

Глава 6

Новая Интерпретация

Квантовой Механики

В основе новой теории лежит предположение о существовании Хаоса за пределами гравитационного поля Вселенной. С этой точки зрения неопределённость, наблюдаемая в микромире, есть остаток от хаотического движения, ограниченного воздействием звёзд. Исходя из этого, в этой главе вводится новое физическое понятие – понятие дискретного (хаотического) движения. Используя это понятие, как будет показано ниже, можно наглядно объяснить все процессы, происходящие в микромире.

§ 6.1. Хаос – граница пространства и времени

Окружающее нас пространство-время обладает совокупностью разнообразных свойств. Вот наиболее важные из них.

- 1) Макроскопические тела движутся в пространстве-времени по определённым траекториям.
- 2) В пространстве существуют инерциальные (или локально инерциальные) системы отсчёта.
- 3) Существует предельная скорость распространения взаимодействий, одинаковая для всех наблюдателей.
- 4) Существует неопределённость в движении субатомных частиц.

5) Пространство-время обладает геометрическими свойствами.

6) Любое тело, находящееся в пространстве-времени, обладает энергией.

Таким образом, пространство-время является достаточно сложным объектом нашего мира. Но одно из основных предположений, лежащих в самом фундаменте современной физики – это то, что все эти разнообразные свойства пространства-времени существуют независимо от находящихся в нём материальных тел. Исключение составляет только геометрия, которая под действием гравитации становится неевклидовой. Все же остальные свойства пространства-времени рассматриваются как неизменные и не зависящие от распределения масс во Вселенной.

В новой теории излагается альтернативная точка зрения: все свойства пространства-времени являются результатом взаимодействия находящихся в нём частиц и полей. Например, любое тело, существующее в пространстве-времени, обладает энергией покоя: $E_o = m_o c^2$. Энергия тела – это потенциальная способность тела совершить работу над другими телами.

Но почему покоящееся тело обладает такой способностью? А потому, что находится в гравитационном поле Вселенной, то есть находится во взаимодействии с другими телами. Полная энергия тела как раз и определяется этим взаимодействием – величиной гравитационного потенциала Φ_{Un} (2.1):

$$E_o = m_o c^2 = -m_o \Phi_{Un}$$

Вне гравитационного поля Вселенной тело не будет обладать энергией, а, значит, и не сможет существовать там. То есть тело может существовать, только взаимодействуя с другими телами.

Возьмём, например, макроскопическое тело. Такое тело движется по вполне определённой траектории – непрерывной линии. Но ведь существует бесконечное множество разнообразных вариантов движения, которые только можно мысленно представить. Множество непрерывных функций есть только малая часть всех функций вообще.

Почему же тогда макроскопическое тело движется только по непрерывной траектории? Какая причина так сильно ограничивает выбор в его движении? Такой причиной являются все массы Вселенной. Именно они посредством гравитационного воздействия ограничивают неопределённость в движении тела.

Иногда можно услышать следующее: неопределённость в движении тел ограничена физическими законами. Иначе говоря, законы движения – вот причина, почему тела движутся так, а не иначе. Это неверно. Законы движения являются лишь описанием движения тел (более или менее правильным) и поэтому не могут быть причиной, ограничивающей произвол (неопределённость) в движении. Точно также, например, расписание движения автобусов (пусть и верное) не является причиной движения автобусов.

Итак, все массы Вселенной, взаимодействуя друг с другом посредством единого гравитационного поля, ограничивают неопределённость в движении тел. А существующие физические законы являются лишь выражением этого ограничения (порядка), сделанным на языке математики.

Поэтому по мере удаления от всех масс Вселенной из-за уменьшения абсолютной величины гравитационного потенциала законы движения будут становиться всё менее определёнными. А свойства пространства-времени будут постепенно вырождаться. Предельная степень вырожденного пространства-времени и есть Хаос. Из-за того, что при приближении к Хаосу скорость света будет уменьшаться вплоть до нуля, *будет разрушаться и причинно-следственная, и пространственно-временная связь между различными событиями.*

Так как в нашем пространстве-времени точки определяются с помощью материальных тел (частиц), размерами которых можно пренебречь, то *из-за неограниченного возрастания неопределённости в движении понятие точки или местоположения в Хаосе потеряет физический смысл.*

Понятия расстояния и времени (ближе – дальше или раньше – позже) имеют смысл только для тел, движение которых подчиняется определённым законам. Поэтому при приближении

к Хаосу понятия расстояния и времени также потеряют физический смысл.

Таким образом, Хаос, с одной стороны, существует вне времени и за пределами пространства, а с другой стороны, является естественнымместилищем нашей Вселенной. С этой точки зрения пространство и время есть результат наложения гравитационного поля Вселенной на Хаос.

А наблюдаемое движение физических объектов в пространстве и во времени *есть результат ограничения их хаотического движения огромным гравитационным потенциалом Вселенной* ($\Phi_{Un} = -9 \cdot 10^{16} \text{ м}^2/\text{с}^2$). Именно благодаря этому ограничению Хаос преобразуется в окружающее нас пространство и время.

§ 6.2. Дискретное движение

1. Хаотическое движение. В современной физике существует всего два рода объектов. Это частицы и поля. Соответственно, существует и два типа движений. Это, во-первых, движение материальной точки вдоль непрерывной линии в пространстве. И, во-вторых, движение волны.

С одной стороны, электрон (или другой квантовый объект) является не волной, а частицей, более того, неделимой частицей. Но, с другой стороны, при определённых условиях электрон ведёт себя как волна и может одновременно пройти через два отверстия. Очевидно, что электрон не движется в пространстве по непрерывной линии. Как же он движется?

В новой интерпретации квантовой механики, которая будет последовательно изложена в этой главе, мы предлагаем *принципиально новый* тип движения, который позволит наглядно объяснить *все* квантово-механические парадоксы, в том числе и нелокальность квантовой механики. Это *дискретное движение*.

Рассмотрим электрон, который движется в виде виртуального облака (см. рис. 9). Как уже отмечалось, объём облака – это объём той области пространства, в котором волновая Ψ -функция отлична от нуля.

И мы предполагаем, что внутри этого облака электрон движется **дискретно**, а именно: в момент времени t электрон находится в некоторой точке облака, затем он исчезает из этой точки и через бесконечно малое время dt появляется в другой, совершенно произвольной точке, также находящейся внутри этого облака.

Итак, электрон исчезает из одной точки облака и через бесконечно малое время появляется в другой точке облака. Таким образом, за любой, сколь угодно малый, но конечный промежуток времени (скажем, за время $\Delta t < 10^{-23}$ с – время, за которое свет проходит расстояние, равное ядру атома) электрон успевает исчезнуть и появиться во всех точках виртуального облака. Более того, в каждой точке данного облака он успевает появиться и исчезнуть бесконечное число раз, имея каждый раз при этом разный импульс (частота появления электрона в данной точке облака пропорциональна величине $|\Psi|^2$). Поэтому в каждый, сколь угодно малый, но конечный промежуток времени электрон находится сразу во всех точках некоторой области фазового пространства – пространства (x, y, z, p_x, p_y, p_z) .

И если, например, нам удастся “поймать” электрон в какой-нибудь точке облака, то он будет иметь при этом различные значения импульса. И наоборот, в любой, сколь угодно малый, но конечный промежуток времени определённому значению импульса электрона соответствует бесконечное множество его местоположений внутри данного облака.

Иначе говоря, для любого момента времени t_0 не существует ни предела $\lim \mathbf{r}(t)$ при $t \rightarrow t_0$, ни предела $\lim \mathbf{p}(t)$ при $t \rightarrow t_0$. То есть хаотическое движение электрона внутри виртуального облака по своей сути является **движением разрывным в каждой точке**.

Здесь могут возникнуть, по крайней мере, три вопроса. Во-первых, какой физический смысл имеет дискретное движение? Во-вторых, в течение какого времени происходит один прыжок электрона? И, в-третьих, успеет ли электрон за столь короткое время ($\Delta t < 10^{-23}$ с) побывать во всех точках данной области фазового пространства?

Ответ на первый вопрос. Как уже отмечалось, в Хаосе понятие расстояния теряет физический смысл. Поэтому в Хаосе не может существовать непрерывное движение, а может существовать только движение, разрывное в каждой точке, то есть дискретное. Неопределённость в движении электрона есть остаток от его хаотического движения, ограниченного воздействием звёзд. Поэтому в границах этой неопределённости (в пределах виртуального облака) электрон движется дискретно.

Ответ на второй вопрос. В Хаосе понятие времени также теряет физический смысл. Поэтому вполне возможно, что хаотические “прыжки” электрона происходят не в реальном физическом времени. То есть физический смысл имеет не время одного прыжка, а лишь время, в течение которого изменяется состояние виртуального облака как целого. Например, время перемещения или расплывания облака.

Ответ на третий вопрос. Можно напомнить, что количество точек, расположенных на любом, сколь угодно малом отрезке ненулевой длины равно количеству точек, находящихся в бесконечном n -мерном пространстве. Математически более правильно говорить так: мощность множества всех точек, расположенных на отрезке (неважно какой длины), равна мощности множества всех точек, находящихся в n -мерном пространстве (лишь бы n было конечным числом). Мощность того и другого множества равна мощности континуума – мощности множества действительных чисел. Это означает, что между точками маленького отрезка ($\Delta t < 10^{-23} c$) и точками n -мерного пространства можно осуществить взаимнооднозначное отображение. Поэтому, двигаясь дискретно, электрон успеет (за любой, сколь угодно малый, но конечный промежуток времени) побывать во всех точках фазового пространства. Более того, он успеет побывать во всех точках фазового пространства бесконечное число раз. При этом частота его появления в каждой точке и определяет конкретный вид волновой Ψ -функции.

Конечно, можно задать ещё множество вопросов по поводу обоснованности введения в физику понятия дискретного движения. Но ведь в своё время также можно было задать

множество вопросов по поводу обоснованности введения в физику понятия непрерывного движения. Единственным обоснованием для введения в физику понятия непрерывного движения является то, что, используя это понятие, можно описать огромное количество различных физических процессов.

При помощи понятия непрерывного движения невозможно описать только процессы, происходящие в микромире. Поэтому, если нам удастся описать происходящие в микромире процессы, используя понятие дискретного движения, то это и будет достаточным основанием для введения в физику такого понятия.

2. Непрерывное движение. Рассмотрим, как происходит движение классического объекта по какой-либо определённой траектории. Предположим, что размерами объекта можно пренебречь, и будем рассматривать его как точечный (или же будем рассматривать движение центра масс). Пусть в момент времени t_1 объект находился в точке $\mathbf{r}(t_1)$. А в момент времени t_2 — в точке $\mathbf{r}(t_2)$. Если мы возьмём близкие значения времён t_1 и t_2 , то точки $\mathbf{r}(t_1)$ и $\mathbf{r}(t_2)$ будут также близко расположены. Предполагается, что существует предел $\lim_{t_2 \rightarrow t_1} \mathbf{r}(t_2) = \mathbf{r}(t_1)$ при $t_2 \rightarrow t_1$. Это означает, что движение классического объекта в пространстве-времени происходит вдоль непрерывной линии (траектории).

Предположение о существовании у тела определённой траектории движения лежит в самом фундаменте классической механики. И именно поэтому это предположение не имеет теоретического обоснования, а является лишь вполне естественной (и очень удобной) математической аппроксимацией экспериментальных данных.

Однако классическое движение частицы (материальной точки) по определённой траектории допускает также несколько иную физическую интерпретацию. А именно, частица движется следующим образом: в момент времени t она находится в точке $\mathbf{r}(t)$, затем она исчезает из этой точки и через бесконечно малое время dt появляется в бесконечно близко расположенной

точке $\mathbf{r}(t+dt) = \mathbf{r} + d\mathbf{r}$. Затем она исчезает из этой точки пространства и появляется в следующей.

Итак, предлагается рассматривать непрерывное движение как дискретное движение: *частица исчезает из одной точки пространства и через бесконечно малое время появляется в другой, бесконечно близко расположенной точке*. Такая интерпретация классического движения вполне допустима, так как она является лишь другим способом описания непрерывного движения. Таким образом, непрерывное (классическое) движение также можно рассматривать как частный случай дискретного движения.

§ 6.3. Соотношение неопределённостей

Рассмотрим поведение электрона, который находится в приграничной к Хаосу области пространства, то есть практически вне гравитационного поля Вселенной. Так как неопределённость в движении тел ограничена только существующими во Вселенной большими массами (создаваемым ими гравитационным потенциалом), то в данном случае неопределённость в движении электрона практически ничем не будет ограничена. Это означает, что электрон может двигаться хаотически (дискретно) по всей рассматриваемой нами области пространства. То есть за любой, сколь угодно малый, но конечный промежуток времени он успеет побывать (исчезнуть и появиться снова) во всех точках данной области пространства. Говорить о каком-либо значении скорости или координатах местоположения электрона в таком состоянии не имеет смысла. Он как бы “размазан” по всему пространству (находится сразу во всех точках пространства). Энергия электромагнитного поля, создаваемого электроном, практически равна нулю, так как она обратно пропорциональна размеру области, в которой размазан электрон.

Теперь рассмотрим случай, когда электрон находится в гравитационном поле Вселенной. Из-за того, что массы Вселенной ограничивают хаотическое движение электрона

посредством гравитационного потенциала, неопределённость в его движении будет конечна. При этом энергия электромагнитного поля, создаваемого электроном, будет уже отлична от нуля и примерно равна: $\varepsilon \approx e^2/r$, где r – характерный размер области, в которой электрон совершает дискретное движение (неопределённость его местоположения в пространстве). Чем меньше область, в которой локализован электрон, тем больше энергия, создаваемого им электромагнитного поля. Эта энергия образуется в результате работы, совершённой над электроном другими телами Вселенной. Таким образом, определённость в местоположении электрона (или какой-либо другой частицы) возникает в результате совершённой над ним работы.

Для того чтобы локализовать электрон в какой-либо определённой точке, нужно совершить над ним бесконечно большую работу, так как для точечного заряда энергия электромагнитного поля будет стремиться к бесконечности. Но совершённая работа всегда конечна. Поэтому всегда существует остаточная неопределённость в местоположении электрона. Это означает, что в данный, сколь угодно малый промежуток времени электрон находится с различной плотностью вероятности сразу во всех точках некоторой области пространства (во всех точках виртуального облака).

Чтобы определить местоположение электрона более точно, можно выстрелить по облаку, в котором дискретно движется электрон, высокоэнергетичным фотоном или какой-нибудь другой частицей, имеющей достаточно малую длину волны. При этом существует вероятность взаимодействия электрона с пролетающим фотоном. В тот момент, когда произойдёт это взаимодействие, вероятность нахождения электрона в какой-либо другой точке виртуального облака, в котором он только что двигался дискретно, станет равной нулю. А для того чтобы вероятность его нахождения в какой-либо другой точке снова стала отлична от нуля, требуется время, так как скорость перемещения электрона ограничена скоростью света.

Таким образом, электрон получает точную координату своего местоположения (правильней говорить – более определённую координату, так как длина волны фотона всегда отлична от нуля) только в процессе взаимодействия с объектом, имеющим достаточно малую длину волны, а, значит, и достаточно большую энергию.

Нужно отметить, что неопределённость в местоположении электрона внутри виртуального облака приводит к неопределённости в силе электромагнитного взаимодействия электрона со своим полем. А неопределённость электромагнитной силы, с которой электрон взаимодействует со своим полем, приводит к неопределённости в импульсе электрона. Но, с другой стороны, чем больше область, в которой размазан электрон, тем слабее электромагнитное поле, создаваемое им, и, значит, тем слабее сила, с которой электрон взаимодействует со своим полем. Это в свою очередь приводит к уменьшению неопределённости в импульсе электрона. Получается, что неопределённость в импульсе электрона обратно пропорциональна неопределённости в его местоположении.

Таким образом, мы дали качественное объяснение соотношению неопределённостей Гейзенберга: $\Delta x \Delta p_x \geq \hbar/2$. Необходимо подчеркнуть, что неопределённость в движении и местоположении электрона существует независимо от процесса измерения состояния электрона. С другой стороны, процесс измерения состояния электрона всегда изменяет его состояние, так как происходит обмен энергией между электроном и прибором [6;с.16].

§ 6.4. Модель электрона

В классической электродинамике не существует удовлетворительной модели электрона. Например, известно, что при ускорении заряд излучает электромагнитные волны и теряет при этом энергию. Поэтому ускорение заряда требует большей силы, чем ускорение нейтрального объекта той же массы. Это означает, что часть массы электрона имеет электромагнитное

происхождение, вызванное взаимодействием электрона со своим полем. Но если электрон взаимодействует со своим полем, то непонятно, какие силы удерживают его от разрыва. Такие силы неизвестны.

В классической электродинамике электрон считается точечным [5;с.69]. А полная энергия электромагнитного поля, создаваемого точечным зарядом, равна бесконечности. Поэтому, согласно классической электродинамике, электрон должен обладать также и бесконечной массой. Физическая бессмысленность этого результата показывает, что классическая электродинамика, как логически замкнутая теория, становится внутренне противоречивой при переходе к достаточно малым расстояниям [5;с.126].

В квантовой электродинамике электрон также считается точечным. Вот что написано об этом в 5-м томе Физической Энциклопедии: «Один из важных выводов, вытекающий из проверок квантовой электродинамики, связан с размерами электрона. Квантовая электродинамика предполагает электрон точечным. Ни в одном эффекте расхождения с этим допущением обнаружено не было. Физически это означает, что размеры электрона меньше 10^{-16} см» [18;т.5,с.545]. Однако, несмотря на то, что квантовая электродинамика существенно отличается от классической, в ней также существует проблема бесконечной собственной энергии точечного заряда. Таким образом, проблема остаётся нерешённой. Подробно эту тему обсуждает Ричард Фейнман в своих лекциях по физике [9;гл.28].

Для объяснения парадоксальности квантовых процессов мы ввели новое понятие – дискретное движение. Предлагается считать электрон дискретно движущейся точкой и поэтому находящейся в данный, сколь угодно малый, но конечный промежуток времени в определённой области фазового пространства. Квадрат же модуля волновой Ψ -функции показывает плотность вероятности обнаружить электрон в какой-либо точке обычного пространства. Получается, что точечный электрон находится одновременно во всех точках некоторой области пространства (виртуального облака) и при этом в каждой

точке имеет различные значения скорости. Распределение этих скоростей во всей области и определяет движение (в общем случае, перемещение и расплывание) данного облака.

Таким образом, в каждый физический момент времени (под физическим моментом времени мы будем подразумевать достаточно малый промежуток времени, например, $\Delta t < 10^{-23} \text{ с}$ – время, за которое свет проходит расстояние, равное атомному ядру) дискретное движение электрона характеризуется определённым непрерывным набором координат и импульсов. С этой точки зрения очевидно, что волновая Ψ -функция даёт полное описание движения электрона или любого другого квантового объекта. А уравнение Шрёдингера однозначно определяет изменение Ψ -функции во времени и поэтому даёт полное представление о движении.

Случайный характер квантовых процессов проявляется только при взаимодействии, когда, в зависимости от конкретных условий, квантовый объект приобретает более определённое значение местоположения или импульса. *Этот процесс имеет принципиально вероятностный характер.* Он будет рассмотрен в следующем параграфе.

Таким образом, электрон является точечным и взаимодействует со своим полем. Но электромагнитное поле, создаваемое дискретно движущимся точечным электроном, соответствует полю, создаваемому распределённым в конечной области пространства зарядом. И полная энергия такого электромагнитного поля конечна. Поэтому отпадает проблема бесконечно большой энергии точечного электрона. В дальнейшем мы увидим, что новая модель электрона позволит наглядно объяснить всю парадоксальность квантовых процессов.

§ 6.5. Редукция волновой Ψ -функции

Чтобы наглядно представить себе поведение квантовых объектов, рассмотрим детально, каким образом происходит процесс редукции волновой Ψ -функции. Именно этот процесс и является ключом к пониманию такого квантового парадокса, как

“действие на расстоянии”, или нелокальность квантовой механики. Для удобства описания предположим, что область, в которой электрон (или другой квантовый объект) совершает дискретное движение, достаточно большая, например комната. Как было отмечено в § 6.3, закон сохранения энергии не позволяет электрону иметь определённое местоположение, так как в этом случае энергия электромагнитного поля, создаваемого им, будет очень высока. В данном же случае, какой, сколь угодно малый, промежуток времени мы бы ни взяли, электрон успеет исчезнуть и появиться во всех точках комнаты.

Может возникнуть вопрос: а не противоречит ли движение электрона теории относительности? Нет, не противоречит, так как ни масса, ни заряд, ни энергия не перемещаются со скоростью, превышающей скорость света. Также невозможно, используя неопределённость в местоположении электрона, передать сигнал (информацию) быстрее скорости света. Подробно мы разберём этот вопрос в § 6.7. Нужно отметить, что теория относительности накладывает ограничение только на классическую скорость движения физических объектов. А хаотическое (дискретное) движение электрона не приводит к бесконечной скорости в классическом смысле, так как проявляется только в *неопределённости* его движения.

Предположим, мы всё же решили узнать, где находится электрон. И для этого в комнату выпустили фотон. Пусть для наглядности фотон будет иметь размер (то есть длину волны), примерно, футбольного мяча. Этот футбольный мяч пролетает через комнату, и существует вероятность его взаимодействия с электроном. Пусть в промежуток времени $[t_0; t_0 + \Delta t]$ произошло это взаимодействие. То есть в промежуток времени $[t_0; t_0 + \Delta t]$ электрон и фотон оказались в одном и том же месте комнаты (с точностью до размера футбольного мяча). Необходимо отметить, что электрон не находился в этом месте перед самым взаимодействием. Перед самым взаимодействием он всё ещё находился сразу во всех точках комнаты. Так вот, в промежуток времени $[t_0; t_0 + \Delta t]$ нам удалось электрон “поймать”. Мы как бы спровоцировали его на мгновение принять определённое

местоположение. Только во время взаимодействия у электрона появляется более точное местоположение. При этом область его локализации практически мгновенно уменьшается от размеров комнаты до размеров футбольного мяча. Происходит так называемая редукция волновой функции.

Следует отметить, что уменьшение области локализации электрона вызывает возрастание величины электромагнитного поля, создаваемого им. Это, в свою очередь, приводит к увеличению неопределённости в импульсе электрона.

Говоря о редукции волновой функции, мы использовали термин “мгновенно”. Но ведь абсолютно мгновенно ничего не происходит. Всегда всё происходит в какой-то отличный от нуля промежуток времени. В данном же случае нас интересует следующее: если взаимодействие произойдёт достаточно быстро, может ли скорость редукции (схлопывания) волнового пакета быть больше скорости света?

Скажем, размеры комнаты L , время взаимодействия Δt (в принципе, это время можно сколь угодно уменьшать). Возможно ли $L/\Delta t \gg c$? Да, возможно. *Скорость редукции (схлопывания) волновой Ψ -функции (волнового пакета) может быть сколь угодно больше скорости света.* Противоречит ли это теории относительности? Нет, не противоречит, потому что в данном случае ни энергия, ни заряд, ни масса не перемещаются быстрее света. Более того, необходимо отметить, что если бы редукция волновой ψ -функции происходила со скоростью меньшей, чем скорость света, то именно тогда возникли бы противоречия с теорией относительности.

Действительно, пусть произошло взаимодействие электрона с фотоном. Если бы в этот промежуток времени существовала отличная от нуля вероятность нахождения его в какой-либо другой точке комнаты, значит, в принципе, существовала бы возможность там обнаружить электрон. Но электрон как целое не может перемещаться в пространстве быстрее света. Поэтому, если время взаимодействия Δt , то вероятность нахождения электрона на расстоянии большем, чем $r = c\Delta t$ от места взаимодействия, равна нулю.

§ 6.6. Расщепление волнового пакета

Давайте ещё раз рассмотрим электрон, который совершает дискретное (хаотическое) движение в ограниченной области пространства, например в комнате. В каждый, сколь угодно малый, но конечный, промежуток времени электрон успевае́т побывать (исчезнуть и появиться) во всех точках комнаты.

Теперь предположим, что мы разделили комнату пополам непроницаемой для электрона перегородкой (перегородка так же, как и стены комнаты, не взаимодействует с электроном). Что в этом случае изменится в движении электрона? Ничто не изменится. Перегородка не будет мешать электрону двигаться по всей комнате, так как электрон движется не по непрерывной траектории, а дискретно: исчезает из одной точки и появляется в другой. (Примером такого дискретного движения в двух изолированных друг от друга областях может служить движение электрона в атоме – смотри рис. 14). Область же, в которой электрон совершает дискретное (хаотическое) движение, может перемещаться и расплываться в пространстве только непрерывно, так как скорость её перемещения и расплывания ограничена скоростью света.

Итак, у нас получились две изолированные друг от друга комнаты, внутри которых движется дискретно (хаотически) только *один электрон*. И если мы начнём отодвигать друг от друга эти комнаты, то электрон будет продолжать двигаться хаотически, находясь по-прежнему в обеих комнатах. Расстояние между комнатами можно сделать сколь угодно большим – электрон будет продолжать двигаться одновременно в двух комнатах.

Таким образом, если волновой пакет (виртуальное облако), в котором электрон совершает хаотическое (дискретное) движение, имеет возможность расщепиться на две половины, то он, расщепившись на два волновых пакета, может двигаться в различных направлениях. Электрон, совершая хаотическое движение в этих пакетах, также будет двигаться одновременно в различных направлениях.

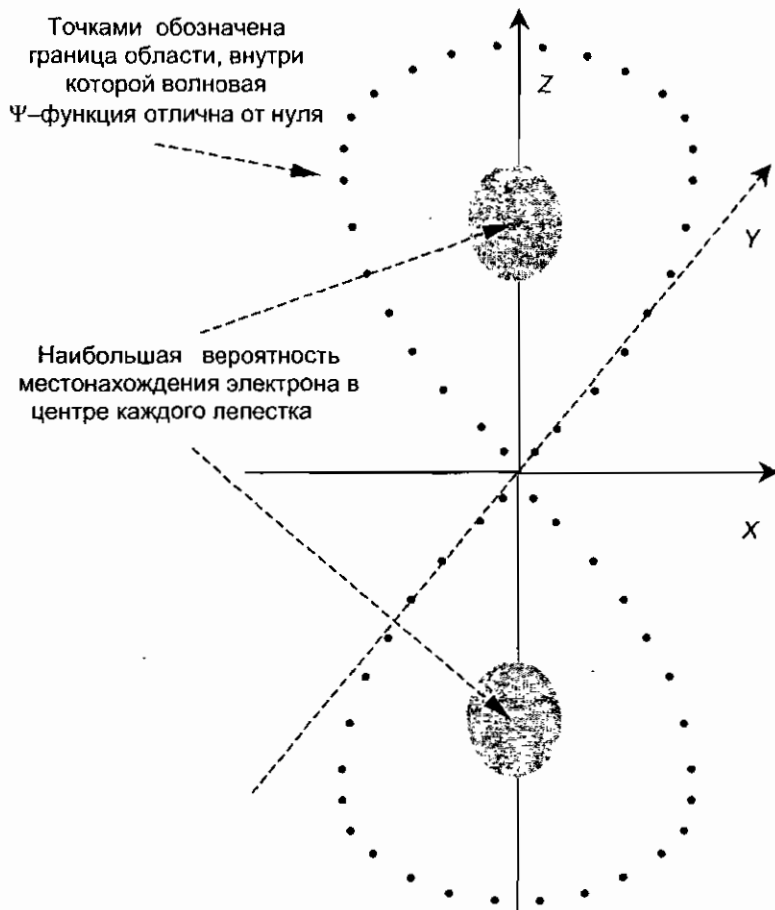


Рис. 14. Схематичное изображение распределения плотности вероятности местонахождения электрона в атоме для $2p$ -состояния [14;с.229]. На рисунке изображён разрез в плоскости XZ . Распределение плотности вероятности симметрично относительно оси Z , поэтому точно такой же график распределения будет и в плоскости YZ . Наибольшая вероятность местонахождения электрона – в центре каждого "лепестка", а в плоскости XU она равна нулю.

С точки зрения классического (непрерывного) движения невозможно объяснить, каким образом электрон может находиться в обоих лепестках, не пересекая при этом плоскость XU .

Например, он сможет пройти через два отверстия одновременно (см. рис. 12). Если при дальнейшем движении эти волновые пакеты соединятся на детекторе, то произойдёт их интерференция. Хотя электрон при этом только один. Движение любого другого квантового объекта (например, фотона) будет происходить аналогично.

Рассмотрим теперь “парадоксальное” поведение фотонов в эксперименте, описанном в § 5.6. С точки зрения дискретного движения такому поведению фотонов можно дать следующее объяснение. В данном эксперименте *каждый фотон, расщепившись на светодетекторе, движется по различным путям (в виде двух волновых пакетов) к детектору*. И на детекторе эти волновые пакеты интерферируют между собой.

Рассмотрим теперь, что произойдёт, если экспериментатор перекроет один из двух путей (по которым движется расщеплённый волновой пакет) дополнительным детектором, то есть прибором, который взаимодействует с фотоном. В данном случае для фотона будут две возможности.

Во-первых, существует вероятность, что произойдёт взаимодействие фотона с дополнительным детектором. В результате этого взаимодействия фотон получит определённое местоположение и, таким образом, потеряет возможность двигаться по другому пути.

Во-вторых, существует вероятность, что взаимодействие не произойдёт, и в этом случае фотон, потеряв возможность двигаться по первому пути, будет двигаться только по второму.

Получается, что, перекрыв путь одному волновому пакету (при этом взаимодействие с дополнительным детектором может либо произойти, либо нет), экспериментатор мгновенно изменяет волновую функцию другого волнового пакета.

Возникает вопрос: а не противоречит ли такое “мгновенное действие на расстоянии” (нелокальность квантовой механики) теории относительности, запрещающей передачу сигнала быстрее света? Возможность такой “мгновенной” передачи сигнала, используя нелокальность квантовой механики, мы рассмотрим в следующем параграфе.

§ 6.7. Нелокальность квантовой механики

Сейчас мы рассмотрим гипотетический случай, в котором, однако, нет ничего принципиально невозможного. Два экспериментатора (условно назовём их “землянин” и “марсианин”), желая использовать нелокальность квантовой механики для мгновенной передачи сигналов, решили осуществить следующий опыт. На Юпитере они установили лазер и светоделиитель, а на Земле и на Марсе – по лаборатории. Светоделиитель расщепляет волновой пакет (в котором дискретно движется фотон) на две неравные части. И скажем, вероятность обнаружить фотон в волновом пакете на Земле равна 60%, а на Марсе – 40%.

Принципиальная идея эксперимента проста. Из лазера на Юпитере в известное для обоих экспериментаторов время вылетает один фотон, затем он попадает на светоделиитель и, расщепившись на два волновых пакета, движется одновременно к Земле и Марсу. Причём, в лабораторию на Земле волновой пакет должен прилететь на одну секунду раньше, чем в лабораторию на Марсе. Время ожидаемого прибытия волнового пакета известно с высокой степенью точности.

Итак, фотон, дискретно двигаясь в двух волновых пакетах, движется одновременно к Земле и Марсу. Перед тем как волновой пакет достигнет Земли, землянин переключает детектором смену путь. Здесь возможны два варианта.

Во-первых, произойдёт взаимодействие фотона с земным детектором (вероятность такого процесса – 60%), тогда вероятность обнаружить фотон в марсианском волновом пакете сразу упадёт до нуля.

Во-вторых, взаимодействие *не произойдёт* (вероятность такого процесса – 40%). Тогда вероятность обнаружить фотон в марсианском волновом пакете сразу возрастёт до 100%. И в любом случае состояние волновой функции марсианского волнового пакета изменится.

Таким образом, переключая путь волновому пакету на Земле, землянин мгновенно изменяет состояние волнового

пакета на Марсе. И если марсианин сможет как-то обнаружить это изменение, то это означает, что в принципе возможна мгновенная передача сигнала.

Например, если землянин не перекрывает путь своему волновому пакету (тем самым он не изменяет состояние марсианского), то это означает “ноль”. А если землянин перекрывает волновому пакету путь (тем самым мгновенно изменяя состояние марсианского пакета), то это означает “единицу”.

Задача марсианина состоит в том, чтобы по состоянию своего волнового пакета определить, перекрыл или нет землянин путь своему волновому пакету. И в результате узнать, какую информацию (“единицу” или “ноль”) землянин хотел ему передать. Назначение данного эксперимента как раз и заключается в том, чтобы выяснить, возможна или нет передача сигнала таким способом.

Итак, эксперимент начался. Марсианин знает время, ожидаемого прибытия волновых пакетов на Землю и Марс. Он знает, что шансов “поймать” фотон у его коллеги на Земле – 60%. Но он заранее не знает, как поступит землянин (перекроет или нет путь волновому пакету). И в ожидаемое время марсианин перекрывает путь своему волновому пакету и хочет извлечь по результатам этого процесса какую-либо информацию.

Если марсианин не поймает фотон, то он сможет сделать два вывода. Во-первых, его земной коллега перекрыл путь волновому пакету и поймал фотон. А во-вторых, его коллега не перекрыл путь волновому пакету, но марсианин всё равно не поймал фотон (ведь в этом случае вероятность поймать фотон – 40%), и сейчас фотон, возможно, продолжает лететь дальше по курсу Юпитер-Земля.

Если же марсианин “поймает” фотон, то он сможет сделать однозначный вывод о том, что землянин фотон не “поймал”. Но он никак не сможет узнать, перекрывал ли его коллега путь волновому пакету или нет. А ведь ему нужно узнать именно это. Таким образом, марсианин всё-таки не получит никакой информации.

Поразмыслив над неудачей эксперимента, можно предположить следующее. Перекрывая путь одному волновому пакету, мы мгновенно изменяем волновую Ψ -функцию второго волнового пакета. Однако из-за вероятностного характера волновой Ψ -функции это изменение трудно обнаружить. Поэтому мы несколько усложним эксперимент. Пусть теперь каждую секунду от светоделиителя на Юпитере вылетает расщепившийся фотон. С точностью до долей секунды известно время прибытия каждого волнового пакета в каждую лабораторию (на Земле и на Марсе). И теперь землянин попытается передать марсианину один бит информации, уже используя какой-нибудь сложный код (разумеется, известный его коллеге). Например, сначала он перекрывает путь первым десяти волновым пакетам. Затем открывает путь следующим двадцати. Затем снова перекрывает путь следующим десяти и т. д. Такая сложная комбинация, например, будет означать "единицу".

Своими действиями землянин в течение минуты изменяет состояние большого числа марсианских волновых пакетов. Может, в этом случае марсианин что-нибудь заметит? Если он заметит хоть что-нибудь, значит, существует реальная возможность передать информацию быстрее света.

Между результатами действий землянина и марсианина будет чёткая связь (корреляция). Если землянин поймает фотон, то его коллега однозначно фотон не поймает. А если землянин *будет ловить* и не поймает фотон, то его коллега однозначно фотон поймает. Однако марсианин всё равно не получит никакой информации.

Действительно, землянин поймает ровно 60% от всех фотонов, которые он попытается поймать. *Но независимо от действий землянина, марсианин в любом случае поймает ровно 40% от всех фотонов, которые он попытается поймать.* То есть он поймает столько же фотонов, сколько бы он поймал, если бы землянин просто сидел сложа руки (перекрыв или не перекрыв при этом путь волновым пакетам).

Так как землянин *не может управлять* результатами своих измерений, то он, следовательно, и не может послать никакой информации марсианину.

Таким образом, несмотря на существующую связь (корреляцию) между результатами наблюдений экспериментаторов, каждый из них будет наблюдать совершенно случайный (землянин – с вероятностью 60%, а марсианин – с вероятностью 40%) процесс взаимодействия волнового пакета с детектором. Никакой передачи информации здесь не будет.

Итак, дальное действие существует, но оно, с точки зрения удалённого наблюдателя, принципиально не наблюдаемо. Поэтому дискретное движение квантового объекта внутри волновых пакетов не противоречит теории относительности, запрещающей передачу сигналов быстрее света.

§ 6.8. Парадокс Эйнштейна–Подольского–Розена

Рассмотрим с новой точки зрения парадокс Эйнштейна – Подольского – Розена, изложенный в § 5.5. Система, состоящая из двух квантовых объектов A и B и описываемая единой волновой Ψ_{AB} -функцией, самопроизвольно распадается. И квантовые объекты разлетаются в противоположные стороны.

В этом случае каждый квантовый объект будет двигаться дискретно, удаляясь одновременно во все стороны от места распада. Согласно законам сохранения энергии, импульса и момента импульса дискретное движение одного квантового объекта будет взаимосвязано (скоррелировано) с дискретным движением другого. Можно отметить, что эта взаимосвязь есть также следствие того, что и система AB перед распадом двигалась дискретно.

Корреляция между данными объектами будет существовать сколь угодно долго, пока не произойдёт взаимодействие и как следствие этого – редукция волновой функции Ψ_{AB} . При этом осуществится какое-нибудь состояние, описываемое общей волновой Ψ_{AB} -функцией. Только в этом случае квантовые объекты A и B станут действительно не зависимыми.

Таким образом, производя измерение над одним квантовым объектом (в действительности, мы производим измерение над всей системой, так как объекты не разъединены), мы мгновенно изменяем состояние другого квантового объекта.

Из-за того, что процесс измерения состояния квантового объекта имеет принципиально вероятностный характер, такое “действие на расстоянии” с точки зрения удалённого наблюдателя в принципе не наблюдаемо. Тем не менее, *между результатами измерений двух разных наблюдателей будет существовать определённая корреляция (взаимосвязь).*

§ 6.9. Почему время необратимо?

Все уравнения фундаментальной физики симметричны относительно направления времени. Не является исключением и уравнение Шрёдингера. Это означает, что если любой физический процесс обратить во времени, то такой, обращённый во времени процесс, будет также удовлетворять уравнениям физики. Тем не менее, процессы, происходящие в природе, часто необратимы. Почему?

В современной физике существуют объяснения того факта, что процессы, происходящие с участием достаточно большого числа частиц, необратимы во времени. Например, при передаче тепла от более нагретого тела к менее нагретому. Необратимость таких процессов имеет вероятностный характер. Это означает, что обратный во времени процесс, в принципе, возможен (то есть он не противоречит уравнениям и законам физики), но крайне маловероятен.

Однако не существует *ни одного* объяснения необратимости элементарных физических процессов. Например, процессов, происходящих при взаимодействии только двух частиц.

Вот, к примеру, что пишет про необратимость времени Фейнман в своих лекциях по физике: «Насколько нам сейчас известно, причиной этой необратимости является огромное число частиц, принимающих участие в обычных процессах. Но если бы

мы видели отдельные молекулы, то не могли бы сказать, работает ли вся машина вперёд или назад» [8;с.475]. И далее: «Предположим, что мы засняли на киноленту какой-то процесс, происходящий с веществом, и запустили плёнку задом наперёд. Тогда ни один из физиков не мог бы сказать: “Это противоречит физическим законам, происходит что-то не то”. Если деталей не видно, то всё становится совершенно ясно. Например, когда на тротуар падает яйцо и разбивается совершенно вдребезги, то вы сразу скажете: “Этот процесс необратим; если мы заснимем его на киноленту и прокрутим её наоборот, то яйцо само соберётся в скорлупу, которая тут же склеится обратно, а это бессмыслица!” Но если мы видим отдельные атомы, то всё кажется нам полностью обратимым. Открыть эту симметрию было, конечно, гораздо труднее, чем другие, но всё-таки то, что фундаментальные законы физики, управляющие атомами и молекулами, обратимы во времени, по-видимому, верно» [8;с.476].

Однако, несмотря на то, что фундаментальные законы физики обратимы во времени, тем не менее, всё-таки существуют элементарные физические процессы, которые необратимы. Например, процесс редукции волновой Ψ -функции. И новая модель дискретного движения даёт наглядное представление о необратимости таких процессов, то есть о необратимости времени на самом фундаментальном уровне. С точки зрения этой модели сразу становится ясно, почему редукция волнового пакета является необратимым процессом или, иначе говоря, процессом несимметричным относительно направления времени.

В качестве примера рассмотрим электрон, который совершает дискретное (хаотическое) движение в некоторой области пространства. То есть он существует в виде виртуального облака (смотри рис. 15). И если, например, произойдёт взаимодействие электрона с пролетающим фотоном, то размеры виртуального облака могут уменьшиться практически до нуля за сколь угодно малое время. Очевидно, что обратный во времени процесс физически невозможен, так как скорость расплывания виртуального облака ограничена, по крайней мере, скоростью света.

Таким образом, если процесс редукции волновой Ψ -функции (виртуального облака) обратить во времени, то такой, обращённый во времени, процесс *будет противоречить законам теории относительности*.

Поэтому процесс редукции волновой Ψ -функции делает физическое взаимодействие необратимым во времени. Особенно наглядно необратимость квантовых процессов проявляется при редукции расщеплённого волнового пакета.

Можно отметить, что при взаимодействии классических объектов редукция волновой Ψ -функции практически незаметна, так как неопределённость в их движении пренебрежимо мала. Поэтому необратимость времени в классической механике можно не учитывать.

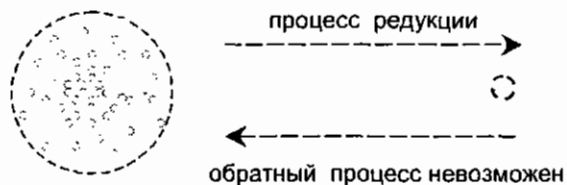


Рис. 15. Наглядная иллюстрация необратимости времени.

Электрон совершает дискретное движение в некоторой области пространства, существуя в виде виртуального облака (слева). Допустим, произошло взаимодействие электрона с физическим объектом, имеющим достаточно малую длину волны, например с γ -квантом. В результате электрон получит более точную координату своего местоположения, и размеры виртуального облака уменьшатся практически мгновенно до очень малой величины (справа). Очевидно, что обратный во времени процесс физически невозможен. Потому что для его осуществления потребуется определённое время, так как скорость расплывания виртуального облака ограничена скоростью света.

§ 6.10. Корпускулярно – волновой дуализм

В предыдущих параграфах мы рассмотрели примеры необычного поведения квантовых объектов с новой точки зрения. Суть этой точки зрения (интерпретации) состоит в следующем.

Окружающее нас пространство-время есть результат наложения гравитационного поля Вселенной на Хаос (§ 6.1). Гравитационный потенциал, создаваемый всей массой Вселенной, ограничивает неопределённость в хаотическом (дискретном) движении тел.

Так как масса Вселенной всё же конечна, то существует оставшаяся от Хаоса неопределённость в движении. Поэтому квантовый объект движется хаотически (дискретно): в момент времени t он исчезает из точки $\mathbf{r}(t)$ и через бесконечно малый промежуток времени dt появляется в точке $\mathbf{r}(t + dt)$, которая в общем случае может находиться сколь угодно далеко от точки $\mathbf{r}(t)$. В результате, за любой, сколь угодно малый, но конечный, промежуток времени квантовый объект успеет исчезнуть и появиться во всех точках некоторой области пространства (волнового пакета) (§ 6.2).

Таким образом, квантовый объект является *дискретно движущейся частицей*.

Скорость перемещения и скорость расплывания волнового пакета ограничена скоростью света, поэтому движение волнового пакета (виртуального облака) является непрерывным. В общем случае волновой пакет может расщепиться (разделиться) на две или более частей (волновых пакетов). Образовавшиеся волновые пакеты могут двигаться в различных направлениях сколь угодно долго (§ 6.6). При этом квантовый объект будет совершать дискретное движение: за сколь угодно малый, но конечный, промежуток времени он успеет появиться и исчезнуть во всех точках, находящихся внутри этих волновых пакетов.

Иначе говоря, *один квантовый объект (например, электрон или фотон) может двигаться одновременно в нескольких различных направлениях*. То есть волновой пакет (в котором дискретно движется квантовый объект) ведёт себя как волна.

При взаимодействии с классическим объектом (физическим объектом, неопределённость в местоположении которого пренебрежимо мала) неопределённость в местоположении квантового объекта уменьшается практически мгновенно до сколь угодно малой величины. Происходит так называемая редукция волновой Ψ -функции (§ 6.5). Этот процесс *принципиально необратим во времени* (§ 6.9).

Таким образом, в новой интерпретации предлагается рассматривать движение квантового объекта как комбинацию двух движений: непрерывного движения волновых пакетов и дискретного движения квантового объекта внутри этих волновых пакетов. Как было показано в § 6.7, дискретное движение не противоречит теории относительности.

Итак, новая интерпретация квантовой механики позволяет объяснить, во-первых, откуда взялась неопределённость в микромире. Во-вторых, как неделимый электрон ухитряется пройти через два отверстия одновременно. В-третьих, как физически осуществляется механизм дальнего действия (нелокальность квантовой механики). В-четвертых, что в действительности описывает волновая Ψ -функция, и как происходит процесс её редукции. В-пятых, почему квантовый объект ведёт себя то как частица, а то как волна (корпускулярно-волновой дуализм). И, наконец, в-шестых, новая интерпретация объясняет необратимость времени на самом фундаментальном уровне (например, для процессов происходящих при участии только двух частиц).

Но наиболее важно в данном случае то, что из новой интерпретации квантовой механики вытекает *принципиально новое следствие*, которое непосредственно не содержится в квантовой механике. А именно, при приближении к большой массе неопределённость в движении квантового объекта *будет уменьшаться*, и, следовательно, *будет уменьшаться значение постоянной Планка*. Это отражено в уравнениях (2.9) и (2.10). И экспериментально проверив эти уравнения, можно установить, верна или нет новая интерпретация.

Глава 7

Квантовая Теория Гравитации

Исходя из принципа Маха, во 2-й главе мы пришли к выводу, что вблизи большой массы *уменьшается* неопределённость в движении частицы. А из этого, в свою очередь, следует, что вблизи большой массы *траектория движения частицы будет искривлена*. Поэтому в рамках новой теории гравитационное взаимодействие можно рассматривать как *исключительно квантовый эффект*. Такой подход к гравитации и будет последовательно изложен в этой главе.

§ 7.1. Главный недостаток общей теории относительности с точки зрения квантовой механики

С точки зрения общей теории относительности предполагается, что в гравитационном поле изменяется пространственно-временной масштаб (соответственно, изменяется и выражение для квадрата интервала). Например, вблизи большой массы замедляется течение времени, а также изменяются размеры тел.

Рассмотрим конкретный пример. В современной физике промежуток времени длительностью в одну секунду определяется следующим образом. «Атомная секунда равна

9192631770 периодам излучения, соответствующего энергетическому переходу между двумя уровнями сверхтонкой структуры основного состояния атома цезия $^{133}_{55}\text{Cs}$ » [18, т.4; с.484]. Таким образом, эталон времени определяется через период излучения определённой спектральной линии атома цезия. А с точки зрения общей теории относительности вблизи большой массы скорость течения времени замедляется. Скажем, если на достаточно большом удалении от большой массы пройдёт 1 секунда, то вблизи большой массы пройдут только доли секунды. Следовательно, вблизи массы увеличится период излучения спектральной линии атома цезия, то есть понизится частота излучения данной спектральной линии. Соответственно, в той же самой пропорции понизятся и частоты излучения других атомов.

В то же время в общей теории относительности предполагается, что фундаментальные физические постоянные ($c, \hbar, m, e \dots$) вблизи большой массы не изменяются. И здесь возникает следующее противоречие с квантовой механикой. С точки зрения квантовой механики частота излучения атома полностью определяется величинами $c, \hbar, e, m_e, m_p, m_n$ (здесь m_e, m_p, m_n – соответственно массы покоя электрона, протона и нейтрона). А если все эти величины остаются в гравитационном поле теми же самыми, то, следовательно, частоты излучения атомов также должны оставаться теми же самыми. Почему же тогда время вблизи большой массы замедляется?

Таким образом, главный недостаток общей теории относительности с точки зрения квантовой механики состоит в следующем. В рамках общей теории относительности время рассматривается как самостоятельная физическая величина, полностью независимая от протекания конкретных физических процессов. Хотя, с другой стороны, современный эталон времени определяется через период излучения определённой спектральной линии.

Аналогичным недостатком общей теории относительности является также то, что в ней и расстояние рассматривается как самостоятельная физическая величина, полностью независимая от реальных физических объектов. Хотя, например, в качестве

эталона длины в современной физике принята величина в один метр, которая, начиная с 1983 года, определяется следующим образом. «В 1983 17-я Генеральная конференция по мерам и весам приняла определение метра как расстояния, проходимого в вакууме плоской электромагнитной волной за $1/299\,792\,458$ долю секунды» [18, т.3; с.124]. Таким образом, эталон длины определяется через эталон времени и величину скорости света. До 1983 года метр определялся через длину волны определённой спектральной линии атома криптона. А до 1960 года – как расстояние между двумя штрихами на платино-иридиевом бруске, то есть эталон метра был связан с размерами атома.

Указанный выше недостаток общей теории относительности был вполне ясен уже Эйнштейну. Вот что он писал об этом в своей автобиографии: «Сделаем теперь критическое замечание о теории в том виде, как она охарактеризована выше. Можно заметить, что теория вводит (помимо четырёхмерного пространства) два рода физических предметов, а именно: 1) масштабы и часы, 2) всё остальное, например электромагнитное поле, материальную точку и т. д. Это в известном смысле нелогично; собственно говоря, теорию масштабов и часов следовало бы выводить из решений основных уравнений (учитывая, что эти предметы имеют атомную структуру и движутся), а не считать её независимой от них. Обычный образ действия имеет, однако, своё оправдание, поскольку с самого начала ясна недостаточность принятых постулатов для обоснования теории масштабов и часов. Эти постулаты не настолько сильны, чтобы из них можно было вывести достаточно полные уравнения для физических процессов. Если вообще не отказываться от физического толкования координат (что само по себе было бы возможно), то лучше уж допустить такую непоследовательность, но с обязательством избавиться от неё на дальнейшей стадии развития теории. Однако этот грех нельзя узаконивать до такой степени, чтобы разрешать, например, пользоваться представлением о расстоянии, как о физической сущности особого рода, существенно отличной от других физических величин (сводить физику к геометрии и

т. п.» [16;с54,55]. То есть Эйнштейн прямо говорил, что нельзя сводить физику к геометрии, то есть нельзя рассматривать “масштабы и часы” отдельно от физических процессов. Он также выражал надежду на то, что в дальнейшем теории “масштабов и часов” можно будет вывести, учитывая то, что они имеют атомную структуру.

Общая теория относительности создавалась Эйнштейном в 1906-1916 годах, то есть раньше, чем была создана квантовая механика. Во время создания общей теории относительности атомная структура вещества ещё находилась только на стадии изучения. Поэтому с исторической точки зрения вполне оправдано то, что в общей теории относительности “масштабы и часы” первоначально рассматривались отдельно (независимо) от реальных физических объектов. Однако в настоящее время, когда атомная структура вещества хорошо изучена, очевидно, что нельзя ни время, ни расстояние рассматривать как самостоятельные физические сущности в отрыве от протекания конкретных физических процессов.

Именно такой подход к гравитационному взаимодействию и будет предложен в этой главе. *Вблизи большой массы изменяются скорость света, постоянная Планка, а также массы покоя элементарных частиц. И именно это, в свою очередь, приводит к изменению пространственно-временного масштаба.*

В лекциях по гравитации Фейнман также высказывал мысль о том, что, возможно, естественный пространственно-временной масштаб, то есть масштаб, выраженный в величинах c , \hbar , m (здесь m – масса покоя электрона или какой-либо другой частицы), определяется распределением всех масс во Вселенной, и, следовательно, немного изменяется вблизи большой массы. Исходя из уравнений общей теории относительности, Фейнман пытался угадать, как должен зависеть пространственно-временной масштаб от распределения всех масс во Вселенной, чтобы в результате прийти к уравнениям общей теории относительности. Но его попытка не удалась. Тем не менее, его рассказ об этом достаточно интересен [10;п.5.4].

Мы же не ставили перед собой цель согласовать уравнения общей теории относительности с квантовой механикой. У нас была другая цель – построить новую физическую теорию на основе принципа Маха. И при построении такой теории мы пришли к выводу, что скорость света, постоянная Планка, а также массы покоя элементарных частиц должны зависеть от распределения всей материи во Вселенной.

Таким образом, мы пришли к выводу, что пространственно-временной масштаб (который с точки зрения квантовой механики всегда можно выразить в виде некоторой комбинации величин c , \hbar , m) внутри нашей Вселенной полностью определяется распределением всей материи во Вселенной. И с этой точки зрения можно сформулировать принципиально новый подход к гравитации. *Гравитация – это эффект искривления пространства-времени (которое проявляется в том, что изменяются величины c , \hbar , m), вызванный локальными неоднородностями в распределении материи на общем фоне распределения материи во Вселенной.*

§ 7.2. Механизм Всемирного тяготения

Известно, что все тела притягивают друг друга, но не известно, *почему* это происходит. Закон Всемирного тяготения Ньютона (или его модификация, сделанная Эйнштейном в общей теории относительности) позволяет рассчитать, *как* будет двигаться то или иное тело в гравитационном поле. Этот закон очень хорошо описывает, *как* происходит гравитационное взаимодействие. Но он ни слова не говорит о том, *почему* тела притягивают друг друга. Иначе говоря, какой физический “механизм” имеет гравитационное притяжение?

Вот что писал об этом, например, Ричард Фейнман в своих лекциях по физике: «До сих пор мы только описывали, как Земля обращается вокруг Солнца, но ни слова не сказали о том, *что заставляет её двигаться*. Ньютон не строил догадок об этом; ему было достаточно открыть, *что* происходит, не входя в

механизм происходящего. Но и никто другой с тех пор никакого механизма не открыл» [7;с.137].

А в рамках новой теории можно дать простое и наглядное объяснение механизму гравитационного взаимодействия.

Рассмотрим поведение электрона (или любого другого квантового объекта) в гравитационном поле. Допустим, он локализован в окрестности точки A . Существует вероятность, что через некоторое время он окажется в окрестности точки B . Существует также вероятность обратного перехода. В пространстве с постоянным гравитационным потенциалом эти вероятности равны.

Если же величина гравитационного потенциала в точке B меньше (смотри рис. 16), чем в точке A ($\Phi_B < \Phi_A$, а $|\Phi_B| > |\Phi_A|$), то, как следует из уравнения (2.9), значение постоянной Планка в точке B меньше, чем в точке A . Это, в свою очередь, означает, что и неопределённость движения электрона в точке B меньше, чем в точке A . Следовательно, вероятность перехода электрона из окрестности точки A в окрестность точки B *больше*, чем обратно.

Поэтому с точки зрения новой теории гравитационное взаимодействие можно рассматривать как квантовый эффект. Вблизи большой массы неопределённость в движении электрона



Рис. 16. Механизм гравитационного притяжения.

Предположим, частица находится в окрестности точки A . Существует вероятность, что через некоторое время она окажется в окрестности точки B . Существует также вероятность обратного перехода. И если точка B находится ближе к массе M , то неопределённость движения частицы в этой точке немного меньше, чем в точке A . Поэтому вероятность перехода частицы из окрестности точки A в окрестность точки B больше, чем обратно.

(или другой частицы) уменьшается, вследствие чего электрон движется в сторону большой массы.

Предложенный механизм гравитационного взаимодействия не только позволяет объяснить, почему все тела притягивают друг друга. Он также позволяет объяснить, почему гравитационное взаимодействие такое слабое. Это есть следствие того, что неопределённость в движении электрона (или любой другой частицы) ограничена, в основном, удалёнными массами Вселенной. А близко расположенные тела уменьшают неопределённость в его движении на очень незначительную в процентном отношении величину.

Обычно считается, что между теорией гравитации и квантовой механикой нет ничего общего. А в рамках новой теории гравитационное взаимодействие – это исключительно квантовый эффект!

Квантовый механизм гравитационного взаимодействия можно рассмотреть и с другой точки зрения. В качестве примера опять рассмотрим движущийся электрон. Из-за того, что в движении электрона есть неопределённость, он обладает волновыми свойствами. То есть движущийся электрон представляет собой движущуюся волну, которая может быть описана с помощью волновой Ψ -функции.

В однородном пространстве (в пространстве с одинаковым гравитационным потенциалом) волна будет распространяться по прямой линии. Но вблизи большой массы неопределённость в движении электрона уменьшится, и, следовательно, уменьшится его длина волны. В результате траектория движения электрона будет искривлена.

Далее в этой главе мы рассчитаем движение электрона (или другой частицы) в гравитационном поле, исходя из предложенного выше квантового механизма гравитационного взаимодействия. А затем сравним полученное уравнение движения с уравнениями теории гравитации Ньютона и теории гравитации Эйнштейна.

§ 7.3. Принцип наименьшего действия

В наиболее общей форме фундаментальные законы движения могут быть выражены в виде принципа наименьшего действия (или принципа Гамильтона) [4;с.10].

Например, движение частицы массы m в потенциальном поле $U(x,y,z)$ в рамках механики Ньютона может быть описано следующими тремя уравнениями:

$$m \frac{dV_x}{dt} = -\frac{\partial U}{\partial x}; \quad m \frac{dV_y}{dt} = -\frac{\partial U}{\partial y}; \quad m \frac{dV_z}{dt} = -\frac{\partial U}{\partial z} \quad (7.1)$$

Или в векторном виде: $m \frac{d\vec{V}}{dt} = -\vec{\nabla}U$, где $\vec{\nabla}$ так называемый

градиент – векторный оператор: $\vec{\nabla} = \left(\frac{\partial}{\partial x}, \frac{\partial}{\partial y}, \frac{\partial}{\partial z} \right)$.

Но, с другой стороны, движение частицы может быть описано с помощью принципа наименьшего действия. Суть этого принципа состоит в следующем. Предположим, в момент времени t_1 частица находилась в точке (x_1, y_1, z_1) , а в момент времени t_2 она находилась в точке (x_2, y_2, z_2) . Движение частицы можно изобразить в виде линии (графика) в четырёхмерном пространстве (x, y, z, t) , проходящей через точки $a = (x_1, y_1, z_1, t_1)$ и $b = (x_2, y_2, z_2, t_2)$. Так вот, принцип наименьшего действия утверждает, что тело будет двигаться из точки a в точку b по такой траектории, вдоль которой будет иметь минимум следующая величина S (она и называется действием):

$$S = \int_{t_1}^{t_2} \left[\frac{mV^2}{2} - U(x, y, z) \right] dt = \min \quad (7.2)$$

Это уравнение можно представить и в вариационном виде:

$$\delta S = \delta \int_{t_1}^{t_2} \left[\frac{mV^2}{2} - U(x, y, z) \right] dt = 0 \quad (7.3)$$

Величина, стоящая в квадратных скобках под знаком интеграла, называется функцией Лагранжа, или лагранжианом:

$$L = \frac{mV^2}{2} - U(x, y, z)$$

С математической точки зрения система уравнений (7.1) полностью эквивалентна вариационному уравнению (7.3). Кратко эта тема излагается в курсе теоретической физики Л.Д. Лапдау и Е.М. Лифшица [4;с.10-13]. Более подробно – в фейнмановских лекциях по физике [9;гл.19].

В релятивистском случае действие для свободной частицы имеет следующий вид [5;с.44]:

$$S = -mc \int_a^b ds \quad (7.4)$$

Учитывая выражение (1.20), интервал ds можно представить в виде:

$$ds = \sqrt{c^2 dt^2 - dx^2 - dy^2 - dz^2} = \sqrt{c^2 dt^2 - V^2 dt^2} = c dt \sqrt{1 - \frac{V^2}{c^2}}$$

И, следовательно, выражение для действия (7.4) можно представить в виде интеграла по времени от функции Лагранжа следующим образом:

$$S = - \int_{t_1}^{t_2} mc^2 \sqrt{1 - \frac{V^2}{c^2}} dt \quad (7.5)$$

В самом общем виде действие может быть представлено в виде следующего интеграла, взятого вдоль траектории движения [4;с.180]:

$$S = \int (\vec{p} \cdot d\vec{r} - E dt) \quad (7.6)$$

Здесь \vec{p} – импульс частицы, а E – её полная энергия (пределы интегрирования мы будем для краткости опускать).

До создания квантовой механики считалось, что представление уравнений движения в виде принципа наименьшего действия – это удобный математический приём. Но лишь после создания квантовой механики стал ясен его физический смысл. Движение частицы в квантовой механике описывается волновой Ψ -функцией, которая в общем случае

может быть представлена как сумма (или интеграл) плоских волн вида:

$$A \cdot \exp \left[-\frac{i}{\hbar} (Et - \vec{p} \cdot \vec{r}) \right]$$

Здесь величина A — это амплитуда волны, а величина $\varphi = -(Et - \vec{p} \cdot \vec{r})/\hbar$ — её фаза. Траектория распространения волны, как известно, определяется следующим условием: *разность фаз в конце и начале пути должна быть минимальна*, иначе говоря, должна быть минимальна оптическая длина пути [6; с.36] (смотри также § 4.7). Это условие можно представить в виде уравнения:

$$\varphi = -\int \frac{Edt - \vec{p} \cdot d\vec{r}}{\hbar} = \min \quad (7.7)$$

Или в вариационном виде:

$$\delta\varphi = -\delta \int \frac{Edt - \vec{p} \cdot d\vec{r}}{\hbar} = 0 \quad (7.8)$$

Если постоянная Планка не меняется при движении частицы, то её можно вынести из-под знака интеграла. А учитывая выражение для действия (7.6), в результате получаем:

$$\delta\varphi = \frac{1}{\hbar} \delta \int (\vec{p} \cdot d\vec{r} - Edt) = \frac{1}{\hbar} \delta S = 0 \quad (7.9)$$

Таким образом, квантовая механика раскрывает физический смысл принципа наименьшего действия. *Движение частицы представляет собой движение волны, описываемое волновой Ψ -функцией. А волна движется так, чтобы разность фаз в конце и начале пути была минимальна. И так как действие изменяется пропорционально фазе, то это и приводит к тому, что частица движется по траектории, которая соответствует наименьшему действию.*

Если же постоянная Планка изменяется при движении частицы, то уравнение (7.8) приводит к следующей формуле для принципа наименьшего действия:

$$\delta\varphi = \delta \int \frac{dS}{\hbar} = 0 \quad (7.10)$$

То есть частица будет двигаться по такой траектории, вдоль которой имеет минимум действие, измеренное в единицах \hbar . Напомним, что постоянная Планка имеет размерность действия.

§ 7.4. Уравнение движения в квантовой теории гравитации

Рассмотрим частицу, которая находится в гравитационном поле. Для того чтобы рассчитать траекторию её движения, будем исходить из того, что частица представляет собой волну, движение которой в самом общем виде описывается уравнением (7.8).

Полная энергия частицы E равна:

$$E = \frac{m c^2}{\sqrt{1 - \frac{V^2}{c^2}}}$$

А её импульс \vec{p} равен:

$$\vec{p} = \frac{m \vec{V}}{\sqrt{1 - \frac{V^2}{c^2}}}$$

Учитывая, что $d\vec{r} = \vec{V}dt$, в результате получаем:

$$\begin{aligned} \delta\phi &= -\delta \int \frac{Edt - \vec{p} \cdot d\vec{r}}{\hbar} = -\delta \int \frac{1}{\hbar} \left(\frac{m c^2 dt}{\sqrt{1 - \frac{V^2}{c^2}}} - \frac{m \vec{V} \cdot \vec{V} dt}{\sqrt{1 - \frac{V^2}{c^2}}} \right) = \\ &= -\delta \int \frac{m c^2}{\hbar \sqrt{1 - \frac{V^2}{c^2}}} \left(1 - \frac{V^2}{c^2} \right) dt = -\delta \int \frac{m c^2}{\hbar} \sqrt{1 - \frac{V^2}{c^2}} dt = \\ &= -\delta \int \frac{m c}{\hbar} \sqrt{c^2 dt^2 - V^2 dt^2} = -\delta \int \frac{m c}{\hbar} \sqrt{c^2 dt^2 - dx^2 - dy^2 - dz^2} = \\ &= -\delta \int \frac{m c}{\hbar} ds = 0 \end{aligned}$$

Итак, мы получили, что движение частицы в гравитационном поле определяется следующим уравнением

$$\delta\varphi = -\delta \int \frac{mc}{\hbar} ds = 0 \quad (7.11)$$

Так как при движении частицы в гравитационном поле величина mc/\hbar изменяется достаточно медленно (по сравнению с изменением фазы), то её можно вынести из-под знака интеграла. И в результате получаем следующее уравнение, описывающее движение частицы в гравитационном поле:

$$-\delta \int ds = 0 \quad (7.12)$$

Напомним, что интервал ds играет роль элемента длины в четырёхмерном пространстве-времени:

$$ds = \sqrt{c^2 dt^2 - d\ell^2} \quad (7.13)$$

Где $d\ell$ – элемент длины в обычном трёхмерном пространстве:

$$d\ell = \sqrt{dx^2 + dy^2 + dz^2}$$

Таким образом движение частицы в гравитационном поле определяется точно таким же уравнением, что и движение свободной частицы (7.4), то есть частица движется по прямой линии в четырёхмерном псевдоевклидовом пространстве-времени. Давайте теперь, исходя из этого, рассчитаем уравнение движения частицы в гравитационном поле, создаваемом массой M .

С точки зрения квантовой механики любой пространственно-временной масштаб (размер атома, длину волны спектральной линии, частоту излучения атома и т. д.) всегда можно выразить в виде некоторой комбинации величин c , \hbar , m . А так как эти величины изменяются вблизи большой массы, то, соответственно, изменяется и пространственно-временной масштаб. Поэтому с точки зрения неподвижного наблюдателя траектория движения частицы будет искривлена.

Рассчитаем выражение для бесконечно малого квадрата интервала ds^2 в зависимости от расстояния r до массы M с точки зрения наблюдателя, находящегося на достаточно большом удалении от массы M .

Напомним, что интервал времени Δt имеет следующий физический смысл: *это величина, равная числу периодов*

определённого периодического процесса, длительность которого взята в качестве эталона времени.

Длительность любого физического процесса dt , выраженная в единицах c , \hbar , m , будет пропорциональна \hbar/mc^2 . Из уравнения (2.8) следует, что: $\hbar \sim \frac{I}{c}$. А из уравнения (3.20)

следует, что: $m \sim \frac{I}{c}$. И в результате получаем: $dt \sim \frac{I}{c^2}$.

Например, частота излучения атома (см. § 4.9.) пропорциональна величине m/\hbar^3 . И, следовательно, с учётом уравнений (2.8) и (3.20), период излучения T будет обратно пропорционален квадрату скорости света:

$$T = \frac{I}{\nu} = \frac{I}{2\pi\omega} \sim \frac{\hbar^3}{m} \sim \frac{I}{c^2}$$

Поэтому вблизи массы M все интервалы времени сократятся в $(c/c_0)^2$ раз:

$$dt(r) = dt_0 \frac{c_0^2}{c^2(r)} \quad (7.14)$$

Здесь dt_0 – интервал времени, прошедший на достаточно большом удалении от массы M , а $dt(r)$ – интервал времени, прошедший на расстоянии r от массы M ; c_0 – скорость света на достаточно большом удалении от массы M , а $c(r)$ – скорость света на расстоянии r от массы M .

Как известно, расстояние Δl между двумя точками имеет следующий физический смысл: *это величина, равная числу единичных эталонов длины λ , которые можно расположить между этими точками.*

Любой эталон длины λ , выраженный в единицах c , \hbar , m , будет пропорционален \hbar/mc . Если учесть уравнения (2.8) и (3.20), то получим: $\lambda \sim \frac{I}{c}$.

Поэтому вблизи массы M (в зависимости от расстояния r до неё) все эталоны длины уменьшаться в $c(r)/c_0$ раз:

$$\lambda(r) = \lambda_0 \frac{c_0}{c(r)} \quad (7.15)$$

Здесь λ_0 – длина данного эталона, находящегося на достаточно большом удалении от массы M , а $\lambda(r)$ – длина этого же эталона, находящегося на расстоянии r от массы M .

И, соответственно, все расстояния между точками dl (измеренные с помощью данных эталонов) возрастут в $c(r)/c_0$ раз:

$$dl(r) = dl_0 \frac{c(r)}{c_0} \quad (7.16)$$

Таким образом, выражение для квадрата интервала, выраженное в единицах c_0, dt_0, dl_0 (то есть в системе единиц наблюдателя, который находится на достаточно большом удалении от массы M), будет иметь следующий вид:

$$ds^2 = c^2 dt^2 - dl^2 = c^2 dt_0^2 \frac{c_0^4}{c^4} - dl_0^2 \frac{c^2}{c_0^2} \quad (7.17)$$

Учитывая уравнение (3.17): $\Delta\Phi = -2G\frac{M}{r}$, а также уравнение

(2.1): $c^2 = -\Phi$, получаем: $c^2(r) = c_0^2 + 2G\frac{M}{r}$. Подставляя из этого

уравнения квадрат скорости света в уравнение (7.17), в результате получаем следующее выражение для квадрата интервала:

$$ds^2 = \frac{c_0^2 dt_0^2}{(1 + 2G\frac{M}{rc_0^2})} - (1 + 2G\frac{M}{rc_0^2}) dl_0^2 \quad (7.18)$$

Таким образом, мы приходим к следующему уравнению, описывающему движение частицы в гравитационном поле, созданном точечной массой M :

$$\delta\varphi = -\delta \int ds = -\delta \int \sqrt{\frac{c_0^2 dt_0^2}{1 + \frac{2GM}{rc_0^2}} - (1 + \frac{2GM}{rc_0^2}) dl_0^2} = 0 \quad (7.19)$$

§ 7.5. Закон тяготения Ньютона

В предыдущем параграфе мы пришли к выводу, что частица движется в гравитационном поле по прямой линии (7.12) в четырёхмерном пространстве-времени. А так как масштаб времени (7.14) и масштаб длины (7.16) вблизи большой массы M изменяются, то прямая линия в таком пространстве-времени с точки зрения неподвижного относительно массы M наблюдателя будет искривлена. И для наблюдателя, удалённого на достаточно большое расстояние от массы M , траектория такой искривлённой “прямой” (она называется геодезической) будет определяться уравнением (7.19).

В этом параграфе мы найдём решение данного уравнения в случае слабого гравитационного поля ($GM/rc^2 \ll 1$) и для медленно движущейся частицы ($V \ll c$).

Напомним, что если $\varepsilon \ll 1$, то с точностью до членов порядка ε^2 справедливо следующее выражение:

$$(1 + \varepsilon)^n = 1 + n\varepsilon \quad (7.20)$$

Преобразуем выражение (7.19), введя обозначение $\varepsilon = 2GM/rc_o^2 \ll 1$, а также учитывая, что $d\ell_o = V dt_o$:

$$\begin{aligned} -\delta \int \sqrt{\frac{c_o^2 dt_o^2}{1 + \varepsilon}} - (1 + \varepsilon) d\ell_o^2 &= -\delta \int c_o \sqrt{\frac{1}{1 + \varepsilon} - (1 + \varepsilon) \frac{V^2}{c_o^2}} dt_o = \\ &= -\delta \int c_o \sqrt{1 - \varepsilon - \frac{V^2}{c_o^2} - \varepsilon \frac{V^2}{c_o^2}} dt_o = 0 \end{aligned}$$

Пренебрегая членом второго порядка малости $\varepsilon V^2/c_o^2$, а также учитывая (7.20), в результате получаем:

$$-\delta \int \left(c_o - \frac{c_o \varepsilon}{2} - \frac{V^2}{2c_o} \right) dt_o = 0$$

Так как вариация постоянной величины равна нулю, то, опуская первое слагаемое c_o , получаем:

$$\delta \int \left[\frac{c_o \varepsilon}{2} + \frac{V^2}{2c_o} \right] dt_o = 0$$

Так как $V \ll c_0$, то с хорошей степенью точности можно считать, что масса покоя частицы m остаётся постоянной. Поэтому можно умножить выражение в квадратных скобках на произведение mc_0 :

$$\delta \int \left[\frac{mc_0^2 \varepsilon}{2} + \frac{mV^2}{2} \right] dt_0 = 0$$

Подставляя значение ε , получаем: $\delta \int \left[\frac{mV^2}{2} + G \frac{Mm}{r} \right] dt_0 = 0$

В результате мы получили уравнение, которое соответствует уравнению (7.3), описывающему классическое (нерелятивистское) движение частицы массы m в потенциальном поле $U(r)$, где:

$$U(r) = -G \frac{Mm}{r}$$

Решением этого вариационного уравнения, как уже отмечалось, является векторное уравнение:

$$m \frac{d\vec{V}}{dt} = -\vec{\nabla} \cdot U(r) = \vec{\nabla} \cdot \left(G \frac{Mm}{r} \right)$$

Так как $\vec{\nabla} \frac{1}{r} = -\frac{1}{r^2} \vec{e}_r$, где \vec{e}_r — единичный вектор в направлении \vec{r} , то в результате получаем закон Всемирного тяготения:

$$m \frac{d\vec{V}}{dt} = -G \frac{Mm}{r^2} \vec{e}_r$$

Итак, решая уравнение (7.19) в случае слабого гравитационного поля для нерелятивистской частицы, мы пришли к ньютоновскому закону Всемирного тяготения.

§ 7.6. Теория тяготения Эйнштейна

Как уже отмечалось в 4-й главе, с точки зрения общей теории относительности частицы в гравитационном поле движутся по геодезическим линиям в четырёхмерном пространстве-времени (4.1). При этом квадрат интервала ds^2 (который играет роль элемента длины) изменяется в зависимости от расстояния r до массы M следующим образом (4.3):

$$ds^2 = (1 - \varepsilon)c_0^2 dt^2 - (1 + \varepsilon)d\ell^2 \quad (4.3)^*$$

здесь $\varepsilon = 2GM/rc_0^2$. А в рамках квантовой теории гравитации квадрат интервала изменяется в зависимости от расстояния r до массы M следующим образом (7.18):

$$ds^2 = \frac{c_0^2 dt_0^2}{1 + \varepsilon} - (1 + \varepsilon)d\ell_0^2 \quad (7.18)^*$$

Напомним, что уравнение (4.3) общей теории относительности проверено только в случае слабого гравитационного поля. Например, в гравитационном поле Солнца, в котором $\varepsilon = 2GM/rc_0^2 \leq 2GM_S/R_S c_0^2 \approx 10^{-6}$, где M_S – масса Солнца, а R_S – его радиус.

Так как с точностью до членов порядка ε^2 выполняется равенство: $\frac{1}{1 + \varepsilon} = 1 - \varepsilon$, то уравнение (7.18)* отличается от уравнения (4.3)* в гравитационном поле Солнца на величину порядка $\varepsilon^2 \leq 10^{-12}$.

Таким образом, квантовая теория гравитации совпадает с общей теорией относительности в случае слабого гравитационного поля с точностью до ε^2 . И, следовательно, в случае гравитационного поля Солнца она предсказывает поправки к релятивистским гравитационным эффектам (которые порядка $\varepsilon \leq 10^{-6}$) порядка одной миллионной. А точность, с которой эти эффекты проверены, составляет примерно 0,1 %. То есть в пределах точности экспериментов, проведённых в гравитационном поле Солнца, квантовая теория гравитации совпадает с общей теорией относительности.

В случае сильных гравитационных полей ситуация существенно меняется. В выражении для квадрата интервала (7.18)* отсутствует сингулярность, которая появляется в выражении (4.3)* при $\varepsilon = 1$.

В рамках общей теории относительности это означает следующее. Если объект массы M имеет радиус $r = 2GM/c^2$, то на поверхности такого объекта время (с точки зрения удалённого наблюдателя) полностью останавливается. Образуется так называемая чёрная дыра.

А в рамках квантовой теории гравитации коэффициент при dt^2 ни при каких условиях не обращается в нуль. Это означает, что чёрные дыры в принципе не существуют (смотри об этом в § 4.10).

Представим величину $1 + \varepsilon$ в следующем виде:

$$1 + \varepsilon = 1 + \frac{2GM}{rc_o^2} = \frac{\Phi(r)}{\Phi_o}$$

И теперь, чтобы был лучше виден физический смысл уравнения (7.18)*, преобразуем его следующим образом:

$$ds^2 = \frac{\Phi_o}{\Phi(r)} c_o^2 dt_o^2 - \frac{\Phi(r)}{\Phi_o} d\ell_o^2 \quad (7.21)$$

Из этого уравнения видно, что кривизна пространства-времени определяется отношением гравитационного потенциала вблизи массы к гравитационному потенциалу на достаточно большом удалении от неё. То есть кривизна пространства-времени вызвана локальными неоднородностями в распределении материи ($\Phi(r) = \Phi_o + \Delta\Phi$) на общем фоне распределения материи во Вселенной (Φ_o).

§ 7.7. Отличие квантовой теории гравитации от общей теории относительности

В случае слабого гравитационного поля квантовая теория гравитации приводит к тем же самым уравнениям движения, что и общая теория относительности. Несмотря на это, основные положения квантовой теории гравитации принципиально отличаются от основных положений общей теории относительности. Наиболее существенные отличия мы рассмотрим в этом параграфе.

С точки зрения квантовой теории гравитации вблизи большой массы изменяются величины c , \hbar , m (как было показано во 2-й и 3-й главах, значения этих величин связаны между собой). Например, вблизи большой массы возрастает величина скорости света и уменьшается значение постоянной Планка. Кроме того,

возрастает частота колебаний ω любой спектральной линии (4.20), так как $\omega \sim m/\hbar^3$. То есть возрастает скорость протекания физических процессов.

Так как любой эталон времени или длины (период колебаний спектральной линии, длина волны спектральной линии, размер атома и т. д.) изменяется в зависимости от значения величин c , \hbar , m (и любой эталон можно выразить в виде некоторой комбинации этих величин), то, следовательно, вблизи большой массы изменяются *все* эталоны времени и длины. То есть изменяется пространственно-временной масштаб. Именно это и приводит к искривлению траектории движущейся частицы, что и показывают уравнения (7.18) и (7.19).

В основе общей теории относительности лежат совершенно иные предположения. С точки зрения общей теории относительности вблизи большой массы понижается частота колебаний любой спектральной линии, вследствие чего все физические процессы замедляются. Например, замедляется скорость распространения электромагнитных колебаний (скорость света). Тем не менее, уравнения движения частицы в общей теории относительности совпадают с уравнениями движения в квантовой теории гравитации с точностью до членов порядка $|\Delta\Phi|^2/c^4$ (4.3) и (7.18). Это представляется странным и нуждается в объяснении.

Рассмотрим отличие квантовой теории гравитации от общей теории относительности на конкретных примерах.

Известно, что земной наблюдатель видит спектр излучения атомов, находящихся на Солнце, смещённым в сторону инфракрасных частот. В рамках общей теории относительности объяснение этому эффекту следующее. Во-первых, предполагается, что пока фотон летит от Солнца к Земле его частота *остаётся постоянной*. Во-вторых, предполагается, что время на Солнце *течёт медленнее*, чем на Земле, и вследствие этого частоты излучения атомов на Солнце с точки зрения земного наблюдателя сдвинуты в инфракрасную область [5;с.324]. Таким образом, причиной “покраснения” фотона является разная скорость течения времени.

С точки зрения квантовой теории гравитации частоты излучения атомов на Солнце *выше*, чем на Земле (4.20). Это есть следствие того, что на Солнце *ниже* значение постоянной Планка \hbar . Но пока фотон летит к Земле, его частота *понижается*. Это есть следствие того, что *уменьшается* скорость света и *возрастает* значение постоянной Планка. В результате земной наблюдатель также видит спектр излучения находящихся на Солнце атомов смещённым в инфракрасную область.

Таким образом, совершенно разные подходы к одному и тому же явлению, тем не менее, приводят в случае слабого поля к одному и тому же уравнению для величины гравитационного смещения спектральных линий (4.22).

Рассмотрим другой пример. В геометрической оптике траектории световых лучей в самом общем виде определяется уравнением (4.8) или (4.10):

$$\int_A^B \frac{d\ell}{\lambda(\ell)} = \int_A^B \frac{\omega(\ell)}{2\pi c(\ell)} = \min$$

Здесь величина $1/\lambda$ или ω/c играет роль эффективного показателя преломления.

С точки зрения общей теории относительности вблизи большой массы *уменьшается* скорость света, а его частота *остаётся неизменной*. Это приводит к тому, что вблизи большой массы возрастает эффективный показатель преломления [17; §59]. И в результате луч света огибает массу (притягивается к ней).

С точки зрения квантовой теории гравитации вблизи большой массы *возрастает* скорость света, но его частота *возрастает в процентном отношении ещё сильнее*. И в результате вблизи большой массы также возрастает эффективный показатель преломления. Для слабого гравитационного поля оба подхода приводят к одинаковому углу отклонения для луча света (4.18).

Таким образом, отличие квантовой теории гравитации от общей теории относительности состоит в следующем. С точки зрения общей теории относительности вблизи большой массы все физические процессы *замедляются* (время “течёт” медленней) и,

в частности, *уменьшается* скорость света. А с точки зрения квантовой теории гравитации вблизи большой массы скорость света, наоборот, *возрастает*. Кроме того, *повышаются* частоты излучения спектральных линий (время “течёт” быстрее).

Но, тем не менее, несмотря на такие совершенно противоположные положения, и общая теория относительности, и квантовая теория гравитации в случае слабого гравитационного поля приводят к одним и тем же уравнениям и для гравитационного смещения спектральных линий (4.4) и (4.22), и для отклонения луча света (4.5) и (4.18), и для величины квадрата интервала (4.3) и (7.18). То есть приводят к одним и тем же уравнениям движения.

§ 7.8. Преимущества квантовой теории гравитации

Квантовая теория гравитации – это новая теория, альтернативная общей теории относительности, которая в настоящее время признана в качестве единственной теории гравитации. В связи с этим имеет смысл показать преимущества квантовой теории гравитации и указать на ряд недостатков, присущих общей теории относительности.

Во-первых, первоначально общая теория относительности задумывалась Эйнштейном как теория, в которой будет воплощён принцип Маха. Практически во всех своих ранних работах Эйнштейн писал о важности этого принципа. Он также писал о физической несостоятельности таких теорий, как механика Ньютона и специальная теория относительности только потому, что в них не содержится этот принцип. Смотри, например, его книгу «О специальной и общей теории относительности», § 21 «Насколько неполны основы классической механики и специальной теории относительности» [1;с.565,566]. Смотри также его знаменитый мысленный эксперимент с двумя жидкими шарами [1;с.455-457].

Тем не менее, когда общая теория относительности была построена, оказалось, что в ней также не содержится принцип Маха. Вот что писал об этом Паули: «При рассмотрении вопроса

об относительности центробежной силы эта трудность дала себя знать особенно сильно. Хотя подобное выделение некоторых систем координат с помощью граничных условий, вообще говоря, не совместимо логически с постулатом инвариантности, однако противоречит духу релятивистской теории и должно рассматриваться как тяжёлый теоретико-познавательный недостаток. Эйнштейн поразительно осветил его с помощью мысленного эксперимента с двумя жидкими шарами, вращающимися относительно друг друга вокруг соединяющей их линии [1;с.455-457]. Этот недостаток остаётся не только в классической механике и в специальной теории относительности, но и в развитой выше, базирующейся на уравнениях (4.2) теории тяготения» [49;с.249,250].

А в квантовой теории гравитации не только содержится принцип Маха, но и полностью раскрыт его физический смысл. В результате чего раскрыт и физический смысл неопределённости, которая наблюдается в микромире (см. § 3.1).

Во-вторых, в общей теории относительности гравитация сводится к геометрии, и в ней время и расстояние выступают как самостоятельные физические сущности, оторванные от конкретных физических процессов. Очевидно, что такой подход является непоследовательным, так как любая геометрия, в действительности, основана на конкретных свойствах физических объектов. Например, в качестве единицы длины может быть выбран размер какого-либо атома или длина волны определённой спектральной линии. Поэтому абстрактное понятие единицы длины (без связи с размерами реальных тел) лишено какого-либо физического смысла. Это прекрасно понимал и Эйнштейн (см. его цитату об этом в § 7.1).

В-третьих, общая теория относительности не имеет ни малейшего отношения к квантовой механике, и в ней совсем не учитываются волновые свойства частиц. В то время как в квантовой теории гравитации гравитационное взаимодействие рассматривается как квантовый эффект (см. § 7.2,7.4).

В-четвёртых, с одной стороны, в общей теории относительности предполагается, что пространственно-

временной масштаб изменяется вблизи большой массы. Но с другой стороны, предполагается, что протекание физических процессов не зависит от абсолютной величины гравитационного потенциала. Поэтому в любом месте гравитационного поля можно принять пространственно-временной масштаб условно за “единицу”. И в результате получается весьма странная вещь: с одной стороны, вблизи большой массы пространственно-временной масштаб изменяется, но, с другой стороны, его и там можно принять за ту же “единицу”. Именно поэтому в общей теории относительности и возникают сингулярности – вблизи чёрной дыры время полностью останавливается. Похожие мысли высказывал Ричард Фейнман в лекциях по гравитации: «Другая возможность состоит в том, что I , которая появляется в формуле для замедления времени, есть ошибка в рассуждении. Мы записали формулу, которая применяется только в том случае, когда разность потенциалов φ много меньше I , так что константа I может каким-либо образом представлять нормализованный вклад в распределение массы удалённых скоплений» [10;с.131]. Смотри также [10;с.129].

В рамках квантовой теории гравитации, конечно, также можно условно принять любой пространственно-временной масштаб за единицу. Например, удобно принять за единицу масштаб околоземного пространства-времени. Но в этом случае масштаб вблизи Солнца нельзя принимать за единицу, так как он будет уже другим. И тем более будет другим, например, масштаб на ранней стадии эволюции Вселенной. А с точки зрения общей теории относительности пространственно-временной масштаб на ранней стадии эволюции Вселенной (величины c , \hbar , m) был тот же самый, что и в настоящее время. Возможно, именно поэтому и возникают многочисленные космологические проблемы (проблема возраста Вселенной, проблема скрытой массы и т. д.), которые нельзя разрешить в рамках общей теории относительности. Решению космологических проблем в рамках квантовой теории гравитации будет посвящена 10-я глава.

И наконец, в-пятых, общая теория относительности несмотря на то, что является теорией гравитации, несколько не

объясняет механизм гравитационного взаимодействия. Она не объясняет, почему гравитационное взаимодействие такое слабое и почему существует *только* гравитационное притяжение. Наконец, в рамках общей теории относительности остаётся загадкой, почему гравитационный потенциал, создаваемый всей массой Вселенной, равен в пределах точности наблюдений квадрату скорости света.

А в рамках квантовой теории гравитации даётся простое объяснение *всем* особенностям гравитационного взаимодействия.

Конечно, решающую роль в выборе той или иной теории играет эксперимент. И в следующей главе (§ 8.3) будет предложен простой эксперимент, который позволит сделать однозначный выбор между общей теорией относительности и квантовой теорией гравитации.

Глава 8

Время и Гравитация

В случае слабого гравитационного поля единственным и принципиальным отличием квантовой теории гравитации от общей теории относительности является то, что с точки зрения общей теории относительности вблизи массы время “замедляется”, а с точки зрения квантовой теории гравитации, наоборот, – “ускоряется”. В этой главе мы подробно разберём этот вопрос и рассмотрим доводы в пользу той или другой точки зрения.

§ 8.1. Пространственно-временной масштаб

В общей теории относительности предполагается, что окружающее нас пространство имеет тот же самый пространственно-временной масштаб (любой пространственно-временной масштаб всегда можно выразить в виде некоторой комбинации величин c , \hbar , m [10,с.133]), что и пустое пространство. С этой точки зрения пространственно-временной масштаб при расширении Вселенной *не изменяется*. Это означает, что распределение материи во Вселенной никак не влияет на процессы, происходящие на Земле.

А с точки зрения квантовой теории гравитации *пространственно-временной масштаб внутри нашей Вселенной определяется распределением всей материи во Вселенной*. И эффект гравитации – это изменение пространственно-временного масштаба, вызванное локальными неоднородностями в распределении материи на общем фоне распределения материи во Вселенной (7.21). И с этой точки зрения пространственно-

временной масштаб будет изменяться и при расширении Вселенной, и при изменении гравитационного потенциала. Например, когда Земля подходит ближе к Солнцу (находится в перигелии) скорость света возрастает (2.1), постоянная Планка уменьшается (2.9), массы покоя элементарных частиц также уменьшаются (3.21). В частности, как было выяснено в § 2.8 (и уточнено в § 3.5), скорость света изменяется в течение года на величину $|\Delta c| \approx 0,1 \text{ м/с}$.

Тем не менее, если мы будем измерять скорость света в течение года даже с точностью 1 см/с , мы всё равно не обнаружим её изменения. Это произойдёт потому, что все эталоны длины и времени также будут изменяться в течение года.

Например, предположим, что величина скорости света возросла в k раз. При этом, как следует из уравнения (7.15), все эталоны длины уменьшаться в k раз. И, значит, свет будет пролетать метровый эталон в k^2 раз быстрее. Но из уравнения (7.14) следует, что длительность одной секунды уменьшится также в k^2 раз, и в результате скорость света, измеренная в метрах в секунду, останется той же самой.

Поэтому для того чтобы выяснить, как изменяется (возрастает или уменьшается) скорость света в гравитационном поле, нужно непосредственно сравнить скорость распространения света в различных областях гравитационного поля. Например, с точки зрения квантовой теории гравитации на высоте 30 км над земной поверхностью величина скорости света будет на 1 мм/с меньше, чем на земной поверхности. Но такое незначительное изменение очень трудно обнаружить экспериментально.

Тем не менее, в земных условиях можно провести относительно простой эксперимент, который позволит однозначно определить, какая из двух теорий гравитации (общая теория относительности или квантовая теория гравитации) является верной. Только для этого нужно измерять не скорость света, а “скорость времени”. Описание этого эксперимента будет изложено в § 8.3.

§ 8.2. Неоднородность времени

В § 3.6 мы пришли к выводу, что массы покоя элементарных частиц зависят от абсолютной величины гравитационного потенциала (3.21). А что в действительности это означает? Ведь если, к примеру, мы будем свободно падать вместе с физической лабораторией в гравитационном поле, то мы не заметим, что массы покоя элементарных частиц как-то изменились. Это произойдёт потому, что все наши эталоны массы также изменятся в той же самой пропорции, что и массы элементарных частиц. А в предыдущем параграфе выяснили, что если мы будем двигаться в гравитационном поле, то свет всё равно будет проноситься мимо нас с одной и той же скоростью – $300\,000\text{ км/с}$! И это произойдёт потому, что все наши эталоны длины и времени также будут изменяться в гравитационном поле.

Какой же тогда физический смысл имеют уравнения, связывающие величину скорости света (2.1), постоянной Планка (2.9), массы покоя элементарных частиц (3.21) с величиной гравитационного потенциала? В какой системе отсчёта они будут выполняться? Ответ простой: они будут выполняться в системе отсчёта, в которой пространственно-временной масштаб остаётся неизменным. А существуют ли в природе такие системы отсчёта? Строго говоря, такие системы отсчёта в природе не существуют, так как из-за расширения Вселенной пространственно-временной масштаб изменяется каждую секунду.

Такое положение вещей очень похоже на то, которое существует в механике Ньютона. С одной стороны, законы Ньютона выполняются только в инерциальной системе отсчёта, а с другой стороны, инерциальные системы отсчёта, строго говоря, в природе не существуют. Такая, казалось бы, неразрешимая ситуация, в действительности, разрешается очень просто следующим образом. Задача формально решается в некоторой абстрактной, но идеальной, инерциальной системе отсчёта. Затем путём математических преобразований совершается переход к

данной неинерциальной системе отсчёта. При этом законы Ньютона несколько модернизируются (вводятся поправки на центробежные силы, силы Кориолиса и т. д.), и в таком модернизированном виде они становятся справедливы и в неинерциальной системе отсчёта. И, наоборот, если в некоторой системе отсчёта наблюдается отклонение от законов Ньютона, то по величине этих отклонений можно сделать вывод о том, как данная система отсчёта движется относительно инерциальной системы отсчёта.

Подобная ситуация имеет место и в нашем случае. Для того чтобы использовать уравнения (2.1), (2.9), (3.21), следует выбрать некоторую систему отсчёта, в которой пространственно-временной масштаб *не изменяется*. На самом деле мы так всегда и поступали. И уже исходя из этого можно будет рассчитать, какие наблюдаемые эффекты следует ожидать в том случае, когда пространственно-временной масштаб будет *изменяться*. И, наоборот, если в некоторой системе отсчёта мы экспериментально обнаружим такие эффекты, то мы сможем сделать вывод о том, что пространственно-временной масштаб в ней изменяется. Более того, мы сможем рассчитать скорость, с которой изменяется масштаб, то есть сможем узнать, как быстро в данной системе отсчёта изменяется абсолютный гравитационный потенциал.

Давайте разберём конкретный пример. Наша Вселенная расширяется (по крайней мере, это предполагается). Поэтому, если исходить из квантовой теории гравитации, пространственно-временной масштаб должен изменяться каждую секунду. То есть каждую секунду будут изменяться величина скорости света, постоянной Планка, масса покоя электрона (или любой другой частицы). А это означает, что каждую секунду изменяются размеры атомов, энергии перехода электрона с одного уровня на другой, длины волн спектральных линий и т. д.

Можно сказать, что из-за расширения Вселенной в нашем мире *нарушена однородность времени*, так как различные моменты времени не эквивалентны. И нам как раз нужно эту неоднородность времени зарегистрировать экспериментально. А

для этого достаточно сравнить между собой длины волн двух лучей, испущенных из одного и того же лазера при одних и тех же условиях, но в разные моменты времени. Этот, относительно простой эксперимент (который почему-то никогда не рассматривался в научной литературе, так как, по-видимому, все убеждены в том, что время однородно), мы рассмотрим в § 10.10.

§ 8.3. Эксперимент по проверке квантовой теории гравитации

Для того чтобы выяснить, какая из двух теорий (общая теория относительности или квантовая теория гравитации) является истинной, необходимо провести следующий, очень простой эксперимент.

Двое точных часов (лучшие современные атомные часы, основанные на измерениях атомных радиопереходов, имеют относительную погрешность около $2 \cdot 10^{-15}$ [51]) следует установить на различных высотах (смотри рис. 17).

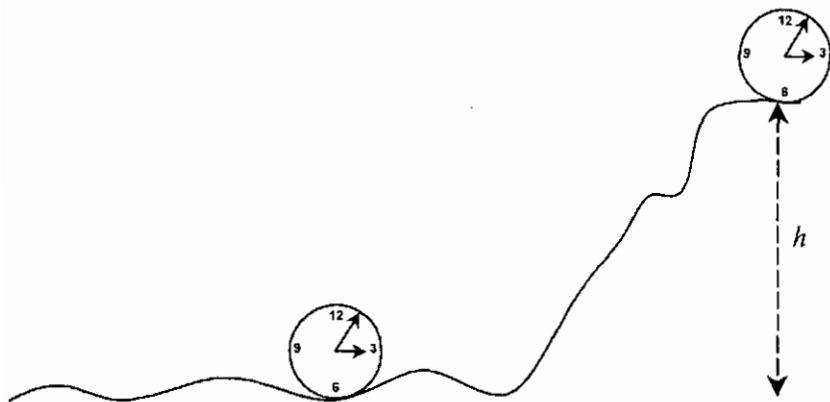


Рис. 17. Одинаковые часы расположены на различных высотах над земной поверхностью. Если верна общая теория относительности, то будут отставать часы, находящиеся внизу. А если верна квантовая теория гравитации, то отстанут часы, находящиеся наверху.

Например, одни часы установить в лаборатории на равнине, а вторые – в лаборатории, расположенной высоко в горах, скажем, на высоте $h = 5$ км относительно первой лаборатории.

Если верна общая теория относительности, то будут отставать часы, находящиеся на равнине. И относительное отставание составит величину [5;с.322]:

$$\frac{gh}{c^2} \approx \frac{10 \text{ мс}^{-2} \cdot 5 \cdot 10^3 \text{ м}}{10^{17} \text{ м}^2 \text{ с}^{-2}} \approx 5 \cdot 10^{-13} \quad (8.1)$$

То есть каждую секунду часы, находящиеся на равнине, будут отставать от часов на горе на $5 \cdot 10^{-13}$ с. И, следовательно, через 12 дней (примерно миллион секунд) они отстанут на 0,5 мс.

А если верна квантовая теория гравитации, то будут отставать часы, находящиеся высоко в горах. И нетрудно рассчитать, используя уравнение (7.14), что относительное отставание составит величину:

$$\frac{c^2(h)}{c^2(0)} - 1 = \frac{c^2(0) + 2gh}{c^2(0)} - 1 = \frac{2gh}{c^2} \approx 10^{-12} \quad (8.2)$$

То есть каждую секунду часы, находящиеся на горе, будут отставать от часов на равнине на 10^{-12} с. И, следовательно, через 12 дней они отстанут на 1 мс.

Таким образом, если верна общая теория относительности, то через 12 дней часы, находящиеся на равнине, отстанут на 0,5 мс. А если верна квантовая теория гравитации, то они, наоборот, уйдут вперёд на 1 мс по сравнению с часами, находящимися на горе. То есть по результатам данного эксперимента можно будет сделать однозначный выбор между общей теорией относительности и квантовой теорией гравитации.

Для того чтобы учесть систематическую ошибку (она может быть вызвана тем, что скорость хода первых и вторых часов, возможно, незначительно различается), нужно провести аналогичный эксперимент, в котором первые и вторые часы следует поменять местами. Кроме того, следует сравнить

скорость хода первых и вторых часов при одинаковых условиях и выяснить, какие из них идут быстрее и насколько быстрее.

Для того чтобы устранить случайные ошибки в эксперименте, следует использовать не двое, а большее количество часов. А затем произвести статистическую обработку полученных результатов. Только после учёта случайных и систематических ошибок можно будет сделать определённые выводы по результатам данного эксперимента.

Можно также отметить, что с точки зрения специальной теории относительности (истинность которой установлена с высокой степенью точности) часы, расположенные на горе, должны идти несколько медленнее, чем часы на равнине. Этот эффект вызван тем, что скорость движения часов на горе, вызванная вращением Земли вокруг своей оси, несколько больше, так как они расположены дальше от центра Земли. Пусть V – скорость вращения земной поверхности в том месте, где расположены первые часы. Она зависит от широты местности и на средних широтах примерно равна: $V \approx 300$ м/с. В этом случае часы, находящиеся на горе, будут двигаться быстрее примерно на величину: $\Delta V = Vh/R \approx 0,3$ м/с, где R – радиус Земли. Используя уравнение (1.19) специальной теории относительности для замедления времени (для его применения необходимо выбрать какую-нибудь инерциальную систему отсчёта, например, связанную с центром Земли), нетрудно рассчитать, что относительное отставание часов, расположенных на горе, составит следующую величину:

$$\frac{\sqrt{1 - \frac{V^2}{c^2}}}{\sqrt{1 - \frac{(V + \Delta V)^2}{c^2}}} - 1 \approx \frac{V \cdot \Delta V}{c^2} \approx 10^{-15}$$

То есть этот эффект на три порядка меньше, чем эффект относительного замедления времени, вызванный действием гравитационного поля Земли.

И в заключение этого параграфа необходимо отметить следующее. С точки зрения квантовой теории гравитации вблизи

большой массы будет повышаться частота любого периодического процесса, вызванного электромагнитными силами. И только поэтому можно сказать, что вблизи большой массы “скорость” течения времени возрастает. Однако не все физические процессы будут ускоряться в гравитационном поле. Например, процессы, связанные с распадом ядра, будут, наоборот, замедляться из-за уменьшения значения постоянной Планка (смотри § 10.4). Поэтому в общем случае, чтобы выяснить, как изменится скорость протекания какого-либо процесса в гравитационном поле, нужно посмотреть на уравнение, описывающее этот процесс. В это уравнение входят какие-либо из величин c , \hbar , m . Рассчитав изменение этих величин, используя уравнения (2.1), (2.9) и (3.21), можно выяснить, как изменится скорость протекания данного процесса вблизи большой массы.

§ 8.4. Эксперименты по проверки общей теории относительности

С точки зрения общей теории относительности время вблизи большой массы замедляется (замедляются *все* физические процессы). И это одно из ключевых положений, лежащих в самом фундаменте общей теории относительности. Поэтому очень важно убедиться в его истинности экспериментально. И в 70-х годах 20-го века были проведены эксперименты по проверке влияния гравитационного потенциала на разность показаний атомных часов. Первый такой эксперимент был проведён Хэйфеле и Китингом, которые осуществили полёт вокруг Земли на самолётах в противоположных направлениях нескольких часов на парах рубидия и сравнили их показания до и после полётов с показаниями часов, оставленных на Земле. «В частности, Хэйфеле и Китинг определили относительные разности между измерениями и предсказаниями для гравитационных и кинематических эффектов, равные приблизительно $-0,01 \pm 0,09$ для полётов на запад и около $-0,04 \pm 0,4$ для полётов на восток» [50;с.219]. Таким образом,

погрешность в данном эксперименте значительно превышала ожидаемый эффект.

В 1976 году водородный мазерный стандарт частоты был помещён на ракету и выведен на околоземную орбиту. Для сравнения показаний водородного мазерного стандарта на ракете с показаниями аналогичного устройства, расположенного на Земле, использовались радиосигналы. Погрешность в данном эксперименте в два раза превышала ожидаемый эффект [50; с.220].

В 1977 году были проведены эксперименты, в которых были использованы трое цезиевых часов. Эти часы также совершили несколько полётов на самолётах. «В этих экспериментах лазерные сигналы посылались с Земли и отражались от кубических уголкового отражателя на самолёте, реализуя тем самым на практике эйнштейновский мысленный эксперимент по синхронизации разделённых часов с помощью обмена световыми сигналами» [50; с.219].

Итак, в первом и втором экспериментах погрешность превышала ожидаемый эффект. В третьем эксперименте синхронизация часов, летящих на самолётах, зачем-то производилась лазерными импульсами, посылаемыми с Земли. Что, вообще говоря, ставит под сомнение однозначность интерпретации полученных результатов. Можно отметить, что установка часов на самолётах (или на ракете) довольно плохая идея во всех отношениях: ускорение, скорость, вибрации – все эти помехи сильно мешают проведению эксперимента. Кроме того, в 70-х годах 20-го века относительная погрешность хода лучших атомных часов составляла $\pm 1 \cdot 10^{-11}$ [18, т.4; с.484], что явно недостаточно для проведения подобных экспериментов.

Для получения однозначного ответа на вопрос о скорости времени нужно сравнить показания двух *неподвижных* относительно друг друга часов, находящихся в *одинаковых* условиях, но на *разной* высоте. То есть провести простой эксперимент, описанный в предыдущем параграфе. Такой эксперимент будет гораздо дешевле, и по его результатам можно будет сделать *однозначный* вывод о том, как влияет гравитация на скорость протекания физических процессов.

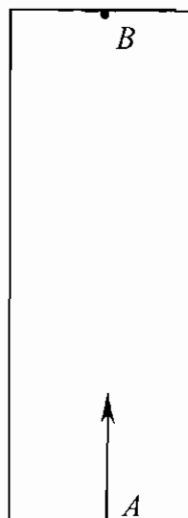
Этот простой эксперимент никого не заинтересовал, возможно, потому, что в его исходе, по-видимому, никто не сомневается. *Все абсолютно убеждены* в том, что время в гравитационном поле течёт медленнее. Такое убеждение основывается, во-первых, на принципе эквивалентности, который лежит в фундаменте общей теории относительности и который основан на равенстве инертной и тяжёлой масс. А это равенство, в свою очередь, экспериментально проверено с очень высокой степенью точности. И, во-вторых, из принципа эквивалентности вытекает эффект гравитационного смещения спектральных линий, также проверенный экспериментально. А этот эффект, как принято думать, является экспериментальным подтверждением того, что время вблизи большой массы замедляется. И в следующем параграфе мы разберём доводы, которые приводятся для доказательства этой точки зрения.

§ 8.5. Фотоны в гравитационном поле

В общей теории относительности предполагается, что время в гравитационном поле замедляется. И для доказательства этого предположения приводится следующий хорошо известный

Рис. 18. Из точки *A* вылетают фотоны и движутся к точке *B*. Наблюдатель, находящийся на верху башни, в точке *B*, обнаруживает, что частота прилетевших фотонов несколько понизилась.

Этот экспериментально проверенный эффект считается в рамках общей теории относительности доказательством того, что время на верху башни течёт несколько “быстрее”, чем внизу.



пример (смотри рис.18). Допустим, наблюдатель находится на верху башни (точка B), а источник света – у её основания (точка A). В этом случае наблюдатель обнаружит, что спектр излучения несколько сдвинут в инфракрасную сторону. Именно этот эффект и интерпретируется в общей теории относительности как то, что время на верху башни течёт быстрее, чем внизу. Аргументы следующие.

Предположим, что у основания башни стоит человек и каждый час ударяет в колокол. И если наблюдатель наверху будет слышать колокольный звон только один раз в два часа, то он вправе будет сделать вывод, что часы у звонаря идут в два раза медленнее, чем у него.

Теперь предположим, что у основания башни имеется звуковая мембрана, которая колеблется с частотой, скажем, 10 кГц (по часам, находящимся внизу). И если бы наблюдатель, находящийся наверху, услышал звуковые колебания с частотой 9 кГц , то он сделал бы вывод, что часы, находящиеся у основания башни, по какой-то причине идут медленнее, чем у него.

А так как свет представляет собой электромагнитные колебания, и наблюдатель, находящийся наверху, видит, что частота этих колебаний понизилась, то он, исходя из этого, также делает вывод, что часы у основания башни идут медленнее, чем у него.

Данный аргумент впервые был приведён ещё Эйнштейном. А затем многократно использовался в научной литературе. Наиболее ясно он изложен в 3-х томном учебнике «Гравитация» Мизнера, Торна и Уилера. Приведём выдержку из него: «Нижний экспериментатор испускает электромагнитный сигнал фиксированной стандартной частоты $\omega_{\text{нижн}}$, принимаемый наблюдателем наверху. Для определённости положим, что сигнал представляет собой импульс, содержащий точно N колебаний. Тогда интервал времени $\delta\tau_{\text{нижн}}$, в течение которого испускается импульс, задаётся выражением $2\pi N = \omega_{\text{нижн}} \cdot \delta\tau_{\text{нижн}}$. Верхний наблюдатель должен принять те же N колебаний электромагнитного волнового импульса и измерить время $\delta\tau_{\text{верхн}}$, которое для этого потребуется. Согласно определению “частоты” имеем $2\pi N = \omega_{\text{верхн}} \cdot \delta\tau_{\text{верхн}}$.

Эффект красного смещения, установленный экспериментально (для нас) или из закона сохранения энергии (для Эйнштейна), свидетельствует о том, что $\omega_{\text{верхн}} < \omega_{\text{нижн}}$; следовательно, интервалы времени имеют разную длительность: $\delta\tau_{\text{верхн}} > \delta\tau_{\text{нижн}}$ » [27, т.1; с.237,238].

Итак, наблюдатель, находящийся наверху, наблюдает некоторый периодический процесс с частотой $\omega_{\text{нижн}}$, происходящий у основания башни. И он обнаруживает, что этот процесс происходит с частотой $\omega_{\text{верхн}} < \omega_{\text{нижн}}$. И в результате он делает вывод, что время у основания башни течёт медленнее, чем у него.

Однако, такой вывод необоснован, и вот почему. Свет существенно отличается от звука. Звук представляет собой механические колебания в среде, звук *не является* потоком частиц. А вот свет – это поток частиц – фотонов. Эти частицы – *неделимы*. Сколько фотонов вылетело снизу вверх, столько их и будет зарегистрировано наверху.

Если у основания башни колеблется звуковая мембрана, то от неё по воздуху будут распространяться звуковые волны. Поэтому наблюдатель, находящийся наверху, сможет зарегистрировать каждое колебание мембраны. И в этом случае по частоте воспринимаемых колебаний он сможет сделать однозначный вывод о скорости времени у основания башни.

А теперь предположим, что у основания башни совершает колебания электрический заряд. Заряд будет излучать фотоны, движение которых можно только приближённо описать как движение волны в пространстве. И наблюдатель наверху будет регистрировать не каждое отдельное колебание заряда (как в случае со звуковой мембраной), а каждый отдельный фотон.

Наблюдатель наверху регистрирует фотон, частота которого несколько понизилась. Что он вправе предположить, исходя из этого? Только то, что пока фотон летел в гравитационном поле, его свойства несколько изменились. Он не вправе сделать вывод, что время внизу “течёт медленнее”. Вот если бы снизу вверх каждую секунду вылетало 1000 фотонов, а наблюдатель наверху регистрировал бы каждую секунду 999 фотонов (числа условные), то тогда он вправе был бы сделать

вывод, что время внизу “течёт медленнее” на одну тысячную, чем у него.

Например, с точки зрения квантовой теории гравитации время у основания башни течёт несколько “быстрее” чем наверху. И если снизу вверх каждую секунду будет вылетать N фотонов, то наблюдатель наверху будет регистрировать те же N фотонов за время несколько меньшее, чем одна секунда. Но при этом частота каждого фотона будет несколько ниже, то есть наблюдатель также обнаружит эффект красного смещения спектральных линий.

Таким образом, исходя из эффекта гравитационного смещения спектральных линий, нельзя сделать однозначный вывод о “замедлении” или “ускорении” времени.

§ 8.6. **Время и общая теория относительности**

В этом параграфе мы рассмотрим доводы, которые используются в общей теории относительности для обоснования её основных положений. При этом наибольшее внимание будем уделять вопросу о “скорости времени” в гравитационном поле.

Хорошо известно, что ускорение тела в поле тяжести не зависит от его инертной массы, то есть гравитационная масса тела *всегда* пропорциональна его инертной массе. Поэтому движение тел в поле тяжести похоже на движение тел в неинерциальной системе отсчёта. Исходя из этого, Эйнштейн сформулировал принцип эквивалентности, суть которого состоит в следующем.

Рассмотрим две лаборатории. Одна из них находится на Земле, где действует сила тяжести \vec{g} . А другая движется в пустом пространстве с ускорением $-\vec{g}$. Принцип эквивалентности утверждает, что *все* физические процессы будут протекать в обеих лабораториях одинаково.

Теперь рассмотрим в качестве примера эксперимент, изображённый на рис. 18. Если исходить из принципа эквивалентности, то можно считать, что никакого поля тяжести нет, но всё, что изображено на рисунке, движется вверх с

ускорением g . И в этом случае за время, пока фотон летит снизу вверх (время полёта фотона $t = L/c$, где L – высота башни), наблюдатель, находящийся наверху, получает дополнительную скорость $\Delta V = gt$ (он ведь движется вверх с ускорением g). И, таким образом, он обнаружит, что спектр излучения сдвинут в инфракрасную сторону, и величина красного смещения z равна:

$$z = \Delta V/c = gL/c^2 = \Delta\varphi/c^2$$

Используя принцип эквивалентности, можно рассчитать, какие из часов, изображённых на рис.17, будут отставать. И если этот принцип верен, то будут отставать часы, находящиеся внизу.

Сформулируем теперь ещё раз вкратце суть доводов, приводимых в рамках общей теории относительности в пользу того, что время в гравитационном поле замедляется.

1. Установленное с высокой степенью точности равенство инертной и гравитационной масс считается экспериментальным подтверждением принципа эквивалентности.

2. Установленный факт гравитационного смещения спектральных линий также считается экспериментальным подтверждением принципа эквивалентности.

3. Из принципа эквивалентности следует, что время в гравитационном поле *замедляется*.

4. Кроме того, из экспериментально установленного факта гравитационного смещения спектральных линий *однозначно* делается вывод (см. предыдущий параграф), что время в гравитационном поле также замедляется.

Все эти доводы выглядят достаточно убедительными, и нужно было построить новую теорию (квантовую теорию гравитации), чтобы понять, где в них допущены ошибки.

Первая ошибка (можно сказать более мягко: логическая неточность, но от этого суть не меняется). Равенство инертной и гравитационной масс не является подтверждением принципа эквивалентности. Например, из Нового закона (2.1) также следует равенство инертной и гравитационной масс (§ 3.2), и поэтому экспериментальный факт этого равенства можно также рассматривать и как подтверждение Нового закона. А Новый закон противоречит принципу эквивалентности.

Также нельзя рассматривать эффект гравитационного смещения спектральных линий как подтверждение принципа эквивалентности. Потому что этот эффект с равным правом можно рассматривать и как подтверждение квантовой теории гравитации (§ 4.9), которая целиком построена на Новом законе.

Вторая ошибка. Исходя из эффекта красного гравитационного смещения (рис.18) нельзя сделать вывод, что время внизу башни “течёт медленнее”. Например, с точки зрения квантовой теории гравитации время внизу башни “течёт быстрее”, но несмотря на это наблюдатель, находящийся наверху, обнаружит, что фотоны “покраснели” (смотри предыдущий параграф).

Таким образом, из всех экспериментов, подтверждающих общую теорию относительности (гравитационное смещение спектральных линий; равенство инертной и тяжёлой масс; отклонение луча света, проходящего вблизи Солнца; “задержка” радиосигнала; смещение перигелия Меркурия) нельзя сделать однозначный вывод о замедлении времени вблизи большой массы и о справедливости принципа эквивалентности. А прямые эксперименты по проверке непосредственного влияния величины гравитационного потенциала на скорость времени (рис.17) почему-то не проводились.

Возражения против принципа эквивалентности не раз выдвигались в научной литературе (правда, по другим причинам). Смотри, например [17;§61]. Предлагают даже совсем отказаться от этого принципа, а уравнения тяготения Эйнштейна (4.2) получить, исходя из предположения, что пространство-время искривляется вблизи масс. Такой путь построения общей теории относительности возможен. Смотри, например [17;§52]. Однако и в этом случае нельзя сделать однозначный вывод о замедлении времени вблизи большой массы. Действительно, из уравнений (4.2) следует [5;с.393], что квадрат интервала в слабом гравитационном поле, создаваемом точечной массой M , имеет следующий вид (4.3):

$$ds^2 = \left(1 - \frac{2GM}{rc^2}\right) c^2 dt^2 - \left(1 + \frac{2GM}{rc^2}\right) dl^2$$

И это выражение практически полностью (с точностью до членов порядка $(GM/rc^2)^2$) совпадает с выражением для квадрата интервала, рассчитанном в рамках квантовой теории гравитации (7.18):

$$ds^2 = \frac{c_0^2 dt_0^2}{\left(1 + 2G \frac{M}{rc_0^2}\right)} - \left(1 + 2G \frac{M}{rc_0^2}\right) dl_0^2$$

Выражение (7.18) было рассчитано, исходя из предположения, что вблизи большой массы время “течёт быстрее” (4.20), (7.14). Поэтому, исходя из выражения (4.3), нельзя сделать вывод о том, что время вблизи большой массы замедляется.

Первый член выражения (7.18) в рамках квантовой теории гравитации имеет простой физический смысл. Вблизи большой массы неопределённость в движении частиц уменьшается, вследствие этого размеры атомов также уменьшаются. В результате возрастает энергия перехода электрона с одного уровня на другой (4.19), и, значит, повышается частота излучения любой спектральной линии (4.20), то есть длительность любого периодического процесса вблизи большой массы *сокращается*, и, следовательно, скорость его протекания *возрастает*.

А какой физический смысл имеет первый член в выражении (4.3) в рамках общей теории относительности? Ошибочность (или, лучше сказать, физическая несостоятельность) общей теории относительности заключается в том, что в ней нет чёткого определения ни времени, ни расстояния. И время, и расстояние в общей теории относительности рассматриваются в отрыве от конкретных физических процессов, то есть носят абстрактный характер. Этот недостаток общей теории относительности был указан ещё Эйнштейном (см. § 7.1) и рассматривался им как временный. Однако, по прошествии многих лет несмотря на значительные успехи квантовой механики, ситуация несколько не изменилась. И в следующем параграфе мы рассмотрим траекторию движения частицы в гравитационном поле с точки зрения квантовой механики. И покажем, что предположение о замедлении времени вблизи большой массы в корне неверно.

§ 8.7. Частица в гравитационном поле

Хорошо известно, что все частицы (так же как и тела) притягиваются к Земле. Можно сказать, что со стороны Земли на частицу действует сила, и поэтому она притягивается к Земле (такой подход к гравитации применяется в теории тяготения Ньютона). А можно сказать, что частица движется по “прямой линии” (геодезической) в искривлённом пространстве-времени. И так как пространственно-временной масштаб изменяется в зависимости от высоты над поверхностью Земли, то с точки зрения неподвижного наблюдателя такая “прямая” будет искривлена. Именно такой подход к гравитации применяется как в общей теории относительности, так и в квантовой теории гравитации.

Напомним, что с точки зрения квантовой механики движущаяся частица представляет собой движущуюся волну. А волна движется из одной точки в другую так, чтобы разность фаз в конце и начале пути была минимальна [6;с.36] (смотри также § 4.7), то есть волна движется так, чтобы затратить на пройденный путь *минимум* собственных колебаний. А это, в свою очередь, означает, что частица движется из одной точки в другую так, чтобы затратить на пройденный путь *минимум* времени, *измеренного по собственным часам* (то есть в единицах времени кратных собственному периоду колебаний).

Предположим, что никакого гравитационного поля нет, и частица движется из точки A в точку B по прямой (смотри рис. 19). То есть частица движется так, чтобы затратить на пройденный путь минимум времени. Пусть она затрачивает на этот путь, к примеру, 100 секунд. Теперь предположим, что в верхней полуплоскости (над прямой AB) время стало течь медленнее, скажем на 10%, чем на прямой AB , а в нижней полуплоскости – на 10% быстрее. Вопрос: как в этом случае будет двигаться частица – по прямому отрезку AB , по кривой ACB или по кривой ADB ?

Для простоты предположим, что отклонение частицы от прямой линии незначительно. То есть это означает, что по часам

наблюдателя, находящегося на прямой AB , частица затратит примерно одинаковое время и на путь ACB , и на путь ADB , и на путь по прямому отрезку AB . Но ведь частица движется так, чтобы затратить на пройденный путь минимум времени *по собственным часам*. Для большей наглядности предположим, что частица не стабильна, и время её жизни как раз составляет 100 секунд. И для частицы по времени будет короче тот путь, на который она затратит меньшую часть своей жизни.

Если бы частица двигалась по кривой ADB , где время течёт на 10% быстрее, то ей потребовалось бы затратить на свой путь по собственным часам (которые в этом случае шли бы на 10% быстрее) больше времени – 110 секунд. То есть частица не долетела бы до точки B . А если бы частица двигалась по кривой ACB , где время течёт медленнее на 10%, то она затратила бы на свой путь по собственным часам, соответственно, 90 секунд. То есть она затратила бы на путь из точки A в точку B только 90% своей жизни. Следовательно, частица будет двигаться по кривой ACB .

Итак, чтобы прийти из точки A в точку B как можно быстрее (по собственным часам) частица немного завернёт в ту область пространства, где время течёт медленнее.

Хорошо известно, что в гравитационном поле Земли частица движется по параболе. И при движении из точки A в

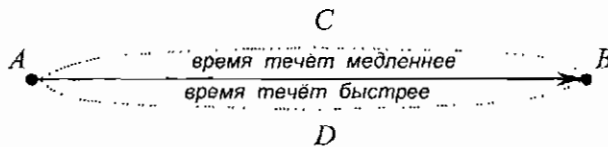


Рис. 19. Если время во всех точках пространства течёт одинаково быстро, то частица будет двигаться из точки A в точку B по прямой. Но если в нижней полуплоскости время течёт быстрее, а в верхней, наоборот, медленнее, то частица при движении немного завернёт в верхнюю полуплоскость, чтобы затратить на пройденный путь меньшую часть своей жизни.

точку B она немного заворачивает в область, находящуюся выше от поверхности Земли (смотри рис. 20). Но это как раз и означает, что на большей высоте время течёт медленнее. То есть на большей высоте скорость протекания физических процессов несколько уменьшается. И, соответственно, частота колебаний любого периодического процесса несколько понижается (4.20).

Этот вывод полностью согласуется с квантовой теорией гравитации и показывает ошибочность общей теории относительности.

Таким образом, несложный анализ траектории движения частицы в поле тяжести Земли, выполненный в рамках квантовой механики, показывает, что одно из основных положений общей теории относительности (о замедлении времени вблизи большой массы) в корне неверно.

Ввиду особой важности этого вывода, а также учитывая то, что такое возражение против основных положений общей теории относительности, по-видимому, никогда раньше в научной литературе не рассматривалось, давайте ещё раз кратко формулируем его суть.

С точки зрения общей теории относительности на большей высоте время течёт быстрее. И любые часы (а, значит, и любые физические процессы), связанные с движущейся из точки A в точку B частицей (рис.20), будут идти быстрее, чем любые часы, движущиеся по прямой AB . Более того, «истинная орбита часов

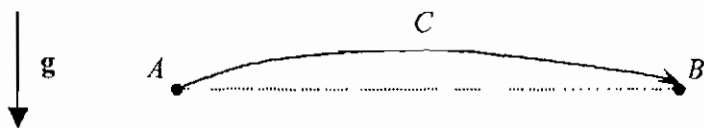


Рис. 20. Хорошо известно, что в поле тяжести Земли частица движется из точки A в точку B по параболе ACB . То есть для того, чтобы затратить на путь из точки A в точку B меньшее время (по своим часам), частица заворачивает немного вверх. И это означает, что на большей высоте время течёт медленнее.

это та, которая соответствует максимальному собственному времени» [10;с.158]. Это одно из ключевых положений общей теории относительности.

Но, с другой стороны, с точки зрения квантовой механики движение частицы может быть полностью описано при помощи волновой Ψ -функции, которая определяет амплитуду плотности вероятности её местонахождения в пространстве. А любая волна *всегда* движется по кратчайшему оптическому пути, то есть так, чтобы была минимальна разность фаз в конце и начале пути (в противном случае все близкорасположенные к траектории пути приходили бы в точку B с разной фазой, и в результате вероятность обнаружить частицу в окрестности этой точки была бы равна нулю). Это означает, что волна при движении из точки A в точку B движется так, чтобы совершить за время своего пути как можно *меньшее* число собственных колебаний. То есть частица будет двигаться так, чтобы затратить на пройденный путь *минимум* собственного времени.

Итак, с точки зрения общей теории относительности частица движется из точки A в точку B так, чтобы затратить на пройденный путь *максимум* собственного времени. Из этой точки зрения следует, что время на большей высоте будет течь быстрее. А с точки зрения квантовой механики частица движется из точки A в точку B так, чтобы затратить на пройденный путь *минимум* собственного времени. Из этой точки зрения следует, что время на большой высоте будет течь медленнее.

Таким образом, основное положение квантовой механики о том, что частица обладает волновыми свойствами, в корне противоречит основному положению общей теории относительности о том, что время вблизи большой массы замедляется.

Так как истинность квантовой механики проверена в многочисленных экспериментах с очень высокой степенью точности, то можно сделать вывод, что ошибка заложена в фундаменте общей теории относительности. И, следовательно, из двух одинаковых часов отстанут те, которые расположены *выше* над земной поверхностью (рис. 17).

Глава 9

Проблемы

Современной Космологии

В этой главе мы рассмотрим наиболее интересные проблемы современной космологии, которые явным образом не вписываются в стандартную модель расширяющейся Вселенной, основанную на уравнениях общей теории относительности.

§ 9.1. Измерение расстояний

Для того чтобы составить некоторое представление об устройстве Вселенной, необходимо уметь определять расстояния до различных небесных объектов (звёзд, галактик, квазаров...). Сейчас мы рассмотрим некоторые из основных способов определения расстояний.

1. Тригонометрический параллакс. Каждые полгода Земля перемещается в пространстве на 300 миллионов километров. Из-за этого направление на близкую звезду смещается на небольшой угол. Угол, равный половине угла смещения, называется параллаксом звезды. Даже для ближайших звёзд параллакс меньше 1 секунды (3600 секунд составляют один градус). Зная угол смещения и диаметр земной орбиты, легко определить расстояние до звезды. При этом параллакс в одну секунду соответствует расстоянию около трёх световых лет. Такое расстояние называется парсеком. Парсек используют в

астрономии в качестве единицы измерения расстояний ($1 \text{ пк} = 3,262$ световых года). Методом тригонометрического параллакса можно определять расстояния только до близких звёзд, находящихся на расстояниях порядка тысячи световых лет.

2. Метод движущегося скопления. При движении звёздного скопления по галактике все входящие в него звёзды перемещаются в пространстве практически по параллельным траекториям. Если векторы скоростей видимого движения звёзд нанести на карту неба, то линии, являющиеся продолжением этих векторов, из-за эффекта перспективы сойдутся в общей точке на небе – точке схождения (также как параллельные рельсы сходятся на горизонте в одной точке). По измерению доплеровского смещения линий в спектре звезды определяют её лучевую скорость, то есть составляющую скорости вдоль луча зрения (вдоль направления на звезду). Если лучевую скорость умножить на $\operatorname{tg} \theta$ (где θ – угол между положением звезды и точкой схождения), то получим скорость звезды, перпендикулярную лучу зрения. А разделив эту скорость на угловую скорость видимого перемещения звезды на небе, определим расстояние до неё. Метод движущегося скопления позволяет определять расстояния до звёздных скоплений, находящихся в пределах нашей Галактики, имеющей диаметр около 100 тысяч световых лет.

3. Цефеиды. Существуют гигантские звёзды с переменной светимостью. Они называются цефеидами. В среднем светимость цефеид в 10.000 раз превосходит светимость Солнца. Относительно много цефеид находится в Магеллановых Облаках – маленьких галактиках, вращающихся вокруг нашей Галактики. В 1908 году Генриетта Ливит, изучая звёзды Малого Магелланового Облака, обратила внимание на интересное свойство цефеид. Она обнаружила, что видимая яркость этих звёзд связана с их периодом изменения светимости. Чем ярче звезда, тем больше у неё период изменения светимости. Все звёзды Малого Магелланового Облака находятся примерно на одинаковом расстоянии от нас, так как размеры облака малы по сравнению с расстоянием до него. Это означает, что и

абсолютная светимость цефеид также связана с периодом изменения видимого блеска. Для того чтобы однозначно определить закон этой связи, нужно каким-либо другим способом измерить расстояние до близких цефеид. Это удалось сделать методом тригонометрического параллакса. Измерив период изменения блеска цефеиды, находящейся в какой-нибудь галактике, определяют её абсолютную светимость. Сравнивая видимую и абсолютную светимости, вычисляют расстояние до цефеиды, а значит и до галактики. Этот метод позволяет определять расстояния до галактик, удалённых на сотни миллионов световых лет.

4. Закон Хаббла. В 1929 году Эдвин Хаббл обнаружил, что красное смещение в спектре излучения галактики напрямую зависит от расстояния до неё. Чем дальше находится от нас галактика, тем больше величина красного смещения z в её спектре. По определению: $z = \Delta\lambda/\lambda$, где λ – длина волны спектральной линии, а $\Delta\lambda$ – изменение этой длины волны в спектре излучения галактики. Предполагается, что красные смещения вызваны тем, что галактики удаляются от нас с различными скоростями. Хаббл располагал значениями расстояний примерно до 25 галактик и сделал следующий вывод. Каждая галактика удаляется от нас со скоростью V тем большей, чем дальше она находится:

$$V = Hr \quad (9.1)$$

здесь r – расстояние до галактики, H – постоянная Хаббла. По современным данным, основанным на измерении анизотропии реликтового излучения (эксперимент Бумеранг) скорость удаления галактик возрастает на 65 ± 5 км/с на каждый миллион парсек [43;с.859], то есть:

$$H = 65 \pm 5 \text{ км/(с·Мпк)} \quad (9.2)$$

По другим данным, основанным на наблюдении 800 цефеид, находящихся в 18 далёких галактиках (космический телескоп Хаббл), приводится следующее значение для постоянной Хаббла [45,46]: $H = 71 \pm 6$ км/(с·Мпк).

Закон Хаббла позволяет напрямую вычислить расстояние r до галактики по измерению величины красного смещения z в её

спектре. Если скорость галактики $V \ll c$, то $z = V/c = Hr/c$ и, следовательно: $r = zc/H$.

В общем случае связь между красным смещением и скоростью удаления источника определяется следующим уравнением (релятивистский доплеровский эффект) [17;с.57]:

$$z = \frac{1 + \frac{V}{c}}{\sqrt{1 - \frac{V^2}{c^2}}} - 1 \quad (9.3)$$

Числитель в этом уравнении – это классический доплеровский эффект, вызванный скоростью удаления источника, а знаменатель – это релятивистская поправка, вызванная замедлением времени на движущимся источнике.

Для наглядности приведём таблицу, связывающую величину красного смещения со скоростью удаления источника:

V/c	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,8	0,9	0,92	0,94	0,96	0,98
$z \approx$	0,1	0,2	0,4	0,5	0,7	1	2	3,3	3,9	4,5	6	8,9

5. Сверхновые звёзды. Время от времени во Вселенной происходят взрывы звёзд невероятной силы. Такие звёзды называются сверхновыми. Благодаря огромному количеству энергии, выделяющейся при взрыве, сверхновые видны на огромных расстояниях. Было обнаружено, что при взрывах сверхновых определённого типа Ia с хорошей степенью точности выделяется одна и та же энергия, то есть они имеют одинаковую абсолютную светимость. Поэтому такие сверхновые можно использовать в качестве “стандартной свечи” и, измеряя их *видимую* светимость, определять расстояния до них, а, значит, и расстояния до галактик, в которых они находятся.

Существует также множество других косвенных методов определения расстояний до далёких объектов. Подробнее узнать об этом можно, например, из монографии С. Миттона «Исследование галактик» [33;гл.3].

§ 9.2. Расширение Вселенной

Как уже отмечалось в предыдущем параграфе, скорость расширения Вселенной характеризуется величиной постоянной Хаббла. И «один из наиболее интересных космологических вопросов состоит в том, является ли наша Вселенная неограниченной и расширяющейся вечно или она ограничена» [10;с.243].

Можно рассчитать критическое значение средней плотности материи во Вселенной (под материей мы будем подразумевать и вещество, и излучение), при котором гравитация способна остановить расширение. Для этого рассмотрим область пространства радиуса r (смотри рис. 21). Общая масса материи m , находящейся внутри этой области, равна:

$$m = \frac{4}{3} \pi \rho r^3$$

Здесь ρ – средняя плотность материи во Вселенной. Скорость расширения внешней границы области равна $V = Hr$.

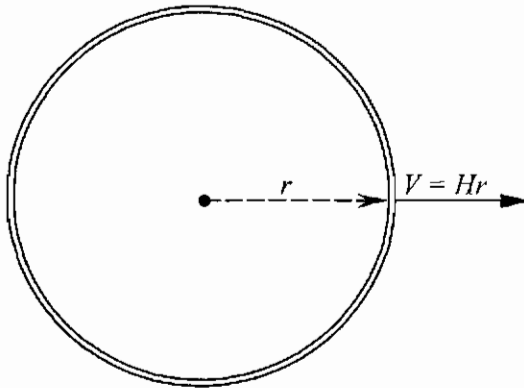


Рис. 21. Рассмотрим область пространства радиуса r . В соответствии с законом Хаббла вещество, находящееся на внешней границе области, движется со скоростью $V = Hr$. Благодаря гравитационному взаимодействию материя, находящаяся внутри данной области, замедляет скорость её расширения.

Мы предполагаем, что вне данной области пространства материя во Вселенной распределена изотропно, и поэтому на внешнюю границу области будут действовать гравитационные силы только со стороны материи, находящейся внутри области. Следовательно, гравитационные силы будут способны остановить расширение при следующем условии:

$$\frac{V^2}{2} \leq G \frac{m}{r} \Rightarrow \frac{H^2 r^2}{2} \leq \frac{4}{3} \pi \rho G r^2$$

И в результате получаем следующее выражение для критической плотности ρ_c [5;с.476]:

$$\rho_c = \frac{3H^2}{8\pi G} \quad (9.4)$$

Если средняя плотность материи во Вселенной больше, чем ρ_c , то говорят, что Вселенная замкнута. В этом случае её максимальный размер конечен, а кривизна пространства в целом положительна. Если же средняя плотность материи меньше, чем ρ_c , то говорят об открытой Вселенной. В этом случае расстояние между галактиками будет неограниченно возрастать, а пространство в целом будет иметь отрицательную кривизну. И, наконец, Вселенная будет плоской, если её плотность в точности равна критической. В этом особом случае пространство имеет евклидову геометрию. Из уравнения (9.4) получаем:

$$\rho_c \approx 10^{-29} \text{ г/см}^3 \quad (9.5)$$

Если экстраполировать расширение Вселенной в прошлое, то окажется, что несколько миллиардов лет назад вся материя во Вселенной находилась в очень плотном состоянии. Время, которое прошло с этого момента, называется возрастом Вселенной. Так как гравитационное поле Вселенной замедляет её расширение, то это значит, что в прошлом скорость разбегания галактик была ещё больше. Поэтому из уравнения (9.1) можно оценить верхнюю границу возраста Вселенной T :

$$T < r/V = H^{-1} \quad (9.6)$$

Давайте рассчитаем зависимость между возрастом Вселенной и величиной постоянной Хаббла, если плотность материи равна критической. В этом случае (см. рис. 21):

$$\frac{V^2}{2} = G \frac{m}{r} \Rightarrow V = \frac{dr}{dt} = \sqrt{2G \frac{m}{r}} \Rightarrow \int \sqrt{r} dr = \int \sqrt{2Gm} dt \Rightarrow$$

$$\frac{2}{3} r^{3/2} = \sqrt{2Gm} \cdot T + const$$

Так как при $T = 0, r = 0$, то $const = 0$, и, следовательно:

$$\frac{4}{9} r^3 = 2Gm \cdot T^2 = 2G \frac{4}{3} \pi \rho_c r^3 T^2 \Rightarrow \frac{4}{9} = \frac{8}{3} \pi \rho_c G T^2$$

Подставляя в полученное выражение значение ρ_c из уравнения (9.4), в результате получаем:

$$T = \frac{2}{3H} \quad (9.7)$$

Итак, мы получили зависимость, связывающую возраст Вселенной с величиной постоянной Хаббла при условии, что плотность материи во Вселенной равна критической. Если плотность материи во Вселенной больше критической, то, очевидно, будет выполняться следующее неравенство [5;с.477]:

$$T < \frac{2}{3H}$$

А если плотность меньше критической, то, соответственно, будет выполняться следующее неравенство [5;с.476]:

$$\frac{2}{3H} < T < \frac{1}{H}$$

§ 9.3. Λ -член

Описание космологических проблем, связанных с расширением Вселенной, будет неполным, если предварительно не упомянуть о так называемом Λ -члене.

Уравнения тяготения Эйнштейна (4.2) могут быть видоизменены путём введения в них новой космологической постоянной Λ (лямбда-члена) [5;с.457]:

$$R_{ik} - \frac{1}{2}g_{ik}R = \frac{8\pi G}{c^4}T_{ik} + \Lambda g_{ik} \quad (9.8)$$

Физической идеей введения Λ -члена является предположение о том, что пустое пространство (вакуум) может обладать свойством гравитации или антигравитации. Космологическая постоянная описывает силы притяжения (если $\Lambda < 0$) или отталкивания (если $\Lambda > 0$), являющиеся дополнительными по отношению к гравитационным силам, создаваемым обычной материей. Эти дополнительные силы пропорциональны расстоянию между телами и их часто называют гравитацией вакуума.

Впервые в уравнения тяготения Λ -член был введён ещё Эйнштейном. Это было сделано с целью построить стационарную модель Вселенной, в которой силы гравитационного притяжения на больших расстояниях уравновешиваются силами отталкивания. Но когда было обнаружено, что наша Вселенная расширяется, то, соответственно, отпала и надобность в Λ -члене.

Тем не менее, на протяжении всего 20-го века неоднократно предпринимались попытки ввести Λ -член в уравнения Эйнштейна. Это делалось с целью объяснить какую-нибудь новую космологическую проблему. Дело здесь в том, что «если приписать “космологической постоянной” Λ очень малое значение, то наличие этого члена не будет сказываться существенным образом на гравитационных полях в не слишком больших областях пространства-времени, но приведёт к появлению новых типов “космологических решений”, которые могли бы описывать мир в целом» [5;с.457]. И в результате «космология была “испорчена” трудностями, связанными с определением значения космологической постоянной» [10;с.216].

В настоящее время, по крайней мере, можно утверждать, что [18,т.2;с.475]: $|\Lambda| < 10^{-55}$ см.

Формально космологический член в уравнениях (9.8) эквивалентен дополнительному члену в тензоре энергии-импульса. Этот член даёт следующее значение для компоненты энергии ε_Λ и давления p_Λ :

$$\epsilon_{\Lambda} = -p_{\Lambda} = \frac{c^4 \Lambda}{8\pi G} \quad (9.9)$$

Это означает, что если космологическая постоянная отлична от нуля, то физический вакуум (пустое пространство) обладает некоторым давлением и энергией. Такое предположение, возможно, интересно с логической или математической точек зрения, но оно не имеет никаких оснований с *физической* точки зрения. Вот что написано по этому поводу в курсе Теоретической физики Л. Ландау и Е. Лифшица: «В настоящее время, однако, нет никаких настоятельных и убедительных оснований – как наблюдательных, так и теоретических – для такого видоизменения основных уравнений теории. Подчеркнём, что речь шла бы об изменении, имеющем глубокий физический смысл: введение в плотность лагранжевой функции постоянного члена, вообще не зависящего от состояния поля, означало бы приписывание пространству-времени принципиально неустранимой кривизны, не связанной ни с материей, ни с гравитационными волнами» [5;с.457].

Единственное основание для введения Λ -члена – это то, что с его помощью можно объяснить некоторые космологические проблемы. И в результате одно непонятное явление “объясняется” через введение другого, ещё более непонятного.

§ 9.4. Скрытая масса

Определение полной массы Вселенной – задача достаточно трудная. С одной стороны, требуется оценить массу всех видимых галактик, измеряя их видимую светимость и учитывая при этом расстояние до них. С другой стороны, во Вселенной существует невидимая материя, определить массу которой значительно сложнее.

Минимальное значение средней плотности Вселенной можно найти, сложив полное количество видимого вещества. Оказывается, что его плотность примерно равна 3% от критической плотности. Невидимое же вещество можно, в принципе, регистрировать косвенно, по гравитационным

эффектам. Например, галактики за счёт гравитационного взаимодействия образуют скопления. Проводились исследования скоростей галактик, входящих в такие скопления. Многие галактики движутся так быстро, что скопления в целом должны были бы распасться. Поэтому предполагается, что они содержат значительное количество невидимого вещества. Существует множество методов, позволяющих определять невидимое вещество по гравитационным эффектам. Они достаточно хорошо согласуются между собой и позволяют сделать вывод, что невидимого вещества во Вселенной примерно в десять раз больше, чем светящегося.

Природа этого невидимого вещества, или, как сейчас принято говорить скрытой массы (dark matter) совершенно неизвестна. Известно только то, что это тёмная, но абсолютно прозрачная материя. То есть она не излучает ни света, ни других электромагнитных волн и, вообще, практически не взаимодействует с электромагнитным излучением [39]. Она имеет небарионное происхождение, то есть не имеет ничего общего с обычным веществом (основную массу обычного вещества составляют барионы – тяжёлые частицы: протоны, нейтроны и т. д.). Она является гравитационно не сгущивающейся, то есть не образует под действием сил гравитационного притяжения компактные массивные объекты, хотя и участвует в гравитационном взаимодействии. Одним словом, скрытая масса – это неизвестное науке вещество. Вот выдержка на эту тему из апрельского номера журнала «Успехи физических наук» за 2000 год: «К настоящему времени твёрдо установлено, что Вселенная состоит в основном не из звёзд, газа и пыли, а из вещества неизвестной природы, которое проявляет себя лишь через гравитационное взаимодействие с обычной материей. Это вещество называют “тёмной материей”, или “скрытой массой”» [40].

Таким образом, средняя плотность материи во Вселенной составляет около 30 % от критической, и из них только десятую часть составляет обычное вещество, а всё остальное – это неизвестная материя.

В 2000 году с помощью телескопов, установленных на воздушных шарах, был проведён международный эксперимент “Бумеранг” (Boomerang), в котором были выполнены измерения угловых флуктуаций температуры реликтового излучения Вселенной. И по результатам данного эксперимента был сделан следующий вывод. Пространственная геометрия Вселенной близка к евклидовой, а суммарная плотность материи во Вселенной близка к критической [41].

И по данным наблюдений за 2000 год [43;с.859] приводится следующее значение для величины средней плотности материи во Вселенной Ω (в единицах критической плотности, то есть $\Omega = \rho/\rho_c$):

$$\Omega = 1,09 \pm 0,07 \quad (9.10)$$

И в связи с этим возникают две проблемы.

Проблема 1. Случайное это совпадение или нет, что плотность материи во Вселенной близка к критической? Если это совпадение случайное, то его вероятность ничтожно мала. А если не случайное, то что является его причиной?

Проблема 2. Как уже говорилось, суммарная плотность обычного вещества и тёмной материи составляет около 30 % от критической. Так что же это за “новая материя”, которая даёт недостающий вклад величиной 70 %?

В предыдущем параграфе говорилось о том, что уравнения Эйнштейна формально можно видоизменить путём введения Λ -члена. И в этом случае физический вакуум будет обладать некоторой плотностью энергии (9.9). Так вот, в современной космологии предполагается, что эти недостающие 70 % связаны с энергией вакуума, то есть с Λ -членом. И в общем случае величину средней плотности материи во Вселенной Ω принято представлять в следующем виде [39]:

$$\Omega = \Omega_B + \Omega_D + \Omega_\Lambda$$

Здесь Ω_B – вклад барионов, то есть обычного вещества:

$$\Omega_B = 0,02 \pm 0,01 \quad (9.11)$$

Ω_D – вклад тёмной материи:

$$\Omega_D = 0,3 \pm 0,1 \quad (9.12)$$

Ω_Λ – вклад “вакуумной энергии”:

$$\Omega_\Lambda = 0,7 \pm 0,1 \quad (9.13)$$

По современным данным, основанным на исследовании крупномасштабного распределения галактик, приводятся несколько иные оценки [47,48]:

$$\Omega_\Lambda \approx 0,62, \quad \Omega_D \approx 0,33, \quad \Omega_B \approx 0,05 \quad (9.14)$$

§ 9.5. Возраст Вселенной

Как уже отмечалось в предыдущем параграфе наша Вселенная с хорошей степенью точности является плоской, и её плотность близка к критической. И так как плотность Вселенной близка к критической, то, следовательно, её возраст T определяется выражением (9.7):

$$T = \frac{2}{3H}$$

Подставляя в это выражение значение постоянной Хаббла (9.2), получаем, что возраст Вселенной равен:

$$T = 10 \pm 1 \text{ млрд. лет} \quad (9.15)$$

И в связи с этим возникает следующее противоречие. Полученный возраст Вселенной оказался меньше, чем теоретическая оценка возраста старых звёздных систем, называемых шаровыми скоплениями.

Шаровые скопления были в числе первых объектов, образовавшихся в нашей Галактике, и их возраст оценивается примерно в 12 миллиардов лет. Хотя ясно, что возраст шаровых скоплений не может превышать возраст Вселенной. Подробнее об этом можно узнать, например, из статьи «Скорость расширения и размеры Вселенной», напечатанной в 1–м номере журнала «В мире науки» за 1993 год [42;с.24].

По поводу данного противоречия в рамках современной космологии предлагается следующее объяснение. Если ввести в уравнения Эйнштейна Λ -член (9.8), то из-за силы дополнительного отталкивания между галактиками, возраст Вселенной уже не будет определяться выражением (9.7). И при данном значении постоянной Хаббла всегда можно выбрать такую величину

Λ -члена, чтобы возраст Вселенной получился сколь угодно большим.

§ 9.6. Барийонная асимметрия Вселенной

С физической точки зрения вещество и антивещество абсолютно симметричны. Однако в окружающем нас мире существует только вещество, а антивещества – нет. Может возникнуть вопрос: куда делось антивещество? Или: почему существует только вещество? Асимметрию вещества и антивещества во Вселенной иногда также называют барийонной асимметрией Вселенной. Следует также отметить, что при любых физических процессах сохраняется разность между числом барийонов и числом антибарийонов. Это явление носит название закона сохранения барийонного заряда.

Вот что написано о барийонной асимметрии в 1–м томе Физической Энциклопедии за 1988 год: «Объяснение происхождения барийонной асимметрии Вселенной – одна из ключевых проблем современной космологии и физики элементарных частиц. Конечно, можно стать на точку зрения, что Вселенная с самого начала была глобально асимметричной. Такое “объяснение” ничему не противоречит, однако оно представляется неудовлетворительным» [18, т.1; с.178].

А может быть Вселенная не является глобально асимметричной по отношению к веществу и антивеществу? Скажем, наша область Вселенной состоит из вещества, а другие, достаточно удаленные от нас области, состоят из антивещества?

Но всё дело в том, что с точки зрения современной физики невозможно объяснить, каким образом антивещество могло бы отделиться от вещества. Вот, например, что писал об этом Яков Зельдович: «Однако, несмотря на усилия многих теоретиков, не удалось найти механизм, который разделял бы барийоны и антибарийоны в астрономических масштабах» [34; с.168].

§ 9.7. Квазары

В 1960 году был обнаружен необычный астрономический объект, спектр которого не поддавался объяснению, так как не соответствовал ни одному из известных элементов. В 1963 году эта загадка была разрешена. Оказалось, что если предположить наличие большого красного смещения в спектре объекта, то все линии спектра совпадут с уже известными. В дальнейшем было обнаружено множество подобных объектов. Они были названы квазарами. Вот что пишет по этому поводу в монографии «Исследование галактик» С. Миттон: «Самой удивительной особенностью квазаров являются их аномально большие красные смещения. Другие проблемы, обычно связываемые с квазарами, проистекают в первую очередь из этого свойства» [33;с.195].

Общепринято, что в расширяющейся Вселенной величины скорости света и постоянной Планка остаются неизменными. Поэтому красные смещения, наблюдаемые в спектрах излучения квазаров, могут объясняться только доплеровским эффектом, вызванным разбеганием галактик. К 1990 году уже были обнаружены квазары с красным смещением $z > 4$ [18,т.2;с.250].

Если принять закон Хаббла для связи красного смещения с расстоянием, то красные смещения квазаров соответствуют расстояниям в несколько миллиардов световых лет. Зная расстояние до квазара и его видимую светимость, можно рассчитать его абсолютную светимость. И оказалось, что мощность излучения квазаров превосходит мощность излучения наиболее ярких галактик в сотни раз.

Вот, например, что написано о квазарах в Физической энциклопедии: «Данные наблюдений квазаров во всём диапазоне частот электромагнитного излучения интерпретируются следующим образом. Квазары представляют собой ядра галактик, в которых происходит мощное выделение энергии из области с характерными размерами менее 10^{16} см. Интегральная светимость квазаров составляет 10^{45} – 10^{48} эрг/с, т. е. на несколько порядков превосходит оптическую светимость звёздной составляющей наиболее ярких галактик» [18,т.2;с.250].

Нередки случаи, когда яркость квазара может изменяться на значительную величину с периодом всего несколько суток. Это означает, что размеры квазара (размеры области, где происходит интенсивное энерговыделение) не могут намного превышать одни световые сутки, то есть составляют доли парсека. До сих пор неизвестно, какие законы физики позволяют втиснуть такую колоссальную мощность в такой маленький объём!

§ 9.8. Ускорение галактик

В 1998 году было обнаружено интересное астрофизическое явление, которое не укладывалось в рамки стандартной космологической модели, основанной на уравнениях общей теории относительности. И данное явление было интерпретировано следующим образом. *Наша Вселенная расширяется с ускорением!* То есть скорости, с которыми галактики удаляются друг от друга, не уменьшаются с течением времени из-за гравитационного притяжения между ними, а, наоборот, увеличиваются вопреки закону Всемирного тяготения. В связи с этим в научном мире идут разговоры о революции в космологии.

На эту тему в 2001 году была напечатана обзорная статья в журнале «Успехи физических наук». Чтобы лучше понять, что же в действительности было обнаружено, приведём выдержку из неё: «Первая группа наблюдателей [37,38], сообщавшая о своих результатах в 1998 г., располагала данными о всего нескольких сверхновых нужного типа на нужных расстояниях, но уже и этого было достаточно, чтобы заметить космологический эффект в законе убывания видимой яркости с расстоянием; точнее, лучше смотреть ни на расстояния, а на красные смещения, как это обычно и делается в случае далёких источников. Оказалось, что убывание яркости в среднем происходит заметно быстрее, чем этого следовало бы ожидать по космологической теории, которая три года назад считалась стандартной. Такое дополнительное потускнение означает, что данному красному смещению

соответствует некоторая эффективная добавка расстояния. Но это возможно тогда (и, как сейчас думают, только тогда), когда космологическое расширение происходит с ускорением, т. е. когда скорость удаления от нас источника не убывает, а возрастает со временем» [39;с.1154].

Итак, при исследовании взрывов сверхновых типа Ia (такая сверхновая, как уже отмечалось в § 9.1, является с хорошей степенью точности стандартной свечёй) было обнаружено, что зависимость их видимой яркости от величины красного смещения несколько не соответствует закону Хаббла. А именно, видимая яркость убывает с ростом красного смещения несколько быстрее, чем это следует из закона Хаббла. Этот эффект становится заметным при красных смещениях $z \approx 1$ [38;p.568]. И, значит, красное смещение возрастает несколько медленнее, чем это следует из закона Хаббла.

Далее идёт примерно такая логика рассуждений. Когда мы смотрим на далёкие галактики, мы смотрим в прошлое и видим, что красное смещение в спектрах излучения галактик несколько меньше ожидаемого. То есть скорости галактик в прошлом были несколько меньше, чем следует из закона Хаббла. И, значит, скорость расширения Вселенной в прошлом была также несколько меньше, чем это следует из её скорости расширения в настоящий момент. Но это означает, что скорость расширения Вселенной получила некоторое дополнительное ускорение.

Можно ли на основании таких рассуждений сделать вывод, что скорости удаления галактик возрастают со временем? Однозначно такой вывод сделать нельзя. Следует напомнить, что ускорение какого-либо тела – это возрастание его скорости со временем. Вот если бы было установлено, что величины красного смещения в спектрах излучения галактик *возрастают со временем*, то тогда (и то при условии, что их возрастание вызвано только доплеровским эффектом) можно было бы сделать вывод, что наша Вселенная расширяется с ускорением. Но в данном случае было обнаружено нечто другое. А именно, было обнаружено явление, которое явным образом не вписывается в стандартную космологическую модель, основанную на

уравнениях общей теории относительности. А из этого логически можно сделать не один, а два вывода.

Вывод 1. Уравнения общей теории относительности могут быть применимы для описания космологических явлений только в том случае, если в них вести Λ -член. Причём, $\Lambda > 0$, то есть вакуум должен обладать свойством антигравитации, и в результате этого наша Вселенная расширяется с ускорением.

Вывод 2. Уравнения общей теории относительности *не применимы* для описания космологических явлений.

Теперь следует напомнить, что общая теория относительности внесла некоторые уточнения в закон Всемирного тяготения Ньютона, но она *не отменила* этот закон. С другой стороны, общая теория относительности, как и *любая* другая физическая теория, имеет ограниченную область применения, хотя границы её применимости будут вполне ясны только после построения другой, более полной теории (в данном случае на роль такой теории претендует квантовая теория гравитации). Поэтому наиболее правдоподобным из двух выводов является второй.

§ 9.9. Инфляция

Всё перечисленное в этой главе – это далеко не полный перечень существующих космологических проблем. Теория горячей Вселенной (теория Большого взрыва), основанная на уравнениях общей теории относительности, столкнулась с большим количеством трудностей при объяснении астрофизических наблюдений. Вот что написано на эту тему в Физической энциклопедии: «Теория горячей Вселенной не даёт ответов на вопросы: что было до Большого Взрыва; почему риманова геометрия, описывающая свойства пространства нашей Вселенной, с такой огромной степенью точности близка к евклидовой геометрии плоского мира; почему наблюдаемая часть Вселенной в среднем является однородной; откуда в этом однородном мире взялись начальные неоднородности, необходимые для образования галактик; почему разные части

Вселенной, сформировавшиеся независимо друг от друга, в настоящее время выглядят практически одинаково; почему все части бесконечной, плоской и открытой Вселенной должны были начать своё расширение одновременно. Если же Вселенная замкнута, то было непонятно, как она могла прожить $\approx 10^{10}$ лет, несмотря на то, что типичное время жизни замкнутой горячей Вселенной не должно было бы сильно превосходить так называемое планковское время $t_p \approx 10^{-43}$ с» [18, т.4; с.240].

Казалось бы, из всего этого можно сделать следующий вывод. Общая теория относительности *не применима* для описания космологических процессов (что, впрочем, не удивительно, ведь её уравнения экспериментально проверены только для слабых гравитационных полей, и то с незначительной точностью $\approx 0,1\%$).

Однако вместо этого примерно с 1980 года в астрофизике начинают всерьёз рассматривать различные модели раздувающейся (инфляционной) Вселенной. Суть модели раздувающейся Вселенной состоит в том [18, т.4, с.239-242], что на раннем этапе эволюции Вселенной *её расширение происходило со скоростью, превышающей на много порядков скорость света*.

То есть если предположить, что расширение Вселенной происходило так быстро, то можно обойти целый ряд космологических вопросов. Спрашивается, какие есть основания, чтобы прийти к инфляционной модели?

Логика рассуждений здесь следующая. Если предположить, что Λ -член больше нуля, то, как уже отмечалось в § 9.3, это приведёт к некоторому отталкиванию между любыми двумя точками в пространстве (отрицательное “давление вакуума”). При определённой (очень большой) величине Λ -члена можно добиться того, что расширение Вселенной будет происходить по экспоненциальному закону. Такое расширение и называется инфляцией. При дальнейшем расширении величина Λ -члена могла каким-либо образом уменьшиться очень сильно, и в наше время Λ -член практически равен нулю, хотя всё же даёт основной вклад в величину средней плотности Вселенной (9.13).

Спрашивается, есть ли во всём этом (Λ-члене и инфляции) какой-либо *физический* смысл? Чтобы лучше понять ответ на этот вопрос, следует вспомнить, чем физическая теория отличается, скажем, от хиромантии. Физическую теорию *можно проверить экспериментально*. И поэтому физическая теория *может* быть опровергнута экспериментом. Но никакая хиромантия не может быть опровергнута экспериментом [11;с.145].

Рассмотрим конкретный пример. Предположим, некоторый физический институт в результате проведения ряда экспериментов разработал теорию, объясняющую их. Однако при проведении новых экспериментов, были обнаружены явления, опровергающие эту теорию. Чтобы “спасти” теорию (плод многолетних усилий института), теоретики выдвигают следующую гипотезу: в ходе проведения новых экспериментов произошло вмешательство “высших сил”. Правда, кто-то при этом сообразил, что навряд ли такую гипотезу напечатают в серьёзном научном журнале и предложил несколько изменить её формулировку: в новых экспериментах сказывается “влияние четвёртого измерения”. Затем формулировку ещё раз изменили, и в результате в научном журнале появилась статья, суть которой сводилась к следующему. Новые эксперименты, проведённые в институте, подтвердили предсказания теоретиков о существовании четвёртого измерения.

Когда ускорение галактик “объясняется” антигравитационными свойствами вакуума, то чем такое объяснение отличается от предположения о вмешательстве “высших сил”? С *физической* точки зрения ничем. Напомним, что физика – это наука, которая изучает влияние одного *наблюдаемого* явления на другое *наблюдаемое* явление. Она не изучает то, что нельзя наблюдать.

Например, если мы предполагаем, что ускорение одного тела вызвано присутствием другого тела, то такое предположение имеет физический смысл (в данном случае не важно, верно оно или нет), так как его можно проверить экспериментально. Но если мы предполагаем, что ускорение тела вызвано “действием” вакуума, то как это проверить? Мы ведь не можем воздействовать на вакуум. А если бы могли, то та часть вакуума,

на которую мы могли бы воздействовать, называлась бы уже иначе.

Поэтому ни Λ -член, ни, тем более, различные модели инфляционной Вселенной не имеют ни малейшего физического смысла. Не случайно все значимые физики отвергали космологическую постоянную. Вот что писал о ней Ричард Фейнман: «Рассмотрение предельно большого радиуса действия гравитационных сил делает довольно бессмысленным введение такого слагаемого в действие, даже если бы это приводило к согласованной теории» [10;с.216]. А Эйнштейн вообще считал введение Λ -члена своей Великой Ошибкой. И если бы он не сделал это, то смог бы сам предсказать расширение Вселенной, открытое впоследствии Хабблом.

Можно сказать, что инфляционные модели в какой-то мере свидетельствуют об инфляции в самой физике: это проявляется в обилии различных идей, лишённых физического смысла (струны, суперструны, суперсимметрия, супергравитация, большое число дополнительных пространственных измерений, торсионные поля и т. д.). И в результате, несмотря на значительный прогресс в технике физического эксперимента и в исследовании космоса, никаких фундаментальных изменений (даже незначительных) за последние семьдесят лет в физике нет. «Фактическим идейным итогом, привнесённым в физику мучительными поисками последнего пятидесятилетия, стало выявление сходства в описании трёх фундаментальных взаимодействий. В остальном современная теория представляет собой сочетание релятивизма и квантовой механики. Ничего принципиально нового в ней нет» [34;с.138].

В следующей главе мы рассмотрим эволюцию Вселенной с новой точки зрения, учитывая влияние всей массы Вселенной на протекание физических процессов. При этом многие космологические проблемы получают своё естественное разрешение.

Глава 10

Космология с точки зрения

Квантовой Теории Гравитации

В этой главе мы рассмотрим эволюцию Вселенной в рамках квантовой теории гравитации, то есть, учитывая влияние распределения материи во Вселенной на протекание физических процессов. При этом большинство космологических проблем получит своё естественное разрешение.

§ 10.1. Эволюция Вселенной

Если основные положения квантовой теории гравитации подтверждаются экспериментально, а точность современных физических экспериментов позволяет осуществить проверку новой теории уже в настоящее время (см. § 8.3), то это кардинальным образом изменит наши представления о наблюдаемой Вселенной. Давайте вкратце рассмотрим наиболее существенные изменения, вносимые уравнениями (2.1), (2.9), (3.9) и (3.21) в существующую картину мира.

1. Скорость света и постоянная Планка. В далёком прошлом расстояние между галактиками было существенно меньше, чем в настоящее время. Это означает, что вещество во Вселенной находилось в более плотном состоянии. Поэтому, как видно из уравнений (2.1) и (2.9), *величина скорости света была*

значительно выше, а постоянной Планка ниже, чем в настоящее время. Иначе говоря, в прошлом наша Вселенная была более “классической”. А в будущем будет более “квантовой”.

2. Масса Вселенной. Из уравнения (3.9) следует, что при движении любого физического объекта (твёрдого тела, электромагнитного излучения...) в гравитационном поле сохраняется его масса. Причём не масса покоя, а полная масса $m = m_0$, или $m = E/c^2$, где E – полная энергия данного объекта. Поэтому *полная масса Вселенной остаётся постоянной при её расширении.*

3. Энергия Вселенной. В далёком прошлом полная масса Вселенной была такой же, как и в настоящее время, а величина скорости света была существенно выше. Это означает, что полная энергия Вселенной в далёком прошлом была также существенно выше. *А при расширении Вселенной её полная энергия уменьшается.*

4. Вселенная замкнута. Полная энергия любого тела равна по абсолютной величине его потенциальной энергии в гравитационном поле Вселенной (2.1). А кинетическая энергия тела – это только часть его полной энергии. *Поэтому любому телу, независимо от его скорости, не хватает кинетической энергии, чтобы преодолеть гравитационное притяжение Вселенной.* Это означает, что со временем расширение Вселенной прекратится, и начнётся сжатие.

5. Элементарные частицы. Из уравнения (3.7) следует, что при движении элементарной частицы в гравитационном поле её масса покоя изменяется. Это означает, что масса покоя элементарной частицы зависит от величины гравитационного потенциала Вселенной (3.21). В этом нет ничего необычного. Действительно, масса покоя частицы равна энергии покоящейся частицы, делённой на квадрат скорости света. А энергия покоящейся частицы определяется в том числе и величиной её гравитационного взаимодействия со всей остальной материей, существующей во Вселенной.

При падении электрона (или любой другой частицы) в гравитационном поле его скорость увеличивается, а полная масса остаётся постоянной (3.7). Отсюда следует, что масса покоя будет уменьшаться. Часть массы покоя переходит при этом в

кинетическую энергию движения. И наоборот, как следует из формулы (3.21), при расширении Вселенной масса покоя элементарной частицы увеличивается. Поэтому в далёком прошлом массы элементарных частиц были существенно меньше.

6. Вещество и излучение. Энергия, существующая во Вселенной, находится в различных формах и может переходить из одной формы в другую. В настоящее время большая часть наблюдаемой энергии во Вселенной существует в виде энергии покоя различных тел, то есть находится в скрытой форме. И при современных условиях в активную форму (излучение, кинетическая энергия, тепло и т. д.) может переходить только незначительная часть энергии. Например, при термоядерном синтезе только около 1% энергии покоя переходит в активную энергию.

Однако в далёком прошлом всё было иначе. Полная масса Вселенной в то время была такой же, как и сейчас, а масса покоя всех элементарных частиц (а значит и всех тел) была во много раз меньше. Таким образом, на раннем этапе эволюции Вселенной большая часть её полной массы, а, значит, и большая часть полной энергии находилась в активной форме, в том числе и в виде излучения.

§ 10.2. Куда исчезло антивещество?

Как было отмечено в конце предыдущего параграфа, на раннем этапе эволюции Вселенной подавляющая часть энергии Вселенной находилась в виде излучения, то есть в активной форме. И только малая часть – в виде вещества.

Но если излучение находится в сильно сжатом состоянии, то, как известно, оно может превращаться в вещество и антивещество. Иначе говоря, в очень далёком прошлом во Вселенной было вещество, антивещество и излучение.

Предположим, что в настоящее время общее число барионов и антибарионов, существующих во Вселенной, равно N_0 , то есть $N_0 m_B$ составляет практически всю массу (или по крайней мере значительную часть) вещества во Вселенной (m_B – это некая усреднённая масса покоя одного бариона).

Но в далёком прошлом масса $N_0 m_B$ составляла очень незначительную часть от полной массы Вселенной. Например, когда Вселенная была в миллион раз меньше, масса покоя бариона была в тысячу раз меньше и масса N_0 барионов (или антибарионов) составляла примерно 0,1% от современного значения. Это следует из уравнения (3.21).

Таким образом, в далёком прошлом вещества было лишь на какие-то доли процента больше, чем антивещества. Вещество и антивещество аннигилировали друг с другом с выделением большого количества высокоэнергетичных фотонов. При столкновении таких фотонов снова рождались пары частица–античастица.

Рассмотрим теперь, что произошло при расширении Вселенной.

Пусть N_1 – количество барионов во Вселенной, N_2 – количество антибарионов. И $N_1 \approx N_2$.

Предположим, барионы N_1 и антибарионы N_2 проаннигилировали друг с другом, и выделилась энергия:

$$E = (N_1 + N_2)m_B \cdot c^2 \quad (10.1)$$

Процесс аннигиляции – обратимый процесс, и излучение может вновь превратиться в вещество и антивещество.

При расширении Вселенной остаётся постоянной величина $E/c^2 = const$ (3.9). А масса покоя бариона m_B возрастает (3.21). Поэтому, как видно из уравнения (10.1), сумма $N_1 + N_2$ уменьшается при расширении Вселенной. А так как разность $N_1 - N_2$ остаётся постоянной (закон сохранения барионного заряда), то в результате увеличивается разность между полной массой барионов $N_1 m_B$ и полной массой антибарионов $N_2 m_B$.

Итак, при расширении Вселенной увеличивались массы покоя элементарных частиц. Вследствие этого энергия из активной формы постепенно переходила в скрытую форму – энергию покоя вещества. В результате вещества становилось в процентном отношении всё больше и больше. И, наконец, антивещество полностью исчезло из Вселенной.

Если же исходить из симметрии вещества и антивещества, то можно предположить несколько другой, более вероятный

сценарий. На раннем этапе эволюции Вселенной вещества и антивещества было в точности поровну. Однако со временем возникли незначительные флуктуации: в одной области Вселенной стало чуть-чуть больше вещества, а в другой наоборот – антивещества. При расширении Вселенной эти области перестали контактировать друг с другом. И в дальнейшем небольшой перевес в какой-либо области вещества приводил к тому, что в ней оставалось только вещество, и наоборот. Это означает, что мы находимся в одной из таких областей, где существует теперь уже только вещество, а антивещества нет. А другие удалённые области во Вселенной состоят исключительно из антивещества.

§ 10.3. Источник энергии квазаров

Как было отмечено в § 9.7, мощность излучения квазаров настолько высока, что неизвестно, какие физические процессы могли бы обеспечить такое огромное выделение энергии. И проще всего объяснить её происхождение, предположив, что на квазарах идут процессы аннигиляции вещества и антивещества [10;с.253]. Почему же тогда такое предположение даже не рассматривается? Ответ простой. Действительно, предположив, что на квазарах происходят аннигиляционные процессы, можно объяснить источник колоссальной мощности квазаров. Но как в таком случае объяснить, откуда взялось на квазарах вещество и антивещество? Как уже отмечалось, в рамках современной физики невозможно объяснить, каким образом антивещество могло бы отделиться от вещества в астрономических масштабах [34;с.168].

А в рамках квантовой теории гравитации процесс разделения вещества и антивещества не просто возможен, но, как было показано в предыдущем параграфе, с неизбежностью должен происходить на раннем этапе эволюции Вселенной.

Ввиду особой важности этого процесса, а также учитывая то, что он, по-видимому, никогда раньше не рассматривался, давайте вкратце повторим его суть.

На ранней стадии эволюции Вселенной вся материя в ней находилась в виде излучения, которое, находясь в сильно сжатом состоянии, превращалось в вещество и антивещество. Процесс образования вещества и антивещества с последующей аннигиляцией происходил непрерывно. При этом с неизбежностью возникали флуктуации, случайные отклонения плотности вещества (антивещества) от среднего значения. Эти флуктуации приводили к тому, что в одной области пространства было чуть-чуть больше вещества, а в другой, наоборот, – антивещества.

Из-за расширения Вселенной в какой-то момент времени эти области перестали контактировать друг с другом. И из-за того, что масса покоя бариона при расширении Вселенной возрастала (3.21), а полный барионный заряд сохранялся, то небольшой перевес вещества в некоторой области пространства приводил к тому, что в ней оставалось только вещество. И таким образом, во Вселенной образовались области, состоящие только из вещества или, наоборот, антивещества.

В дальнейшем, спустя сотни миллионов лет, некоторые скопления вещества и антивещества благодаря гравитационному притяжению могли вновь вступить в контакт друг с другом. Колоссальная энергия, выделившаяся при их аннигиляции, как раз и даёт нам возможность наблюдать эти экзотические объекты – квазары, находящиеся от нас на расстояниях несколько миллиардов световых лет.

§ 10.4. Происхождение радиоактивных элементов

Ядра химических элементов состоят из протонов и нейтронов, общее название которых – нуклоны. Протоны имеют положительный электрический заряд и отталкиваются друг от друга. Но с другой стороны, между нуклонами существует ядерное притяжение. Ядерные силы гораздо сильнее электромагнитных, и поэтому они удерживают ядро от распада. Существенной особенностью ядерных сил является достаточно малый радиус их действия $r \approx 10^{-12}$ см. Именно радиус действия ядерных сил и определяет максимально возможный размер ядра,

а значит, и максимально возможное количество протонов и нейтронов, способных образовать относительно устойчивое ядро. Поэтому ядра химических элементов с большим порядковым номером, начиная с урана, неустойчивы. Они самопроизвольно распадаются с выделением большого количества энергии. Это явление называется радиоактивным распадом.

Нуклоны, составляющие ядро, хаотически движутся в нём. И если неопределённость в движении нуклона уменьшится, то его эффективный размер также уменьшится. А объём, занимаемый им, уменьшится пропорционально 3-й степени от эффективного размера. Это означает, что в объёме, который занимает ядро урана (это максимальный объём, при котором ядро относительно стабильно), можно будет разместить в несколько раз больше протонов и нейтронов. Поэтому скорость радиоактивного распада определяется в том числе и величиной постоянной Планка.

Если постоянная Планка возрастет, то соответственно увеличится и неопределённость в движении протонов и нейтронов в ядре. И в результате период полураспада радиоактивного элемента уменьшится. Период полураспада – это время, за которое количество радиоактивного вещества уменьшится в два раза. И наоборот, если постоянную Планка уменьшить, то период полураспада радиоактивных элементов увеличится. Поэтому в далёком прошлом, когда значение постоянной Планка было существенно ниже, могли существовать стабильные трансурановые элементы.

Общепринято, что ядра существующих химических элементов образовались в процессе термоядерного синтеза в недрах горячих звёзд. Однако при современных условиях образование ядер тяжёлых элементов энергетически невыгодно. Поэтому не совсем ясно, каким образом образовались ядра тяжёлых и особенно радиоактивных элементов. Вот что написано об этом в Физической энциклопедии. «Одной из основных задач ядерной астрофизики, помимо объяснения энерговыделения в стационарных звёздах и при взрывах сверхновых (эти процессы сопровождаются синтезом элементов вплоть до железа), является

объяснение происхождения химических элементов тяжелее железа» [18, т.5; с.654].

А если же в прошлом постоянная Планка была существенно меньше, то условия образования ядер были другие. Термоядерный синтез тяжелых и даже трансурановых элементов был вполне возможен. При расширении Вселенной постоянная Планка увеличивалась, трансурановые элементы становились радиоактивными и распадались. С этой точки зрения современные радиоактивные элементы – это остатки, оставшиеся от распада когда-то стабильных трансурановых элементов.

§ 10.5. Плотность материи во Вселенной

Как уже отмечалось ранее, значительная часть усилий в астрофизике во второй половине двадцатого века была направлена на то, чтобы определить с достаточно высокой степенью точности величину средней плотности материи во Вселенной. Трудность этой задачи осложнялась ещё и тем, что во Вселенной, возможно, существует так называемая скрытая масса – тёмная материя, имеющая небарионное происхождение. Точное определение средней плотности материи во Вселенной позволило бы предсказать дальнейшую эволюцию нашей Вселенной. То есть определить, будет ли расширение Вселенной продолжаться неограниченно долго, или со временем оно остановится, и начнётся сжатие.

А в рамках квантовой теории гравитации можно сразу ответить на вопрос о том, замкнута или открыта наша Вселенная и о величине средней плотности материи в ней.

Полная энергия любого тела, как следует из Нового закона (2.1), в точности равна его потенциальной энергии в гравитационном поле Вселенной. А так как кинетическая энергия любого тела меньше его полной энергии, то ни одно тело *не может* вылететь за “пределы Вселенной”. Следовательно, Вселенная замкнута, и её плотность ρ больше критической:

$$\rho > \rho_c \quad (10.2)$$

Теперь ответим на следующий вопрос. *На сколько плотность Вселенной больше критической плотности?*

Если бы во Вселенной не было вещества, а было только излучение, то плотность материи во Вселенной в точности равнялась бы критической. И в этом случае расширение Вселенной длилось бы неограниченно долго во времени и в пространстве. Но благодаря тому, что во Вселенной существует вещество (или антивещество), которое обладает энергией покоя, суммарная кинетическая энергия материи во Вселенной несколько меньше, чем её энергия взаимного гравитационного притяжения. Проще говоря, если “убрать” из Вселенной всё вещество и антивещество, то её плотность будет в точности равна критической. И, значит, плотность материи во Вселенной равна критической плотности плюс плотность вещества:

$$\rho = \rho_c + \rho_B \quad (10.3)$$

здесь ρ_B – средняя плотность вещества (барионов) во Вселенной.

Как было выяснено в § 10.2 и § 10.3, вещество (антивещество) во Вселенной существует только потому, что на ранней стадии эволюции Вселенной были незначительные локальные флуктуации вещества и антивещества. И если бы этих флуктуаций не было, то во Вселенной существовало бы только излучение.

Не вдаваясь в детали процессов, происходивших в то время, трудно сказать, какой была среднеквадратичная величина таких флуктуаций. Но, по крайней мере, можно утверждать, что величина этих флуктуаций составляла не более чем $5 \div 10 \%$, а, скорее всего, ещё меньше. По современным астрофизическим данным величина галактических неоднородностей на ранней стадии эволюции Вселенной была примерно равна 5% [43;с.859]. И, значит, на долю барионов (обычного вещества) приходится всего только около 5% процентов (а, возможно, и меньше) от общего количества материи во Вселенной:

$$\Omega_B \leq 0,05 \quad (10.4)$$

Следовательно, значение средней плотности материи во Вселенной находится в следующих пределах:

$$\Omega \approx 1 \div 1,05 \quad (10.5)$$

Таким образом, современные астрофизические данные о средней плотности материи во Вселенной и о средней плотности обычного вещества (барионов) (§ 9.4) полностью подтверждают выводы, сделанные в рамках квантовой теории гравитации. Эти выводы непосредственно основаны на Новом законе (2.1) и на его прямом следствии – уравнении (3.21).

В заключение параграфа ещё раз подчеркнём, что с точки зрения квантовой теории гравитации подавляющая часть (95% или даже более) материи во Вселенной находится в виде излучения, то есть основной вклад в значение средней плотности вносит свет (электромагнитное излучение). Кстати, именно свет лучше всего подходит под определение тёмной материи (dark matter). Во-первых, полная масса света во много раз превосходит массу обычного вещества. Во-вторых, свет имеет не барионное происхождение. В-третьих, свет участвует в гравитационном взаимодействии. В-четвёртых, свет является абсолютно не сгущивающейся материей. И, наконец, в-пятых, как это ни парадоксально звучит, свет является абсолютно невидимой материей. Действительно, любую материю, которая находится от нас на некотором расстоянии, мы можем наблюдать *только* при помощи света (электромагнитных волн). Но сам свет (фотоны) мы можем обнаружить только в том случае, если он попадёт нам в глаз или будет зарегистрирован прибором. Но если свет, пролетая в пространстве, не попадёт в наш глаз или не будет зарегистрирован прибором, то такой свет в принципе не наблюдаем (его можно обнаружить только по гравитационному воздействию, то есть косвенно).

§ 10.6. Красное смещение

Общепринято, что в расширяющейся Вселенной остаются неизменными скорость света, постоянная Планка, а также массы покоя элементарных частиц. С этой точки зрения красные смещения, наблюдаемые в спектрах излучения далёких галактик, могут объясняться только доплеровским эффектом, вызванным тем, что галактики удаляются от нас (9.1).

С новой точки зрения это не так. Пока фотон летит к нам из далёкой галактики, Вселенная расширяется, и вследствие этого изменяется и скорость света, и постоянная Планка. Поэтому частота фотона также изменяется. Например, из формулы (3.9) следует, что энергия фотона, двигающегося в расширяющейся Вселенной, будет уменьшаться вследствие уменьшения величины скорости света. Этот результат имеет простой физический смысл: фотон, участвуя в гравитационном взаимодействии, “тормозит” расширение Вселенной. Отсюда следует, что космологическое красное смещение только частично вызвано доплеровским эффектом. Следовательно, скорость разбегания галактик, а значит, и величина постоянной Хаббла меньше, чем предполагается в современной космологии. А возраст Вселенной, соответственно, больше.

Рассчитаем величину дополнительного красного космологического смещения, вызванного *не доплеровским* эффектом.

Предположим, что некоторая галактика n неподвижна относительно Земли. В этом случае, как следует из уравнения (3.17), изменение гравитационного потенциала $\Delta\Phi_n$, создаваемого ею в околосмном пространстве, будет равно:

$$\Delta\Phi_n = -2GM_n/\ell_n \quad (10.6)$$

где M_n – масса галактики, а ℓ_n – расстояние до неё.

Если же галактика движется, то это уравнение следует несколько уточнить, учитывая запаздывание, вызванное тем, что скорость распространения гравитационного взаимодействия конечна:

$$\Delta\Phi_n(t) = -2GM_n/\ell_n(t-\tau)$$

где τ – время, необходимое гравитационному взаимодействию, чтобы распространиться от галактики до Земли.

А так как гравитационное поле распространяется со скоростью света, то $\ell_n(t-\tau)$ – это есть ничто иное, как расстояние до галактики, *видимое* с Земли в момент времени t .

Таким образом, чтобы учесть запаздывание, вызванное конечной скоростью распространения гравитации, в уравнении

(10.6) вместо истинного расстояния до галактики (которое, вообще говоря, нам не известно) следует поставить *видимое* расстояние. Следовательно, гравитационный потенциал $\Phi(t)$, создаваемый всей Вселенной в околосемном пространстве, будет равен:

$$\Phi(t) = -2G \sum_n \frac{M_n}{L_n(t)} \quad (10.7)$$

где $L_n(t)$ – *видимое* с Земли в момент времени t расстояние до галактики или до любого другого объекта, имеющего массу M_n .

В § 4.9, учитывая то, что величина скорости света, постоянной Планка, а также масса покоя электрона (или любой другой частицы) зависит от гравитационного потенциала, мы вывели уравнение (4.21):

$$\omega_{12} = \omega_2 \sqrt{\frac{\Phi_2}{\Phi_1}}$$

Здесь ω_2 – частота излучения спектральной линии в области с потенциалом Φ_2 (там, где находится наблюдатель), ω_{12} – частота той же спектральной линии, но испущенной в области с потенциалом Φ_1 и наблюдаемой в области с потенциалом Φ_2 .

Следовательно, величина красного смещения z будет равна:

$$z = \frac{\Delta\lambda}{\lambda} = \frac{\lambda_{12} - \lambda_2}{\lambda_2} = \frac{\lambda_{12}}{\lambda_2} - 1 = \frac{\omega_2}{\omega_{12}} - 1 = \sqrt{\frac{\Phi_1}{\Phi_2}} - 1 \quad (10.8)$$

Таким образом, в спектре излучения галактики будет дополнительная к доплеровскому эффекту величина красного смещения z_Φ , вызванная тем, что при расширении Вселенной изменяется гравитационный потенциал:

$$z_\Phi = \sqrt{\frac{\Phi(t-\tau)}{\Phi(t)}} - 1. \quad (10.9)$$

Здесь $\Phi(t-\tau)$ – потенциал внутри Вселенной в момент вылета фотона из галактики; $\Phi(t)$ – потенциал внутри Вселенной в момент прибытия фотона на Землю; τ – время полёта фотона.

В соответствии с законом Хаббла (9.1) *видимая* с Земли скорость удаления галактики V_n пропорциональна *видимому* с

Земли расстоянию L_n до неё. И, следовательно, все видимые с Земли линейные размеры внутри Вселенной увеличиваются со временем в одной и той же пропорции. Рассчитаем зависимость линейных размеров L в зависимости от возраста Вселенной T .

Плотность материи во Вселенной близка к критической. Поэтому постоянная Хаббла зависит от возраста Вселенной следующим образом (9.6):

$$H = \frac{2}{3T}$$

И, следовательно:

$$V = \frac{dL}{dt} = HL = \frac{2L}{3T} \Rightarrow \int \frac{dL}{L} = \int \frac{2dt}{3T} \Rightarrow \ln L = \frac{2}{3} \ln T + \text{const} \Rightarrow$$

$$L \sim T^{2/3} \quad (10.10)$$

Таким образом, все видимые с Земли расстояния до галактик увеличиваются пропорционально возрасту Вселенной в степени $2/3$.

Гравитационный потенциал Вселенной изменяется обратно пропорционально её *видимым* линейным размерам (10.7), и, следовательно:

$$z = \sqrt{\frac{\Phi(T-\tau)}{\Phi(T)}} - 1 = \sqrt{\frac{L_n(T)}{L_n(T-\tau)}} - 1 = \sqrt[3]{\frac{T}{T-\tau}} - 1 \quad (10.11)$$

Здесь L_n – видимое с Земли расстояние до галактики в момент времени T (время прибытия фотона на Землю). А $L_n(T-\tau)$ – видимое с Земли расстояние до галактики в момент времени $T-\tau$ (время вылета фотона из галактики). И в результате получаем следующее значение для дополнительного (не доплеровского) красного смещения в спектрах излучения галактик:

$$z_\phi = \frac{1}{\sqrt[3]{1-\tau/T}} - 1 \quad (10.12)$$

§ 10.7. Постоянная Хаббла

В предыдущем параграфе мы пришли к выводу, что красное смещение в спектрах излучения далёких объектов вызвано *не только* доплеровским эффектом. Поэтому скорость удаления от нас галактик несколько меньше, чем предполагается в современной космологии. И, значит, значение постоянной Хаббла также меньше. Рассчитаем значение постоянной Хаббла с новой точки зрения.

Если скорость галактики $V \ll c$, то из-за доплеровского эффекта величина красного смещения z_V равна: $z_V = V/c$. Если расстояние до галактики L , то фотон находился в пути время:

$$\tau = L/c$$

Учитывая, что $\tau \ll T$, из уравнения (10.12) получаем следующее значение дополнительного красного смещения z_Φ :

$$z_\Phi = \frac{\tau}{3T} \quad (10.13)$$

И учитывая уравнение (9.6), получаем:

$$z_\Phi = \frac{\tau}{3T} = \frac{tH}{2} = \frac{LH}{c2} = \frac{V}{2c} \quad (10.14)$$

Так как $z_V, z_\Phi \ll 1$, то наблюдаемый эффект красного смещения z_o будет равен сумме: $z_o = z_V + z_\Phi$. И, следовательно:

$$z_o = \frac{3V}{2c} = \frac{3}{2} z_V \quad (10.15)$$

Полученное значение величины красного смещения z_o оказалось в 1,5 раза больше доплеровского эффекта. Следовательно, скорость разбегания галактик, а значит, и значение постоянной Хаббла в 1,5 раза меньше, чем предполагается в современной космологии (9.2), и составляет следующее значение:

$$H \approx 43 \text{ км}/(\text{с}\cdot\text{Мпк}) \quad (10.16)$$

Из уравнения (9.6) получаем, что возраст Вселенной T составляет следующую величину:

$$T \approx 15 \text{ млрд. лет} \quad (10.17)$$

Итак, только 2/3 от величины видимого красного смещения в спектрах излучения близко расположенных галактик вызвано доплеровским эффектом. Поэтому возраст Вселенной составляет не 10, а 15 млрд. лет. И таким образом, отпадает проблема возраста Вселенной, изложенная в § 9.4.

§ 10.8. Физический вакуум

Как уже отмечалось ранее для решения ряда космологических проблем в научной литературе не раз выдвигалось предположение о том, что пустое пространство (вакуум) может обладать свойством антигравитации ($\Lambda > 0$). А в рамках квантовой теории гравитации предлагается совершенно противоположный подход. С новой точки зрения космологические проблемы возникают не потому, что мы не учитываем какие-то экзотические свойства вакуума, не связанные с обычным веществом, а, наоборот, потому, что мы не учитываем влияние вещества на вакуум. То есть считаем известные свойства вакуума чем-то абсолютно неизменным и независимым от распределения материи во Вселенной. В рамках новой теории все свойства вакуума определяются распределением материи и поэтому изменяются при расширении Вселенной. И если это учитывать, то большинство космологических проблем исчезнет само собой.

Например, при расширении Вселенной нужно учитывать изменение пространственно-временного масштаба, а, значит, и вызванную этим изменением дополнительную величину красного космологического смещения (9.12). С учётом этого, постоянная Хаббла получается в 1,5 раза меньше, а возраст Вселенной, соответственно, в 1,5 раза больше, и сама собой отпадает проблема возраста Вселенной, изложенная в § 9.5. Следовательно, отпадает и вызванная этой проблемой необходимость в Λ -члене.

А если значение постоянной Хаббла оказывается в 1,5 раза меньше, то критическая плотность материи во Вселенной (9.4), (9.5) будет, соответственно, в 2,25 раза меньше:

$$\rho_c \approx 0,4 \cdot 10^{29} \text{ г/см}^3 \quad (10.18)$$

И, значит, опять отпадает необходимость в Λ -члене и связанной с ним энергией и плотностью вакуума Ω_Λ (8.13).

Теперь что касается “ускорения” галактик (§ 9.8). Напомним, что в 1998 году был обнаружен следующий астрофизический эффект. Видимая яркость сверхновых типа Ia убывала в зависимости от величины красного смещения несколько быстрее, чем это следует из стандартной космологической теории [37,38].

Рассмотрим это явление с новой точки зрения. Во-первых, величина красного смещения вызвана не только доплеровским эффектом, и это нужно учитывать. Но в данном случае наиболее важно другое. При большой скорости движения источника в величину доплеровского красного смещения (9.3) значительный вклад вносит релятивистская поправка (знаменатель). Взрывы сверхновых, имеющих красное смещение $z \approx 1$, как нетрудно оценить, происходили тогда, когда размеры Вселенной были примерно раза в два меньше, чем сейчас. А скорость света, соответственно, была в $\sqrt{2}$ раз больше. И из-за того, что в прошлом скорость света была существенно больше, величина красного смещения в спектрах излучения далёких объектов будет меньше, чем это следует из уравнения (9.3) (без учёта изменения скорости света). И наоборот, данному красному смещению будет соответствовать большая скорость удаления объекта, а, значит, и большее расстояние до него и, соответственно, более сильное его потускнение (“эффективная добавка расстояния”, необъяснимая в рамках стандартной космологической теории). Таким образом, и в этом случае также отпадает необходимость в Λ -члене.

§ 10.9. Масса и размеры Вселенной

Одна из важнейших задач современной астрофизики – это достаточно точное определение полной массы наблюдаемой Вселенной. Трудность этой задачи ещё и в том, что возможно существование так называемой скрытой массы, то есть массы недоступной прямому наблюдению.

Рассматривая эволюцию Вселенной с точки зрения квантовой теории гравитации (то есть, учитывая то, что при расширении Вселенной изменяются величины c , \hbar , m), мы пришли к следующему выводу. Плотность материи во Вселенной близка к критической (10.5), а постоянная Хаббла в 1,5 раза меньше (10.16), чем предполагается в современной космологии (если предположить, что космологическое красное смещение вызвано исключительно доплеровским эффектом). Исходя из этого, мы сейчас сделаем оценку полной массы Вселенной M , а также её радиуса R . С одной стороны, учитывая уравнение (9.4),

$$\text{получаем: } M = \frac{4}{3} \pi \rho_c R^3 = \frac{4}{3} \pi R^3 \frac{3H^2}{8\pi G} = \frac{R^3 H^2}{2G}$$

С другой стороны, учитывая уравнения (2.1) и (3.17), получаем:

$$c^2 = -\Phi = 2G \frac{M}{R} \Rightarrow M = \frac{c^2 R}{2G}$$

И в результате получаем следующие уравнения для радиуса и массы Вселенной:

$$R = \frac{c}{H} \quad (10.19)$$

$$M = \frac{c^3}{2GH} \quad (10.20)$$

Подставляя численные значения величин, получаем:

$$R \approx 22,5 \text{ млрд. св. лет} \approx 2 \cdot 10^{26} \text{ м} \quad (10.21)$$

$$M \approx 1,5 \cdot 10^{53} \text{ кг} \quad (10.22)$$

Полученное значение массы Вселенной можно сравнить с данными, приведёнными в «Таблице физических величин» [44; с.987]:

$$M \approx 10^{51} \div 3 \cdot 10^{53} \text{ кг}$$

Итак, рассматривая эволюцию Вселенной с новой точки зрения, мы получили уравнения для массы (10.20) и для радиуса (10.19) Вселенной. При этом наибольшую погрешность в определении этих величин вносит значение постоянной Хаббла. Трудность в определении точного значения постоянной Хаббла вызвана, с одной стороны, тем, что нужно с высокой степенью точности уметь определять расстояния до далёких галактик, а это

можно сделать только косвенными методами. А с другой стороны, т.е. что в действительности мы измеряем не скорость удаления галактики от нас (которую необходимо знать для вычисления постоянной Хаббла), а только лишь величину видимого красного смещения в спектре её излучения, то есть делаем вывод о скорости удаления галактики по косвенным признакам.

В следующем параграфе будет описан эксперимент, который позволит измерить скорость расширения Вселенной *непосредственно*. Причём, для его проведения нам даже не нужно будет смотреть на небо.

§ 10.10. Эксперимент по измерению скорости расширения Вселенной

Для того чтобы в земных условиях непосредственно измерить скорость расширения Вселенной достаточно провести следующий простой эксперимент (о нём уже упоминалось в § 8.2).

Луч лазера (смотри рис. 22) разделяется на два луча так, что один луч сразу попадает на детектор, а второй луч сначала движется некоторое время между двумя параллельными зеркалами и только после этого попадает на детектор. Таким образом, второй луч попадает на детектор с временной задержкой τ (несколько минут). И на детекторе сравниваются длины волн двух лучей, испущенных в моменты времени $t - \tau$ и t .

Изменение длины волны второго луча относительно первого следует ожидать из-за расширения Вселенной, так как при этом изменяется пространственно-временной масштаб. Из уравнения (10.9) следует, что длина волны луча, пришедшего на детектор с временной задержкой будет больше, и величина красного смещения $z(\tau)$ будет равна:

$$z(\tau) = \sqrt{\frac{\Phi(t - \tau)}{\Phi(t)}} - 1 \quad (10.23)$$

Здесь $\Phi(t-\tau)$ – величина гравитационного потенциала Вселенной в момент времени $t-\tau$, а $\Phi(t)$ – его величина в момент времени t .

Преобразуем это уравнение следующим образом:

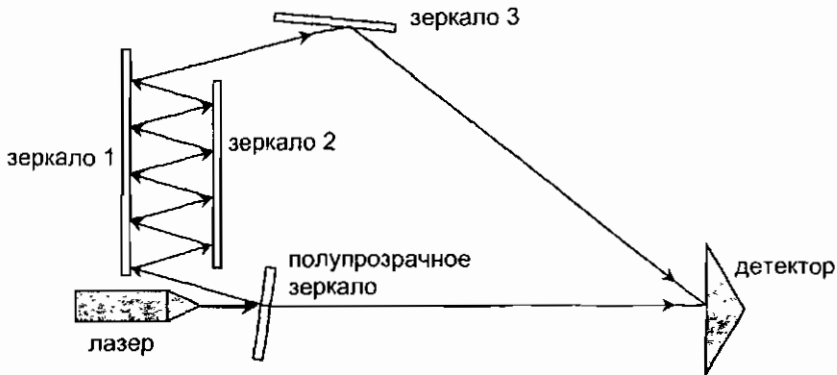


Рис. 22. Принципиальная схема эксперимента по измерению скорости расширения Вселенной. Луч лазера направляется на полупрозрачное зеркало. При этом одна часть луча проходит сквозь зеркало и по кратчайшему пути попадает на детектор. А вторая часть луча, отразившись от зеркала и пройдя через систему зеркал 1, 2, 3, попадает на детектор с некоторой задержкой по времени. И в результате на детекторе сравниваются длины волн двух лучей, испущенных в разные моменты времени.

$$z(\tau) = \sqrt{\frac{\Phi(t-\tau)}{\Phi(t)}} - 1 = \sqrt{\frac{\Phi(t) - \frac{d\Phi}{dt}\tau}{\Phi(t)}} - 1 = \sqrt{1 - \frac{d\Phi}{dt} \frac{\tau}{\Phi(t)}} - 1 =$$

$$= \sqrt{1 + \frac{d\Phi}{dt} \frac{\tau}{c^2}} - 1 = 1 + \frac{\tau}{2c^2} \frac{d\Phi}{dt} - 1 = \frac{\tau}{2c^2} \frac{d\Phi}{dt}$$

И в результате получаем:

$$\frac{d\Phi}{dt} = 2c^2 \frac{z(\tau)}{\tau} \quad (10.24)$$

Гравитационный потенциал Вселенной изменяется обратно пропорционально её видимым линейным размерам L (10.7), то есть его можно представить в следующем виде:

$$\Phi = A/L$$

Где A – некоторая постоянная величина, зависящая от данного распределения материи во Вселенной. И, следовательно:

$$\frac{d\Phi}{dt} = -\frac{A}{L^2} \frac{dL}{dt}, \text{ а, учитывая, что } \frac{1}{L} \frac{dL}{dt} = H, \text{ получаем:}$$

$$\frac{d\Phi}{dt} = -\frac{A}{L} H = -\Phi H = c^2 H$$

И в результате получаем следующее уравнение для определения величины постоянной Хаббла:

$$H = 2 \frac{z(\tau)}{\tau} \quad (10.25)$$

Таким образом, измерив величину относительного красного смещения двух лучей (рис. 22), мы сможем непосредственно определить и скорость изменения суммарного гравитационного потенциала Вселенной (10.24), и величину постоянной Хаббла (10.25). А, значит, сможем рассчитать и массу (10.20) и радиус (10.19) Вселенной.

И наоборот, используя значение для постоянной Хаббла (10.16), можно оценить величину красного смещения $z(\tau)$, ожидаемую в данном эксперименте. Например, если $\tau \approx 10^3 \text{ сек}$, то $z(\tau) = \Delta\lambda/\lambda \approx 10^{-15}$.

Из приведенной оценки следует, что для проведения данного эксперимента необходим лазер, способный генерировать монохроматический луч с относительной погрешностью частоты излучения: $\Delta\omega/\omega < 10^{-16}$ (можно отметить, что в настоящее время разработана методика измерения частоты видимого света с относительной погрешностью $3 \cdot 10^{-17}$ [51]). Также необходимы зеркала с очень высоким коэффициентом отражения: $k > 1 - 10^{-9}$, то есть практически идеальные. Как раз недавно был изготовлен опытный образец такого зеркала: «Созданный в М И Т опытный образец идеального зеркала работает в инфракрасном диапазоне. Как считают исследователи, идеальное зеркало найдёт множество

научных и технических применений. Например, в полости со стенками, изготовленными из идеального зеркала, свет можно удерживать в течение длительного времени» [55].

Нужно также отметить, что эксперимент следует проводить в полдень (полночь) и в то время, когда Земля находится в перигелии (афелии) своей орбиты, чтобы исключить влияние изменения гравитационного потенциала, создаваемого Солнцем на земной поверхности в месте проведения эксперимента.

Данный эксперимент по измерению скорости расширения Вселенной имеет простой физический смысл. Если распределение материи во Вселенной каким-то образом влияет на физические процессы (именно это и утверждает принцип Маха), то следует ожидать, что это распределение как-то влияет и на процессы, происходящие в атоме. А, значит, оно влияет и на частоты излучения атомов. И в этом случае частоты излучения атомов должны изменяться каждую секунду, так как каждую секунду изменяется распределение материи во Вселенной. За время τ относительное изменение плотности материи во Вселенной составляет примерно величину τH . Следовательно, относительное изменение частоты излучения будет также примерно равно τH .

§ 10.11. Экспериментальная астрофизика

Астрофизика является частью физики, где невозможны прямые эксперименты. Человек может наблюдать за процессами, происходящими в астрономических масштабах, но он не может активно вмешиваться в эти процессы. Поэтому существующие модели Вселенной являются в большей мере только научными гипотезами. Новую же модель пространства-времени и основанную на ней квантовую теорию гравитации можно проверить экспериментально в земной лаборатории. И такая проверка позволила бы однозначно ответить на многие астрофизические вопросы.

Рассмотрим конкретные примеры.

1. Скорость расширения Вселенной. В современной астрофизике предполагается, что Вселенная расширяется. Этот вывод сделан на основании того факта, что существует эффект красного смещения в спектрах излучения галактик. Чем дальше находится галактика, тем больше величина красного смещения в её спектре. Конечно, с точки зрения современной науки наиболее правдоподобно объяснить красное смещение можно доплеровским эффектом, вызванным тем, что галактики удаляются от нас.

Но это объяснение является только научной гипотезой. Поэтому на протяжении двадцатого века высказывались и другие объяснения эффекта красного смещения. Например, гипотеза “старения света” [33;с.200].

Простой эксперимент, описанный в предыдущем параграфе, позволяет проверить гипотезу о расширении Вселенной экспериментально. Более того, он даёт возможность *непосредственно измерить скорость её расширения.*

Это, в свою очередь, позволит более точно определить величину постоянной Хаббла. А зная величину постоянной Хаббла, можно уточнить расстояние до галактик.

2. Поиски чёрных дыр. Исследованию свойств чёрных дыр посвящена обширная литература. Существует даже такой раздел физики, как «Астрофизика чёрных дыр». На поиски чёрных дыр тратятся значительные силы и средства. А в течение последних тридцати лет периодически появляются сообщения о том, что “почти” обнаружена чёрная дыра. Однако, несмотря на значительные успехи астрофизики в исследовании космоса, чёрные дыры до сих пор не обнаружены. Смотри на эту тему статью «Поиски чёрных дыр: новейшие данные», напечатанную в 8-м номере журнала «Успехи физических наук» за 2001 год [43;с.864-866].

Предположим, что в некоторой галактике обнаружен массивный объект – кандидат в чёрную дыру. Как установить, является этот объект чёрной дырой или нет? Максимум, что можно узнать об этом объекте, – это чему приблизительно равна его масса, и примерно какой объём в пространстве он занимает.

После этого с точки зрения общей теории относительности можно сделать вывод о том, является ли данный объект достаточно массивным, чтобы быть чёрной дырой.

Однако вопрос состоит не в том, существуют ли во Вселенной объекты с большой массой. А в том, действительно ли они являются чёрными дырами или нет. Из уравнения (4.23) следует, что если скорость света не зависит от величины гравитационного потенциала, то чёрные дыры могут существовать. И наоборот, если квадрат скорости света растёт пропорционально абсолютной величине гравитационного потенциала, то чёрные дыры не существуют.

В § 8.3 было показано, что для проверки квантовой теории гравитации достаточно сравнить скорости хода двух часов, расположенных на разной высоте. И если выяснится, что часы вблизи большой массы идут быстрее (вопреки утверждению общей теории относительности), то чёрные дыры не существуют (с точки зрения общей теории относительности вблизи чёрных дыр время, наоборот, останавливается).

Поэтому целесообразно часть усилий, которые прилагаются на поиски чёрных дыр, направить на проведение простого эксперимента, описанного в § 8.3.

3. Плотность Вселенной. Одним из важных космологических вопросов является вопрос о величине средней плотности материи во Вселенной. В зависимости от величины этой плотности Вселенная будет либо открытой, либо замкнутой. Плотность вещества во Вселенной близка к критической. Точность же, с которой она измерена, очень незначительна. И даже если эта точность существенно повысится, всё равно будет оставаться возможность того, что плотность Вселенной несколько больше или меньше критической. Таким образом, мы никак не сможем узнать, замкнута или открыта наша Вселенная.

А квантовая теория гравитации даёт однозначный ответ на этот вопрос. С новой точки зрения Вселенная замкнута (10.2), но её плотность близка к критической (10.5). Поэтому для того чтобы узнать, открыта или замкнута наша Вселенная, достаточно экспериментально проверить новую теорию.

Список литературы

Основная литература

1. Эйнштейн А. Собрание научных трудов т. 1. М.: Наука, 1965
2. Эйнштейн А. Собрание научных трудов т. 3. М.: Наука, 1966
3. Бор Н. Избранные научные труды т.2. М.: Наука, 1971
4. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Механика. М.: Наука, 1988
5. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Теория поля. М.: Наука, 1988
6. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Квантовая механика. М.: Наука, 1989
7. Фейнман Р., Лейтон Р., Сэндс М. Фейнмановские лекции по физике т.1,2. М.: Мир, 1977
8. Фейнман Р., Лейтон Р., Сэндс М. Фейнмановские лекции по физике т.3,4. М.: Мир, 1977
9. Фейнман Р., Лейтон Р., Сэндс М. Фейнмановские лекции по физике т.6. М.: Мир, 1977
10. Фейнман Р., Мориниго Ф., Вагнер У. Фейнмановские лекции по гравитации. М.: Янус-К, 2000
11. Фейнман Р. Характер физических законов. М.: Наука, 1987
12. Киттель Ч., Найт В., Рудерман М. Берклеевский курс физики т. 1, Механика. М.: Наука, 1983
13. Вихман Э. Берклеевский курс физики т.4, Квантовая физика. М.: Наука, 1977
14. Акоста В., Кован К., Грем Б. Основы современной физики. М.: Просвещение, 1981

Дополнительная литература

15. Проблемы физики: Классика и современность. М.: Мир, 1982
16. Сборник: Эйнштейн и современная физика. М. 1956
17. Фок В.А. Теория пространства, времени и тяготения. М.: Гостехиздат, 1955
18. Физическая Энциклопедия в 5-и томах. М. 1988-1998
19. Большая Советская Энциклопедия т.15. М.: «Советская энциклопедия», 1974, с.519
20. Альтшулер Б. Л. Принцип Маха и современные представления о структуре вакуума // Сборник: Исследования по истории физике и механике 1993-1994 г. М.: Наука, 1997, с.60
21. Hawking S. W. On the rotation of the Universe // Monthly Notices Roy. Astron. Soc. 1969, Vol. 142, № 2, p. 129-141
22. Капица П. Л. Эксперимент, теория, практика. М.: Наука, 1977

23. Albrecht A., Magueijo J. (Time varying speed of light as a solution to cosmological puzzles). *Physical Review D* **59** 043516 (1999)
24. Barrow J. (Cosmologies with varying light speed). *Physical Review D* **59** 043515 (1999)
25. Дирак П. Воспоминания о необычайной эпохе. М.: Наука, 1990
26. Дикке Р. Гравитация и Вселенная. М.: Мир, 1972
27. Мизнер Ч., Торн К., Уилер Дж. Гравитация (в 3-х т.) М.: Мир, 1977
28. Хунд Ф. История квантовой теории. Киев, 1980
29. Клайн Б. В поисках. М.: Атомиздат, 1971
30. Шимони А. (Реальность квантового мира). В мире науки № 3, 1988
31. Хорган Дж. (Квантовая философия). В мире науки № 9-10, 1992
32. Борн М. Размышления и воспоминания физика. М.: Мир, 1977
33. Миттон С. Исследование галактик. М.: Мир, 1980
34. Зельдович Я. Б., Хлопов М. Ю. Драма идей в познании природы. М.: Наука, 1988
35. Shapiro J. *J. Phys. Rev.* **119**, 1743 (1960)
36. Вейнберг С. Гравитация и космология. Волгоград: Платон, 2000
37. Riess A. G. et al. *Astron. J.* **116**, 1009 (1998)
38. Perlmutter S. et al. *Astrophys. J.* **517**, 565 (1999)
39. Чернин А. Д. УФН т.171 № 11, с.1154 (2001)
40. УФН т.170 № 4, с.446 (2000)
41. УФН т.170 № 6, с.680 (2000)
42. Фридман В. (Скорость расширения и размеры Вселенной) В мире науки № 1, 1993
43. УФН т.171 № 8, с. 859-866 (2001)
44. Таблицы физических величин. М.: Атомиздат, 1976
45. УФН т.167 № 7, с.796 (1999)
46. УФН т.169 № 10, с.1148 (1999)
47. УФН т.171 № 3, с.306 (2001)
48. *Phys. Rev. D* **63** 043007 (2001)
49. Паули В. Теория относительности. М.: Наука, 1983
50. Астрофизика, кванты и теория относительности. М.: Мир, 1982
51. УФН т.169 № 8, с.916 (1999)
52. Менский М. Б. УФН т.170 № 6, с.634 (2000)
53. Aspect A. *Nature (London)* **390** 189 (1999)
54. Tittel W. et al. *Europhys. Lett.* **40** 595 (1997)
55. УФН т.169 № 1, с.48 (1999)

Издательство УРСС

специализируется на выпуске учебной и научной литературы, в том числе монографий, журналов, трудов ученых Российской Академии наук, научно-исследовательских институтов и учебных заведений.



Уважаемые читатели! Уважаемые авторы!

Основываясь на широком и плодотворном сотрудничестве с Российским фондом фундаментальных исследований и Российским гуманитарным научным фондом, мы предлагаем авторам свои услуги на выгодных экономических условиях. При этом мы берем на себя всю работу по подготовке издания — от набора, редактирования и верстки до тиражирования и распространения.

Среди недавно вышедших книг мы предлагаем Вам следующие.

Серия «Relata Refero».

Изовцев В. В. **Время и место физики XX века.**

Ацюковский В. А. **Физические основы электромагнетизма и электромагнитных явлений (эфиродинамическая интерпретация).**

Зверев Г. Я. **Физика без механики Ньютона и без теории Эйнштейна.**

Стельмахович Е. М. **Пространственная (топологическая) структура материи.**

Долгушин М. Д. **Эвристические методы квантовой химии или о смысле научных занятий.**

Терлецкий Н. А. **О пользе и вреде излучения для жизни (воздействие слабых высокочастотных электромагнитных полей на живые организмы в очерках о механизмах и возможных последствиях).**

Галавкин В. В. **Дорогой Декарта, или физика глазами системотехника.**

Федосин С. Г. **Современные проблемы физики. В поисках новых принципов.**

Опарин Е. Г. **Введение в бестопливную энергетику.**

Пенроуз Р. **Новое мышление императора.**

Грин Б. **Эlegantная Вселенная. Суперструны, скрытые размерности и поиски окончательной теории.**

Попов Н. Н. **Новые представления о структуре пространства-времени и проблема геометризации материи.**

Малинецкий Г. Г. **Хаос. Структуры. Вычислительный эксперимент.**

Табор М. **Хаос и интегрируемость в нелинейной динамике.**

Пригожин И., Стенгерс И. **Порядок из хаоса.**

Пригожин И. **От существующего к возникающему.**

Сарданашивили Г. А. **Современные методы теории поля. Т. 1–4.**

Коноплева Н. П., Попов В. Н. **Калибровочные поля.**

Рубаков В. А. **Классические калибровочные поля.**

Эбелинг В., Энгель А., Файстель Р. **Физика процессов эволюции.**

По всем вопросам Вы можете обратиться к нам:
тел./факс (095) 135-44-23, тел. 135-42-46
или электронной почтой urss@urss.ru.
Полный каталог изданий представлен
в Интернет-магазине: <http://urss.ru>

Издательство УРСС

Научная и учебная
литература

