

Теория обнаруживает патологии и в большом — коллапс, сингулярности, решения с нарушенной причинностью. Таким образом, как и всюду в теоретической физике, ОТО правильно описывает некоторую ограниченную область явлений, а вне нее, видимо, становится неприменимой. Как всегда бывает в подобной ситуации, неясно, каковы на самом деле пределы применимости ОТО; заведомо верны лишь сильные условия — слабые поля, не слишком большие расстояния.

Наконец, в теории Эйнштейна гравитация рассматривалась изолированно от других взаимодействий. Уже в 20-30-е годы Эйнштейн и другие теоретики (Вейль, Калуца и Клейн) пытались объединить гравитацию и электромагнетизм. Один из вариантов, в разработку которого Эйнштейн вложил много сил, как раз исходил из того, что использовались несимметричные  $g_{ik}$ , причем симметричная часть описывала гравитацию, а антисимметричная — электромагнетизм. Эти попытки не привели к успеху. Кроме того, еще в 30-е годы были открыты два новых типа сил: слабые и сильные. В последние десятилетия удалось построить единую теорию электромагнитных и слабых взаимодействий, предсказания которой прекрасно согласуются с опытом, построить принципиально новую теорию сильных взаимодействий (квантовую хромодинамику) и серьезно продвинуться на пути к объединенному описанию всех четырех взаимодействий — сильного, электромагнитного, слабого и гравитационного. В настоящее время исследованием многочисленных вариантов единых теорий занимаются многие теоретики. Такая теория, если она будет построена, укажет соответствующим образом границы применимости ОТО.

Заметим еще, что квантование ГП в ОТО по каноническим рецептам приводит к трудностям (неперенормируемость).

Последнее замечание. В современной теоретической и математической физике широко принято рассматривать размерность пространства как свободный параметр. Получающиеся игрушечные теории поучительны, часто оказывается, что они находят область применимости. Среди таких игрушек очень занята гравитация в пространстве размерности  $(2,1)$  (две пространственные и временная координаты) [32]. В таких пространствах нет кривизны, что сразу видно из приводившихся формул. Действительно, число компонент  $R_{ik}$  и  $R_{iklm}$  в этом случае одинаково, поэтому в пустом пространстве из уравнения  $R_{ik} = 0$  следует и  $R_{iklm} = 0$ . Таким образом, геометрия является плоской. Легко получить, что вблизи двумерного тела возникает 2-геометрия конуса и нечто от тяготения остается.

## 4. НАБЛЮДАЕМЫЕ ЭФФЕКТЫ ОТО В ПРИБЛИЖЕНИИ СЛАБОГО ПОЛЯ

### 4.1. О наблюдаемых следствиях ОТО

В предыдущих разделах было закончено построение ОТО: найдены уравнения поля и уравнения движения частиц и лучей света в ГП. В области механики и геометрической оптики — это полная система уравнений.

Более сложной оказывается область явлений, где ГП можно еще не квантовать, но поля материи (включая свет) надо уже рассматривать квантовым образом. Обсуждению большого круга явлений этого типа посвящена книга [15].

Мы ограничимся только той частью ОТО, которая содержится в уравнениях (66)–(69). Пока их достаточно для описания наблюдаемых эффектов. Приведем список наблюдаемых (в принципе) эффектов ОТО.

1. Красное (или голубое) смещение спектральных линий, излучаемых атомами, находящимися в ГП.
2. Отклонение луча света в ГП.
3. Запаздывание электромагнитных сигналов при их распространении в ГП.
4. Прецессия орбит планет.
5. Геодезическая прецессия гироскопа, увлечение гироскопа вращающимся телом.
6. Гравитационные волны.

Все перечисленные эффекты (за исключением третьего) были предсказаны уже в первые годы существования ОТО. Эффекты 1, 2, 4 наблюдались в первое десятилетие существования теории, но если тогда ошибки измерения составляли десятки процентов, то сейчас они находятся на уровне нескольких процентов. Эффект 3 был описан в 60-е годы и также наблюдался с точностью  $10^{-2}$ . Эффект 5 наблюдать трудно (речь идет о запуске специального спутника с гироскопом на борту), но сомнений в осуществимости опыта и получении его согласия с теорией, кажется, ни у кого нет. Что касается гравитационных волн, то трудно предсказать, когда их удастся непосредственно наблюдать на Земле — сейчас не хватает несколько порядков в точности. Современное положение в этой области освещено в обзоре К. Торна в [33]. Все же считается, что гравитационные волны обнаружены косвенно — наблюдается изменение параметров орбиты одного из компонентов в двойной звезде (пульсар PSR 1913+16), которые монотонно меняются таким образом, что это согласуется с потерей энергии за счет гравитационного излучения.

Все перечисленные эффекты можно рассчитать в рамках теории слабых полей, т.е. по теории возмущений. Для эффектов 1–3, 5 вообще достаточно полученного выше выражения для интервала в пределе слабого поля (80), для вычисления прецессии орбит нужен следующий порядок теории возмущений. Излучение гравитационных волн также может рассматриваться по теории возмущений.

Более сложна и больше обещает ситуация, где неевклидовость пространства-времени проявляется в полном объеме, — коллапс и эволюция Вселенной в целом. Эти вопросы будут рассмотрены в следующей книге.