

МЕТОДИЧЕСКИЕ ЗАМЕТКИ

Гравитация, фотоны, часы

Л.Б. Окунь, К.Г. Селиванов, В.Л. Телегди

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 большей 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 распространенное 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 серьезных монографий по общей теории относительности, где она используется в качестве "наглядного" пояснения формул, полученных математически безупречным образом. Мы показываем, что такая интерпретация неправильна и создает путаницу в простом вопросе.

PACS numbers: 01.40.-d, 01.55.+b, 04.20.-q

Содержание

1. Введение (1141).
 2. Эксперименты (1142).
 3. Теория до 1916 г.: эйнштейновский лифт (1143).
 4. Общая теория относительности: метрика (1143).
 5. Псевдовывод и псевдоинтерпретация гравитационного красного смещения (1145).
 6. Измерение длины волны (1145).
 7. Заключение (1146).
- Список литературы (1146).

1. Введение

В литературе известны два типа красного смещения фотонов: гравитационное и космологическое. Обычно их рассматривают отдельно друг от друга. Гравитационное красное смещение возникает, когда фотон удаляется от массивного объекта (например, Земли или Солнца), который можно рассматривать как статический. Наблюдаемые величины смещения обычно очень малы. Эта статья посвящена гравитационному красному смещению.

Космологическим называется красное смещение света (фотонов) от отдаленных галактик, обусловленное их разбеганием. Часто это смещение называют хаббловским. Его величина велика: для самых далеких из наблюдавшихся галактик $\Delta\lambda/\lambda \approx 5$, где λ — длина волны излучаемого света. В дальнейшем мы не будем обсуждать космологическое красное смещение.

Явление гравитационного красного смещения было предсказано Эйнштейном в 1907 г. [1] и обсуждалось им в 1911 г. [2] до создания общей теории относительности (ОТО). После создания Эйнштейном ОТО [3] гравитационное красное смещение стало одним из трех классических эффектов этой теории (см. [4, 5]; относительно истории создания ОТО см. [6–8]).

Феноменологически, не вдаваясь в теоретическую интерпретацию явления, его можно описать так: частота света, испускаемого двумя тождественными атомами, меньше у того атома, который глубже "сидит" в гравитационном потенциале. Начиная с 1960 г. были осуществлены уникальные эксперименты [9–14] с целью измерения различных проявлений этого эффекта. Эти эксперименты обсуждаются в прекрасных обзорах [15–25], основная цель которых — сопоставление экспериментальных данных с предсказаниями не только ОТО, но и различных нестандартных теорий гравитации. Интерпретации гравитационного красного смещения в рамках стандартной теории в этих обзорах не обсуждаются.

Авторы большинства монографий по ОТО (см., например, [26–35]) следуют интерпретации Эйнштейна, данной им в 1916–1920 гг. (см. [3–5]). Согласно этой интерпретации, гравитационное красное смещение обусловлено универсальным свойством стандартных часов (атомов, атомных ядер). В общем случае произвольного

Л.Б. Окунь, К.Г. Селиванов. Государственный научный центр "Институт теоретической и экспериментальной физики", 117259 Москва, ул. Б. Черемушкинская 25, Российская Федерация
E-mail: okun@heron.itep.ru, selivanov@heron.itep.ru
В.Л. Телегди. EP Division, CERN, CH-1211 Geneva 23, Switzerland
E-mail: valentine.telegdi@cern.ch

Статья поступила 19 мая 1999 г.

гравитационного поля и произвольных скоростей излучающего и поглощающего атомов собственный временной интервал между событиями испускания двух фотонов, измеренный стандартными часами в точке испускания, отличен от собственного временного интервала между событиями поглощения этих фотонов, измеренного тождественными стандартными часами в точке поглощения. Отношение этих интервалов дает инвариантное описание красного смещения. Такая формулировка красного смещения была впервые дана в 1923 г. Г. Вейлем [36].

В случае статического гравитационного потенциала и неподвижных атомов картина упрощается, поскольку существует выделенное время (временная координата), от которого не зависит метрика. Это время можно выбрать в качестве универсального (мирового) времени. При таком выборе разность энергий двух атомных уровней возрастает по мере увеличения расстояния между атомом и Землей. Вместе с тем энергия фотона остается неизменной. (В дальнейшем будем говорить о Земле, но это может быть и другое массивное тело.) Таким образом, то, что называется красным смещением фотона, является в действительности синим смещением атома. Что же касается значений собственного времени в различных точках, то они выражаются через универсальное время с помощью множителя, который зависит от гравитационного потенциала и потому имеет различные значения в различных точках.

В учебниках и монографиях, опубликованных в последние годы [37–40], при описании красного смещения используются такие математические конструкции как ортонормированные базисы (последовательность собственных систем отсчета), по отношению к которым определена энергия фотона и параллельный перенос 4-импульса фотона вдоль его мировой линии. Зачастую такое строгое математическое описание сопровождается отнюдь не строгими словесными представлениями о фотоне, теряющем энергию по мере того, как он "выбирается" из гравитационной потенциальной ямы. Даже в некоторых классических учебниках и монографиях [41–43] используется подобная "наглядная фразеология". Эксперты по общей теории относительности не обращают на нее внимания: для них это дань научно-популярной традиции. Но неэксперты должны быть предупреждены, что смысл математических формул, лежащих в основе описания гравитационного красного смещения, радикально отличается от "эвристических" (и неправильных) аргументов, о которых шла речь выше и которые широко представлены во многих элементарных текстах (см., например, [44–50]).

Авторы этих текстов неявно исходят из того, что безмассовый фотон подобен обычной массивной нерелятивистской частице, называют энергию фотона E , деленную на квадрат скорости света, c^2 , массой фотона и рассматривают "потенциальную энергию фотона" в гравитационном поле. Лишь редкие научно-популярные тексты (см. [51]) не содержат этой неверной картины и подчеркивают, что энергия и частота фотона не меняются по мере его подъема.

2. Эксперименты

Первые лабораторные измерения гравитационного красного смещения были осуществлены в Гарварде в 1960 г.

Робертом Паундом и Гленном Ребкой [9, 10] (с точностью 10 %). С точностью 1 % такой эксперимент был проведен Паундом и Снайдером [11]. Фотоны двигались в башне высотой 22,5 м. Источником и поглотителем фотонов (γ -лучей с энергией 14,4 кэВ) служили ядра изотопа железа ^{57}Fe . Для уменьшения возможных систематических ошибок наблюдалось как покраснение, так и посинение фотона. В первом случае источник располагался в подвале, а поглотитель на чердаке; во втором они менялись местами.

Измеренный сдвиг частоты был исключительно мал: $\Delta\omega/\omega \approx 10^{-15}$. Добиться такой точности позволил открытый в 1958 г. эффект Мёссбауэра, благодаря которому фотонные линии в кристалле предельно монохроматичны. Гравитационное красное смещение компенсировалось с помощью эффекта Доплера: поглотитель медленно двигался в вертикальном направлении, в результате чего восстанавливалось резонансное поглощение фотонов.

Что касается интерпретации полученных результатов, в статьях Паунда и сотрудников имеется некоторая неоднозначность. Хотя они упоминают интерпретацию в терминах часов, ссылаясь на статьи Эйнштейна, тем не менее, заглавие статьи [9] гласит "Apparent weight of photons", а доклад Паунда в Москве [10] называется "О весе фотона". Из заглавия статьи Паунда и Снайдера [11] "Effect of gravity on nuclear resonance" можно заключить, что они не хотели делать выбор между альтернативными интерпретациями.

В отличие от оригинальных статей Паунда и сотрудников, большинство обзоров гравитационных экспериментов [18–24] рассматривают их результат как проверку поведения часов в гравитационном поле. В действительности же эксперименты сами по себе не дают возможности выбрать между двумя интерпретациями, если не опираться на ОТО. Ведь в них измеряется относительный сдвиг фотонной и ядерной частот, а каждая из них по отдельности не измеряется. Это же замечание относится и к сдвигу частоты фотона (радиоволны) относительно частоты атомного стандарта (водородного мазера), измеренному с помощью ракеты, поднявшейся на высоту 10000 км и упавшей в океан [12]. В этом опыте теория гравитационного красного смещения была подтверждена с точностью порядка 10^{-4} .

Для того, чтобы непосредственно проверить зависимость хода атомных часов от высоты (без участия фотонов), были осуществлены эксперименты, в которых часы долгое время находились в воздухе на самолетах [13, 14] (см. также обзоры [18–24]). В этих экспериментах часы после полетов возвращались в лабораторию, где их показания сравнивались с показаниями таких же часов, оставшихся на Земле. (Кроме того, в опыте [14] за сдвигом самолетных часов следили с земли телеметрически.) Оказалось, что, в согласии с общей теорией относительности, летавшие часы уходили вперед на величину $\Delta T = (gh/c^2)T$, где T — продолжительность полета на высоте h , g — гравитационное ускорение, а c — скорость света. (Точность эксперимента [13], использовавшего пучок атомов цезия, порядка 20 %. Точность эксперимента [14] — 1,5 %.)

Этот результат, разумеется, получился после учета многочисленных фоновых эффектов. Одним из них был знаменитый "парадокс близнецов": согласно специальной теории относительности, двигавшиеся часы после

возвращения в исходную точку отстанут от покоившихся. Нетрудно получить общую формулу, описывающую воздействие как гравитационного потенциала ϕ , так и скорости u (см., например, [27]):

$$d\tau = dt \left[1 + \frac{2\phi}{c^2} - \frac{u^2}{c^2} \right]^{1/2}, \quad (1)$$

где τ — это собственное "физическое" время часов, а t — уже упоминавшееся выше так называемое универсальное мировое время, которое можно ввести в случае статического гравитационного потенциала и которое иногда называют лабораторным временем, поскольку именно его показывают часы, покоящиеся в лаборатории, где значение ϕ принято равным нулю.

В своих лекциях по гравитации [35] Ричард Фейнман подробно разъясняет различия в изменении хода часов из-за ϕ и из-за u . Он заключает, что центр Земли должен быть "на день или два моложе, чем ее поверхность".

Кроме "башенных", ракетных и самолетных экспериментов были осуществлены также "настольные" опыты [52, 53] с использованием эффекта Джозефсона, компенсирующего гравитационное смещение.

Что касается спутниковых экспериментов, то они неоднократно обсуждались в литературе (см., например, [54, 55]), однако их результаты нам неизвестны.

Наряду с измерением сдвига частоты фотонов проводилось также измерение сдвига длины волны [56] (см. также рис. 38.2 в монографии [37], иллюстрирующий опыт [56], и обзоры [15–25]). В этом опыте с помощью дифракционной решетки измерялся (с точностью 5%) сдвиг линии натрия в спектре Солнца. Теория таких решеточных опытов обсуждается ниже (см. раздел 6). Сдвиг солнечной линии поглощения калия был измерен путем резонансного рассеяния солнечного света атомным пучком [57] (с точностью 6%).

3. Теория до 1916 г.: эйнштейновский лифт

Поскольку в этой статье обсуждается в основном гравитационное красное смещение в поле Земли, мы выберем систему отсчета, в которой Земля покоится (ее вращением мы пренебрегаем).

Хорошо известно, что потенциал определен с точностью до аддитивной константы. Рассматривая гравитационный потенциал $\phi(r)$ на некотором расстоянии r от центра Земли, удобно выбрать $\phi(\infty) = 0$. Тогда ϕ при любых конечных r отрицательно.

На высоте h вблизи поверхности Земли ($h = r - R \ll R$, где R — радиус Земли) можно использовать линейное приближение:

$$\delta\phi(h) = \phi(R+h) - \phi(R) = gh, \quad (2)$$

где g — обычное гравитационное ускорение. Отметим, что $\delta\phi(h) > 0$ при $h > 0$. Мы будем обсуждать красное смещение только в первом порядке по параметру gh/c^2 .

Линейное приближение в уравнении (2) справедливо для лабораторных и самолетных экспериментов. Очевидно, однако, что для высоко взлетающей ракеты ($h \simeq 10^4$ км) оно непригодно. В этом случае вместо $\delta\phi(h)$ надо использовать ньютоновский потенциал $\phi(r)$, что, однако, несущественно для дилеммы "часы или фотоны", являющейся предметом данной статьи.

Первые статьи Эйнштейна [1, 2] по гравитационному красному смещению содержали многие основные идеи, которые вошли в многочисленные тексты различных авторов (иногда без должного критического анализа). Он рассмотрел эффект Доплера в свободно падающей системе и нашел, что частота атома (часов) возрастает с ростом высоты (потенциала). Краеугольным камнем его рассуждений был сформулированный им принцип эквивалентности: локальная эквивалентность между поведением физических систем в гравитационном поле (2) и в соответственно ускоренной системе отсчета (лифте). В таком лифте наблюдатель не может обнаружить никаких проявлений гравитационного поля, какие бы локальные эксперименты он не проводил. (Заметим, что эксперименты с незаэкранированными электрическими зарядами не являются локальными, так как кулоновское поле таких зарядов простирается до бесконечности.)

Рассмотрим теперь из лифта, свободно падающего с ускорением g , испускание и поглощение фотона. Фотон с частотой ω испускается вверх атомом, покоящимся на поверхности Земли. На высоте h покоится такой же атом, который должен поглотить фотон. В свободно падающем лифте гравитационное поле не действует на фотон, и потому фотон сохраняет свою исходную частоту. Пусть в момент испускания фотона ($t = 0$) скорость лифта равнялась нулю. Тогда в момент $t = h/c$, когда фотон долетит до верхнего атома, скорость последнего относительно лифта будет равна $v = gh/c$ и направлена вверх: атом будет "убегать" от фотона. В результате частота фотона, воспринимаемая поглощающим атомом, будет уменьшена линейным эффектом Доплера, и фотон покраснеет:

$$\frac{\Delta\omega}{\omega} = -\frac{v}{c} = -\frac{gh}{c^2}. \quad (3)$$

Рассмотрим теперь другую постановку опыта. Пусть верхний атом (поглотитель) движется в лабораторной системе вниз с постоянной скоростью $v = gh/c$. Тогда его скорость в системе отсчета, связанной с лифтом будет равна нулю в момент поглощения, и он сможет поглотить фотон, испущенный с частотой ω резонансным образом в полном согласии с опытами [9–11]. Очевидно, что в системе отсчета, связанной со свободно падающим лифтом интерпретация красного смещения как потери фотоном энергии в процессе преодоления гравитационного притяжения, невозможна, поскольку в лифте гравитационного притяжения нет.

Не менее наглядна и интерпретация в лабораторной системе отсчета. В статическом поле частота фотона сохраняется. А в системе атома, движущегося навстречу фотону, она возрастает в силу эффекта Доплера и компенсирует "посинение" атома в гравитационном поле.

4. Общая теория относительности: метрика

До сих пор мы использовали лишь специальную теорию относительности (постоянство скорости света и эффект Доплера) и ньютонову гравитацию в приближении линейного потенциала. Как известно, последовательное релятивистское описание классической гравитации дает ОТО с ее искривленной пространственно-временной метрикой. В основе этой теории лежит метрический

тензор $g_{ik}(x)$, $i, k = 0, 1, 2, 3$, который при изменении координат преобразуется таким образом, что интервал ds между двумя событиями с координатами x^i и $x^i + dx^i$,

$$ds^2 = g_{ik}(x) dx^i dx^k, \quad (4)$$

остается неизменным. Полагая $dx^1 = dx^2 = dx^3 = 0$, получаем соотношение между интервалом собственного времени $d\tau = ds/c$ и интервалом мирового ¹ времени $dt = dx^0/c$ для покоящегося наблюдателя:

$$d\tau = \sqrt{g_{00}} dt. \quad (5)$$

В статическом случае интегрирование уравнения (5) дает

$$\tau = \sqrt{g_{00}} t, \quad (6)$$

где g_{00} в общем случае функция x , в то время как в (2) g_{00} зависит только от $x^3 = z = h$.

Собственное время τ отсчитывается любыми стандартными часами. Его можно также рассматривать и как координатное время в так называемой сопутствующей локально-инерциальной системе, т.е. локально-инерциальной системе, которая в данный момент в данной точке имеет нулевую скорость по отношению к лабораторной системе. (Представьте себе камень, подброшенный с земли и находящийся в верхней точке своей траектории.) Если имеется набор стандартных часов в различных точках, то их собственные времена τ по-разному связаны с мировым (лабораторным) временем t из-за того, что g_{00} зависит от x (см. (6)). Это объясняет самолетные эксперименты [13, 14]. (Заметим, что t часто называют "координатным временем".)

Слабое гравитационное поле можно описывать с помощью гравитационного потенциала ϕ , при этом g_{00} выражается через ϕ следующим образом:

$$g_{00} = 1 + \frac{2\phi}{c^2}. \quad (7)$$

Мы поясним смысл этого соотношения чуть позже (см. (8)–(10)). Согласно уравнениям (5), (7) часы идут медленнее в той лаборатории, которая глубже сидит в гравитационном потенциале.

Аналогично (5), энергия покоя тела в лабораторной системе, E_0^{lab} , и в сопутствующей локально-инерциальной системе, E_0^{loc} , связаны соотношением

$$E_0^{\text{lab}} = E_0^{\text{loc}} \sqrt{g_{00}} \quad (8)$$

(заметим, что $E_0^{\text{lab}} dt = E_0^{\text{loc}} d\tau$; такое соотношение имеет место, поскольку энергия E есть нулевая компонента ковариантного 4-вектора, в то время как $d\tau$ — нулевая компонента контравариантного 4-вектора).

Энергия покоя в локально-инерциальной системе такая же, как в специальной теории относительности (см., например, [58, 59] и [48] с. 246 3-го английского

издания),

$$E_0^{\text{loc}} = mc^2, \quad (9)$$

в то время как энергия покоя в лабораторной системе E_0^{lab} включает также потенциальную энергию тела в гравитационном поле. Заметим, что в (8) эта потенциальная энергия "спрятана" в g_{00} , что соответствует основному принципу общей теории относительности: гравитация входит только через метрику. Связь между метрикой и потенциалом — уравнение (7) — можно рассматривать как следствие уравнений (8), (9) и соотношения

$$E_0^{\text{lab}} = mc^2 + m\phi, \quad (10)$$

которое обобщает понятие энергии покоя свободной частицы на таковое в слабом гравитационном потенциале.

Теперь мы в состоянии объяснить красное смещение в лабораторной системе отсчета. Согласно (8) или (10), разность энергий атомных или ядерных уровней в этой системе, ε_{lab} , зависит от положения атома. Чем глубже атом сидит в гравитационном потенциале, тем меньше ε_{lab} . Для атома-поглотителя, который расположен на высоте h относительно тождественного атома, испускающего фотон, относительная разность энергий уровней равна

$$\frac{\Delta\varepsilon^{\text{lab}}}{\varepsilon^{\text{lab}}} = \frac{gh}{c^2}. \quad (11)$$

(Мы используем в (11) линейное приближение, как и в (2).) Можно сказать, что энергетические уровни у поглощающего атома чуть "синее", чем у испускающего атома. Уравнение (11), разумеется, не что иное, как способ описать разность хода двух атомных часов, расположенных на высоте h одни над другими. С другой стороны, энергия (частота) фотона сохраняется по мере того, как он распространяется в статическом гравитационном поле. Это можно увидеть, например, из волнового уравнения электромагнитного поля в присутствии статического гравитационного потенциала или из уравнения движения частицы (безмассовой или массивной) в статической метрике. Из всего сказанного ясно, что в лабораторной системе нет места интерпретации, согласно которой "фотон теряет свою энергию, совершая работу против гравитационного поля".

Наконец, можно обсудить эксперимент по красному смещению, используя последовательность локально-инерциальных систем, которые сопутствуют лабораторным часам (атомам) в тот момент, когда фотон их проходит. Как мы объяснили выше, в таких системах стандартные часы идут с одной и той же скоростью, энергия покоя атома равна его массе, умноженной на c^2 (см. (9)), и энергии атомных уровней такие же, как на бесконечности. С другой стороны, энергия фотона в лабораторной системе $E_\gamma^{\text{lab}} = \hbar\omega^{\text{lab}}$, и в сопутствующей локально-инерциальной системе E_γ^{loc} связаны следующим образом:

$$E_\gamma^{\text{lab}} = E_\gamma^{\text{loc}} \sqrt{g_{00}}. \quad (12)$$

Уравнение (12) можно получить из уравнения (8), если заметить, что фотон может быть поглощен массивным

¹ Напомним, что мировое время иногда называют лабораторным. Первое название отражает тот факт, что это время одно и то же для всего мира, второе — то, что его можно установить с помощью стандартных часов в лаборатории (см. текст после уравнения (1)). Многие авторы говорят о t , как о координатном времени.

телом, и рассмотреть увеличение энергии этого тела. Таким образом, поскольку E_γ^{lab} сохраняется, E_γ^{loc} уменьшается с высотой:

$$\frac{\omega^{\text{loc}}(h) - \omega^{\text{loc}}(0)}{\omega^{\text{loc}}(0)} = \frac{E_\gamma^{\text{loc}}(h) - E_\gamma^{\text{loc}}(0)}{E_\gamma^{\text{loc}}(0)} = -\frac{gh}{c^2}, \quad (13)$$

а это и есть наблюдаемое красное смещение фотона. Но E^{loc} уменьшается вовсе не потому, что фотон совершает работу против гравитационного поля. (Гравитационное поле отсутствует в локально инерциальной системе.) E_γ^{loc} изменяется, поскольку в данном описании приходится переходить из одной локально-инерциальной системы в другую (из сопутствующей лаборатории в момент испускания в сопутствующую лаборатории в момент поглощения).

5. Псевдовывод и псевдоинтерпретация гравитационного красного смещения

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

$$\frac{\Delta E_\gamma}{E_\gamma} = \frac{\Delta \omega}{\omega} = -\frac{gm_\gamma h}{m_\gamma c^2} = -\frac{gh}{c^2}. \quad (14)$$

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.

Некоторые читатели могут попытаться использовать авторитет Эйнштейна, чтобы защитить вышеприведенный псевдовывод. В статье 1911 г. [2] Эйнштейн выдвинул идею, что энергия не только источник инерции, но и источник гравитации. Он использовал эвристический аргумент: "Если есть масса, то есть энергия, и наоборот". Как он осознал позднее, это "наоборот" было не столь правильно, как прямое утверждение (фотон имеет энергию, в то время как его масса равна нулю). Отождествляя энергию и массу, он вычислил потерю энергии фотона, движущегося вертикально в гравитационном поле земли, как это обсуждалось выше. Пользуясь тем же эвристическим принципом, он также получил выражение для отклонения луча света Солнцем, которое было при этом в два раза меньше правильного. Впоследствии, в рамках ОТО, Эйнштейн восстановил эту двойку [3–5]. Правильная формула была подтверждена наблюдением.

6. Измерение длины волны

Выше мы обсуждали гравитационный красный сдвиг в терминах частоты фотона и частоты часов. Обсудим теперь тот же эффект в терминах длины волны фотона и периода дифракционной решетки. Рассмотрим две

решетки на различных высотах. Нижняя решетка при этом служит как монохроматор, т.е. как источник монохроматического света. Длина волны фотона $\lambda^{\text{lab}}(z)$ соответствует его частоте, в то время как период решетки в вертикальном (z) направлении $l^{\text{lab}}(z)$ соответствует частоте часов.

В то время, как энергия фотона, E^{lab} , сохраняется в статическом гравитационном поле, его импульс, p^{lab} , не сохраняется. Соотношение между этими величинами дается условием, что фотон остается безмассовым. Условие безмассовости в гравитационном поле имеет вид

$$g^{ij} p_i p_j = 0, \quad (15)$$

где g^{ij} , $i, j = 0, \dots, 3$ — контравариантные компоненты метрического тензора, p_j — компоненты 4-импульса, $p_0 = E^{\text{lab}}$, $p_3 = p^{\text{lab}} = 2\pi\hbar c/\lambda^{\text{lab}}(z)$ (для фотона, движущегося вдоль оси z). В нашем случае метрика g^{ij} может быть взята в диагональном виде, тогда, в частности, $g^{zz} = 1/g_{zz}$.

Из (15) можно легко найти, как $\lambda^{\text{lab}}(z)$ меняется с высотой:

$$\lambda^{\text{lab}}(z) = \sqrt{\frac{g^{zz}(z)}{g^{zz}(0)}} \sqrt{\frac{g^{00}(0)}{g^{00}(z)}} \lambda^{\text{lab}}(0). \quad (16)$$

С другой стороны, период решетки в направлении z , $l^{\text{lab}}(z)$, также меняется с высотой. Это просто обычное изменение масштаба в гравитационном поле, объясненное, например, в книге Л.Д. Ландау и Е.М. Лифшица (см. в [28] § 84):

$$l^{\text{lab}}(z) = \sqrt{-g^{zz}(z)} l^0, \quad (17)$$

где l^0 есть "собственный период" решетки в направлении z , аналог собственной частоты стандартных часов. Таким образом, период решетки $l^{\text{lab}}(z)$ зависит от z следующим образом:

$$l^{\text{lab}}(z) = \sqrt{\frac{g^{zz}(z)}{g^{zz}(0)}} l^{\text{lab}}(0). \quad (18)$$

Наконец, в "решеточной" версии эксперимента типа Паунда и др., при разнице высот h , измерялось бы двойное отношение $[\lambda(h)/l(h)]/[\lambda(0)/l(0)]$. Результат может быть представлен в виде

$$\frac{\Delta \lambda^{\text{lab}}}{\lambda^{\text{lab}}} - \frac{\Delta l^{\text{lab}}}{l^{\text{lab}}} = \sqrt{\frac{g^{00}(0)}{g^{00}(h)}} = \frac{gh}{c^2}, \quad (19)$$

где $\Delta \lambda^{\text{lab}}/\lambda^{\text{lab}} = [\lambda^{\text{lab}}(h) - \lambda^{\text{lab}}(0)]/\lambda^{\text{lab}}(0)$, аналогично для $\Delta l^{\text{lab}}/l^{\text{lab}}$. Заметим, что g^{zz} выпадает из результата. Этого следовало ожидать, поскольку существует свобода в выборе шкалы по оси z , и наблюдаемые величины не должны зависеть от этого выбора. Уравнение (19) аналогично уравнению, которое описывает результат эксперимента Паунда и др.:

$$\frac{\Delta \omega}{\omega} - \frac{\Delta \epsilon}{\epsilon} = \sqrt{\frac{g_{00}(0)}{g_{00}(h)}} = -\frac{gh}{c^2}, \quad (20)$$

где ω — частота фотона, а ϵ/\hbar — частота часов (см. (11)). Уравнение (20) требует некоторого пояснения. В лабора-

торной системе первый член в левой части равен нулю,

$$\frac{\Delta\omega^{\text{lab}}}{\omega^{\text{lab}}} = 0, \quad (21)$$

как обсуждалось в разделе 3; таким образом, весь вклад дает только второй член, который определяется уравнением (11).

Мы, однако, хотели бы подчеркнуть важное различие со случаем, когда измеряется частота фотона. В том случае можно независимо измерять разницу хода верхних и нижних часов ($\Delta\epsilon^{\text{lab}}/\epsilon^{\text{lab}}$ в уравнении (20)), и это как раз и делалось в самолетных экспериментах. В случае же решетки изменение масштаба, $\Delta l^{\text{lab}}/l^{\text{lab}}$ (в уравнении (19)), не может быть измерено независимо. Это важное различие происходит из того факта, что метрика не зависит от времени, но существенно зависит от z .

Следует осознать, что такой чисто лабораторный эксперимент с решетками не может быть выполнен на нынешнем уровне развития экспериментальной физики (вспомним важность эффекта Мёссбауэра в экспериментах Паунда и др.). Однако такой эксперимент возможен при измерении достаточно большого красного смещения, например, такого, как сдвиг линии натрия на Солнце [56]. Разумеется, в этом эксперименте исходная длина волны света фиксировалась не решеткой, а атомом на поверхности Солнца.

7. Заключение

Настоящая статья содержит мало оригинального материала: она, в основном, педагогическая. Поскольку гравитационный красный сдвиг является одним из краеугольных камней ОТО как с теоретической, так и с экспериментальной точки зрения, очень важно, чтобы его объясняли максимально просто, но при этом правильно. Такое объяснение основано на изменении хода часов в гравитационном потенциале. Альтернативное объяснение в терминах приписанной фотону массы — и соответствующей потенциальной энергии — неверно и ведет к путанице. Мы продемонстрировали его ошибочность и схематически обсудили эксперименты по красному смещению в рамках правильного подхода. Мы хотели бы отметить те эксперименты, в которых атомные часы поднимали на большую высоту, удерживали там достаточное время и затем сравнивали с их двойниками, которые никогда не покидали землю. Побывавшие на высоте часы уходили вперед по сравнению с их двойниками. Таким образом, "синее" смещение часов с высотой было установлено как абсолютный эффект. Отсюда непосредственно следует, что наивное объяснение гравитационного красного смещения в терминах притяжения фотона землей неверно.

Благодарности. Мы хотели бы поблагодарить В.В. Окорокова, который задал вопрос о совместимости экспериментов Паунда и др. с самолетными экспериментами. Мы также признательны С.И. Ближнему, Г. Венециано, А.Д. Долгову, А.Ю. Морозову, Н. Страуманну и К. Торну за интересные обсуждения. Мы хотим особо поблагодарить Е.Л. Шуккина за его помощь в существенном улучшении нашей библиографии и за то, что он настаивал на едином инвариантном описании гравитационного и космологического красного смеще-

ния, основанном на векторах Киллинга. Мы, однако, не смогли последовать его совету, так как хотели сосредоточить внимание читателей — не специалистов по ОТО на ошибочности широко распространенной наивной интерпретации гравитационного красного смещения. Один из нас (Л.Б. Окунь) хотел бы поблагодарить теоретический отдел ЦЕРНа, где была выполнена часть этой работы, за гостеприимство. Особо мы хотели бы выразить признательность Дж.А. Уиллеру за доброжелательную поддержку. Работа была частично поддержана грантами РФФИ 96-15-96578, 98-02-17372.

Список литературы

1. Einstein A *Jahrb. Radioaktivität Elektronik* **4** 411 (1907) [Русский перевод: Эйнштейн А *Собрание научных трудов* Т. 1 (М.: Наука, 1965) с. 110]
2. Einstein A *Ann. Phys. (Leipzig)* **35** 898 (1911) [Русский перевод: Эйнштейн А *Собрание научных трудов* Т. 1 (М.: Наука, 1965) с. 167]
3. Einstein A *Ann. Phys. (Leipzig)* **49** 769 (1916) § 22 [Русский перевод: Эйнштейн А *Собрание научных трудов* Т. 1 (М.: Наука, 1965) с. 502]
4. Einstein A *Über die Spezielle und Allgemeine Relativitäts Theorie (Gemeinverständlich)* (Braunschweig: Vieweg Verlag, 1920) [Translated into English: Einstein A *Relativity: The Special and General Theory* (New York: Crown Trade Paperbacks, 1961) p. 130] [Русский перевод: Эйнштейн А *Собрание научных трудов* Т. 1 (М.: Наука, 1965) с. 597]
5. Einstein A *The Meaning of Relativity* (New York: Princeton University Press, 1921) Eqn (106) [Русский перевод: Эйнштейн А *Собрание научных трудов* Т. 2 (М.: Наука, 1965) с. 5]
6. Pais A "Subtle is the Lord ..." *The Science and the Life of Albert Einstein* (Oxford University Press, 1982) Ch. 9 [Русский перевод: Пайс А *Научная деятельность и жизнь Альберта Эйнштейна* Гл. 9 (М.: Наука, 1989) с. 5]
7. Визгин В П *Релятивистская теория тяготения (источники и формирование)* (М.: Наука, 1981)
8. Corry L, Renn J, Stachel J *Science* **278** 1270 (1997)
9. Pound R, Rebka G *Phys. Rev. Lett.* **4** 337 (1960); **4** 275 (1960); **3** 439 (1959)
10. Паунд Р *УФН* **72** 673 (1960) [*Sov. Phys. Usp.* **3** 875 (1961)]
11. Pound R, Snider J *Phys. Rev. B* **140** 788 (1965); *Phys. Lett.* **13** 539 (1964)
12. Vessot R, Levine M *Gen. Rel. Grav.* **10** 181 (1979)
13. Haefele J, Keating R *Science* **117** 168, 170 (1972)
14. Alley C et al., in *Experimental Gravitation, Proc. of the Conf. at Pavia (September 1976)* (Ed. В Bertotti) (New York: Academic Press)
15. Коноплева Н П *УФН* **123** 537 (1977)
16. Руденко В Н *УФН* **126** 361 (1978)
17. Гинзбург В Л *О теории относительности* (М.: Наука, 1979) с. 157
18. Will C, in *General Relativity* (Eds S Hawking, W Israel) (Cambridge: Cambridge University Press, 1979) Table 2 [Русский перевод: Уилл К, в сб. *Общая теория относительности* (Под ред. С Хокинга, В Израэля) (М.: Мир, 1983) Табл. 2]
19. Will C *Theory and Experiment in Gravitational Physics* (Cambridge: Cambridge University Press, 1981) Sect. 2.4 [Русский перевод: Уилл К *Теория и эксперимент в гравитационной физике* (М.: Энергоатомиздат, 1986) с. 34]
20. Will C *Int. J. Mod. Phys. D* **1** 13 (1992)
21. Will C, Preprint WUGRAV-95-5; gr-qc/9504017 (1995)
22. Shapiro I, in *Astrofisica e Cosmologia, Gravitazione Quanti e Relatività* (Firenze: Giunti Barbera, 1979) Sect. 3 [Русский перевод: Шапиро И, в сб. *Астрофизика, кванты и теория относительности* (М.: Мир, 1982) с. 218]
23. Ashby N, Spilker J, in *The Global Positioning System: Theory and Applications* Vol. 1 (American Institute of Aeronautics and Astronautics Inc., 1995) Ch. 18

24. Taylor J "Astronomical and space experiments to test relativity", in *General Relativity and Gravitation* (Cambridge: Cambridge University Press, 1987) p. 214
25. Тонела М А "Частоты в общей теории относительности. Теоретические определения и экспериментальные проверки", в сб. *Эйнштейновский сборник* (М., 1967) с. 175
26. Pauli W *Theory of Relativity* (Oxford: Pergamon Press, 1967) Sect. 53 [Русский перевод: Паули В *Теория относительности* (М.: Наука, 1983) § 53]
27. Möller C *The Theory of Relativity* (Oxford: Clarendon Press, 1960) §§ 92, 93 [Русский перевод: Мёллер К *Теория относительности* (М.: Атомиздат, 1975) § 8.12]
28. Ландау Л, Лифшиц Е *Теория поля* (М.: Наука, 1988) § 88 [Translated into English: Landau L, Lifshitz E *The Classical Theory of Fields* (Oxford: Pergamon Press, 1962) § 89]
29. Weinberg S *Gravitation and Cosmology* (New York: Wiley, 1972) p. 79 [Русский перевод: Вейнберг С *Гравитация и космология: принципы и применение общей теории относительности* (М.: Мир, 1975) с. 95]
30. Schneider P, Ehlers J, Falco E E *Gravitational Lenses* (Berlin: Springer-Verlag, 1996) p. 93
31. Straumann N *General Relativity and Relativistic Astrophysics* (Berlin: Springer-Verlag, 1984) p. 96
32. Dirac P A M *General Theory of Relativity* (New York: Wiley, 1975) [Русский перевод: Дирак П А М *Общая теория относительности* (М.: Атомиздат, 1978)]
33. Берков А В, Кобзарев И Ю *Теория тяготения Эйнштейна. Общие принципы и экспериментальные следствия* (М.: МИФИ, 1989) с. 88
34. Ciufolini I, Wheeler J A *Gravitation and Inertia* (Princeton: Princeton University Press, 1995) p. 97
35. Feynman R *Lectures on Gravitation* (Ed. В Hatfield) (Redwood City, Calif.: Addison-Wesley Publ., 1995) Sect. 5.2
36. Weyl H *Raum, Zeit, Materie* 5te Auflage (Berlin: Verlag von Julius Springer, 1923) p.322; см. также 7-е изд., опубликованное J Ehlers (Springer-Verlag, 1988)
37. Misner C, Thorne K, Wheeler J A *Gravitation* (San Francisco: Freeman and Company, 1973) §§ 7.2–7.5, 25.4, 38.5 [Русский перевод: Мизнер Ч, Торн К, Уилер Дж *Гравитация* Т. 1–3 (М.: Мир, 1977) §§ 7.2–7.5, 25.4, 38.5]
38. Wald R W *General Relativity* (Chicago, London: University of Chicago Press, 1984) p. 137
39. Stephani H *General Relativity* 2nd ed. (Cambridge: Cambridge University Press, 1996) p. 117
40. Kenyon I R *General Relativity* (Oxford: Oxford University Press, 1996) p. 15
41. Born M *Einstein's Theory of Relativity* (New York: Dover Publications, 1962) Ch. VII, § 11 [Русский перевод: Борн М *Эйнштейновская теория относительности* (М.: Мир, 1972) с. 60, 342]
42. Sciama D W *The Physical Foundations of General Relativity* (New York: Doubleday and Co., 1969) Ch. 5 [Русский перевод: Сиама Д *Физические принципы общей теории относительности* (М.: Мир, 1971)]
43. Зельдович Я Б, Новиков И Д *Теория тяготения и эволюция звезд* (М.: Наука, 1971) Гл. 3, § 4 [Translated into English: Zeldovich Ya B, Novikov I D *Relativistic Astrophysics* Vol. 1 *Stars and Relativity* (Chicago, London: University of Chicago Press, 1971) p. 89
44. Брагинский В Б, Полнарев А Г *Удивительная гравитация (или как измеряют кривизну мира)* (М.: Наука, 1985) с. 29
45. *Физика космоса. Маленькая энциклопедия* (М.: Советская Энциклопедия, 1986) с. 331
46. *The New Encyclopedia Britannica* Vol. 20, 15th ed. (1994) p. 174
47. Wheeler J A *A Journey into Gravity and Spacetime* (New York: Scientific American Library, 1990) pp. 48, 166
48. Taylor E, Wheeler J A *Spacetime Physics* 3rd ed. (New York: Freeman and Co., 1992) pp. 258, 272 [Русский перевод 2-го издания: Тейлор Э Ф, Уилер Дж *Физика пространства–времени* (М.: Мир, 1971) с. 200, 201, 295, 296]
49. Layzer D *Constructing the Universe* Ch. 6 (New York: Scientific American Library, 1984) p. 210
50. Bowler M G *Gravitation and Relativity* (New York: Pergamon, 1976) [Русский перевод: Боулер М *Гравитация и относительность* (М.: Мир, 1979)]
51. Schwinger J *Einstein's Legacy* (New York: Scientific American Library, 1986) p. 141
52. Jain A K et al. *Phys. Rev. Lett.* **58** 1165 (1987)
53. Anandan J *Phys. Lett. A* **105** 280 (1984)
54. Гинзбург В Л *УФН* **59** 11 (1956); **63** 119 (1957)
55. Гинзбург В Л "Космические исследования и теория относительности", в сб. *Эйнштейновский сборник* (М., 1967) с. 80
56. Brault J W *Bull. Am. Phys. Soc.* **8** 28 (1963)
57. Snider J L *Phys. Rev. Lett.* **28** 853 (1972)
58. Окунь Л Б *УФН* **158** 511 (1989) [*Sov. Phys. Usp.* **32** 629 (1989)]
59. Okun L B *Phys. Today* (June 1989) p. 31; (May 1990) p. 115

Gravitation, photons, clocks

L.B. Okun, K.G. Selivanov

State Scientific Center of Russian Federation "Institute for Theoretical and Experimental Physics",
ul. B. Chermushkinskaya 25, 117259 Moscow, Russian Federation

E-mail: okun@heron.itep.ru, selivanov@heron.itep.ru

V.L. Telegdi

EP Division, CERN, CH-1211 Geneva 23, Switzerland

E-mail: valentine.telegdi@cern.ch

This paper is concerned with the gravitational redshift phenomenon, the decrease in the frequency of a photon moving away from a gravitating body (e.g., the Earth). Of the two current interpretations, one is that at high altitudes the frequency-measuring clocks — atoms or atomic nuclei — run faster (i.e., their characteristic frequencies are higher), while the photon frequency in a static gravitational field is independent of the altitude and so the photon only reddens relative to the clocks. The other approach is that the photon loses its energy when overcoming the attraction of the gravitational field. This view, which is especially widespread in popular science literature, ascribes such notions as a 'gravitational mass' and 'potential energy' to the photon. Unfortunately, also scientific papers and serious books on the general theory of relativity often employ the second interpretation as a 'graphic' illustration of mathematically immaculate results. We show here that this approach is misleading and only serves to create confusion in a simple subject.

PACS numbers: **01.40.-d**, **01.55. + b**, **04.20.-q**

Bibliography — 59 references

Received 19 May 1999