

ОБЩАЯ ТЕОРИЯ ОТНОСИТЕЛЬНОСТИ:**история и современные проблемы.****Часть III***

А.Л. Симанов, А.Ю. Сторожук

В третьей части работы, посвященной философско-методологическому анализу современного состояния исследований в области структуры пространства-времени, рассматриваются космологические следствия общей теории относительности и связанные с ними проблемы унификации.

Ключевые слова: теория относительности, космология, теория тяготения, пространство-время, основания теории, эксперимент

Общая теория относительности (ОТО) является теоретической основой современных представлений о пространстве-времени и космологии. Основные проблемы, касающиеся крупномасштабных свойств Вселенной, были сформулированы именно благодаря ОТО. Последовательно ставились проблемы определения кривизны пространства, геометрии пространства, проблемы определения критической плотности Вселенной и др. На основе решения уравнений ОТО была предсказана возможность существования так называемых черных дыр. Открытие Шварцшильдом горизонта событий позволило описать последовательность звездной эволюции в зависимости от массы звезды. Предсказанное ОТО искривление луча света вблизи тяготеющих масс положено в основу метода гравитационного линзирования, используемого для изучения глубокого космоса. Иными словами, современная космология обязана своим существованием прежде всего общей теории относительности. С другой стороны, астрономические открытия стимулировали дальнейшее развитие ОТО.

* Работа выполнена при финансовой поддержке Российского гуманитарного научного фонда, проект № 08-03-90302 а/Б.

Публикуется в авторской редакции.

Космологические следствия ОТО

Уравнения Эйнштейна в ОТО допускают множество решений, из которых следовало несколько космологических моделей. Сам Эйнштейн выделял три варианта, основанные на различных значениях гравитационного потенциала: нулевом, равным некоторому конечному значению, и бесконечном. С точки зрения Эйнштейна все три возможности оказались неудовлетворительными, и он разработал космологическую модель, согласно которой Вселенная представляла собой стационарный замкнутый сферический мир положительной кривизны.

В свою очередь в 1917 г. В. де Ситтер предложил вариант решения для случая значения потенциалов гравитационного поля на бесконечности при различных предположениях о характере распределения масс. Он рассмотрел варианты с эллиптическим пространством положительной кривизны (система *A*), гиперболическим пространством, или пространством Лобачевского, с постоянной отрицательной кривизной (система *B*), и плоским пространством (система *C*). Исследуя согласованность значений гравитационного потенциала с представлением о распределении масс, де Ситтер ввел два постулата: «Если выбрана система отсчета для пространственных и временных переменных, то из этих уравнений можно получить компоненты $g_{\mu\nu}$ с точностью до постоянных интегрирования или граничных условий на бесконечности. Таким образом, лишь отклонения фактических значений $g_{\mu\nu}$ от этих значений на бесконечности обязаны воздействию масс (matter)... Если бы все компоненты $g_{\mu\nu}$ были бы равны нулю на бесконечности, то мы с полным правом могли бы сказать, что не только гравитация, но и *вся* инерция обусловлена таким воздействием. Подобные соображения легли в основу постулата о том, что все компоненты $g_{\mu\nu}$ равны нулю на бесконечности. Я назвал его *математическим постулатом об относительности инерции*.

Если же убрать все массы, кроме одной материальной частицы, будет ли она обладать инерцией? Школа Маха требует ответить: “Нет”. Но если под «всеми массами» подразумевать все вещество, известное нам: звезды, туманности, скопления и т.п., – то наши наблюдения весьма определенно дают нам ответ: “Да”. Поэтому последователи Маха вынуждены предполагать, что существует еще какое-то вещество. Но это вещество нужно нам лишь для одной цели: чтобы мы могли предположить, что его нет, и утверждать, что тогда не будет и инерции.

Такую точку зрения, которая отрицает логическую возможность существования мира без массы, я называю *материальным постулатом относительности инерции*» [1].

Однако уравнения Эйнштейна имеют решения и без предположения о существовании мировой массы. Граничные условия обращения в ноль компонентов поля инерции $g_{\mu\nu}$ могут быть обеспечены благодаря введению λ -члена. При этом материальный постулат относительности инерции не выполняется, но математический постулат об относительности инерции сохраняет свою силу. И для случая эллиптической геометрии пространства (система A) де Ситтер находит, что материя может играть роль абсолютного пространства Ньютона, т.е. является выделенной инерциальной системой отсчета: «Система A лишь в том случае удовлетворяет математическому постулату об относительности инерции, если он применяется только к трехмерному пространству. Другими словами, если мы представим себе, что трехмерное пространство (x_1, x_2, x_3) с его мировой массой может двигаться в некоем абсолютном пространстве, то мы никогда не сможем обнаружить путем наблюдений его движение: всякое движение материальных тел происходит относительно пространства (x_1, x_2, x_3) с мировой массой, а не относительно нашего абсолютного пространства. Таким образом, мировая материя становится на место абсолютного пространства ньютоновской теории, или так называемой “инерциальной системы”. Это не что иное, как материализованная инерциальная система. Отметим, что в системе A такую относительность инерции можно осуществить, лишь приняв время практически абсолютным» [2].

Система B является четырехмерным аналогом системы A , в ней нет универсального времени, и все четыре координаты равноправны. Лучи света в ней являются геодезическими, массы может и не быть, но если имеется более чем одна масса, то эти массы не могут покоиться. Данная система удовлетворяет математическому постулату относительности инерции. Материальные частицы в этой системе под влиянием только инерции не могут двигаться по прямой линии с постоянной скоростью.

В системе C нет относительности инерции, эта система в целом соответствует ньютоновской теории инерции, пространство является евклидовым, траектории частиц, движущихся по инерции, являются прямолинейными в прямоугольных декартовых координатах.

Обобщением космологических идей Эйнштейна и де Ситтера послужили ставшими этапными исследования А.А. Фридмана, проведенные им в 1922–1924 гг. Он получил решения для случаев цилиндриче-

ского и сферического миров с постоянной кривизной как частные случаи общего решения. Из этих решений следовала, в частности, возможность существования миров, кривизна которых меняется со временем. Фридман принимает исходные положения Эйнштейна и Ситтера о том, что гравитационные потенциалы удовлетворяют системе уравнений Эйнштейна, и о том, что материя находится в несвязанном состоянии и обладает относительным покоем. Он добавляет в качестве исходных еще и следующие положения: «По выделении из четырех мировых координат трех пространственных (x_1, x_2, x_3) мы будем иметь пространство постоянной кривизны, могущей, однако, меняться с течением четвертой временной координаты x_4 ... В выражении для интервала g_{14}, g_{24}, g_{34} обращаются в нуль при соответствующем выборе временной координаты, или, кратко выражаясь, время ортогонально пространству» [3].

Данные предположения позволили Фридману получить уравнение, связывающее распределение масс, время и значения радиуса кривизны. Он получил три нестационарных решения, описывающих эволюцию Вселенной. То, какой именно сценарий реализуется, зависело от общей массы Вселенной. Имеющиеся на тот момент данные не позволяли однозначно выбрать сценарий развития мира и поставили новые вопросы. Один из этих вопросов касался возможности определения кривизны пространства путем прямых наблюдений, другой – определение массы Вселенной, и третий – выбор между стационарной и нестационарной моделями.

Эмпирическое подтверждение нестационарности Вселенной было получено Э. Хабблом, который в 1929 г. установил зависимость между красным смещением галактик и расстоянием до них [4]. Он открыл, что красное смещение для далеких галактик больше, чем для близких, и возрастает пропорционально расстоянию (закон Хаббла). Иными словами, галактики разбегаются друг от друга, и чем дальше они находятся от нашей галактики, тем с большей скоростью они от нее удаляются.

Несмотря на это первое эмпирическое подтверждение космологических предположений, недостатками всех космологических моделей того времени являлось отсутствие у них предсказательной силы и они не объясняли сегодняшнего состояния Вселенной. Основными проблемами являлись объяснение крупномасштабной структуры Вселенной и объяснение того, почему предполагаемая в то время скорость расширения Вселенной очень близка к критической.

Применение ОТО в космологии оказалось очень плодотворным. В свою очередь космология не осталась в долгу перед теоретической

физикой. Тщательное исследование красного смещения показало, что Вселенная расширяется с ускорением, то есть должен быть источник антитяготения, который получил название темной материи. Метод гравитационного линзирования дал одно из экспериментальных доказательств существования темной энергии. В итоге выяснилось, что скрытая масса галактик в несколько раз превосходит массу видимого вещества. Таким образом, космология продемонстрировала, что физика в течение трехсот лет изучала только 5% того, что есть во Вселенной.

Благодаря ОТО космология получила и мощный стимул для технического развития. Если вплоть до 1970-х небо наблюдалось только с помощью оптических телескопов, то предсказания на основе следствий из ОТО рентгеновских вспышек и реликтового излучения потребовало применения радиотелескопов. Расширение диапазона астрономических наблюдений привело к открытию пульсаров, белых и коричневых карликов, черных дыр, открытию планетных систем у далеких звезд. Была открыта неоднородность реликтового излучения, давшая новый толчок развитию инфляционной модели и теоретической разработке модели множественных вселенных, проводимой А. Линде.

Предсказанное ОТО искривление луча света в поле тяготения стало теоретической основой метода гравитационного линзирования, позволяющего дать точные оценки масс звездных скоплений. Точность наблюдений в оптическом диапазоне была значительно повышена. Большую роль в астрономических наблюдениях играют спутниковые телескопы, снабдившие информацией о ранних этапах развития Вселенной, что позволило более точно определить ее возраст. В числе фундаментальных открытий, сделанных в оптическом диапазоне, следует упомянуть изменение постоянной тонкой структуры, открытое Веббом.

Но несмотря на все эти впечатляющие достижения ОТО ставит перед учеными множество проблем, и прежде всего проблем, связанных с разработкой так называемого великого объединения, или унификации фундаментальных теорий – собственно ОТО, квантовой механики и физики высоких энергий. Именно унифицированная теория сможет объяснить природу Вселенной.

На пути великого объединения

Поиск теории великого объединения является центральной проблемой современной теоретической физики. С методологической точки зрения эта тенденция представляет собой реализацию принципа уни-

фикации: стремление описать все многообразие явлений исходя из немногих оснований. Методология унификации возникла одновременно с появлением философии. Целью первых философов: Фалеса, Анаксимандра, Анаксимена был поиск первоначала, породившего весь мир. Эта традиция была поддержана Пифагором, заложившим основу математического естествознания и считавшим, что «все есть число». В эпоху Возрождения она была подхвачена Галилеем, считавшим, что книга природы написана на языке математики.

Наука прошла долгий путь в поисках единой теории. Первой унифицированной теорией стала механика Ньютона, описывающая единым формализмом «земное и небесное». Далее открытие Эрстеда указало на единую природу электричества и магнетизма. Фарадей и Максвелл установили электромагнитную природу видимого света. Квантовая механика совместила корпускулярное и волновое описания микроробъектов. Опыты Кауфмана показали, что инерция тел имеет электромагнитную природу, а Лоренц и Пуанкаре нашли, что как механические, так и электромагнитные силы ведут себя одинаково, соответственно преобразованиям Лоренца. Наконец, в рамках квантовых теорий была построена теория, объединяющая электрослабое и сильное взаимодействия.

Задача объединения двух столпов современной физики – ОТО и квантовых теорий, помимо конкретно-научных проблем, усложняющих ее решение, усложняется еще и неполным согласованием их философских предпосылок. Ученые при разработке новой теории стремятся достигнуть максимального согласия с уже имеющимися эмпирическими данными и возможности предсказания новых, эмпирически проверяемых результатов. Философские основания различных теорий, как правило, не принимаются во внимание. Поясним, что в данном случае имеется в виду под философскими основаниями научных теорий.

В основе любой теории лежат неопределяемые понятия и постулаты. Некоторые из исходных понятий являются настолько общезначимыми, что представляют собой наиболее общие неопределяемые понятия, т.е. философские категории. Примерами философских категорий являются пространство, время, причинность, материя. Характеристическим признаком философской категории является отсутствие определения. В итоге различные научные теории, как правило, придают одинаково звучащим базовым понятиям различное содержание, что видно из приводимой ниже таблицы.

Категория	Интерпретация с точки зрения квантовых теорий	Интерпретация с точки зрения ОТО
Пространство	Первоначально понималось в ньютоновском смысле как трехмерное пустоеместилище объектов и процессов. Позже при разработке теории поля были использованы релятивистские идеи, введено понятие планковской длины и обсуждался вопрос о дискретности пространства.	Пространство и время равноправны и объединены в 4-мерное гладкое многообразие, кривизна которого зависит от распределения масс. Основные проблемы ОТО составляют ее локальность и наличие сингулярностей.
Причинность	Теория носит статистический характер. Принцип неопределенности Гейзенберга утверждает принципиальную невозможность получения сколь угодно точной информации о всех характеристиках системы одновременно. Влияние наблюдателя на систему приводит к неконтролируемому изменению параметров системы.	Детерминистическая теория. Причинность рассматривается не изолировано, а определяется через пространственно-временные характеристики (световой конус) и постоянную – скорость света.
Материя	Характеристики массивных частиц рассматриваются независимо от пространственно-временных параметров, в описании параметров частиц доминируют идеи симметрии. Частицы превращаются друг в друга благодаря нарушению симметрии. Масса элементарных частиц определяется поглощением кванта скалярного поля – бозона Хиггса.	Тяжелая масса сведена к инертной путем установления их эквивалентности. Масса определяет геометрию пространства-времени, кинематика тел определяется кривизной пространства.

Несовместимость базовых понятий квантовых теорий и ОТО, фактически имеющих философское звучание и значение, является источником проблем, затрудняющих поиск теории великого объединения. В наше время узкой специализации может показаться странным, что между наукой и философией нет четкой границы, тем не менее это так. Многие известные философы были естествоиспытателями, многие уче-

ные философствовали. В конце XIX – начале XX вв. в ходе реализации позитивистской программы изгнания философии из науки произошел разрыв науки и философии. До 1980-х годов физика развивалась лавинообразно. Теория и эксперимент шли рука об руку. Новые экспериментальные данные описывались в терминах теорий, а новые теории проверялись новыми экспериментами. Однако в начале 1980-х годов ситуация изменилась: не было сделано ни одного фундаментального открытия, связанного с эмпирическим предсказанием и обоснованием (за исключением открытия массы нейтрино и темных материи и энергии в конце XX в., кстати, до сих пор не имеющих четкого понимания в рамках существующих теорий). В итоге было осознано, что философия всегда присутствует в науке, но за предшествующий период традиция философской культуры в среде ученых была утрачена. В настоящее время философствование в среде ученых считается дурным тоном, но тот, кто сознательно не придерживается критического рефлексивного подхода, неосознанно занимает некритическую позицию полного доверия научной теории. Такую позицию называют наивным реализмом.

Взаимопроникновение идей квантового подхода и относительности идет достаточно давно. Построение квантовой теории поля происходило с учетом принципа относительности, и уже первая из таких теорий – квантовая электродинамика, является релятивистской. Применение квантовых идей в ОТО необходимо в связи с проблемой сингулярностей, поскольку значения плотности и гравитационного потенциала вблизи особой точки принимают расходящиеся значения. Классическая ОТО создавалась в предположении слабых гравитационных полей, и непосредственно экстраполировать ее в область, ограниченную гравитационным радиусом, нельзя. Важность проблемы сингулярностей обусловлена тем, что Вселенная имеет сингулярную точку в качестве начального условия. Именно с условиями, существовавшими вблизи сингулярности, связывается возможность объединения четырех фундаментальных взаимодействий, три из которых удалось объединить в рамках квантовых теорий.

Основной проблемой построения теории великого объединения является невозможность проквантовать гравитацию, что вызвано несовместимостью базовых понятий квантовой механики и ОТО. При переходе к квантовым масштабам, согласно принципу неопределенности возникает неопределенность значений энергии-импульса, что, согласно теории относительности, должно сопровождаться искривлением пространства. Таким образом, на микроуровне структура пространства-

времени оказывается подвержена флуктуациям, что не согласуется с гладкостью геометрии пространства на макромасштабах, при том, что локально геометрия пространства времени, согласно ОТО, может быть любой. «Стандартное разрешение парадоксов Зенона основывается больше на математическом понятии континуума, чем на природе самого пространства-времени. Утверждение о том, что пространство-время образует континуум, подразумевает сохранение его непрерывной природы независимо от того, с каким «увеличением» мы его рассматриваем. Но ведь отнюдь не очевидно, что непрерывное описание соответствует действительности в достаточно малых масштабах, где существенную роль играют квантовые эффекты. Возьмем, например, масштабы порядка 10^{-13} см (примерный радиус элементарной частицы). При любой попытке определить положение частицы с такой степенью точности становится вероятным (ввиду принципа неопределенности) возникновение чрезвычайно большого импульса. Тогда должны рождаться новые частицы, и некоторые из них могут оказаться неотличимыми от первоначальной, так что понятие «положения» первоначальной частицы становится неопределенным. Но еще более угрожающая картина вырисовывается, когда мы осмеливаемся перейти к явлениям, протекающим в масштабах порядка 10^{-33} см. Здесь квантовые флуктуации кривизны пространства-времени становятся достаточно сильными, чтобы изменить топологию, и пространство-время должно оказаться каким-то беспорядочным наложением разнообразных топологий, а это уж никак не похоже на гладкое многообразие» [5]. Гравитация отлична от других полей «потому что гравитация формирует арену, на которой сама действует, в противоположность другим полям, которые действуют в заданном пространстве-времени» [6].

Предпринималось много попыток построения теорий объединения, в которых предлагаются различные подходы к решению данной проблемы. Так, в теории квантовой гравитации предпринимаются попытки запретить существование «голой» сингулярности, а за пределами горизонта событий предпринимается склейка многообразий.

Применение новых методов ведет к тому, что пространство перестает рассматриваться как отдельная сущность и становится частью более общего понятия. Так, в одном из вариантов теории квантовой гравитации использование теории твисторов позволяет описать связь между семействами частиц и античастиц и пространственно-временной структурой. Световые лучи рассматриваются как точки в твисторном пространстве, а само пространство-время является вторичным понятием

ем, частью более фундаментального понятия твисторного пространства. Применение новых математических методов в квантовой теории гравитации ведет к тому, что пространство перестает рассматриваться как отдельная сущность и становится частью более общего понятия.

Другой известный подход к великому объединению – теория струн, использует понятие пространства как самостоятельное и фундаментальное, описывая посредством его искривления все виды фундаментальных взаимодействий. Изменение понимания пространства здесь касается в основном размерности и топологических свойств (многообразия Калаби-Яу). Кроме того, теория струн ограничивает снизу размер области сингулярности порядка фундаментальной (планковской) длины, что позволяет получить конечные значения плотности и энергии вблизи сингулярности. Решение проблемы объединения в рамках теории струн нельзя признать достигнутым, поскольку самая актуальная проблема теории струн – проблема выбора ландшафта, связана именно с пониманием философской категории пространства.

История поиска теории великого объединения естественным образом может быть подразделена на следующие этапы:

1. Динамика как геометрия: идеи Калуцы и Клейна.
2. Открытие сильного и слабого взаимодействия, построение теории электрослабого взаимодействия.
3. Разработка теории струн.
4. Теория квантовой гравитации.

ОТО выступает основа объединения, ее понятия гораздо более интегрированы в единую понятийную конструкцию, чем в квантовой механике, где они понимаются независимо. Понятие пространства в ОТО тесно связано с понятиями массы, причинности, принципом относительности. Весьма вероятно, что с развитием идей объединения пространство потеряет статус самостоятельной сущности и будет интегрировано с понятием поля.

Введение фундаментальной длины математически позволяет избежать расходимостей, но проблема философской несогласованности оснований теории останется нерешенной. Фундаментальная длина предполагает квантование пространства, то есть его дискретность на масштабах порядка фундаментальной длины, что должно быть согласовано с гладкостью пространства на макроуровне и локальным характером геометрии. Для такого согласования недостаточно простой

ссылки на разницу масштабов, как это делается для объяснения компактификации скрытых размерностей в теории струн. Открытым остается вопрос согласованности в понимании причинности. Квантовомеханический принцип неопределенности и детерминистическая по сути ОТО должны быть, видимо, совместимы на субквантовом уровне. Следует отметить также, что предположение о дискретности пространства затруднит описание движения и возрождает двухполовинотысячелетние парадоксы Зенона. Постулат существования минимальной длины должен быть совместим также с требованием лоренц-инвариантности и принципом относительности.

Кажущийся наиболее очевидным путь рассматривать движущийся объект как перемещающее возбуждения соответствующего поля, полагая само поле покоящимся в пространстве, противоречит принципу относительности, поскольку тем самым вводится выделенная система отсчета.

Примечания

1. *Sumner de B.* О теории тяготения Эйнштейна и ее следствиях для астрономии. Статья III // Альберт Эйнштейн и теория гравитации. – М.: Мир, 1979. – С. 301.
2. Там же. – С. 307.
3. *Фридман А.А.* О кривизне пространства // Альберт Эйнштейн и теория гравитации. – М.: Мир, 1979. – С. 321–322.
4. См.: *Hubble E.* The observational approach to cosmology. – Oxf., 1937.
5. *Пенроуз Р.* Структура пространства-времени. – М.: Мир, 1972. – С. 11–12.
6. *Хокинг С., Пенроуз Р.* Природа пространства и времени. – Ижевск: НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика», 2000. – С. 12.

Дата поступления 11.04.2010

Институт философии и права
СО РАН, Новосибирск
science@philosophy.nsc.ru

Simanov, A.L. and A.Yu. Storozhuk. The general relativity: its history and modern problems. Part II

The third part of the philosophical and methodological analysis of the current state of research on the structure of space-time are cosmological implications of general relativity and the problems of unification.

Keywords: relativity theory, cosmology, gravitation theory, space-time, foundation of theory, experiment