

Лекция 2

2.1. Постулаты статистической механики

При построении возможных вариантов нашей теории гравитации мы должны остерегаться от слишком поспешного принятия (без достаточных на то оснований) многих из предрассудков нынешнего научного мировоззрения. В предыдущей лекции мы увидели, что имеется что-то не вполне удовлетворительное в том, что вероятности появляются при нашей интерпретации вселенной. Если мы действительно думаем, что вселенная описывается великой волновой функцией без внешнего наблюдателя, то ничто не может быть когда-либо вероятностью, так как никакого измерения даже не может быть сделано! Это обстоятельство физики имеют ввиду, несмотря на экспериментальное свидетельство оправданности подобного описания для подобластей вселенной, которые могут для наших целей довольно детально описываться волновыми функциями, амплитуды которых представляют вероятности результатов измерений.

Подобным образом, существуют трудности с описанием статистической механики в простом учебнике; хотя этот пример не слишком близко связан с теорией гравитации, но он связан с космологическими вопросами, которые мы будем обсуждать ниже. Довольно часто постулируют *a priori*, что все состояния равновероятны. Этот постулат не является истиной в нашем мире, как мы видим его. Этот мир не описывается правильно физикой, в которой предполагается выполнение этого постулата. В мире живут люди – не физики – такие как геологи, астрономы, историки, биологи, которые готовы поставить высокую ставку на то, что когда мы наблюдаем еще ненаблюдаемую область вселенной, мы найдем определенную организацию, которая не предсказывается физикой, которой мы призываем верить. В соответствии с нашим опытом как наблюдателей, мы обнаруживаем, что если мы заглянем в книгу с заглавием на обложке "Наполеон", то действительно, шансы на то, что внутри книги будет что-либо о Наполеоне, очень велики. Мы определенно не ожидаем найти систему в термодинамическом равновесии, когда мы открываем эти страницы. Но физики не нашли способа, как учесть подобные шансы для ненаблюдаемых областей вселенной. Современные физики никогда не могли бы предсказать так же хорошо, как геолог, шансы на то, что когда мы взглянем внутрь определенных камней, мы найдем ископаемое топливо.

Подобным образом, историки астрономии и астрономы находят,

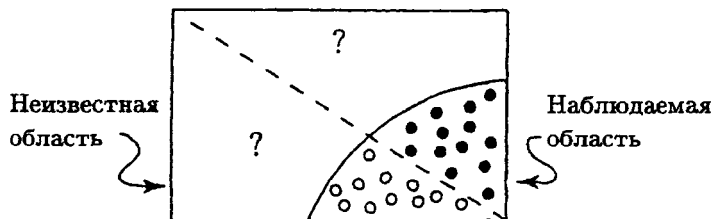


Рис. 2.1.

что всюду во вселенной, которую мы наблюдаем, мы видим звезды, которые горячее внутри и холоднее снаружи, т. е. системы, которые, на самом деле, весьма далеки от термодинамического равновесия.

Мы можем понять насколько невероятна такая ситуация с точки зрения обычных предсказаний термодинамики, путем рассмотрения простых упорядочений. Рассмотрим ящик в качестве вселенной, в которой имеется два типа частиц, белые и черные. Предположим, что в определенной области вселенной, подобной маленькому углу ящика, мы видим, что все белые частицы отделены от черных частиц диагональю (точнее плоскостью, проходящей через диагонали на противоположных сторонах, см. рис. 2.1). Априорная вероятность того, что такая картина имеет место, должна быть очень, очень мала, и мы должны, исходя из наших нынешних предубеждений, приписать этому состоянию статистическую флуктуацию, которая довольно невероятна. Что мы предсказываем для остальной части вселенной? Это предсказание состоит в том, что если мы взглянем на другую область, то мы должны были бы наиболее вероятно найти, что эта другая область имеет значительно менее упорядоченное распределение белых и черных частиц. Но фактически, мы такого не обнаруживаем, и в каждой новой области мы наблюдаем то же самое упорядочение, как и в предыдущем случае. Так, если я сяду в свою машину и поеду в горы, которые я до этого никогда не видел, я найду деревья, которые выглядят в точности также, как те деревья, которые я знаю. Если рассматриваются системы с экстремально большим количеством частиц, то вероятности таких наблюдений в терминах обычной статистической механики фантастически малы.

Наилучшим объяснением флуктуации, которая наблюдается, является то только, что многое флуктуировало, и что остальное находится в случайном состоянии. Если все состояния равновероятны *a priori*, и если найден кусочек мира, который столь односторонен, то остальная часть мира должна была бы быть равномерно перемешана, поскольку тогда была бы меньше флуктуация. Можно было бы возразить, что события и структуры коррелированы; они все имели

одно и тоже прошлое! Но это другая теория, чем та, которая лежит в основании описания вселенной в рамках статистической механики. Это та противоположная теория, которая утверждает, что в прошлом мир был более организован, чем сейчас, и что наиболее вероятное состояние не есть состояние равновесия, а некоторое особое состояние, которое динамически эволюционирует. В этом заключается общепризнанное предположение, которое принимается всеми историками, палеонтологами и другими.

Вероятностные аргументы могут быть использованы как тест для теории и могут быть применены следующим образом. Предположим, что на априорной основе мы хотим приписать очень, очень низкие шансы той гипотезе, что вселенная не должна описываться как тщательно подобранная флуктуация от полного хаоса, характеризующего термодинамическое равновесие; например, предположим, что *априорная* вероятность представления, что все состояния равновероятны, есть $1 - 10^{-100}$. Затем давайте опишем число упорядоченных состояний в соответствии с некоторой схемой; например, предположим, что мы перечислим все состояния, которые упорядочены менее, чем миллионом слов. Теперь мы определим оставшуюся *априорную* вероятность 10^{-100} для гипотезы, что вселенная эволюционирует от одного из этих специально упорядоченных состояний в прошлом. Другими словами, мы предполагаем, что все состояния равновероятны, но хотим допустить возможность того, что наблюдательные тесты могут опровергнуть гипотезу равновесия.

Теперь мы начинаем делать наблюдения мира вокруг нас и мы наблюдаем состояния с описываемым порядком. Каждый из нас этим утром видел, что земля была внизу, а воздух был вверху, но одного такого наблюдения достаточно, чтобы увеличить шансы для упорядоченных состояний в *апостериорном* суждении о вероятности начальной ситуации. И если мы делаем все больше и больше наблюдений, это увеличение в конце концов достигнет даже 10^{-100} способом, который может вычисляться в соответствии с теоремой: если *априорная* вероятность ситуации A есть P_a и если *априорная* вероятность ситуации B есть P_b , и если сделано наблюдение, которое более вероятно, если A имеет место, и менее вероятно, если B имеет место, то *апостериорная* вероятность A увеличивается отношением, по которому результат измерения является более вероятным, если A имеет место.

Если делается наблюдение угла вселенной, причем наблюдение макроскопическое, то можно обнаружить, что это состояние весьма далеко от равновесия. Шансы на то, что это может быть флуктуа-

ция, экстремально малы; требуется только одиночное наблюдение макроскопического порядка, чтобы уменьшить вероятность до 10^{-2000} , для которой только 5000 молекул должны быть упорядочены. Таким образом, совершенно очевидно, что только специальные состояния могли бы порождать огромную степень упорядочения, которую мы видим в мире.

Как тогда работает термодинамика, если ее постулаты вводят в заблуждение? Фокус состоит в том, что мы всегда упорядочиваем объекты таким образом, что мы не делаем эксперименты над объектами, когда мы их находим, а только после того, как мы выбрасываем все те ситуации, которые могли бы привести к нежелательным упорядочениям. Если мы должны проводить эксперименты над газами, которые первоначально помещены в металлический кан, мы должны заботиться о том, чтобы "дождаться того момента, когда термодинамическое равновесие установится" (как часто мы слышали *эту* фразу!), и мы выбрасываем все те ситуации, в которых что-либо случается с аппаратурой, что электричество отключается вследствие того, что сгорел предохранитель, или что кто-либо ударил по кану молотком. Мы никогда не проводим экспериментов над вселенной, как таковой, но скорее мы контролируем обстоятельства, чтобы подготовить более тщательно системы, над которыми мы экспериментируем.

Более удовлетворительный способ представления постулатов статистической механики может быть следующим. Предположим, что мы действительно знаем все детали (классической) системы, такие как масса газа, с бесконечной точностью; это означает, что мы знаем положения и скорости всех частиц в некоторый момент времени $t = 0$. Тогда мы можем (игнорируя действительные трудности в практике) вычислять точно, если мы знаем законы природы в точности, и узнать поведение и состояние всех других частиц в любой момент времени в будущем. Но сейчас предположим, что имеется некоторая небольшая неопределенность в наших измерениях или в нашем знании какого-либо одного фактора, который включен в вычисление, положение, скорости любой выделенной частицы или в небольшой неопределенности в точности, с которой мы знаем взаимодействие частиц. Не имеет значения (за исключением контрпримеров, построенных математиками), с чем связана эта неопределенность. Если такая неопределенность существует, мы должны будем описать финальное состояние усреднением этой неопределенности, и если прошло достаточно большое время, которое будет короче, чем наиболее длинное время неопределенности и наиболее длинное время системы, предсказания измерений будут очень близки к тем, которые даются канонической

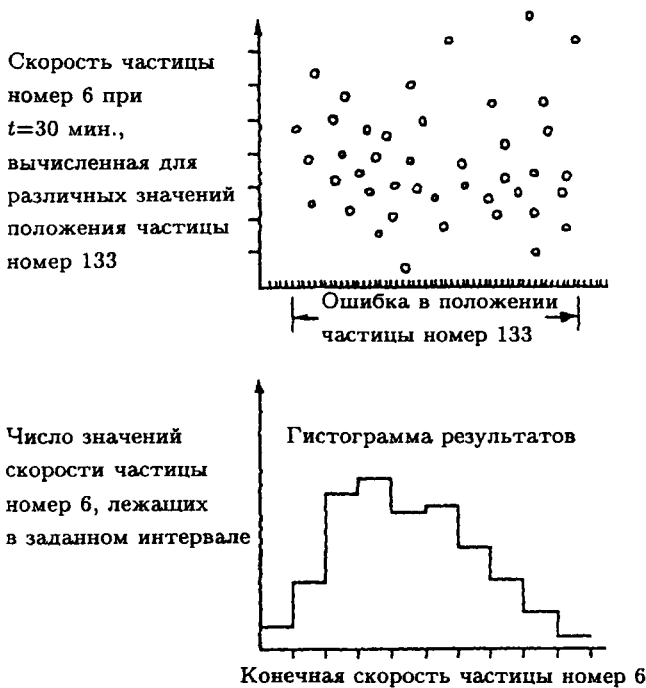


Рис. 2.2.

теорией термодинамического равновесия.

Если для примера мы нарисуем скорость молекулы номер 6 в момент времени $t = 30$ мин. как функцию любой другой начальной переменной в системе, например, такой как начальное положение или скорость частицы номер 133, мы найдем экстремально сложную кривую с очень, очень тонкими деталями, которые должны усредняться к "равновесным" результатам, как только мы усредняем по начальной конечной неопределенности выбранной переменной в данной задаче. Другими словами, распределение начальных значений в рассматриваемом диапазоне должно быть очень похоже на "равновесное" распределение (рис. 2.2).

Физически удовлетворительное обсуждение термодинамики и статистической физики может быть достигнуто, если признать, что проблема состоит в том, чтобы определить условия в системе, в которой различные события происходят при очень различных скоростях. Только если эти скорости существенно различны, термодинамика может быть использована. Таким образом, термодинамика должна различить медленные и быстрые процессы. Когда мы говорим о термодинамическом равновесии для нашей массы газа, мы не ждем беско-

нечное время, а ждем время достаточно продолжительное по сравнению с некоторым классом взаимодействий (например, молекулярных столкновений), который и производит тот тип равновесия, который мы рассматриваем. При изучении кислорода в металлическом канале, мы не ждем так долго, чтобы стенки канала могли бы окислиться или чтобы металл испарился бы в пространство, как в конце концов должно было бы произойти, так как он имеет конечное давление пара, также как мы не рассматриваем всех ядерных реакций, которые время от времени (в согласии с нашей теорией) имеют место для сталкивающихся молекул.

Мы должны быть внимательны при интерпретации этих результатов наших теорий, когда они исследуются с полной математической строгостью. У нас нет физической строгости, которая была бы достаточно хорошо определена. Если имеется что-либо слегка неправильное в нашем определении рассматриваемых теорий, тогда полная математическая строгость может трансформировать эти ошибки в нелепые выводы.

Вопрос заключается в том, как в квантовой механике описать ту идею, что состояние вселенной в прошлом было каким-то особенным. Очевидный путь состоит в том, чтобы сказать, что волновая функция мира (если таковая существует) была определенной ψ_0 при $t = -$ (возраст вселенной). Но это означает, что волновая функция ψ в настоящее время говорит нам не только о нашем мире, но в равной степени и обо всех других возможных вселенных, которые могли эволюционировать из того же самого начала. Это парадокс кота на большом масштабе. Эквивалентно представляется "наш мир" плюс все другие мертвые коты, чья смерть была квантовой контролируемой случайностью. Из этого "наш мир" может быть получен "редукцией волнового пакета". Каков механизм этой редукции? Вы должны или предположить, что наблюдаемые создания делают что-либо, не описываемое квантовой механикой (т.е. уравнением Шредингера), или что все возможные миры, которые могли бы эволюционировать из прошлого, являются одинаково "реальными". Это не значит сказать, что тот или иной выбор является "плохим", но значит только отметить, что я верю, что теперешняя квантовая механика подсказывает тот или иной выбор.

2.2. Трудности гипотетических теорий

При построении новой теории мы должны побеспокоиться о том, чтобы добиться того, чтобы построенные теории были точными, дающими описание, из которого могут быть сделаны определенные заключения. Мы не хотим следовать моде, которая позволила бы нам

менять детали теории в любом месте, в котором мы найдем, что теория противоречит экспериментам или нашим начальным постулатам. Любая неясная теория, которая не является полным абсурдом, может быть поправлена более неясным разговором в каждом случае, в котором возникают несогласованности – и если мы начинаем верить в такой разговор более, чем в (экспериментальное) доказательство, мы будем находиться в плачевном состоянии. Нечто подобного рода происходит с вариантами единой теории поля. Например, может быть, что одна такая теория говорила, что имеется тензор $J_{\mu\nu}$, который "ассоциируется" с электромагнитным тензором. Но что значит такое "ассоциирование"? Если мы устанавливаем, что эти два объекта идентичны, то такая теория предсказывает неверные эффекты. Но если мы не уточнили, что значит "ассоциировано", мы не знаем, что сказано. И разговор о том, что такая "ассоциация" означает "предлагать" некоторое новое соотношение, приводит в никуда. Такие неверные предсказания приписываются неверным "предложениям" скорее, чем неверной теории, и люди сохраняют намерение добавлять новую часть некоторого антисимметричного тензора, которое могло бы как-нибудь устранить недостатки теории. Такой умозрительный разговор заслуживает доверия не больше, чем разговор исследователей чисел, которые ищут случайные соотношения между определенными величинами, которые должны были бы непрерывно модифицироваться в том случае, если бы значения этих величин измерялись все с большей и большей точностью сначала первоначально выбранных величин, а затем все более и более мелких долей этих величин для того, чтобы предлагаемые соотношения не отставали от все более и более малых неопределенностей в измеряемых величинах.

В этой связи я хотел бы рассказать анекдот, который был частью беседы, произошедшей после коктейля в Париже несколько лет тому назад. Это случилось в то время, когда все дамы таинственным образом исчезли, и я столкнулся лицом к лицу со знаменитым профессором, который торжественно сидел в кресле, окруженный своими студентами. Он спросил: "Скажите мне, профессор Фейнман, почему Вы уверены в том, что фотон не имеет массы покоя?" Я ответил: "Конечно, это зависит от массы; очевидно, что если эта масса бесконечно мала, то этот эффект нигде не мог бы проявиться, и я не мог бы опровергнуть его существование, но я был бы рад обсудить, что эта масса не является равной определенной конечной величине. Но условие обсуждения состоит в том, что после того, как я дам аргументы о невозможности такого значения массы, должно быть против правил менять значение массы". Тогда профессор выбрал значение

10^{-6} массы электрона.

Мой ответ состоял в том, что, если мы согласны с тем, что масса фотона связана с частотой как $\omega = \sqrt{k^2 + m^2}$, фотоны с различными длинами волн должны были бы путешествовать с различными скоростями. Тогда при наблюдении затменной двойной звезды, которая от нас достаточно удалена, мы должны были бы наблюдать затмение в голубом и красном диапазоне в различное время. Поскольку ничего подобного не наблюдается, мы можем положить верхний предел на эту массу, который, если использовать числа, порядка 10^{-9} массы электрона. Мой ответ был переведен профессору. Тогда он захотел узнать, чтобы я сказал, если бы он сказал 10^{-12} массы электрона. Переводивший студент был смущен таким вопросом, я протестовал, что это против наших правил, но согласился попробовать снова.

Если фотоны имеют малую массу, одинаковую для всех фотонов, большие относительные различия от поведения безмассовых фотонов ожидаются в тех случаях, когда длина волны больше. Так что из резкости известного отражения импульсов радара, мы можем положить верхний предел на массу фотона, который несколько лучше, чем предел, получаемый из аргумента двойной затменной звездной системы. Оказывается, что эта масса должна быть меньше 10^{-15} массы электрона.

После этого, профессор снова захотел изменить значение массы и сделать ее равной 10^{-18} массы электрона. После этого вопроса все студенты забеспокоились, я запротестовал, поскольку он нарушает правила, делая эту массу все меньше и меньше, я не смог бы привести аргументы в некотором случае. Тем не менее, я попытался снова. Я спросил его, согласен ли он с тем, что если фотон имеет малую массу, то из аргументов теории поля потенциал фотона зависит от расстояния как $\exp(-mr)/r$. Он согласился. Тогда Земля имеет статическое магнитное поле, которое, как известно, продолжается в пространство на некоторое расстояние (что известно из поведения космических лучей), на расстояние, по крайней мере, равное нескольким Земным радиусам. Но это значит, что масса фотона должна быть величиной меньшей, чем та, которая соответствует длине распада порядка 8000 миль или 10^{-20} массы электрона. В этом месте, к моему облегчению, беседа закончилась.

Мы не должны поступать подобным образом при попытках построить теорию гравитации из *известных* полей, модифицируя величины взаимодействий или вводя новые постулаты в каждом месте, в котором мы обнаружим трудности; мы должны быть готовы выдвинуть определенные теории, использующие *известное* поведение

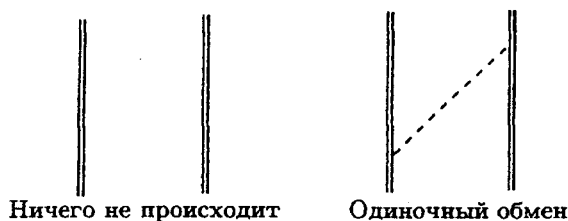


Рис. 2.3.

наших полей, и подготовится к тому, чтобы отвергнуть их, если они окажутся неадекватными.

2.3. Обмен одним нейтрино

Посмотрим можем ли мы получить силу, чем либо похожую на гравитацию, обменом одним нейтрино. Эти пробные теории, которые мы обсуждаем, неточно сформулированы и не полностью исследованы потому, что они не кажутся подходящими, когда мы делаем первые несколько оценок. Может быть, возможно преодолеть эти трудности, которые заставляют нас отвергнуть эти оценки, но я чувствую, что предпочтительнее упорно придерживаться тех правил, относительно которых мы договорились, что мы должны пытаться дать объяснение в терминах *известных* свойств частиц без каких бы то ни было новых постулатов. Это мне не удалось.

Обмен нейтрино может обладать потенциалом, который зависит от расстояния как $1/r$, поскольку его масса равна нулю. Но так как нейтрино имеет полуцелый спин, одиночный обмен не приводит к статической силе, поскольку после одиночного обмена источник нейтрино не находится больше в том же самом состоянии, в котором он был первоначально. Для того, чтобы получить из обмена силу, а не только рассеяние, необходимо, чтобы диаграмма, включающая этот обмен, могла бы интерферировать с диагональными членами в амплитуде рассеяния, что состоит в том, что произошло бы добавление к амплитуде, которая соответствует тому, что ничего не происходит (2.3). Таким образом, возможность обмена одним нейтрино управляется тем фактом, что половина единицы углового момента не может быть испущена объектом, который остается в том же самом внутреннем состоянии, в котором находился исходно.

Бесспиновый мезон с нулевой массой мог бы привести к потенциалу, пропорциональному $1/r$. Наиболее просто вычислить дополнительную энергию взаимодействия в координатном пространстве по сравнению с импульсным пространством. Импульсный пропагатор для такой частицы был бы $1/k^2$. Нейтринный пропагатор имеет вид $1/k$ или k/k^2 , таким образом имеет более высокую степень k в числи-

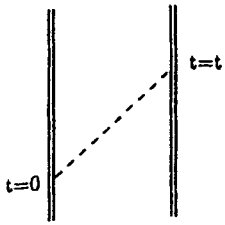


Рис. 2.4.

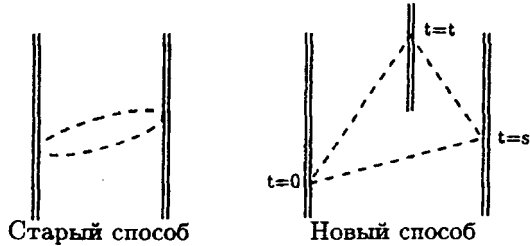


Рис. 2.5.

теле; было бы даже еще труднее связать такой пропагатор с силой типа гравитационной. Для мезона с нулевым спином мы вычисляем диаграмму, интегрируя по всем возможным моментам времени, в которые происходит испускание, и по всем моментам времени захвата, в которые происходит захват мезона, пропагатор $\delta_+ = 1/(t^2 - r^2 + i\epsilon)$ (рис. 2.4), дополнительная энергия есть (опуская множители)

$$E \propto \int \frac{idt}{(t^2 - r^2 + i\epsilon)} \propto \frac{1}{r}. \quad (2.3.1)$$

В последнем соотношении интегрирование проводится только по времени испускания (или только по времени захвата); повторное интегрирование вводит временной множитель, который представляет нормальное опережение фазы, так что он не представляет энергии взаимодействия.

Мы не установили точно только, как мы ожидаем, чтобы массы появились как множители, но имеется весьма мало смысла делать это, поскольку мы не знаем никаких бесспиновых нейтрино. Эта теория убивается половиной единицы углового момента, переносимого при взаимодействии.

2.4. Обмен двумя нейтрино

Может быть мы все еще можем получить теорию гравитации путем обмена двух нейтрино, так что они могут иметь диагональные расчетные элементы. Нет ясного пути, идя по которому, можно увидеть, почему энергия взаимодействия между двумя большими объектами должна была бы быть в точности пропорциональна их массам, хотя очевидно, что она была бы, по крайней мере, грубо пропорциональна числу частиц в каждом из них. Оставляя в стороне это обстоятельство (или возвращаясь назад, если что-либо работает не так, как следует), мы будем говорить, что взаимодействие двух объектов пропорционально произведению $m_1 \cdot m_2$, умноженному на взаимодействие одной пары частиц. Мы продвигаемся много дальше, чем в предыдущем случае, но делаем это несколько более аккуратно, поскольку

результаты более интересные. Амплитуда того, что испускается пара нейтрино за время dt , есть $G' dt$. Амплитуда того, что одно нейтрино испускается из одной точки в другую равна $1/(t^2 - r^2 + i\epsilon)$. Мы введем массы взаимодействующих частиц m_1, m_2 , говоря, что эти массы должны представлять общее число частиц так, что энергия между двумя массами равна

$$E = m_1 m_2 G'^2 \int \frac{i dt}{(t^2 - r^2 + i\epsilon)^2}. \quad (2.4.1)$$

Этот интеграл может быть весьма легко взят, либо вычислением вычетов в полюсах или простым дифференцированием интеграла (2.3.1), так что энергия равна

$$E = m_1 m_2 \frac{G'^2 \pi}{2} \frac{1}{r^3}, \quad (2.4.2)$$

где r расстояние, разделяющее частицы. Таким образом, мы обнаруживаем, что обмен двумя нейтрино приводит значение энергии, которое неправильно зависит от расстояния. Это заключение приводит к выводу, что теория выглядит безнадежно. Но надежда возникает вновь, если мы анализируем ситуацию несколько дальше. Оказывается, что мы можем получить член, который зависит как $1/r$, рассмотрением обмена между тремя массами. Три частицы могут обмениваться двумя нейтрино между любыми из трех пар и новым способом (рис. 2.5). Положим, что первое испускание имело место при $t = 0$, а другие вершины имели место в моменты времени t и s . Тогда во взаимодействие вовлечена была бы энергия

$$G'^3 m_1 m_2 m_3 i^2 \int \frac{ds dt}{(s^2 - r_{12})(t^2 - r_{23})[(s - t)^2 - r_{31}]}. \quad (2.4.3)$$

Этот интеграл может быть вычислен последовательным интегрированием в каждом из полюсов и результат равен

$$E = -G'^3 m_1 m_2 m_3 \pi^2 \frac{1}{(r_{12} + r_{23} + r_{13})r_{12}r_{23}r_{13}}. \quad (2.4.4)$$

Если одна из масс, скажем масса номер 3, существенно удалена, так что r_{13} много больше, чем r_{12} , то мы, действительно, получаем, что взаимодействие между массами номер 1 и номер 2 обратно пропорционально величине r_{12} .

Что же такое масса m_3 ? Это, очевидно, может быть некоторая эффективная средняя величина по всем другим массам во вселенной.

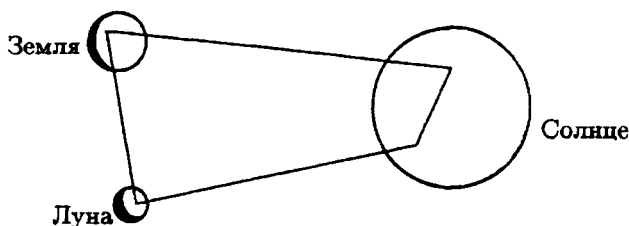


Рис. 2.6.

Влияние удаленных масс, сферически распределенных вокруг масс 1 и 2, проявилось бы как интеграл по средней плотности; мы бы имели

$$E = -\frac{G'^3 m_1 m_2 \pi^2}{r_{12}} \int \frac{4\pi \rho(R) R^2 dR}{2R^3}, \quad (2.4.5)$$

где R – большое значение расстояния $R \approx r_{12} \approx r_{23}$. Для простой оценки мы можем взять плотность, равной константе внутри сферы; мы выполним интегрирование от некоторого начального значения радиуса, которое, тем не менее, достаточно большое по сравнению со значением r_{12} . Вклад всех масс вне сферы с этим минимальным значением радиуса является чем-то типа

$$E = -\frac{m_1 m_2}{r_{12}} 2\pi^3 G'^3 \ln \left(\frac{R_0}{R_i} \right) \rho. \quad (2.4.6)$$

Этот логарифм является некоторой величиной, которая не может быть многим больше, чем 50 или 100, так как характерное значение внешнего радиуса может быть равно $Tc = 10^{10}$ световых лет $= 10^{28}$ см. Такая энергия действует подобно гравитации; можем ли мы опровергнуть это? Да, и двумя способами. Во-первых, величина этого логарифмического члена становится сравнимой с величиной всей силы (2.4.2), пропорциональной $1/r^3$, на расстояниях больших, чем те, на которых ньютоновский закон гравитации уже проверен. Более того, если мы рассматриваем влияние Солнца на гравитационное взаимодействие между Землей и Луной, мы обнаруживаем, что это влияние должно было бы приводить к наблюдаемым отклонениям в орбитальном движении, так как расстояние от Земли до Солнца меняется при движении Земли вдоль своей орбиты. Мы оцениваем этот эффект следующим образом. Мы хотим сравнить вклад Солнца во взаимодействие Земля – Луна со вкладом всех остальных звезд. Это влияние зависит от массы и обратно пропорционально кубу расстояния. Для логарифма меньшего, чем 1000, вклад Солнца превосходит в 10^{12} вклад звезд для любой разумной оценки плотности звезд! Таким

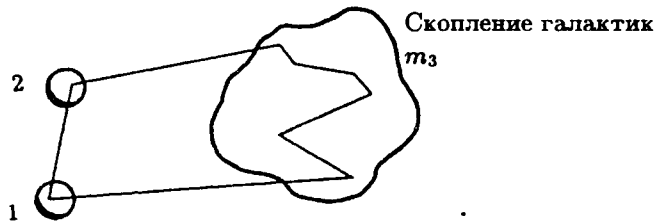


Рис. 2.7.

образом, мы можем пренебречь вкладом звезд. Но таких больших возмущений, которые бы соответствовали изменению эффективной гравитационной константы, которое бы возникало от ± 2 процентной вариации расстояния между Землей и Солнцем, не наблюдалось в системе Земля – Луна.

Но можно ли все-таки спасти эту теорию? Представляется, что процессы более высокого порядка могли бы снять эти трудности, например процесс, включающий 4 нейтринных линии или даже более высокие порядки, мог бы быть вычислен. Ясно, что член, изображенный на рис. 2.6, мог бы дать вклад порядка m_3^2 , т.е. квадрата числа частиц окружающих масс, и, следовательно, влияние удаленной туманности могло бы значительно превзойти влияние Солнца. Этот факт мог бы быть еще более справедливым для более высоких порядков теории. Мы должны, следовательно, суммировать диаграммы различных порядков, типа изображенных на рис. 2.7.

Тем не менее, насколько я могу судить из статистики Ферми, члены различных порядков оказываются противоположными по знаку и никакого удовлетворительного результата не получается.

Чтобы объяснить эту идею более формально, мы полагаем, что в теории (где есть, скажем, скаляр ψ) с квадратичной связью $\bar{\psi}\phi^2\psi$ математическое ожидание для произведения двух полевых переменных $\phi(1)\phi(2)$ в состоянии при наличии многих туманностей может определяться соотношением

$$\langle \phi(1)\phi(2) \rangle = \delta_+(S_{12}^2) + C, \quad (2.4.7)$$

где первый член есть обычный вакуумный член, а C возникает от взаимодействия с удаленной туманностью. Величина C практически не зависит от 1 и 2, если они (1 и 2) близки по сравнению с радиусом вселенной.

Тем не менее, я думаю, что для спина $1/2$ не может возникнуть C . Для фотонов такой член, даже если он возникает, не имел бы желаемого эффекта, т.к. насколько я могу видеть, этот член не является квадратичным для связи фотонов.

Итак, теория с двойной нейтринной парой не привела к плодотворному результату. Однако, мы научились кое-чему, работая с этой теорией от начала до конца, что представляет собой весьма замечательную идею. Если мы построим теорию гравитации, основанную на взаимодействии трех тел, в которой одно тело достаточно далеко удалено от других двух тел, закон $1/r$ будет выполняться, если квант поля имеет целый спин, и величина потенциала будет пропорциональна количеству вещества в удаленном теле. Эти туманности, которые до сих пор не влияли на наши физические законы, могут играть важную роль в гравитационном взаимодействии!

Тем не менее, для того, чтобы построить такую теорию, мы должны были бы предположить существование бозона с нулевой массой, который взаимодействует квадратично со всей остальной материей во вселенной, и должны были бы вернуться к вопросу, почему сила в точности пропорциональна массе. Но кажется, что нет смысла следовать по такому извилистому пути, когда мы не достигли цели с использованием известных частиц. Если предположить существование новой частицы, мы можем построить абсолютно хорошую теорию, предполагая существование частицы с нулевой массой и со спином 2, которая взаимодействует линейно с веществом.