Глава 6

АТОМНАЯ ТЕОРИЯ ГРАВИТАЦИИ

6.1 Суть атомной теории гравитации

В параграфе 3.3 мы сформулировали основы атомного подхода к гравитационному взаимодействию. Основная идея такого подхода очень проста, но, учитывая то, что эта тема никогда ранее не рассматривалась в научной литературе, имеет смысл ещё раз вкратце изложить её суть.

Итак, атом падает в гравитационном поле, и его масса покоя уменьшается (дефект массы, равный энергии связи, делённой на квадрат скорости света, смотри параграф 3.1). Соответственно, уменьшается масса атомного ядра и масса электрона. Кулоновская сила притяжения электрона к ядру остаётся той же самой, но из-за того, что масса электрона уменьшилась, электрон получает дополнительное центростремительное ускорение и переходит на более низкую орбиту. В результате, вблизи большой массы изменяется размер атома, а, значит, изменяются и частота излучения атома, и длина волны спектральной линии. А так как эталоны длины и времени определяются через свойства атома, то, следовательно, вблизи большой массы изменяется пространственно-временной масштаб.

В третьей главе, используя простые уравнения квантовой механики, мы рассчитали, как в слабом гравитационном поле изменится размер атома (3.30) и продолжительность одной секунды, создаваемой атомными часами (3.40). То есть рассчитали изменение пространственно-временного масштаба вблизи большой массы.

Далее в этой главе мы рассчитаем угол отклонения луча света, проходящего вблизи Солнца, гравитационное смещение спектральных линий и “задержку” радиосигнала, проходящего вблизи Солнца. Одним словом, мы рассчитаем все известные релятивистские гравитационные эффекты. И для этого нам не понадобится ни знание общей теории относительности, ни знание римановой геометрии, ни использование громоздкого тензорного аппарата.

Но главное даже не в этом. Главное в том, что мы рассчитаем **принципиально новый** релятивистский гравитационный эффект – ускорение времени (повышение частоты излучения атома) в гравитационном поле. И при современной точности атомных часов этот эффект можно будет обнаружить уже в ближайшее время!

6.2 Чему равна потенциальная энергия?

Предположим, что тело массой m подняли на высоту H над земной поверхностью. Чему равно изменение его потенциальной энергии? Казалось бы, ответ очевиден. Изменение потенциальной энергии равно: $\Delta U = mgH$, где $g \approx 10$м/с^2 – ускорение свободного падения. Ведь если тело упадёт с высоты H, то оно совершит работу: $A = mgH$. А совершённая работа как раз и равна изменению потенциальной энергии.

И всё-таки это рассуждение неверно! Не следует забывать, что любое тело обладает также и внутренней энергией – энергией покоя: $E_0 = m_0c^2$. Эта энергия огромна. Если тело массой 1кг упадёт с высоты 100 м, то оно совершит работу в 1000 Дж. А энергия покоя тела массой 1кг равна 10^{17} Дж, то есть на 14 порядков больше! Поэтому, если при падении тела его внутренняя энергия изменится хотя бы на очень незначительную в процентном отношении величину, то этим изменением пренебречь нельзя.

То, что внутренняя энергия должна измениться, очевидно. Например, с точки зрения общей теории относительности время на разных высо́тах над землёй течёт по-разному. Кроме того, размеры атома также изменяются с высотой. А так как изменяются размеры атома, то, следовательно, изменяется и энергия притяжения электронов к ядру и кинетическая энергия вращения электронов вокруг ядра. То есть, изменяется энергия атома. Например, изменяется энергия фотона, испускаемого атомом. А так как все тела состоят из атомов, то, значит, с высотой должна измениться внутренняя энергия любого тела.

Таким образом, вместо того чтобы написать $\Delta K = -\Delta U$ (ΔK – изменение кинетической энергии, ΔU – изменение потенциальной энергии), нам следует написать:

$$\Delta K + \Delta E_0 = -\Delta U \tag{6.1}$$

Здесь ΔE_0 – изменение внутренней энергии тела. То есть потенциальная энергия переходит не только в кинетическую, но и во внутреннюю энергию (энергию покоя) тела.

Допустим, тело массы m, имея начальную нулевую скорость, падает с высоты H. В этом случае, с одной стороны, изменение кинетической энергии равно $\Delta K = \frac{mV^2}{2}$ (V – скорость тела, приобретённая в результате падения), а, с другой стороны: $\frac{mV^2}{2} = mgH$. То есть $\Delta K = mgH$. И, следовательно, изменение потенциальной энергии равно:

$$-\Delta U = mgH + \Delta E_0 \tag{6.2}$$

Итак, когда тело падает с высоты, его потенциальная энергия переходит в кинетическую энергию и во внутреннюю энергию. Изменение кинетической энергии известно. Осталось рассчитать изменение внутренней энергии.

Предположим, тело P, имеющее массу m и состоящее, для определённости, из N атомов, находится в покое на значительном удалении от большой массы M (и обладает внутренней энергией E_0). А затем, проделав некоторый путь, оказывается на поверхности массы M (смотри рисунок 6.1). Требуется рассчитать изменение внутренней энергии.

Изменение внутренней энергии можно рассчитать по-разному.

Во-первых, исходя из *размерности* энергии. Энергия имеет размерность $[E] = \text{кг}\cdot\text{м}^2\cdot\text{с}^{-2}$. Поэтому, зная, как изменяется эталон массы μ (эталон массы изменяется пропорционально массе атома (3.27)), эталон длины L (эталон длины изменяется пропорционально размеру атома (3.31)) и эталон времени T (3.40), нетрудно рассчитать изменение энергии:

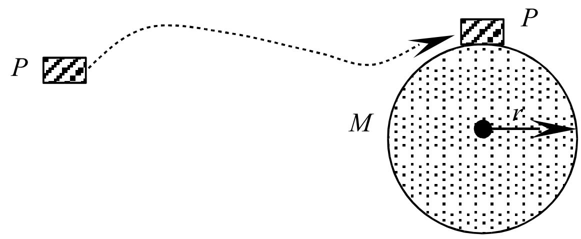

Рисунок 6.1. Одно и то же тело (например, N атомов железа) сначала находится на значительном удалении от большой массы, а затем оказывается вблизи неё. Чему равно изменение внутренней энергии тела? Или чему равно изменение энергии каждого из N атомов, составляющих это тело?

$$E \sim \mu \cdot L^2 \cdot T^{-2} = \mu_0 (1 - \frac{GM}{rc^2}) \frac{L_0^2}{(1 + \frac{GM}{rc^2})^2} T_0^{-2} (1 - 2\frac{GM}{rc^2})^{-2}$$

Здесь μ_0, L_0, T_0 – эталоны массы, длины и времени на значительном удалении от массы M. А учитывая, что $\frac{GM}{rc^2} \ll 1$, получаем:

$$E \sim \mu_0 L_0^2 T_0^{-2} (1 - \frac{GM}{rc^2})(1 - 2\frac{GM}{rc^2})(1 + 4\frac{GM}{rc^2}) = \mu_0 L_0^2 T_0^{-2} (1 + \frac{GM}{rc^2})$$

И, следовательно:

$$E(r) = E_0(1 + \frac{GM}{rc^2}) \quad (6.3)$$

Здесь E_0 – внутренняя энергия (энергия покоя) тела P, когда оно находилось на значительном удалении от массы M, $E(r)$ – внутренняя энергия этого же тела, когда оно находится на расстоянии r от массы M.

Во-вторых, изменение внутренней энергии можно рассчитать, основываясь на уравнениях квантовой механики и учитывая то, что энергии всех тел и частиц изменяются в одной и той же пропорции. Например, внутренняя энергия какого-либо тела изменится в той же самой пропорции, что и энергия атома. Энергия атома, в свою очередь, изменится в той же самой пропорции, что и энергия фотона, излучаемого при определённом атомном переходе. А, используя формулу Бора (3.34) и учитывая то, что заряд электрона в гравитационном поле не изменяется, нетрудно рассчитать, как изменится энергия фотона ε:

$$\varepsilon \sim \frac{m_e}{\hbar^2} \tag{6.4}$$

То есть энергия фотона изменится пропорционально массе электрона и обратно пропорционально квадрату величины постоянной Планка.

Используя уравнения (3.27) и (3.28), получаем:

$$\varepsilon(r) = \varepsilon_0(1+\frac{GM}{rc^2}) \tag{6.5}$$

Здесь ε_0 – энергия фотона, испускаемого атомом, который находится на большом удалении от массы M, а $\varepsilon(r)$ – энергия фотона, испускаемого точно таким же атомом, который находится на расстоянии r от массы M.

Мы видим, что уравнение (6.5) совпадает с уравнением (6.3), то есть энергия фотона, испускаемого атомом в гравитационном поле (вблизи большой массы) изменится *в той же самой* пропорции, что и энергия атома, или энергия любого тела.

Учитывая, что $\frac{GM}{r} = \Delta\varphi$ (где $\Delta\varphi$ – разность гравитационных потенциалов между точкой, находящейся на значительном удалении от массы M, и точкой, находящейся на расстоянии r от центра массы M), мы можем представить уравнение (6.3) в следующем виде:

$$E_A = E_B(1+\frac{\varphi_B - \varphi_A}{c^2}) \tag{6.6}$$

Здесь E_B – внутренняя энергия тела, находящегося в точке B, где гравитационный потенциал равен φ_B, а E_A – внутренняя энергия того же тела, находящегося в точке A, где гравитационный потенциал равен φ_A. То есть, чем "глубже" тело находится в гравитационном поле, тем больше его внутренняя энергия.

Аналогично этому, мы можем представить уравнение (6.5) в следующем виде:

$$\varepsilon_A = \varepsilon_B(1+\frac{\varphi_B - \varphi_A}{c^2}) \tag{6.7}$$

Здесь ε_B – энергия фотона, испускаемого атомом в точке B, а ε_A – энергия фотона, испускаемого атомом в точке A. То есть, чем "глубже" находится атом в гравитационном поле, тем больше энергия фотона, испускаемого им.

Теперь мы сможем ответить на вопрос: чему равна потенциальная энергия тела массы m, поднятого в гравитационном поле g на высоту H? Для этого нам нужно рассчитать изменение внутренней энергии тела в уравнении (6.2). Используя уравнение (6.6) и учитывая, что $\Delta E_0 \ll E_0$, получаем:

$$\Delta E_0 = E_0 \frac{gH}{c^2} = mc^2 \frac{gH}{c^2} = mgH \qquad (6.8)$$

Мы получили очень интересный результат. Когда тело массы m падает с высоты H, его внутренняя энергия увеличивается на величину mgH. И получается, что потенциальная энергия тела, поднятого на высоту H, равна $2mgH$:

$$|\Delta U| = 2mgH \qquad (6.9)$$

6.3 Как “падает” в гравитационном поле свет?

В предыдущем параграфе мы пришли к неожиданному, но вполне обоснованному выводу: потенциальная энергия тела массы m, поднятой на высоту H, равна $2mgH$. Такой вывод мы сделали исходя из того, что внутренняя энергия атома изменяется в гравитационном поле, и это необходимо учитывать при расчёте потенциальной энергии.

В этом параграфе мы рассчитаем изменение потенциальной энергии совершенно с других позиций.

Предположим, что в гравитационном поле g находятся две одинаковые шахты с зеркальными внутренними стенками (смотри рисунок 6.2).

Пусть в нулевой момент времени с высоты H в каждой шахте начинают падение (из состояния покоя) две частицы – электрон и позитрон. В первой шахте электрон и позитрон падают, не взаимодействуя друг с другом. А во второй шахте сразу же после падения электрон и позитрон, проаннигилировав друг с другом, превращаются в два γ-кванта. Предположим, что эти два γ-кванта разлетаются строго в горизонтальном направлении. Таким образом, в первой шахте падают электрон и позитрон, а во второй шахте “падают” два γ-кванта, летая между зеркальными стенками шахты.

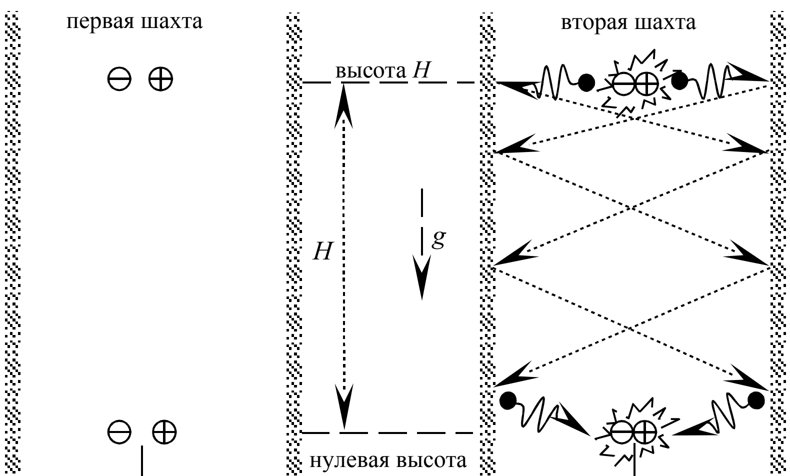

Рисунок 6.2. Две шахты с зеркальными внутренними стенками находятся в гравитационном поле g. В первой шахте падают электрон и позитрон. Во второй шахте электрон и позитрон, взаимодействуя друг с другом, превращаются в два γ-кванта, которые разлетаются в горизонтальных направлениях и, отражаясь от стенок шахты, также падают вниз. Затем на нулевой высоте γ-кванты снова превращаются в электрон и позитрон. На основании закона сохранения энергии можно сделать вывод, что скорость падения электрона и позитрона не должна зависеть от того, что происходило с ними во время падения, то есть $V_1 = V_2$. И, таким образом, мы приходим к выводу, что свет (γ-кванты) должен падать в гравитационном поле точно с такой же скоростью, а значит, и точно с таким же ускорением, как и обычное вещество.

Когда электрон и позитрон в первой шахте долетят до нулевой высоты, скорость их падения V_1 будет равна: $V_1 = \sqrt{2gH}$. А чему будет равна скорость падения V_2 двух γ-квантов, когда они долетят до нулевой высоты?

Чтобы ответить на этот вопрос, предположим, что два γ-кванта, долетев до нулевой высоты, провзаимодействовали друг с другом и снова превратились в электрон и позитрон.

С одной стороны, в момент этого превращения скорость падения вновь образовавшихся электрона и позитрона будет равна скорости V_2 падения γ-квантов, так как при таком превращении скорость движения центра масс должна оставаться неизменной. С другой стороны, на основании закона сохранения энергии, мы можем утверждать, что скорость падения V_2 вновь образовавшихся электрона и позитрона должна быть равна скорости падения V_1 электрона и позитрона в первой шахте: $V_2 = V_1 = \sqrt{2gH}$. Потому что в противном случае у нас либо появится "лишняя" энергия (при $V_2 > V_1$), либо произойдёт "исчезновение" энергии (при $V_2 < V_1$). Проще говоря, энергия электрона и позитрона, которые упали с высоты H на нулевую высоту, не должна зависеть от того, что происходило с ними, пока они падали. Так как процессы, происходящие внутри замкнутой системы, не могут изменить её полную энергию.

И в результате мы приходим к выводу, что скорость падения γ-квантов V_2 должна быть всё время равна скорости падения частиц V_1. То есть свет будет "падать" в гравитационном поле точно с таким же ускорением, как и обычное тело.

Итак, фотон, летая между зеркальными стенками шахты, будет падать вниз с ускорением g. При этом его полная скорость c (когда он долетит до нулевой высоты) будет равна (смотри рисунок 6.3):

$$c = \sqrt{c_x^2 + c_y^2} \tag{6.10}$$

Здесь c_x – горизонтальная составляющая скорости фотона, она остаётся постоянной при его движении: $c_x = c_H$ (c_H – скорость фотона на высоте H); c_y – вертикальная составляющая скорости фотона, она равна $c_y = \sqrt{2gH}$. В результате мы получаем:

$$c^2 = c_H^2 + 2gH \tag{6.11}$$

Умножив это выражение на массу фотона m, которая остаётся постоянной при движении фотона (при падении обычного тела его полная масса также остаётся постоянной и именно поэтому масса покоя уменьшается, смотри параграф 3.1), получаем:

$$mc^2 - m c_H^2 = 2mgH \tag{6.12}$$

Величина $m c_H^2$ – это полная энергия фотона, которой он обладал на высоте H, а величина mc^2 – это полная энергия фотона, которой он обладает на нулевой высоте. В результате мы приходим к следующему выводу. При падении фотона массы m с высоты H его полная энергия изменяется на величину $2mgH$. И, следовательно, изменение потенциальной энергии фотона (или фотонов) равно $2mgH$. А так как свет (фотоны) может превращаться в обычное вещество, а обычное вещество может превращаться обратно в свет (при таких превращениях полная масса остаётся неизменной), то можно заключить, что и при падении обычного тела массы m с высоты H его полная энергия изменяется на величину $2mgH$.

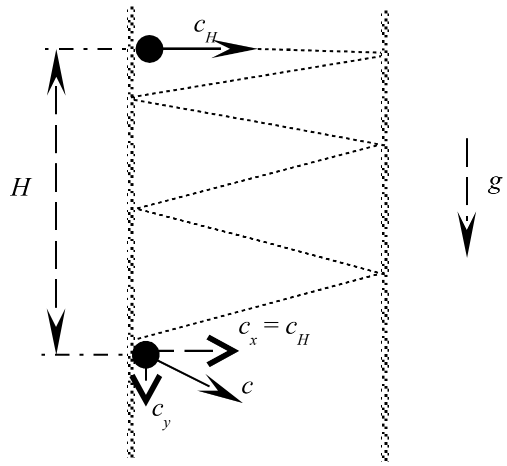

Рисунок 6.3. Фотон движется между зеркальными стенками шахты. На высоте H его скорость строго горизонтальна и равна c_H. Вертикальная составляющая скорости фотона c_y возрастает с ускорением g и поэтому на нулевой высоте $c_y = \sqrt{2gH}$.

Физический смысл этого, необычного на первый взгляд, вывода достаточно прост. С одной стороны, свет должен двигаться в гравитационном поле точно с таким же ускорением, как и обычное тело (в противном случае, превращая тело в свет и обратно, мы могли бы изменять скорость его падения, что противоречит закону сохранения энергии). С другой стороны, кинетическая энергия света (а другой у него нет) равна не $\frac{mV^2}{2}$, как у нерелятивистского тела, а mc^2. Поэтому, когда свет падает в гравитационном поле, его кинетическая энергия возрастает в два раза быстрее, чем кинетическая энергия нерелятивистского тела (так как она не делится пополам!). И именно поэтому изменение потенциальной энергии света массы m, “упавшего” с высоты H, равно $2mgH$. А уже из этого, на основании закона сохранения энергии, можно сделать вывод, что изменение потенциальной энергии нерелятивистского тела массы m, упавшего с высоты H, также равно $2mgH$. И раз кинетическая энергия тела при этом возрастает на величину mgH, то, значит, внутренняя энергия тела должна возрасти на величину:

$$2mgH - mgH = mgH$$

Этот вывод полностью согласуется с выводом, полученным в предыдущем параграфе. И тот факт, что, используя совершенно разные предположения (в предыдущем параграфе мы рассчитывали изменение внутренней энергии атома при его падении, а в этом параграфе рассматривали “падение” света), мы пришли к одному и тому же выводу, позволяет с большой вероятностью заключить, что этот вывод правильный.

6.4 Реабилитация ньютоновской теории гравитации

В двух предыдущих параграфах, используя совершенно различные доводы (в одном случае мы рассчитали, как изменится при падении внутренняя энергия атома, в другом – рассмотрели “падение” света), мы пришли к выводу, что изменение потенциальной энергии тела массы m, упавшего с высоты H, равно: $2mgH$! А совсем не mgH, как принято считать. Изменение же кинетической энергии тела равно: $\Delta K = mgH$, и поэтому, как видно из уравнения (6.2), изменение внутренней энергии тела также равно: $\Delta E_0 = mgH$.

Рассмотрим подробнее полученный результат. Тело массой m падает с высоты H в поле тяжести g. Изменение потенциальной энергии тела равно $|\Delta U| = 2mgH$. Это изменение потенциальной энергии переходит в кинетическую энергию тела и в его внутреннюю энергию (энергию покоя). При этом только половина потенциальной энергии переходит в кинетическую, а вторая половина – во внутреннюю энергию. Внутренняя энергия тела – это энергия, находящаяся в скрытой форме. Её нельзя наблюдать непосредственно. Кинетическую же энергию тела можно использовать, например, для совершения работы. Поэтому при падении тела учитывают только изменение его кинетической энергии, “забывают” об изменении внутренней энергии и делают отсюда неверный вывод об изменении потенциальной энергии. Изменение потенциальной энергии занижается ровно в два раза.

Таким образом, мы пришли к выводу, что изменение потенциальной энергии, а значит, и изменение гравитационного потенциала $\Delta\Phi$ в действительности **ровно в два раза больше**, чем это предполагается в теории тяготения Ньютона. Это означает, что если φ_1 – значение ньютоновского потенциала в одной точке пространства, а φ_2 – его значение в другой точке, то:

$$\Phi_2 - \Phi_1 = 2(\varphi_2 - \varphi_1) \qquad (6.13)$$

Здесь Φ_1, Φ_2 – значения гравитационного потенциала с учётом изменения внутренней энергии тел.

Например, изменение ньютоновского потенциала $\Delta\varphi$, создаваемого точечной массой M на расстоянии r (по сравнению с потенциалом на большом удалении от массы M), равно: $\Delta\varphi = -G\dfrac{M}{r}$. И, значит, действительное изменение гравитационного потенциала $\Delta\Phi$, создаваемого той же массой, равно:

$$\Delta\Phi = -2\,G\frac{M}{r} \qquad (6.14)$$

До тех пор пока скорость тела мала по сравнению со скоростью света, использование ньютоновского потенциала не приводит к ошибке, так как всегда только половина потенциальной энергии переходит в кинетическую:

$$\Delta K = -\ m\Delta\Phi/2 = -\ m\Delta\varphi$$

Однако при вычислении траектории для релятивистской частицы теория тяготения Ньютона приведёт уже к неверному результату. Например, фотон не имеет энергии покоя. Поэтому при движении фотона в поле тяжести *вся* его потенциальная энергия переходит в кинетическую.

Как уже отмечалось в параграфе 2.5, фотоны, пролетая вблизи Солнца, отклоняются на 1,75 угловых секунды, в полном согласии с общей теорией относительности. Если же мы будем рассчитывать угол отклонения фотонов в рамках ньютоновской теории гравитации, то получим угол отклонения в два раза меньше правильного значения. Почему ньютоновская теория предсказывает неверный результат?

Сейчас мы сможем ответить на этот вопрос. Ньютоновская теория предсказывает неверный результат для угла отклонения фотона потому, что мы неправильно используем эту теорию. А именно, мы не учитываем то, что в действительности гравитационный потенциал, создаваемый каким-либо телом, *ровно в два больше*, чем это предполагается в теории Ньютона. Соответственно, и сила, действующая со стороны огромной массы на пробное тело, также в два раза больше. Но всё дело в том, что если пробное тело имеет массу покоя, и его скорость достаточно мала (по сравнению со скоростью света), то только половина гравитационной силы, действующей на тело, расходуется на увеличение кинетической энергии, так как другая половина расходуется на увеличение внутренней энергии.

Фотон – это частица, которая не имеет массы покоя, то есть не имеет внутренней энергии (энергии, связанной с массой покоя). И именно поэтому вся гравитационная сила, действующая со стороны Солнца на фотон, расходуется на изменение его кинетической энергии. То есть гравитационная сила, действующая на фотон или на ультрарелятивистскую частицу (частицу, у которой энергия покоя много меньше кинетической энергии), ровно в два раза больше гравитационной силы, действующей на медленную частицу. И если это учесть при расчёте угла отклонения фотона в рамках ньютоновской теории гравитации (смотри параграф 2.5), то получится правильный ответ.

Можно также отметить следующее. Фотон (как и любой другой квантовый объект) обладает двойственной природой. Поэтому, с одной стороны, свет можно рассматривать как поток частиц, но, с другой стороны, свет – это электромагнитные волны. И в следующем параграфе мы рассчитаем отклонение луча света в гравитационном поле, рассматривая свет как движение электромагнитных волн.

6.5 Распространение электромагнитных волн

В однородной среде свет (электромагнитные волны) движется из одной точки в другую по кратчайшему пути, то есть по прямой. А в неоднородной среде путь света искривлён, то есть свет движется не по кратчайшему пути. В качестве единицы измерения пройденного светом пути мы можем выбрать любую величину. Но если мы будем измерять пройденный светом путь в единицах длины световой волны $\lambda(\ell)$ (которая может изменяться вдоль траектории луча ℓ), то окажется, что и в неоднородной среде свет движется из точки A в точку B также по кратчайшему пути:

$$\int_A^B \frac{d\ell}{\lambda(\ell)} = \min \tag{6.15}$$

То есть свет будет двигаться из точки A в точку B таким образом, чтобы интеграл от $\dfrac{d\ell}{\lambda(\ell)}$, взятый вдоль траектории луча, имел минимальное значение. Длина пути, пройденного светом и измеренная в единицах длины световой волны, называется оптической длиной пути. Поэтому из уравнения (6.15) следует, что свет движется так, чтобы оптическая длина пройденного им пути была минимальна.

Например, свет движется из точки A в точку B по кривой L (смотри рисунок 6.4). В этом случае оптическая длина любой линии, проходящей через точки A и B, например линии L', будет больше, чем оптическая длина линии L:

$$\int_A^B \frac{dL'}{\lambda(L')} > \int_A^B \frac{dL}{\lambda(L)} = \min$$

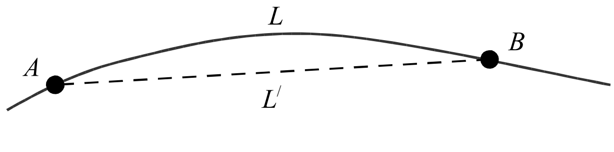

Рисунок 6.4

Так как оптическая длина линии L минимальна, то оптическая длина любой линии, бесконечно близко расположенной к L, будет в первом приближении такая же, как и у L. Поэтому уравнение (6.15) можно представить в вариационном виде:

$$\delta \int_A^B \frac{d\ell}{\lambda(\ell)} = 0 \qquad (6.16)$$

Это уравнение означает, что при бесконечно малом отклонении (вариации) подынтегрального выражения от истинной траектории движения изменение значения интеграла равно нулю.

Вариационное уравнение (6.16), описывающее распространение волны в неоднородной среде, имеет следующий физический смысл. Пусть некоторая волна распространяется вдоль линии L (смотри рисунок 6.5).

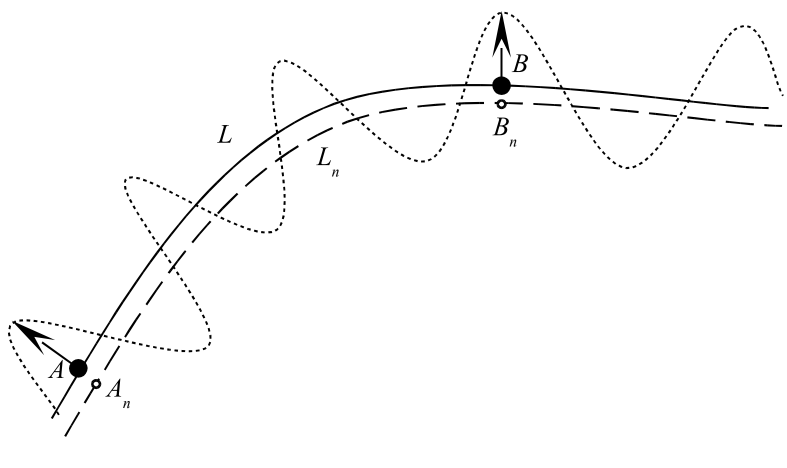

Рисунок 6.5. В отличие от материальной точки волна движется сразу по всему семейству линий L_n, которые близко расположены к линии L. И если в точках A и B максимум интенсивности, то, следовательно, и в точках A_n и B_n, лежащих на линии L_n, также будет максимум интенсивности. Это означает, что вдоль любой линии L_n, близко расположенной к L, содержится одно и тоже число длин волн (одна и та же разность фаз). То есть оптическая длина всех линий L_n одинакова. Именно это и отражено в уравнении (6.16).

Рассмотрим точки A и B, лежащие на L и соответствующие максимумам интенсивности. В отличие от материальной точки волна движется не по математической линии L, а сразу по всему семейству линий L_n, которые достаточно близко расположены к L. И если в точках A и B находится максимум интенсивности, то, следовательно, и в точках A_n и B_n также будет максимум интенсивности. Но это как раз и означает, что волна будет двигаться по такому семейству линий L_n, у которых одна и та же оптическая длина (одна и та же разность фаз между точками B и A), в соответствии с уравнением (6.16).

Учитывая что $\lambda(\ell) = \dfrac{2\,\pi\, c(\ell)}{\omega\,(\ell)}$, где $c(\ell)$ – скорость распространения волны, а $\omega\,(\ell) = 2\,\pi\cdot \nu(\ell)$ – циклическая частота колебаний волны (ν – обычная частота колебаний), уравнение (6.15) можно представить в виде:

$$\int_A^B \frac{\omega\,(\ell)}{c(\ell)}\, d\ell = \min \qquad (6.17)$$

Можно отметить, что при движении электромагнитной волны в какой-нибудь среде скорость её распространения может изменяться, но частота всегда остаётся постоянной, и поэтому её можно вынести из-под знака интеграла:

$$\int_A^B \frac{d\ell}{c(\ell)} = \min \qquad (6.18)$$

Интеграл в этом уравнении – это время, которое требуется свету, чтобы попасть из точки A в точку B вдоль траектории ℓ. То есть свет движется из точки A в точку B таким образом, чтобы затратить на свой путь минимум времени. Поэтому уравнение (6.18) называется принципом наименьшего времени (или принципом Ферма). Если это уравнение умножить на постоянную величину c_0 (скорость света в вакууме в земных условиях), то его можно представить в виде:

$$\int_A^B \frac{c_0}{c(\ell)}\, d\ell = \int_A^B n(\ell)\, d\ell = \min \qquad (6.19)$$

Величина $n(\ell) = c_0/c(\ell)$ называется показателем преломления среды.

Но при движении электромагнитной волны в гравитационном поле её частота изменяется (так как изменяется энергия фотонов, из которых состоит электромагнитная волна), и поэтому принцип наименьшего времени (6.18) уже неприменим для нахождения траектории движения. В этом случае для нахождения траектории нужно воспользоваться более фундаментальным принципом, выраженным в виде уравнения (6.16) или (6.17).

При движении электромагнитной волны в гравитационном поле её полная масса будет оставаться постоянной, и, следовательно, будет оставаться постоянной масса каждого фотона в этой волне, то есть величина $\frac{\hbar\omega}{c^2}$. А так как величина постоянной Планка изменяется обратно пропорционально величине скорости света (3.8), то, следовательно, будет оставаться постоянной величина:

$$\frac{\omega}{c^3} = \mathrm{const} \tag{6.20}$$

Таким образом: $\frac{\omega}{c} \sim c^2$, и уравнение (6.17) можно представить в виде:

$$\int_A^B c^2 d\ell = \min \tag{6.21}$$

Уравнение (6.19) описывает распространение света в неоднородной среде, а уравнение (6.21) описывает распространение света в гравитационном поле. Тем не менее, с математической точки зрения они полностью эквивалентны. Поэтому величину c^2, стоящую под знаком интеграла в уравнении (6.21), можно рассматривать как эффективный показатель преломления. И для того, чтобы определить угол отклонения света, проходящего вблизи массы M, достаточно найти этот показатель преломления, то есть величину $c(r)$.

Напомним, что величина постоянной Планка уменьшается в гравитационном поле в соответствии с уравнением (3.28):

$$\hbar(r) = \hbar_0 (1 - \frac{GM}{rc_0^2})$$

А величина скорости света изменяется обратно пропорционально величине постоянной Планка (3.8):

$$c(r) = c_0 (1 + \frac{GM}{rc_0^2}) \tag{6.22}$$

Здесь c_0 – скорость света на большом удалении от массы M, $c(r)$ – скорость света на расстоянии r от массы M. Следует отметить, что изменение скорости света в гравитационном поле можно также рассчитать, исходя из *размерности* скорости и зная как изменяется эталон длины (3.24) и эталон времени (3.40).

Возведём уравнение (6.22) в квадрат и получим:

$$c^2(r) = c_0^2 \left(1 + 2\frac{GM}{rc_0^2}\right) \tag{6.23}$$

Это и есть эффективный показатель преломления, определяющий движение света в слабом гравитационном поле. Так как показатель преломления *n* определён с точностью до умножения на произвольную постоянную, то его можно представить в виде:

$$n(r) = 1 + 2\frac{GM}{rc_0^2} \tag{6.24}$$

Таким образом, полученная величина показателя преломления совпадает с величиной показателя преломления (2.14), рассчитанного в рамках общей теории относительности. И, следовательно, угол отклонения света, рассчитанный в рамках атомной теории гравитации, также будет совпадать с углом отклонения, рассчитанном в рамках общей теории относительности. То есть свет, проходя на расстоянии ρ массы *M* (смотри рисунок 2.5), отклонится на угол (2.16):

$$\alpha = -\frac{4GM}{\rho c^2}$$

Давайте проанализируем полученный результат. Траектории световых лучей (в пределе геометрической оптики, то есть когда длина световой волны практически не меняется на расстояниях порядка длины волны) в самом общем виде определяются уравнением (6.15) или (6.17):

$$\int \frac{d\ell}{\lambda(\ell)} = \int \frac{\omega(\ell)\, d\ell}{2\pi\, c(\ell)} = \min$$

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 (смотри параграф 2.5). И в результате луч света огибает массу (притягивается к ней). А с точки зрения атомной теории гравитации вблизи большой массы *возрастает* скорость света, но его частота *возрастает в процентном отношении ещё сильней*. И в результате вблизи большой массы также возрастает эффективный показатель преломления. Для слабого гравитационного поля оба подхода приводят к одному и тому же эффективному показателю преломления (уравнения (2.14) и (6.24)), и, значит, к одинаковому углу отклонения для луча света.

6.6 "Задержка" радарного сигнала

С точки зрения общей теории относительности координатная скорость света (скорость света с точки зрения неподвижного наблюдателя) в гравитационном поле уменьшается (2.12). И поэтому во второй половине прошлого века был проведён ряд экспериментов по измерению времени задержки радиосигнала, отражённого от Меркурия и проходящего вблизи Солнца (смотри параграфы 2.6, 5.6). Для этого сравнивались между собой фазы отражённого и исходного сигналов, и когда Меркурий начинал заходить за Солнце, происходило резкое возрастание фазы отражённого сигнала (смотри рисунок 5.10). Результаты таких экспериментов хорошо согласовывались с предсказаниями общей теорией относительности.

Однако, как это уже неоднократно отмечалось, в общей теории относительности предполагается, что частота электромагнитного сигнала остаётся *постоянной* при движении гравитационном поле. И именно поэтому резкое возрастание фазы отражённого сигнала (при его прохождении вблизи Солнца) интерпретируется в рамках общей теории относительности как уменьшение скорости света вблизи Солнца. Но фаза отражённого сигнала может резко возрасти ещё и потому, что частота электромагнитного сигнала *повышается* при его прохождении вблизи Солнца. Давайте разберём этот простой вопрос.

Предположим, мы посылаем радиосигнал на Меркурий, регистрируем отражённый сигнал и сравниваем фазу отражённого сигнала с фазой исходного сигнала (сравнение фаз двух сигналов – это наиболее точный и пока единственно возможный способ по определению времени задержки сигнала). Когда Меркурий находится далеко от Солнца (имеется в виду его видимое с Земли положение на небе) фаза отражённого сигнала плавно меняется со временем (в зависимости от орбитальных и угловых скоростей Земли и Меркурия).

Но когда Меркурий начинает заходить за Солнце, происходит резкое возрастание фазы отражённого сигнала (смотри рисунок 5.10). Это означает, что вблизи Солнца возрастает оптическая длина пути радиосигнала (и, кстати, именно поэтому радиосигнал или свет "огибают" Солнце). То есть, проходя вблизи Солнца, электромагнитный сигнал совершает большее число собственных колебаний, чем при движении в пустом пространстве. Но почему это происходит?

Во-первых, можно предположить (так как это предполагается в общей теории относительности), что частота сигнала остаётся постоянной, и тогда можно сделать однозначный вывод, что его скорость вблизи Солнца уменьшается.

Во-вторых, можно предположить, что скорость сигнала вблизи Солнца возрастает, но его частота в процентном отношении возрастает ещё быстрее, чем скорость.

Давайте проделаем количественные расчёты.

Пусть электромагнитный сигнал проходит в пустом пространстве расстояние dr. В этом случае его фаза φ (в этом параграфе буквой φ мы будем обозначать фазу – не следует путать с гравитационным потенциалом!) изменяется на величину $d\varphi$:

$$d\varphi = \frac{2\pi dr}{\lambda}$$

Здесь λ – длина волны сигнала. То есть, если сигнал проходит расстояние, равное длине волны, то его фаза изменяется на 2π. Так как $\lambda = \frac{c}{\nu}$ (где ν – частота сигнала), то изменение фазы можно представить в виде:

$$d\varphi = \frac{2\pi\nu}{c} dr = \frac{\omega}{c} dr$$

где ω – так называемая циклическая частота: $\omega = 2\pi\nu$.

С точки зрения общей теории относительности частота сигнала вблизи Солнца остаётся той же самой, а его скорость уменьшается в зависимости от расстояния r до центра Солнца следующим образом (2.12):

$$c(r) = c(1 - \frac{2GM}{rc^2})$$

С учётом этого получаем:

$$d\varphi = \frac{\omega}{c}(1 + \frac{2GM}{rc^2})dr \qquad (6.25)$$

С точки зрения атомной теории гравитации скорость сигнала вблизи Солнца возрастает в зависимости от расстояния r до его центра следующим образом (6.22):

$$c(r) = c_0(1 + \frac{GM}{rc_0^2})$$

Но частота сигнала возрастает быстрее, чем скорость (6.20):

$$\omega(r) = \omega_0 \cdot \frac{c^3(r)}{c_0^3} = \omega_0 \cdot (1 + \frac{3GM}{rc_0^2})$$

Здесь ω_0, c_0 – частота и скорость сигнала на большом удалении от массы M; $\omega(r)$, $c(r)$ – частота и скорость сигнала на расстоянии r от массы M. И в результате получаем следующее уравнение для изменения фазы сигнала в гравитационном поле:

$$d\varphi = \frac{\omega\,(r)}{c(r)} dr = \frac{\omega_0}{c_0}(1 + \frac{2GM}{rc_0^2}) dr \tag{6.26}$$

которое полностью совпадает с (6.25).

Таким образом, эксперимент по измерению “задержки” (в эксперименте измерялась не задержка сигнала, а резкое возрастание его фазы) радарного сигнала, проходящего вблизи Солнца, одинаково подтверждают и общую теорию относительности, и атомную теорию гравитации. То есть, этот эксперимент можно интерпретировать по-разному. Для его однозначной интерпретации необходимо провести дополнительный эксперимент, который позволит выяснить, изменяется или нет частота фотона (а, значит, и частота электромагнитного сигнала) при его движении в гравитационном поле. А для этого можно, например, провести эксперимент с неподвижными часами. И этот эксперимент мы рассмотрим в следующем параграфе.

6.7 Эксперимент, который опровергнет общую теорию относительности, а заодно и теорию струн

Все гравитационные эксперименты, проведённые на Земле и в Солнечной системе, подтверждают не основные уравнения (1.14) общей теории относительности и даже не уравнение Шварцшильда (1.15) для одной точечной массы, а лишь приближённое уравнение (1.20) для квадрата интервала в слабом гравитационном поле. Но, как уже отмечалось в параграфе 5.4, уравнение (1.20) можно интерпретировать по-разному. И для однозначной интерпретации этого уравнения необходимо провести прямой эксперимент по измерению скорости времени в гравитационном поле. Для проведения такого эксперимента нужны высокоточные атомные часы с погрешностью менее чем 10^{-15}. Атомные часы такой точности в настоящее время уже существуют, и, возможно, эксперимент по измерению скорости хода атомных часов в зависимости от их высоты над земной поверхностью будет проведён уже в ближайшее время.

Теперь несколько слов о том, что представляют собой атомные часы. Основой атомных часов является квантовый стандарт частоты (смотри, например, Физическую энциклопедию [41], том 2, с.326-328), схема работы которого в общих чертах выглядит следующим образом. Атомы некоторого вещества, например цезия, сначала переводятся в возбуждённое состояние. Затем атомы снова переходят в обычное состояние, и в результате такого перехода испускают фотоны определённой частоты. Частота электромагнитной волны, состоящей из этих фотонов, берётся в качестве эталона частоты [41,т.2,с.328]:

> В 1964 году Международный комитет по вопросам мер и весов принял в качестве эталона частоты переход между подуровнями сверхтонкой магнитной структуры основного состояния атомов ^{133}Cs, не возмущённого внешними полями, приписав его частоте значение 9192631770 Гц. Соответствующая шкала времени называется атомной, а единица времени в ней – атомная секунда – определена как 9192631770 периодов резонансного колебания ^{133}Cs. Таким образом, квантовый стандарт частоты на цезиевой атомно-лучевой трубке признан первичным стандартом (эталоном), по отношению к которому стандарты других типов являются вторичными.

Основой точности и стабильности квантового стандарта частоты является стабильность энергетических уровней в атомах. Если бы энергетические уровни внутри атома немного сдвинулись (сдвинулись электронные орбиты), то частота квантового стандарта частоты сразу бы изменилась. Потому что эта частота равна частоте фотонов, испускаемых при атомном переходе, а частота фотона пропорциональна его энергии и обратно пропорциональна постоянной Планка.

Другой очень важной частью атомных часов является счётчик частоты, то есть устройство, которое регистрирует *каждое* колебание частоты, генерируемой квантовым стандартом частоты. И не просто регистрирует каждое колебание, а ведёт им счёт. И благодаря этому вся информация о полном числе колебаний, прошедших с момента включения часов также хранится в атомных часах.

Необходимо подчеркнуть, что сам по себе квантовый генератор частоты без счётчика – это ещё не совсем часы. Можно сказать, что это часы, которые только “тикают”, но при этом не показывают время.

Таким образом, атомные часы – это квантовый генератор частоты, который “производит” секунды с очень высокой степенью точности плюс устройство, которое хранит всю информацию о количестве уже произведённых секунд.

В настоящее время существуют атомные часы с относительной погрешностью менее чем 10^{-15}. Вес таких часов примерно составляет от 50 до 200 килограммов. Это физический прибор размером с холодильник (но бывают часы и меньших размеров). Для того чтобы атомные часы работали с высокой точностью, им необходимо создать определённые условия работы: стабильная температура, отсутствие магнитных полей и малейших встрясок и т. п.

Например, пол в метрологических институтах, на котором установлены высокоточные атомные часы, как правило, представляет собой специальную платформу, отделённую от остального здания для того, чтобы уменьшить влияние на часы едва заметных подземных толчков, которые происходят время от времени. И если атомные часы просто переместить с одного места на другое, то режим их работы собьётся, и потребуется определённое время (от нескольких часов до нескольких недель), чтобы высокая стабильность хода часов восстановилась.

Суть эксперимента с часами состоит в следующем. Одни часы устанавливаются на нижнем этаже здания, а другие – на верхнем (смотри рисунок 6.6). При этом с нижнего этажа вверх каждую наносекунду (по нижним часам) посылается кратковременный электромагнитный импульс. И с верхнего этажа вниз также каждую наносекунду (по верхним часам) посылается кратковременный электромагнитный импульс. На среднем этаже здания находится устройство, которое регистрирует эти импульсы в течение длительного времени (несколько недель) и в результате определяет, откуда, сверху или снизу, импульсы приходят чаще.

Если верна общая теория относительности, то верхние часы будут идти быстрее нижних, и, соответственно, импульсы будут приходить чаще от верхних часов. Например, если высота здания 20 метров, то за 12 дней (миллион секунд) верхние часы уйдут вперёд примерно на две наносекунды (смотри уравнение (1.2) или (5.1)).

А если верна атомная теория гравитация, то, наоборот, нижние часы уйдут вперёд, причём не на две, а на четыре наносекунды (смотри уравнение (3.41) или (5.2)). В этом случае электромагнитные импульсы будут приходить снизу чаще, чем сверху – примерно на четыре импульса за 12 дней.

Результат этого эксперимента можно с уверенностью предсказать заранее. И с точки зрения общей теории относительности, и с точки зрения атомной теории гравитации масса атома в нижних часах будет меньше, чем масса точно такого же атома в верхних часах. И размер нижнего атома также будет меньше размера верхнего атома. Используя простые уравнения квантовой механики для размера атома (3.29) и частоты его излучения (энергия перехода между двумя уровнями в атоме (3.34), делённая на постоянную Планка), нетрудно рассчитать, что частота квантового стандарта частоты в нижних часах будет *выше*, чем частота квантового стандарта частоты в верхних часах. То есть, нижние часы будут идти *быстрее*.

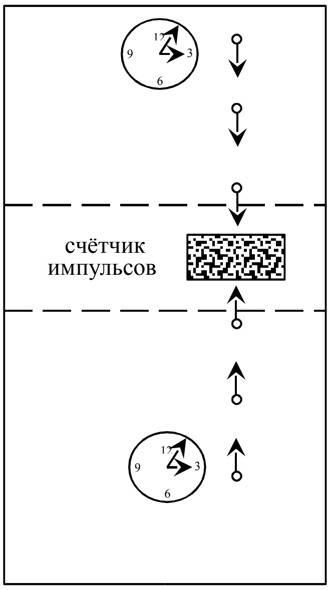

Рисунок 6.6. Двое стандартных идентичных высокоточных атомных часов находятся на верхнем и нижнем этажах здания. На среднем этаже здания находится счётчик импульсов. Снизу вверх каждую наносекунду (по нижним часам) посылается на счётчик кратковременный электромагнитный импульс. И сверху вниз каждую наносекунду (по верхним часам) посылается на счётчик кратковременный электромагнитный импульс. От тех часов, которые идут быстрее, импульсы будут приходить на счётчик чаще.

Таким образом, данный эксперимент позволит сделать вывод, что время близи массивных тел ускоряется, и, следовательно, чёрные дыры (гипотетические массивные объекты, на поверхности которых время останавливается) *не существуют*.

И в заключение параграфа необходимо отметить, что эксперимент с часами сможет опровергнуть не только общую теорию относительности, но и также теорию струн.

Струны – это гипотетические объекты, имеющие размеры порядка 10^{-33} см. Современная экспериментальная техника позволяет человеку проникать в микромир вплоть до расстояний порядка 10^{-17} см. И таким образом, струны находятся настолько “глубоко” в микромире, что исследовать их нет никакой возможности ни настоящее время, ни в будущем. Тем не менее, сторонники теории струн всерьёз надеются на то, что использование таких объектов поможет понять устройство мироздания, и называют теорию струн теорией будущего.

Однако за тридцать лет своего существования теория струн не смогла сделать НИ ОДНОГО предсказания, которое можно было бы проверить экспериментально. И именно поэтому ещё рано называть теорию струн *физической теорией*. Это, скорее, математические вариации на тему “великого объединения”.

И, тем не менее, теория струн всё-таки сделала одно “предсказание”! Это предсказание настолько “необычное”, что я приведу цитату об этом из книги “Элегантная Вселенная”, написанной Б. Грином, специалистом по теории струн [74,с.143]:

> Эдвард Виттен с гордостью объявил, что теория струн уже сделала впечатляющее и подтверждённое экспериментальное предсказание: “Теория струн обладает замечательным свойством: она *предсказывает* гравитацию”. Этим Виттен хотел сказать, что Ньютон и Эйнштейн разработали свои теории гравитации, так как наблюдения ясно показывали им, что гравитация существует и поэтому требует точного и непротиворечивого объяснения. Напротив, даже если бы физики, занимающиеся изучением теории струн, совершенно ничего не знали об общей теории относительности, они неизбежно пришли бы к ней в рамках теории струн. Благодаря существованию моды колебаний, соответствующей безмассовому гравитону со спином 2, гравитация является неотъемлемым элементом этой теории. Как сказал Виттен: “Тот факт, что гравитация является следствием теории струн, является величайшим теоретическим достижением в истории”. Признавая, что “предсказание” правильнее было бы называть “послесказанием”, так как физики дали теоретическое описание гравитации до появления теории струн, Виттен подчёркивает, что это просто историческая случайность. Какая-нибудь другая высокоразвитая цивилизация во Вселенной, фантазирует Виттен, вполне могла бы сначала открыть теорию струн, а уже после, в качестве ошеломляющего следствия, – теорию гравитации.

Это “предсказание” теории струн физики, которые не являются сторонниками теории струн, просто игнорируют. А зря! Ведь теория струн предсказывает не просто гравитационное взаимодействие, она предсказывает общую теорию относительности. То есть всё, что содержится в общей теории относительности, логически вытекает из теории струн. А это, в свою очередь, означает, что если не верна общая теория относительности, то и теория струн также не верна. Поэтому если эксперимент с часами опровергнет общую теорию относительности, то он также опровергнет и теорию струн.

В связи с этим меня интересует следующий вопрос. Когда будет проведён эксперимент с часами, и станет ясно, что общая теория относительности не верна, как поведут себя сторонники теории струн? Признают ли они тот факт, что теория струн – это неверная теория? (Ведь общая теория относительности – это один из двух столпов, на которых построена теория струн [74,с.11]). Или они постараются побыстрее "откреститься" от общей теории относительности?

6.8 А были ли часы в экспериментах с часами?

Итак, используя простые уравнения квантовой механики для энергетических уровней в атоме (3.34) и размера атома (3.29), нетрудно показать, что скорость хода атомных часов должна возрастать вблизи Земли (или вблизи любого другого массивного объекта). Тем не менее, все сторонники общей теории относительности уверены в том, что скорость хода атомных часов должна уменьшаться вблизи Земли. Такое "поголовное" заблуждение вызвано, на мой взгляд, тем, что общая теория относительности "не дружит" с квантовой механикой. С момента своего создания и по сей день общая теория относительности развивается, абсолютно не пересекаясь с квантовой механикой. Это тем более странно, что сам Эйнштейн считал, что использовать "часы" и "линейки", не учитывая при этом тот факт, что они состоят из атомов, – не корректно. Вот что он писал об этом в своей автобиографии [25,с.280]:

> 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.).

Таким образом, Эйнштейн прямо говорил, что нельзя использовать “метры” и “секунды” как самостоятельные физические сущности, не связанные с процессами, происходящими в атоме. И уж тем более, нельзя это делать в настоящее время, когда основной эталон времени – атомные часы!

Но, несмотря на это, я ни разу не встречал в обширнейшей литературе по общей теории относительности исследование такого простого вопроса, как изменение свойств атома в гравитационном поле. Никто также не пытался ответить на вопрос, как изменится величина постоянной Планка в гравитационном поле. А ведь очевидно, что величина этой постоянной должна измениться вблизи большой массы!

Во-первых, потому, что она имеет размерность $[\hbar] = \text{кг}\cdot\text{м}^2/\text{с}$, а килограммы, метры и секунды изменяются вблизи большой массы. Во-вторых, с точки зрения общей теории относительности величина скорости света изменяется в гравитационном поле. И, значит, если учесть неизменность постоянной тонкой структуры $\alpha = \frac{e^2}{c\hbar} \approx \frac{1}{137}$, то придётся сделать вывод об изменении величины постоянной Планка!

И сразу же становится ясным ещё одно противоречие, которое есть в общей теории относительности. Напомним, что в рамках этой теории энергия и частота фотона *не изменяются*, когда он удаляется от большой массы. Но ведь ясно, что этого не может быть из-за изменения величины постоянной Планка. Например, если предположить, что когда фотон удаляется от большой массы, его энергия E сохраняется, то придётся сделать вывод, что его частота ω должна измениться из-за изменения постоянной Планка, так как частота фотона равна $\omega = E/\hbar$.

Удивительно то, что эта важная тема о взаимосвязи между квантовой механикой и общей теорией относительности совершенно не обсуждается в научной литературе. Наверное, единственное исключение – это Ричард Фейнман, который в своих лекциях по гравитации вкратце касается этой темы [34,с.133].

Итак, первое серьёзное заблуждение сторонников общей теории относительности – это уверенность в том, что атомные часы будут идти медленнее вблизи Земли. А второе, ещё более серьёзное заблуждение – это уверенность в том, что замедление времени вблизи Земли является экспериментальным фактом. И так как об этом неоднократно говорилось в литературе по общей теории относительности (смотри параграф 5.7), то в результате широкие слои научной общественности были введены в заблуждение.

Но, как оказалось (и это действительно так!), во всех гравитационных экспериментах с часами часов-то и не было! Не правда ли звучит странно?

Во всех гравитационных экспериментах с часами использовались не атомные часы, а всего лишь квантовые стандарты частоты!

Но квантовый стандарт частоты – это всего лишь высокостабильный генератор фотонов определённой частоты. Поэтому во всех гравитационных экспериментах с "часами" между собой сравнивались не скорости хода часов в различных точках гравитационного поля, а сравнивались между собой частоты фотонов, испущенных стандартными генераторами, находящимися в различных точках гравитационного поля. То есть, по сути, это были не эксперименты по измерению скорости времени, а эксперименты по измерению гравитационного смещения спектральных линий.

Впервые я заподозрил что-то неладное в экспериментах с так называемыми "часами", когда обратил внимание на точность этих экспериментов. Дело в том, что погрешность лучших современных атомных часов составляет примерно 10^{-15}. С каждым годом эта погрешность уменьшается, и в среднем точность атомных часов повышается на один порядок (то есть в 10 раз!) примерно за 10 лет. Например, в настоящее время во Франции идёт работа по созданию цезиевых часов с относительной погрешностью 10^{-16}. Но гравитационные эксперименты с часами проводились в 70-х годах двадцатого века. В то время относительная погрешность лучших атомных часов составляла примерно 10^{-12}, и этого было явно недостаточно для проведения подобных экспериментов.

О создании высокоточных атомных часов, об истории повышения их точности и о перспективах развития смотри тематический выпуск 1-го номера журнала "В мире науки" за 2003 год. Вот небольшая справка из этого журнала [101]:

> В 1999 году в лаборатории Национального института стандартов и технологий (NIST) в Болдере, штат Колорадо, были введены в эксплуатацию часы на базе "цезиевого фонтана", которые стали государственным эталоном времени США, допускающим погрешность в 10^{-15}. Это значение в 500 раз превосходит точность лучших часов NIST образца 1975 года.

Второй раз я заподозрил неладное, когда читал о гравитационных экспериментах с часами в книге К. Уилла "Теория и эксперимент в гравитационной физике" и дошёл до следующего места в ней [39,с.36]:

Первый из таких экспериментов был выполнен Вессо и Левином в 1976 г. Часы, основу которых составлял водородный мазер, были подняты ракетой на высоту 10^4 км, и их частота сравнивалась с частотой аналогичных часов на земле. Высокая частотная стабильность водородного мазера (10^{-15} за время усреднения 100 с) позволила исследовать зависимость смещения частоты от высоты над поверхностью Земли. Изощрённая система обработки данных тщательно исключала доплеровские сдвиги первого порядка, обусловленные движением ракеты, а система слежения давала данные о положении и скорости прибора (для оценки разности гравитационных потенциалов ΔU и доплеровского сдвига второго порядка).

Из этой цитаты ясно, что речь идёт не о часах, а о высокостабильных квантовых генераторах частоты.

И, наконец, мне стало всё ясно, когда у меня в руках оказались фотокопии статей S. Leschiutta и L. Briatore, проводивших в Турине эксперименты с "часами".

Вот что, например, пишет об этих экспериментах профессор М. Сажин на официальном сайте Государственного Астрономического института [81]:

Пусть одни часы помещены на уровне моря, а вторые помещены на гору высотой 10 км. Тогда вторые часы будут идти быстрее и разность хода за час составит 3,6 наносекунды.

Регистрация хода часов с такой точностью стала возможна, когда были созданы атомные и водородные часы, обладающие точностью хода не хуже чем 10^{-12} на протяжении примерно одного часа.

Современные часы значительно точнее. С их помощью физикам удалось измерить неравномерность хода времени в двух различных точках пространства.

В одном случае это был эксперимент, проведенный итальянскими учеными. Они синхронизовали двое часов. Одни часы они оставили на физическом факультете, а вторые на грузовике вывезли в горы и установили на высоте 3250 метров над уровнем моря. Подождав 66 дней, они спустили вторые часы и сравнили показания. Эксперимент показал полное согласие с теорией Эйнштейна! Часы, которые находились на горе ушли вперед, часы, которые остались на уровне моря – отстали.

А вот аннотация к этим экспериментам [87]:

On the basis of the height difference between the CNR cosmic-ray laboratory at Plateau Rosa, 3500 m, and Turin, 250 m above s.l., a direct measurement of the terrestrial gravitational shift has been made by the comparison of the time scales of two cesium beam atomic frequency standards of the Instituto Ellettrotechnico Nazionale "Galileo Ferraries" The principle of equivalence predicts the effect $\Delta t/t = -\Delta U/c^2 = 3.54 \cdot 10^{-13}$, corresponding to the gain of the standard at mountain altitudes $\Delta t/t = 30.6$ ns/d. The results $\Delta t/t = (33.8 \pm 6.8)$ ns/d and $\Delta t/t = (36.5 \pm 5.8)$ ns/d, derived with two independent operating criteria, have been obtained from 1584 h of actual measurement, with reference to an atomic time scale whose linearity was continuously and carefully tested. The results are discussed in terms of the current gravitational theories and in view of future experimental researches, which will be permitted by the advancements of the metrology of time.

Из этой аннотации видно, что речь идёт не об эксперименте по измерению скорости времени, а об эксперименте по измерению красного смещения. Кроме того, авторы эксперимента предполагают в соответствии с общей теорией относительности, что частота электромагнитной волны НЕ ИЗМЕНЯЕТСЯ при движении в поле тяжести земли. И поэтому ставят знак равенство между гравитационным смещением спектральных линий и скоростью времени.

Таким образом, сторонники общей теории относительности, как правило, совершают две ошибки. Во-первых, путают эксперименты по гравитационному смещению спектральных линий с экспериментами по измерению скорости времени. Во-вторых, не делают никакого различия между атомными часами и квантовыми стандартами частоты.

И в заключение параграфа хочу предложить простой тест, как выяснить, использовались или нет настоящие атомные часы в каком-либо гравитационном эксперименте с "часами". В качестве примера рассмотрим эксперимент с "часами" на самолётах, проведённый Ч. Аллеем и его коллегами в 1977 году. Так как на этот эксперимент чаще всего ссылаются, когда хотят доказать, что время (скорость хода стандартных атомных часов) вблизи Земли замедляется.

Из аннотации к этому эксперименту (смотри [82]) можно заключить, что самолёт летал на высоте около 10^4 метров, и, следовательно, гравитационные эффекты были порядка 10^{-12}. Точность же проведения эксперимента около 1%. Таким образом, для проведения этого эксперимента были необходимы атомные часы с погрешностью менее чем 10^{-14}. Но таких атомных часов в то время не было. Следовательно, в эксперименте использовались не атомные часы, а квантовые стандарты частоты. То есть, это был эксперимент не по измерению времени, а по измерению гравитационного смещения спектральных линий.

Следует ещё раз подчеркнуть, что точность атомных часов в 70-х (да и 80-х) годах двадцатого века была недостаточна для проведения гравитационных экспериментов с часами. В то время можно было проводить только эксперименты по измерению относительной разности частот двух идентичных квантовых стандартов частоты, расположенных на разных высотах. То есть можно было измерить только гравитационное смещение спектральных линий.

6.9 Что такое частота одного фотона?

Итак, во всех гравитационных экспериментах с часами, проведенных в конце 20-го века, были использованы не часы, а квантовые стандарты частоты. И тому было несколько причин.

Во-первых, точность атомных часов всё время “отстаёт” на один-два порядка от точности квантовых стандартов частоты. Потому что атомные часы – это квантовый стандарт частоты, который генерирует фотоны высокостабильной частоты, плюс устройство, которое “считает” и “записывает” число колебаний интенсивности в этом пучке фотонов. И это устройство (счётчик частоты) вносит дополнительную погрешность. Но другой, более важной, причиной является то, что все специалисты по общей теории относительности, по-видимому, не видят никакой разницы между экспериментами по измерению скорости времени и экспериментами по измерению гравитационного смещения спектральных линий. В параграфе 4.5 была приведена цитата из учебника Ч. Мизнера, К. Торна, и Дж. Уилера “Гравитация”, в которой авторы, основываясь на эффекте красного смещения, “доказывают”, что время в гравитационном поле замедляется. А вот аналогичное “доказательство” из книги К. Уилла “Теория и эксперимент в гравитационной физике” [39,с.34]:

> Предположим теперь, что излучатель, приёмник и гравитационное поле являются статическими, так что в статической системе координат t_S, x_S траектории последовательных волновых максимумом излучённого сигнала отличаются только лишь на время переноса Δt_S от одного максимума до соседнего. Следовательно, временной интервал Δt_S между прохождениями волновых максимумов для излучателя и приёмника должен быть одним и тем же (иначе волновые максимумы начнут скапливаться или разрежаться между двумя часами, нарушая наше предположение о статичности ситуации).

Из приведённой цитаты видно, что К. Уилл совершает ту же ошибку, что и большинство сторонников общей теории относительности. Он ошибочно полагает, что волновые максимумы и минимумы в пучке фотонов (ведь любой электромагнитный сигнал состоит из фотонов) существуют реально и движутся в пространстве, никуда не исчезая по дороге, наподобие волновых максимумов и минимумов обычных, например звуковых, волн, распространяющихся в какой-либо среде. Если бы это было так, то, действительно, эффект красного смещения означал бы замедление времени вблизи большой массы. Но это не так. Давайте ещё разберёмся в этом, как оказалось, непростом вопросе.

Предположим, в пространстве летит один фотон с энергией E. Это означает, что частота ω этого фотона равна $\omega = E/\hbar$. Но что означает эта частота? И можно ли её наблюдать?

Частота фотона – это частота, с которой изменяется амплитуда волновой функции фотона, то есть с такой частотой изменяется вероятность обнаружить фотон в некотором месте пространства. Чтобы эта частота стала наблюдаемой, одного фотона недостаточно. Для этого требуется огромное число фотонов, волновые функции которых имеют не только одну и ту же частоту, но и находятся в одной и той же фазе друг с другом. Такой пучок фотонов называется когерентным. И если в когерентном пучке фотонов измерять интенсивность (то есть количество фотонов в единицу времени), то эта интенсивность как раз и будет изменяться с частотой $\nu = \dfrac{\omega}{2\pi} = \dfrac{E}{2\pi\hbar}$, где E – энергия одного фотона.

Предположим, что в пространстве движется равномерный однородный и когерентный пучок фотонов с частотой ω. Если мы поместим в этот пучок прибор, который измеряет интенсивность фотонов, то этот прибор зарегистрирует, что интенсивность фотонов изменяется с частотой $\nu = \omega/2\pi$. И здесь очень важна следующая деталь. До того как произошло взаимодействие пучка фотонов с прибором, в нём не существовало никаких реальных максимумов и минимумов плотности, чередующихся с частотой ν. В пучке фотонов существовали только волны вероятности, вызванные тем, что каждый фотон не имеет определённого местоположения в пространстве. И только в результате взаимодействия с прибором, после того как квантовое состояние фотонов изменилось мгновенно и скачкообразно (произошла редукция волновой функции), появились *реальные* (наблюдаемые) максимумы и минимумы интенсивности.

Предположим далее, что пучок фотонов пролетает некоторую область **A** (смотри рисунок 6.7), где с ним что-то происходит, и после этого мы снова, при помощи прибора, измеряем частоту этого пучка. Чему будет равна частота? Ответ простой: частота, с которой будет изменяться интенсивность в пучке фотонов (после того как пучок провзаимодействовал с прибором) равна энергии одного фотона, делённой на величину постоянной Планка, умноженную на 2π. Таким образом, если энергия каждого фотона изменится, когда он пролетит область **A**, то и его частота также изменится.

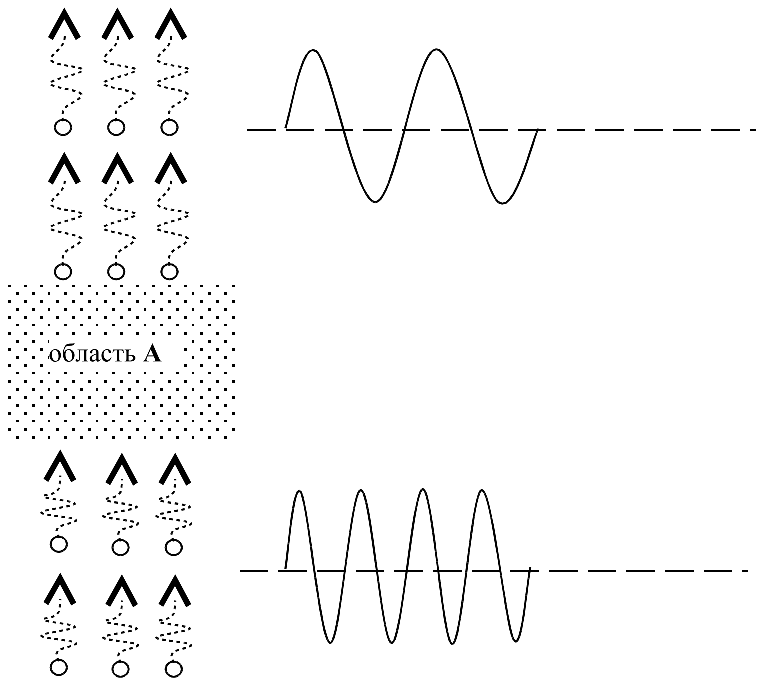

Рисунок 6.7. Равномерный, однородный и когерентный пучок фотонов (энергия каждого фотона E_1) пролетает через область **А**. В области **А** с фотонами что-то происходит, и в результате энергия каждого фотона изменяется и становится равной E_2. Если измерить частоту изменения интенсивности ν_1 в пучке фотонов до того, как он оказался в области **А**, то получится величина: $\nu_1 = \dfrac{E_1}{2\pi\hbar}$. А если измерить частоту изменения интенсивности в пучке фотонов после прохождения области, то получится величина: $\nu_2 = \dfrac{E_2}{2\pi\hbar}$. И если $E_2 < E_1$, то $\nu_2 < \nu_1$. Этот результат может показаться странным (неправдоподобным), если предположить, что максимумы и минимумы в пучке фотонов существуют реально уже до измерения.

Чтобы показать, что сторонники общей теории относительности ошибаются, утверждая, что частота фотонов измениться не может, достаточно привести следующий пример. Когда в 1905 году Альберт Эйнштейн выдвинул гипотезу, что свет представляет собой поток частиц, ему никто не поверил. Потому что свойство быть неделимой частицей противоречит свойству быть волной. И даже экспериментальное подтверждение Милликеном открытого Эйнштейном закона фотоэффекта никого не убедило.

Физики всерьёз отнеслись к гипотезе квантов света (фотонов) только после экспериментов Комптона, проведённых в 1922 году, в которых исследовалось рассеяние рентгеновских лучей на электронах. Сторонники волновой природы света (также как и сторонники общей теории относительности) ошибочно полагали, что электромагнитное излучение – это волны, состоящие из реальных максимумов и минимумов интенсивности, движущихся в пространстве. С этой точки зрения частота электромагнитной волны после рассеяния на электронах не должна была измениться. Но частота изменилась. Причём, частота каждого фотона (или частота электромагнитного излучения, рассеянного под определённым углом) изменилась пропорционально изменению его энергии.

Таким образом, было экспериментально доказано, что частота электромагнитного излучения изменяется пропорционально изменению энергии фотонов. А также было показано, что классические представления о максимумах и минимумах интенсивности, которые реально движутся в пространстве, неприменимы к электромагнитному излучению.

И в заключение параграфа можно отметить следующее. Электрон, также как и фотон, обладает волновыми свойствами. Квантовая частота пучка электронов не отличается принципиально от квантовой частоты пучка фотонов. Поэтому, если следовать логике сторонников общей теории относительности, то квантовая частота электрона также не может измениться при его движении в гравитационном поле. Более того, с точки зрения принципа эквивалентности, квантовая частота электрона должна изменяться *точно так же*, как и квантовая частота фотона, то есть должна оставаться постоянной.

Но это не так. Потому что частота волны, связанной с электроном, понижается по мере подъёма электрона в гравитационном поле (смотри параграф 5.9). Следовательно, и частота фотона, движущегося в гравитационном поле, также понижается с высотой.

6.10 Правильная интерпретация красного смещения

В параграфе 4.1 мы рассмотрели две интерпретации красного смещения. Первая интерпретация сделана в рамках ньютоновской теории гравитации, вторая – в рамках общей теории относительности. Как уже неоднократно отмечалось, эти интерпретации противоречат друг другу. Кроме того, они основаны на ошибочных предположениях.

Например, в первой интерпретации предполагается, что частота излучения атома в точке A в точности равна частоте излучения атома в точке B (смотри рисунок 4.1). Очевидно, что это не так хотя бы потому, что масса атома в точке A *меньше*, чем масса точно такого же атома в точке B (дефект масс, равный гравитационной энергии связи, делённой на квадрат скорости света: $\Delta m = \frac{mgH}{c^2}$). Во второй интерпретации ошибочно предполагается, что энергия и частота фотона не изменяются, когда он движется из точки A в точку B. Очевидно, что это не так, потому что фотон имеет и инертную, и гравитационную массы (он не имеет только массы покоя) и, следовательно, притягивается к Земле. А, значит, его энергия *уменьшается*, когда он движется из точки A в точку B.

Таким образом, правильная интерпретация красного смещения должна учитывать *одновременно оба эффекта*.

Во-первых, она должна учитывать, что частота излучения атома в точке A отличается от частоты излучения атома в точке B.

Во-вторых, она должна учитывать, что энергия фотона *понижается*, когда он движется из точки A в точку B.

Кроме того, правильная интерпретация красного смещения должна учитывать то, что величина постоянной Планка *разная* в точках A и B.

Именно такая интерпретация красного смещения и будет изложена в этом параграфе.

Пусть E_A, ω_A – энергия и частота фотона, излучаемого атомом в точке A; E_B, ω_B – энергия и частота фотона, излучаемого атомом в точке B; $\hbar_A$, $\hbar_B$, c_A, c_B – соответственно величины постоянной Планка и скорости света в точках A и B.

Из уравнения (3.28) следует:

$$\hbar_A = \hbar_B \cdot \left(1 - \frac{gH}{c_B^2}\right) \tag{6.27}$$

Из уравнения (3.8) следует:

$$c_A = c_B \cdot (1 + \frac{gH}{c_B^2}) \qquad (6.28)$$

То есть скорость света в точке A больше, чем в точке B, а величина постоянной Планка меньше.

Из уравнения (6.7) следует:

$$E_A = E_B \cdot (1 + \frac{gH}{c_B^2}) \qquad (6.29)$$

И учитывая (6.27), получаем:

$$\omega_A = \frac{E_A}{\hbar_A} = \frac{E_B(1+\frac{gH}{c_B^2})}{\hbar_B(1-\frac{gH}{c_B^2})} = \omega_B (1 + 2\frac{gH}{c_B^2}) \qquad (6.30)$$

Итак, частота фотона, испускаемого атомом в точке A, *выше*, чем частота фотона, испускаемого точно таким же атомом в точке B, на относительную величину $\frac{2gH}{c^2}$. И именно поэтому стандартные атомные часы в точке A должны идти *быстрее*, чем точно такие часы в точке B, также на относительную величину $\frac{2gH}{c^2}$.

Предположим, что фотон, испущенный атомом в точке A, движется вверх в точку B. В этом случае его энергия уменьшается на величину $2mgH$ (где m – масса фотона, смотри уравнение (6.9) или (6.12)) и становится равной E_{AB}:

$$E_{AB} = E_A - 2mgH = E_B + E_B\frac{gH}{c_B^2} - 2mgH =$$

$$= E_B + E_B\frac{gH}{c_B^2} - 2\frac{E_B}{c_B^2}gH \quad \Rightarrow$$

$$E_{AB} = E_B(1 - \frac{gH}{c_B^2}) \qquad (6.31)$$

А частота ω_{AB}, соответственно, равна:

$$\omega_{AB} = \frac{E_{AB}}{\hbar_B} = \omega_B(1 - \frac{gH}{c_B^2}) \qquad (6.32)$$

Итак, частота фотона, испускаемого атомом в точке A выше на относительную величину $\frac{2gH}{c^2}$, чем частота фотона, испускаемого точно таким же атомом в точке B. Но пока фотон летит вверх, его частота понижается на относительную величину $\frac{3gH}{c^2}$. При этом 2/3 этой величины (то есть $\frac{2gH}{c^2}$) вызвано уменьшением энергии фотона (энергия фотона понижается в два раза быстрее, чем энергия нерелятивистского тела потому, что фотон не имеет энергии покоя), а 1/3 этой величины (то есть $\frac{gH}{c^2}$) вызвано увеличением постоянной Планка.

6.11 Что является инвариантом гравитационного поля?

С точки зрения общей теории относительности гравитационное поле может быть описано при помощи геометрии Римана, в которой инвариантом является интервал ds между двумя событиями. Инвариантность интервала в гравитационном поле – это основа общей теории относительности. Например, если предположить, что величина интервала остаётся неизменной в гравитационном поле, то отсюда сразу же следует, что время вблизи большой массы замедляется.

Пусть в одном и том же месте на поверхности гравитирующего тела массы M и радиуса R произошли два события с интервалом времени $d\tau$, *измеренному по местному времени*. Это означает, что квадрат интервала между этими событиями с точки зрения наблюдателя, который находится на поверхности тела массы M, равен:

$$ds_M^2 = c^2 d\tau^2 \tag{6.33}$$

Квадрат интервала между этими же событиями с точки зрения удалённого от массы M наблюдателя равен:

$$ds_0^2 = c^2 g_{00} dt^2 = c^2 (1 - \frac{2GM}{Rc^2}) dt^2 \tag{6.34}$$

Здесь $g_{00} = 1 - \frac{2GM}{Rc^2}$ – временнáя компонента метрического тензора g_{ik}, а dt – интервал времени между событиями, прошедший по часам удалённого от массы M наблюдателя. В общей теории относительности предполагается, что $ds_M^2 = ds_0^2$ и поэтому:

$$d\tau = dt\sqrt{1 - \frac{2GM}{Rc^2}} \qquad (6.35)$$

И в результате в общей теории относительности делается вывод о том, что скорость хода часов вблизи большой (гравитирующей) массы замедляется.

Как уже отмечалось, ошибочность такого вывода состоит в том, что интервал *не является* инвариантом гравитационного поля. В общей теории относительности делается вывод о неизменности интервала на основании принципа эквивалентности. А справедливость принципа эквивалентности обосновывается равенством инертной и гравитационной масс. Но равенство инертной и гравитационной масс не является достаточным основанием для принципа эквивалентности (смотри параграф 5.1).

С другой стороны, с точки зрения общей теории относительности заряд электрона также является инвариантом гравитационного поля, то есть величина заряда электрона не зависит от того, где находится электрон: вблизи большой массы или вдали от неё.

Предположим, что на поверхности большой массы находится электрический заряд Q, состоящий для определённости из N электронов: $Q = Ne$. И величину этого заряда измеряют два наблюдателя. Один находится на поверхности массы, а другой – на достаточно большом удалении от неё. Наблюдатель, который находится на удалении, может определить величину заряда по тому, как этот заряд влияет на движение заряженных тел, находящихся на удалении от него. Ясно, что оба наблюдателя должны получить одну и ту же величину заряда Q и, следовательно, одну и ту же величину заряда электрона e.

Величину заряда можно измерять в различных единицах, но проще это сделать в системе СГСЭ. В этой системе принято следующее определение единичного заряда Q_0. Если расстояние между двумя единичными зарядами Q_0 равно одному сантиметру, то сила отталкивания между ними равна одной дине:

$$1 \text{ дина} = 1\text{г}\cdot\text{см}\cdot\text{с}^{-2} = \frac{Q_0}{1\text{см}^2} \qquad (6.36)$$

И, следовательно, электрический заряд в системе СГСЭ имеет размерность:

$$[Q] = \sqrt{\text{г}\cdot\text{см}^3\cdot\text{с}^{-2}} \qquad (6.37)$$

Наблюдатель, находящийся на удалении от большой массы, измеряет заряд Q на её поверхности, используя “свои” граммы, сантиметры и секунды. А наблюдатель, находящийся на поверхности большой массы, измеряет величину этого же заряда, используя *другие* эталоны для грамма, сантиметра и секунды. Но, несмотря на то, что он использует *другие* эталоны, он должен получать *ту же самую* величину заряда.

И поэтому можно сделать вывод, что граммы, сантиметры и секунды изменяются в гравитационном поле таким образом, чтобы величина электрического заряда и, значит, заряда электрона оставалась *той же самой*. Отсюда сразу же следует, что в гравитационном поле должна оставаться неизменной следующая размерная величина:

$$[Q^2] = \text{г}\cdot\text{см}^3\cdot\text{с}^{-2} = \text{const} \qquad (6.38)$$

Потому что если эта размерная величина изменится вблизи большой массы, то наблюдатель на поверхности этой массы обнаружит, что величина заряда и, следовательно, величина заряда электрона *изменилась*. То есть, измеряя заряд электрона при помощи местных эталонов массы, длины и времени, он получит *другую* величину, чем наблюдатель, который измеряет заряд электрона, находясь на удалении от большой массы.

С точки зрения общей теории относительности вблизи большой массы эталон массы *уменьшается*, эталон длины *уменьшается*, а продолжительность секунды *увеличивается*. Поэтому, как нетрудно увидеть из уравнения (6.37), величина заряда (величина заряда электрона) *уменьшается*. Это означает, что различные наблюдатели, измеряя величину заряда электрона, получат *разные* величины.

Таким образом, с одной стороны, в общей теории относительности предполагается, что заряд электрона является инвариантом гравитационного поля. Но, с другой стороны, предполагается, что инвариантом гравитационного поля является интервал. Однако, эти два предположения несовместимы друг с другом. Потому что, если инвариантом является интервал, то величина заряда электрона будет *уменьшаться* вблизи большой массы.

С точки зрения атомной теории гравитации *инвариантом гравитационного поля является величина заряда электрона*. Потому что в рамках этой теории изменение эталонов массы, длины и времени вблизи большой массы было получено, именно исходя из соотношения (6.38) (смотри параграф 3.3).