

# Гравитационное красное смещение

Материал из Википедии — свободной энциклопедии

**Гравитационное красное смещение** — проявление эффекта изменения частоты испущенного некоторым источником света (любых электромагнитных волн) по мере удаления от массивных объектов, таких как звёзды и чёрные дыры; оно наблюдается как сдвиг спектральных линий в излучении источников, близких к массивным телам, в красную область спектра. Свет, приходящий из областей с более слабым гравитационным полем, испытывает гравитационное синее смещение.

Эффекты смещения не ограничиваются исключительно электромагнитным излучением, а проявляются во всех периодических процессах — вдали от массивного объекта де-бройлевские частоты элементарных частиц (фотонов, электронов, протонов) выше, чем на его поверхности, и все процессы идут с большей скоростью. Данный эффект является одним из частных проявлений гравитационного замедления времени.

|  |
|--|
| <b>Содержание</b>  |
| <u>Определение</u>   |
| <u>История</u>   |
| <u>Важные моменты</u>  |
| <u>Экспериментальное подтверждение</u>   |
| <u>Применение</u>  |
| <u>Связь с замедлением времени</u>   |
| <u>Вывод на основе принципа эквивалентности</u>  |
| <u>Эвристический вывод гравитационного красного смещения из метрических свойств пространства-времени</u> |
| <u>Примечания</u>  |
| <u>Литература</u>  |
| <u>Ссылки</u>  |

## Определение

Гравитационное красное смещение принято обозначать символом *z<sub>G</sub>* :

$$z_G = \frac{\lambda - \lambda_0}{\lambda_0} = \frac{\nu_0 - \nu}{\nu} \text{ [1] } ,$$

где:

*ν* и *λ* — измеренная частота и длина волны фотона,  
*ν*<sub>0</sub> и *λ*<sub>0</sub> — лабораторная частота и длина волны фотона.

Гравитационное красное смещение было предсказано А. Эйнштейном (1911) при разработке общей теории относительности (ОТО), и в слабых гравитационных полях приблизительно равно

$$z_G = \frac{\varphi - \varphi_0}{c^2} = \frac{GM}{c^2 r} - \frac{GM}{c^2 R},$$

где:

$z_G$  — относительное смещение спектральных линий под влиянием гравитации,  
 $\varphi = -\frac{GM}{R}$  и  $\varphi_0 = -\frac{GM}{r}$  — значения гравитационного потенциала в точках наблюдения и излучения соответственно,  
 $G$  — гравитационная постоянная Ньютона;  
 $M$  — масса гравитирующего тела,  
 $c$  — скорость света,  
 $r$  — радиальное расстояние от центра масс тела до точки излучения,  
 $R$  — радиальное расстояние от центра масс тела до точки наблюдения.

Для света, излучаемого на расстоянии  $r$  от центра масс массивного тела и принимаемого на бесконечности ( $R = \infty$ ), гравитационное красное смещение приблизительно равно:

$$z_G = \frac{GM}{c^2 r}.$$

Поскольку первая космическая скорость на расстоянии  $r$  от тела массой  $M$  равна

$$V_I = \sqrt{\frac{GM}{r}}, \text{ то формула для красного смещения может принять следующий вид:}$$

$$z_G = \frac{V_I^2}{c^2}.$$

Универсальная формула для изменения частоты, приложимая в любой метрической теории гравитации в условиях применимости приближения геометрической оптики (эйконала):

$$\frac{\nu_r}{\nu_e} = \frac{s_e}{s_r} = \frac{\vec{u}_r \cdot \vec{k}_r}{\vec{u}_e \cdot \vec{k}_e},$$

где

$\nu_r$  и  $\nu_e$  — частоты принятого (recieved) и излучённого (emitted) сигнала, соответственно,  
 $s_r$  и  $s_e$  — собственные времена колебаний,  
 $u_r$  и  $u_e$  — 4-скорости приёмника и источника, а  
 $k_r$  и  $k_e$  представляют собой касательный светоподобный вектор (волновой 4-вектор сигнала), параллельно перенесённый вдоль траектории распространения сигнала<sup>[2]</sup>.

## История

Ослабление энергии света, излучаемого звёздами с сильной гравитацией, было предсказано Джоном Митчеллом ещё в 1783 году, на основе корпускулярного представления о свете, которого придерживался Исаак Ньютон. Влияние гравитации на свет исследовали в своё

время Пьер-Симон Лаплас и Иоганн фон Зольднер (1801 год) задолго до того, как Альберт Эйнштейн в статье 1911 года о свете и гравитации вывел свой вариант формулы для этого эффекта.

Филипп Ленард обвинил Эйнштейна в плагиате за то, что он не процитировал более раннюю работу Зольднера — однако, принимая во внимание, насколько эта тема была забыта и заброшена до того момента, как Эйнштейн вернул её к жизни, практически не подлежит сомнению, что Эйнштейн не был знаком с предыдущими работами. В любом случае, Эйнштейн пошёл намного дальше своих предшественников и показал, что ключевым следствием из гравитационного красного смещения является *гравитационное замедление времени*. Это была очень оригинальная и революционная идея. Эйнштейн впервые предположил, что потерю энергии фотоном при переходе в область с более высоким гравитационным потенциалом можно объяснить через разность хода времени в точках приёма и передачи сигнала. Энергия кванта электромагнитного излучения пропорциональна его частоте согласно формуле  $E = \hbar\omega$ , где  $\hbar$  — редуцированная постоянная Планка. Таким образом, если время для приёмника и передатчика течёт с разной скоростью, наблюдаемая частота излучения, а вместе с ней и энергия отдельных квантов, тоже будет различной для приёмника и передатчика. В 2010 году физикам удалось измерить эффект замедления в лабораторных условиях<sup>[3]</sup>.

## Важные моменты

- Для наблюдения гравитационного красного смещения приёмник должен находиться в месте с более высоким гравитационным потенциалом, чем источник.
- Существование гравитационного красного смещения подтверждается многочисленными экспериментами, которые год от года проводятся в различных университетах и лабораториях по всему миру.
- Гравитационное красное смещение предсказывается не только в теории относительности. Другие теории гравитации тоже предсказывают гравитационное красное смещение, хотя объяснения могут отличаться.
- Гравитационное красное смещение проявляется, но не ограничивается Шварцшильдовским решением уравнений общей теории относительности — при этом масса  $M$ , указанная ранее, может быть массой вращающегося или заряженного тела.

## Экспериментальное подтверждение

Эксперимент Паунда и Ребки 1960 года продемонстрировал существование гравитационного красного смещения спектральных линий. Эксперимент был осуществлён в башне Лаймановской лаборатории физики Гарвардского университета с использованием эффекта Мёссбауэра; источник и поглотитель гамма-квантов (ядра железа-57) находились друг от друга на расстоянии 22,5 м по вертикали в гравитационном поле Земли. Относительный сдвиг частоты в этих условиях составлял  $2,57 \cdot 10^{-15}$ .

## Применение

Гравитационное красное смещение активно применяется в астрофизике. Релятивистская поправка на гравитационное красное смещение вводится в бортовые часы спутников глобальных систем позиционирования GPS и ГЛОНАСС.

## Связь с замедлением времени

**Гравитационное замедление времени** — физическое явление, заключающееся в изменении темпа хода времени (и, соответственно, часов) в гравитационном потенциале. Основная сложность в восприятии этого обстоятельства состоит в том, что в теориях гравитации временная координата обычно не совпадает с физическим временем, измеряемым стандартными атомными часами.

При использовании формул общей теории относительности для расчёта изменения энергии и частоты сигнала (при условии, что мы пренебрегаем эффектами зависимости от траектории, вызванными, например, увлечением пространства вокруг вращающейся чёрной дыры) гравитационное красное смещение в точности обратно величине фиолетового смещения. Таким образом, наблюдаемое изменение частоты соответствует относительной разности скорости хода часов в точках приёма и передачи.

В то время как гравитационное красное смещение измеряет наблюдаемый эффект, гравитационное замедление времени говорит, что можно заключить *на основании* результатов наблюдения. То есть, говоря иными словами: измеряя единое красное/фиолетовое смещение для любого способа посылки сигналов «оттуда»—"сюда", мы приходим к выводу, что одинаковые с нашими часы **там** идут «как-то не так», быстрее или медленнее.

Для *статического* гравитационного поля, гравитационное красное смещение можно полностью объяснить разностью темпа хода времени в точках с различным гравитационным потенциалом. Процитируем Вольфганга Паули: «В случае статического гравитационного поля всегда можно так выбрать временную координату, чтобы величины  $g_{ik}$  от неё не зависели. Тогда число волн светового луча между двумя точками P1 и P2 также будет независимым от времени и, следовательно, частота света в луче, измеренная в заданной шкале времени, будет одинаковой в P1 и P2 и, таким образом, независимой от места наблюдения.»

Однако согласно современной метрологии время определяют локально для произвольной мировой линии наблюдателя (в частном случае — для одной и той же точки пространства с течением времени) через тождественные атомные часы (см. определение секунды). При таком определении времени темп хода часов строго задан и будет различаться от линии к линии (от точки к точке), в результате чего имеющаяся разность частот, например, в опыте Паунда — Ребки, или красное смещение спектральных линий, излучённых с поверхности Солнца или нейтронных звёзд, находит своё объяснение в разности темпа хода физического времени (измеряемого стандартными атомными часами) между точками излучения и приёма. В самом деле, так как скорость света считается постоянной величиной, то длина волны жёстко связана с частотой  $\lambda = cT = c/\nu$ , поэтому изменение длины волны равносильно изменению частоты и обратно.

Если в некоторой точке излучаются, например, сферические вспышки света, то в любом месте в области с гравитационным полем координатные «временные» интервалы между вспышками можно сделать одинаковыми — путём соответствующего выбора *временной координаты*. Реальное же изменение *измеряемого* временного интервала определяется разностью темпа хода стандартных тождественных часов между мировыми линиями излучения и приёма. При этом в статическом случае абсолютно неважно, чем конкретно

ведётся передача сигналов: световыми вспышками, горбами электромагнитных волн, акустическими сигналами, пулями или бандеролями по почте — все способы передачи будут испытывать абсолютно одинаковое «красное/фиолетовое смещение»<sup>[4]</sup>.

В нестационарном же случае вообще точным и инвариантным образом отделить «гравитационное» смещение от «доплеровского» невозможно, как например, в случае расширения Вселенной. Эти эффекты — одной природы, и описываются общей теорией относительности единым образом. Некоторое усложнение явления красного смещения для электромагнитного излучения возникает при учёте нетривиального распространения излучения в гравитационном поле (эффекты динамического изменения геометрии, отклонений от геометрической оптики, существования гравитационного линзирования, гравимагнетизма, увлечения пространства и так далее, которые делают величину смещения зависящей от траектории распространения света), но эти тонкости не должны затенять исходной простой идеи: скорость хода часов зависит от их положения в пространстве и времени.

В ньютоновской механике объяснение гравитационного красного смещения принципиально возможно — опять-таки через введение влияния гравитационного потенциала на ход часов, но это очень сложно и непрозрачно с концептуальной точки зрения. Распространённый способ выведения красного смещения как перехода кинетической энергии света  $E = \hbar\omega$  в потенциальную в самой основе апеллирует к теории относительности и не может рассматриваться как правильный<sup>[5]</sup>. В эйнштейновской теории гравитации красное смещение объясняется самим гравитационным потенциалом: это не что иное, как проявление геометрии пространства-времени, связанной с относительностью темпа хода физического времени.

## Вывод на основе принципа эквивалентности

Гравитационное красное смещение является следствием принципа эквивалентности.

Рассмотрим сначала распространение фотона в однородном гравитационном поле вдоль линий напряжённости поля из точки с меньшим потенциалом гравитационного поля в точку с большим потенциалом. Согласно принципу эквивалентности, наличие гравитационного поля напряжённости  $\mathbf{g}$  в инерциальной системе отсчёта эквивалентно ускоренному движению системы отсчёта с ускорением  $-\mathbf{g}$  в отсутствие гравитационного поля. То есть в данном опыте можно заменить наличие поле тяготения предположением о движении источника и приёмника с ускорением  $\mathbf{a} = -\mathbf{g}$ , которое направлено вверх. Если считать, что излучение волны с частотой  $\nu$  происходит в тот момент, когда скорость источника равна нулю, то спустя время  $\Delta t = \frac{h}{c}$ , когда волна достигнет приёмника, его

скорость будет равна  $v = g\Delta t = \frac{gh}{c}$ . При вычислении относительной скорости  $v$  в формуле

эффекта Доплера  $\frac{\Delta\nu}{\nu} = \frac{v}{c}$  скорость источника следует брать в момент излучения, а скорость приёмника — в момент прихода волны. Поэтому использование этой формулы показывает, что вследствие эффекта Доплера будет наблюдаться сдвиг частоты, равный

$$\frac{\Delta\nu}{\nu} = -\frac{gh}{c^2}.$$

Обобщение этой формулы для случая неоднородного гравитационного поля имеет вид

$$\frac{\Delta\nu}{\nu} = - \int_{r_0}^{r_1} \frac{g(x)}{c^2} dx.$$

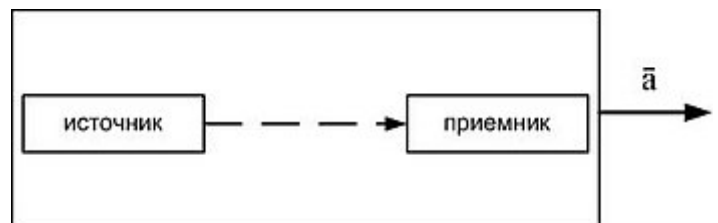
Согласно закону всемирного тяготения Ньютона  $g(x) = G \frac{M}{x^2}$ . Таким образом

$$\frac{\Delta\nu}{\nu} = - \int_{r_0}^{r_1} \frac{G \frac{M}{x^2}}{c^2} dx = - \frac{GM}{c^2} \left( \frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_0} \right).$$

## Эвристический вывод гравитационного красного смещения из метрических свойств пространства-времени

Гравитационное красное смещение можно получить, используя закон сложения скоростей<sup>[6]</sup>.

Рассмотрим установку, состоящую из источника сигнала (к примеру, пуль) и приёмника. Расстояние между ними, измеренное в неподвижной системе отсчёта, обозначим  $l$ . При этом установка движется в пустоте с постоянным ускорением  $\vec{a}$  относительно неподвижной системы отсчёта, что, согласно принципу эквивалентности, равнозначно помещению установки в однородное гравитационное поле.



Ускоренная лаборатория, состоящая из источника пуль и приёмника

Далее, поместим в приёмник и источник одинаковые часы  $\tau_{out} = \tau_{in}$ , и попросим наблюдателя, который находится в точке «приёмника», сравнить их ход. Своё собственное время  $\tau_{in}$  он измерит непосредственно, а чтобы измерить ход времени в точке «источника», он будет измерять частоту приходящего сигнала. Скорость пули относительно «источника» обозначим как  $w$ , скорость самого источника в момент посылки сигнала  $v$ . Тогда, пользуясь законом сложения скоростей, получаем скорость пули  $u$  в неподвижной системе:

$$u = \frac{w + v}{1 + wv/c^2} = \frac{c^2(w + v)}{c^2 + wv}. \quad (1)$$

На преодоление расстояния  $l$  сигнал затратит время  $t$ , а приёмник за это время сместится на  $vt + at^2/2$ . Отсюда получаем уравнение:

$$ut = l + vt + at^2/2,$$

решив которое относительно  $t$ , получим:

$$t = \frac{u - v}{a} \cdot \left[ 1 \pm \left( 1 - \frac{2al}{(u - v)^2} \right)^{-1/2} \right]$$

или приближённо<sup>[7]</sup>:

$$t = \frac{u-v}{a} \cdot \left[ 1 \pm \left( 1 + \frac{la}{(u-v)^2} + \dots \right) \right].$$

Таким образом, приходим к двум решениям:

$$t_1 = -\frac{l}{u-v}, \quad t_2 = 2\frac{u-v}{a} + \frac{l}{u-v}.$$

Очевидно, что первое решение в данном случае — лишнее.

Подставим  $u$  из формулы (1) в формулу для  $t$  и при этом ограничимся  $w$  и  $v$  столь малыми, чтобы мы могли отбросить малые члены порядка  $w^2$  и  $v^2$  :

$$t = \frac{l(c^2 + wv)}{wc^2} = l \left( \frac{1}{w} + \frac{v}{c^2} \right).$$

Скорость установки за время  $\tau$ , разделяющее посылку двух последовательных сигналов<sup>[8]</sup>, увеличится на  $a\tau$  и станет равной  $v + a\tau$ . Поэтому разница во времени прохождения двух последовательных сигналов составит:

$$\Delta t = \Delta \tau = l \left( \frac{1}{w} + \frac{v + a\tau_0}{c^2} \right) - l \left( \frac{1}{w} + \frac{v}{c^2} \right) = \frac{al\tau_0}{c^2},$$

и в итоге

$$\frac{\Delta \tau}{\tau_0} = \frac{al}{c^2} \iff \tau_1 = \tau_0 \left( 1 + \frac{al}{c^2} \right).$$

Изменениями  $l$  и  $\tau$  (функции скорости) мы пренебрегли, как величинами соответствующего порядка малости.

*Итак, часы идут медленнее, если они установлены вблизи весоных масс. Отсюда следует, что спектральные линии света, попадающего к нам с поверхности больших звёзд, должны сместиться к красному концу спектра», писал [9].*

А. Эйнштейн

Для частоты получим:

$$\frac{\Delta \nu}{\nu_0} = \frac{al}{c^2} \iff \nu_1 = \nu_0 \left( 1 - \frac{al}{c^2} \right).$$

Обозначив разность гравитационных потенциалов на поверхности звезды и поверхности Земли как  $\Delta \Phi = -al$ , получим:

$$\tau_1 = \tau_0 \left( 1 - \frac{\Delta \Phi}{c^2} \right); \quad \nu_1 = \nu_0 \left( 1 + \frac{\Delta \Phi}{c^2} \right).$$

Эти выражения были выведены Эйнштейном в 1907 году для случая  $\Delta\Phi/c^2 \ll 1$ <sup>[10]</sup>.

## Примечания

- Красное смещение (<http://www.astronet.ru/db/msg/1177975>). Дата обращения: 16 января 2015. Архивировано (<https://web.archive.org/web/20150116082544/http://www.astronet.ru/db/msg/1177975>) 16 января 2015 года.
- Мицкевич, Н. В. Системы отсчета: описание и интерпретация эффектов релятивистской физики / Н. В. Мицкевич // Итоги науки и техники / Гл. ред. Б. Б. Кадомцев. Научный редактор проф. В. Н. Мельников. — М.: ВИНТИ, 1991. — Т. 3: Сер. Классическая теория поля и теория гравитации. — С. 108—165.
- [1] (<http://www.membrana.ru/lenta/?10807>) Физики измерили замедление времени в лаборатории
- Мария-Антуанетта Тонела. «Частоты в общей теории относительности. Теоретические определения и экспериментальные проверки.» // Эйнштейновский сборник 1967 / Отв. ред. И. Е. Тамм и Г. И. Наан. — М.: Наука, 1967. — С. 175—214.
- Окунь Л. Б., Селиванов К. Г., Телегди В. Л. «Гравитация, фотоны, часы». УФН, 1999, том 169, № 10, с. 1141—1147.
- Эйнштейновский сборник 1967 (М.: Мир, 1967) Баранов Б. Г. Гравитационное красное смещение, с. 215
- Напомним:  $(1 + x)^b = 1 + bx + \dots$
- Так как  $w^2$  и  $v^2$  по условию малы, то время  $\tau$  отличается от времени в неподвижной системе отсчёта  $t$  на величины второго порядка малости.
- Эйнштейн А. Собрание научных трудов, т. 1 (М.: Наука, 1965, с. 502).
- Эйнштейн А. Собрание научных трудов, т. 1 (М.: Наука, 1965, с. 110).

## Литература

- Окунь Л. Б., Селиванов К. Г., Телегди В. Л. Гравитация, фотоны, часы // УФН, 1999, том 169, № 10, с. 1141—1147. (<https://ufn.ru/ru/articles/1999/10/d/>)
- Паунд Р. В. О весе фотонов // УФН, 1960, № 12, том 73, с. 673—683. ([http://www.ufn.ru/ufn/60/ufn60\\_12/Russian/r6012b.pdf](http://www.ufn.ru/ufn/60/ufn60_12/Russian/r6012b.pdf))
- Laplace, Pierre-Simon*. The system of the world (English translation 1809) (<https://books.google.com/?id=f7Kv2iFUNJoC>) (англ.). — London: Richard Phillips, 1796. — Vol. 2. — P. 366—368.
- Misner, Charles W.; Thorne, Kip S.; Wheeler, John Archibald*. Gravitation. — San Francisco: W. H. Freeman, 1973. — ISBN 978-0-7167-0344-0.

## Ссылки

- Michell, John*. On the means of discovering the distance, magnitude etc. of the fixed stars (англ.) // *Philosophical Transactions of the Royal Society* : journal. — 1784. — Vol. 74. — P. 35—57. — doi:10.1098/rstl.1784.0008 (<https://dx.doi.org/10.1098%2Frstl.1784.0008>). — .
- Soldner, Johann Georg von*. On the deflection of a light ray from its rectilinear motion, by the attraction of a celestial body at which it nearly passes by (англ.) // *Berliner Astronomisches Jahrbuch* : journal. — 1804. — P. 161—172.
- Pound, R.V.; Rebka, G.A.; Jr*. Gravitational Red-Shift in Nuclear Resonance (англ.) // *Phys. Rev. Lett.*. — 1959. — Vol. 3, no. 9. — P. 439—441. — doi:10.1103/physrevlett.3.439 (<https://dx.doi.org/10.1103%2Fphysrevlett.3.439>). — .
- Pound, R.V.; Snider, J.L*. Effect of gravity on gamma radiation (англ.) // *Physical Review B*. — 1965. — Vol. 140, no. 3B. — P. 788—803. — doi:10.1103/physrev.140.b788 (<https://dx.doi.org/10.1103%2Fphysrev.140.b788>). — .



- *Pound, R.V. Weighing Photons"* (2000) (англ.) // *Classical and Quantum Gravity*. — 2000. — Vol. 17, no. 12. — P. 2303—2311. — doi:10.1088/0264-9381/17/12/301 (<https://dx.doi.org/10.1088/0264-9381/17/12/301>). — .
- 

Источник — [https://ru.wikipedia.org/w/index.php?title=Гравитационное\\_красное\\_смещение&oldid=125986812](https://ru.wikipedia.org/w/index.php?title=Гравитационное_красное_смещение&oldid=125986812)

---

**Эта страница в последний раз была отредактирована 10 октября 2022 в 18:09.**

Текст доступен по лицензии Creative Commons Attribution-ShareAlike; в отдельных случаях могут действовать дополнительные условия.

Wikipedia® — зарегистрированный товарный знак некоммерческой организации Wikimedia Foundation, Inc.