

ОБ ОДИНАКОВОМ ХОДЕ ВРЕМЕНИ НА ЗЕМЛЕ И НА СОЛНЦЕ

Окунев В.С.

*Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана,
Москва, Россия*

Ключевые слова: специальная теория относительности, фактор Лоренца, замедление времени, релятивистские эффекты, гравитационный потенциал, планеты.

Аннотация. Основная цель работы в выявлении хода времени на Земле и на Солнце. Процедура и методы исследования основаны на соотношениях специальной теории относительности и их корректировке при учете гравитационного эффекта замедления времени. На основе этих соотношений получено условие «равновесия» кинематического и гравитационного эффектов замедления времени, т.е. условие, когда эти эффекты взаимно компенсируются. Результаты проведенного исследования показали, что Земля находится в условии «равновесия», когда кинематический и гравитационный эффекты замедления времени, связанные с ее движением вокруг Солнца, равны. С другой стороны, оценки, проведенные для движения других планет солнечной системы вокруг Солнца, а также для движения Солнца относительно галактического центра, показали, что условие «равновесия» кинематического и гравитационного эффектов замедления времени не выполняется. В этом теоретическая значимость полученных результатов. Эффекты крайне малы, но могут оказаться существенны при исследованиях дальнего космоса, когда необходимо учитывать релятивистские эффекты для обеспечения точности.

ON THE SAME FLOW OF TIME ON EARTH AND ON THE SUN

Okunev V.S.

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia

Keywords: special theory of relativity, Lorentz factor, time dilation, relativistic effects, gravitational potential, planets.

Abstract. The main objective of the work is to identify the passage of time on Earth and the Sun. The procedure and methods of the study are based on the relationships of the special theory of relativity and their correction when taking into account the gravitational effect of time dilation. Based on these relationships, the condition of "equilibrium" of the kinematic and gravitational effects of time dilation is obtained, i.e. the condition when these effects mutually compensate. The results of the study showed that the Earth is in the condition of "equilibrium" when the kinematic and gravitational effects of time dilation associated with its motion around the Sun are equal. On the other hand, the estimates made for the motion of other planets of the solar system around the Sun, as well as for the motion of the Sun relative to the galactic center, showed that the condition of "equilibrium" of the kinematic and gravitational effects of time dilation is not met. This is the theoretical significance of the results obtained. The effects are extremely small, but can be significant in deep space studies where relativistic effects must be taken into account to ensure accuracy.

В каждой точке пространства время течет по-разному. На ход времени для малого объекта с малой массой m в основном оказывают влияние его близость к телу с относительно большой гравитационной массой M и скорость его вращения (или любого передвижения по замкнутой траектории) вокруг этого массивного тела. В теории относительности первый эффект называют гравитационным эффектом замедления времени, второй – кинематическим.

В эксперименте Хафеле–Китинга (1972) при перемещении часов на самолете вокруг Земли на определенной скорости и на определенной высоте кинематический и гравитационный вклад в изменение времени заметно различаются по абсолютному значению, а при движении на восток они различаются и по знаку [1]. Это связано с относительно малым по абсолютному значению гравитационным потенциалом Земли.

Для каждой точки пространства Солнечной системы можно оценить скорость движения объектов (в том числе планет) малой массы (по сравнению с массой Солнца) в данной точке, при которой кинематический и гравитационный эффекты замедления времени равны. Чем дальше объект малой массы от Солнца, тем быстрее для него течет время, чем выше скорость объекта, тем медленнее для него течет время. Для каждой точки пространства существует скорость, при которой эти эффекты взаимно компенсируются. В этой точке и на Солнце ход времени одинаков.

Получим условие «равновесия» кинематического и гравитационного эффектов замедления времени, т. е. условие, когда эти эффекты взаимно компенсируются. Допустим, система отсчета K' движется относительно системы K в направлении оси x (совпадает с направлением оси x') со скоростью v . Из преобразований Лоренца следует, что промежутки времени, прошедшие в инерциальных системах отсчета K и K' , связаны соотношением

$$\Delta t = \gamma \Delta t',$$

где

$$\gamma = 1 / \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}} \quad (1)$$

– фактор Лоренца [2]; c – скорость света в вакууме.

Скорость тела, движущегося в поле силы тяжести Земли с ускорением свободного падения g , после прохождения расстояния x равна $v = \sqrt{2gx}$. Подставляя это соотношение в формулу (1), получим

$$\gamma = 1 / \sqrt{1 - \frac{2gx}{c^2}}. \quad (2)$$

Потенциальная энергия однородной силы тяжести на поверхности Земли $U = -mgx$, гравитационный потенциал $\varphi = -U/m = -gx$. С учетом этого, выражение (2) можно переписать в виде

$$\gamma = 1 / \sqrt{1 - \frac{2|\varphi|}{c^2}}. \quad (3)$$

Вблизи поверхности Земли (радиус нашей планеты $x = 6371$ км, среднее значение ускорения свободного падения $g = 9,807$ м/с²) гравитационный потенциал $\varphi = -62480,397$ м²/с², отношение

$$2|\varphi|/c^2 = 1,400 \cdot 10^{-12} \ll 1.$$

Значит, гравитационное поле Земли можно считать слабым. В общем случае гравитационный потенциал определяется как

$$\varphi = -GM/x, \quad (4)$$

где $G = 6,6743 \cdot 10^{-11} \text{ м}^3 \text{ с}^{-2} \text{ кг}^{-1}$ – гравитационная постоянная, M – масса большого объекта; x – расстояние от центра масс большого объекта до данной точки, в которой расположено тело массой m (причем $m \ll M$).

Подставляя выражения (4) в формулу (3), получим

$$\gamma = 1 / \sqrt{1 - \frac{2GM}{xc^2}}. \quad (5)$$

Формулы (3) и (5) справедливы при малом $|\varphi|$. Обозначим $a = \frac{GM}{xc^2}$.

Формула (5) справедлива при $a \ll 1$. В этом случае

$$(1 - a)^2 = (1 - 2a + a^2) \approx 1 - 2a$$

или
$$\sqrt{1 - 2a} \approx \sqrt{(1 - a)^2} = |1 - a|. \quad (6)$$

Если $|\varphi| \sim c^2$, то выражение (5) с учетом (6) можно записать в виде

$$\gamma = 1 / \sqrt{1 - \frac{GM}{xc^2}}. \quad (7)$$

Это более точная формула. Она справедлива для любого гравитационного потенциала [3, 4].

Сравнивая правые части соотношений (1) и (7), определим связь между скоростью v перемещающегося вокруг большой гравитационной массы M объекта малой массы m , на расстоянии x от центра масс большого объекта до центра масс малого объекта, который можно считать точечным, при которой кинематический и гравитационный вклад в изменение времени одинаковы. Получим искомое условие «равновесия» кинематического и гравитационного эффектов замедления времени

$$v^2 = GM/x. \quad (8)$$

Планеты Солнечной системы (да и других систем) движутся с нерелятивистскими скоростями по замкнутым траекториям вокруг Солнца, на поверхности которого гравитационный потенциал относительно невелик по абсолютному значению: $|\varphi| = 1,906 \cdot 10^{14} \text{ м}^2/\text{с}^2$, отношение $2|\varphi|/c^2 = 4,242 \cdot 10^{-17} \ll 1$.

Рассмотрим движение Земли вокруг Солнца. Масса Солнца равна $1,98892 \cdot 10^{30} \text{ кг}$, радиус – 696 340 км. В этом случае

$$v = 1,6294 \cdot 10^{10} / x^{0,5}. \quad (9)$$

Как следует из соотношения (9), при движении вокруг Солнца на расстоянии 149597870700 м (расстояние от Земли до Солнца) со скоростью 107238,9391 км/ч кинематический и гравитационный вклад в изменение времени одинаковы. Эта скорость намного меньше скорости света и приблизительно равна средней скорости вращения Земли вокруг Солнца по эллиптической орбите (около 107154 км/ч). Максимальная ее орбитальная скорость в перигелии около 108972 км/ч, а минимальная в афелии – 105372 км/ч.

Таким образом, Земля находится в условии «равновесия», когда кинематический и гравитационный эффекты замедления времени, связанные с ее движением вокруг Солнца, равны.

Расчетные оценки, проведенные для движения других планет Солнечной системы вокруг Солнца, для движения Солнца относительно галактического центра, показали, что условие «равновесия» кинематического и гравитационного эффектов замедления времени не выполняется. В таблице 1 приведены значения средней скорости v движения планет Солнечной системы вокруг Солнца и скорости v_G , необходимой для компенсации гравитационного эффекта замедления времени, вызванного притяжением Солнца. Заметим, что $v \ll c$ и $v_G \ll c$. Вклад массы планет в замедление времени не учитывается. Расчеты соответствуют центру планеты. В скобках указаны минимальная и максимальная орбитальная скорость движения планеты вокруг Солнца.

Табл. 1. Значения скоростей v и v_G для разных планет

Планета	v , км/ч	v_G , км/ч
Меркурий	170496 (139320; 203760)	5451
Венера	126072 (125244; 126936)	1108666
Земля	107154 (105372; 108972)	107239
Марс	86868 (79092; 95400)	763034
Юпитер	47052 (44784; 49392)	413068
Сатурн	34884 (32724; 36648)	304786
Уран	24516 (23364; 25596)	214878
Нептун	19566 (19332; 19800)	171811
Плутон	16809 (13356; 21960)	149833

Таким образом, время в центре Солнца и центре Земли время течет приблизительно одинаково. Из данных таблицы 1 и соотношений (1) и (7) следует, что медленнее всего время течет на Меркурии. Это связано с близким расположением от Солнца и высокой скоростью орбитального движения. Меркурий – самая быстрая планета в Солнечной системе и ближе других планет расположена к Солнцу. Средняя скорость движения Меркурия по орбите составляет 0,016% от скорости света в вакууме. Для Меркурия

параметр $\frac{GM}{xc^2} = 2,2137 \cdot 10^{-9}$; параметр $\frac{v^2}{c^2} = 2,4954 \cdot 10^{-8}$. Основной вклад в

замедление времени вносит кинематический эффект. Время на Меркурии течет медленнее, чем на Земле и Солнце, но это практически не заметно.

Быстрее всего время течет на Плутоне, но и это практически не заметно. Основной вклад вносит кинематический эффект.

Список литературы

1. Hafele J., Keating R. Around the world atomic clocks: predicted relativistic time gains // Science. 1972, vol. 177, iss. 4044, pp. 166-168. DOI: 10.1126/science.177.4044.166.
2. Утияма Р. Теория относительности / пер. с япон. – М.: Атомиздат, 1979. – 208 с.

3. Okunev V.S. Unexpected Conclusions of the General Theory of Relativity when Correcting its Simplest Relations // AIP Conference Proceedings. 2023, vol. 2911, p. 2028. doi.org/10.1063/5.0163963.
4. Okunev V.S. An Elementary Analysis of the Simplest Relations of Relativity Theory // Physical Interpretations of Relativity Theory: 22th Int. Scientific Conf., Abstracts. – M.: Bauman Moscow State Technical University. 2021. – P. 89-91.

References

1. Hafele J., Keating R. Around the world atomic clocks: predicted relativistic time gains // Science. 1972, vol. 177, iss. 4044, pp. 166-168. DOI: 10.1126/science.177.4044.166.
2. Utiyama R. Theory of relativity. – M.: Atomizdat, 1979. – 208 p.
3. Okunev V.S. Unexpected Conclusions of the General Theory of Relativity when Correcting its Simplest Relations // AIP Conference Proceedings. 2023, vol. 2911, p. 2028. doi.org/10.1063/5.0163963.
4. Okunev V.S. An Elementary Analysis of the Simplest Relations of Relativity Theory // Physical Interpretations of Relativity Theory: 22th Int. Scientific Conf., Abstracts. – M.: Bauman Moscow State Technical University. 2021. – P. 89-91.

Окунев Вячеслав Сергеевич – кандидат технических наук, доцент okunevvs@bmstu.ru	Okunev Viacheslav Sergeevich – candidate of technical sciences, associate professor
--	---

Received 05.10.2024