

Лекция 1

1.1. Полевое приближение гравитации

В этой серии лекций обсудим гравитацию во всех ее аспектах. Фундаментальный закон гравитации, открытый Ньютоном, утверждает, что гравитационные силы пропорциональны гравитирующем массам и обратно пропорциональны квадратам расстояний. Этот закон впоследствии был модифицирован Эйнштейном так, чтобы он стал релятивистским. Изменения, которые необходимо сделать для того, чтобы теория была релятивистская, фундаментальны. Нам известно, что массы частиц не являются постоянными в теории относительности, таким образом, фундаментальный вопрос заключается в том, как изменение массы меняет закон гравитации.

Эйнштейн сформулировал свой закон гравитации в 1911 г., тем самым, предмет нашего обсуждения не нов, и физические результаты, которые мы должны объяснить, впервые были замечательно объяснены уже самим Эйнштейном. Поэтому обычный курс теории гравитации начинается с установления основных законов теории, т.е. так, как это было сделано Эйнштейном. Такая процедура, однако, не является универсальной, и по педагогическим соображениям в настоящих лекциях будет использоваться несколько другой подход для изложения теории. В настоящее время студенты-физики знают кое-что о квантовой теории, мезонах и других элементарных частицах, которые не были известны в то время, когда Эйнштейном была создана общая теория относительности. Физика в большой степени состояла из теории гравитации и электродинамики, и именно электродинамика вызвала к жизни создание теории относительности, так что проблема состояла в том, чтобы внести теорию гравитации в общую канву открытий, сделанных при изучении электродинамики.

Эйнштейновская теория гравитации, которая, как утверждается, явилась величайшим открытием в теоретической физике, заключается в красивых соотношениях, связывающих гравитационные эффекты с геометрией пространства, что было довольно увлекательной идеей. Видимая простота гравитационных и электрических сил, например состоящая в том, что и те, и другие следуют закону обратных квадратов, который может понять любой ребенок, приводит к тому, чтобы у каждого из этих "детей" появилась мечта о том, что когда он подрастет, он найдет дорогу к геометризации электродинамики. Таким образом, поколения физиков делали попытки создания так называемых единых теорий поля, которые могли бы объединить гравитацию

и электродинамику в рамках единой теории. Ни одна из созданных теорий не была успешной, и мы не будем обсуждать их в этих лекциях. Большая часть из этих теорий являлась просто математическими игрушками, создаваемыми математически мыслящими людьми, у которых было довольно слабое знание физики, большая часть из этих теорий непонимаема. Сам Эйнштейн также работал над этими теориями, и его сочинения на эту тему, по крайней мере, имеют некоторый смысл, тем не менее, успешной теории поля, которая бы объединяла гравитацию и электродинамику, не существует.

В случае создания подобной единой теории такой успех был бы кратковременным, поскольку в настоящее время в физике заключено существенно больше, чем только электродинамика и гравитация, и нам нужно было бы побеспокоиться об объединении мезонов, каонов и нейтрино и всех других тридцати и более элементарных частиц, которые сейчас известны. Таким образом, подобное объединение электродинамики и гравитации не было бы таким великим достижением, как это представлялось ранее, поскольку в мире есть много другого, кроме электричества и гравитации.

Наш педагогический подход является наиболее близким для теоретиков, специалистов в физике элементарных частиц, которые довольно часто используют различные поля, так что для них довольно просто понять, что вселенная образована двадцатью девятью или тридцатью одним полями, объединенными в одном уравнении; феномен гравитации добавляет еще одно поле в общий "котел"; это такое поле, которое было пропущено при предыдущих рассмотрениях; гравитационное поле является только одним из тридцати других, поэтому объяснение гравитации состоит в объяснении трех процентов всех известных полей.

Мы даже можем описать наш подход, пользуясь приемами научной фантастики. Представим себе, что в некоторой малой области вселенной, скажем, на такой планете, как Венера, живут ученые, которые знают все о других тридцати полях во вселенной, которые уже знают все, что знаем мы о нуклонах, мезонах и др., но не знают о гравитации. И вдруг производится новый замечательный эксперимент, который показывает, что большие незаряженные массы притягиваются друг к другу с очень-очень слабой силой. И что стали бы тогда делать венериане для того, чтобы объяснить этот замечательный дополнительный экспериментальный факт? Они вероятно попытались бы интерпретировать новый эксперимент в терминах теории поля, что было бы для них весьма привычным.

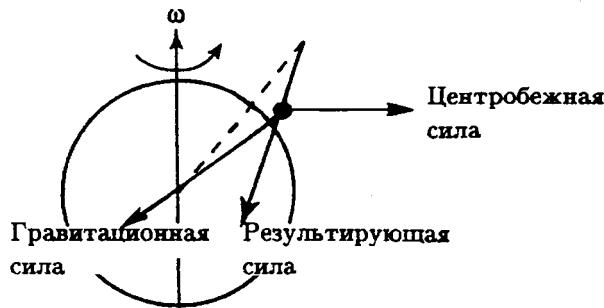


Рис. 1.1.

1.2. Характеристики феномена гравитации

Рассмотрим некоторые экспериментальные факты, которые венерийский теоретик должен был бы обсудить при создании теории, объясняющей этот новый замечательный эксперимент.

Прежде всего фактом является то, что сила притяжения определяется законом обратных квадратов расстояний. Что касается наших знаний об этом законе, то он известен очень-очень точно на основании изучения орбит планет. Кроме того, мы знаем, что сила пропорциональна массам объектов. Этот факт был известен Галилео Галилею, который обнаружил, что все тела падают с одинаковым ускорением. Насколько хорошо нам это известно? В принципе, что надо делать, абсолютно ясно; сначала мы определяем массу как инерцию данного объекта, которую мы измеряем, прикладывая к ней известные силы и измеряя ускорения. Затем мы измеряем притяжение, обусловленное гравитацией, например взвешиванием, и затем сравниваем результаты. Такие эксперименты, измеряющие силы и ускорения, должны были бы быть очень трудными для их проведения с достаточной точностью, однако имеются другие пути проверки закона Галилея с точностью до 10^{-8} , один из которых был проделан Этвешем. Такой эксперимент может быть реализован путем сравнения гравитационной силы Земли с центробежной силой, обусловленной вращением Земли. Ясно, что возникновение центробежной силы представляет собой чистый эффект инерции. В принципе гиря отвеса, находящегося на некоторой широте, не равной 0° или 90° , направлена не на центр Земли. Действительно, гиря отвеса не направлена к центру также и потому, что Земля имеет несферическую форму, но все эти факторы могут быть учтены при проведении сравнения сил. В любом случае, при некотором промежуточном значении широты (не совпадающим с экваториальным или полярным) гиря отвеса отклоняется в направлении, которое определяется результатом действия гравитационной

и центробежной силы. Если же сделать гирю отвеса из некоторого другого материала, который имеет другое отношение инерциальной и гравитационной массы, то отвес мог бы отклониться на несколько отличный от первоначального угол. Мы можем, таким образом, сравнивать различные вещества; например, если сделать первую гирю из меди, а вторую из водорода (конечно, может оказаться трудным изготовить гирю из чистого водорода, однако без труда ее можно было бы изготовить из полистирина), мы можем проверить постоянство инерциальной и гравитационной массы.

В реальном эксперименте не измеряются разности столь малых углов, а измеряются вращающие моменты; такие малые вращающие моменты являются более удобными для измерений потому, что кварцевые нити обладают для этого весьма подходящими свойствами, являясь достаточно тонкими и в то же время способными выдерживать достаточно большую нагрузку. Как это обычно делается, два тела, сделанные из двух различных материалов, подвешиваются на концах стержня, а стержень подвешивается в своей средней точке; если компоненты сил, перпендикулярные гравитационным силам, не равны, то имеется некоторый результирующий вращающий момент, который может быть измерен. Опубликованные результаты недавнего эксперимента Дикке показали, что эффекта нет, и сделан вывод, что отношение инерциальной массы к гравитационной является константой с точностью 10^{-8} для самых различных веществ от кислорода до свинца.

Подобный эксперимент может быть проведен путем сравнения гравитационной силы, обусловленной влиянием Солнца, с инерциальными силами, связанными с нашим орбитальным движением вокруг Солнца. Находясь на Земле, мы вовлечены во вращение в пространстве с фантастической скоростью вдоль орбиты Земли, и единственная причина не замечать этого движения состоит в том, что все другие объекты, нас окружающие, также движутся по той же орбите; если бы гравитационное притяжение не было бы в точности то же самое для различных объектов, то эти объекты должны были бы стремиться к тому, чтобы иметь различные орбиты, и существовали бы эффекты, которые были бы связаны с этими различиями. Общий эффект выглядел бы как наличие небольшой силы в направлении Солнца. Такой эффект искался через попытки обнаружения некоторой суточной осцилляции, которая могла бы быть найдена по поведению баланса закручивающего момента для пары масс в ночное и дневное время. Естественно отличия были измерены, некоторые из этих отличий были обусловлены тем, что различные стороны здания имеют

различные температуры – трудность проведения таких экспериментов с очень маленькими эффектами заключается в том, что необходимо быть уверенными, что измеряется на самом деле то, о чем идет речь, а не что-либо иное. Тем не менее, можно сделать заключение из этих экспериментов, что все объекты также хорошо сбалансированы на своих орбитах, как и Земля, с точностью 10^{-8} . Такая точность 10^{-8} уже может сообщить нам множество очень интересных вещей; например энергия связи в ядре порядка 6 Мэв на нуклон, а массы нуклонов порядка 940 Мэв, или, грубо говоря, энергия связи порядка одного процента общей энергии. Тогда точность 10^{-8} говорит нам, что отношение инерциальной и гравитационной массы *энергии связи* является константой с точностью 10^{-6} . Мы можем даже проверить отношение энергии связи для электронов, находящихся на нижних уровнях, поскольку 10^{-8} массы нуклона составляет порядка 9 эв. Если в дальнейших экспериментах будет достигнута точность 10^{-10} , что, как предполагается, будет сделано в ближайшем будущем, мы будем иметь пяти процентную точность на возможный диапазон значений энергии химической связи, которая порядка двух вольт.

С такой же точностью у нас есть также проверка гравитационного поведения антиматерии. Поразительное сходство электрических и гравитационных сил, заключающееся в зависимости от расстояний по закону обратных квадратов, заставило некоторых ученых прийти к заключению, что было бы замечательно, если бы антиматерия отталкивала материю; они говорят, что поскольку в электричестве тела с одинаковым зарядом отталкиваются, а противоположные притягиваются, то было бы замечательно, если бы в гравитации похожие тела притягивались, а непохожие отталкивались; и единственный кандидат для гравитационной "непохожести" – антиматерия. Но с точностью 10^{-8} мы можем проверить гравитационное поведение поправок к энергии взаимодействия K -электронов в свинце, обусловленной поляризацией вакуума, которая включает виртуальные пары и антивещество. Можно сказать, что в данном случае нет абсолютно никаких свидетельств, которые заставляли бы предположить, что материя и антиматерия отличаются в проявлении гравитационных эффектов. Более того, все свидетельства, экспериментальные и даже некоторые теоретические, оказывается демонстрируют то, что гравитационные эффекты определяются количеством энергии, вовлеченным в гравитацию, и следовательно, так как и материя, и антиматерия характеризуется положительными значениями энергии, гравитация не делает различия между ними.

Другой аргумент следует из того факта, что свет "падает" в гра-

витационном поле в соответствии с соотношениями, которые определяются нашей теорией; свет отклоняется Солнцем на измеряемую величину, которая будет вычислена в дальнейшем. Но фотон является своей собственной античастицей, так что мы должны заключить, что и частицы, и античастицы в этом случае ведут себя одинаково с точки зрения гравитации. Может быть забавным упражнением для некоторых людей попытаться построить теорию, в которой фотоны, исходящие из электрона, отличаются от фотонов, исходящих от позитронов. Но так как нет абсолютно никаких свидетельств того, что такая теория необходима для объяснения какого-либо явления, то довольно мало смысла заключено в попытке создания подобной теории; она должна была бы объяснять все известные эффекты также хорошо, как и существующая теория, и очень вероятно, что можно будет показать, что новая теория неверна, поскольку некоторые новые эффекты, предсказываемые новой теорией, не будут обнаружены при экспериментах.

Наиболее прямое свидетельство того, что материя и антиматерия действительно ведут себя идентично по отношению к гравитационным эффектам, приходит из экспериментов по распаду K_0 и \bar{K}_0 , проведенных в Массачусетском Технологическом Институте (MIT). Сам по себе этот эксперимент не без своих собственных недостатков, но его результаты возможно могут быть использованы для того, чтобы исключить теорию, в которой возможно было бы неодинаковое поведение материи и антиматерии. Эти аргументы были приведены М. Гудом [Good 61].

Предположим, что гравитация действует на K_0 и \bar{K}_0 , в противном случае данный аргумент не работает. Эти две частицы являются античастицами друг для друга. Итак посмотрим, что происходит, если одна из них притягивается, а другая отталкивается гравитацией. Эти частицы имеют две моды распада, которые могут описываться как

$$K_1 = \frac{1}{\sqrt{2}}(K_0 + \bar{K}_0), \quad K_2 = \frac{1}{\sqrt{2}}(K_0 - \bar{K}_0).$$

Амплитуды для распада по этим модам интерферируют, эксперимент обнаружил эту интерференцию и установил значение Δm разности масс такое, что $\Delta m < \hbar/(10^{-10} \text{ с})$. Эта величина не согласуется с идеей, что вещество притягивается, а антивещество отталкивается, поскольку данный эксперимент проводился в гравитационном поле Земли, и если гравитационный потенциал есть ϕ , то имеется увеличение или уменьшение массы для одной моды $m\phi$ и $-m\phi$ для другой, и такая разность масс была бы больше, чем ограничение, полученное

в эксперименте МИТ. Если мы рассмотрим гравитационный потенциал не Земли, а Солнца, который больше Земного, или рассмотрим даже Галактический потенциал, то получим все более и более лучшие пределы на степень того, насколько гравитационное взаимодействие должно быть одинаковым для материи и антиматерии. Однако подобная аргументация может быть отвергнута теми, кто считает, что антиматерия отталкивается, но для этого ими должно быть признано, что K_0 и \bar{K}_0 не являются гравитирующими частицами, а для этого уже требуется ввести новое специальное предположение. Очевидно, что любой единичный экспериментальный факт может быть проигнорирован, если мы готовы придумать особенную причину тому, почему данный эксперимент должен показывать такой результат, какой наблюдается.

Известно также, что одиночные свободные нейтроны падают в гравитационном поле так, как это ожидается. Этот факт известен с превосходной точностью, поскольку он должен учитываться при создании нейтронных интерферометров; медленные нейтроны из реактора могут коллимироваться в узкие пучки и детектироваться на некотором расстоянии от него, которое порядка нескольких сотен футов. Обнаружено, что они падают в гравитационном потенциале Земли так же, как и любые другие частицы, которые мы можем измерить. Резюмируя вышесказанное, можно утверждать, что первый изумительный факт, связанный с гравитацией, заключается в том, что отношение инерциальной и гравитационной массы постоянно, где бы мы его ни проверяли.

Второй изумительный факт, связанный с гравитацией, заключается в том, что это взаимодействие очень слабое. Сила гравитационного взаимодействия настолько слаба, что если венериане называют взаимодействия при β -распаде "слабыми" взаимодействиями, то открытие гравитации вызвало бы гигантские затруднения. Очевидно, что гравитация играет очень важную роль в нашей жизни, хотя силы гравитации, действующие на наше тело, сравнимы с силами мускулов наших ног; а это значит, что гравитационные силы очень слабы сравнительно с другими силами, существующими между частицами. Это сравнение предположительно более универсально, чем сравнение сил гравитации с силой человека. Давайте для примера вычислим отношение гравитационной и электрической силы между двумя электронами. Тогда получаем следующий результат:

$$F_{\text{гравит}} / F_{\text{электр}} = 1/(4.17 \times 10^{42}),$$

Другими словами, сила гравитации *действительно* слаба. Подоб-

ное сравнение на языке отношения сил является более значимым, чем обычное сравнение на языке констант взаимодействия; например, часто говорят, что электромагнитные силы являются "слабыми", потому, что величина $e^2/\hbar c$ – мала, а именно $1/137$. Но ссылка на значение константы $1/137$ не является слишком значимой, т.к. мы могли бы также хорошо представить, что более значимой величиной для ссылки являлся бы безразмерный заряд электрона, который равен $\sqrt{(4\pi^2/\hbar c)} = 0.31$, что выглядит весьма отличично от величины $1/137$, но имеет то же самое физическое содержание. Таким образом, когда говорится, что слабое взаимодействие (взаимодействие при β -распаде) должно быть слабым потому, что сила взаимодействия есть "малая величина" $GM_p^2 = 10^{-5}$, мы можем спросить, почему в данное соотношение включается масса протона? Если слабое взаимодействие передается с помощью некоторого мезона, называемого в настоящее время В-мезоном, то может быть более естественным учесть в предыдущем соотношении массу В-мезона, которая может быть много больше, чем масса нуклона, достаточная для того, чтобы константа взаимодействия была весьма отличной от "малой" константы 10^{-5} .

Все другие поля, которые нам известны, являются много более сильными, чем гравитация, что приводит к тому предположению, что гравитация никогда не может быть объяснена как некоторая поправка, как некоторые члены, которыми ранее пренебрегали в теории, которая бы объединяла все другие поля, которые нам известны. Число 10^{42} так чрезвычайно велико, что появляется весьма заманчивая перспектива поискать другие большие числа, которые могут быть связаны с этим числом. Подобная идея первоначально была предложена А. Эдингтоном [Eddi 31, Eddi 36, Eddi 46].¹ Существование одного большого числа весьма загадочно, в случае существования двух таких чисел ситуация была бы еще хуже, и ситуация могла бы быть улучшена для нас, если бы эти числа были связаны так, что большая величина одного приводила бы к большой величине другого; существование же одной большой величины могло бы быть объяснено значительно более просто, чем двух больших чисел. Эдингтон предположил, что $10^{42} = 2^{137}$, однако некоторые части его книги настолько непонятны, что можно было бы сказать, что книга Эдингтона не содержит полезной теории, поскольку изложение крайне туманно. Мы будем искать объяснения большого числа 10^{42} в другом направлении. Мы знаем о других таких больших числах,

¹ Интересное обсуждение возможности совпадения больших чисел и некоторых других вопросов, рассматриваемых в лекции, приведено в книге П.Девиса [Деви 85*]. (Прим. перев.)

например числе атомов или частиц в нас, но как и ранее, нам бы хотелось уйти от нашей человеческой природы при проведении подобных сравнений. Интересно, что гравитационные силы играют определяющую роль для движения таких огромных объектов, как галактики, так что можно было бы поискать связь между величиной гравитационных сил и размером вселенной.

В настоящее время размер вселенной очень большой, и ее границы нельзя считать хорошо известными, однако можно определить некоторую величину, которая называется радиусом вселенной. Существует наблюдательный факт, что свет, приходящий от удаленных звезд и галактик, сдвигается в сторону более низких частот, как будто они разбегаются от нас со скоростями, пропорциональными расстояниям от нас до этих объектов. Этот факт может быть объяснен в рамках так называемой теории Большого Взрыва Вселенной. Как мы увидим, теория гравитации очень важна при рассмотрении космологических моделей, и мы будем обсуждать их позднее в нашем курсе. Однако сейчас предположим, что галактики образованы из материи, которая начала двигаться из некоторого пятна в Большом Взрыве; тогда пропорциональность между скоростью от центра и расстоянием получается довольно естественно, поскольку вещество, которое находится дальше, движется быстрее. Такая пропорциональность имеет вид $R/V = T$, где T – время, прошедшее с момента такого гипотетического взрыва. Это время (обратная величина которого известна как постоянная Хаббла) характеризуется величиной порядка 13×10^{10} лет. Ошибка в этой величине составляет довольно существенную часть, несколько лет назад для этой величины приводилось значение 2×10^{10} лет. Ошибки определения этой величины связаны с ошибками определения расстояний; допплеровские сдвиги измеряются значительно проще, чем расстояния до далеких галактик.

Эта константа описывает время жизни вселенной; не обязательно мы должны верить в то, что вселенная образовалась T лет назад, скорее эта величина характеризует фундаментальную размерность вселенной, причем значительно в большей степени, чем величина e^2/mc^2 представляет "радиус электрона". Аналогично, величина Tc описывает некоторую длину, которая может называться "радиусом" вселенной. Посмотрим, как можно было бы получить коэффициент порядка 10^{42} каким-либо образом из постоянной Хаббла. Мы можем взять для примера отношение времени, которое требуется свету, чтобы пройти расстояние, равное комптоновской длине волны электрона \hbar/mc^2 или протона $\hbar/M_p c^2$, к постоянной Хаббла, кроме того, мы надеемся, что эта величина представляет собой нечто более значитель-

ное, чем просто некоторое количество секунд в нашей человеческой шкале измерений. Эти времена равны соответственно $\hbar/mc^2 = 10^{-21}$ с, или $\hbar/M_p c^2 = 10^{-24}$ с, время жизни вселенной $T = 10^{17}$ сек, таким образом, это отношение порядка 10^{41} для протонов, и можно сказать, пользуясь подобными соотношениями, что эта величина находится не слишком далеко от отношения электрических и гравитационных сил для протона, которое примерно равно 10^{36} . Если мы рассмотрим электроны, то это отношение равно 10^{38} , что также не слишком близко к величине 10^{42} , но мы должны иметь в виду, что мы пустились на самые смелые размышления с целью посмотреть на то, получим ли мы хоть какие-то осмысленные результаты. Можно напомнить такой факт, что П. Дирак [Dirac 37, Dirac 38] пытался построить некоторую теорию гравитации, в которой гравитационная константа была бы в точности этой величины. Одна из трудностей такой теории состоит в том, что необходимо вводить зависимость от времени силы гравитации, так как вселенная все время стареет в единицах времени, соответствующих комптоновской длине волн. Однако очень трудно определить, что значит сказать, что силы гравитации зависят от времени, в то время как все остальное "остается тем же самым". Так как эти значимые величины являются безразмерными отношениями некоторых физических величин, то эту ситуацию можно было бы описывать, предполагая, что электрический заряд зависит от времени, так что теория на самом деле, не является хорошо определенной. В данный момент попытаемся взглянуть поверх этих трудностей теории и посмотреть, хотя бы интуитивно, какие мы можем вывести следствия из зависимости от времени гравитационной константы. Некоторые ученые говорят, что этот факт может помочь объяснить землетрясения, поскольку, когда гравитационные силы слабеют, Земля слегка вытягивается, и могут возникать трещины. Однако, альтернативная теория, в которой рассматриваются токи в магме, находящейся внутри Земли, лучше описывает то, почему землетрясения происходят в высоко локализованных областях Земной коры. Итак, приятным является то, что некоторые выводы могут использоваться в теории землетрясений.

Можно было бы попытаться опровергнуть идею об изменении гравитационной постоянной G , основываясь на следствиях теории звезд; мы не будем детально изучать звезды, однако вкратце можно сказать, какие процессы в них происходят. Вещество звезды падает к центру, выделяемая гравитационная энергия нагревает вещество до температуры, при которой происходят ядерные реакции, а в результате давление сохраняет звезду в состоянии равновесия, энергетические

потери компенсируются энерговыделением при ядерных реакциях, и давление не позволяет веществу коллапсировать дальше. Если мы предполагаем, что гравитационная константа зависит от времени и имела большее значение в прошлом, мы должны предположить, что скорость энерговыделения в прошлом была выше для того, чтобы компенсировать больший вес; детальное рассмотрение показывает, что мы могли бы ожидать, что светимость звезды зависит от гравитационной постоянной как G^6 ; качественно, если постоянная больше, то больше и центральная температура, необходимая, чтобы силы газового давления поддерживали больший вес вещества, так что ядерные реакции происходят с большим энерговыделением. Мы можем спросить, какое влияние все это могло бы оказывать на наше Солнце и отсюда на поверхностную температуру Земли; мы утверждаем, что имеются некоторые ограничения на поверхностную температуру Земли, исходя из того факта, что на нашей планете жизнь существует (по крайней мере, в каком-то виде) уже 10^9 лет. Если гравитационная константа раньше была больше, то светимость Солнца была бы больше, согласно закону G^6 , и орбита Земли должна была бы быть ближе к Солнцу, чем сейчас. В этом случае световой поток, падающий на Землю, должен был бы быть пропорционален G^8 . Сейчас мы можем сделать некоторую оценку земной температуры; получить точную оценку довольно трудно, потому что плохо известна отражающая способность поверхности Земли (альбедо), достаточно трудно учесть влияние облаков и другие усложнения подобного рода, но мы можем получить оценку, основываясь на предположении, что Земля является черным телом. Черное тело испускает энергию, зависящую от температуры поверхности как T^4 , и поскольку Земля вращается, температура приходит в равновесие с энергией, получаемой от Солнца. Если сравнить полученные оценки с имеющимися данными об измеренных температурах поверхностей планет, то это сравнение показывает, что простая оценка оказывается весьма точной (во всех тех случаях, когда поверхностная температура известна). Итак, мы можем использовать эту оценку для получения оценки температуры земной поверхности миллиард лет тому назад, предполагая, что гравитационная константа была в то время на 8 % больше. Энергия, падающая на поверхность Земли, связана с температурой в соответствии с законом T^4 , эта энергия связана с гравитационной постоянной как G^8 , таким образом температура поверхности Земли пропорциональна G^2 и на 16%, или на 48°C , была выше миллиард лет тому назад, чем сейчас.

Теперь можно спросить геофизиков и биохимиков, что было бы, если бы температура Земной поверхности была бы такая, как 75°C .

Эта температура еще не достаточно высока, чтобы моря закипели, так что мы еще не можем отвергнуть полностью такую теорию. Можно предположить, что жизнь действительно зародилась при такой температуре воды. Известны некоторые места на Земле, такие как горячие источники в Йеллоустоне, где некоторые бактерии живут в воде при аналогичных температурах. Это была бы довольно странная жизнь, которая могла бы существовать при таких температурах; найденные древнейшие ископаемые остатки не демонстрируют никаких особенностей, которые могли бы быть разумным свидетельством существования таких больших температур, тем не менее, насколько я знаю, мы не можем предъявить решающего свидетельства против более высокой температуры в более ранние времена.

Существенно большая светимость звезд в том случае, если бы гравитационная постоянная была больше в прошлом, поменяла бы эволюционные масштабы времени некоторых звезд. Я знаю, что некоторые астрономы пытаются увидеть, согласуются ли эти выводы с наблюдениями, но я не знаю, получили ли они на этот счет строгое заключение.

Другое замечательное совпадение, связывающее гравитационную константу с размером вселенной, получается из рассмотрения полной энергии. Полная гравитационная энергия всех частиц вселенной есть что-то вроде GMM/R , где $R = Tc$ и T – хаббловское время. На самом деле, если вселенная является сферой с постоянной плотностью, необходимо учесть множитель $3/5$, но мы будем пренебрегать им, поскольку наша космологическая модель не во всем хорошо известна. Мы сравним эту величину с общей массой вселенной, Mc^2 . И вдруг, о чудо! Мы получаем замечательный результат, $GM^2/R = Mc^2$, так что полная масса вселенной равна нулю.¹ На самом деле, мы не знаем ни плотности вещества, ни радиуса во вселенной с достаточной точностью для того, чтобы говорить о равенстве, но тот факт, что эти два больших числа должны были бы иметь одинаковые порядки величин, представляет собой поистине замечательное совпадение. Отсюда можно прийти к весьма смелой мысли, что это "ничто" рождает новые частицы, так как мы можем создать их в центре вселенной, где имеется отрицательная гравитационная энергия, равная Mc^2 .

В этих оценках именно плотность вселенной является наиболее трудным для определения параметром. Мы можем видеть звезды и галактики, видеть их достаточно много, но не иметь ясной идеи о том, насколько много темных звезд находится там, звезд, в которых

¹ Другое решение этого уравнения $M = c^3 T/G$ Фейнман не обсуждает. (Прим. перев.)

перестали идти реакции ядерного горения. Не знаем мы и плотность межзвездного газа. У нас имеются некоторые мысли о том, как оценить плотность натрия в пространстве между галактиками, основываясь на измерении поглощения излучения в линиях D , испускаемого удаленными звездами. Однако натрий возможно составляет лишь небольшую часть общей массы, и нам необходимо знать плотность водорода. Путем изучения движения спиральных рукавов галактик, шаровых скоплений, выясняется, что галактики имеют в своих центрах большое количество скрытой массы. Все это не позволяет получить надежную оценку средней плотности во вселенной. А.Эддингтон для своих оценок в 20-х годах использовал значение 1 атом водорода в см^3 для галактик. Радиоастрономы, которые недавно изучили Галактику в "свете водорода", привели несколько меньшую оценку, скажем 0.7 атома водорода в см^3 . Нет никаких достоверных данных о плотности межгалактического вещества; космологи предполагают величины в 10^5 меньшие, чем галактическая плотность, 10 атомов водорода в кубическом метре. Пользуясь этой оценкой, мы получаем чрезвычайно интересный результат, что полная энергия вселенной равна нулю. Почему так должно быть, является одной из величайших тайн – и, следовательно, одним из важнейших вопросов физики. После всего этого можно задать вопрос, что мы должны были бы изучать в физике, если подобные тайны не являются столь важными, чтобы их исследовать.

Все приведенные выше размышления о возможных связях между размером вселенной, количеством частиц и гравитацией не оригинальны и обсуждались ранее. Ученые, обсуждавшие подобные предположения, делятся на два типа: или это очень серьезные математики, играющие в игры, заключающиеся в построении математических моделей, или скорее всего шутники, забавляющиеся тем, что обращают внимание на некие забавные численные курьезы со смутной надеждой на то, что все это возможно когда-нибудь и будет иметь какой-то смысл.

1.3. Квантовые эффекты в гравитации

В следующих нескольких лекциях мы начнем строить квантовую теорию гравитации. Было бы весьма полезно для нас держать в уме, что могли бы представлять из себя любые наблюдательные эффекты в такой теории. Вначале давайте рассмотрим гравитацию как теорию возмущений на атоме водорода. Ясно, что дополнительное притяжение между электроном и протоном приводит к малому изменению в энергии связи водорода; мы можем вычислить это изменение энергии из теории возмущений и получить значение ϵ . Известна зави-

сящая от времени волновая функция атома водорода $\psi = \exp(-iEt)$, где E – такая величина, которая соответствует частоте порядка 10^{16} Гц. Теперь для того, чтобы наблюдать какие-либо эффекты, обусловленные влиянием ϵ , мы должны были бы ждать какое-то время до тех пор, пока истинная волновая функция могла бы быть отличима от невозмущенной волновой функции, например на 2π в фазе. Однако величина ϵ настолько мала, что для этого необходимо ждать время в 100 раз большее, чем возраст вселенной T . Таким образом, гравитационные эффекты в атомах ненаблюдаемы.

Рассмотрим другую возможность, когда атом удерживается только гравитационными силами. Например, мы хотели бы иметь два нейтрона в связанном состоянии. Когда мы вычисляем радиус Бора такого атома, то получаем, что он должен быть равным 10^8 световых лет, и энергия связи должна быть равна 10^{-70} Р.¹ Таким образом, надежда обнаружить влияние гравитационных эффектов на системах, которые являются достаточно простыми для того, чтобы можно было провести вычисления в квантовой механике, слишком мала.

Другое предсказание квантовой механики и гравитации должно бы состоять в том, что гравитационная сила могла бы передаваться виртуальным обменом некоторыми частицами, которые обычно называются гравитонами. Следовательно, мы могли бы ожидать, что при определенных обстоятельствах мы могли бы видеть гравитоны, подобно тому, как мы можем наблюдать фотоны. Я хотел бы напомнить, что хотя свет наблюдался существенно раньше в истории человечества (возможно впервые Адамом), до 1898 г. не было осознанного понимания того, что это электромагнитные волны, а квантовые аспекты этих волн наблюдались еще позже. Мы наблюдаем гравитацию в том смысле, что мы знаем, что она влияет на Землю, но классические гравитационные волны до сих пор не наблюдались; это не является несогласованным с нашими ожиданиями, поскольку гравитация настолько слаба, что нет эксперимента, который мог бы быть сделан сегодня и быть достаточно чувствительным, чтобы обнаружить гравитационные волны, по крайней мере, от таких ожидаемых сильнейших источников, которые могут быть рассмотрены, как быстро вращающиеся двойные звезды. Квантовый аспект гравитационных волн в миллион раз дальше от порога детектирования, поэтому видимо нет даже надежды наблюдать гравитон.

¹Напомним, что внесистемная единица 1 Ридберг выражается следующим образом: 1Р.= 13.6 эВ. (Прим. перев.)

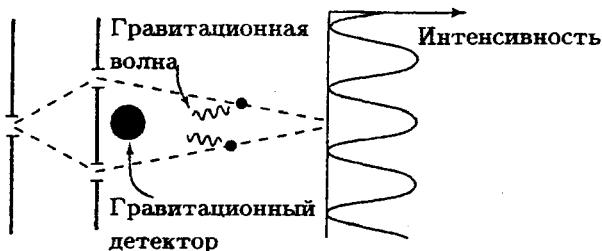


Рис. 1.2.

1.4. О философских проблемах в квантовании макроскопических объектов

Экстремальная слабость квантовых гравитационных эффектов могла бы теперь поставить некоторые философские проблемы; может быть природа пытается сказать нам что-либо новое, может быть мы не должны пытаться квантовать гравитацию. Возможно ли, что мы не должны настаивать на единобразии природы, чтобы все могло быть проквантовано? Возможно ли, чтобы было так, что гравитация не квантуется, а все остальное в мире квантуется? Существуют некоторые аргументы, которые были приведены в прошлом, что мир не может быть полуклассическим и полуквантовым. Теперь постулат, который определяет кваново-механическое поведение, заключается в том, что существует амплитуда для различных процессов. Не может быть, следовательно, чтобы частица, которая описывается амплитудой, такая как электрон, имела взаимодействие, которое описывается не амплитудой, а вероятностью. Мы рассмотрим дифракционный эксперимент с двумя щелями и вставим гравитационный детектор, который, как мы предполагаем, является классическим, который в принципе может сказать нам, через какую щель прошел электрон (рис. 1.2). Представим себе, что детектор еще не получил сигнал, говорящий нам, через какую щель прошел электрон; положение электрона описывается амплитудой, половина которой проходит через верхнюю щель, а половина через нижнюю. Если гравитационное взаимодействие передается полем, то отсюда следует, что гравитационное поле должно было бы также иметь амплитуду; половина которой соответствует гравитационному полю электрона, проходящему через каждую щель. Но все это в точности характеристика квантового поля, которое должно было бы описываться амплитудой предпочтительнее, чем вероятностью! Таким образом, кажется, что должно быть невозможным нарушить квантовую природу полей.

Несмотря на эти аргументы, мы хотели бы быть свободными от предубеждений. Ведь все еще остается возможность, что кванто-

вая теория абсолютно не гарантирует, что гравитация должна быть квантуема. Я хочу, чтобы здесь я был правильно понят, отсутствие предубеждений не значит отсутствие всяких убеждений. Я имею ввиду, что возможно, если мы рассматриваем альтернативные теории, которые не кажутся нам *a priori* оправданными, и мы вычисляем, что бы имели, если бы такая теория была верна, возможно было бы неожиданным открытием, что такой путь в действительности существует! Мы никогда не сделаем это открытие с позиции, что "конечно, всегда необходимо наслаждаться возможностью сомнений", а действовать и вычислять только с одним предубеждением. Рассуждая в этом духе, я хотел бы предположить, что квантовая механика не выполнима при больших расстояниях и для больших объектов. Теперь следите за моими утверждениями, я не говорю, что квантовая механика будет не выполняться на больших расстояниях, я только сказал, что это не является несогласованным с тем, что мы знаем. Если такая несостоятельность квантовой механики связана с гравитацией, то умозрительно рассуждая, мы могли бы ожидать, что это происходит для масс таких, что $GM^2/\hbar c = 1$, или $M \sim 10^{-5}$ г, что соответствует приблизительно 10^{18} частиц. Квантовая механика дает довольно глупые ответы для объектов такого размера; если мы вычислим вероятность того, что песчинка перепрыгнула через стену, то получим такие ответы как $10^{-260000}$, которые представляются довольно нелепыми. Следовательно, мы не должны пренебрегать рассмотрением того, что возможно квантовая механика не верна для больших масштабов и не выполнима для объектов нормального (немикроскопического) размера. В этой связи мы могли бы обсудить, как теория наблюдения и измерения создает некоторые проблемы. Для примера давайте поговорим о придуманном Шредингером парадоксе кота. Это не настоящий парадокс в том смысле, что имеется два различных ответа при использовании соответствующих логических рассуждений, это означает, что необходимо отметить наличие философской трудности в квантовой механике, и каждый физик должен решить, какой ответ он предпочтывает.

Представим себе закрытый ящик, в который помещен живой кот и подвешено ружье; причем кот размещен таким образом, что если ружье выстрелит, то кот умрет. Ружье выстреливает с помощью счетчика Гейгера, который считает частицы от радиоактивного распада; предположим, что источник такой, что мы ожидаем один отсчет в час. Имеется следующий вопрос: Какова вероятность того, что кот остался жив спустя один час, если мы оставили его запертым в ящице?

Ответ, получаемый из квантовой механики чрезвычайно прост; имеется два возможных конечных состояния, которые мы рассматриваем; амплитуда равна

$$\text{Амплитуда} = \frac{1}{\sqrt{2}}\psi(\text{кот жив}) + \frac{1}{\sqrt{2}}\psi(\text{кот мертв}).$$

Когда мы думаем об этом ответе, то у нас появляется ощущение, что кот не видит эти вещи таким же образом; он не чувствует, что у него $1/\sqrt{2}$ жизни и $1/\sqrt{2}$ смерти, а чувствует или одно, или другое. Итак, то, что может соответствующим образом описываться амплитудой внешнего наблюдателя, не обязательно описывается аналогичной амплитудой, когда наблюдатель составляет часть этой амплитуды. Таким образом, внешний наблюдатель обычной квантовой механики находится в выделенном положении. Для того, чтобы убедиться в том, жив кот или мертв, он делает маленькую дырочку в ящике и наблюдает; и только после этого он делает свое измерение, что система находится в хорошо определенном конечном состоянии; но ясно с точки зрения внутреннего наблюдателя, что результаты такого измерения внешнего наблюдателя определяются вероятностью, но не амплитудой. Таким образом, мы видим, что при традиционном описании квантовой механики мы имеем встроенное в теорию расхождение между описанием, включающим внешнего наблюдателя, и описанием без наблюдения.

Такого рода парадокс возникает всякий раз, когда мы рассматриваем усиление атомного события, так что мы узнаем, как это событие влияет на вселенную в целом. Традиционное описание общей квантовой механики всего мира чудовищно сложной волновой функцией (которая описывает всех наблюдателей), удовлетворяющей уравнению Шредингера

$$i\frac{\partial\Psi}{\partial t} = H\Psi,$$

приводит к невероятно сложной бесконечности амплитуд. Если я играю в азартные игры в Лас Вегасе и собираюсь поставить некоторые деньги на номер 22 в rulette, и ближайшая ко мне девушка выливает на меня свой напиток, потому что она увидела кого-то, кого она знает, и я останавливаюсь перед тем, как сделать ставку, и приходит число 22 на rulette, я могу увидеть, что все течение вселенной для меня зависело от того факта, что некоторый маленький фотон попадет в нервное окончание сетчатки глаза девушки. Таким образом, вся вселенная бифурцирует на каждом атомном событии. В

настоящее время некоторые ученые, которые настаивают на том, чтобы свести всю квантовую механику к букве, удовлетворены подобной картиной; так как нет внешнего наблюдателя для волновой функции, описывающей вселенную в целом, они утверждают, что правильное описание мира включает в себя все амплитуды, которые, таким образом, бифурцируют в каждом атомном событии. Но тем не менее, мы, которые являемся частью такой вселенной, знаем, какой путь вселенной бифурцировал для нас, так что можем следовать треку нашего прошлого. Теперь философский вопрос для нас состоит в том, что когда мы делаем наблюдение нашего трека в прошлом, становится ли результат нашего наблюдения реальным в том смысле, что конечное состояние было бы определено, если бы внешний наблюдатель сделал бы наблюдение? Все это весьма смущает, особенно когда мы считаем, что даже хотя мы можем согласованно рассматривать себя всегда в качестве внешнего наблюдателя, когда мы смотрим на весь остальной мир, остальной мир в то же самое время наблюдает нас, и очень часто мы согласны с тем, что мы видим друг в друге. Означает ли это, что мои наблюдения становятся реальными только тогда, когда я наблюдаю наблюдателя, наблюдающего, как что-либо происходит? Это ужасная точка зрения. Серьезно ли вы обдумываете мысль, что без наблюдателя нет реальности? Какого наблюдателя? Людого наблюдателя? Является ли наблюдателем муха? Является ли звезда наблюдателем? Отсутствует ли реальность во вселенной за 10^9 лет до н.э., т.е. до зарождения жизни? Или являетесь ли вы тем самым наблюдателем? Тогда нет реальности в мире после вашей смерти? Я знаю большое число респектабельных физиков, которые покупают страховку на случай смерти. Какой философией была бы понята вселенная без человека?

Для того, чтобы придать некий смысл рассуждениям, мы должны относиться без предубеждений к вероятности того, что для достаточно сложных процессов амплитуды становятся вероятностями. Факт, что именно амплитуды добавляются, может быть обнаружен только процессами, которые детектируют разность фаз и интерференцию. Теперь фазовые соотношения для очень сложных объектов могли бы быть чудовищно сложны, так что наблюдать интерференцию можно было бы только в том случае, если фазы всех частей сложного объекта эволюционируют очень, очень точным образом. Если существует некоторый механизм, с помощью которого эволюция фазы слегка изменяется, так что не является абсолютно точной, тогда наши амплитуды становятся вероятностями для очень сложных объектов. Но можно быть уверенным, что если фазы действительно имели та-

кое встроенное в теорию смещение, должны были бы быть некоторые следствия, связанные с этим смещением. Если одно такое следствие состояло бы в существовании гравитации самой по себе, не было бы квантовой теории гравитации, что было бы ужасающей идеей для остальных лекций.

Все это представляет собой весьма смелые рассуждения, и бесполезно продолжать их дискутировать; однако мы всегда должны помнить о том, что существует некоторая вероятность того, что квантовая механика может не выполняться, так как у нас есть определенные трудности с философскими предрассудками относительно измерений и наблюдений.

1.5. Гравитация как следствие других полей

Вернемся к построению теории гравитации, как это могли бы сделать наши друзья венериане. В общем случае, мы ожидаем, что должны быть две школы мысли о том, как работать с этим новым феноменом. Имеются следующие возможности:

1. Что гравитация – новое поле, номер 31.
2. Что гравитация – следствие чего-то, что мы уже знаем, но что мы еще точно не вычислили.

Мы рассмотрим кратко вторую точку зрения для того, чтобы посмотреть, какие в этом случае имеются возможности. Факт универсального притяжения может напомнить нам ситуацию в молекулярной физике; мы знаем, что все молекулы притягиваются друг к другу с силой, которая на больших расстояниях ведет себя как $1/r^6$. Этот факт мы понимаем в терминах дипольных моментов, которые индуцируются флуктуациями в распределении заряда молекул. То, что это универсальный закон, хорошо известно из того факта, что все вещества могут конденсироваться при соответствующем охлаждении. Итак, одна возможность состоит в том, что гравитация может быть некоторым притяжением, обусловленным подобными флуктуациями в чем-либо, мы пока не знаем в чем, возможно обладающим зарядом.

Если мы беспокоимся о том факте, что квантовая механика не выполняется тогда, когда очень часто возникают бесконечности при суммировании по всем состояниям, мы могли бы поискать связь между гравитацией, размером вселенной и неприменимостью квантовой механики. Бесконечности всегда появляются, когда мы суммируем все дроби $\Sigma n_1/(E - E_n)$. Теперь мыслится так, что если мы должны рассмотреть всю вселенную, то мы не должны суммировать по всем виртуальным состояниям обычным образом, а мы должны суммировать только те виртуальные состояния, для которых мы можем взять достаточно энергии из остальной части вселенной. Теория, которая не

могла бы разрешать виртуальные состояния, если энергия нарушения больше, чем общая энергия вселенной, была бы слегка отличной от той, которая предполагает, что общая энергия бесконечна. Здесь были бы отличия от обычной теории, но я подозреваю, что ничего другое, кроме как гравитация, не может быть следствием из такой теории.

Мы могли бы рассмотреть вопрос о том, могут ли гравитационные силы возникать вследствие виртуального обмена частицей, которую мы уже знаем, такой как нейтрино. Все-таки при поверхностном взгляде взаимодействие имеет правильные свойства, так как нейтрино – незаряженная частица с нулевой массой, то это взаимодействие должно было бы зависеть от расстояния как $1/r$, и это взаимодействие будет очень слабым.

В следующей лекции мы будем заниматься этой нейтринной теорией гравитации и обнаружим, что такая теория неприменима. Тогда мы начнем строить теорию гравитации как 31-ое поле, которое должно быть обнаружено.