

ВИКИПЕДИЯ

Эксперимент Паунда и Ребки

Материал из Википедии — свободной энциклопедии

Экспериме́нт Па́унда и Ре́бки — проверка замедления хода времени в поле тяготения (экспериментальное подтверждение существования гравитационного красного смещения), предложенная в 1959^[1] и осуществлённая в 1959—1960 годах^[2] сотрудником Гарвардского университета Робертом Паундом и его аспирантом Гленом Ребкой в лабораторном контролируемом эксперименте. Полученное значение в пределах ошибок эксперимента (10 %) блестяще подтвердило принцип эквивалентности и основанную на нём общую теорию относительности Эйнштейна. Позже (в 1964 году) в подобном эксперименте Паунд и Снайдер получили совпадение измеренного и теоретического значений с точностью около 1 %^[3]. В 1980 году точность проверки релятивистских предсказаний гравитационного красного смещения была улучшена до 0,007 % в экспериментах Gravity Probe A с водородным мазером в космосе^[4].



Джефферсоновская физическая лаборатория в Гарвардском университете. Эксперимент был выполнен в башне левого крыла, которая частично скрыта чердаком, надстроенным позднее

Содержание

Предпосылки эксперимента

Описание эксперимента

Дальнейшие эксперименты

Значение в истории науки

Примечания

Литература

Предпосылки эксперимента

Ещё в 1916 году Эйнштейн предложил^[5] три варианта экспериментальной проверки своей общей теории относительности (они известны как классические тесты ОТО):

- аномальная прецессия перигелия Меркурия;
- отклонение света Солнцем;
- гравитационное красное смещение (или замедление хода часов в гравитационном поле).

Первый эффект был обнаружен ещё в 1859 году и оставался необъяснённым до появления ОТО. Второй эффект был подтверждён наблюдениями Эддингтона во время солнечного затмения в 1919 году^[6], которые стали решающими для признания теории Эйнштейна не только в сообществе физиков, но и в массовой культуре. Однако третий классический тест

ввиду крайней малости ожидаемого эффекта замедления времени в слабом гравитационном поле Земли (и даже Солнца) не мог быть надёжно проверен до тех пор, пока экспериментальная техника не достигла должной чувствительности. Ранние попытки включали в себя измерения красного смещения спектральных линий Солнца и белых карликов, однако потому, что смещение типично значительно меньше полной ширины таких линий и может вызываться и другими причинами (в случае Солнца основной причиной является крупномасштабная конвекция в солнечных ячееках), интерпретации экспериментов оставались противоречивыми^[7]. В результате этот аспект теории дождался надёжной проверки более сорока лет.

Описание эксперимента

Для определения разности темпа хода времени в разнесённых по высоте точках Паунд и Ребка использовали измерения частоты фотонов в двух точках вдоль их траектории: в точке испускания и в точке поглощения. Разность в измеренной частоте в верхней и нижней точках указывает на разность хода времени в этих точках. Гамма-квант с энергией 14,4 кэВ, испускаемый возбуждённым ядром ⁵⁷Fe в переходе на основное состояние, проходил расстояние $H = 22,5$ м по вертикали в поле тяготения Земли и резонансно поглощался мишенью из того же материала. При точном совпадении частот фотона в точке испускания и поглощения и отсутствии отдачи испускающего и поглощающего ядер вероятность поглощения максимальна (источник и поглотитель настроены в резонанс); при расхождении частоты фотона и поглотителя вероятность поглощения уменьшается, в зависимости от разности частот и «остроты» резонанса (то есть ширины линии поглощения). Эта схема эквивалентна радиопередатчику и радиоприёмнику, настроенным на одну частоту; согласно ОТО, когда приёмник переносится вниз, в точку с большим гравитационным потенциалом, частота, на которую он настроен, уменьшается с точки зрения наблюдателя, оставшегося возле передатчика, как замедляются и любые другие процессы, и в результате приёмник и передатчик выходят из резонанса — электромагнитное излучение передатчика перестаёт поглощаться приёмником. Однако эффект в слабом гравитационном поле Земли очень мал, поэтому его обнаружение наталкивается на существенные экспериментальные трудности. В первую очередь, даже при излучении и поглощении в одной точке (то есть даже в отсутствие гравитационного красного смещения) будет наблюдаться существенный доплеровский сдвиг частот между излучающим и поглощающим атомами ввиду того, что оба атома получают импульс отдачи от фотона. Этот доплеровский сдвиг отдачи для одиночного атома железа-57 на пять порядков больше ожидаемого эффекта. Поэтому в эксперименте использовался открытый всего за два года до его проведения эффект Мёссбауэра, который обеспечивает поглощение импульса отдачи при испускании и поглощении фотона не отдельным ядром атома, а всем кристаллом (точнее, его небольшой, но уже макроскопической частью), так что энергия фотона при излучении практически не тратится на отдачу.

Для вычисления изменения частоты электромагнитного излучения, испущенного в гравитационном поле, используется принцип эквивалентности. Наличие однородного гравитационного поля с напряжённостью (ускорением свободного падения) g в инерциальной системе отсчёта эквивалентно ускоренному движению системы отсчёта с ускорением $-g$ в отсутствие гравитационного поля. То есть в данном опыте можно заменить наличие поле тяготения предположением о движении источника и приёмника с ускорением $a = -g$, которое направлено вверх. Если считать, что излучение волны с частотой ν происходит в тот момент, когда скорость источника равна нулю, то спустя время $\delta t = H/c$, когда волна достигнет приёмника, его скорость будет равна $v = g\delta t = gH/c$ (где c — скорость света). 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

$$\frac{\delta\nu}{\nu} = -\frac{gH}{c^2}.$$

Если гравитационное поле неоднородно, то при прохождении светом малого участка $d\vec{r}$, на котором напряженность гравитационного поля \vec{g} можно считать однородным,

$$\frac{\delta\nu}{\nu} = -\frac{\vec{g}d\vec{r}}{c^2}.$$

При прохождении светом конечного пути в неоднородном гравитационном поле это равенство необходимо проинтегрировать:

$$\ln \frac{\nu_2}{\nu_1} = -\frac{1}{c^2} \int \vec{g}d\vec{r} = -\frac{\varphi_2 - \varphi_1}{c^2}.$$

где φ_2, φ_1 — гравитационный потенциал в точках конца и начала пути света. В случае малой разности гравитационных потенциалов $|\varphi_2 - \varphi_1| \ll c^2$:

$$\frac{\nu_2 - \nu_1}{\nu_1} = -\frac{\varphi_2 - \varphi_1}{c^2} \text{ [8]}$$

С другой точки зрения, изменение частоты электромагнитного излучения в гравитационном поле вызвано замедлением собственного времени^[9]. Промежуток собственного времени между двумя событиями в одной и той же точке пространства:

$$\tau = \frac{1}{c} \int \sqrt{g_{00}} dx^0,$$

где g_{00} — компонента метрического тензора, c — скорость света.^[10] В постоянном гравитационном поле частота света, измеренная в координатном времени, не изменяется вдоль светового луча, а измеряемая опытным путём равна $\nu = \frac{1}{\tau_0}$ (τ_0 — период колебаний, измеряемый в собственном времени τ) и зависит от собственного времени. Отношение частот ν_2 и ν_1 в разных точках равно $\frac{\nu_2}{\nu_1} = \sqrt{\frac{g_{00}(1)}{g_{00}(2)}}$.

В слабом гравитационном поле $g_{00} = 1 + \frac{2\varphi}{c^2}$ и с точностью до членов $\frac{\varphi}{c^2}$:^[11]

$$\frac{\nu_2 - \nu_1}{\nu_1} = -\frac{\varphi_2 - \varphi_1}{c^2}$$

Таким образом, в условиях эксперимента относительное изменение частоты света должно составлять

$$\frac{\delta\nu}{\nu} = -\frac{gH}{c^2} = -2,46 \times 10^{-15},$$

где g — ускорение свободного падения,

$H = 22,5$ м — расстояние (высота излучателя относительно поглотителя)^[12].

Абсолютный сдвиг энергии для гамма-квантов железа-57 с энергией $E = 14,4$ кэВ составлял при этом всего $3,54 \cdot 10^{-11}$ эВ^[12].

Точности имеющейся у Паунда и Ребки аппаратуры не хватало для таких измерений. Даже естественная ширина самого γ распадающегося уровня $\Gamma = \hbar/\tau = 4,6 \cdot 10^{-9}$ эВ, обусловленная его конечным временем жизни ($\tau = 142$ нс)^[13], была на два порядка больше, чем ожидавшийся эффект. Тогда исследователи придумали остроумный приём для повышения точности измерений сдвига частоты: они догадались двигать источник фотонов вверх и вниз со скоростью $v_0 \cos \omega t$, где ω было некоторой постоянной частотой, несколько десятков герц, а v_0 было подобрано так, чтобы доплеровский сдвиг частоты от него намного превышал предполагаемый гравитационный сдвиг частот. Гравитационное красное смещение, вызванное различием гравитационного замедления времени в точках излучения и приёма, добавляется к доплеровскому смещению и гравитационный относительный сдвиг частоты можно оценить по изменениям легко регистрируемого доплеровского смещения^[14]. Источником была железная фольга толщиной 15 мкм с внедрённым в неё кобальтом-57 активностью около 0,4 Ки, при распаде которого путём электронного захвата (с периодом полураспада 272 дня) возникало железо-57 в возбуждённом состоянии с энергией 14,4 кэВ^[12]. В эксперименте источник был помещён на подвижный элемент пьезодинамика, на который подавался синусоидальный сигнал звуковой частоты 50 Гц. Данные снимались в течение каждой четверти периода (5 мс) вокруг момента максимальной скорости источника. Кроме того, источник вместе с пьезодинамиком был помещён на гидравлическом поршне, который обеспечивал поступательное равномерное перемещение источника к поглотителю (или от него) со скоростью около $6 \cdot 10^{-4}$ см/с; это устройство позволяло по известному сигналу (доплеровскому красному или синему смещению от постоянной скорости источника) откалибровать полученный спектр^[12]. Между источником и поглотителем располагалась труба диаметром 40 см из пластиковой плёнки, наполненная гелием под атмосферным давлением, для устранения поглощения гамма-квантов в воздухе. Железо-57 как мёссбауэровский изотоп было выбрано благодаря тому, что с ним можно работать при комнатной температуре (в отличие, например, от цинка-67, с которым приходилось работать при температуре жидкого гелия), а также благодаря большому периоду полураспада источника (^{57}Co) и высокой интенсивности гамма-линии^[1].

Детектором гамма-квантов служила сборка из семи сцинтилляторов NaI толщиной 7 мм, установленных на фотоэлектронных умножителях. На сцинтилляторы сверху устанавливались поглотители — семь бериллиевых дисков толщиной 1 см, на которые гальванически была нанесена плёнка из железа, обогащённого железом-57 до 32 %^{[1][12]}.

Вначале Паунд и Ребка получили значение относительного сдвига частоты гамма-квантов в 4 раза больше ожидаемого. Это различие объяснялось разностью температур источника и мишени, что было указано Джозефсоном. Тепловое движение атома-источника (как и атома-поглотителя) за счёт классического эффекта Доплера в среднем не сдвигает линии излучения и поглощения, приводя лишь к их уширению, поскольку в классический доплеровский сдвиг даёт вклад лишь проекция скорости излучателя (приёмника) на направление распространения фотона, а эта проекция в среднем равна нулю. Однако спецрелятивистское замедление времени (релятивистский эффект Доплера) зависит не от

направления скорости источника (приёмника), а лишь от её абсолютной величины, поэтому в среднем не обнуляется. В результате теплового движения релятивистский эффект Доплера при разности температур источника и поглотителя в 1 °C даёт относительный сдвиг

частот $\frac{\langle v^2 \rangle}{2c^2}$ около $2,20 \cdot 10^{-15}$, почти равный ожидаемому общерелятивистскому эффекту.

Исследователям пришлось измерять эти температуры и учитывать их разность. Лишь после этого был получен окончательный результат для гравитационного смещения частоты:

$\frac{\delta\nu}{\nu} = -(2,57 \pm 0,26) \times 10^{-15}$, в пределах ошибок измерения совпадавший с теоретическим предсказанием ОТО^[1].

Дальнейшие эксперименты

В 1964 году Паунд (совместно со Снайдером) улучшил точность эксперимента на порядок, получив совпадение измеренного и теоретического значений с точностью около 1 %^[3].

В 1976 году группой физиков Смитсоновского института под руководством Роберта Вессо^[4] был проведён эксперимент Gravity Probe A по измерению гравитационного смещения частот между двумя водородными мазерами, одним наземным и другим, установленным на суборбитальной ракете Scout, запущенной на высоту 10 273 км. Предварительная обработка результатов дала погрешность 0,007 % от теоретического значения^[4]. На 2014 год этот эксперимент пока остаётся наиболее точным среди экспериментов, определяющих разность хода часов в точках с различными гравитационными потенциалами (то есть гравитационное красное смещение)^[15].

Среди чисто лабораторных экспериментов по измерению гравитационного красного смещения можно отметить работу физиков Национального института стандартов и технологии (США) 2010 года, в которой этот эффект был с помощью атомных часов измерен между точками, разделёнными по вертикали расстоянием менее метра^[16].

В настоящее время гравитационное замедление времени рутинно учитывается при определении международной шкалы атомного времени — показания отдельных атомных часов, составляющих пул хранителей времени этой шкалы и находящихся в лабораториях на разной высоте над уровнем моря, приводятся к поверхности геоида. Поправка на гравитационное замедление времени (а также на релятивистский эффект Доплера, который в данном случае имеет обратный знак) вводится в бортовые часы навигационных спутников GPS и GLONASS. Так, на высоте спутников GPS (20 180 км) поправка на гравитационное красное смещение относительно поверхности Земли составляет −45 мкс в сутки (знак минус означает, что часы без поправки на орбите идут быстрее, чем на Земле)^[17].

Значение в истории науки

Стивен Вайнберг отмечает, что эксперимент Паунда и Ребки имеет особое значение, как независимая от экспериментов Этвеша и Дикке проверка принципа эквивалентности. Кроме того, эксперимент Паунда и Ребки является первым проведённым в земных условиях экспериментом по изучению влияния гравитации на электромагнитные явления^[14].

Примечания

- Pound R. V., Rebka Jr. G. A. Gravitational Red-Shift in Nuclear Resonance* (англ.) // Physical Review Letters : journal. — 1959. — 1 November (vol. 3, no. 9). — P. 439—441. — doi:10.1103/PhysRevLett.3.439 (<https://dx.doi.org/10.1103%2FPhysRevLett.3.439>). — .

2. *Pound R. V., Rebka Jr. G. A.* Apparent weight of photons (англ.) // *Physical Review Letters* : journal. — 1960. — 1 April (vol. 4, no. 7). — P. 337—341. — doi:10.1103/PhysRevLett.4.337 (<https://dx.doi.org/10.1103%2FPhysRevLett.4.337>). — .
3. *Pound R. V., Snider J. L.* Effect of Gravity on Nuclear Resonance (англ.) // *Physical Review Letters* : journal. — 1964. — 2 November (vol. 13, no. 18). — P. 539—540. — doi:10.1103/PhysRevLett.13.539 (<https://dx.doi.org/10.1103%2FPhysRevLett.13.539>). — .
4. *Vessot R. F. C. et al.* Test of Relativistic Gravitation with a Space-Borne Hydrogen Maser (англ.) // *Physical Review Letters* : journal. — 1980. — 29 December (vol. 45, no. 26). — P. 2081—2084. — doi:10.1103/PhysRevLett.45.2081 (<https://dx.doi.org/10.1103%2FPhysRevLett.45.2081>). — .
5. *Einstein A.* Die Grundlage der allgemeinen Relativitätstheorie (<http://www.alberteinstein.info/gallery/gtext3.html>) // *Annalen der Physik*. — 1916. — Т. 354, № 7. — С. 769—822. — doi:10.1002/andp.19163540702 (<https://dx.doi.org/10.1002%2Fandp.19163540702>). — .
Архивировано (<https://www.webcitation.org/5QWa44CvC?url=http://www.alberteinstein.info/gallery/gtext3.html>) 22 июля 2007 года.; Русский перевод в сборнике: Альберт Эйнштейн и теория гравитации: Сборник статей (<http://eqworld.ipmnet.ru/ru/library/books/Kuranskij1979ru.djvu>) / Под ред. Е. Куранского. — М.: Мир, 1979. — 592 с. — С. 146—196.
6. *Dyson, F. W.; Eddington, A. S.; Davidson, C.* A Determination of the Deflection of Light by the Sun's Gravitational Field, from Observations Made at the Total Eclipse of May 29, 1919 (<http://adsabs.harvard.edu/abs/1920RSPTA.220..291D>) (англ.) // *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series A, Containing Papers of a Mathematical or Physical Character*. — Vol. 220. — P. 291—333.
7. *Bruno Bertotti, Dieter Brill, and Robert Krotkov.* Experiments on Gravitation // *Gravitation: an introduction to current research* / Witten L., ed.. — New York, London: John Wiley & Sons, Inc., 1962. — P. 23—29.
8. *Сивухин Д. В.* Общий курс физики. Механика. — М., Наука, 1979. — с. 376—378
9. *Окунь Л. Б., Селиванов К. Г., Телегди В.* «Гравитация, фотоны, часы» (<https://ufn.ru/ru/articles/1999/10/d/>) // *УФН*, т. 169, 1141—1147 (1999)
10. *Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М.* Теория поля. — М., Наука, 1973. — с. 299
11. Гинзбург В. Л. «Об экспериментальной проверке общей теории относительности» (<https://ufn.ru/ru/articles/1979/7/b/>) // *УФН*, т. 128, 435—458 (1979)
12. *Паунд Р. В.* О весе фотонов (http://www.ufn.ru/ufn60/ufn60_12/Russian/r6012b.pdf) // *Успехи физических наук*. — Российская академия наук, 1960. — Т. 72, вып. 4. — С. 673—683. Архивировано (https://web.archive.org/web/20061112020127/http://www.ufn.ru/ufn60/ufn60_12/Russian/r6012b.pdf) 12 ноября 2006 года.
13. *Audi G., Wapstra A. H., Thibault C.* The AME2003 atomic mass evaluation (II). Tables, graphs, and references (<http://www.nndc.bnl.gov/amdc/masstable/Ame2003/Ame2003b.pdf>) (англ.) // *Nuclear Physics A*. — 2003. — Vol. 729. — P. 337—676. — doi:10.1016/j.nuclphysa.2003.11.003 (<https://dx.doi.org/10.1016%2Fj.nuclphysa.2003.11.003>). — .
14. *Вейнберг С.* 2.3.5. Изменение масштаба времени // *Гравитация и космология* (<http://eqworld.ipmnet.ru/ru/library/books/Vajnberg1975ru.djvu>) / Пер. с англ. В. М. Дубовика и Э. А. Тагирова, под ред. Я. А. Смородинского. — М.: Мир, 1975. — С. 93—100. — 696 с.
15. *Will C. M.* The Confrontation between General Relativity and Experiment // *Living Rev. Relativity*. — 2014. — Vol. 17. — P. 4. — doi:10.12942/lrr-2014-4 (<https://dx.doi.org/10.12942%2Flrr-2014-4>). — arXiv:1403.7377.
16. *Chou C. W., Hume D. B., Rosenband T., Wineland D. J.* Optical Clocks and Relativity (англ.) // *Science*. — 2010. — Vol. 329, no. 5999. — P. 1630—1633. — doi:10.1126/science.1192720 (<https://dx.doi.org/10.1126%2Fscience.1192720>). — .
17. *Misra P., Enge P.* Global Positioning System. Signals, Measurements and Performance (<https://books.google.com/books?id=pv5MAQAAIAAJ>) (англ.). — 2nd Ed. — Ganga-Jamuna Press, 2006. — P. 115. — ISBN 0-9709544-1-7.

Литература

- *Паунд Р. В.* О весе фотонов (http://www.ufn.ru/ufn60/ufn60_12/Russian/r6012b.pdf) // Успехи физических наук. — Российская академия наук, 1960. — Т. 72, вып. 4. — С. 673—683. Архивировано (https://web.archive.org/web/20061112020127/http://www.ufn.ru/ufn60/ufn60_12/Russian/r6012b.pdf) 12 ноября 2006 года.
 - *Руденко В. Н.* Релятивистские эксперименты в гравитационном поле (http://ufn.ru/ufn78/ufn78_11/Russian/r7811a.pdf) // Успехи физических наук. — Российская академия наук, 1978. — Т. 126, вып. 3. — С. 362—401. Архивировано (https://web.archive.org/web/20150518010757/http://ufn.ru/ufn78/ufn78_11/Russian/r7811a.pdf) 18 мая 2015 года.
 - *Брагинский В. Б., Полнарёв А. Г.* Удивительная гравитация (<https://math.ru/lib/bmkvant/39>). — М.: Наука, 1985. — 160 с. — (Библиотечка «Квант», вып. 39). — 110 000 экз.
-

Источник — https://ru.wikipedia.org/w/index.php?title=Эксперимент_Паунда_и_Ребки&oldid=119223155

Эта страница в последний раз была отредактирована 8 января 2022 в 13:22.

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

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