

1921 г., правильной была оспаривавшаяся Эйнштейном точка зрения Пуанкаре.

3.5. Возможны ли другие теории тяготения?

В некотором смысле, ответ на этот вопрос отрицателен. Теория Эйнштейна предсказывает некоторое число эффектов, эти предсказания с достаточной точностью совпадают с опытом — ясно, что любая другая достаточно простая теория даст другие числа. Можно пытаться усложнить теорию, вводя новые константы и поля. При этом необходимо держать все добавления в таких пределах, чтобы уложиться в ошибки эксперимента. По мере уменьшения ошибок сужаются и пределы на дополнительные параметры. В настоящее время, грубо говоря, согласие с опытом ОТО установлено с точностью примерно 1%.

Если не проблема, то своеобразие положения ОТО состоит в том, что экспериментальных фактов все же немного, если сравнивать, скажем, с квантовой электродинамикой или классической механикой. Если в последних случаях теория покрывает факты, можно сказать, всюду плотно, то в ОТО теория похожа на очень красивый мост на нескольких опорах с большими пролетами — свободного пространства много, и часто появляется искушение что-то туда вставить.

Однозначность уравнений Эйнштейна диктуется требованием простоты. Очевидно, что пока мы не накрыли факты всюду плотно, всегда есть возможность как-то "изуродовать" теорию. Не бесполезно все же выдвинуть гипотезу простоты в какой-то приемлемой форме и затем посмотреть, есть ли другие возможные теории тяготения, кроме теории Эйнштейна. Будем исходить из того, что теория должна быть теорией поля и в первом приближении быть релятивистски инвариантной. Тогда в рамках гипотезы простоты нужно считать, что поле должно быть: скаляром; вектором; тензором второго ранга и т.д.

Прежде всего, гравитационное поле должно быть безмассовым, так как гравитация — дальнедействующее взаимодействие. На языке квантовых полей это означает, что масса квантов соответствующих полей равна нулю (в противном случае взаимодействие имеет вид \tilde{e}^{mr}/r и эффективно исчезает на расстояниях $r \sim \frac{1}{m}$ в единицах $\hbar = c = 1$).

Скалярные и векторные теории сразу исключаются опытом. Рассмотрим скалярный вариант. Если мы не хотим прийти к противоречию с опытом типа опыта Этвеша, то нужно, чтобы скалярное поле φ взаимодействовало с чем-то вроде T_{00} . Действительно, инертная масса есть $\int T_{00} dV$, и если мы хотим, чтобы ускорения были равны для тел любого состава, то сила должна быть тоже $\sim T_{00}$. Такое взаимодействие противоречит лоренцинвариантности, но можно попытаться взять взаимодействие в виде

$$\mathcal{L}_{int} = -\varphi T \quad , \quad (98)$$

где $T = g^{ik} T_{ik} = S\rho T_{ik}$. Для обычного тела $T_{\alpha\alpha} \ll T_{00}$ и $T \sim T_{00}$, однако для электромагнитного поля $T = 0$ и, таким образом, свет вообще не будет взаимодействовать со скалярным полем и отклоняться в таком гравитационном поле.

Это можно показать и несколько иным способом. Тензор T_{ik} для частицы можно записать в виде (где S берется в плоском пространстве)

$$T^{ik} = \int \delta^{(4)}(x-x(s)) m u^i u^k ds. \quad (99)$$

Тогда, учитывая вид лагранжиана взаимодействия скалярного поля с веществом, получаем:

$$\begin{aligned} S &= S_0 + S_{int} = -m \int ds - \int \mathcal{L}_{int} d^4x = \\ &= -m \int ds - m \int \varphi ds = -m \int (1 + \varphi) ds = -m \int ds', \end{aligned}$$

где введен новый интервал $ds' = (1 + \varphi) ds$. Видно, что в скалярной теории влияние ГП по-прежнему можно описать как изменение интервала, и траектории тел зависят не от массы, а только от начальной скорости. Однако теперь лучи света остаются прямыми: из $ds = 0$ следует, что и $ds' = 0$, несмотря на включение взаимодействия со скалярным ГП.

В то время как Эйнштейн работал над тензорной теорией, теорию скалярного типа в эти же годы рассматривал Нордстрем. Его теория, по-видимому, непротиворечива внутренне, но грубо противоречит факту отклонения лучей света вблизи массивных тел.

Рассмотрим векторную теорию, в которой ГП описывается некоторым 4-вектором φ^i . В квантовой теории поля показано, что взаимодействие векторного поля с частицами и античастицами имеет противоположные знаки. Поэтому если протоны падают в гравитационном поле Земли, то антипротоны должны получать ускорение от центра Земли. Это не так — антипротоны тоже падают! И это доказано прямыми экспериментом. Возникают и противоречия с опытом типа Этвеша, так как вблизи ядра есть виртуальные пары электронов и позитронов и последние будут давать отрицательный вклад в вес. Есть и многие другие трудности, так что этот вариант теории совершенно неудовлетворителен.

Перейдем к тензорной теории. Начнем с того, что разделим тензор φ_{ik} на симметричную и антисимметричную части. Антисимметричная теория эквивалентна векторной (вспомните электродинамику). Симметричная же теория есть как раз линеаризованная теория Эйнштейна. Она становится нелинейной, если учесть, что ГП само несет энергию, которая снова порождает поле и так до бесконечности. Заметим сразу, что тензор h_{ik} содержит и скалярную компоненту $h = S\rho h_{ik}$, и положить ее равной нулю нельзя. Поэтому гравита-

ция — это не теория поля со спином 2, а нечто более сложное. Более высокие спины, по-видимому, вообще исключаются: для них никому еще не удалось построить разумного взаимодействия с материей.

Таким образом, из возможных простых теорий (в указанном выше смысле) теория тяготения Эйнштейна — единственно приемлемая. Конечно, можно рассматривать более сложные модели, в которых к полю эйнштейновского типа примешиваются с малой константой другие поля. К такого типа теориям относится, например, теория Бранса и Дикке, где примешивается скалярное поле. Можно также рассматривать геометрии, более сложные, чем геометрия Римана, но опять нужно позаботиться о малости соответствующих поправок. Сейчас мы знаем, что все эффекты, связанные с отличием теории от теории Эйнштейна, отсутствуют на уровне процентов: через 10 лет будем, скорее всего, знать, что их нет и на уровне десятых долей процента.

Методически самой интересной альтернативой, если ее удастся осуществить, была бы теория гравитации с отличной от нуля массой гравитона, $m_g \neq 0$. В такой теории не было бы общей ковариантности и, по-видимому, можно было бы определить абсолютную геометрию Минковского. Эмпирически модификации, связанные с $m_g \neq 0$, должны быть малы. Вопрос о $m_g \neq 0$ рассматривался рядом авторов (В. Захаров [28], А. Вайнштейн [29], Дезер [30]), столкнувшихся с определенными трудностями. Последние попытки принадлежат А. Логунову с сотрудниками [31], в работах которых, кроме того, подчеркивается отсутствие законов сохранения в ОТО.

Означает ли все сказанное, что эйнштейновская теория есть окончательная истина? Конечно, нет! Из мировых постоянных \hbar , c и G можно построить универсальную так называемую планковскую длину (Планк указал на ее существование в 1900 г., как только ввел константу \hbar):

$$l_{Pl} = \sqrt{\frac{G\hbar}{c^3}} = 1,61 \cdot 10^{-33} \text{ см} . \quad (100)$$

Аналогично можно ввести планковское время и планковскую массу:

$$t_{Pl} = \sqrt{\frac{G\hbar}{c^5}} = 0,53 \cdot 10^{-43} \text{ с} , \quad (101)$$

$$m_{Pl} = \sqrt{\frac{\hbar c}{G}} = 2,17 \cdot 10^{-5} \text{ г} \approx 1,22 \cdot 10^{19} \text{ ГэВ} . \quad (102)$$

В эти величины входит \hbar и, следовательно, это те расстояния, промежутки времени и значения энергии, при которых квантовые эффекты доминируют — флуктуации метрики становятся порядка самих g_{ik} . Таким образом, на расстояниях $l \lesssim l_{Pl}$ и при энергиях $E \gtrsim m_{Pl}c^2$ неквантованная теория гравитации заведомо неприменима.

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.