

## **Глава IX. НЕКОТОРЫЕ ВОПРОСЫ ДАЛЬНЕЙШЕГО РАЗВИТИЯ ТЕОРИИ ГРАВИТАЦИИ**

Мы рассмотрели развитие теории гравитации от закона всемирного тяготения Ньютона до релятивистской концепции Эйнштейна, основанной на идее о слиянии гравитации с метрикой пространства-времени. Достаточное внимание было уделено также применению теории гравитации в различных областях астрономии. При этом, излагая основы ОТО, мы придерживались классической формы теории, отвечающей направлению работ Эйнштейна, и не ставили своей целью описать последующее развитие математического аппарата ОТО, рассмотреть позднейшие истолкования этой теории или изложить ее новые варианты. Для ознакомления с этим широким кругом вопросов отсылаем читателя к более специальным монографиям и оригинальным работам. В заключительной главе мы коснемся некоторых принципиальных вопросов, рассмотрим обобщение ОТО на случай переменной гравитации и остановимся на одном из вариантов так называемой линейной теории гравитации.

**1. Природа поля гравитации.** Как известно, в современной физике принято различать два вида материи — вещество и излучение (электромагнитное поле). Естественно поставить вопрос о природе гравитационного поля: обладает ли гравитация непосредственной материальностью, являясь особым (третьим) видом материи, или она имеет чисто геометрическую природу и представляет собой только метрику пространственно-временного континуума? Этот вопрос, обсуждавшийся в той или иной форме многими физиками и философами, не имеет в настоящее время общепринятого решения. Некоторые авторы считают, что гравитационное поле является самостоятельной физической реальностью и должно рассматриваться как особый вид материи, свойства которого проявляются в метрике пространства-времени. Другие придерживаются противоположной точки зрения, отрицая субстанциональность гравитационного поля и отождествляя его с метрикой пространственно-временного континуума.

В настоящее время в нашем распоряжении нет эмпирических данных, которые могли бы составить основу убедительного решения вопроса о природе гравитации. Поэтому приходится отказаться

от широкой постановки этого вопроса и ограничить его рамками определенной теории. В качестве таковой естественно принять ОТО.

В ОТО виды материи — вещество и электромагнитное поле — характеризуются тензором энергии-импульса, удовлетворяющим известному закону сохранения. Этот тензор служит единственным признаком существования материи в данной области пространственно-временного континуума: условие  $T_{ij} \neq 0$  указывает на наличие вещества или радиации, тогда как при  $T_{ij} = 0$  область является вакуумом. Условие наличия или отсутствия материи, выражаясь тензорным уравнением, удовлетворяет общему принципу относительности. Если в одной системе отсчета тензор энергии-импульса отличен от нуля, то преобразованием координат невозможно добиться его исчезновения, как невозможно имитировать материю в вакууме с помощью какого-либо специального выбора системы отсчета.

Для положительного решения вопроса о материальности гравитационного поля необходимо найти тензорную характеристику, которая позволила бы определить свойства поля аналогичные свойствам других видов материи. Это, прежде всего, энергия и импульс, присущие всем известным формам материи. Однако, как видно из главы VI, для поля гравитации удалось сформулировать лишь так называемый псевдотензор энергии-импульса, который сохраняет тензорные свойства только при линейных преобразованиях координат, но не отвечает общему принципу относительности. Псевдотензор энергии-импульса не может служить признаком материальности поля гравитации, поскольку для каждой произвольно заданной точки пространственно-временного континуума можно построить систему координат, в которой все компоненты псевдотензора принимают нулевые значения.

Все попытки найти характеристику энергии-импульса поля гравитации, отвечающую общему определению тензора, оказались неудачными. Предлагались лишь новые определения псевдотензора, которые с принципиальной точки зрения не обладают каким-либо существенным преимуществом по сравнению с определением, указанным в главе VI.

Основываясь на принципе эквивалентности, можно предположить, что определение правильного тензора энергии-импульса поля в ОТО вообще невозможно, так как в бесконечно малой окрестности каждой точки пространственно-временного континуума существует система отсчета, в которой поля гравитации нет. Однако это предположение оказывается правильным лишь в том случае, если искомый тензор энергии-импульса содержит только первые производные от компонент метрического тензора. Действительно, введение системы координат, позволяющей устранить поле гравитации в окрестности данной точки, с математической точки зрения представляет собой введение соприкасающегося пространства Эв-

клида, которое аппроксимирует пространство Римана во втором приближении. Это значит, что в данной точке для обоих пространств совпадают компоненты метрического тензора и их первые производные по координатам, тогда как производные более высоких порядков остаются различными. Поэтому из компонент метрического тензора и их производных различных порядков можно составить такие выражения, которые нельзя привести к нулю одним лишь преобразованием координат. Отсюда следует, что, с математической точки зрения, возможность образовать правильный тензор энергии-импульса поля *argioi* отрицать нельзя, хотя предпринимавшиеся до сих пор попытки, как уже сказано, к успеху не привели.

Если будет доказана невозможность построить правильный тензор энергии-импульса поля гравитации, то придется признать, что в рамках ОТО поле не является видом материи, поскольку оно не имеет основных физических свойств, присущих известным формам материи. В этом случае гравитационному полю следует приписать чисто геометрическую природу, отождествив его с метрикой пространственно-временного континуума. Придется также изменить представление о природе гравитационных волн. Последние придется рассматривать как волнообразное возмущение метрики, распространяющееся с конечной скоростью, но не связанное с переносом энергии и количества движения. Такая точка зрения очень четко и последовательно развивается М. Ф. Широковым [1].

Геометрическое истолкование гравитации представляется в ОТО вполне естественным, хотя и отличается от обычного изложения, в котором гравитационные волны связываются с переносом энергии.

Рассмотрим гравитационную волну, распространяющуюся в континууме Минковского. Пробная частица, двигавшаяся до того равномерно и прямолинейно, под действием волны будет испытывать ускорение, которое с точки зрения СТО можно истолковать как увеличение ее энергии. На самом же деле мировой траекторией частицы, как и прежде, остается геодезическая линия пространственно-временного континуума, но метрика последнего отличается от метрики Минковского. С точки зрения ОТО, представление о силе, обусловленной гравитационной волной и вызвавшей увеличение кинетической энергии пробной частицы, условно: оно возникает в результате применения метрики СТО, тогда как в действительности при прохождении волны метрика пространства-времени отличается от континуума Минковского. После прохождения волны, когда метрика СТО восстановится, скорость пробной частицы, а следовательно, и ее энергия останутся прежними.

В заключение необходимо еще раз подчеркнуть, что геометрическое истолкование гравитации не общепринято и что многие авторы, следуя классическому изложению Эйнштейна (см. главу VI), приписывают гравитационному полю энергию и количество движения,

вычисляя их с помощью псевдотензора энергии-импульса. Гравитационные волны рассматриваются при этом как механизм переноса импульса и энергии и даже как источник дополнительного гравитационного поля (см., например, [2]). Придерживаясь этой точки зрения, А. З. Петров называет гравитационное поле особым видом материи, обладающим некоторыми общими свойствами с другими видами материи [3].

**2. Квантование гравитации.** Вскоре после разработки основ квантовой механики довольно популярной стала идея квантования поля гравитации. Необходимость такого квантования усматривалась в том, что в микромире классическая теория гравитации должна неизбежно вступить в конфликт с квантовой механикой. Действительно, если гравитационные поля элементарных частиц являются классическими и отвечают обычной ОТО, то принципиально возможно путем соответствующих изменений найти одновременно координаты и скорости частиц, что противоречит принципу неопределенности. Для преодоления противоречия необходимо преобразовать ОТО по образцу квантовой электродинамики с тем, чтобы в применении к микрочастицам она приводила к результатам, согласным с принципами квантовой механики.

Этому соображению противопоставлялось предположение о том, что в микромире гравитация крайне слаба и не играет скольконибудь существенной роли. Например, отношение гравитационного взаимодействия двух электронов к кулоновскому равно  $\gamma : \left(\frac{e}{m}\right)^2$ , что составляет величину порядка  $10^{-42}$ . Однако с точки зрения ОТО такое сравнение допустимо только для достаточно больших расстояний, когда нелинейные уравнения поля можно аппроксимировать законом Ньютона. Что же касается расстояний, характерных для микромира, то для них, вследствие нелинейности уравнений поля, гравитационные взаимодействия могут оказаться существенными.

Первая попытка квантования гравитации относится, по-видимому, к 1930 г. [4]. Подробную квантовую теорию слабого гравитационного поля построил в 1936 г. М. Бронштейн [5], рассматривавший поле тяготения в пустоте как некоторую квантово-механическую систему. По аналогии с квантовой электродинамикой, Бронштейн ввел понятие «гравитационного кванта» (по современной терминологии — гравитона) и объяснял гравитационное взаимодействие между материальными частицами испусканием и поглощением этих квантов, пытаясь, таким образом, вывести закон тяготения Ньютона.

К ранним попыткам квантования поля гравитации можно отнести также работы П. Г. Бергмана [6]. Впоследствии различные варианты квантовой теории гравитационного поля как в линейном