

## Физическая природа замедления времени в эксперименте Хафеле-Китинга и в часах спутников GPS

*Гаджиев М.Г., кандидат физико-математических наук*

**Аннотация:** В качестве причины изменения хода времени в часах эксперимента Хафеле-Китинга и спутников GPS рассматриваются не релятивистские эффекты, а увеличение длины пути, обусловленное смещением перигелия орбиты ИСЗ на соответствующей высоте полета. Опираясь на законы Кеплера, выведены формулы для вычисления поправок к длительности периода обращения. Результаты расчетов по этим формулам совпадают с прогнозами теории относительности и с данными наблюдений и экспериментов.

Соответствие результатов расчетов наблюдениям в эксперименте Хафеле-Китинга при движении самолетов в восточном и западном направлениях достигается в предположении, что смещение перигелиев орбит происходит не в сторону направления движения как принято в теории относительности, а в сторону вращения центра притяжения. Это предположение, подтвержденное также и при расчетах поправок длительности периода обращения спутников GPS, позволяет заключить, что причиной смещения перигелиев является вращение центра притяжения.

Установлено, что релятивистские эффекты, в том числе и смещение перигелиев орбит, которые не описываются Ньютоновской теорией гравитации, являются следствием влияния момента импульса вращающегося центра притяжения. Если центр притяжения не вращается, то релятивистские эффекты отсутствуют и все движения материальных тел в гравитационном поле происходят в соответствии с классической теорией гравитации Ньютона. Движения в гравитационном поле вращающегося центра притяжения описываются обновленной теорией гравитации Ньютона, которая учитывает влияние момента импульса, а не только массы центра притяжения.

Влияние вращения космических объектов в теории относительности тоже учитывается (эффект Саньяка). Но это влияние незначительно, поправки к ходу часов в спутниках GPS, например, на три порядка меньше, чем поправки от других эффектов.

В обновленной теории гравитации Ньютона, как и в теории относительности, время не является абсолютным. Течение времени зависит как от скорости движения по орбите, так и от расстояния до центра

притяжения, что подтверждается совпадением результатов расчетов с показаниями часов в эксперименте Хафеле-Китинга и в спутниках GPS.

**Ключевые слова:** теория гравитации, парадокс близнецов, смещение перигелия, спутники GPS, центр притяжения.

## 1. Эксперимент Хафеле-Китинга

Эксперимент Хафеле-Китинга [1] является одним из тестов теории относительности и считается демонстрацией реальности замедления времени для движущихся объектов, а также парадокса близнецов. Несмотря на сложности при его проведении, эксперимент выполнен на высоком теоретическом и техническом уровне, что подтверждается результатами и оценками их достоверности. Так как в качестве движущегося объекта выбран самолет, совершающий кругосветное путешествие, возникает вопрос: имеют ли отношение результаты эксперимента к самому первому тесту теории относительности об аномальном смещении перигелия Меркурия, который также является объектом, совершающим кругосветное путешествие.

В 1915 году Эйнштейн писал: «Результат, касающийся смещения перигелия Меркурия, наполняет меня глубоким удовлетворением» [2]. Так как смещение перигелия орбиты увеличивает длину пути и период обращения, есть все основания предполагать, что этим можно объяснить изменение времени полета в гравитационном поле Земли.

Релятивистские эффекты, которые рассматриваются в теоретической части эксперимента Хафеле-Китинга, включают в себя постоянство скорости света, принцип эквивалентности, замедление времени, гравитационные сдвиги частоты и др. Так как прогнозируемое смещение перигелия орбиты Меркурия с высокой точностью совпадает с наблюдением, можно считать, что влияние перечисленных эффектов учтено также в формуле для расчета этого смещения за один оборот  $S = 6\pi GM/c^2$  [3]. Особенность этой формулы заключается в том, что линейное смещение  $S$  одинаково для всех планет и не зависит от их массы и расстояния до притягивающего центра. По этой же формуле можно рассчитывать и смещение перигелиев орбит спутников Земли. Например, наблюдаемое и подтвержденное угловое смещение перигелия Луны составляет **0,06"** за **100** земных лет [3]. Если пересчитать, то получится, что линейное смещение перигелия орбиты Луны за один оборот **0,0834 m**. Так как диаметр Луны **3500** километров, то смещение перигелия составляет **0,00000024** часть диаметра. По этой цифре можно судить о размерах аномальных гравитационных эффектов, которые не описываются классической теорией гравитации Ньютона, а также о тех поправках, которые вносят в гравитационные расчеты релятивистские эффекты. Эти поправки в

эксперименте Хафеле-Китинга можно рассчитать так, как это и сделано в статье [1], а можно воспользоваться уже известным значением  $S$  и оценить изменение периода обращения, обусловленного смещением перигелия орбиты кругосветного путешествия.

Если рассмотреть движение искусственного спутника (ИСЗ) вокруг Земли, то смещение перигелия орбиты тоже будет, как и у Луны - **0,0834 м**. Смещение перигелия орбиты не означает удлинения самой орбиты. Она просто поворачивается на угол, соответствующий смещению. В теории относительности предполагается, что смещение перигелия является следствием движения спутника по орбите, а его направление совпадает с направлением скорости движения и не зависит от направления вращения притягивающего центра. Из наблюдений за смещением перигелиев планет Солнечной системы следует, что все они смещаются в сторону вращения Солнца. В статье [3] показано, что момент импульса вращающейся массы создает в окружающем пространстве тангенциальные силы, которые и являются причиной смещения перигелиев орбит спутников и направлены в сторону вращения притягивающего центра. Если это подтвердится в расчетах и наблюдениях, то смещение перигелия Меркурия перестает быть наблюдательным подтверждением теории относительности.

Для расчетов и сравнения с прогнозами и результатами в эксперименте Хафеле-Китинга рассмотрим беспосадочное путешествие на восток и запад на уровне 32-ой параллели с высотой, средней скоростью и длительностью приведенными в статье [1].

Простейшей формулой для вычисления поправки длительности кругосветного путешествия является отношение смещения перигелия к абсолютной скорости движения самолета  $S/v_a$  в локально-инерционной системе координат (ЕСИ). Но такая поправка, как и смещение перигелия, не зависит от высоты полета. Задача учета этой зависимости сводится к сравнению полетов ИСЗ на уровне Земли и на высоте  $h$ .

Вторая космическая скорость, с которой летают ИСЗ, зависит от высоты полета. ИСЗ-1 летает на высоте  $h$  со скоростью:

$$v_1 = \sqrt{GM / (r+h)} ;$$

Здесь  $G$  – гравитационная постоянная,  $M$  и  $r$  – масса и радиус Земли,  $h$  – расстояние до поверхности Земли.

ИСЗ-2 летает на поверхности Земли на уровне аэропорта со скоростью:

$$v_2 = \sqrt{GM / r} ;$$

Время, необходимое спутникам для полета на расстояние  $S$ :

$$t_1 = S/v_1; t_2 = S/v_2; (1)$$

Время  $t_1 - t_2$  является изменением длительности периода обращения ИСЗ-1 по сравнению с ИСЗ-2:

$$t_{12} = (t_1 - t_2) = S (1 - \sqrt{r_e / (r_e + h)}) / v_1;$$

Абсолютную скорость самолета можно представить в виде суммы скорости вращения Земли  $v_e$  и относительной скорости самолета  $v$ :

$$v_a = v_e + v$$

Так как абсолютная скорость самолета  $v_a$  значительно меньше скорости спутника  $v_1$ , то изменение периода обращения самолета пропорционально больше и вычисляется по формуле:

$$t_a = t_{12} v_1 / (v_e + v); (2)$$

Если в этой формуле предположить  $v = 0$ , то получится универсальная формула для вычисления изменения времени в зависимости от высоты для объектов неподвижных относительно Земли:

$$t_e = t_{12} v_1 / v_e = S (1 - \sqrt{r / (r + h)}) / v_e; (3)$$

В эксперименте Хафеле-Китинга определяется поправка времени часов, совершивших кругосветное путешествие, с часами неподвижными относительно Земли. Это значит, что из результата движения с абсолютной скоростью (2) надо вычесть результат, связанный с вращением Земли (3):

$$t(v) = t_a - t_e = -S (1 - \sqrt{r / (r + h)}) v / (v_e + v) / v_e; (4)$$

На Рис.1 приведен график зависимости поправки к длительности кругосветного путешествия от относительной скорости самолета. В правом верхнем углу аналогичный график из [1] построенный в системе координат, вращающейся вместе с Землей.

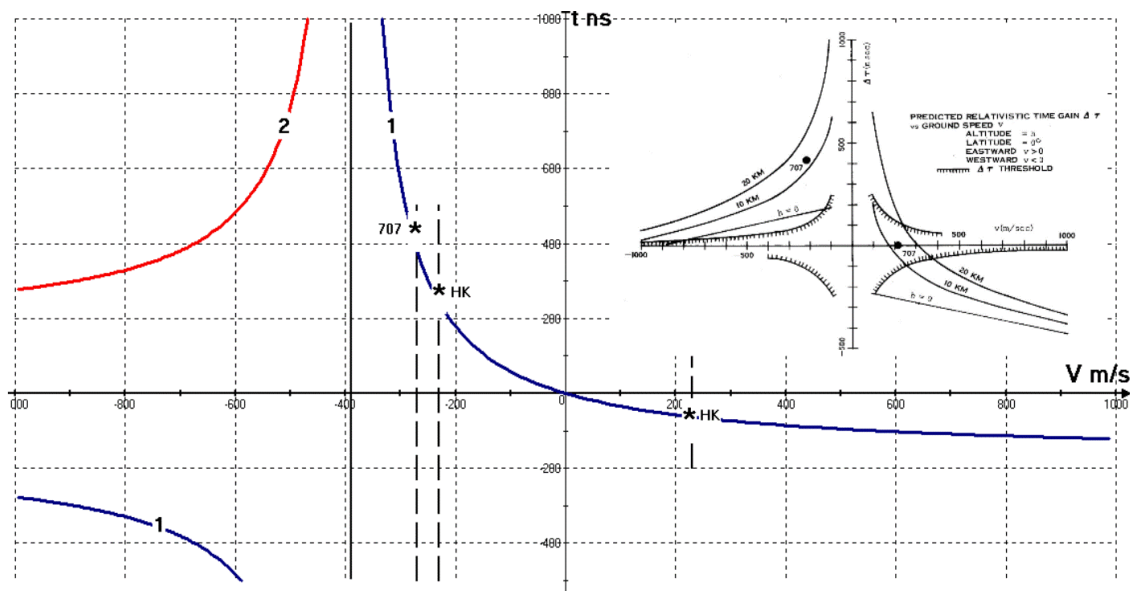


Рис.1 Зависимость поправки к длительности кругосветного путешествия от скорости движения самолета в эксперименте Хафеле- Китинга. В правом верхнем углу аналогичный график из [1], построенный в системе координат, вращающейся вместе с Землей.

Рассчитанные поправки к периоду обращения безостановочного кругосветного путешествия для движения в западном и в восточном направлениях (**265 ns**; **-45 ns**) совпадают с результатом прогноза для эксперимента Хафеле-Китинга (275ns; -40 ns). Совпадающим результатом на этих рисунках является и изменение периода обращения Боинга 707.

Рис.1 также проясняет вопрос о том, зависит ли смещения перигелия от вращения Земли. Если самолет движется в восточном направлении, то направление движения самолета, направление смещения перигелия орбиты и направление вращения Земли совпадают. Если самолет движется в западном направлении и его скорость приближается к скорости вращения Земли, то период обращения и поправки к периоду обращения положительны и возрастают до бесконечности. А из графика функции  $t(v)$  следует, что если самолет движется в западном направлении и его скорость больше скорости вращения Земли, то поправки к периоду обращения (линия 1), вычисленные по формуле (4), отрицательны. Исправить это можно только если поменять знак  $S$  в формуле (4). Тогда продолжением графика  $t(v)$  при движении в западном направлении будет линия 2. Но такая перемена знака означает, что длина пути от перигелия до перигелия в западном направлении сокращается, то есть перигелий орбиты смещается навстречу самолету, то есть в сторону вращения Земли. Таким образом, направление смещения перигелия орбиты самолета в обоих случаях совпадает с направлением вращения Земли, а не с направлением движения самолета.

## 2. Суточные поправки к периоду обращения спутников GPS

Расчет и контроль поправок времени является актуальной для спутников GPS, которые также совершают кругосветные путешествия по геоцентрической орбите на заданной высоте и в различных направлениях по отношению к экваториальной плоскости Земли. В теории относительности эти поправки считаются релятивистскими, а формула, включающая в себя гравитационную и кинематическую поправки для орбит ИСЗ, выглядит следующим образом [4]:

$$t(h) = T \frac{GM}{c^2} \frac{r-2h}{2r(r+h)}; \quad (5)$$

Здесь  $h$  – расстояние до поверхности Земли,  $T$  – период обращения ИСЗ,  $c$  – скорость света.

По этой формуле вычисляются поправки к периоду обращения ИСЗ в зависимости от расстояния до Земли (Рис.2, красная линия 1). По этой же формуле можно рассчитывать поправки за конкретное время  $\tau$  приняв  $T = \tau$  (Рис.2, красная линия 2).

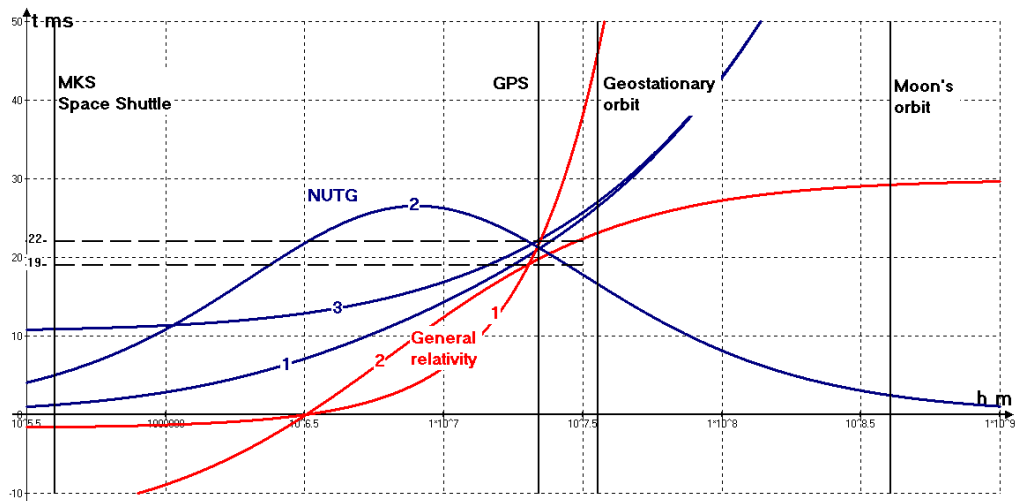


Рис.2 Зависимость поправок хода времени от расстояния до Земли для ИСЗ по теории относительности и по обновлённой теории гравитации Ньютона (NUTG). Линии 1 – поправки времени к периоду обращения  $T$ , линии 2 - поправки времени за 12 часов (43200 секунд).

В обновленной теории гравитации Ньютона (NUTG) наиболее простой формулой вычисления поправок к периоду обращения ИСЗ для любого расстояния от центра Земли является формула, аналогичная формуле (1):

$$t(h) = S/v_1; \quad (6)$$

На Рис.2 этой функции соответствует синяя линия 3, которая отлична от нуля вплоть до центра Земли. Это абсолютные поправки к периоду обращения для спутников на любом расстоянии от центра Земли.

В наблюдениях ход часов на орбите сравнивается с показаниями часов на Земле, поэтому поправки являются разностью этих значений. Для того, чтобы они обращались в ноль на поверхности Земли в HUTG они вычисляются по формуле, аналогичной (4):

$$t(h) = S \left( \frac{1}{v_1} - \frac{1}{v_2} \frac{T_2}{T_1} \right); \quad (7)$$

Коэффициент  $T_2/T_1$  обеспечивает расчет поправки к часам ИСЗ-2 за период обращения ИСЗ-1. Подставляя известные значения параметров в формулу (7) получим формулу для вычисления поправок к периоду обращения ИСЗ в зависимости от расстояния до Земли:

$$t(h) = S \left( 1 - \frac{r^2}{(r+h)^2} \right) \sqrt{\frac{r+h}{GM}}; \quad (8)$$

На Рис.2 этой функции соответствует синяя линия 1.

Для вычисления поправок не за период обращения  $T$ , а за конкретное время  $\tau$ , необходимо в формуле (7) умножить поправку каждого спутника на коэффициент  $\tau/T_1$ .

$$t(h) = S \left( \frac{1}{v_1} \frac{\tau}{T_1} - \frac{1}{v_2} \frac{T_2}{T_1} \frac{\tau}{T_2} \right) = S \left( \frac{1}{v_1} - \frac{1}{v_2} \right) \frac{\tau}{T_1}; \quad (9)$$

Подставляя известные значения параметров в формулу (9) получим формулу для вычисления поправок к часам ИСЗ за конкретное время  $\tau$  в зависимости от расстояния до Земли:

$$t(h) = S \left( 1 - \sqrt{\frac{r}{r+h}} \right) \frac{\tau}{2\pi(r+h)}; \quad (10)$$

На Рис.2 этой функции соответствует синяя линия 2.

Как следует из Рис.2 наблюдения за часами спутников GPS подтверждают, как поправки рассчитанные по теории относительности Эйнштейна, так и по обновленной теории гравитации Ньютона. В пересчете на земные сутки (24 часа) теоретические поправки находятся в диапазоне **38-45 микросекунд**. Для ИСЗ с орбитами на других расстояниях от Земли результаты расчетов по этим теориям существенно отличаются между собой. Это относится в том числе к космическим станциям, спутникам на геостационарных орбитах, а также к часам на Луне. Так как вокруг Земли летает огромное количество спутников, удивительно, что в публикациях отсутствуют иные наблюдения, подтверждающие теоретические предсказания теории относительности, кроме как наблюдения за часами спутников GPS.

Формулы (6), (7), (9) для расчета поправок к периоду обращения спутников GPS позволяют еще раз прояснить вопрос о том, в какую сторону смещается перигелий орбит. Для того, чтобы результаты расчетов не зависели от направления движения, необходимо, чтобы эти результаты не изменялись при изменении знаков скоростей в формулах. Но если в этих формулах заменить знаки скорости  $v_i$  на  $-v_i$ , то поправки становятся отрицательными. Чтобы результаты расчетов по этим формулам не изменялись при изменении знаков скоростей достаточно заменить  $S$  на  $-S$ . Изменение знака скорости — это изменение направления движения, а изменение знака смещения перигелия — это изменение длины пути. Если спутник движется на восток, смещение перигелия положительно и длина пути от перигелия до перигелия увеличивается. Если спутник движется на запад, смещение перигелия отрицательно и длина пути от перигелия до перигелия сокращается. Следовательно, перигелий орбит ИСЗ смещается в сторону вращения Земли, а не в сторону направления скорости. При этом расчетные поправки к периоду обращения одинаковые и не зависят от направления движения спутников.

Таким образом, результаты эксперимента Хафеле-Китинга и наблюдений за спутниками GPS можно прогнозировать как по формулам теории относительности, так и по формулам обновленной теории гравитации Ньютона. Но в теории относительности поправки к длительности периода обращения считаются релятивистскими эффектами, подтверждающими замедление хода времени и парадокс близнецов, а в обновленной теории гравитации Ньютона следствием изменения длины пути в результате смещения перигелия орбиты под воздействием момента импульса вращающейся Земли.

### 3. Заключение

В теории относительности результаты эксперимента Хафеле-Китинга и суточные поправки времени в часах спутников GPS считаются релятивистскими эффектами, влияющими на ход часов из-за их движений в гравитационном поле Земли. Особенностью этих движений является то, что они происходят по круговым Кеплеровским орбитам, для которых известно, что их перигелий смещается, увеличивая длину пути за один оборот. Предполагая, что эти изменения влекут за собой и изменение длительности кругосветного путешествия, в статье выведены формулы для вычисления гравитационных поправок к периоду обращения. Результаты расчетов по этим формулам совпадают с прогнозами теории относительности и с данными наблюдений и экспериментов.

Эксперимент Хафеле-Китинга, в котором совершается кругосветное путешествие в обоих направлениях позволил также установить, что

смещение перигелиев планет и спутников происходит не в сторону их движения по орбите как принято в теории относительности, а в сторону вращения центра притяжения. Этот нетривиальный результат, подтвержденный также расчетами для спутников GPS, является тестом для обоснования предлагаемого подхода к расчету гравитационных поправок времени.

Предложены элементарные формулы для расчёта влияния смещения перигелиев орбиты искусственных спутников на гравитационные поправки времени в GPS как относительно центра, так и относительно поверхности Земли. Установлено, что результаты расчетов не зависят от направления движения спутников. Учитывая, что для орбиты спутников GPS эти результаты совпадают с прогнозами теории относительности, для верификации методов требуются дополнительные экспериментальные исследования и наблюдения.

Исходя из результатов работы можно заключить, что релятивистские эффекты, в том числе и смещение перигелиев орбит, которые не описываются Ньютоновской теорией гравитации, являются следствием влияния момента импульса вращающегося центра притяжения. Все движения в гравитационном поле вращающегося центра притяжения описываются обновленной теорией гравитации Ньютона [5]. Если же центр притяжения не вращается, то релятивистские эффекты отсутствуют и все движения в гравитационном поле происходят в соответствии с классической теорией гравитации Ньютона.

В обновленной теории гравитации Ньютона, как и в теории относительности, время не является абсолютным. Течение времени зависит как от скорости движения по орбите, так и от расстояния до центра притяжения, что подтверждается совпадением результатов расчетов с показаниями часов в эксперименте Хафеле-Китинга и в спутниках GPS.

#### **4. Список литературы**

1. Hafele, J.C., Keating, R.E. Around-the-World Atomic Clocks: Predicted Relativistic Time Gains // *Science*, 177 (4044), 1972, 166-168.
2. Роузвер Н.Т. Перигелий Меркурия от Лавруе до Эйнштейна. Москва «Мир», 1985.
3. Гинзбург В.Л. «Экспериментальная проверка теории относительности», УФН, май 1956, т. LIX, вып. I, стр. 11-49.
4. Neil Ashby, Relativity in the Global Positioning System. *Living Rev. Relativity*, 6, (2003), 1, 10-12

5. Magomed Gadzhiev, Newton's Updated Theory of Gravity. International Journal of Scientific Advances Volume 7 | Issue 1 | Jan – Feb 2026