to the philosophical interpretation of the several approaches to the creation of a quantum theory of gravity. The analysis of the key aspects of the General theory of relativity and the Standard Model, the clarification of the relevant concepts contents (gravity,

particle, field, space, etc.) are conducted for this purpose. We establish the causes and origins of the creation of the quantum theory of gravity problematical character, give the interpretation of the existing problems. Therefore, the article shows a fundamental difference between realities described by the two leading modern physical theories. Classical science is based on common sense and intuitive representability, while the microcosm cannot be directly observed and therefore is out of the representable sphere. This is probably the part of the reason for the incompatibility of the equations of quantum theory and general relativity. On the basis of the philosophical analysis of the results of some modern theoretical physics concepts, the article presents the direction of creation a quantum theory of gravity. This direction appears to be the combination of the consequences of several concepts of the string theory and the holographic principle to the properties of the quantum-mechanical entanglement. The phenomenon of nonlocality is discussed separately. Historically, it has been considered axiomatic that the world is organized locally – i. e. there can not be interactions (without intermediaries) through empty space. In Newton's theory of gravitation this has become the main problem: the gravitational force has had no intermediaries (and has also propagated instantly). Any remote bodies have interacted with each other not in a local way. In fact, it has been a mathematical challenge to the physics of that time. Later the problem has been solved in a positive way: the gravitational interaction propagates with a finite velocity – the speed of light, and thus the inconvenient question of instantaneity has been solved. The question of the absence of intermediaries has been also solved – they are gravitons, but the hypothetical ones (although, recently recorded gravitational waves have become indirect confirmation of this – the perturbations of the gravitational field). However, nonlocality has returned not for long. Modern quantum field theory is nonlocal. Moreover, it is nonlocal in both ways - both the time costs and the concept of physical intermediaries are unnecessary for the transfer the interaction. In the strongest sense of nonlocality we are talking about the fact that the space itself is nonlocal (this becomes possible if the multidimensionality is allowed). In the quantum field theory nonlocality is a consequence of the quantum entanglement. The entanglement is most likely dually connected with gravity, and the non-locality is a characteristic of the multidimensional space. The problem lies in the fact that this result is not literally applicable to our reality and describes the possible worlds (in the context of the diversity of the laws of physics). The article establishes that, despite the mentioned, the theory remains scientific and still appears to be a good approximation to the observed physical reality.

Keywords: philosophy of science, quantum gravity, cosmology, general relativity, quantum field theory, holographic principle, string theory, AdS/CFT correspondence

Acknowledgements: The publication was prepared within the framework of the Academic Fund Program at the National Research University Higher School of Economics (HSE) in 2017-2018 (grant №17-01-0029) and by the Russian Academic Excellence Project “5-100”.

References

Aharonov, Y., Albert, D. Z., Vaidman, L. “How the result of a measurement of a component of the spin of a spin-1/2 particle can turn out to be 100”, *Physical Review Letters*, 1988, vol. 60, no. 14 [<http://johnboccio.com/research/quantum/notes/aav.pdf>, accessed on 19.02.2017].

Arshinov, V. I. “Problema interpretacii kvantovoj mehaniki i teorema Bella” [Quantum mechanics interpretation problem and Bell's theorem], in: *Teoreticheskoe i jempiricheskoe v sovremennom fizicheskom poznanii* [Theoretical and empirical in modern physical knowledge]. [<http://www.ihst.ru/~apech/arshinov.pdf>, accessed on 19.02.2017]. (In Russian)

Bell, J. S. “On the Einstein Podolsky Rosen Paradox”, *Physics*, 1964, vol. 1, no. 3, pp. 195–200.

Chen-Te, Ma. *Discussion of the Entanglement Entropy in Quantum Gravity*, 2016 [<https://arxiv.org/pdf/1609.03651.pdf>, accessed on 19.02.2017].

Cramer, J. G. “The transactional interpretation of quantum mechanics”, *Reviews of Modern Physics*, 1986, vol. 58, no. 3, pp. 647–688.

De Boer, J., Heller, M., Myers, R., Neiman, Y. “Holographic de Sitter Geometry from Entanglement in Conformal Field Theory”, *Physical Review Letters*, 2016, vol. 116, no. 2 [<https://arxiv.org/pdf/1509.00113.pdf>, accessed on 19.02.2017].

Giustina, M. et al. “Significant-Loophole-Free Test of Bell’s Theorem with Entangled Photons”, *Physical Review Letters*, 2015, vol. 115, no. 25 [<http://journals.aps.org/prl/abstract/10.1103/PhysRevLett.115.250401>, accessed on 19.02.2017].

Hosten, O., Kwiat, P. “Observation of the spin Hall effect of light via weak measurements”, *Science*, 2008, vol. 319, no. 5864, pp. 787–790.

Irvine, W., Bouwmeester, D. “Linked and knotted beams of light”, *Nature Physics*, 2008, vol. 4, pp. 716–720.

Katz, N. et al. “Reversal of the Weak Measurement of a Quantum State in a Superconducting Phase Qubit”, *Physical Review Letters*, 2008, vol. 101, no. 20 [<http://www.engr.ucr.edu/~korotkov/papers/PRL-101-200401-2008.pdf>, accessed on 19.02.2017].

Karpenko, A. S. “V poiskah real’nosti: Ischeznovenie” [In search of reality: the Disappearance], *Filosofija nauki*, 2015, vol. 20, pp. 36–72. (In Russian)

Korotkov, A. N., Jordan, A. N. “Undoing a Weak Quantum Measurement of a Solid-State Qubit”, *Physical Review Letters*, 2006, vol. 97, no. 16 [<https://arxiv.org/pdf/cond-mat/0606713.pdf>, accessed on 19.02.2017].

Lin, J., Marcolli, M., Ooguri, H., Stoica, B. “Locality of Gravitational Systems from Entanglement of Conformal Field Theories”, *Physical Review Letters*, 2015, vol. 114, no. 22 [<http://authors.library.caltech.edu/58294/1/PhysRevLett.114.221601.pdf>, accessed on 19.02.2017].

Maldacena, J. “The Large N Limit of Superconformal Field Theories and Supergravity”, *International Journal of Theoretical Physics*, 1999, vol. 38, no. 4, pp. 1113–1133.

Markopoulou, F., Smolin, L. “Disordered Locality in Loop Quantum Gravity States”, *Classical and Quantum Gravity*, 2007, vol. 24, no. 15, pp. 3813–3824.

Merali, Z. “Reincarnation can save Schrödinger’s cat”, *Nature*, 2008, vol. 454 [<http://www.ee.ucr.edu/~korotkov/news/Reincarnation.pdf>, accessed on 19.02.2017].

Rañada, A. F. “Knotted solutions of the Maxwell equations in vacuum”, *Journal of Physics A: Mathematical and General*, 1990, vol. 23, no. 16, pp. 815–820

Ryu, S., Takayanagi, T. “Holographic derivation of entanglement entropy from AdS/CFT”, *Physical Review Letters*, 2006, vol. 96, no. 18 [URL: <https://arxiv.org/pdf/hep-th/0603001.pdf>, accessed on 19.02.2017].

Seval’nikov, A. Yu. “Fizika i filosofija: starye problemy i novye reshenija” [Physics and philosophy: old problems and new solutions], *Filosofskij zhurnal*, 2016, no. 1(9), pp. 42–60. (In Russian)

Shalm, L. K. et al. “Strong Loophole-Free Test of Local Realism”, *Physical Review Letters*, 2015, vol. 115, no. 25 [<http://journals.aps.org/prl/pdf/10.1103/PhysRevLett.115.250402>, accessed on 19.02.2017].

Susskind, L. “The World as a Hologram”, *Journal of Mathematical Physics*, 1995, vol. 36, no. 11, pp. 6377–6396.

’t Hooft, G. *Dimensional Reduction in Quantum Gravity*, 1993 [<https://arxiv.org/pdf/gr-qc/9310026v2.pdf>, accessed on 19.02.2017].

Takesue, H. et al. “Quantum teleportation over 100 km of fiber using highly efficient superconducting nanowire single-photon detectors”, *Optica*, 2015, vol. 2, no. 10, pp. 832–835.

Wang, X.-L. et al. “Quantum teleportation of multiple degrees of freedom of a single photon”, *Nature*, 2015, vol. 518, pp. 516–519.

Wheeler, J. A., Feynman, R. P. “Classical Electrodynamics in Terms of Direct Interparticle Action”, *Reviews of Modern Physics*, 1949, vol. 21, no. 3, pp. 425–433.

Wootters, W. K., Zurek, W. H. “A Single Quantum Cannot be Cloned”, *Nature*, 1982, vol. 299, pp. 802–803.