

Глава 4

О ПРОТИВОРЕЧИВОСТИ РАЗЛИЧНЫХ ИНТЕРПРЕТАЦИЙ КРАСНОГО СМЕЩЕНИЯ

4.1 Две интерпретации красного смещения

В научной литературе по общей теории относительности часто используются две интерпретации красного гравитационного смещения спектральных линий (смотри рисунок 4.1).

Первая интерпретация. Смотри, например [31,46-50,53,54,61,62]. Фотон обладает энергией E и, следовательно, он обладает массой $m = E/c^2$. Когда он движется из точки A в точку B , то совершает работу против гравитационного притяжения, и в результате его энергия уменьшается на величину: $\Delta E = mgH$. Так как частота фотона ω пропорциональна его энергии: $\omega = E/\hbar$, то уменьшение энергии фотона приводит к понижению его частоты:

$$\Delta\omega = \frac{\Delta E}{\hbar} = \frac{EgH}{c^2\hbar} = \omega \frac{gH}{c^2} \quad (4.1)$$

И наблюдатель, находящийся в точке B , обнаружит, что частота фотонов, испускаемых атомами в точке A и прилетевших в точку B ,

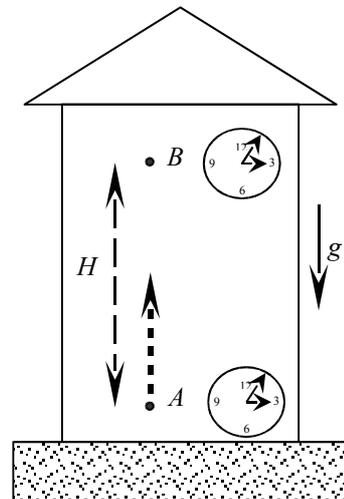
ниже, чем частота фотонов, испускаемых точно такими же атомами в точке B , на относительную величину $\frac{gH}{c^2}$.

Вторая интерпретация. Смотри, например [4,29,34,37-39,77-80]. Местное время в точке A течёт медленнее, чем в точке B на относительную величину $\frac{gH}{c^2}$. Например, стандартные атомные часы в точке A будут идти медленнее, чем точно такие же часы в точке B . И наблюдатель в точке B обнаружит, что все физические процессы, происходящие в точке A , идут медленнее, чем у него. В частности, он обнаружит, что частота фотонов, испускаемых атомами в точке A , ниже на относительную величину $\frac{gH}{c^2}$, чем частота фотонов, испускаемых точно такими же атомами в точке B .

Рисунок 4.1

Эффект красного смещения.

В точке A атомы излучают фотоны, которые затем движутся к точке B . Наблюдатель в точке B обнаруживает, что частота прилетевших фотонов несколько ниже, чем частота фотонов, испущенных точно такими же атомами в точке B .



Таким образом, обе интерпретации приводят к одному и тому же явлению – красному гравитационному смещению спектральных линий.

Во многих учебниках, научно-популярных книгах и даже монографиях по общей теории относительности (смотри, например,

[47-50,53,54,61,62]) обе эти интерпретации преподносятся так, как будто это просто разные способы описания одного и того же явления.

Но это не так. Предположения, которые лежат в основе этих интерпретаций, противоречат друг другу. В первой интерпретации предполагается, что частота фотона, испущенного атомом в точке *A* *точно такая же*, как и частота фотона, испущенного атомом в точке *B*. А это, в свою очередь, означает, что скорость хода атомных часов в точке *A* *будет точно такой же*, как и в точке *B*. И это явно противоречит предположению, которое лежит в основе второй интерпретации согласно которой скорость хода атомных часов в точке *B* *ниже*, чем в точке *A*.

Таким образом, две существующие интерпретации красного смещения – это не различные взаимодополняющие способы описания одного явления. Эти интерпретации явно противоречат друг другу.

С новой точки зрения, основанной на атомном подходе к гравитации, обе эти интерпретации неверны.

Первая интерпретация предполагает, во-первых, что скорость хода атомных часов в точке *A* *точно такая же*, как и в точке *B*. А во-вторых, что частота фотона, пока он движется из точки *A* в точку *B*, изменяется на относительную величину $\frac{gH}{c^2}$. Оба эти предположения ошибочны.

Вторая интерпретация предполагает, во-первых, что скорость хода атомных часов в точке *A* *ниже*, чем в точке *B*. А во-вторых, что частота фотона, пока он движется из точки *A* в точку *B*, остаётся постоянной. Оба эти предположения также ошибочны.

Как уже говорилось, частота фотона, испускаемого атомом в точке *B*, *выше*, чем частота фотона, испускаемого точно таким же атомом в точке *A*. Но пока фотона летит из точки *A* в точку *B*, его частота понижается. Причём, не на относительную величину $\frac{gH}{c^2}$ (как предполагается в первой интерпретации), а гораздо сильнее.

Численные расчёты мы сделаем в 6-й главе.

4.2 Интерпретация красного смещения в рамках общей теории относительности

Когда я учился в университете, изучение общей теории относительности не входило в обязательную программу, и поэтому приходилось изучать её самостоятельно по книгам. Но практически во всех книгах по общей теории относительности обе интерпретации красного смещения преподносятся так, как будто это всего лишь различные способы описания одного и того же явления. Выходило так, что первая интерпретация как бы раскрывала *физический* смысл красного смещения, в то время как вторая интерпретация являлась *геометрическим* описанием этого явления в рамках общей теории относительности. И необходимо отметить, что именно благодаря первой интерпретации эффект красного смещения спектральных линий становился простым и понятным.

Какой вывод напрашивается из всего этого? Вывод простой и печальный одновременно: большая часть специалистов по общей теории относительности не совсем правильно понимают суть этой теории, так как неправильно интерпретируют один из ключевых эффектов, предсказанных общей теорией относительности, – эффект гравитационного смещения спектральных линий. Вот только небольшой перечень неправильно понимающих.

Ч. Киттель, У. Найт, М. Рудерман (“Берклевский курс физики” [31,с.442-444]), Макс Борн (“Эйнштейновская теория относительности” [46,с.342,343]), Денис Сиамма (“Физические принципы общей теории относительности” [48,с.57,58]), Джон Уилер, Кип Торн, Чарльз Мизнер (“Гравитация” [47,т.1,с.236]), Стивен Хокинг (“Краткая история времени” [61,с.53]), В. Брагинский (“Удивительная гравитация” [62,с.66]), В. Гинзбург (“Экспериментальная проверка общей теории относительности” [53,с.107], статья опубликована в 1956 году в сборнике, посвящённом памяти Эйнштейна, но и двадцать три года спустя в книге “О теории относительности” [54,с.166] Гинзбург продолжает придерживаться первой интерпретации красного смещения, не понимая, что ей нет места в рамках общей теории относительности), Я. Зельдович и И. Новиков (“Общая теория относительности и астрофизика” [49,с.31,32], смотри также их книгу “Релятивистская астрофизика” [50,с.73]).

Все эти авторы для объяснения эффекта красного смещения используют первую интерпретацию на равных правах со второй интерпретацией. И, таким образом, становится ясно, что они, во-первых,

не понимают, что две интерпретации красного смещения противоречат друг другу и поэтому не могут одновременно быть правильными. А, во-вторых, не знают, что первой интерпретации нет места в общей теории относительности.

Что касается Макса Борна, то это, безусловно, выдающийся физик, и его ошибку можно простить потому, что он не является специалистом по общей теории относительности. Что же касается таких общепризнанных авторитетов по общей теории относительности, как Хокинг, Уилер, Брагинский, Гинзбург, Зельдович и Новиков, то остаётся только гадать, почему они запутались в таком простом вопросе. А самое главное – ввели в заблуждение широкие слои научной общественности относительно истинного смысла общей теории относительности.

Итак, подавляющая часть книг по общей теории относительности неправильно излагает суть этой теории. Подчеркнём ещё раз, что сейчас речь идёт не о том, верна или неверна общая теория относительности, а о том, *как* следует интерпретировать эффект красного смещения в рамках этой теории.

Суть общей теории относительности в принципе эквивалентности. Из этого принципа следует, что время вблизи большой массы замедляется. Замедление времени вблизи большой массы – это главный вывод общей теории относительности. Другой главный вывод общей теории относительности – это гравитационное смещение спектральных линий. Согласовать между собой оба эти вывода можно только одним-единственным способом – предположить, что частота фотона, когда он удаляется (или приближается) к большой массе, НЕ ИЗМЕНЯЕТСЯ. Потому что если предположить, исходя из здравого смысла, что энергия и частота фотона *уменьшаются*, когда фотон вылетает из гравитационного поля, то мы получим величину красного смещения в два раза больше экспериментально установленного значения.

Например, фотон движется вверх в поле тяжести земли (смотри рисунок 4.1). С точки зрения общей теории относительности частота фотона, испущенного атомом в точке *A*, ниже на относительную величину $\frac{gH}{c^2}$, чем частота фотона, испущенного точно таким же атомом в точке *B*. Если также, исходя из здравого смысла, предположить, что энергия и, следовательно, частота фотона *уменьшаются*, пока он движется вверх из точки *A* в точку *B*, на относительную величину $\frac{gH}{c^2}$ (как предполагается в первой

интерпретации), то мы получим, что величина красного смещения должна быть равна не $\frac{gH}{c^2}$, а вдвое больше: $2\frac{gH}{c^2}$.

Давайте сейчас в качестве примера разберём цитату Я. Зельдовича и И. Новикова [49, с.31,32] и проанализируем типичные ошибки, которые совершаются при интерпретации эффекта красного смещения:

Частота сигнала уменьшается при выходе его из поля тяготения и увеличивается при движении в обратном направлении. Соответственно этому меняется и энергия кванта $E = \hbar\omega$. Описанное явление называется гравитационным красным смещением. Для наблюдателя, находящегося на поверхности звезды, спектр испускания атомов выглядит точно так же, как и в лаборатории на Земле. Однако спектр тех же атомов звезды, наблюдаемый с Земли, сдвинут благодаря описанному явлению в красную сторону.

Гравитационное изменение частоты квантов демонстрирует изумительную стройность теории относительности. Действительно, описанное явление в рамках ньютоновской теории можно интерпретировать как потерю энергии квантами при выходе из поля тяготения. Но благодаря связи энергии и частоты ($E = \hbar\omega$) изменение энергии связано с изменением частоты, а последняя $\sim 1/\Delta t$. Таким образом, из этого факта следует изменение темпа времени в поле тяготения, то есть изменение свойств пространственно-временного континуума. Отсюда уже непосредственно вытекает теория тяготения Эйнштейна с идеей кривизны пространства-времени.

В первых двух предложениях первого абзаца авторы цитаты утверждают, что энергия и частота светового кванта понижаются, когда фотон вылетает из поля тяготения. Подчеркнём ещё раз, что с точки зрения общей теории относительности частота фотона НЕ ИЗМЕНЯЕТСЯ, когда он вылетает из поля тяжести. И в связи с этим естественно возникает вопрос. Почему два ведущих специалиста по общей теории относительности в СССР не знали этого?

Что касается второго абзаца, то он демонстрирует не изумительную стройность общей теории относительности, а изумительную путаницу в простом вопросе. Сначала авторы цитаты утверждают, что фотоны, вылетая из поля тяготения, теряют энергию, их частота понижается, и именно это приводит к эффекту красного смещения. А потом, исходя из эффекта красного смещения, они “доказывают”, что скорость времени изменяется в гравитационном поле. Но для того, чтобы такое доказательство имело силу, необходимо предположить, что когда фотон вылетает из гравитационного поля, его частота *не изменяется*, а эффект красного смещения вызван исключительно *изменением скорости местного времени*.

Итак, получается, что значительная часть специалистов по общей теории относительности не правильно понимают суть общей теории относительности, раз они не понимают, что первая интерпретация красного смещения противоречит общей теории относительности. Представьте себе такую ситуацию: учебники по классической механике пишут люди, которые неправильно понимают смысл одного из трёх законов Ньютона. И здесь, естественно, возникает вопрос. А как так получилось, что большая часть специалистов по общей теории относительности не смогла разобраться в таком простом явлении, как красное смещение?

Я думаю, причина в следующем. Первая интерпретация красного смещения имеет простой физический смысл. Эта интерпретация очень наглядна, так как сделана в рамках ньютоновской теории гравитации. И если эту интерпретацию рассматривать вне контекста общей теории относительности, то очень трудно разглядеть ошибки в этой интерпретации. С другой стороны, вторая интерпретация, которая является единственно правильной интерпретацией в рамках общей теории относительности, очень сильно противоречит здравому смыслу. Потому что очень трудно поверить в то, что энергия и частота фотона НЕ ИЗМЕНЯЮТСЯ, когда он вылетает из поля притяжения огромной массы. Можно сказать, что первую интерпретацию используют исключительно для того, чтобы закрыть противоречие между общей теорией относительности и здравым смыслом. И при этом закрывают глаза на то, что первая интерпретация явно противоречит второй интерпретации.

Существуют, конечно, учебники и монографии, в которых красное смещение объясняется строго в рамках общей теории относительности. Например, монография В. Паули “Теория относительности” [37,§53], “Фейнмановские лекции по гравитации” [34,§7.2], классический учебник Л. Ландау и Е. Лифшица “Теория поля” [29,§88] (цитата из этого учебника приведена в параграфе 2.3) и некоторые другие [38,39]. В этих книгах отсутствует первая интерпретация, которая, как уже отмечалось, свидетельствует о непонимании общей теории относительности.

Однако, вот что интересно. Авторы книг, в которых излагается только вторая интерпретация красного смещения (единственно правильная в рамках общей теории относительности), наверняка знают о существовании первой (неправильной) интерпретации. Почему же тогда они не обсуждают первую интерпретацию и не объясняют её ошибочность?

И в результате широкие слои научной общественности вводятся в заблуждение относительно физического смысла красного смещения и,

следовательно, относительно физического смысла общей теории относительности. И практически никто (за исключением немногих специалистов) не знает о том, что с точки зрения общей теории относительности частота и энергия фотона остаётся постоянной, когда фотон удаляется от большой массы или, наоборот, приближается к ней.

Поэтому можно только приветствовать появление методологической статьи на эту тему “Гравитация, фотоны, часы”, напечатанной в 10-м номере журнала “Успехи физических наук” за 1999 год [77]. Один из авторов статьи – академик Л. Окунь – эксперт по общей теории относительности в нашей стране. Другой – В. Телегди – сотрудник Европейского центра ядерных исследований. Цель статьи – объяснение эффекта красного гравитационного смещения спектральных линий в рамках общей теории относительности. И авторы доходчиво объясняют читателям журнала, почему в рамках общей теории относительности нет места первой интерпретации (в статье интерпретации пронумерованы наоборот). А также объясняют, почему в рамках общей теории относительности энергия и частота фотона не изменяются, когда он вылетает из поля тяготения.

Вот аннотация к этой статье [77,с.1141]:

Статья посвящена классическому явлению, называемому гравитационным красным смещением. Явление заключается в том, что при удалении фотона от гравитирующего тела (например, Земли), его измеряемая частота уменьшается. Это явление объясняется в литературе двумя различными способами. Первое объяснение сводится к тому, что измеряющие частоту часы (атомы или атомные ядра) сами идут быстрее (увеличивают свои характерные частоты) на большой высоте, а частота фотона в статическом гравитационном поле с высотой не меняется. Так что фотон краснеет только относительно часов. Второе объяснение заключается в том, что фотон краснеет потому, что теряет свою энергию, преодолевая притяжение гравитационного поля. Это второе объяснение, особенно широко распространённое в научно-популярной литературе, оперирует такими понятиями как “гравитационная масса фотона” и “потенциальная энергия фотона”. К сожалению, такая интерпретация зачастую встречается и в ряде научных статей и серьёзных монографий по общей теории относительности, где она используется в качестве “наглядного” пояснения формул, полученных математически безупречным образом. Мы показываем, что такая интерпретация неправильна и создаёт путаницу в простом вопросе.

Вот цитата из этой статьи, где объясняется, почему первая интерпретация неверна [77,с.1145]:

Простейшее (при этом неправильное) объяснение красного смещения основано на приписывании фотону инерциальной гравитационной массы $m_\gamma = E_\gamma / c^2$. Благодаря такой массе фотон притягивается к земле с силой

gm_γ , благодаря чему относительное изменение его энергии (частоты) на высоте H равно:

$$\frac{\Delta E_\gamma}{E_\gamma} = \frac{\Delta \omega}{\omega} = -\frac{gm_\gamma H}{m_\gamma c^2} = -\frac{gH}{c}$$

Заметим, что (с точностью до знака) это в точности формула для “синего” смещения атомного уровня, что не удивительно. Атом и фотон рассматриваются здесь одинаковым образом: и тот, и другой – нерелятивистски! Это, разумеется, не годится для фотона. Если бы объяснение в терминах гравитационного притяжения фотона к Земле было правильно, тогда надо было бы ожидать удвоения красного смещения (сложение эффектов часов и фотона) в эксперименте типа Паунда и Ребки.

И, наконец, цитата, в которой критикуются авторы книг, где излагается первая интерпретация [77, с.1142]:

Авторы этих текстов неявно исходят из того, что безмассовый фотон подобен обычной массивной нерелятивистской частице, называют энергию фотона E , делённую на квадрат скорости света, c^2 , массой фотона и рассматривают “потенциальную энергию фотона” в гравитационном поле. Лишь редкие научно-популярные тексты не содержат этой неверной картины и подчёркивают, что энергия и частота фотона не меняются по мере его подъёма.

Итак, с точки зрения общей теории относительности энергия и частота фотона НЕ ИЗМЕНЯЮТСЯ по мере его подъёма в гравитационном поле. Ещё раз подчеркнём, что сейчас речь идёт не о том, верна или неверна общая теория относительности, а о том, как следует интерпретировать эффект красного смещения в рамках этой теории.

Иногда можно услышать следующее мнение.

Частота фотона остаётся постоянной по мировому времени. Но в экспериментах наблюдается только частота фотона, измеренная по местному времени. То есть частота фотона, измеренная по мировому времени не наблюдаема, и поэтому говорить о ней нет смысла.

Это ошибочное утверждение. Потому что в статическом гравитационном поле всегда можно ввести мировое время (смотри параграф 2.2). И в каждом месте поля можно установить двое часов: одни часы будут показывать местное время, а другие – мировое. В этом случае мы сможем измерить частоту фотона и по местному времени, и по мировому. И, значит, обе частоты будут *наблюдаемы*. И, конечно же, наибольший физический смысл имеет именно частота фотона, измеренная по мировому времени, так как изменение этой частоты отражает *реальное* изменение частоты фотона. А изменение частоты фотона по местному времени (это и есть эффект гравитационного

смещения спектральных линий) отражает сумму двух эффектов: *реальное* изменение частоты фотона плюс *изменение скорости местного времени*.

4.3 О дискуссии вокруг красного смещения на страницах журнала “Доклады Академии наук”

Методологическая статья “Гравитация, фотоны, часы” [77] была напечатана в журнале “Успехи физических наук” для того, чтобы внести ясность в вопросе об интерпретации красного смещения. Казалось бы, любой человек, обладающий элементарной логикой и прочитавший эту статью, должен был понять, что первая и вторая интерпретации красного смещения (смотри параграф 4.1) явно противоречат друг другу. А также то, что первой интерпретации, утверждающей, что частота фотона понижается, когда он удаляется от большой массы, нет места в рамках общей теории относительности.

Однако этого не произошло. Вместо того чтобы внести ясность в проблему, статья вызвала “брожение в умах” и даже некоторый раскол в рядах физиков. Например, в “Докладах Академии наук” была напечатана статья, название которой говорит само за себя – “О противоречивости экспериментов, подтверждающих некоторые выводы общей теории относительности” [75]. Основная идея статьи состоит в том, что утверждение о замедлении времени вблизи большой массы противоречит утверждению о том, что частота фотона понижается, когда он удаляется от большой массы.

И автор статьи В. Окороков предлагает три возможных варианта интерпретации красного смещения [75,с.617]:

Возможны, по-видимому, три альтернативных варианта трактовки результатов экспериментов, исследующих гравитационный сдвиг частоты фотона:

а) частота фотона ν при подъёме в поле земли изменяется в полном соответствии с формулой, предсказываемой общей теорией

относительности, $\frac{\Delta \nu}{\nu} = \frac{gH}{c^2}$, а положение уровней ядер и атомов не

зависит от гравитационного потенциала;

б) частота фотона не меняется, а уровни ядер и атомов отслеживают изменение гравитационного потенциала в соответствии с зависимостью

$$\frac{\Delta \nu}{\nu} = \frac{gH}{c^2};$$

в) меняются и частота фотонов, и уровни ядер; в этом случае возможны различные варианты в зависимости от знака и величины этих изменений при перемещении в гравитационном поле.

В. Окорочков совершенно прав в том, что эффект гравитационного смещения спектральных линий можно интерпретировать по-разному. Но он не прав, когда полагает, будто бы в рамках общей теории относительности частота фотона изменяется при подъёме в гравитационном поле (вариант а). Но эта ошибка имеет очень простое объяснение. Ведь в подавляющем большинстве книг по общей теории относительности (как научных, так и научно-популярных) утверждается, что частота фотона уменьшается, когда он вылетает из поля тяготения (смотри, например [31,46-50,53,54,61,62]).

Таким образом, неправильное изложение основ общей теории относительности в многочисленных книгах по этой теории ввело в заблуждение широкие слои научной общественности. Примером этого как раз и является указанная статья.

Чтобы лучше понять суть проблемы, связанной с непониманием общей теории относительности, давайте рассмотрим её вот с какой стороны. Предположим, некоторый человек, физик, но не специалист по общей теории относительности, знает из многочисленных книг о двух интерпретациях красного смещения. То есть, с одной стороны, он знает, что время в гравитационном поле замедляется, а, с другой стороны, что частота фотона понижается, когда он вылетает из гравитационного поля. Так как данный человек не специалист по общей теории относительности, то поэтому он никогда и не задумывался о логической несовместимости этих интерпретаций. Предположим далее, что этот человек вдруг узнаёт, что разные интерпретации красного смещения противоречат друг другу. Какие выводы он сделает?

Если бы человек был не физик, а логик, то он тут же сделал бы следующий вывод. Чтобы согласовать между собой два предсказания общей теории относительности о замедлении времени и о красном смещении, необходимо предположить, что частота фотона не изменяется по мере его подъёма в гравитационном поле.

Но если человек не только логик, но и физик, то сделать такой вывод ему будет очень трудно. Потому что с точки зрения физика, логика, пусть и правильная, не может просто “висеть в воздухе”. В основе любой логики должен быть физический смысл. И именно поэтому физику очень трудно поверить в то, что энергия и частота фотона НЕ ИЗМЕНЯЮТСЯ по мере его подъёма в гравитационном поле. Ведь такое утверждение очень сильно противоречит здравому смыслу!

Спустя некоторое время после публикации статьи В. Окорокова “О противоречивости экспериментов, подтверждающих некоторые выводы общей теории относительности” в “Докладах академии наук”, в том же журнале была опубликована статья Л. Окуня и К. Селиванова, которая уже называлась “О непротиворечивости экспериментов подтверждающих общую теорию относительности” [76].

Авторы статьи объясняли, что эффект красного смещения не противоречит эффекту замедления времени, потому что с точки зрения общей теории относительности частота фотона остаётся постоянной по мере его подъёма в гравитационном поле [76]:

Кажущееся противоречие имеет чисто терминологический характер и обусловлено тем, что интерпретация опытов по красному смещению фотонов в целом ряде публикаций не вполне последовательна. В действительности наблюдавшееся в этих опытах изменение частоты фотонов имеет не абсолютный, а относительный характер. В статическом гравитационном поле Земли фотон, испущенный в ядерном переходе в источнике, находящемся в подвале здания, не может вызвать обратный ядерный переход в детекторе на чердаке не потому, что энергия фотона стала меньше, а потому, что на чердаке расстояние между ядерными уровнями становится больше, чем в подвале. То же относится и к атомным уровням в атомных часах. Таким образом, частота фотона уменьшается лишь относительно частоты ядерного перехода или относительно частоты атомных часов (смотри, например, [29, §88]).

В научной и особенно в научно-популярной литературе это обстоятельство недостаточно разъясняется. Именно этим вызваны заблуждения В. В. Окорокова и необходимость публикации работ [77-80].

Итак, авторы данной статьи дали правильное объяснение красного смещения в рамках общей теории относительности и, таким образом, сняли с этой теории “обвинение” в её внутренней противоречивости. Здесь всё правильно.

Однако, судя по всему, авторы статьи не совсем поняли, из-за чего, собственно говоря, происходит непонимание общей теории относительности. Неправильное понимание общей теории относительности происходит по очень простой причине. Как уже неоднократно отмечалось, с точки зрения общей теории относительности, частота фотона остаётся постоянной, когда он вылетает из гравитационного поля. Такое утверждение очень сильно противоречит здравому смыслу, и именно из-за этого происходит недоверие к этому утверждению. Поэтому авторам статьи, защищающим общую теорию относительности, необходимо было привести хоть какие-то доводы в пользу того, что частота фотона не изменяется (помимо довода, что “так утверждает общая теория относительности”). Но такие доводы в статье не были приведены.

И в заключение параграфа необходимо отметить, что проблема интерпретации красного смещения, несмотря на свою логическую простоту, до сих пор актуальна. И об этом свидетельствуют не только статьи в журнале “Доклады академии наук”. В зарубежных журналах также дискутируется эта тема. Смотри, например [78-80].

4.4 Гравитационное смещение спектральных линий – это следствие закона сохранения энергии

Оказывается, для того чтобы рассчитать гравитационное смещение спектральных линий, совсем не нужно знание общей теории относительности. Потому что гравитационное смещение спектральных линий можно рассчитать, основываясь только на законе сохранения энергии и равенстве инертной и гравитационной масс, не используя при этом ни принцип эквивалентности, ни предположение о замедлении времени. Такой вывод красного смещения изложен, например, в монографии Р. Дикке “Гравитация и Вселенная” [42,с.34] (смотри также “Фейнмановские лекции по гравитации” [34,с.129]).

Рассмотрим следующий циклический процесс (смотри рисунок 4.2).

1) Из резервуара с энергией вылетает фотон с энергией E_0 и, поглотившись атомом, переводит этот атом из обычного состояния в возбуждённое. При этом масса атома M увеличивается.

2) Из резервуара с энергией берётся энергия E_{M+} для того, чтобы поднять возбуждённый атом на высоту H .

3) Возбуждённый атом на высоте H излучает фотон, который, отразившись от зеркала, движется вниз и попадает в резервуар с энергией. Предположим, когда фотон попадает в резервуар, энергия фотона равна E_H .

4) Атом, испустив фотон, возвращается в основное состояние и затем падает вниз, возвращая резервуару энергию E_M .

В результате такого циклического процесса всё возвращается в исходное состояние. Поэтому, на основании закона сохранения энергии, можно сделать вывод, что энергия $E_0 + E_{M+}$, взятая из резервуара, в точности равна энергии $E_H + E_M$, возвращённой в резервуар:

$$E_0 + E_{M+} = E_H + E_M$$

Или:

$$E_H - E_0 = E_{M+} - E_M \quad (4.2)$$

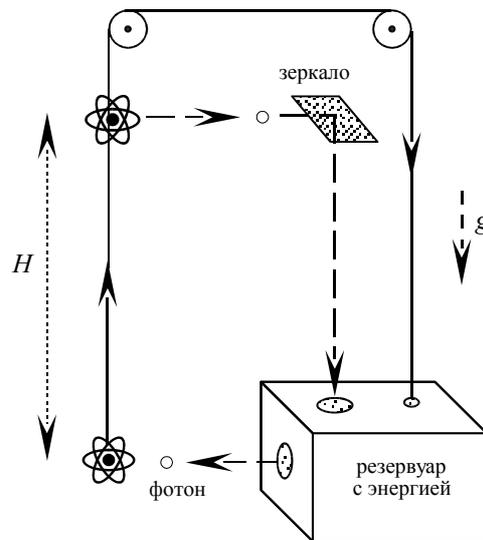


Рисунок 4.2. Мысленный эксперимент, позволяющий рассчитать величину гравитационного смещения спектральных линий, основываясь только на законе сохранения энергии.

Физический смысл этого уравнения следующий. Возбуждённый атом, находящийся на высоте H , испускает фотон. Когда этот фотон прилетает вниз, его энергия равна E_H . И эта энергия больше, чем энергия фотона E_0 , испускаемого точно таким же атомом внизу: $E_H > E_0$, потому что для поднятия вверх возбуждённого атома нужно затратить *больше* энергии, чем для поднятия невозбуждённого атома: $E_{M+} > E_M$.

Возбуждённый атом тяжелее невозбуждённого на величину $\frac{E_0}{c^2}$, и поэтому:

$$E_{M+} - E_M = \frac{E_0}{c^2} gH \quad (4.3)$$

И, следовательно:

$$E_H - E_0 = \frac{E_0}{c^2} gH \quad (4.4)$$

Так как энергия фотона E пропорциональна его частоте ω , то в результате получаем хорошо известную формулу для гравитационного смещения спектральных линий:

$$\frac{\Delta\omega}{\omega} = \frac{gH}{c^2} \quad (4.5)$$

Таким образом, гравитационное смещение спектральных линий следует из закона сохранения энергии и из экспериментально проверенного равенства инертной и гравитационной масс. Для вывода уравнения (4.5) не нужны ни уравнения Эйнштейна (1.14), ни принцип эквивалентности, ни предположение о замедлении времени. Поэтому экспериментальное подтверждение уравнения (4.5) в экспериментах типа Паунда-Ребки не является подтверждением общей теории относительности.

Кроме того, при выводе уравнения (4.5) мы не делали никаких предположений об изменении свойств атома, поднятого на высоту H . Возможно, свойства атома как-то изменяются, когда его поднимают вверх, а, возможно, – нет. Для вывода уравнения (4.5) это не имеет значения. Мы также не делали никаких предположений о том, изменялась или нет энергия фотона, когда он двигался сверху вниз. Мы *не знаем*, какая энергия была у этого фотона в момент его испускания возбуждённым атомом, находящимся на высоте H . Мы можем только рассчитать (на основании закона сохранения энергии), какая будет у фотона энергия, когда он прилетит вниз в резервуар с энергией. Но именно этого и достаточно для вывода уравнения (4.5).

Необходимо подчеркнуть, что величина $\Delta\omega$ – это не изменение частоты фотона, пока он движется сверху вниз. Частота фотона, испускаемого атомом наверху, отличается от частоты фотона, испускаемого атомом внизу. И, кроме того, пока фотон летит сверху вниз, его частота также изменяется. Величина гравитационного смещения спектральных линий $\Delta\omega$ – эффект, вызванный суммой двух эффектов. Это изменение частоты фотона, испускаемого атомом наверху плюс изменение частоты фотона, пока он летит сверху вниз.

На всякий случай следует также отметить, что вывод гравитационного смещения, основанный на законе сохранения энергии, коренным образом отличается от первой интерпретации красного смещения, которая, на первый взгляд, также основана на законе сохранения энергии. Первая интерпретация не корректна, потому что содержит два необоснованных предположения. Во-первых, в первой интерпретации предполагается, что свойства атома *не изменяются* в гравитационном поле. И, во-вторых, предполагается, что кинетическая энергия фотона, при его движении в гравитационном поле, изменяется

точно так же, как и кинетическая энергия обычной нерелятивистской частицы, которая имеет ненулевую массу покоя. Оба эти предположения неверны. Их ошибочность станет ясной после того, как в 6-й главе будет сформулирована правильная интерпретация красного смещения.

4.5 Изменяются или нет энергия и частота фотона, когда он вылетает из гравитационного поля?

Перед каждым, кто изучает общую теорию относительности и узнаёт, что с точки зрения этой теории энергия и частота фотона *не изменяются* по мере его подъёма в гравитационном поле, возникает следующий вопрос. А какие есть основания для такого, мягко говоря, странного утверждения? И этот вопрос, в свою очередь, можно разделить на два вопроса. Во-первых, существует ли *экспериментальное подтверждение* этого утверждения? И, во-вторых, на *основании каких теоретических рассуждений* было сделано такое утверждение?

На первый вопрос можно ответить сразу. Подобные эксперименты не проводились. По-видимому, никому не приходило в голову экспериментально проверить, изменяются или нет частота и энергия фотона, когда он вылетает из гравитационного поля. Такой эксперимент вообще не обсуждался в литературе по общей теории относительности. И это очень странно.

В своё время Эйнштейн отказывался принять квантовую механику, считая её неполной теорией, так как из неё вытекала нелокальность – мгновенное действие на расстоянии. Например, два электрона, находящиеся во взаимодействии, разлетаются в разные стороны. В этом случае измерения, проводимые над одним электроном, *мгновенно* влияют на результаты измерений, проводимых над другим [100,107,108]. Такая связь между пространственно разделёнными квантовыми объектами получила название нелокальность. Для того чтобы разрушить эту связь, нужно локализовать один электрон в каком-либо месте пространства. При этом второй электрон также окажется локализованным в другом месте пространства, и нелокальная связь между электронами нарушится.

Здесь важно даже не то, что такая нелокальная связь может существовать между квантовыми объектами, а другое. Нелокальность противоречит здравому смыслу, и это дало повод Эйнштейну и многим другим физикам усомниться в истинности квантовой механики. Именно сомневающиеся в истинности квантовой механики и провели в конце

прошлого века ряд экспериментов по обнаружению нелокальности. И в результате они, вопреки собственным ожиданиям, экспериментально доказали существование такой нелокальности.

Но ведь утверждение о том, что энергия и частота фотона *не изменяются*, когда он удаляется от огромной массы, тоже очень сильно противоречит здравому смыслу! Почему же никто не усомнился в этом? Почему никто не предложил провести эксперимент для проверки этого утверждения?

Возможно, здесь сыграла свою роль первая интерпретация красного смещения, которая ввела в заблуждение многих физиков. Но как бы там ни было, эксперименты по проверке наиболее сомнительного утверждения общей теории относительности *не проводились*.

Давайте теперь перейдём ко второму вопросу и посмотрим, *какие* теоретические доводы используются в общей теории относительности для обоснования того, что частота и энергия фотона *не изменяются* по мере его подъёма в гравитационном поле. Эти доводы очень просты.

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

Теперь предположим, что у основания башни имеется звуковая мембрана, которая колеблется с частотой, скажем, 10 кГц (по нижним часам). И если наблюдатель, находящийся наверху, услышал бы звуковые колебания с частотой 9 кГц, то он сделал бы вывод, что часы, находящиеся у основания башни, по какой-то причине идут медленнее, чем у него. А так как свет представляет собой электромагнитные колебания, и наблюдатель, находящийся наверху, видит, что частота этих колебаний понизилась, то он, исходя из этого, также делает вывод, что часы у основания башни идут медленнее, чем у него.

Впервые такие доводы были приведены Эйнштейном в его работе “О влиянии силы тяжести на распространение света” [4], опубликованной в 1911 году. Затем эти доводы многократно использовались в научной литературе. Наиболее ясно и доходчиво они изложены в книге Ч. Мизнера, К. Торна и Дж. Уилера “Гравитация” [47, §7.3]:

Нижний экспериментатор испускает электромагнитный сигнал фиксированной стандартной частоты $\omega_{\text{нижн}}$, принимаемый наблюдателем наверху. Для определённости положим, что сигнал представляет собой импульс, содержащий точно N колебаний. Тогда интервал времени $\delta t_{\text{нижн}}$, в течение которого испускается импульс, задаётся выражением $2\pi N = \omega_{\text{нижн}} \delta t_{\text{нижн}}$. Верхний наблюдатель должен принять те же N колебаний

электромагнитного волнового импульса и измерить время $\delta t_{\text{верхн}}$, которое для этого потребуется. Согласно определению “частоты” имеем $2\pi N = \omega_{\text{верхн}} \delta t_{\text{верхн}}$. Эффект красного смещения, установленный экспериментально (для нас) или из закона сохранения энергии (для Эйнштейна), свидетельствует о том, что $\omega_{\text{верхн}} < \omega_{\text{нижн}}$; следовательно, интервалы времени имеют разную длительность: $\delta t_{\text{верхн}} > \delta t_{\text{нижн}}$.

Таким образом, авторы знаменитого учебника по общей теории относительности, основываясь на эффекте красного смещения, “доказывают”, что время замедляется вблизи большой массы. Но это, часто встречающееся в научной литературе “доказательство” ошибочно!

Ошибка этого доказательства состоит в том, что для описания движения фотонов (электромагнитной волны) используются классические представления о движении, которые *неприменимы* для описания квантовых объектов. Чтобы лучше это понять, предположим, что снизу (из точки A в точку B , смотри рисунок 4.3) в течение одной секунды (по местному времени в точке A) вылетает миллиард фотонов с частотой 10^{15} Гц (фотоны такой частоты воспринимаются человеческим глазом как синие).

Теперь предположим для наглядности, что разница гравитационного потенциала между точками B и A столь велика, что наблюдатель в точке B воспринимает прилетающие снизу фотоны как “красные” (то есть частота фотона по местному времени в точке B равна $0,5 \cdot 10^{15}$ Гц). Допустим, что в течение интервала времени Δt (по местному времени в точке B) верхний наблюдатель поймал все фотоны, которые вылетели из точки A . Предположим также, что все фотоны долетели из точки A в точку B и, следовательно, верхний наблюдатель зарегистрировал ровно миллиард фотонов в течение интервала времени Δt .

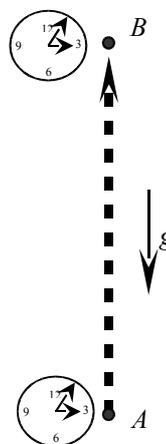


Рисунок 4.3

Из точки A в точку B вылетают “синие” фотоны с частотой 10^{15} Гц (по часам в точке A) с интервалом в одну наносекунду (также по часам в точке A). И в течение одной секунды вылетает ровно миллиард фотонов.

Наблюдатель в точке B регистрирует (по часам в точке B) миллиард “красных” фотонов с частотой $0,5 \cdot 10^{15}$ Гц, которые прилетают в течение времени Δt .

И теперь верхний наблюдатель должен ответить на вопрос: где местное время (стандартные атомные часы) идёт быстрее, в точке A или в точке B ? Ответить на этот вопрос очень просто (смотри параграф 2.2). Если интервал времени Δt больше одной секунды, то скорость местного времени в точке A выше, чем в точке B . Если интервал времени Δt меньше одной секунды, то, наоборот, скорость местного времени в точке A ниже, чем в точке B . И, наконец, если интервал времени Δt равен одной секунде, то скорость местного времени одна и та же и в точке A и в точке B .

Итак, чтобы выяснить, где местное время течёт быстрее, нужно определить, как изменяется частота, с которой летят фотоны, по местному времени. Потому что частота, с которой летят фотоны, если её измерять по мировому времени остаётся постоянной. Ведь фотоны никуда по дороге не исчезают! И именно поэтому изменение этой частоты, измеренной по местному времени, будет означать не что иное, как *изменение скорости местного времени*.

А может ли верхний наблюдатель сделать вывод о скорости времени в точке A по цвету прилетевших снизу фотонов? Нет, не может. Потому что частота (цвет) фотона – это частота его внутренних колебаний. С такой частотой изменяется амплитуда волновой функции фотона – амплитуда волны вероятности. Эту частоту нельзя представлять в виде реально существующих в пространстве гребней и впадин, как это делают авторы учебника по общей теории относительности в приведённой выше цитате.

Рассмотрим, к примеру, четвертое предложение из этой цитаты: “Верхний наблюдатель должен принять те же N колебаний электромагнитного волнового импульса и измерить время $\delta t_{\text{верхн}}$, которое для этого потребуется” Ясно, что это предложение ошибочно. Частота фотонов, вылетающих снизу, равна 10^{15} Гц, и если следовать логике авторов цитаты, то верхний наблюдатель должен зарегистрировать 10^{15} колебаний. Но он в принципе не сможет этого сделать! Максимум, на что он способен – это зарегистрировать 10^9 фотонов.

Итак, чтобы выяснить, где местное время течёт быстрее, нужно измерять не изменение частоты отдельного фотона, а изменение частоты, с которой летят фотоны. Потому что только эта частота остаётся постоянной по мировому времени (смотри параграф 2.2).

Таким образом, во всей научной литературе по общей теории относительности, начиная с ранней работы Эйнштейна [4], делается одна и та же ошибка. Во-первых, для описания движения фотонов (электромагнитной волны) используются классические представления о “гребнях” и “впадинах”, реально существующих в пространстве. Во-вторых, предполагается, как само собой разумеющееся, что эти “гребни” и “впадины” вполне материальные, и поэтому их общее число при движении электромагнитной волны должно сохраняться. И уже отсюда делается неверный вывод о том, что и частота электромагнитной волны также должна оставаться неизменной по мировому времени.

Повторим ещё раз, в чём ошибка подобных рассуждений. Никаких “гребней” и “впадин” в пространстве при движении фотона в действительности не существует. Потому что эти “гребни” и “впадины” – это не реальные (материальные) волны, а волны вероятности. И при регистрации фотона все эти гребни и впадины тут же исчезают без следа.