

Предпосылки создания непротиворечивой теории квантовой гравитации²

Введение

Современный интерес в построении надежной квантовой теории гравитации имел свои истоки не в экспериментальных открытиях аномалий, требующих для своего объяснения создания некоей новой теории, но скорее в серьезном учете нормативных требований унификации (объединения) и непротиворечивости при формулировании удовлетворительной картины физического мира.

Мне представляется, однако, что вопреки весьма распространенным утверждениям некоторых теоретиков, разрабатывающих теорию струн, значение требования объединения для поисков теории квантовой гравитации является преувеличенным. Можно иметь теорию квантовой гравитации, которая способна быть основанием для описания других фундаментальных взаимодействий некоторым объединяющим способом, но способность к объединению еще отнюдь не обеспечивает надежности такого основания. Если у нас есть хорошая квантовая теория сильных взаимодействий, квантовая хромодинамика или КЭД, которые не объединены с квантовой теорией электрослабых взаимодействий каким-либо физически или математически осмысленным способом³, за исключением их структурного сходства (обе являются калибровочными теориями), ясно, что можно также иметь надежную теорию квантовой гравитации, которая не объединена ни с КЭД, ни с теорией электрослабых взаимодействий.

Но непротиворечивость – это совершенно другое дело. Хотя некоторые версии глобальной математической согласованности, такие как конечность и перенормируемость в квантовой теории поля (КТП), не являются необходимыми для того, чтобы физическая те-

ория считалась надежной⁴, концептуальная несогласованность является совершенно неприемлемой. Фактически непротиворечивость и внутренняя согласованность являются фокусом современных поисков в этой области исследований, где успехи и поражения оцениваются почти исключительно в этих терминах⁵.

Сам проект квантования гравитации исторически и концептуально начался с желания расширить наше понимание гравитации от режима низких энергий до режима высоких энергий⁶. Ожидается, что при высоких энергиях гравитация будет вести себя подобно другим фундаментальным взаимодействиям, описываемым КТП. Это расширение тесно связано с другим, касающимся нашего понимания пространства-времени. Поскольку общая теория относительности Эйнштейна (ОТО) выявила глубокую связь между гравитацией, с одной стороны, и природой и структурой пространства-времени, с другой, естественно ожидать, что квантовое поведение гравитации выявит некоторые новые черты пространства-времени на тех масштабах длин (или тех уровнях энергии), где понятие кванта оказывается релевантным для гравитации. Это ожидание стимулировало физиков-теоретиков и метафизиков исследовать возможные модификации и развить новое понимание старых метафизических понятий пространства, времени, локализуемости, каузальности, идентичности, кажимости и реальности, так же как и многих других на основе физического исследования квантовой гравитации. Именно поэтому квантовая гравитация в настоящее время оказывается наиболее многообещающей областью, где физика встречается с метафизикой.

Исследуя эту область, физики разрабатывают различные подходы: гравитонный подход, основанный на теории возмущений (Feynman et al., 1995; DeWitt, 1967a, b, c), петлевое (loop) квантование, базирующееся на перегруппировке (rearrangement) динамических степеней свободы (Ashtekar, 1986, 1987, Rovelli and Smolin, 1990); струнный подход, основывающийся на допущении некоторого нового способа возбуждения субстрата (Polchinski, 1998), и многие другие. Каждый из подходов имеет свои успехи и свои поражения.

Наблюдая за предпринимаемыми попытками, я испытываю смешанные чувства. Меня очень интересуют смелые метафизические выводы, которые делаются физиками. Однако у меня возникает чувство неудовлетворенности в связи с тем, что концептуальные предпосылки этой деятельности недостаточно артикулированы, и при построении теории не уделяется должного внимания требованию непротиворечивости.

Если мы смотрим на построение квантовой теории гравитации не как на революцию, радикально порывающую с принятыми идеями и принципами, но скорее как на последовательное расширение существующих теорий на новый уровень или новую область (либо как на расширение Эйнштейновского понимания гравитации до режима высоких энергий, либо как на приложение квантовых принципов к гравитации, либо как на синтез ОТО и КТП), нам приходится принимать во внимание жесткие ограничения на представления и принципы, которые накладываются существующими теориями, от которых начинается расширение⁷. Однако ограничения, накладываемые начальными теориями, явно противоречат друг другу. Этот недостаток четкости в прояснении предпосылок и в достижении согласованности вызывает законную тревогу.

Можно ли сформулировать последовательную теорию без тщательного концептуального анализа, если задача состоит в том, чтобы примирить две теории, которые накладывают по видимости или по существу несовместимые ограничения? Отсутствие решительного прорыва в поисках квантовой теории гравитации, несмотря на значительные усилия, предпринятые несколькими группами очень талантливых физиков и математиков в течение последних трех или четырех десятилетий, дает основание предполагать, что ответ должен быть отрицательным. Мне представляется, что в данном случае весьма полезной могла бы оказаться работа философа, направленная на прояснение тех условий, которые необходимы для создания согласованной рабочей рамы, на основе которой можно было бы делать дальнейшие разработки. Попытке прояснения таких условий и посвящена данная статья.

Центральный вопрос состоит в том, что такое квантовая гравитация, или какой тип реальности (причинно эффективные гравитационные поля или пространство-время как арена совершения физических явлений) с физической точки зрения должен быть взят в качестве фундаментального⁸. Если этот онтологический вопрос, являющийся, как правило, центральным при анализе оснований физической теории, не поставлен соответствующим образом, в создании теории вновь и вновь будут возникать трудности, и согласованная картина физического мира может навсегда оказаться нам недоступной.

Оставшаяся часть статьи организована следующим образом: раздел 2 дает представление об онтологическом подходе к анализу концептуальных рамок, которые будут затем применены к случаю квантовой гравитации; разделы 3 и 4 посвящаются прояснению теорети-

ческих ограничений, накладываемых соответственно ОТО и КТП на спецификацию базисной онтологии и на создание последовательной теории квантовой гравитации. Заключительные замечания, касающиеся главным образом понятия онтологического синтеза, будут даны в разделе 5.

Онтологический подход

Как я уже показал в моей работе, анализирующей полевые теории XX века (Сао, 1997), концептуальная структура физической теории (и ее эволюция) может быть наилучшим образом проанализирована при реализации подхода, который базируется на понятии теоретической онтологии. Поскольку этот подход будет использован ниже при конструировании подходящей рабочей структуры для создания теории квантовой гравитации, вполне уместно дать вначале краткое описание наиболее важных основных допущений и аспектов этого подхода.

В моем рассмотрении онтологических аспектов физической теории, исходящем из допущения, что предполагаемая каузально иерархическая структура некоторой физической области может быть представлена концептуальной структурой соответствующей физической теории, понятие онтологии относится только к тем структурам, которые постулируются в теории как первичные, лежащие в основании теории автономные основные сущности, из которых все другие сущности и их свойства и отношения могут быть выведены. В данном случае вопрос об онтологии теории должен быть отделен от вопроса о реальности, которой эта теоретическая онтология может обладать, а может и не обладать (т.е. от вопроса об отношении между теорией и миром, который она описывает). Рассматривая современное положение дел в области исследования возможных вариантов теории квантовой гравитации, оправдано сконцентрировать внимание на вопросе об онтологии, оставив пока в стороне вопрос о ее реальном существовании.

Выбор онтологии является ответственным моментом в построении теории. Этот выбор не только определяет те базисные сущности, которые должны быть исследованы теорией, но и диктует теоретическую структуру и ее дальнейшее развитие в рамках некоторой исследовательской программы (см. Сао, 1999b). В связи с этим понятие онтологии нужно признать наиболее важным для понимания концептуальной структуры той или иной научной теории и ее эволюции, что, к сожалению, не всегда осознается.

Очевидно, что в любом обсуждении онтологии присутствует редукционистский момент. Если серьезно рассматривать феномен появления новых онтологических сущностей, сильная версия редукционизма должна быть отброшена. Тем не менее в границах некоторой специфической области научного исследования наличие редукционистского момента всегда желательно и продуктивно, поскольку он связан с идеями упрощения, объединения и объяснения. В этом отношении онтологические допущения играют решающую роль, поскольку без них не может обойтись ни одна теоретическая наука. Интересно отметить, что приведенные выше соображения работают и в обратном направлении, так как они накладывают перечисленные ниже следующие строгие ограничения на формулирование онтологических допущений.

Объяснительная функция и причинная эффективность базисной онтологии

Формально объяснение некоторого явления на более высоком уровне научной теории может определяться его сведением к более низкому уровню (или выведением из него), т.е. уровню, который описывается посредством базисной онтологии теории. С физической точки зрения, однако, объяснительная функция базисной онтологии требует, чтобы на роль базисной онтологии могли претендовать только те сущности, которые являются достаточно причинно эффективными для продуцирования явлений. Используя физические термины, можно утверждать, что это требует, чтобы сущность, претендующая на статус элемента базисной онтологии, находилась в причинной связи с подобными ей или с другими сущностями, т.е., другими словами, она должна иметь динамический характер.

Фактическое же выдвижение онтологических допущений в каждой конкретной ситуации всегда ограничивается и многими другими соображениями. Наиболее общими являются следующие четыре.

Теоретическая и уровневая зависимость онтологического статуса теоретических сущностей

Приписывание онтологического статуса некоторой теоретической сущности (т.е. определение того, является ли она первичной и реальной, или производной и феноменологической) может быть сделано вполне легитимно только в пределах определенного теоретического контекста. Никакого суждения об онтологическом статусе той или иной теоретической сущности не может быть сделано на ос-

нове соединения нескольких разных теоретических контекстов. Например, являются ли пространственно-временные точки первичными сущностями или они конструируются из других сущностей? На этот вопрос не может быть дан ответ в общих терминах, его следует решать в определенном теоретическом контексте. В условной КТП, которая основана на СТО, пространственно-временные точки являются первичными, в ОТО они не являются таковыми. Никакие аргументы вроде знаменитого аргумента, основанного на вырезании полости (hole argument), не могут служить оправданием для выхода за границы, разделяющие теоретические контексты⁹.

Близко связанной с контекстовой, но не идентичной ей теоретической зависимостью, является зависимость теоретической сущности от уровня онтологического статуса. Реальная сущность может рассматриваться как феноменальная, когда рассмотрение движется от данного уровня к более глубокому. Это справедливо и для сущностей классических систем, которые активно квантуются и существуют только как классический предел этой квантованной системы. Таким образом, вопрос о том, что именно является реальной или первичной сущностью, зависит от уровня рассмотрения. Подходящий уровень выбирается согласно нашему теоретическому и практическому интересу, которые кристаллизуются обозначением базисной онтологии. Осознание того, что существует движение от верхнего уровня к нижнему и наоборот, помогает нам избежать смешивания эпистемической приемлемости с онтологической приоритетностью при анализе оснований теоретических структур. (Более подробно об этом будет сказано ниже, в части 3 при рассмотрении взглядов И.Канта).

Межтеоретическая (межуровневая) связь онтологий

Комбинирование зависимости онтологии от теории (или уровня) с объяснительной функцией онтологии накладывает строгое ограничение на расширение онтологических допущений от одного уровня (или теории) к другому: онтологии, существующие до расширения и после него, должны быть каузально связанными. При переходе границ между уровнями могут появляться новые сущности, но они должны быть каузально объясняемы. Черты онтологии более узкой теории (или принадлежащей более высокому уровню иерархии) должны быть выводимы из онтологии более широкой теории (онтологии, принадлежащей более низкому уровню). Как мы увидим, это ограничение является очень мощным теоретическим ресурсом для формирования онтологического основания теории квантовой гравитации. Но его

мощь не может быть использована в полной мере без верного понимания онтологической структуры теоретической сущности и физической теории.

Онтологическая структура сущности

Хотя иногда ситуация бывает проще, все же лучше помнить, что идентичность той или иной теоретической сущности образуется индивидуатором¹⁰, определяемом на субстрате или носителе (либо материей, либо просто «держателями места»). Возьмем в качестве примера реляционную сущность пространства-времени в ОТО. Идентичность пространства-времени задается метрическим тензором, который определяется на многообразии и изменяющиеся общие черты которого представляются дифференциальными и топологическими структурами на этом многообразии. Любое изменение, включающее более чем только изменение квалификатора в конфигурации субстрат-индивидуатор-квалификатор теоретической сущности неизбежно ведет к изменению идентичности этой сущности. Или, если сущность относится к базисной онтологии теории, результатом является онтологический сдвиг, который является или онтологическим базисом для новой теоретической перспективы, либо концептуальной революцией в науке.

Онтологическая структура физической теории

Хотя многие важные черты физической теории (ее основные теоретические сущности, главные характерные черты ее теоретической структуры и перспективы ее развития) могут быть схвачены базисной онтологией (которая должна быть динамической сущностью, для того, чтобы быть причинно эффективной), ее онтологическое основание не исчерпывается единственной динамической сущностью. Скорее это онтологическое основание демонстрирует свою сложную структуру, в которой другие компоненты также играют независимую и необходимую роль. Возьмем в качестве примера КТП. В дополнение к ее базисной онтологии (динамическому глобальному полю (имеется в виду, что оно определено на глобальном пространственно-временном многообразии), которое всегда является флуктуирующим, локально возбудимым и квантовым по своей природе (имеется в виду, что его локальное возбуждение подчиняется квантовым правилам, таким как каноническая коммутативность и отношение неопределенности), структура оснований этой теории имеет еще один компонент, а именно четырехмерное пространствен-

но-временное многообразие Минковского. Это многообразие имеет фиксированную хроно-геометрическую структуру, которая лежит в основе представления о бесконечности степеней свободы, локализуемости и глобального вакуумного состояния, без которых невозможно никакое понимание концептуальной структуры теории (как, например, в системах Wightman' а или Haag' а)¹¹.

Таким образом, правильно понятый онтологический подход представляет собой не столько фиксирование базисной онтологии как отдельной сущности, сколько детализированный анализ онтологической структуры этой сущности в контексте онтологической структуры концептуального основания теории.

Ограничения, накладываемые ОТО

Теперь мы готовы к тому, чтобы использовать онтологический подход для анализа тех ограничений, которые накладываются ОТО и КТП на структуру будущей теории квантовой гравитации (КТГ). Эти ограничения, если мы серьезно отнесемся к требованию межтеоретической связности, помогут нам определить необходимые предпосылки для такой конструкции.

При расширении нашего макроскопического знания гравитации и пространства-времени, которое нам дает ОТО, до микроскопической области, которая будет рассматриваться в КГ, межуровневая связность антологий требует, чтобы онтологическая структура ОТО была выводима из структуры КГ. Таким образом, существенные черты этой структуры и принципы и идеи, которые ведут к ее построению, накладывают жесткие ограничения на построение концептуальной структуры КГ. Если некоторые из них должны быть модифицированы в процессе этого построения, для такой модификации должны быть приведены веские основания и найдены такие пути ее реализации, чтобы выводимость не могла быть подвергнута сомнению.

С самого своего возникновения в 1907 г., когда был введен принцип эквивалентности, ОТО воспринималась как теория поля¹², а именно теория гравитационного поля и его взаимоотношения со структурой пространства-времени (и его инерциально-гравитационной и хроногеометрической структурами). До появления ОТО все полевые теории предполагали существование некоего лежащего в основании пространства (пространства Ньютона или пространства-времени Минковского), которое считалось независимым от происходящих в нем динамических процессов и, следовательно, онтоло-

гически предшествующим этим процессам. Фактически эта определяющая черта полевой теории, обладающей бесконечным числом степеней свободы, была тесно связана с возможностью приписывать значения величин поля каждой точке независимо от существующего пространственно-временного континуума.

Одно из следствий ОТО состоит в том, что онтологический статус пространства-времени, по крайней мере в терминах его связи с гравитационным полем, должен пониматься совершенно иначе. Это изменение было привнесено проведенным Эйнштейном тщательным исследованием отношений между динамикой гравитационного поля и кинематическими структурами пространства-времени. Это исследование направлялось практическими взглядами Эйнштейна на геометрию, которые, в отличие от аксиоматических и конвенционалистских взглядов, стремились установить прямую связь между геометрией и поведением реальных объектов.

Традиционно любая динамическая теория должна предполагать некоторую геометрию пространства для формулировки ее законов и интерпретации. Фактически выбор геометрии предопределяет основания (причинные и метрические структуры) ее динамики. Например, в Ньютонской динамике евклидова геометрия с ее аффинной структурой, которая определяется кинематической симметрией Галилеевой группы как математическим описанием кинематической структуры пространства, определяет динамический закон инерции. В такой теории кинематические структуры не имеют отношения к динамике. В результате динамические законы являются инвариантными при трансформациях, относящихся к кинематической группе симметрии. Это означает, что кинематические симметрии накладывают некоторые ограничения на форму динамических законов.

В ОТО предполагалось, что динамические законы остаются справедливыми для каждого мыслимого пространственно-временного многообразия. Таким образом, существование фиксированных кинематических структур пространства-времени и соответствующей кинематической симметрии с ее ограничениями на форму динамических законов должно было быть отвергнуто. Как мы увидим в кратком обзоре, приведенном ниже, этот и некоторые другие выводы, оказывающие глубокое влияние на наше понимание природы пространства-времени, были достигнуты в результате сложного интеллектуального усилия, совершенного под эгидой трех принципов: принципа эквивалентности (ПЭ), принципа Маха (ПМ) и общей ковариантности (ОК).

Апеллируя к ПЭ, Эйнштейн смог ввести понятие гравитационного поля в дискуссию об инерции, с тем чтобы установить нераздельность гравитации и инерции (которые могли быть совместно представлены аффинными связями) и совместить инерциально-гравитационные и хроно-геометрические структуры пространства-времени. Онтологически результаты этого совмещения могут быть интерпретированы двумя различными способами. Либо гравитация может интерпретироваться как проявление структуры пространства-времени (а не как особая сила в пространстве-времени), либо инерциально-гравитационная структура может быть интерпретирована как образованная причинно-эффективным физическим полем, а именно гравитационным полем (аффинная связь), а хроно-геометрическая структура (как образованная метрическим тензором. На данной стадии развития эту интерпретативную двусмысленность устранить не удалось¹³.

Хотя Эйнштейн ввел выражение «Принцип Маха» (ПМ) только в 1918 г., его работа по разработке ОТО была с самого начала мотивирована критикой Махом абсолютного пространства Ньютона и его релятивистскими взглядами (которые следовали из его предположения о том, что инерция или инерциальные системы должны быть выводимы из причинных взаимодействий материальных тел). Фактически Эйнштейн утверждал, что его уравнение поля является воплощением принципа Маха. Это означает, что ПМ не только ввел в рассмотрение материю (и таким образом обогатил исследование природы пространства-времени) и поддержал релятивистские взгляды, но также позволил окончательно устранить упомянутую выше интерпретативную двусмысленность в полевой или геометрической интерпретации гравитации посредством использования метафизических следствий – общей ковариантности (ОК).

Какой бы ни была интерпретация, полевое уравнение отчетливо установило динамическую природу кинематических структур пространства-времени и таким образом отвергло его фиксированный характер и независимое существование. Быть динамическим обычно означает быть субъектом временной эволюции. Учитывая, что в ОТО временные отношения сами определяются метрическим тензором, было бы бессмысленно утверждать, что метрический тензор является динамическим в смысле подверженности временным изменениям. Таким образом, быть динамическим для метрического тензора означает прежде всего быть субъектом каузального взаимодействия с материей или другими физическими сущностями (включая электромагнитные или другие поля, включая себя самого)¹⁴.

Но тогда мы сталкиваемся со сложной ситуацией в связи с открытием вакуумных решений Эйнштейновского полевого уравнения. Это могло быть интерпретировано (и на самом деле интерпретировалось) в том смысле, что ПМ является неверным и что геометрические структуры пространства-времени, или даже само пространство-время, могут иметь некоторое независимое от материи существование. Однако это может быть интерпретировано и по-другому.

Во-первых, существование вакуумных решений может быть использовано для того, чтобы показать, что гравитационное поле, как такое же физическое поле как и электромагнитное, является автономной и онтологически первичной сущностью: его существование не выводится из материальных тел, как могла бы предполагать одна из интерпретаций ПМ, или из других физических сущностей, таких как другие поля. Во-вторых, возможность исключения взаимодействий гравитационного поля с другими физическими сущностями не означает, что гравитационное поле не взаимодействует с другими физическими сущностями, когда они присутствуют. То есть существование вакуумных решений не изменяет динамической природы гравитационного поля. В-третьих, если условие совместимости удовлетворяется, то сказанное о гравитационном поле может быть сказано и о метрическом тензоре, который образует кинематическую структуру пространства-времени. Это означает, что и гравитационное поле, и другие поля (из которых в соответствии с КТП могут быть выведены материальные тела) являются причинно эффективными в образовании кинематической структуры пространства-времени, хотя их причинная эффективность должна быть опосредована метрическим тензором через полевые уравнения и условие совместимости.

Таким образом, существование вакуумных решений не обязательно означает, что ПМ является ложным и что пространство-время может иметь независимое существование.

Напротив, это могло бы означать, что первоначальная версия ПМ должна быть обобщена путем замены Маховских материальных тел более общими полями, включая гравитационное. Интерпретированный таким способом ПМ подразумевает, что пространство-время и его инерциально-гравитационная и хроно-геометрическая структура образованы непосредственно гравитационным полем и соответствующим метрическим полем, которые причинно взаимодействуют со всеми физическими полями, включая самих себя.

Интерпретативная двусмысленность, связанная с ПЭ и ПМ, была в конце концов устранена Эйнштейном в процессе его размышлений над ОК при окончательной формулировке ОТО. Идея проста.

Если уравнения поля должны быть общековариантными, тогда точки четырехмерного многообразия не имеют идентичности, а функционируют только как места для структуры отношений, соединяющей их в единое целое. В данном случае структура отношений относится к хроно-геометрической структуре, приписываемой метрическим тензором, являющимся решением уравнений поля.

Из того факта, что пространственно-временные отношения специфицируются отсылкой не к точкам многообразия, а скорее к метрическому тензору, следует, что точки многообразия сами по себе не имеют пространственно-временного смысла. Они могут иметь такой смысл, только когда им приписывается некий метрический тензор. Следовательно, состояния метрического тензора не могут быть обозначены точками многообразия, они должны быть обозначены свойствами его внутренней структуры, связанными с первой и второй фундаментальными формами, определяющими скалярную и внешнюю кривизну (см. Wald, 1984). Кроме того, динамическая природа метрического тензора предполагает динамическую структуру пространственно-временных отношений.

Таким образом, нельзя сказать, что многообразиие, наделенное некоторыми дифференциальными и топологическими структурами, представляет собой пространство-время. Скорее пространство-время как реляционная сущность образуется или индивидуализируется метрическим тензором. Это означает, что только метрический тензор ответствен за определение пространственно-временных отношений. В отличие от пространства-(времени) Ньютона, которое можно считать существующим независимо и не взаимодействующим физически с другими сущностями и в противоположность также представлениям Лейбница о пространственно-временных отношениях, которые вообще не являются физическими сущностями (существующими независимо), метрический тензор является динамической сущностью, которая взаимодействует со всеми другими физическими сущностями, включая самого себя. Именно это универсальное взаимодействие (coupling), включая самовзаимодействие, определяющее относительное движение объектов, мы стремимся использовать в качестве стержней и часов, что позволяет нам дать ему метрическую интерпретацию, которая, в свою очередь, подтверждает его определяющую роль в образовании пространственно-временных отношений¹⁵.

Нередко метрический тензор смешивают с пространством-временем или с его хроногеометрией. Это неверно, потому что тогда становится незаметным важное различие между конституирующим

агентом (метрическим тензором) и конституируемой реляционной сущностью (пространством-временем), которые располагаются на двух разных онтологических уровнях¹⁶. Это различие является важным, потому что оно помогает нам выяснить, какая теоретическая сущность должна быть взята в качестве физически первичной и фундаментальной в дискурсах о гравитации и пространстве-времени и на этом основании должна стать предметом квантово-теоретического рассмотрения. В этом отношении уместно сделать два замечания.

Во-первых, хотя пространство-время как теоретическая сущность представляет собой только отношения, эти отношения образуются индивидуальной физической сущностью (метрическим тензором). Во-вторых, если мы будем считать динамический характер определяющей чертой всего дискурса, т.е. будем рассматривать гравитационные взаимодействия в качестве основного фактора в нашем понимании гравитации и пространства-времени, тогда мы сможем понять метрический тензор в качестве замаскированного варианта аффинной связи или даже в качестве некоторой сущности, которая существует благодаря этой связи. По крайней мере ее формы и характерные черты обуславливаются этой связью через условие совместимости. Все это поддерживает точку зрения, согласно которой метрический тензор может рассматриваться в качестве моста, соединяющего базисную онтологию (связь) с явлениями (пространственно-временные отношения), и таким образом наше рассмотрение должно быть сосредоточено скорее на этой связи, чем на метрическом тензоре¹⁷.

Остается еще вопрос об онтологическом статусе многообразия. После того, как аргумент о совпадении точек нейтрализовал *hole* аргумент против ОТО, некоторые философы стали защищать точку зрения, получившую название «субстанциализма относительно многообразия», чтобы дать новую жизнь субстанциалистскому пониманию пространства-времени¹⁸. Однако этот взгляд связан со многими трудностями. Во-первых, как мы уже замечали выше, без метрического тензора точки многообразия сами по себе не представляют пространственно-временных событий. Во-вторых, благодаря общей ковариантности эти точки неидентифицируемы и, следовательно, не являются локализуемыми динамическими степенями свободы (то есть не могут взаимодействовать с другими физическими сущностями)¹⁹. На самом деле, самое важное свойство многообразия, которое имеет отношение к дискуссии о пространстве-времени, а именно его размерность и явно и неявно предположенные дифференциальные и топологические структуры, могут рассматриваться только в каче-

стве математического описания самых общих свойств метрического тензора. Поэтому эти свойства являются только квалификаторами, но не индивидуаторами реляционной сущности «пространство-время».

Однако, если мы ограничим дискуссию реляционной сущностью пространства-времени и не будем спускаться до уровня гравитации, тогда мы должны будем принять во внимание другой очень интересный аспект многообразия. Необходимость говорить о многообразии в пространственно-временном дискурсе наводит на мысль понять его как голый субстрат²⁰ пространства-времени, который для того, чтобы обладать определенной пространственно-временной структурой, должен быть индивидуирован метрическим тензором. С эпистемологической точки зрения этот взгляд обладает определенными достоинствами, поскольку он помогает нам придать смысл некоторым математическим манипуляциям с многообразием еще до того, как метрический тензор определяется и приписывается многообразию в качестве решения уравнения поля (например, определению дивергенции и регуляризации (в случае, если речь идет о квантовой теории поля). Чтобы проводить эти манипуляции, без которых невозможно начать такого рода исследования, необходимо придать хотя бы самый общий смысл пространству-времени. Этот взгляд может быть также подкреплён методологической идеей самосогласованного подхода (бутстрепа). Прежде чем обсуждать саму эту идею, позвольте остановиться еще на двух обстоятельствах, к которым эта идея имеет отношение.

Во-первых, некоторые физики, склонные к реляционизму, акцентируют то обстоятельство, что гравитационное поле не находится в пространстве-времени, но что положение вещей определяется по отношению к этому полю²¹. Это правильное соображение: пространственно-временные отношения (и следовательно, положения) можно определить только для данного метрического тензора, который тесно связан с гравитационным полем. И все же гравитационное поле как физическая сущность (система с бесконечным числом степеней свободы) также существует в пространстве-времени, то есть состоит в пространственно-временных отношениях с другими физическими сущностями или по крайней мере с самой собой²². В противном случае мы бы не могли определять события взаимодействия поля с другими сущностями, а это единственный способ, с помощью которого мы можем удостовериться в его существовании.

Во-вторых, реляционистский отказ от абсолютного пространства-времени (и его фиксированной хроногеометрии) влечет за собой отказ от локализуемости. Но локализуемость необходима для

того, чтобы определить локальные степени свободы и построить некоторую теорию поля (которая характеризуется тем, что имеет дело с бесконечным числом степеней свободы), поскольку без этого потеряла бы смысл вся дискуссия, в контексте которой возникает реляционистская точка зрения. Конечно, в этом смысле может помочь понятие относительного положения. Но чтобы определить это глубокое понятие (что можно сделать только если получены решения уравнений поля), мы должны начать с некоторой «параметрической локализации», которая определяется на точках голого многообразия²³.

Философский аспект этой проблемы был наиболее остро сформулирован Кантом. Согласно Канту, без пространства и времени невозможны никакие физические опыты и никакие знания о физическом мире. Поэтому в метафизике Канта пространство и время — это первоначальные понятия, которые нельзя объяснить с помощью других понятий.

Однако Кант говорит только об эпистемологической необходимости, а не об онтологическом приоритете. Аргумент Канта не исключает возможности того, что пространству-времени может быть дано онтологическое объяснение. С точки зрения Канта, пространство и время необходимы для того, чтобы иметь доступ к миру явлений. Согласно Маху, Эйнштейну, и в частности ОТО, эта реляционная сущность допускает онтологическое объяснение в терминах взаимодействующих тел, или метрических тензоров, или (в окончательном смысле) в терминах гравитационного поля или аффинных связей.

Однако такое объяснение возможно, только если у нас уже есть хорошая физическая теория, а хорошая физическая теория, как и вообще любая физическая теория, предполагает существование пространства-времени (в этом Кант прав). Дело не только в том, что пространство-время предполагается эмпирическим базисом теории (взаимодействия гравитационного поля и других полей необходимо считать пространственно-временными событиями), но и в том, что даже самые абстрактные концептуальные построения в квантовой теории гравитации (КТГ) предполагают некоторую параметрическую локализацию голого пространства-времени. Явный круг в рассуждении²⁴ грозит оказаться порочным и неизбежным, а такое объяснение — ничего не объясняющим.

С методологической точки зрения, чтобы спасти онтологический приоритет (и следовательно, объяснительную силу) гравитационного поля по отношению к пространству-времени, несмотря на эпистемологическую необходимость последнего для объяснения, можно обратиться к идее бутстрепа.

Возьмем для примера теорию перенормировки. Прежде всего мы должны ввести голые параметры (массу и заряд), а затем различные инструменты для регуляризации. Все эти понятия не имеют физического смысла, и поэтому они сами по себе неприемлемы. Но если конечные результаты не зависят от этих понятий²⁵, такая процедура является обоснованным способом изучения физических свойств и взаимодействий элементарных частиц.

Подобным образом мы можем начать с не имеющего физического смысла голого многообразия, на котором предварительно определяется параметрическая локализация. Однако это предполагает существование физического пространства-времени, и этому многообразию должен быть придан физический смысл. Таким способом удовлетворяется Кантовское требование эпистемологической необходимости пространства-времени. Если окончательные результаты в диффеоморфно ковариантной теории не зависят от параметров локализации, не считая некоторых самых общих свойств гравитационного поля (что неизбежно при всяком эффективном самосогласованном бутстреппе), тогда вся эта процедура является обоснованным способом изучения физического пространства-времени и его онтологических предпосылок. В этом случае круг оказывается не порочным; можно сказать, что он представляет самосогласованный бутстреп. Кроме того, в этом случае не приходится поступаться объяснительной силой (можно сказать, что в этом случае объяснение основывается на физической теории, а не на чистых метафизических спекуляциях²⁶).

Суммируя, можно сказать, что ОТО накладывает на любую возможную КТГ следующие ограничения. Во-первых, искомая теория должна воспроизводить все существенные черты ОТО. А именно: это должна быть новая теория поля (то есть теория, имеющая дело с бесконечным числом степеней свободы, не предполагающая заранее заданного автономного пространства-времени с жесткими структурами²⁷). Скорее пространство-время формируется как реляционная сущность динамическими гравитационными полями (аффинными связями и метрическими тензорами их вариаций) и таким образом является динамическим по своей природе²⁸. Во-вторых, такая теория обязательно должна использовать идею бутстрепа, ключевым моментом которой является установление диффеоморфной ковариантности теории, поскольку в противном случае эта существенная черта ОТО была бы утеряна.

Ограничения, накладываемые Квантовой Теорией Поля

Чтобы применить квантовые принципы к гравитации, естественно работать в рамках квантовой теории поля (сокращенно КТП)²⁹. В качестве наиболее удачной общей рамки для разработки специальных квантовых теорий с бесконечным числом степеней свободы в различных областях явлений, включая все физические взаимодействия кроме гравитации, КТП дает нам знания о квантовых принципах и о применении этих принципов к полевым системам. Поскольку ОТО также имеет дело с полевой системой, кажется естественным и в то же время очень соблазнительным попытаться построить квантовую теорию гравитации, применяя КТП к гравитационному полю ОТО. К сожалению, все попытки такого рода до сих пор не увенчались успехом, причем это произошло скорее не из-за технических проблем, а из-за проблем с основаниями. Поэтому если мы хотим понять, какого рода ограничения, накладываемые КТП на искомую непротиворечивую КТГ, нужно принять всерьез и каким образом нужно модифицировать основания КТП так, чтобы иметь возможность применить ее к гравитации, нам совершенно необходимо внимательно исследовать концептуальные основания КТП.

Первый вопрос, который необходимо поставить в таком исследовании, является онтологическим: что подлежит квантованию? В наше время среди специалистов по КТГ стало признаком хорошего тона говорить о квантовании геометрии, топологии, пространства-времени и даже многообразия. Мне не ясно, что понимают в этих случаях под квантованием. В КТП под квантованием всегда понимается квантование некоторой динамической системы, степени свободы которой должны быть локализуемы (хотя не обязаны существовать постоянно и лежать в основании теории)³⁰. Процедура квантования открывает нам некоторые специальные свойства и образцы поведения данной динамической системы на микроскопическом уровне или в высокоэнергетическом режиме: некоторые особые дискретные значения некоторых полевых величин, некоторые особые вероятности перехода от одного состояния поля в другое и т.д. Необходимо подчеркнуть, что хотя квантование свойств и образцов поведения динамической системы может давать дискретную картину (дискретные значения некоторых полевых переменных и скачки из одного состояния в другое), сама полевая система остается непрерывной. Это значит, что полевая система остается определенной в каждой точке непрерывного четырехмерного пространственно-временного многообразия.

Это приводит нас на более глубокий уровень оснований КТП. КТП требует и предполагает заранее заданное пространственно-временное многообразие (а именно многообразие Минковского), в котором каждая точка обладает идентичностью и может индексировать динамические степени свободы полевой системы. Определяемые таким образом локальные поля обеспечивают онтологический базис для различного рода локальных взаимодействий, каждое из которых за исключением гравитации успешно описывается в рамках КТП. Если мы посмотрим более внимательно на концептуальную структуру КТП, как она сформулирована в аксиоматической системе Вайтмана и Хаагса, мы увидим, что пространственно-временное многообразие Минковского дает онтологические основания для основных предположений КТП, таких как инвариантность Пуанкаре, спектральное условие (вакуумное состояние и скачок массы), локализуемость и канонические соотношения коммутативности. Поскольку одним из самых глубоких метафизических следствий ОТО является как раз отказ от такого предзаданного и фиксированного пространственно-временного многообразия как онтологического обоснования полевой системы, между КТП и ОТО возникает серьезное напряжение.

Однако внимательный читатель может обратить внимание на то, что все сделанные выше утверждения о том, что КТП онтологически требует предзаданного пространства-времени, имеют отношение только к полевой системе. Мы еще не касались понятия кванта. Возможно, что предзаданное пространство-время Минковского не существенно для самой идеи кванта, и, таким образом, напряжение между основаниями КТП и ОТО на самом деле не такое серьезное и не может привести к открытому конфликту между этими теориями.

К сожалению, как мы увидим, это все же не так. Поэтому, чтобы построить непротиворечивую рамку для КТГ (в качестве расширения или синтеза существующих теорий), необходимо что-то изменить в основаниях. Однако, прежде всего, давайте пристальнее посмотрим на роль понятия пространства-времени в определении кванта.

Будет удобнее разделить обсуждение сложных отношений между понятием кванта и предзаданного пространства-времени на две части. Сначала мы проанализируем эти отношения в терминах внутренней физики и метафизики любой квантовой теории. Потом мы перейдем к обсуждению одного необычного аспекта концептуального базиса квантовой теории, который был сформулирован Нильсом Бором, а именно Копенгагенской интерпретации.

Внутренняя физика и метафизика квантовой теории: В начале своей истории (Планк, Эйнштейн и Бор) термин «квант» относился к определению и измерению свойств микроскопических объектов, и в особенности к их дискретному характеру. Условие, гарантирующее дискретный характер измеряемых свойств, было названо Бором и Зоммерфельдом «условием квантуемости». В контексте матричной механики условие квантуемости Бора-Зоммерфельда превратилось в канонические соотношения коммутативности (или антикоммутативности) (сокращенно КСК)³¹. Однако КСК и его аналоги нельзя определить без метрики и связанной с ней каузальной структурой предзаданного пространства-времени.

Более глубокое следствие идеи кванта, которое наложило ограничение на одновременное измерение некоторых пар свойств, было осознано вскоре после формулировки КСК. Наиболее глубоким следствием было, конечно, соотношение неопределенности Гейзенберга. На первый взгляд соотношения неопределенности имеют отношение только к эпистемологической проблеме измерения. Однако чтобы обосновать или даже понять эти соотношения, которые надежно установлены экспериментально, необходимо сделать онтологическое предположение: мы должны допустить существование внутренних (возможно, примитивных) флуктуаций в микроскопическом мире, которые численно описываются соотношениями неопределенности³². Как хорошо известно, принцип неопределенности дает мощные теоретические средства для объяснения многих физических понятий: наиболее релевантным в этом контексте является понятие сингулярности светового конуса, которое вместе с понятием перенормировки составляет концептуальную основу КТП.

Однако и сам принцип неопределенности (сформулированный в терминах вариации измеряемых свойств по отношению к пространственно-временной области), и его метафизическая предпосылка (флуктуации физических свойств определяемых в пространственно-временной области) привязаны к предзаданному пространственно-временному многообразию с фиксированной хроногеометрической структурой. В противном случае нельзя ни сформулировать принцип неопределенности, ни даже определить понятие флуктуации. Конечно, можно сказать, что принцип неопределенности сам делает невозможным точную локализацию в пространстве-времени. Однако понятие неопределенной локализации само определяется только посредством понятия точной локализации и таким образом зависит от многообразия с определенной на нем хроногеометрической структурой (cf. Teller, 1999).

Измерение и пространство-время: согласно Нильсу Бору или Копенгагенской интерпретации, квантовая теория не имеет смысла без измерений. Бор рассматривал квантовую теорию по сути как исчисление вероятностей того, что различные свойства и процессы имеют место в определенных областях пространства-времени. По отношению к любой физической системе можно утверждать, что никакое знание о системе не может быть получено без измерений. Однако особенностью квантовой теории является то, что до измерений нельзя предполагать даже само существование измеряемых свойств. Предположив противное, согласно Копенгагенской интерпретации мы приходим к противоречию с экспериментальными свидетельствами³³. Однако измерение Бор всегда понимает в классическом смысле (как измерение наблюдаемых свойств, локализуемых в пространственно-временном многообразии с фиксированной хроногеометрической структурой. Если эта структура имеет динамическую природу и состоит в причинном взаимодействии с измерительным прибором так же как и измеряемая система, невозможно никакое контролируемое измерение³⁴. Здесь, в квантовой области, Бор очень эффективно повторил и даже усилил тезис Канта о том, что опыт и знание невозможны без априорных форм пространства и времени.

Давайте опять обратимся к онтологическому аспекту квантовой физики, но подойдем к нему с другой стороны. Кажется привлекательной идея объяснить классические макроскопические явления с помощью квантовых микроскопических процессов. Существует два подхода к пониманию отношений между квантовой и классической физикой: активное квантование и квантовый реализм³⁵.

Сторонники активного квантования считают, что квантовая система может и должна быть получена путем активного квантования некоторой классической системы. Тогда классическую систему можно будет объяснить через квантовую как ее предельный случай. Если бы переход с одного уровня на другой был гладким, отношения между классической и квантовой физикой были бы ясными.

Проблема, возникающая при таком подходе, состоит в том, что в некоторых случаях классическая система (в частности, гравитационное поле ОТО), которой мы хотим дать причинное объяснение конститутивного типа (то есть микроскопическое или квантовое объяснение)³⁶, не может быть квантована в рамках обычной КТП³⁷. Обратная проблема такого же рода возникает, когда некоторая квантовая система, например фермионное поле, не имеет классического предела³⁸. В таких проблематичных случаях переход между класси-

ческим и квантовым уровнями оказывается непростым, и объяснение классических свойств посредством сведения их к квантовым в рамках метода активного квантования представляется невозможным.

Однако такое объяснение может оказаться возможным, если мы примем точку зрения квантового реализма. Согласно квантовому реализму у нас нет оснований надеяться правильно понять отношения между квантовым и классическим уровнями, просто исследуя поведение одних и тех же сущностей на различных масштабах длин³⁹, заданных в фиксированном пространственно-временном многообразии. Если переход от одного масштаба к другому необратим, такой подход, очевидно, не работает. Это особенно важно в случае гравитации, где само понятие масштаба длины подлежит исследованию и реконструкции на надежном понятийном основании. Однако, если мы допустим, что реальность имеет квантовую природу, будет лучше, если мы примем квантовую онтологию с самого начала. Тогда мы можем попытаться вывести классические явления некоторым разумным (хотя, возможно, и сложным) способом. Следовательно, явления могут быть не классическими пределами тех же сущностей, которые только ведут себя по-другому на другом масштабе длины, а действительно новыми сущностями, которые появляются в новом контексте.

Теперь мы можем следующим образом суммировать ограничения, которые КТП налагает на любую возможную теорию КТГ. Во-первых, необходимость связи между антологиями различных теорий требует, чтобы КТГ в качестве базовой онтологии принимала глобальное динамическое поле, которое постоянно флуктуирует, является локально возбудимым и квантовым по природе (в том смысле, что локальные возбуждения поля подчиняются квантовым принципам, таким как канонические соотношения коммутативности [или антикоммутативности] и соотношения неопределенности). Во-вторых, теория КТГ должна обладать достаточными теоретическими ресурсами, чтобы обосновать базовые понятия концептуальной структуры КТП, такие как бесконечность числа степеней свободы, локализуемость и глобальное состояние вакуума, которые в обычном варианте КТП обосновываются с помощью 4-хмерного пространственно-временного многообразия Минковского с фиксированной хроногеометрической структурой.

Онтологический синтез: возможное решение

Пытаясь распространить наши знания о гравитации с макроскопического режима на микроскопический, мы выяснили, что это не может быть сделано путем простого приложения квантовых

принципов к ОТО (активное квантование). Вместо этого мы должны строить нашу теорию сразу на квантовом уровне, и уже потом искать разумный способ связать ее с ОТО (квантовый реализм). Это не означает, однако, отказа от проекта расширения теории. Скорее это означает, что такое расширение должно быть жестко ограничено как имеющимися знаниями о гравитации, так и существующей квантовой теорией, которые лучше всего выражены соответственно в ОТО и КТП.

Такой анализ попыток построить непротиворечивую теорию КТГ делает главную концептуальную трудность кристально ясной: глубокое напряжение между ограничениями, накладываемыми ОТО и КТП (как мы их сформулировали выше) делает почти невозможной непротиворечивую теорию, которая находилась бы в гармонии с ограничениями этих двух видов сразу.

Глубокое напряжение: во-первых, универсальное взаимодействие динамического метрического тензора, принятое в ОТО, означает отказ от любой фиксированной кинематической структуры пространства-времени и, таким образом, делает бессмысленным понятие абсолютного положения, тогда как КТП предполагает фиксированную хроногеометрическую структуру Минковского в качестве онтологического базиса своей концептуальной структуры. Это означает, что никакое понятие гравитации, совместимое с ОТО, не может быть введено в рамки КТП так, чтобы концептуальная структура КТП (определимость канонических соотношений коммутативности, соотношения неопределенности, измеряемость и само понятие квантовой флуктуации) не была бы разрушена.

Во-вторых, согласно ОТО непрерывный метрический тензор, определенный на дифференцируемом многообразии, предполагает понятие окрестности точки, что исключает возможность включить в рамки ОТО понятие произвольной флуктуации, тогда как произвольные флуктуации в непосредственной окрестности точки характеризуют квантовое поведение. Это означает, что невозможно ввести понятие кванта в рамках ОТО, не разрушив структуру, лежащую в основании этой теории. Джон Уиллер (1973) понял это уже в 1964 году.

Стратегия ослабления этого напряжения: чтобы найти способ облегчить это напряжение, необходимо пристальнее взглянуть на ситуацию. Начнем с ОТО. Поскольку ОТО является полевой теорией гравитации или динамической теорией пространства-времени, на онтологическом уровне для ОТО существенно предположение о гравитационном поле (связи), взаимодействующем с любыми физичес-

кими сущностями (универсальное взаимодействие). Однако при более внимательном рассмотрении обнаруживается, что это универсальное взаимодействие не требует, чтобы метрический тензор был непрерывным или определенным на гладком многообразии. В любом случае **квантовый реалист** сказал бы, что непрерывная структура пространства-времени, какой мы наблюдаем ее в макроскопическом режиме, могла бы быть получена путем «огрубления» успешной микроскопической теории гравитации, не предполагающей непрерывного поля и даже непрерывного многообразия⁴⁰. Иначе говоря, отказываясь от предположения о непрерывности, можно включить идею произвольных флуктуаций в концептуальные рамки непротиворечивой теории гравитации, хотя это радикально изменило бы наше понимание природы гравитационного поля и пространства-времени, и таким образом радикально изменило бы концептуальные основания ОТО.

Что касается КТП, то необходимость в фиксированной пространственно-временной структуре Минковского заключается только в ее функции определения локализованных состояний. Поэтому при более внимательном рассмотрении мы обнаруживаем, что от предположения о предзаданном пространстве-времени Минковского можно будет отказаться, если мы найдем другой способ локализовать квантовые состояния. Таким образом, **реляционист**⁴¹ сказал бы, что статическая предзаданная пространственно-временная структура будет не нужна для определения локализованных состояний, если мы сможем успешно развить диффеоморфно ковариантную квантовую теорию поля, в которой квантовые состояния могли бы быть локализованы скорее относительным способом (то есть относительно друг друга), а не абсолютным способом (то есть посредством индексации по точкам пространства-времени). Другими словами, принимая реляционный взгляд на пространство-время (локализацию), можно ввести в концептуальную схему непротиворечивой теории квантовых полей динамическое понятие пространства-времени (посредством введения гравитационного поля с универсальным взаимодействием в полевую систему). Я должен подчеркнуть, однако, что это радикально изменило бы концептуальную схему КТП: исчезла бы ее предзаданная кинематическая структура пространства-времени, и все понятия и процессы, затрагивающие пространственно-временные отношения, нужно было бы понимать динамически, то есть путем обращения к действию динамического гравитационного поля.

Онтологический синтез: в нашей стратегии ключевую роль играли два понятия: «универсальное взаимодействие» и «флуктуация». Эти понятия действуют как индивидуаторы. Мы можем использо-

вать понятие универсального взаимодействия для того, чтобы охарактеризовать гравитационное поле и понятие произвольной флуктуации, чтобы охарактеризовать квантовую сущность. В некотором смысле на нашу стратегию можно посмотреть как на онтологический синтез: требуя, чтобы сочетание двух индивидуаторов (один из которых характеризует гравитационное поле, а другой квантовую сущность) характеризовало единственную сущность, а именно квантовое гравитационное поле, которое произвольно флуктуирует и в то же время универсально взаимодействует с любой физической сущностью (и таким образом, его динамика определяет хроногеометрическую структуру прежде всего в микроскопическом режиме, но также, посредством огрубления, и в макроскопическом режиме).

Эта новая онтология дает не только новые основания для концептуальной структуры КТГ, но также и новую картину мира, в которой единственной реальностью является гравитационное поле, взаимодействующее со всеми остальными квантовыми полями; все остальное, включая гладкие или фиксированные метрические тензоры, это вторичные явления. Конечно, эта новая онтология дает радикально новое понимание природы пространства, времени и причинности.

Онтологические аспекты редукции: в предшествующем обсуждении мы понимали переход от КТГ к ОТО не как простой предельный переход, но скорее как огрубление, при котором появляется новая сущность (непрерывный метрический тензор). Подобным образом переход от КТГ к КТП также дает жизнь новой физической сущности (нединамическому пространству-времени Минковского). При этом гравитация исключается из дискурса (или физического мира), что означает радикальное изменение онтологической структуры теории (или мира). Такой гетерогенный характер этого перехода делает невозможным подход активного квантования и требует квантового реализма, хотя, чтобы выполнить требование связности, должны быть приняты во внимание ограничения, накладываемые ОТО и КТП.

Благодарности: я признателен All Souls College, Oxford за предоставленную мне стипендию, позволившую закончить эту статью. Я хочу поблагодарить Dr. Jeremy Butterfield of All Souls College за гостеприимство и его полезные замечания и предложения. Я также хочу выразить свою признательность John Stachel и Harvey Brown за то, что они делились со мной своими идеями и указывали на ценные источники.

Литература

Adler, S. and Horwitz, L. (2000) 'Structure and properties and Hughston's stochastic extension of the Schroedinger equation', *Journal of Mathematical Physics* **41**, 2485.

Ashtekar, A. (1986) 'New variables for classical and quantum gravity', *Physical Review Letter* **57**, 2244-47.

Ashtekar, A. (1987) 'New Hamiltonian formulation of general relativity', *Physical Review* **D36**, 1587-1602.

Ashtekar, A. and Lewandowski (1997a) 'Quantum theory of geometry I: Area operators', *Classical and Quantum Gravity* **A14**, 55-81.

Ashtekar, A. and Lewandowski (1997b) "Quantum theory of geometry II: Volume operators", gr-qc/9711031.

Ashtekar, A. and Lewandowski (1999) 'Quantum field theory of geometry', in *Conceptual Foundations of Quantum Field Theory* (edited by T. Y. Cao; Cambridge, Cambridge University Press), 187-206.

Belot, G. and Earman, J. (1999) 'From metaphysics to physics', in *From physics to Philosophy* (edited by J. Butterfield and C. Pagonis; New York, Cambridge University Press), 166-186.

Belot, G. and Earman, (2000) 'Pre-Socratic quantum gravity' (manuscript).

Brown, H. R. (1997) 'On the role of spacial relativity in general relativity', *International Studies in the Philosophy of Science* **11**, 67-81.

Brown, H. R. and Pooley, O. (2000) 'The origin of the spacetime metric: Bell's "Lorentzian pedagogy" and its significance in general relativity', to appear in *Physics meets Philosophy at the Planck Scale* (edited by C. Callender and N. Huggett; Cambridge University Press).

Brunetti, R., Fredenhagen, K., and Koehler, M. (1995). 'The microlocal spectrum condition and Wick polynomials of free fields on curved spacetimes', *DESY* (1995), 95-196.

Butterfield, J. and Isham, C. (1999a) 'On the emergence of time in quantum gravity', in *The Arguments of Time* (edited by Jeremy Butterfield; Oxford University Press) 111-168; gr-qc/9901024.

Butterfield, J. and Isham, C. (1999b) 'spacetime and the philosophical challenge of quantum gravity', to appear in *Physics Meets Philosophy at the Planck Scale* (edited by C. Callender and N. Huggett; Cambridge University Press, 2000); gr-qc/9903072.

Cao, T. Y. and Schweber, S. S. (1993) 'The conceptual foundations and the philosophical aspects of renormalization theory', *Synthese* **97**, 33-108.

Cao, T. Y. (1997) *Conceptual Development of 20th Century Field Theories* (Cambridge, Cambridge University Press).

Cao, T. Y. (1998) 'Objectivity and progress in science', (manuscripts).

Cao, T. Y. (1999a) 'Introduction: Conceptual issues in quantum field theory', in *Conceptual Foundations of Quantum Field Theory* (edited by T. Y. Cao; Cambridge, Cambridge University Press), 1-27.

Cao, T. Y. (1999b) 'Structural realism and the interpretation of quantum field theory', forthcoming in *Synthese*..

DeWitt, B. S. (1967a, b, c) 'Quantum theory of gravity, I, II, III ', *Physical Review* **160**, 1113-1148; **162**, 1195-1239, 1239-1256.

- Earman, J. and Norton, J.* (1987) 'What price space-time substantivalism? The hole story,' *British Journal for the Philosophy of Science* **38**, 515-525.
- Earman, J.* (1989) *World Enough and Spacetime* (Cambridge, Mass. MIT Press).
- Feynman, R. P., Morinigo, F. B. and Wagner, W. G.* (1995) *Feynman Lectures on Gravitation* (edited by B. Hatfield and foreword by J. Preskill and K. S. Thorne; Reading, Mass, Perseus Books).
- Field, H.* (1980) *Science without Numbers* (Princeton University Press).
- Grunbaum A.* (1977) 'Absolute and relational theories of pace and space-time' in *Foundations of Space-Time Theories* (edited by J. Earman, C. Glymore and J. Stachel; University of Minnesota Press), 303-373.
- Hawking, S. and Israel, W.* (eds.) (1979) *General Relativity: An Einstein Centenary Survey* (Cambridge, Cambridge University Press).
- Isham, C. T., Penrose, R., and Sciama, D. W.* (eds.) (1975) *Quantum Gravity* (Oxford, Clarendon).
- Isham, C. J.* (1997) 'Structural issues in quantum gravity', in *General Relativity and Gravitation* (Singapore, World Scientific): **GR14**, 167-209.
- Kay, B. S.* (1996) 'Quantum fields in Curved spacetime: non-global hyperbolicity and locality', *Proceedings of the Conference on Operator Algebras and Quantum Field Theory* (edited by S. Doplicher, R. Longo, J. Roberts, and L. Zsido; Rome, Accademia Nazionale dei Lincei).
- Monk, N.* (1997) 'Conceptions of space-time problems and possible solutions ', *Studies in History and Philosophy of Modern Physics* **28B**, 1-34
- Polchinski, J. G.* (1998) *String Theory* (Cambridge University Press).
- Redhead, M.* (1987) *Incompleteness, Nonlocality and Realism* (Oxford University Press).
- Redhead, M.* (1999) 'Quantum field theory and the philosopher', in *Conceptual Foundations of Quantum Field Theory* (edited by T. Y. Cao; Cambridge, Cambridge University Press), 34-40.
- Rovelli, C. and Smolin, L.* (1990) ' Loop representation of quantum general relativity', *Nuclear Physics* **B331**, 80-152
- Rovelli, C.* (1998) 'Strings, loops and others: a critical survey of the present approaches to quantum gravity', gr-qc/9803024.
- Rovelli, C.* (1999) ' "Localization " in quantum field theory: how much of QFT is compatible with what we know about space-time?' in *Conceptual Foundations of Quantum Field Theory* (edited by T. Y. Cao; Cambridge, Cambridge University Press), 207-232.
- Salmon, W.C.* (1984) *Scientific Explanation and the causal structure of the World* (Princeton, princeton University Press).
- Sorkin, R. D.* (1997) 'Forks in the road, on the way to quantum gravity', *International Journal of Theoretical Physics*, **36** (12), 2759-81.
- Stachel, J.* (1980) 'Einstein's search for general covariance, 1912-1915,' a paper presented to the 9th International Conference on General Relativity and Gravitation, Jena, 1980; later it is printed in *Einstein and the History of General Relativity* (edited by d. Howard and J. Stachel; Boston, Birkhauser), 63-100.
- Stachel, J.* (1994) 'Changes in the concepts of space and time brought about by relativity,' in *Artifacts, Representations, and Social Practice* (edited by C. C. Gould and R. S. Cohen; Dordrecht/Boston, Kluwer), 141-162.

Stachel, J. (1999a) 'The story of Newstein or: Is gravity just another pretty force?' (Manuscript).

Stachel, J. (1999b) 'The story of Newstein or: Is gravity just another pretty force?' (Manuscript).

Teller, P. (1999) 'The ineliminable classical face of quantum field theory', in *Conceptual Foundations of Quantum Field Theory* (edited by T. Y. Cao; Cambridge, Cambridge University Press), 314-323.

T. Hoof, G. (2000) 'Obstacles on the way towards the quantization of space, time and matter — and possible solutions'.

Wald, R. (1984) *General Relativity* (Chicago, University of Chicago Press).

Wald, R. (1994) *Quantum Field Theory in Curved Spacetime and Black Hole Thermodynamics* (Chicago, University of Chicago Press).

Wheeler, J. (1973) 'From relativity to mutability', in *The Physicist's Conception of Nature* (edited by J. Mehra; Dordrecht, Reidel), 202-247.

Примечания

- ¹ Отделение философии, Бостонский университет, Бостон МА США.
- ² Перевод с английского Е.А.Мамчур и А.В.Родина. Редакция и переводчики выражают благодарность доктору физико-математических наук М.Б.Минскому, сделавшему ряд ценных замечаний по переводу.
- ³ При физически осмысленном объединении различные типы взаимодействия должны оказаться проявлениями более фундаментального взаимодействия и, следовательно, выводимыми из него. В рамках калибровочного подхода математически осмысленное объединение требует существования некоей калибровочной группы (она описывает фундаментальную симметрию и ответственна за фундаментальное калибровочное взаимодействие динамической системы), которая при определенных условиях и при наличии определенных механизмов может быть разложена на отдельные подгруппы, каждая из которых описывает менее фундаментальную симметрию и является ответственной за менее фундаментальный тип взаимодействия, который должен быть объединен с другими. Обобщение может быть легко сделано посредством замещения «калибровочной группы и подгрупп» «общей математической структурой и ее подструктурами».
- ⁴ Подробнее по этому поводу см.: Cao and Schweber (1993) и Cao (1999a).
- ⁵ Обзор современной ситуации и полезные ссылки можно найти в Isham (1997), Sorkin (1997), Rovelli (1998), а также 't Hooft (2000).
- ⁶ Историческое исследование этого вопроса проводится в настоящее время автором этой статьи.
- ⁷ Поднимаемый здесь вопрос об ограничениях не имеет отношения к более радикальным подходам, которые бросают вызов базисным допущениям КТП (либо КМ, либо СТО или ОТО). Я благодарен Дж. Кашингу за то, что он указал мне на такую возможность.
- ⁸ Существуют другие кандидаты. Например (как указал мне Кашинг), в Бомовском подходе к КМ, КТП или квантовой гравитации каузальную роль играет волновая функция (системы, универсума или чего-либо еще), и она действует каузально на частицы или поля в особом и действительно существующем пространственно-временном многообразии, которое остается первичным и в некотором смысле абсолютным (из личной беседе). Более подробно по вопросу о том, какие математические сущности, точки, метрики, или связи, представляют физически фундаментальные сущности в теории квантовой гравитации см.: Stachel «The Story of Newstein or: Is gravity just another pretty force?» (рукопись).
- ⁹ Попытки превращения Эйнштейновской борьбы с общей ковариантностью, сосредоточенной вокруг hole аргумента в исторический анализ генезиса ОТО и философских размышлений о метафизических следствиях общей ковариантности можно найти в Stachel (1981). О попытках обобщения hole аргумента, см.: Earman and Norton (1987); критику таких попыток см. в Stachel (1994).
- ¹⁰ Изменяющиеся черты индивидуатора не имеют никакого влияния на идентичность (или на существенные черты) теоретической сущности, они только квалифицируют те изменяющиеся черты, которыми сущность

обладает, функционируя таким образом в качестве квалификаторов.

- 11 Многообразие Минковского является достаточным основанием для формулировки квантовой теории поля. Но оно не является необходимым. Принцип эквивалентности позволяет расширить эту теорию на нединамически искривленные многообразия. Это расширение является недвусмысленным для действия Дирака и действия с единственным спином; что касается скаляров, оно оказывается недвусмысленным, если безмассовые скалярные полевые теории конформно инвариантны. В тех случаях, когда гравитация является существенной, но геометрии все еще являются статичными, а квантовая гравитация динамической, как в случае с радиацией Хокинга, конкретные результаты могут быть получены, хотя в общих динамических случаях все остается проблематичным. Начальные идеи относительно КТП в искривленном пространстве см. в Isham, Penrose and Sciana (1975); Hawking and Israel (1979); более поздние разработки см.: Wald (1994) и Kay (1996). Относительно прорыва в формулировке спектрального условия в искривленном основополагающем многообразии, где отсутствует симметрия Пуанкаре, см.: Brunetti, Fredenhagen and Koehler (1995). Я благодарен Stephen Adler за высказанное мне пожелание дать более точное описание той роли, которую играет многообразие Минковского в формулировке КТП, а также за предоставленные им ссылки на работы, в которых нашли отражение результаты, достигнутые с середины 70-х гг.

- 12 О концептуальной истории ОТО и всю основную информацию, необходимую для темы этой части статьи, см: Сао (1997), pp. 60-81, 90-103.

- 13 Метрический тензор единственным образом соотносится с аффинной связью посредством уравнения геодезической, которое требует, чтобы компоненты этой связи по отношению к любому базису были в численном отношении равны символам Кристоффеля метрического тензора и таким образом функционировали как условие совместимости между ними. С физической точки зрения состояние совместимости означает, что идеальные часы и измерительные стержни, поскольку они определены хроногеометрической структурой, могут измерять истинные значения длины и промежутки времени, где бы и когда бы они ни были помещены в инерциально-гравитационное поле.

Условие совместимости, которое предполагает, что эта аффинная связь имеет теоретическую идентичность, которая отлична от идентичности метрического тензора, объясняет тайну неверно понятой двойной роли метрического тензора: он действует в качестве гравитационного поля и в то же самое время определяет хроногеометрию пространства-времени. В действительности метрический тензор играет только последнюю роль, первую роль согласно духу ПЭ играет аффинная связь.

Более полно по этому поводу см.: Stachel (1999a, b).

Вопрос о том, какая именно сущность (эта связь или метрический тензор) является онтологически более фундаментальной, не решается условием совместимости. Хотя я склоняюсь к тому, что такой сущностью является аффинная связь, поскольку она дает унифицированное описание инерции и гравитации, которая предполагается ПЭ, а также потому, что она имеет структурное сходство с другими калибровочными потенциалами, Julian Barbour высказывается в пользу приоритета метрического тензора, основываясь на

- рассмотрении его роли в историческом развитии и в математической формулировке ОТО. Он утверждает, что значение аффинной связи преувеличено (таким был его комментарий на семинаре в All Souls College, состоявшемся в Оксфорде 9-го ноября 2000 г.).
- ¹⁴ Более подробное обсуждение этого, по-видимому семантического, вопроса будет дано ниже.
- ¹⁵ Два дополнительных комментария.
- а). Обсуждаемая здесь роль метрического тензора позволяет отличить эту внутреннюю позицию реляционизма как от i) традиционного внешнего взгляда, который поддерживается, например, Адольфом Грюнбаумом (1977) и П.Теллером (1999), см. также Цао (1999 а), так и от ii) более радикального взгляда на пространство-время, которое, базируясь на онтологическом процессе, защищаемом Давидом Бомом, утверждает, что пространство-время является только производной от лежащего в основании процесса (более детально см.: Monk (1997).
- б). Самовзаимодействие (self-coupling) метрического тензора в рамках его универсальных взаимодействий подтверждает ту точку зрения, что метрический тензор (и близко связанная с ним аффинная связь) имеет пространственно-временные отношения со всеми физическими сущностями, включая себя самого.
- ¹⁶ Типичные примеры могут быть найдены в утверждениях типа «возбуждение пространства-времени» или «квантовании геометрии», которые являются очень модными среди экспертов по квантовой гравитации.
- ¹⁷ Очень интересное обсуждение этого сложного вопроса можно найти в Brown (1997) и Brown and Pooley (2000). Ср. также выше сноску 12.
- ¹⁸ Об аргументе совпадения точек см. Stachel (1980, 1994). О субстанциализме в отношении многообразия см., например, Earman (1989), стр. 155; см. также Field (1980), стр. 35.
- ¹⁹ Некоторые теоретики, разрабатывающие теорию струн, предприняли попытку понимать их (или скорее расширенные пространственно-временные координаты) как физические степени свободы. (См., например, Polchinski, 1998). Эти попытки лежат в основании современного варианта субстанциализма и дают научные аргументы в пользу субстанциализма относительно многообразия.
- ²⁰ Поскольку настоящая дискуссия ограничена реляционными сущностями, понятие субстрата нужно здесь понимать скорее в смысле места, чем материи. Хотя и материя, и место играют одну и ту же роль логического субъекта, они имеют различный онтологический статус в плане их свойств и отношений, в которых они находятся. Материя является первичной по отношению к свойствам и отношениям, а место вторичным. Дальнейшее обсуждение этого вопроса в контексте структурализма можно найти в Cao (1998, 1999b). См. также Stachel, «'The relations between things' versus 'the things between relations': The deeper meaning of the hole argument» (рукопись).
- ²¹ См., например, Rovelli (1998, 1999).
- ²² Ср. прим. 14 в.
- ²³ Ниже мы подробнее обсудим «параметрическую локализацию» с методологической точки зрения. «Параметрическая локализация», о которой здесь идет речь, это не реальная локализация, а умозрительное понятие,

используемое для осуществления самосогласованного бутстрепа, подобное понятиям чистой массы и чистого заряда в теории перенормировки (которые являются не реальной массой и реальным зарядом, а параметрами, необходимыми для самосогласованного вычисления реальной массы и реального заряда).

- 24 Чтобы объяснить пространство-время как оно нам является, нам нужно обратиться к подходящей физической теории, которая в свою очередь предполагает существование пространства-времени и для которой это предположение играет решающую роль.
- 25 Теория перенормировки не зависит ни от отрезаний, которые вводятся на промежуточных этапах этой процедуры, ни от специфики голых параметров, исключая их размерность. Самосогласованный бутстреп нельзя провести без определения размерности, поскольку только с помощью размерности можно указать на самые общие свойства физических параметров, которые подлежат исследованию. Подобное замечание относится и к понятию голого (лишенного хроногеометрической структуры) многообразия (обладающего дифференциальной и топологической структурами).
- 26 Обратите внимание на разницу между идеей бутстрепа и полуклассическими подходами. В последнем случае окончательный результат продолжает зависеть от предзаданной геометрии, хотя и учитывает возмущения, вызванные физическим гравитационным полем.
- 27 Таким образом, значения полевых параметров не приписываются независимо существующим пространственно-временным точкам; скорее они просто находятся в определенных пространственно-временных отношениях с другими физическими сущностями.
- 28 Заметим, что семантическая нечеткость фразы «динамический метрический тензор или динамическое пространство-время», также имеет отношение к контексту прим. 14 в. Этот вопрос с другой точки зрения рассматривали Butterfield и Isham (1999a, b) в терминах возникновения времени, и Belot и Earman (1999, 2000), которых интересовал вопрос о том, есть ли смысл говорить об изменении метрического тензора во времени.
- 29 Согласно Joseph Polchinski, ученые, работающие в области теории струн, все еще используют концептуальные рамки КТП (частная беседа; см. также об этом в Сао, 1999a).
- 30 Поэтому, строго говоря, КТП определяется как локальная теория квантовых полей.
- 31 КСК могут быть выведены различными способами и впоследствии они появлялись в различных формах, однако их основная функция всегда оставалась неизменной: показать некоммутативный характер динамической системы на микроскопическом уровне.
- 32 Флуктуации чего? Физических свойств, определяемых в пространственно-временной области. Это может быть предельным метафизическим обоснованием как для загадочного характера суперпозиции векторов состояния, которые описывают физические свойства, так и для их декопозиции (т.е. редукции или коллапса) при измерении.
- 33 См., например, Redhead (1987)
- 34 Такое измерение могло бы быть возможным в рамках полной теории, основанной на КТГ. Однако это не то, что Бор имел в виду, говоря об измерении.

-
- ³⁵ О дальнейшей дискуссии по этому вопросу и по многим другим философским вопросам, связанным с квантовой гравитацией, можно узнать из обзорной статьи Butterfield and Isham (1999b).
- ³⁶ По поводу различия между причинным объяснением конститутивного типа и причинным объяснением через предшествующее, см. Salmon (1984).
- ³⁷ Гравитонный подход, предложенный Ричардом Фейнманом, состоит в попытке активного квантования метрического тензора. Однако такой подход не приводит к непротиворечивой (перенормируемой и унитарной) теории. О развитии этой программы см.: Feynman et. al. (1995) and also DeWitt (1967a,b, c). Ссылки на более поздние попытки можно найти в Rovelli (1998).
- ³⁸ В прошлом ошибочно считали, что фермионное поле можно получить посредством квантования «классической» волновой функции фермиона. Обсуждение интерпретативной путаницы, приведшей к этой ошибке, см. в Сао (1997), стр.162-168.
- ³⁹ С традиционной точки зрения мы сначала должны перейти с макроскопического уровня на микроскопический (с помощью активного квантования), а затем совершить обратный переход с помощью понятия классического предела. Переход к классическому пределу означает не только изменение масштаба длины. Однако для целей настоящей статьи понятие масштаба длины достаточно, чтобы указать на разницу между квантовым и классическим случаями.
- ⁴⁰ См., например, Ashtekar (1997a,b; 1999); Isham (1997).
- ⁴¹ См., например, Rovelli (1998, 1999).