

разной природе эйнштейновской теории. Во всех других теориях поля, в том числе и специальной теории относительности, пространство и время было наделено жесткой геометрической структурой, независимой от происходящих в ней физических процессов. Теория Эйнштейна вкладывает в пространство и время нечто большее, чем просто существование мировых точек и некоторую степень их непрерывности, достаточную для того, чтобы утверждать, что некоторые мировые точки «близки» друг к другу.

Геометрическая структура (в смысле количественного определения расстояния между двумя мировыми точками и параллельного переноса определенного направления из одной мировой точки в соседнюю) вносится в пространственно-временной континуум только гравитационным полем. Эта геометрическая структура отнюдь не является жестко определенной, а зависит от локальных условий и законов физики. Любая форма поля обладает энергией, а энергия всегда является источником гравитационного поля; любые поля и любые частицы вносят свой вклад в геометрическую структуру. Если гравитационное поле подчиняется принципу неопределенности Гейзенберга, геометрия пространства-времени также должна отражать эту неопределенность. От строгих связей между мировыми точками приходится тогда отказаться и перейти к некоторым вероятностным формулировкам. По этой причине квантовая теория гравитационного поля требует введения новых представлений, которые были не нужны в прошлом, но появление которых окажет влияние на всю физику.

23. Что такое наблюдаемая величина?

Квантовая механика учит, что даже самая подробная информация о прошлом физической системы не позволяет сделать определенные предсказания о результатах новых измерений. Вместо этого для каждого допустимого типа измерений в будущем теория указывает, какие результаты возможны, и в зависимости от того, какая имелась информация о прошлом, она связывает с каждым из этих возможных результатов вероятность (или частоту) получения результата. Квантовая теория вообще ничего не говорит о величинах, которые нельзя наблюдать каким-либо экспериментальным приемом. Физические величины, доступные наблюдению и измерению, называют *наблю-*

даемыми, и это представление относится в равной степени к квантовой и неквантовой (классической) теориям.

До появления общей теории относительности физики избегали рассмотрения величин, которые не поддавались наблюдению и измерению. Более того, во всей доквантовой физике считалось, что по крайней мере при достаточно полной эмпирической информации о прошлом системы из законов динамики можно получить точную информацию о значениях всех наблюдаемых величин во все последующие моменты времени. Подтверждение принятых законов динамики состояло в сравнении теоретически предсказанных значений переменных в будущем с фактическими, экспериментально полученными значениями тех же самых величин.

Общая теория относительности в высшей степени осложнила представление о наблюдаемых величинах из-за того, что в ней принимается принцип общей ковариантности. В физической теории Ньютона и даже в специальной теории относительности описание прошлого физической системы включало в себя выбор определенной инерциальной системы отсчета, и эта система отсчета выбирается уже раз и навсегда. Все предсказания, касающиеся будущего, делаются в рамках именно этой инерциальной системы отсчета; в этом смысле должны пониматься, например, такие утверждения, как «десять секунд спустя... частица будет находится в таком-то месте».

Но если взять на вооружение принцип общей ковариантности, выбор координатной системы для описания прошлого системы уже недостаточен для того, чтобы была однозначно определена четырехмерная координатная система для предсказания поведения системы в будущем. Эта неоднозначность определения координатной системы до известной степени уже обсуждалась в связи с законами движения материальных тел. Во всяком случае, утверждения предыдущего параграфа со всеми их уточнениями утрачивают свой буквальный смысл в общековариантной теории вне зависимости от того, насколько тщательно описывается прошлое физической системы. Чтобы любая величина типа переменной поля в будущем стала наблюдаемой, следует указать те чувствительные приборы и все их механические характеристики, с помощью которых будут производиться измерения. Можно, например, оговорить, что некие свободно падающие часы, отсчитывающие

на своем циферблате собственное время, сталкиваются с определенной пробной частицей и что в момент столкновения стрелка часов будет показывать определенное время. Для такого утверждения выбор координатной системы не обязателен.

Исторически сложилось так, что гравитационное поле в общей теории относительности всегда описывалось с помощью значений отдельных переменных поля в мировых точках, которые задавались значениями своих координат. Из предыдущего ясно, что эти величины нельзя наблюдать и что нельзя предсказывать их значения, потому что мировые точки можно задавать значениями их координат только в том случае, если координатная система в окрестности этой мировой точки задана через другие наблюдения. Следовательно, ни один из параметров, используемых обычно для описания физических ситуаций, не является наблюдаемым в строгом смысле этого слова. В любой квантовой теории гравитационного поля, связанной с общей теорией относительности, просто нет величин, относительно значений которых можно делать вероятностные предсказания.

Но хотя бессмысленно задавать вопрос о значениях переменных поля в мировых точках, заданных через их координаты, совсем по-другому обстоит дело с физической ситуацией. Могут существовать такие процедуры наблюдения, при которых можно зафиксировать некоторые частные обстоятельства, позволяющие отличить одну физическую ситуацию от другой допустимой физической ситуации. Если бы это было не так, общая теория относительности была бы бессодержательной, не имеющей отношения к действительности. Но если есть характерные черты в каждой физической ситуации и можно отличить одно гравитационное поле от другого, должны существовать формальные математические выражения, отражающие эти различия. Эти математические выражения будут уже играть роль наблюдаемых в теории тяготения. Квантовая теория гравитационного поля должна строиться с использованием этих величин.

Но одно дело понимать, что в общей теории относительности должны быть наблюдаемые величины, и совсем другое дело построить такие величины, да еще так, чтобы ими можно было с успехом пользоваться. Фактически вопрос о наблюдаемых находится сейчас в весьма плачев-

ном состоянии. Некоторые авторы выдвигали предложения для нахождения наблюдаемых в гравитации, но все известные до сих пор технические приемы крайне неудобны. Хотя в принципе нет никаких оснований для возникновения непреодолимых трудностей, до сих пор необходимая техника не разработана.

Одно из предложений для построения наблюдаемых опирается на идею *совпадений*. Хотя маркировка мировых точек с помощью значений координат зависит от выбора координат, точку можно объективно маркировать за счет различия в свойствах локальной геометрической структуры. Допустим, например, что кривизна (которая имеет двадцать различных компонент) меняется от точки к точке, так что каждая мировая точка может быть маркирована несколькими компонентами кривизны. В той же самой точке имеются и другие геометрические величины, принимающие конкретные числовые значения, такие, как скорость изменения кривизны на единице длины по различным направлениям. Некоторые из этих величин связаны друг с другом уравнениями поля, так что их соответствующие значения зависят друг от друга. Но связи существуют не между всеми величинами. Фактически в любой мировой точке существует бесконечное число геометрических свойств, которые вовсе не определяются какими-либо универсальными законами: если в двух различных гравитационных полях одна и та же мировая точка маркируется значениями четырех различных геометрических характеристик, то в этих двух «соответствующих» точках в двух ситуациях другие геометрические параметры будут также иметь различные значения в двух многообразиях. Эти различные значения могут служить для установления различия между двумя физическими ситуациями и доступны экспериментальному определению. Следовательно, они являются наблюдаемыми в полном смысле этого слова.

Другое предложение относится только к специальному классу физических ситуаций, таких, в которых присутствует гравитационное излучение, но при этом геометрия уплощается по всем направлениям, так что можно использовать на бесконечности все характеристики континуума Минковского. Существование конечного числа весомых тел не мешает такому предположению. В физических ситуациях такого типа можно описывать гравитационное излучение на больших расстояниях по всем направлениям

с помощью волновых характеристик, которые можно зарегистрировать подходящим детектором. Так как на больших расстояниях пространство почти плоское, геометрические соотношения между удаленными мировыми точками допускают наличие некоторых из характеристик обычно связанных с полным уплощением. В результате математическая задача построения маркирующих отметок, к которым можно отнести положение в пространстве и времени, упрощается и конструирование наблюдаемых, напоминающих наблюдаемые привычных физических теорий, может быть осуществлено. К сожалению, еще совсем неясно, будут ли эти наблюдаемые (которые Бонди назвал *новыми функциями*) иметь прямое отношение к наблюдаемым, вводимым в общей теории; именно это могло бы дать некоторую гарантию на успех в общем случае.

24. Пространство-время сегодня и завтра

На протяжении всей этой книги свойства пространства и времени составляли тот фон, на котором разворачивалась эволюция нашего понимания тяготения. Во всей истории естественных наук пространство и время служили тем помостом, на котором наблюдалась, описывалась, анализировалась и интерпретировалась динамика физических систем и даже Вселенной в целом. Вплоть до двадцатого века считалось, что этот помост не имеет никакого отношения к драматическим событиям, разыгрывающимся на нем; его свойства принимались раз навсегда данными и не зависящими от присутствия вещества или каких-либо других физических объектов. Конечно, вместе с интеллектуальным ростом человечества свойства, приписываемые пространству и времени, становились все более и более сложными и все больше и больше отходили от «интуитивных» представлений, основанных на опыте повседневной жизни.

По представлениям Ньютона трехмерный пространственный континуум был плоским; к физическому пространству можно было применять постулаты Евклида. Пространство образовано из точек, которые можно было упорядочить в трехмерную решетку; решетку же можно было построить из прямых линий. Декартовы координаты являются наиболее естественной системой координат для такого многообразия. Время мыслилось как одномерный континуум, не зависящий от пространства и обладающий