Глава 4

Новая Интерпретация Общей Теории Относительности

В общей теории относительности, которая в настоящее время является общепризнанной теорией гравитации, предполагается, что в гравитационном поле пространство-время искривляется. То есть пространственно-временной масштаб изменяется при переходе от одной точки поля к другой. Но что это означает? В чём состоит физическое отличие одной точки гравитационного поля от другой?

В рамках новой теории можно дать следующий ответ на этот вопрос. В гравитационном поле скорость света и постоянная Планка изменяются при переходе от одной точки пространства к другой. И в первом приближении (то есть когда $\Delta\hbar \ll \hbar$, $\Delta c \ll c$) этот эффект можно рассматривать как искривление пространства-времени.

§ 4.1 Основы общей теории относительности

В настоящее время в качестве теории гравитации принята общая теория относительности. Рассмотрим основы этой теории.

Ещё Галилео Галилей первым экспериментально обнаружил тот факт, что все тела падают в поле тяжести Земли с одинаковым ускорением $\vec{g}$ (ускорением свободного падения). Затем Исаак Ньютон построил теорию гравитации, из которой также следовало (при условии, что инертная и гравитационная массы равны), что все тела в гравитационном поле будут двигаться с одинаковым ускорением. С другой стороны, в системе отсчёта, которая движется с ускорением $\vec{a} = -\vec{g}$, все тела также будут двигаться с одинаковым ускорением $\vec{g}$. Поэтому существует некоторая аналогия между движением тел в поле тяжести и их движением в неинерциальной системе отсчёта. После создания специальной теории относительности стало ясно, что время и расстояние не абсолютны в том смысле, что они зависят от выбранной системы отсчёта. В неинерциальной же системе отсчёта масштаб времени и расстояния изменяется при переходе от одной точки пространства к другой. В качестве примера можно рассмотреть платформу, которая вращается с угловой скоростью ω относительно точки O. В такой системе отсчёта часы будут идти тем медленнее, чем дальше они находятся от центра вращения:

$$\Delta t(r) = \Delta t_0 \cdot \sqrt{1 - \frac{\omega^2 r^2}{c^2}} \qquad (4.1)$$

Здесь Δt_0 – интервал времени, прошедший по часам, находящимся в точке O, а $\Delta t(r)$ – интервал времени, прошедший по часам, находящимся на расстоянии r от центра вращения. Масштаб длины также будет меняться в зависимости от расстояния до центра вращения [5;с.296].

Учитывая аналогию между гравитационным полем и неинерциальной системой отсчёта, Эйнштейн предположил, что гравитационное поле – это искривление пространства-времени: *в гравитационном поле пространственно-временной масштаб (метрика) изменяется при переходе от одной точки пространства к другой*. На основе этого предположения он получил уравнения, связывающие геометрию пространства-времени с распределением в пространстве движущейся материи.

В искривлённом (неевклидовом) пространстве не существует понятия прямой линии. Роль "прямой линии" в таком пространстве играет геодезическая линия – кратчайшее (экстремальное) расстояние между двумя точками. Например, на земной поверхности геодезическими линиями являются экватор и меридианы. Таким образом, массы искривляют четырёхмерное пространство-время и движутся в таком искривлённом пространстве-времени по геодезическим линиям.

В общем случае с точки зрения общей теории относительности эффект гравитации состоит в следующем. *Вблизи массивных тел изменяется пространственно-временной масштаб.* Течение времени замедляется, а все расстояния увеличиваются. *На достаточном же удалении от всех тел в пустом пространстве действуют законы специальной теории относительности* [5].

§ 4.2 Кривизна пространства-времени

Свободно движущееся тело движется по прямой линии, то есть по кратчайшему пути между двумя точками. Математически это утверждение можно записать так:

$$\ell_{AB} = \int_A^B d\ell = \min \tag{4.2}$$

То есть из точки A в точку B тело движется таким образом, чтобы пройденный путь ℓ_{AB} имел минимальную длину. В четырёхмерном псевдоевклидовом пространстве-времени свободно движущееся тело также будет двигаться по прямой линии. Роль расстояния в таком пространстве играет интервал s:

$$ds^2 = c^2dt^2 - dx^2 - dy^2 - dz^2 = c^2dt^2 - d\ell^2 \tag{4.3}$$

Но из-за того, что в выражение для квадрата интервала (4.3) пространственные координаты входят со знаком минус, прямая в псевдоевклидовом пространстве-времени имеет не минимальную, а максимальную длину:

$$\int_{A,t_1}^{B,t_2} ds = \max \tag{4.4}$$

Основная идея общей теории относительности состоит в том, что и при наличии гравитационного поля тело будет двигаться из точки

$a = (A, t_1)$ в точку $b = (B, t_2)$ в соответствии с уравнением (4.4). И единственное отличие гравитационного поля от пустого пространства состоит в следующем. В различных точках пустого пространства один и тот же пространственно-временной масштаб, а в гравитационном поле пространственно-временной масштаб изменяется при переходе от одной точки к другой [5;с.317].

Чтобы лучше понять физический смысл искривлённого пространства, рассмотрим в качестве примера глобус, сделанный из тонкой резины. Допустим, мы вырезали из него Тихий океан, а затем растянули во все стороны вырезанный кусок и наклеили его на плоский стол (примерно так и делают географические карты). Теперь нам, к примеру, нужно начертить на получившейся карте кратчайший путь из Южно-Сахалинска до острова Пасхи. Из-за того, что в разных местах карты разный масштаб (по-разному растянута резина), прямая линия, проведённая на карте между двумя точками, уже не будет кратчайшим расстоянием между ними. Так, например, меридиан является кратчайшим расстоянием между точками на земной поверхности, а на географических картах меридианы, как правило, искривлены. Гравитационное поле можно образно сравнить с такой картой. В различных точках гравитационного поля пространство-время “растянуто” по-разному. Таким образом, с точки зрения общей теории относительности эффект гравитации целиком сводится к искривлению пространства-времени, которое состоит в том, что для квадрата интервала изменяется выражение (4.3).

Уравнения тяготения Эйнштейна – это тензорные уравнения, связывающие распределение материи (энергии) с кривизной пространства-времени [5;с.357]:

$$R_{ik} - \frac{1}{2} g_{ik} R = \frac{8\pi G}{c^4} T_{ik} \qquad (4.5)$$

Здесь T_{ik} – тензор энергии-импульса, g_{ik} – метрический тензор, он связывает величину квадрата интервала с пространственно-временными координатами, R_{ik} – тензор Риччи, R – скалярная кривизна пространства-времени. Величины R_{ik} и R непосредственно связаны с величинами g_{ik} [5,§92]. Уравнения Эйнштейна, в принципе, позволяют определить величины g_{ik} и в результате рассчитать выражение для квадрата интервала. Но даже в простейшем случае гравитационного поля, создавае-мого точечной массой, решение этих уравнений сопровождается громозд-кими математическими выкладками, для понимания которых необходимо владеть тензорным анализом в рамках Римановой геометрии.

В частности, выражение для квадрата интервала в гравитационном поле, создаваемом точечной массой M, в сферических пространственных координатах r, θ, ϕ имеет следующий вид [5;§100]:

$$ds^2 = (1 - \frac{2GM}{rc^2}) c^2 dt^2 - \frac{dr^2}{(1 - \frac{2GM}{rc^2})} - r^2 (\sin^2\theta \, d\phi^2 + d\theta^2) \qquad (4.6)$$

Квадрат интервала в разных точках гравитационного поля имеет разное значение, поэтому имеет смысл только выражение для квадрата бесконечно малого интервала ds. Уравнение (4.6) вместе с общим принципом (4.4) полностью определяют движение тела в гравитационном поле массы M. Необходимо подчеркнуть, что если масса M не является точечной, а имеет радиус R, то уравнение (4.6) применимо только вне этого радиуса при $r \geq R$.

§ 4.3 Расстояние и время

Выражение (4.6) для квадрата интервала в общей теории относительности интерпретируется следующим образом.

1) Длина окружности с центром в центре поля равна $2\pi r$, а расстояние между двумя точками r_1 и r_2 на одном и том же радиусе определяется интегралом [5;с.389]:

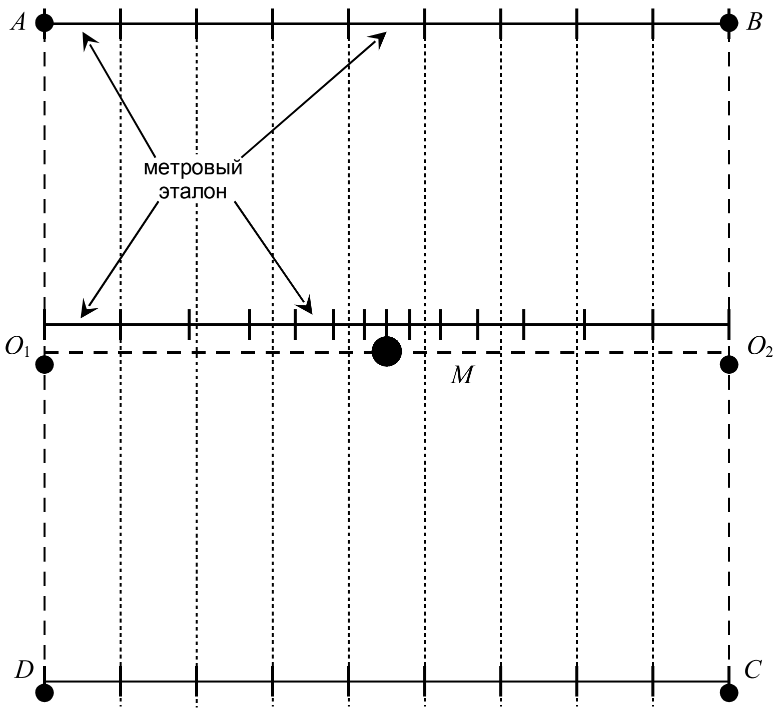


Рис. 5. Все вершины квадрата $ABCD$ находятся на одинаково большом расстоянии от массы M. Если мы будем измерять расстояние между точками A и B или между точками D и C метровым эталоном, то получим одинаковое количество метров. Но если мы будем измерять тем же самым метровым эталоном расстояние O_1O_2, то получим большее количество метров. Это произойдёт потому, что все эталоны длины будут уменьшаться вблизи массы M. То есть расстояние O_1O_2, измеренное в метрах (или любых других единицах длины), будет больше, чем расстояние AB или DC.

$$\int_{r_1}^{r_2} \frac{dr}{\sqrt{1-\dfrac{2GM}{rc^2}}} > r_2 - r_1 \qquad (4.7)$$

Это означает, что все расстояния в гравитационном поле (вблизи большой массы) *увеличиваются*. Геометрический смысл этого явления следующий (см. рис. 5). Все эталоны длины вблизи массы M уменьшаются в k раз, и поэтому все расстояния между точками увеличиваются в k раз:

$$k = \frac{1}{\sqrt{1-\dfrac{2GM}{rc^2}}} > 1 \qquad (4.8)$$

Новая теория раскрывает *физический* смысл этого явления. Вблизи большой массы уменьшается неопределённость в движении частиц. Вследствие этого уменьшаются радиусы электронных оболочек, а, значит, и размеры атомов. Именно поэтому уменьшается длина метрового эталона. Например, величина радиуса Бора (радиус ближайшей к ядру электронной орбиты в атоме водорода) a_0 равна [8;с.232]:

$$a_0 = \frac{\hbar^2}{me} \qquad (4.9)$$

Здесь e – заряд электрона, а m – его масса. Вблизи большой массы уменьшается величина постоянной Планка (2.9) и масса покоя электрона (3.21). Поэтому радиус Бора также *уменьшается* в гравитационном поле, так как его величина пропорциональна величине постоянной Планка в квадрате. Соответственно, в той же самой пропорции *уменьшаются* и размеры всех атомов. Точные расчёты мы сделаем в 7-й главе.

2) Из уравнения (4.6) следует, что связь между некоторым интервалом времени dt, прошедшем вдали от массы M, и тем же самым интервалом времени $d\tau(r)$, прошедшем на расстоянии r от массы M, определяется следующим уравнением:

$$d\,\tau(r) = dt \cdot \sqrt{1-\frac{2GM}{rc^2}} \qquad (4.10)$$

то есть:

$$d\tau(r) < dt \qquad (4.11)$$

В рамках общей теории относительности это неравенство интерпретируется следующим образом. Если на большом расстоянии от массы M пройдёт интервал времени dt, то вблизи массы пройдёт интервал времени $d\tau(r) < dt$, и, следовательно, время вблизи большой массы *замедляется*. Эта тема будет обсуждаться в 8-й главе. В случае слабого поля ($GM/r \ll c^2$) выражение (4.6) можно привести к следующему виду [5;с.393]:

$$ds^2 = \left(1-\frac{2GM}{r\,c^2}\right)c^2dt^2 - \left(1+\frac{2GM}{r\,c^2}\right)(dx^2+dy^2+dz^2) \qquad (4.12)$$

Как уже было отмечено в § 1.3, все гравитационные поля внутри нашей Вселенной являются слабыми (гравитационное поле считается слабым, если в нём $|\Delta\varphi| \ll c^2$). Поэтому уравнения Эйнштейна экспериментально проверены только в случае слабых гравитационных полей. Например, в гравитационном поле Солнца, где $|\Delta\varphi|/c^2 \leq 10^{-6}$. Но в слабом гравитационном поле уравнения Эйнштейна приводят практически к тем же самым уравнениям движения, что и ньютоновский закон Всемирного тяготения. Тем не менее, всё-таки существует ряд дополнительных эффектов, вытекающих из общей теории относительности, которые были экспериментально подтверждены. Это так называемые релятивистские гравитационные эффекты. Их мы рассмотрим в следующем параграфе.

§ 4.4 Релятивистские гравитационные эффекты

Из уравнения (4.12) вытекают несколько эффектов, наблюдаемых в гравитационном поле Солнца и подтверждающих общую теорию относительности. Это так называемые классические релятивистские гравитационные эффекты: движение перигелия Меркурия, гравитационное смещение спектральных линий и отклонение световых лучей, проходящих вблизи Солнца. Во второй половине 20-го века к ним добавляется ещё один гравитационный эффект – эффект Шапиро [36].

1 Движение перигелия Меркурия

С точки зрения теории тяготения Ньютона движение планеты происходит по эллипсу, в одном из фокусов которого находится Солнце. Так как планета притягивается не только к Солнцу, но и к остальным телам Солнечной системы, то эллипс, по которому движется планета, медленно поворачивается в пространстве. Этот эффект очень незначительный: перигелий планеты смещается всего на несколько угловых минут в столетие (см. рис. 6).

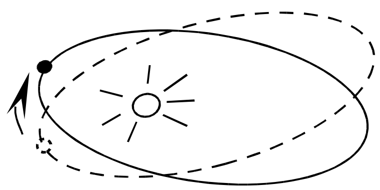


Рис. 6

С помощью теории тяготения Ньютона удалось рассчитать и объяснить смещение перигелия для всех планет Солнечной системы кроме Меркурия. Перигелий Меркурия смещается на 575 угловых секунд в столетие, из них возмущающий эффект от других планет составляет 532 угловых секунды, а оставшиеся 43 секунды не объяснимы с точки зрения теории тяготения Ньютона [16]. С точки же зрения общей теории относительности из-за искривления пространства-времени эллипс, по которому движется планета, должен медленно поворачиваться в пространстве. И для Меркурия этот эффект как раз и составляет 43 секунды в столетие.

Правда высказывались предположения, что смещение перигелия Меркурия может быть вызвано сплюснутостью Солнца [18,т.5;с.193]. Для остальных же планет Солнечной системы этот релятивистский эффект настолько мал, что его трудно обнаружить экспериментально.

2 Гравитационное смещение спектральных линий

Следующий эффект, который вытекает из общей теории относительности – это гравитационное смещение спектральных линий. С точки зрения общей теории относительности “спектр, испускаемый какими-либо атомами, находящимися, например, на Солнце, выглядит там точно так же, как выглядит на Земле спектр, испускаемый находящимися на ней такими же атомами. Если же на Земле наблюдается спектр, испускаемый атомами, находящимися на Солнце, то его линии окажутся смещёнными по сравнению с линиями такого же спектра, испускаемого на Земле. Именно каждая линия с частотой ω будет смещена на интервал Δω, определяемый из формулы:

$$\Delta\omega/\omega = (\varphi_1 - \varphi_2)/c^2 \qquad (4.13)$$

где φ_1 и φ_2 – потенциалы гравитационного поля соответственно в месте испускания и в месте наблюдения спектра” [5;с.324].

Следует подчеркнуть, что φ_1 и φ_2 – это ньютоновские гравитационные потенциалы, то есть $2\cdot(\varphi_1 - \varphi_2) = \Phi_1 - \Phi_2$ (3.16).

Так как $\varphi_1 - \varphi_2 < 0$, то $\Delta\omega < 0$, то есть смещение происходит в сторону меньших частот. Это так называемое красное смещение.

С точки зрения общей теории относительности физический смысл этого явления следующий. При наличии гравитационного поля в разных точках пространства время течёт по-разному. В данном случае значение гравитационного потенциала на Солнце ниже, чем на Земле, и поэтому время на Солнце течёт медленнее, чем на Земле. Это означает, что с точки зрения земного наблюдателя все процессы, происходящие на Солнце (в том числе и электромагнитные колебания), происходят медленнее, чем на Земле. Поэтому и происходит смещение спектральных линий в инфракрасную сторону [5;с.324]. В настоящее время уравнение (4.13) проверено с точностью около 0,1% [18,т.5;с.192].

3. Отклонение световых лучей, проходящих вблизи Солнца

С точки зрения общей теории относительности пространство-время вблизи Солнца искривлено. Поэтому искривляются и траектории световых лучей. Например, если луч света проходит на расстоянии *r* от центра Солнца (см. рис. 7), то он отклонится на угол α [5;с.398]:

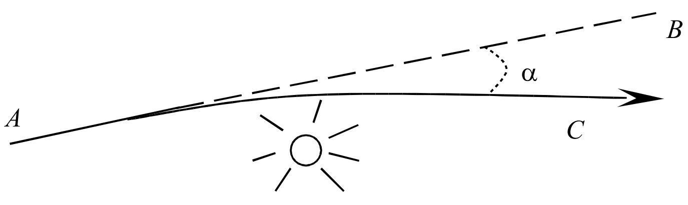


Рис. 7

$$\alpha = \frac{4GM_S}{rc^2} \tag{4.14}$$

Если луч света проходит вблизи Солнца, то r – радиус Солнца, и получаем α = 1,75 угловых секунды. В рамках ньютоновской теории тяготения также можно рассчитать отклонение луча света, проходящего вблизи Солнца. Если рассматривать фотон как частицу, которая притягивается к Солнцу, то получим следующее значение для угла отклонения α:

$$\alpha = \frac{2GM_S}{rc^2} \tag{4.15}$$

Выражение (4.15) для отклонения световых лучей было получено ещё в 1801 году [16;с.120]. Таким образом, для отклонения световых лучей, проходящих вблизи Солнца, общая теория относительности даёт ровно в два раза большее значение, чем ньютоновская теория тяготения. В 1919 году во время полного солнечного затмения было экспериментально подтверждено уравнение (4.14), и, тем самым, впервые сделана экспериментальная проверка общей теории относительности. В настоящее время уравнение (4.14) проверено с точностью около 0,1 % [18;т.5,с.193].

Следует отметить, что *именно экспериментальная проверка уравнения* (4.14) *является основным подтверждением общей теории относительности*. Дело здесь в том, что гравитационное смещение спектральных линий может быть объяснимо и с точки зрения ньютоновской теории тяготения: фотоны теряют энергию на преодоление гравитационного притяжения. Но уравнение (4.14) даёт в два раза большее значение, чем уравнение (4.15), и этот эффект совершенно необъясним в рамках теории тяготения Ньютона.

4 Эффект Шапиро

С точки зрения общей теории относительности время вблизи большой массы замедляется. Поэтому свет движется в гравитационном поле медленнее, чем в пустом пространстве. Для луча, проходящего вблизи Солнца, эта дополнительная задержка составляет около $2 \cdot 10^{-4}$ с. В 50-х годах 20-го века был выполнен эксперимент по измерению временной задержки радарного сигнала, отражённого от Солнца [35]. Этот эксперимент также подтвердил предсказания общей теории относительности, и в настоящее время [18,т.5;с.193] он проверен с точностью около 0,1%.

На первый взгляд может показаться, что этот эксперимент опровергает постулированный нами Новый закон (2.1), из которого следует, что скорость света вблизи Солнца, наоборот, возрастает. Однако, как будет показано в § 4.12, явного противоречия здесь нет.

5 Замедление времени

Как уже отмечалось, с точки зрения общей теории относительности время вблизи большой массы замедляется. В 70–х годах 20-го века был проведён ряд экспериментов с часами на самолётах и ракетах для проверки этого предположения. Однако точность экспериментов была невысока, и к тому же это были только косвенные эксперименты, так как в них измерялся результат влияния различных физических факторов на скорость хода часов (см. § 8.4). Таким образом, замедление времени вблизи большой массы – это не экспериментально установленный факт, а только лишь теоретическое предположение, сделанное на основании экспериментально проверенного приближённого уравнения (4.12).

§ 4.5 Границы общей теории относительности

Уравнения (4.5) общей теории относительности не содержат в явном виде ни массы Вселенной, ни плотности её распределения. С этой точки зрения *вся масса Вселенной практически никак не влияет ни на то, что происходит в околоземном пространстве, ни на то, что происходит где-либо в другом месте Вселенной*. Иначе говоря, пространство-время существует независимо от находящейся в нём материи, а материальные тела влияют *только* на его геометрию.

При этом также по умолчанию предполагается, что ни скорость света, ни постоянная Планка, ни масса покоя электрона (или массы покоя других элементарных частиц) не зависят от величины гравитационного потенциала, то есть не зависят от распределения всей остальной материи во Вселенной. Вот что пишет об этом известный специалист по общей теории относительности Роберт Дикке: “В теории тяготения Эйнштейна ориентация инерциальной системы отсчёта относительно общего распределения масс обусловлена этим распределением. Но в этой теории, помимо указанной несколько тривиальной взаимосвязи, распределение материи во Вселенной вдали от лаборатории не приводит к другим эффектам, наблюдаемым в лаборатории” [26;с.14].

Предположение о том, что вся материя во Вселенной никак не влияет на протекание физических процессов, представляется, по крайней мере, маловероятным. И можно отметить, что в научной литературе не раз высказывались предположения о том, что общая теория относительности не применима в случае сильных гравитационных полей [50;с.40,41].

А с точки зрения новой теории гравитационный потенциал Вселенной определяет такие фундаментальные параметры пространства-времени, как скорость света и постоянная Планка. Поэтому уравнения общей теории относительности применимы только в случае небольших изменений гравитационного потенциала: $|\Delta\Phi| \ll |\Phi| = c^2$, когда изменением величины скорости света и постоянной Планка можно пренебречь.

Гравитационный потенциал, создаваемый всей массой Вселенной и определяющий величину скорости света в околоземном пространстве, равен: $|\Phi| = c^2 = 9{\cdot}10^{16}\,\text{м}^2\text{с}^{-2}$. А в гравитационном поле Солнца скорость света изменяется на очень незначительную в процентном отношении величину. И даже на поверхности Солнца, как нетрудно рассчитать из уравнения (2.4), изменение скорости света составит величину $\Delta c = 600$ м/с, то есть $\Delta c/c = 2{\cdot}10^{-6}$. Точность же экспериментов, подтверждающих общую теорию относительности (например, для релятивистских гравитационных тестов в Солнечной системе), существенно ниже и составляет приблизительно 0,1% [18,т.5;с.192,193].

Таким образом, *по существующим экспериментальным данным* (*в том числе и по проверке общей теории относительности*) *нельзя сделать вывод о том, что распределение материи во Вселенной не влияет на величину скорости света*.

Как уже отмечалось в § 1.3, в межгалактическом пространстве относительное изменение гравитационного потенциала также пренебрежимо мало, так как величина гравитационного потенциала практически полностью определяется удалёнными массами Вселенной. Однако при расширении Вселенной изменение гравитационного потенциала будет очень существенным. Поэтому в этом случае следует учитывать изменение скорости света (2.1) и постоянной Планка (2.9), а также изменение масс элементарных частиц (3.21).

Можно отметить, что в современных космологических моделях никак не учитывается влияние распределения массы Вселенной на протекание астрофизических процессов. Возможно, именно поэтому и возникают многочисленные космологические проблемы. Некоторые из этих проблем мы рассмотрим в 9-й главе, а затем объясним их с новой точки зрения в 10-й главе.

§ 4.6 Принцип эквивалентности

Из-за того, что инертная масса тела тождественно равна его гравитационной массе, движение тел в гравитационном поле похоже на движение тел в неинерциальной системе отсчёта. И с точки зрения общей теории относительности это происходит потому, что гравитационное поле и неинерциальная система отсчёта тождественны по своей сути.

С точки зрения новой теории это не так. Гравитационное поле Вселенной *создаёт* окружающее нас пространство-время. Величины скорости света и постоянной Планка зависят от величины гравитационного потенциала. В неинерциальной же системе отсчёта величины скорости света и постоянной Планка не изменяются. Поэтому гравитационное поле принципиально отличается от неинерциальной системы отсчёта.

Например, при свободном движении частицы в неинерциальной системе отсчёта её масса покоя остаётся постоянной, а инертная масса изменяется в зависимости от скорости частицы (1.21). Совершенно иначе происходит свободное движение частицы в гравитационном поле. В этом случае остаётся неизменной инертная масса частицы (3.7), а её масса покоя изменяется в зависимости от величины гравитационного потенциала (3.21). Существуют и другие отличия между гравитационным полем и неинерциальной системой отсчёта. Например, если электрический заряд движется с ускорением, то он будет излучать электромагнитные волны. Поэтому заряд, покоящийся в неинерциальной системе отсчёта, будет излучать. Но заряд, который покоится в гравитационном поле – *не излучает*. С другой стороны, из формулы (2.1), как было показано в § 3.2, следует равенство инертной и гравитационной масс. И только вследствие этого движение тел в неинерциальной системе отсчёта подобно движению тел в слабом гравитационном поле, когда изменением c и $\hbar$ можно пренебречь.

В общей теории относительности предполагается, что гравитация только искривляет пространство-время. А с точки зрения новой теории гравитация определяет такие фундаментальные параметры пространства-времени, как скорость света и постоянная Планка. И оказывается, что с этой точки зрения можно дать принципиально новое толкование общей теории относительности. В гравитационном поле скорость света и постоянная Планка изменяются при переходе от одной точки пространства к другой. И в первом приближении (то есть когда $\Delta\hbar \ll \hbar$, $\Delta c \ll c$) этот эффект можно рассматривать как искривление пространства-времени.

§ 4.7 Отклонение световых лучей

Кривизна пространства-времени проявляется прежде всего в том, что искривляются траектории световых лучей, а также происходит гравитационное смещение спектральных линий. Эти эффекты отсутствуют в плоском пространстве-времени. То есть основной характеристикой, определяющей кривизну пространства-времени, являются траектории световых лучей [17;с.232].

Рассмотрим движение фотона в гравитационном поле с новой точки зрения. Световые лучи, проходящие вблизи Солнца, отклоняются на угол α согласно уравнению (4.14). Величина этого угла отклонения ровно в два раза превосходит величину угла отклонения света, рассчитанного в рамках ньютоновской теории тяготения (4.15). С точки зрения общей теории относительности в два раза большее отклонение светового луча объясняется кривизной пространства-времени. А с точки зрения новой теории объяснение этого эффекта следующее. В § 3.5, используя формулу (2.1), мы установили, что при движении тела в гравитационном поле (если его скорость мала $V \ll c$) только половина потенциальной энергии тела переходит в кинетическую энергию. Вторая же половина переходит во внутреннюю энергию (энергию покоя) тела. В механике Ньютона отсутствует такое понятие, как энергия покоя. Поэтому при движении тела в гравитационном поле учитывают только изменение его кинетической энергии. И отсюда делается неверный вывод об изменении потенциальной энергии и о величине гравитационного потенциала. Величина гравитационного потенциала занижается ровно в два раза. Фотон не имеет энергии покоя. Поэтому при движении фотона в гравитационном поле ***вся*** потенциальная энергия фотона переходит в его кинетическую энергию. Именно это и приводит к тому, что фотон отклоняется на угол, в два раза больший, чем следует из уравнения (4.15), что как раз и соответствует уравнению (4.14).

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 следующих параграфах мы рассчитаем отклонение луча света в гравитационном поле, рассматривая свет как движение электромагнитных волн.

§ 4.8 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:

$$\int_A^B \frac{d\ell}{\lambda(\ell)} = \min \qquad (4.16)$$

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 (4.16) 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 (рис. 8).

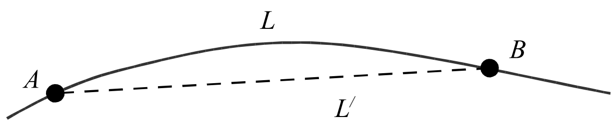


Рис. 8

В этом случае оптическая длина любой линии, проходящей через точки A и B, например линии L', будет больше, чем оптическая длина линии L: $\int_A^B \frac{dL'}{\lambda(L')} > \int_A^B \frac{dL}{\lambda(L)} = \min$. 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 (4.16) можно представить в вариационном виде:

$$\delta \int_A^B \frac{d\ell}{\lambda(\ell)} = 0 \qquad (4.17)$$

Это уравнение означает, что при бесконечно малом отклонении (вариации) подынтегрального выражения от истинной траектории движения изменение значения интеграла равно нулю. Вариационное уравнение (4.17), описывающее распространение волны в неоднородной среде, имеет следующий физический смысл.

Пусть некоторая волна распространяется вдоль линии L (см. рис. 9). 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 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 (4.17).

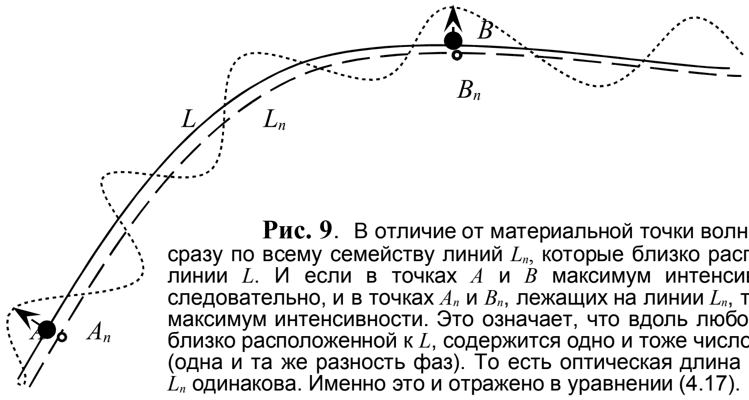


Рис. 9. В отличие от материальной точки волна движется сразу по всему семейству линий L_n, которые близко расположены к линии L. И если в точках A и B максимум интенсивности, то, следовательно, и в точках A_n и B_n, лежащих на линии L_n, также будет максимум интенсивности. Это означает, что вдоль любой 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 (4.17).

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 (4.16) можно представить в виде:

$$\int_A^B \frac{\omega(\ell)}{c(\ell)}\, d\ell = \min \qquad (4.18)$$

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:

$$\int_A^B \frac{d\ell}{c(\ell)} = \min \qquad (4.19)$$

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 (4.19) 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:

$$\int_A^B \frac{c_0}{c(\ell)}\, d\ell = \int_A^B n(\ell)\, d\ell = \min \qquad (4.20)$$

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

Но при движении электромагнитной волны в гравитационном поле её частота изменяется, и поэтому принцип наименьшего времени (4.19) уже неприменим для нахождения траектории движения. В этом случае для нахождения траектории нужно воспользоваться более фундаменталь-ным принципом, выраженным в виде уравнения (4.17) или (4.18).

Из уравнения (3.9) следует, что при движении электромагнитной волны (фотонов) в гравитационном поле будет оставаться постоянной величина $\frac{\hbar\,\omega}{c^2}$. А так как величина постоянной Планка изменяется обратно пропорционально величине скорости света (2.8), то, следовательно, будет оставаться постоянной величина $\frac{\omega}{c^3}$. Таким образом: $\frac{\omega}{c} \sim c^2$, и уравнение (4.18) можно представить в виде:

$$\int_A^B c^2 d\ell = \min \qquad (4.21)$$

Или также, учитывая уравнение (2.1), в виде:

$$-\delta \int_A^B \Phi\, d\ell = 0 \qquad (4.22)$$

В гравитационном поле, создаваемом массой M, уравнение (4.22) можно представить в виде:

$$-\delta \int \Phi\, d\ell = -\delta \int (\Phi_0 + \Delta\Phi)\, d\ell = \delta\, c_0^2 \int (1 + \frac{2GM}{rc_0^2}) d\ell = 0 \quad \Rightarrow$$

$$\delta \int (1 + \frac{2GM}{rc_0^2}) d\ell = 0 \qquad (4.23)$$

Здесь c_0, Φ_0 − скорость света и гравитационный потенциал Вселенной на достаточно большом удалении от массы M:

$$c_0^2 = -\Phi_0$$

Итак, исходя из общего принципа (4.17), определяющего распространение волны, мы получили уравнения (4.21), (4.22) и (4.23), определяющих распространение электромагнитных волн в гравитационном поле. В следующем параграфе, используя эти уравнения, мы рассчитаем отклонение света в гравитационном поле Солнца и сравним полученный результат с экспериментальными данными.

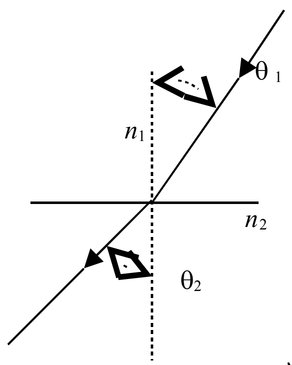
§ 4.9 Показатель преломления

Уравнение (4.20) описывает распространение света в неоднородной среде, а уравнение (4.21) 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 (4.21), можно рассматривать как эффективный показатель преломления.

Напомним, что при переходе из среды с показателем преломления n_1 в среду с показателем преломления n_2 свет отклоняется (смотри рис. 10). При этом:

$$n_1 \sin\theta_1 = n_2 \sin\theta_2 \tag{4.24}$$

Рис. 10. При переходе из среды с показателем преломления n_1 в среду с показателем преломления n_2 луч света отклоняется.



Углы θ_1 и θ_2 отсчитываются от нормали к поверхности, разделяющей две среды. Уравнение (4.24) носит название закона Снелла, оно легко выводится из принципа наименьшего времени Ферма [8;с.9-13].

Пространство, окружающее Солнце, можно мысленно разбить на систему концентрических бесконечно тонких сфер толщиной dr (см. рис. 11). Показатель преломления на такой сфере будет равен:

$$n(r) = c^2(r) = c_0^2 + 2GM/r$$

где c_0 – скорость света на достаточно большом удалении от Солнца, а r – радиус сферы.

Гравитационное поле Солнца является слабым, то есть в нём $\Delta\Phi/\Phi_0 \ll 1$, и, следовательно, $\Delta c/c \ll 1$. В результате, свет движется практически по прямой линии AB. Тем не менее, каждый раз при переходе из сферы с показателем преломления n в следующую сферу с показателем преломления $n+dn$ свет отклоняется на бесконечно малый угол $d\alpha$. Учитывая уравнение (4.24), получаем: $n\,\sin\theta = (n + dn)\sin(\theta + d\alpha)$. Так как $\sin(\theta + d\alpha) = \sin\theta + \sin'\theta\, d\alpha = \sin\theta + \cos\theta\, d\alpha$, то, следовательно: $n\,\sin\theta = (n + dn)(\sin\theta + \cos\theta\, d\alpha) = n\sin\theta + \sin\theta\, dn + n\cos\theta\, d\alpha + \cos\theta\, dn\, d\alpha$.

Пренебрегая членом второго порядка малости ($\cos\theta\, dn\, d\alpha$), получаем: $\sin\theta\, dn = -n\cos\theta\, d\alpha \Rightarrow$

$$d\alpha = -\mathrm{tg}\theta\,\frac{dn}{n} \tag{4.25}$$

$$\frac{dn}{n} = \frac{d(c^2)}{c^2} = \frac{1}{c^2}\, d\left(\frac{2GM}{r}\right) = \frac{1}{c^2}\, d\left(\frac{2GM}{\rho}\sin\theta\right) = \frac{2GM}{\rho\, c^2}\cos\theta\, d\theta$$

Здесь учтено, что $r = \rho/\sin\theta$, где ρ – прицельный параметр, то есть минимальное расстояние от центра Солнца до прямой AB. И, следовательно:

$$d\alpha = -\frac{2GM}{\rho\, c^2}\sin\theta\, d\theta$$

Знак минус означает, что возрастание угла α *уменьшает* угол θ, то есть луч света “притягивается” к Солнцу. При движении луча угол θ меняется от нуля до π, и, следовательно, в общей сложности луч света отклонится на угол α равный:

$$\alpha = -\frac{2GM}{\rho}\int_0^{\pi}\frac{\sin\theta}{c^2}\, d\theta$$

Так как скорость света изменяется в гравитационном поле Солнца на очень незначительную в процентном отношении величину, то её можно вынести из-под знака интеграла.

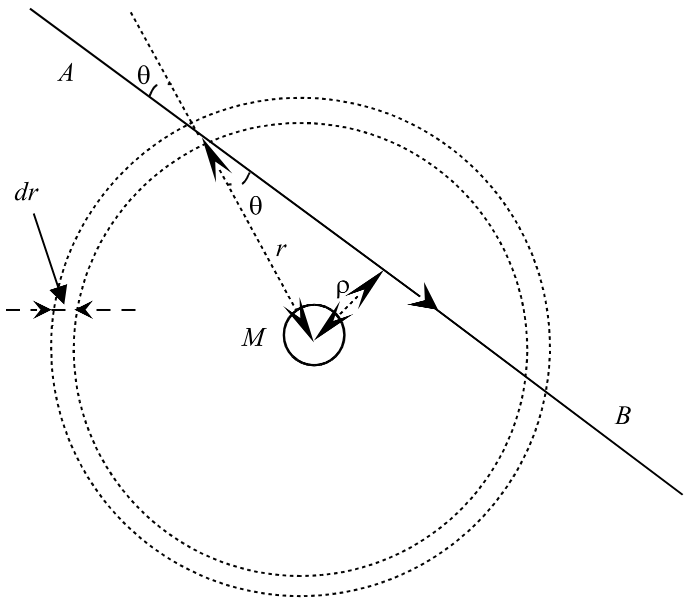


Рис. 11. Луч света проходит на расстоянии ρ от центра Солнца. Он движется практически по прямой линии AB. Тем не менее, каждый раз, когда луч проходит под углом θ бесконечно тонкий слой сферы dr, находящийся на расстоянии r от центра Солнца, он отклоняется на бесконечно малый угол $d\alpha$. Эффективный показатель преломления на каждой сфере равен: $n(r) = c_0^2$

А, учитывая, что $\int_0^{\pi} \sin\theta\, d\theta = -(\cos\pi - \cos 0) = 2$, получаем:

$$\alpha = -\frac{4GM}{\rho c^2} \tag{4.26}$$

Подставляя численные значения величин (так как луч проходит вблизи Солнца, то вместо ρ подставляем величину радиуса Солнца), получаем:

$$|\alpha| = \frac{4 \cdot 6{,}7 \cdot 10^{-11}\ \text{кг}^{-1}\text{м}^3\text{с}^{-2} \cdot 2 \cdot 10^{30}\ \text{кг}}{7 \cdot 10^8\ \text{м} \cdot (3 \cdot 10^8\ \text{м/с})^2} = 0{,}85 \cdot 10^{-5}\ \text{рад} = 1{,}75^{//}$$

То есть при прохождении вблизи Солнца луч света отклонится всего на 1,75 угловых секунды. Это очень незначительное отклонение.

Итак, предполагая, что в гравитационном поле изменяются величины скорости света и постоянной Планка, мы получили уравнение (4.22), описывающее распространение электромагнитных волн. А в случае слабого гравитационного поля мы нашли величину угла отклонения (4.26), которое, как уже отмечалось ранее, проверено в гравитационном поле Солнца с точностью около 0,1%.

§ 4.10 Смещение спектральных линий

Из эксперимента известно, что существует эффект гравитационного смещения спектральных линий (4.13). С точки зрения общей теории относительности этот эффект вызван тем, что в разных точках гравитационного поля время течёт по-разному.

Мы же предполагаем, что в разных точках *гравитационного* поля различны величины скорости света и постоянной Планка. Кроме того, масса покоя элементарной частицы также зависит от величины гравитационного потенциала (3.21). Давайте рассчитаем гравитационное смещение спектральных линий с новой точки зрения.

Уровни энергии E_n атома водорода имеют дискретный спектр значений и определяются формулой Бора [6;с.306]:

$$E_n = -\frac{me^4}{2\hbar^2(1+m/m_P)\cdot n^2} \tag{4.27}$$

здесь m – масса электрона, а m_P – масса протона. При переходе электрона с уровня E_n на уровень E_k ($n > k$) излучается фотон с энергией: $\varepsilon = \hbar\omega = E_n - E_k$ и частотой: $\omega = (E_n - E_k)/\hbar$. Введём обозначение:

$$Z = \frac{e^4}{2(1 + m/m_P)} \cdot \left(\frac{1}{n^2} - \frac{1}{k^2}\right)$$

и получим:

$$\omega = Zm/\hbar^3 \tag{4.28}$$

Такое обозначение для нас удобно, так как величина Z не зависит от гравитационного потенциала.

В областях пространства с гравитационным потенциалом Φ_1 и Φ_2 соответственно будет: $\omega_1 = Zm_1/\hbar_1^3$ и $\omega_2 = Zm_2/\hbar_2^3$. Из уравнения (3.21) следует: $m_2 = m_1 \dfrac{\sqrt{-\Phi_1}}{\sqrt{-\Phi_2}}$. А из уравнения (2.9) следует: $\hbar_2 = \hbar_1 \dfrac{\sqrt{-\Phi_1}}{\sqrt{-\Phi_2}}$.

В результате получаем:

$$\frac{\omega_2}{\omega_1} = \frac{\Phi_2}{\Phi_1} \tag{4.29}$$

Как видно из уравнения (4.29), частота излучения атома будет тем выше, чем "глубже" находится атом в гравитационном поле. Например, на Солнце (Φ_1) частоты излучения атомов выше, чем на Земле (Φ_2).

Однако в данном случае нас интересует следующее. Какая частота будет у фотона, испущенного на Солнце (потенциал Φ_1), когда он уже долетит до Земли (потенциал Φ_2)? Ведь пока фотон летит в гравитационном поле, его частота изменяется.

Как следует из уравнения (3.9), при движении фотона в гравитационном поле будет сохраняться его инертная масса, то есть величина: $\hbar\omega/c^2 = \text{const}$. И, следовательно, когда фотон достигнет Земли, он уже будет иметь частоту ω_{12}. При этом:

$$\hbar_1\omega_1/c_1^2 = \hbar_2\omega_{12}/c_2^2$$

Учитывая (2.1) и (2.9), получаем:

$$\frac{\omega_{12}}{\omega_1} = \frac{\hbar_1 c_2^2}{\hbar_2 c_1^2} = \left(\frac{\Phi_2}{\Phi_1}\right)^{3/2} \tag{4.30}$$

Выражая ω_1 через ω_2, из уравнения (4.29) получаем:

$$\omega_{12} = \omega_2 \sqrt{\frac{\Phi_2}{\Phi_1}} \tag{4.31}$$

Напомним, что ω_2 – частота излучения спектральной линии в области с потенциалом Φ_2. А ω_{12} – частота той же спектральной линии, но испущенной в области с потенциалом Φ_1 и наблюдаемой в области с потенциалом Φ_2. Из уравнения (4.31) следует, что если $|\Phi_2| < |\Phi_1|$ или, что то же самое $\Phi_2 > \Phi_1$, то:

$$\omega_{12} < \omega_2$$

Это означает, что земной наблюдатель увидит спектр излучения атома водорода, находящегося на Солнце, смещённым в сторону красных частот.

Рассчитаем изменение частоты света в случае слабого гравитационного поля. Обозначим $\Delta\Phi = \Phi_2 - \Phi_1$ и $\Delta\omega = \omega_{12} - \omega_2$, тогда:

$$\frac{\Delta\omega}{\omega_2} = \frac{\omega_{12}}{\omega_2} - 1 = \sqrt{\frac{\Phi_2}{\Phi_1}} - 1 = \sqrt{1 + \frac{\Delta\Phi}{\Phi_1}} - 1$$

Учитывая, что $|\Delta\Phi| \ll c^2$, получаем:

$$\frac{\Delta\omega}{\omega_2} = \frac{\Delta\Phi}{2\Phi_1} = -\frac{\Delta\Phi}{2c^2} \tag{4.32}$$

Так как $-\Delta\Phi = \Phi_1 - \Phi_2 = 2(\varphi_1 - \varphi_2)$ (см. (3.16)), то уравнение (4.32) для смещения спектральных линий эквивалентно уравнению (4.13), которое экспериментально проверено с точностью около 0,1%.

Предположим, источник света находится на земной поверхности, а наблюдатель на высоте H над ним. В этом случае наблюдатель зарегистрирует следующее значение гравитационного смещения спектральных линий:

$$\frac{\Delta\omega}{\omega_2} = -\frac{2gH}{2c^2} = -\frac{gH}{c^2} \tag{4.33}$$

Учитывая сказанное в предыдущих параграфах, можно сделать следующий вывод. В слабых гравитационных полях, когда $|\Delta\Phi| \ll c^2$, новая модель пространства-времени приводит к тем же уравнениям что и общая теория относительности для отклонения луча света и для смещения спектральных линий.

§ 4.11 Чёрные дыры

В общей теории относительности величина скорости света есть абсолютная константа. Именно поэтому возможно существование массивных объектов, из поля тяготения которых не может вылететь даже свет. Такие объекты называются чёрными дырами. Следует отметить, что в классической механике также существует понятие чёрной дыры – массивного тела, на поверхности которого вторая космическая скорость больше, чем скорость света [18,т.5;с.452].

А с точки зрения новой теории *чёрные дыры не существуют*, так как величина скорости света *возрастает* вблизи массивных тел (2.1).

Разберём этот вопрос подробнее. Полная энергия тела, имеющего инертную массу m_{in}, равна $E = m_{in}c^2$. И для того чтобы телу вылететь из поля притяжения большой массы, ему нужно затратить часть своей энергии. Поэтому если энергия гравитационного притяжения больше, чем полная энергия тела, то тело ни при каких условиях не сможет вылететь из такого поля. Даже если, например, в результате внутренних процессов тело аннигилирует, то есть превратится в свет, то этот свет также не вылетит за пределы гравитационного поля. Ему просто не хватит энергии для этого. С новой же точки зрения ситуация в корне меняется. Ведь любое тело обладает энергией только потому, что находится в окружении масс Вселенной. И чем “глубже” находится тело в гравитационном поле, **тем больше** внутренняя энергия тела. Полная энергия тела в точности равна его гравитационной энергии притяжения ко всем остальным телам Вселенной. Поэтому она всегда больше, чем энергия притяжения к какому-то одному, пусть и очень большому, телу.

Рассмотрим, например, область пространства с гравитационным потенциалом Φ_0. Пусть на некотором удалении от неё находится огромная масса M, на поверхности которой величина гравитационного потенциала равна Φ ($\Phi < \Phi_0$, $|\Phi| > |\Phi_0|$).

При каком значении потенциала Φ фотон сможет вылететь из гравитационного поля массы M ?

Фотон обладает энергией ε, а, значит, он обладает и инертной, и гравитационной массой равной: $\mu = \varepsilon/c^2$. Для того чтобы фотону вылететь из области с потенциалом Φ и попасть в область с потенциалом Φ_0, ему нужно совершить работу:

$$A = \mu\,(\Phi_0 - \Phi) = \frac{\varepsilon}{c^2}\,(\Phi_0 - \Phi) \tag{4.34}$$

В общей теории относительности (как и в механике Ньютона) скорость света считается постоянной величиной. Поэтому из уравнения (4.34) следует, что если: $(\Phi_0 - \Phi) > c^2$, то: $A > \varepsilon$. Это означает, что работа, которую нужно затратить фотону на преодоление сил притяжения, больше, чем вся его энергия. Следовательно, в этом случае фотон не сможет вылететь из гравитационного поля массы M. С новой же точки зрения на поверхности массы M скорость света будет равна: $c^2 = |\Phi|$. Это означает, что:

$$\Phi_0 - \Phi = c^2 - c_0^2 < c^2$$

Поэтому, как видно из уравнения (4.34), при любом значении Φ: $A < \varepsilon$. Это означает, что фотону хватит энергии, чтобы преодолеть притяжение любого гравитационного поля. Поэтому могут существовать огромные массы – источники мощного электромагнитного излучения. Например, в ядрах активных галактик. Спектры такого излучения будут сильно смещены в инфракрасную область.

§ 4.12 Задержка радиосигнала

В §§ 4.7–4.10 мы рассмотрели движение электромагнитных волн (фотонов) в гравитационном поле с точки зрения новой теории. В результате для слабого поля ($|\Delta\Phi| \ll c^2$) получили уравнения для отклонения луча света (4.26) и для смещения спектральных линий (4.32), совпадающие с соответствующими уравнениями общей теории относительности. И так как “уравнение распространения фронта волны является основной характеристикой свойств пространства и времени” [17;с.232], то можно сделать следующий вывод.

В гравитационном поле скорость света и постоянная Планка изменяются при переходе от одной точки пространства к другой. И в первом приближении (то есть когда $\Delta\hbar \ll \hbar$, $\Delta c \ll c$) *этот эффект можно рассматривать как искривление пространства-времени*.

Что касается эффекта Шапиро, то по этому поводу можно сказать следующее. Если бы в данном эксперименте непосредственно сравнивались между собой скорость света вблизи Солнца и вдали от него, то тогда из эксперимента можно было бы сделать однозначный вывод о том, что скорость света в гравитационном поле уменьшается. Но в данном эксперименте время полёта радиосигнала до Солнца и обратно сравнивалось с *расчётным* временем полёта радиосигнала в пустом пространстве.

Давайте внимательно разберём этот эксперимент (его описание приводится, например, в книге С. Вейнберга “Гравитация и космология”). Когда Земля, Солнце и Меркурий находились практически на одной прямой (при этом Солнце находилось между Землёй и Меркурием), с Земли на Меркурий был послан радиосигнал. Этот сигнал прошёл вблизи Солнца, достиг поверхности Меркурия и, отразившись от него, вернулся обратно на Землю. Время полёта радиосигнала можно измерить с очень высокой степенью точности. Но как измерить с высокой степенью точности расстояние от Земли до Меркурия?

Погрешность, с которой необходимо было знать это расстояние в данном эксперименте, не должна была превышать 1,5 км! Начнём с того, что сигнал отражался не от одной зеркальной точки на поверхности Меркурия, а от площадки вполне определённого размера, поэтому момент прибытия сигнала был известен с точностью до нескольких сот микросекунд [36]. Но даже не это являлось принципиальной трудностью для проведения данного эксперимента. Принципиальная трудность заключалась в другом. Как определить “истинное” расстояние от Земли до Солнца и от Солнца до Меркурия? Как узнать с высокой степенью точности время, за которое радиосигнал прошёл бы эти расстояния в отсутствие гравитационного поля Солнца? Мы ведь не можем “выключить” гравитационное поле Солнца и измерить время, необходимое свету для того, чтобы долететь до Солнца и вернуться обратно.

А так как “истинные” расстояния от Земли до Солнца и от Солнца до Меркурия в данном эксперименте не были известны, то вместо них в расчётах использовались различные параметры. “Эти параметры были затем определены подгонкой наблюдаемого времени движения радиосигнала до Меркурия и обратно по теоретическим формулам” [36;с.221].

Поэтому из данного эксперимента нельзя сделать однозначный вывод о том, что скорость света в гравитационном поле уменьшается. Из него можно только сделать вывод, что приближённое уравнение общей теории относительности (4.12) выполняется в гравитационном поле Солнца с точностью около 0,1%.

Следует отметить, что именно из уравнения (4.12) в рамках общей теории относительности делается вывод, что в гравитационном поле скорость света уменьшается. В 7-й главе на основе новой теории, в том числе используя предположение о том, что скорость света в гравитационном поле увеличивается, мы сформулируем *квантовую* теорию гравитации. При этом выражение для квадрата интервала, которое мы рассчитаем на основе новой теории в слабом гравитационном поле, будет совпадать с выражением для квадрата интервала в общей теории относительности (4.12) с точностью до членов порядка $\Delta\Phi^2/c^4$. И, таким образом, из результатов эксперимента, проведённого Шапиро, в рамках квантовой теории гравитации уже можно будет сделать вывод о том, что скорость света в гравитационном поле, наоборот, возрастает.

Но прежде чем приступить к формулировке квантовой теории гравитации, мы внимательно исследуем “странное” поведение квантовых объектов. Этому будут посвящены две последующие главы.