

УДК 530.1

МЕТОД ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ ПРОВЕРКИ ЭФФЕКТА ГРАВИТАЦИОННОГО ЗАМЕДЛЕНИЯ ВРЕМЕНИ С ПОМОЩЬЮ АКТИВНОГО ВОДОРОДНОГО МАЗЕРА

Г. Б. Малыкин *

Институт прикладной физики РАН, г. Нижний Новгород, Россия

Ещё в 1960-е годы известные эксперименты Паунда и Ребки подтвердили предсказанный ранее в рамках общей теории относительности эффект гравитационного замедления времени. Однако поскольку в ходе этих экспериментов для сравнения частот ядерной резонансной флуоресценции на разных высотах происходил обмен фотонами, то в литературе причины возникновения этого эффекта объясняют двумя различными и, фактически, альтернативными предполагаемыми физическими явлениями. Согласно первому объяснению, часы, расположенные выше, идут быстрее, что обусловлено увеличением гравитационного потенциала по мере удаления от Земли, а восходящие и нисходящие фотоны не меняют свою частоту (по одним и тем же часам, например, так называемого внешнего наблюдателя). Согласно второму объяснению, часы на различных высотах идут одинаково, но при этом восходящие фотоны «краснеют», поскольку теряют энергию, а нисходящие фотоны, соответственно, «синееют», поскольку приобретают энергию. В литературе приводятся и другие, комбинированные интерпретации гравитационного замедления времени, предполагающие одновременное существование обоих явлений. Предлагается осуществить эксперимент с помощью двух часов — активных водородных мазеров, один из которых расположен внизу, а другой — наверху высотного здания. При этом измерение времени первыми и вторыми часами проводится в течение достаточно длительного промежутка времени, после чего мазеры перемещаются в одну точку и их показания сравниваются. В этом случае не требуется обмен фотонами для сравнения показаний часов, и, следовательно, предложенный метод позволяет выяснить истинную причину рассматриваемого эффекта. Сделаны численные оценки, позволяющие учесть сопутствующие эффекты, влияющие на точность измерения. Проведённый критический анализ предыдущих экспериментов показывает, что они либо допускают двойное толкование, либо являются не вполне безупречными в методическом отношении.

Как показано в работах [1–4], гравитационное изменение частоты генерации $\Delta\nu$ квантовых стандартов частоты (сверхточных часов) — мазеров, лазеров и др. — в зависимости от высоты расположения генератора над Землёй обусловлено увеличением гравитационного потенциала по мере удаления от её поверхности. При этом, поскольку гравитационный потенциал имеет отрицательное значение, его абсолютная величина, как и величина гравитационного поля Земли, уменьшается по мере удаления от земной поверхности. Увеличение частоты генерации с высотой составляет $\Delta\nu = \nu gH/c^2$, где ν — частота генерации на поверхности Земли, H — высота над Землёй, $g = 9,8$ м/с² — ускорение свободного падения, c — скорость света в вакууме. Как показано в курсе Л. Д. Ландау и Е. М. Лифшица [1] и работах Л. Б. Окуня [2–4], если генераторы, расположенные на различных высотах, обмениваются фотонами, то частоты восходящих и нисходящих фотонов остаются неизменными (по одним и тем же часам, например, так называемого внешнего наблюдателя) и целиком определяются частотами испустивших их генераторов. Следует отметить, что, фактически, этой же точки зрения придерживались А. Эйнштейн [5], В. Паули [6], А. И. Жуков [7], М. А. Тоннела [8], М. Борн [9], Дж. Вебер [10], Р. Толмен [11], С. Вейнберг [12], В. Л. Гинзбург [13], Дж. Орир [14], К. Уилл [15] и А. А. Логунов [16, 17].

Тем не менее в научной литературе бытует и другое мнение (см., например, работу В. В. Окрокова [18]), согласно которому часы на различных высотах идут одинаково, но при этом восходящие фотоны «краснеют» (поскольку теряют энергию), а нисходящие фотоны, соответственно,

* malykin@ufp.appl.sci-nnov.ru

«синееют» (поскольку приобретают энергию). Этой же точки зрения придерживаются и авторы первого тома берклевского курса физики [19].

Отметим, что в работе [18] рассматривается также возможность третьего варианта, когда, по мнению её автора, могут иметь место сразу оба явления: и часы на разных высотах идут по-разному, и частоты восходящих и нисходящих фотонов меняются. Этой точки зрения придерживаются также Дж. Орир [20], Ч. Мизнер, К. Торн и Дж. Уилер [21], В. Б. Брагинский и А. Г. Полнарев [22] и С. Хокинг [23]. Отметим также, что Дж. Орир в своих учебных курсах [14, 20] высказывает противоположные мнения по данному вопросу.

Но этим не ограничивается количество возможных воззрений на эффект гравитационного замедления времени. Так, в работах В. Л. Янчилина [24, 25] утверждается, что сверхточные часы (квантовые стандарты частоты), расположенные на большей высоте, идут не быстрее, а медленнее идентичных часов, расположенных на меньшей высоте. Более того, в статьях [24, 25] утверждается, что разность в ходе верхних и нижних часов по абсолютной величине в два раза превышает её значение, следующее из теории относительности. Затем, как утверждается в указанных работах, при спуске фотоны «синееют», и это явление компенсирует половину величины предполагаемого в [24, 25] замедления хода времени с увеличением высоты.

Причина такого различия во мнениях заключается в том, что допускаются различные объяснения при обсуждении результатов известных экспериментов Паунда и Ребки [26, 27] по сравнению частот ядерной резонансной флуоресценции (эффекта Мёссбауэра) для образцов Fe^{57} , находящихся внизу и наверху башни Джефферсоновской физической лаборатории в Гарварде. Это связано с тем, что в ходе этих экспериментов для сравнения частот ядерной резонансной флуоресценции на разных высотах проходил обмен фотонами и, следовательно, могло иметь место как гравитационное изменение резонансной частоты переходов Fe^{57} в зависимости от высоты [1–17], так и изменение частот «восходящих» и «нисходящих» фотонов [18–23].

Поскольку первое и второе объяснения эффекта гравитационного замедления времени являются альтернативными (а указанные выше третье и четвёртое объяснения являются комбинацией первого и второго), то, ввиду отсутствия строгой экспериментальной проверки, необходимо осуществить прецизионный эксперимент, позволяющий выяснить, что в действительности имеет место: или на различных высотах часы идут по-разному, или в процессе подъёма (спуска) меняется частота фотонов.

Возражения против мнения автора работы [18] были высказаны в статье [4]. Однако наиболее радикальным методом устранения всяческих недоразумений является прямой эксперимент, в ходе которого сравниваются не частоты некоторых атомных или ядерных переходов атомов, находящихся на разных высотах, а временные интервалы, измеренные прецизионными часами (стандартами времени), на основе указанных переходов. В этом случае будет возможно не только осуществить обоснованный выбор между альтернативными (первым и вторым) объяснениями рассматриваемого эффекта, но и проверить правомерность комбинированных (третьего и четвёртого) объяснений.

Цель настоящей работы заключается в рассмотрении возможности осуществления такого эксперимента с помощью двух активных водородных мазеров, один из которых расположен внизу, а другой — наверху высотного здания.

Кроме того, имеет смысл критически проанализировать предыдущие эксперименты, направленные на выяснение причины эффекта гравитационного замедления времени. Такой анализ показывает, что они либо в принципе допускают двойное толкование, так же, как и эксперименты Паунда и Ребки [26, 27], либо являются не вполне безупречными в методическом отношении.

Прежде всего отметим, что на поставленный выше вопрос не могут ответить эксперименты Вессота и его коллег [28] с водородным мазером, который с помощью ракеты поднимался вер-

тикально на высоту 10 000 км, и эксперименты Чоу и его группы [29] с оптическим стандартом частоты на основе ионов Al^+ , который поднимался вертикально на высоту 10 м, поскольку в них сравнивались частоты, а не временные интервалы. В экспериментах [28, 29], так же как и в экспериментах Паунда и Ребки [26, 27], происходил обмен фотонами между верхними и нижними прецизионными часами. Кроме того, в экспериментах [28, 29] вследствие движения имело место лоренцевское замедление времени.

Эксперимент по сравнению временных интервалов, измеренных верхними и нижними прецизионными часами, был осуществлен в 1971 году, когда Дж. Хафеле и Р. Китинг дважды облетели вокруг Земного шара — сначала на восток, затем на запад — с четырьмя комплектами цезиевых стандартов частоты (прецизионных часов), после чего сравнили показания «двигавшихся» часов с часами, остававшимися в Военно-морской обсерватории США [30, 31]. Перелёты выполнялись на обычных авиалайнерах регулярными коммерческими рейсами. Результаты обработки измерений подтвердили выводы [1–4].

Вместе с тем сама постановка эксперимента Хафеле и Китинга [30, 31] по транспортировке цезиевого стандарта частоты в самолёте представляется нам не очень удачной. Дело в том, что, кроме эффекта, связанного с подъёмом прецизионных часов на высоту $H \sim 10$ км, в нём имели место ещё и релятивистские эффекты: лоренцевское замедление времени, связанное со скоростью самолёта, и эффект Саньяка [32, 33], обусловленный вращением часов вокруг Земли. При обработке результатов измерений в работах [30, 31] учитывалась только средняя скорость самолёта $v \approx 270$ км/ч. На самом деле цезиевые часы летели с переменной скоростью и на различной высоте, подолгу находились в неподвижном состоянии во время пересадок в аэропортах на другие рейсовые самолёты. В то же время лоренцевское замедление времени при $v \ll c$ — это эффект, квадратичный по скорости v . Поэтому при его учёте нельзя пользоваться только средней скоростью самолёта, а необходимо провести интегрирование по времени с учётом того, как менялась скорость самолёта. Отметим, что указанные релятивистские эффекты давали вклад в отличие времени того же порядка величины, что и эффект, связанный с подъёмом часов на высоту порядка 10 км.

Более того, имел место ещё ряд эффектов, влияющих на ход времени, которые вообще не учитывались в работах [30, 31]. Это, главным образом, влияние на ускорение свободного падения g рельефа местности, над которой пролетал самолёт с цезиевыми часами, а также распределения залежей тяжёлых элементов под землёй, толщины и плотности Земной коры (тектонических плит), которые также влияют на величину g [34–36]. Эти эффекты могут менять величину g на $10^{-5} \div 10^{-3} \%$ [34–36]. Отметим, что изменение ускорения g широко используется для разведки полезных ископаемых [34–36]. Кроме того, поскольку в экспериментах [30, 31] при облёте вокруг Земного шара самолёты не придерживались строго определённой широты, то на локальную величину g оказывали воздействие также отклонение формы Земли от сферической и зависимость обусловленной вращением Земли центробежной силы от широты и высоты [34–36]. Последнее явление можно описать введением эффективного ускорения свободного падения $g_{\text{eff}} = g - \Delta g_c = g - \Omega^2 R \cos^2 \varphi$, где Ω — угловая скорость вращения Земли, R — расстояние от точки измерения до центра Земли (если измерение проводится на поверхности Земли, то R — радиус Земли), φ — географическая широта [34–36]. Например, на широте Москвы $\Delta g_c \approx 7,1 \cdot 10^{-10}$ м/с² на один метр высоты. В работах [30, 31] не учитывался даже довольно сильный эффект уменьшения ускорения g по мере удаления от поверхности Земли (в гравиметрии это явление именуется поправкой Фая на высоту [34–36]), который составляет $\Delta g_F = 3,086 \cdot 10^{-6}$ м/с² на один метр высоты. При $H \sim 10$ км изменение величины g достаточно велико и составляет примерно 3%. Методика учёта влияния релятивистских и других рассмотренных выше эффектов на показания перевозимых прецизионных часов подробно рассмотрена в работе [37]. Тем не менее лучше всего не учитывать

сопутствующие эффекты, а исключить их возникновение.

Отметим, что проведённые недавно известным коллекционером различных типов часов Т. ван Бааком эксперименты по сравнению времени, показываемого прецизионными часами, находящимися на различных высотах [38], являются не вполне безупречными в методическом плане (так же как и эксперименты [30, 31]), поскольку в них сравнивался ход времени, задаваемый различными типами мазеров. На гору с высотой 1340 м, расположенную в окрестностях г. Сиэтл (США) поднимались цезиевые часы, а в доме Т. ван Баака оставались водородные часы. Кроме того, не учитывалось влияние релятивистских эффектов, связанных с движением автомобиля, на котором из дома на гору и обратно перевозились цезиевые часы, а также влияние температуры на частоту генерации мазеров, и даже не определялась погрешность измерений времени.

Если в ходе прецизионного измерения изменяются сразу два или более параметров экспериментального устройства или имеют место сразу два или более независимых эффектов, то это измерение не имеет удовлетворительной доказательной силы. Должен изменяться только один параметр (влияние которого на результат измерения определяется) или на результат измерения должен влиять только один эффект — тот, который исследуется¹. Таким образом, в методическом отношении эксперименты Хафеле и Китинга [30, 31] и Т. ван Баака [38] далеко не безупречны. Необходимо провести их повторение в одной точке земной поверхности, но на различных высотах.

За прошедшие 43 года после проведения измерений [30, 31] существенно повысилась точность стандартов частоты — мазеров [40–42] и лазеров [29, 43]. В частности, долговременная относительная стабильность частоты активных водородных мазеров производства ЗАО «Время-Ч» (г. Нижний Новгород) достигает 10^{-16} [40–42], а лазеров — $10^{-18} \div 10^{-16}$ [43]. В то же время создание фемтосекундных лазеров позволяет сравнительно просто реализовать сверхточные часы на основе высокостабильных по частоте лазеров [43]. Следует отметить, что использование активных водородных мазеров для данных измерений имеет ряд практических преимуществ: они более компактны, имеют меньший вес и у них предусмотрен резервный источник электропитания, который позволит бесперебойно отсчитывать время в процессе перевозки в лифте.

Таким образом, в настоящее время существует возможность поставить рассматриваемый эксперимент без горизонтального передвижения прецизионных часов. Два идентичных водородных стандарта частоты, работающие в режиме измерения времени, вначале находятся на среднем этаже высотного здания. Их сверяют, затем один из них на лифте опускают в подвал, а другой поднимают на чердак. Через сутки их опять привозят на средний этаж и сверяют их показания. В этом случае не будет ни лоренцевского замедления времени, ни эффекта Саньяка. В Москве имеется здание «Меркурий-сити Тауэр» с высотой 339 м, завершается строительство восточной башни «Федерация» с высотой 385 м, а башня «Бурдж-Халифа» в Дубае имеет высоту 828 м. Отметим, что весьма близкая схема эксперимента была ранее предложена в статье [3].

Сделаем численные оценки. Разность времён между верхними и нижними часами составит согласно статье [3] $\Delta T = TgH/c^2$, где T — время измерения. При $T = 24 \text{ ч} = 86400 \text{ с}$ и $H = 385 \text{ м}$ разность $\Delta T = 3,62 \text{ нс}$. В этом случае необходимая относительная стабильность частоты квантового стандарта должна быть в несколько раз лучше чем $4 \cdot 10^{-14}$, что вполне реально. Следует отметить, что дальнейшее увеличение длительности измерения, по видимому, нецелесообразно, поскольку долговременная стабильность частоты квантовых стандартов частоты вначале возрастает пропорционально квадратному корню от времени усреднения, но после превышения интервала усреднения порядка $25 \div 100 \text{ ч}$ начинает очень медленно ухудшаться [41, 42].

При обработке результатов рассматриваемых экспериментов следует учитывать только весь-

¹ Эту мысль неоднократно высказывал своим ученикам профессор И. Л. Берштейн (1908–2000 годы, см. обзор его научной деятельности в работе [39]), крупнейший в СССР специалист по измерению малых механических смещений и малых электрических и оптических флуктуаций.

ма незначительные поправки, связанные с различием на разных высотах ускорения g (Δg_F) и наличием центробежной силы (Δg_C), обусловленной вращением Земли [34–37].

В заключение укажем на различие физических причин замедления времени. Если гравитационное замедление времени связано с влиянием ньютоновского (нерелятивистского) скалярного гравитационного потенциала [1], то замедление времени, обусловленное центробежной силой и эффектом Саньяка, связано с влиянием, соответственно, скалярного потенциала центробежной силы и силы Кориолиса, возникающей при движении часов по вращающейся Земле [32, 33]. Лоренцевское замедление времени является кинематическим эффектом специальной теории относительности и происходит при движении часов вне зависимости от вращения Земли. Отметим также публикацию [44], в которой рассмотрено влияние ряда эффектов общей теории относительности на замедление времени.

Автор выражает благодарность Н. А. Демидову и Л. Б. Окуню за многочисленные полезные обсуждения, В. И. Поздняковой за помощь в работе. Работа частично поддержана Советом при Президенте РФ по поддержке ведущих научных школ (грант НШ-2001.2014.2.2).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М. Теоретическая физика. Т. 2. Теория поля. М.: Наука, 1967. 460 с.
2. Окунь Л. Б., Селиванов К. Г., Телегди В. Л. // Успехи физич. наук. 1999. Т. 169, № 10. С. 1141.
3. Okun L. B. // Modern Phys. Lett. A. 2000. V. 15, No. 32. P. 2007.
4. Окунь Л. Б., Селиванов К. Г. // Докл. АН. 2002. Т. 384, № 6. С. 768.
5. Эйнштейн А. Собрание сочинений. Т. 1. М.: Наука, 1965. С. 165.
6. Паули В. Теория относительности. М.: Наука, 1983. 336 с.
7. Жуков А. И. Введение в теорию относительности. М.: Физматгиз. 1961. 172 с.
8. Тоннела М. А. Основы электромагнетизма и теории относительности. М.: Из-во иностр. лит., 1962. С. 295.
9. Борн М. Эйнштейновская теория относительности. М.: Мир, 1964. 453 с.
10. Вебер Дж. // Гравитация и относительность. М.: Мир, 1965. С. 374.
11. Толмен Р. Относительность, термодинамика и космология. М.: Наука, 1974. 520 с.
12. Вейнберг С. Гравитация и космология. М.: Мир, 1975. 696 с.
13. Гинзбург В. Л. // Успехи физич. наук. 1979. Т. 128, № 3. С. 435.
14. Орир Дж. Физика. Т. 1. М.: Мир, 1981. 336 с.
15. Уилл К. Теория и эксперимент в гравитационной физике. М.: Энергоатомиздат, 1985. 296 с.
16. Логунов А. А. Теория гравитационного поля. М.: Наука, 2000. 235 с.
17. Логунов А. А. Релятивистская теория гравитации. М.: Наука, 2006. 253 с.
18. Окорочков В. В. // Докл. АН. 2001. Т. 378, № 5. С. 617.
19. Киттель Ч., Найт В., Рудерман М. Берклеевский курс физики. Т. 1. Механика. М.: Наука, 1983. 448 с.
20. Орир Дж. Популярная физика. М.: Мир, 1969. 557 с.
21. Мизнер Ч., Торн К., Уилер Дж. Гравитация. Т. 1. М.: Мир, 1977. 474 с.
22. Брагинский В. Б., Полнарев А. Г. Удивительная гравитация: Библиотечка «Квант», вып. 39. М.: Наука, 1985. 160 с.
23. Хокинг С. Краткая история времени. СПб.: Амфора, 2007. 231 с.
24. Янчилин В. Л. Тайны гравитации. М.: Новый центр, 2004. 240 с.
25. Янчилин В. Л. // Мир измерений. 2010. № 12. С. 42.
26. Pound R. V., Rebka G. A. // Phys. Rev. Lett. 1960. V. 4, No. 7. P. 337.

27. Паунд Р. В. // Успехи физич. наук. 1960. Т. 72, № 4. С. 673.
28. Vessot R. F. C., Levine M. W., Mattison E. M., et al. // Phys. Rev. Lett. 1980. V. 45, No. 26. P. 2081.
29. Chou C. W., Hume D. B., Rosenband T., Wineland D. J. // Science. 2010. V. 329, No. 5999. P. 1630.
30. Hafele J. C., Keating R. C. // Science. 1972. V. 177, No. 4044. P. 166.
31. Hafele J. C., Keating R. C. // Science. 1972. V. 177, No. 4044. P. 168.
32. Малыкин Г. Б. // Успехи физич. наук. 2000. Т. 170, № 12. С. 1325.
33. Малыкин Г. Б. // Успехи физич. наук. 2002. Т. 172, № 8. С. 969.
34. Знаменский В. В. Общий курс полевой геофизики. М.: Недра, 1989. 520 с.
35. Хмелевский В. К., Горбачёв Ю. И., Калинин А. В. и др. Геофизические методы исследований. Петропавловск-Камчатский: Камчатский гос. педагогический ун-т, 2004. 232 с.
36. Гусев Е. В. Методы полевой геофизики. Томск: Томск. политехн. ун-т, 2007. 222 с.
37. Гайгеров Б. А., Сысоев В. П. // Измерительная техника. 2012. № 2. С. 25.
38. Van Baak T. // Phys. Today. 2007. V. 60, No. 3. P. 16.
39. Малыкин Г. Б. «И. Л. Берштейн — научная деятельность. К 90-летию со дня рождения». Нижний Новгород: ИПФ РАН, 1998. 20 с.
40. Черногубов А. // Электроника: наука, технология, бизнес. 2008. № 3. С. 114.
41. Демидов Н., Васильев В. // Электроника: наука, технология, бизнес. 2008. № 4. С. 92.
42. Boyko A., Domnin Yu., Koshelyaevsky N., Sokolova O. // Proc. "2013 Precise Time and Time Interval Systems and Applicat. Meeting"(ION PTTI 2013), Bellevue, Washington, December 2–5, 2013. P. 75.
43. Бакланов Е. В., Покасов П. В. // Квантовая электроника. 2003. Т. 33, № 5. С. 145.
44. Фатеев В. Ф., Сысоев В. П. // Измерит. техника. 2014. № 8. С. 31.

Поступила в редакцию 2 июня 2014 г.; принята в печать 12 ноября 2014 г.

METHOD FOR EXPERIMENTAL VERIFICATION OF THE EFFECT OF GRAVITATIONAL TIME DILATION BY USING AN ACTIVE HYDROGEN MASER

G. B. Malykin

The well-known experiments performed by Pound and Rebka already in the 1960s confirmed existence of the effect of gravitational time dilation, which had been predicted earlier in the framework of the general relativity theory. However, since photon exchange occurred in the course of these experiments on comparing the frequencies of nuclear resonance fluorescence at various altitudes, the reasons underlying the origin of this effect are explained in literature by two different and, indeed, alternative presumed physical phenomena. According to the first explanation, clocks located higher run faster, which is due to the increase in the gravitational potential with an increase in the distance from the Earth, and ascending and descending photons do not change their frequency (by the same clock, e.g., that of a so-called outside observer). According to the second explanation, the clock rate is identical at different altitudes, but the ascending photons undergo the “redshift”, since they lose their energy, and the descending photons undergo the “blueshift”, since they acquire energy. Other combined interpretations of the gravity time dilation, which presume that the both phenomena exist simultaneously, are proposed in literature. We propose an experiment with two clocks being active hydrogen masers, one of which is located at the bottom of a high-rise building, and the other, on top of the building. In

this case, time is measured by the first and second clock during a sufficiently long time interval. After that, the masers are placed at one point, and their indications are compared. In this case, the photon exchange is not required for comparison of the clock readings, and, therefore, the method proposed allows one to reveal the actual reason of the effect under consideration. Numerical estimations are made, which allow for the cooperative effects which affect the measurement accuracy. Critical analysis of earlier experiments shows that they are either equivocating, or are not absolutely impeccable from the methodology viewpoint.