

УДК 530.12

© Гладышев В. О., Николаев П. П., 2025

РАСЧЁТ ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННЫХ КООРДИНАТ КОСМИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ В ПРОСТРАНСТВЕ С ДИПОЛЬНОЙ АНИЗОТРОПИЕЙ

Гладышев В. О.^{a,1}, Николаев П. П.^{a,2}

^a Московский Государственный Университет им. Н.Э. Баумана, улица 2-я Бауманская, д. 5, стр. 1, г. Москва, 105005, Россия.

Рассматривается возможность ускоренного хода циклически движущихся физических процессов в пространстве с дипольной анизотропией. В качестве пространства с дипольной анизотропией рассматривается эквивалентное пространство наблюдателя, движущегося с постоянной скоростью в изотропном физическом пространстве. Сделаны численные оценки ускорения хода циклически движущихся физических процессов в пространстве с дипольной анизотропией на примере движения искусственных спутников и планет Солнечной системы по гелиоцентрической орбите.

Ключевые слова: специальная теория относительности, замедление времени, дипольная анизотропия.

COMPUTING SPACETIME COORDINATES OF OUTER SPACE OBJECTS IN A SPACE CHARACTERIZED BY DIPOLE ANISOTROPY

Gladushev V. O.^{a,1}, Nikolaev P. P.^{a,2}

^a Bauman Moscow State Technical University, 2-nd Baumanskaya str., 5-1, Moscow, 105005, Russia.

We consider the possibility of physical processes occurring at an accelerated rate when they happen to be cyclically moving in a space characterized by dipole anisotropy. This space is assumed to be the equivalent space of an observer moving at a constant velocity in an isotropic physical space. We provide numerical estimates of the rate acceleration for physical processes moving cyclically in a space characterized by dipole anisotropy for the cases of artificial satellites and planets of the Solar System in their heliocentric orbits.

Keywords: special relativity, time dilation, dipole anisotropy.

PACS: 03.30.+p

DOI: 10.17238/issn2226-8812.2025.2.21-31

Введение

Предельная скорость физических взаимодействий в физическом пространстве (ФП) является обобщением принципа относительности и постулата о постоянстве скорости света. Однако в экспериментах может наблюдаться кажущееся превышение скорости физических взаимодействий скорости света в вакууме при одновременном сохранении принципа предельности скорости. Например, в работах [1,2] было показано, что при определенном наборе параметров максимум оптического отклика резонатора Фабри-Перо опережает максимум гравитационноволнового сигнала, распространяющегося в вакууме со скоростью света. Для наблюдателя данный факт воспринимается, как сверхсветовая скорость передачи оптического сигнала, но данный парадокс убедительно объясняется многолучевой интерференцией оптического отклика.

¹E-mail: gladyshev@bmstu.ru

²E-mail: ppn@bmstu.ru

Также измеряемая скорость физических взаимодействий может отличаться от истинной, например, при проведении эксперимента в неинерциальной системе отсчета или при наличии движущихся элементов или сред, участвующих во физическом взаимодействии, в результате чего могут проявляться неинвариантные свойства преобразований пространства-времени [3,4].

Согласно специальной теории относительности существует возможность в управляемом замедлении протекания движущихся физических процессов относительно неподвижного наблюдателя. Современные представления о расширяющейся Вселенной позволяют ввести связанную с ФП сопутствующую инерциальную систему отсчета (ИСО) [5], которая также является сопутствующей и относительно реликтового излучения. Наблюданное свойство дипольной анизотропии реликтового излучения [6] определяет ненулевую пекулярную скорость любого наблюдателя во Вселенной.

В 1987 году была проведена регистрация нейтринного потока от вспышки сверхновой SN1987A, в результате чего была измерена аномально большая задержка времени регистрации сигнала разнесенными детекторами [7,8]. Вспышка была зарегистрирована гравитационными антеннами в Мэриленде и Риме, а также нейтринным детектором LSD под горой Монблан, имеющими привязку к всемирному времени. Показания этих детекторов были скоррелированы в течение 2 часов, но сигнал, зарегистрированный нейтринным детектором, отставал на 1,1 с. Полученную задержку времени нельзя объяснить отклонением скорости распространения нейтрино от скорости света, так как в этом случае разность времен регистрации сигналов оптическими телескопами, нейтринными и гравитационными детекторами составляла бы на порядки большие значения вследствие большого расстояния между источником нейтринного потока и приемниками. Однако полученный результат можно объяснить запаздыванием сигнала вследствие движения наблюдателя в ИСО, сопутствующей ФП.

Таким же образом может быть решена проблема измерения скорости распространения нейтрино в экспериментах на детекторе OPERA (Oscillation Project with Emulsion-tRacking Apparatus), который находится в подземной лаборатории Гран-Сассо, Италия (Laboratori Nazionali del Gran Sasso) [9]. Проводимые в данном эксперименте измерения построены на сравнении мгновенных значений собственных параметров физических процессов (собственного времени разнесенных часов) в различные моменты времени и основаны на процедуре синхронизации удаленных часов.

Изотропное ФП, в котором наблюдатель движется с постоянной скоростью, эквивалентно пространству с дипольной анизотропией, в котором, как будет показано в этой работе, возможен ускоренный ход циклически движущихся физических процессов. Между тем следует разделять наблюдательные кажущиеся проявления анизотропии, связанные с космологическим движением наблюдателя, с фундаментальными анизотропными свойствами самого ФП. Проявлениями фундаментальной анизотропии ФП на масштабах Вселенной можно считать распределение собственных окружных движений квазаров [10], обнаружение неравнoprавности направлений в распределении параметра Хаббла по небосводу [11], а также открытие мультипольной анизотропии реликтового космического микроволнового излучения (эксперимент «Реликт-1» [12], проведенный ИКИ РАН и серия экспериментов на спутниках COBE [13] и WMAP [14], проведенных NASA). Исследование фундаментальной анизотропии ФП представляет собой самостоятельную задачу.

1. Соотношение временных интервалов у наблюдателя и движущегося космического объекта в пространстве с дипольной анизотропией

Релятивистские эффекты замедления времени начинают проявляться при высоких скоростях движения, поэтому на практике их учет востребован при анализе движения космических объектов (КО), включая и естественные космические объекты, и искусственные спутники, и пилотируемые космические летательные аппараты (КЛА). При описании движения таких КО необходимо не только синхронизировать часы стороннего наблюдателя с КО, но также знать функцию, связывающую ход часов в различных ИСО наблюдателя и КО. Эта функция должна связывать элементарные

отсчеты времени в выбранных ИСО, и вследствие движения наблюдателя в ФП эта зависимость, в общем случае, будет включать зависимость вектора скорости наблюдателя от времени.

Рассмотрим две ИСО₁ и ИСО₂, движущиеся относительно ИСО_{ФП}, сопутствующей ФП. Пусть наблюдатель располагается в ИСО₁, а движущийся КО будет связан с ИСО₂. Любое событие S в ИСО_{ФП} может быть задано радиус-вектором \vec{r} и временем t . В выбранных ИСО₁ и ИСО₂ этому событию будут соответствовать радиус вектора \vec{r}_1 и \vec{r}_2 и времена t_1 и t_2 . Нормированные скорости β_1 и β_2 ИСО₁ и ИСО₂, движущихся относительно ИСО_{ФП}, связаны соотношением преобразования скоростей:

$$\vec{\beta}_2 = a\vec{\beta}_0 + b\vec{\beta}_1, \quad (1)$$

где

$$a = \frac{1 + \frac{\gamma_0}{\gamma_0+1}(\vec{\beta}_0, \vec{\beta}_1)}{1 + (\vec{\beta}_0, \vec{\beta}_1)}, \quad b = \frac{\gamma_0^{-1}}{1 + (\vec{\beta}_0, \vec{\beta}_1)}, \quad \beta_i = \frac{v_i}{c}, \quad \gamma_0 = \frac{1}{\sqrt{1 - \beta_0^2}}, \quad (2)$$

где v_1 – скорость ИСО₁, v_2 – скорость ИСО₂, v_0 – скорость ИСО₂ относительно ИСО₁, β_0 – нормированная скорость ИСО₂ относительно ИСО₁, γ_0 – фактор Лоренца, соответствующий скорости v_0 .

Интегральная форма общих преобразований координат и времени между ИСО₁ и ИСО₂ в проекциях на координатные оси x^μ ($\mu, \nu = 1, 2, 3$) будет иметь вид [15]:

$$x_1^\mu = D_2^{-1}(\hat{\eta}_\mu, \vec{r}_2) - (\gamma_0 - 1) \frac{v_{0\mu}}{v_0^2} \hat{\tau}_\mu(\vec{r}_2, \vec{v}_0) + \int_0^{t_2} \gamma_0 \hat{\beta}_\mu v_{0\mu} dt_2, \quad (3)$$

$$t_1 = \int_0^{t_2} \gamma_0 \lambda_1 dt_2 + \lambda_2 \frac{\gamma_0}{c}(\vec{r}_2, \vec{\beta}_0), \quad (4)$$

где

$$\begin{aligned} \hat{\beta}_\mu &= 1 - \frac{c}{v_{0\mu}\gamma_0} \left\{ D_2^{-1} \left(\hat{a}_\mu, \frac{\vec{dr}_2}{|\vec{dr}_2|} \right) - a \frac{\gamma_2 - 1}{v_2^2} \left(\frac{\vec{dr}_2}{|\vec{dr}_2|}, \vec{v}_0 \right) (a\hat{a}_{\mu\nu}^0 v_{0\nu} + ba_{\mu\nu} v_{1\nu}) - \right. \\ &\quad \left. - ba_{\mu\nu}(\gamma_2 - 1) \frac{v_{2\nu}}{v_2^2} \left(\frac{\vec{dr}_2}{|\vec{dr}_2|}, \vec{v}_1 \right) (av_{0\nu} + bv_{1\nu}) \right\}, \end{aligned} \quad (5)$$

$$\lambda_1 = 1 + (\vec{\beta}_0, \vec{\beta}_1), \quad \lambda_2 = 1 + |\vec{dr}_2| \frac{(\vec{\beta}_0, \vec{\beta}_1)}{(\vec{dr}_2, \vec{\beta}_0)}, \quad (6)$$

$$a_{\mu\nu} = \begin{bmatrix} g\tau\bar{\tau} + D_1 \left(\frac{v_{12}^2 k_2}{\kappa_2} + \frac{1}{\kappa_1} \right) & g\sigma\bar{\tau} + D_1 \frac{v_{12} k_2}{\kappa_2} & g\bar{\tau} \\ g\sigma\tau + D_1 \frac{v_{11} k_2}{\kappa_2} & g\sigma^2 + \frac{D_1}{\kappa_2} & g\sigma \\ g\sigma & g\sigma & g \end{bmatrix}, \quad (7)$$

$$\hat{a}_{\mu\nu} = \begin{cases} a_{\mu\nu}, & \mu \neq \nu, \\ a_{\mu\nu} - 1, & \mu = \nu. \end{cases}, \quad \hat{a}_{\mu\nu}^0 = \begin{cases} a_{\mu\nu}, & \mu \neq \nu, \\ a_{\mu\nu} - \frac{(\gamma_0 - 1)v_2^2}{(\gamma_2 - 1)a^2 v_0^2}, & \mu = \nu. \end{cases}, \quad (8)$$

$$g = \frac{D_1}{1 - p_0 v_{13}^2 - p_0 v_{12} v_{13} \sigma}, \quad \tau = k_2(\sigma v_{12} - v_{13}), \quad \bar{\tau} = k_2(\sigma v_{12} + v_{13}), \quad \sigma = \frac{p_0 v_{12} v_{13}}{\kappa_2}, \quad (9)$$

$$p_0 = k_1 \kappa_1 + k_2^2, \quad k_1 = (\gamma_1 - 1) \frac{D_1}{v_1^2}, \quad k_2 = \frac{k_1 v_{11}}{\kappa_1}, \quad \kappa_1 = 1 - D_1 \frac{v_{11}^2}{v_1^2}, \quad \kappa_2 = 1 - p_0 v_{11}^2. \quad (10)$$

В выражениях (4)-(10) все коэффициенты, не входящие под знак интегралов, вычисляются в момент времени t_2 . Полученные преобразования могут быть использованы при сравнении координат и показаний часов движущихся КО, а также при описании процедур регистрации астрофизических сигналов разнесенными детекторами, движущимися в различных ИСО в ФП, т. е. при сравнении пространственно-временных координат событий.

При измерении интервалов времени синхронизированных часов в движущихся ИСО можно сравнить эти интервалы благодаря преобразованию частных дифференциалов общих преобразований, в которых частные производные координат равны нулю. Тогда из выражения (4) можно получить следующее соотношение временных интервалов в ИСО₁ и ИСО₂:

$$dt_2 = \frac{\sqrt{1 - \beta_0^2}}{1 + (\vec{\beta}_0, \vec{\beta}_1)} dt_1. \quad (11)$$

В случае неинерциального движения КО преобразования также могут быть использованы, если неравномерное движение КО можно представить, как непрерывный переход от одной мгновенно сопутствующей ИСО к другой. Для произвольного закона изменения относительной скорости $v_0(t_2)$ должно выполняться условие $\Delta v_0 \ll c$ на каждом элементарном измеряемом интервале времени. Интегральная форма преобразований для расчета времени равноускоренных часов использовалась неоднократно, например, в работе [15], демонстрируя пример использования группы Лоренца для случая неинерциального движения.

2. Соотношение временных интервалов у наблюдателя и движущегося объекта при циклическом движении по гелиоцентрической орбите

Большинство естественных и искусственных объектов Солнечной системы движется по гелиоцентрическим орбитам – эллиптическим траекториям, в одном из фокусов которых располагается Солнце. На рис. 1 представлено изображение произвольной эллиптической орбиты вокруг Солнца, привязанной к гелиоцентрической системе координат.

Гелиоцентрические орбиты лежат в плоскости эклиптики или отклонены от них на небольшие углы в пределах 10°. Поэтому в дальнейших расчетах будет предполагаться, что гелиоцентрическая орбита лежит точно в плоскости эклиптики, и тогда положение эллиптических орбит в эклиптической системе координат можно определить одной координатой – эклиптической долготой перигелия λ_p .

Плоскость эклиптики и связанная с ней эклиптическая система координат наклонена к галактической плоскости под углом примерно 60°, и ее положение задается направлением на точку весеннего равноденствия с галактическими координатами $l_e = 96^\circ$ и $b_e = 60^\circ$ [17]. Солнечная система, как часть Галактики Млечный Путь, обладает пекулярной скоростью около $v_1 = 370$ км/с с направлением вектора в сторону созвездия Льва с галактическими координатами $l_s = 264^\circ$ и $b_s = 48^\circ$ [6].

В дальнейшем анализе связем наблюдателя и соответствующую ИСО₁ с Солнечной системой, а ИСО₂ с КО, движущимся по эллиптической орбите вокруг Солнца. Тогда скорость v_1 будет соответствовать пекулярной скорости движения Солнечной системы относительно ФП или реликтового излучения, а скорость v_0 будет соответствовать скорости движения произвольного КО по Солнечной системе.

Пусть объект движется по эллиптической траектории, его скорости v_0 и проекции скорости на выбранные большую и малую полуоси эллиптической траектории v_a и v_b в любой момент времени можно рассчитать с помощью уравнения Кеплера [16]:

$$E - \varepsilon \sin E = \frac{2\pi}{T}(t - t_0), \quad \operatorname{tg} \frac{\theta}{2} = \sqrt{\frac{1 + \varepsilon}{1 - \varepsilon}} \operatorname{tg} \frac{E}{2}, \quad r = \frac{a(1 - \varepsilon^2)}{1 + \varepsilon \cos \theta}, \quad (12)$$

$$v_0 = \sqrt{\mu \left(\frac{2}{r} - \frac{1}{a} \right)}, \quad v_a = -\frac{na^2}{r} \sin E, \quad v_b = \frac{na^2}{r} \sqrt{1 - \varepsilon^2} \cos E, \quad (13)$$

где ε – эксцентриситет орбиты, t_0 – момент прохождения перигея Р, E – эксцентрическая аномалия, θ – истинная аномалия, r – расстояние от Солнца до объекта, $\mu = GM$ – гравитационный параметр Солнца, a – большая полуось орбиты.

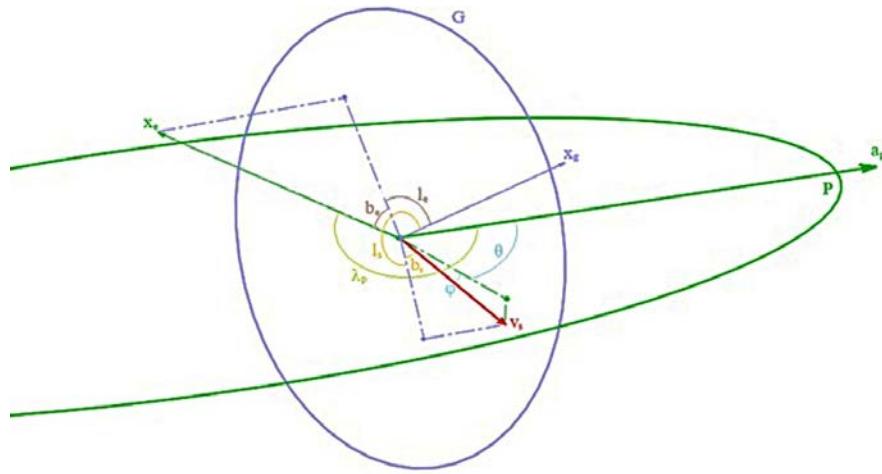


Рис. 1. Р – перигелий эллиптической орбиты вокруг Солнца, x_e – ось, направленная на точку весеннего равноденствия, a_p – большая полуось эллиптической орбиты, направленная в сторону перигелия, G – плоскость галактики Млечный Путь, x_g – ось, направленная в сторону центра галактики, v_s – вектор пекулярной скорости Солнца.

Необходимое для определения соотношения временных интервалов скалярное произведение векторов скоростей ($\vec{\beta}_0, \vec{\beta}_1$) определяется двумя углами (рис. 1): углом φ между вектором пекулярной скорости Солнца и плоскостью эклиптики, и углом θ между осью a_p и проекции вектора пекулярной скорости Солнца на плоскость эклиптики. Положение в галактической системе координат плоскости эклиптики и вектора пекулярной скорости Солнца задает величину угла $\varphi = 11^\circ$. Тогда соотношение для собственных интервалов времени (11) при ненулевой пекулярной скорости Солнца может быть записано в следующем виде:

$$dt_{\text{аниз}} = dt_2 = \frac{\sqrt{1 - \beta_0^2}}{1 + \beta_\perp \cos \varphi (\beta_{||} \cos \theta - \beta_\perp \sin \theta)} dt_1, \quad (14)$$

где $\beta_{||}$ – проекция нормированной скорости объекта относительно Солнца на большую полуось эллиптической траектории (ось a_p), β_\perp – проекция нормированной скорости объекта относительно Солнца на малую полуось эллиптической траектории (ось, ортогональная a_p в плоскости орбиты).

В дальнейшем анализ этот вариант будет иметь пометку «анизотропный», так как соответствует движению КО в эквивалентном ФП с дипольной анизотропией.

Случай, когда вектор пекулярной скорости Солнца ортогонален плоскости орбиты ($\varphi = 90^\circ$), соответствует обычному релятивистскому замедлению времени относительно неподвижного наблюдателя в изотропном ФП. Тогда выражение (14) принимает классический вид:

$$dt_{\text{изот}} = dt_2(\varphi = 90^\circ) = \sqrt{1 - \beta_0^2} dt_1. \quad (15)$$

В дальнейшем анализ этот вариант с пометкой «изотропный» будет использоваться для оценки ускорения хода циклически движущихся физических процессов в пространстве с дипольной анизотропией.

Интегрируя выражения (14) и (15) при движении по эллиптической орбите, можно получить величину разности показания часов на Солнце и на КО, врачающимся вокруг Солнца, за один период:

$$\delta t_{\text{аниз}} = \int_0^T \frac{\sqrt{1 - \beta_0^2}}{1 + \beta_\perp \cos \varphi (\beta_{||} \cos \theta - \beta_\perp \sin \theta)} dt_1 - T, \quad (16)$$

$$\delta t_{\text{изот}} \sqrt{1 - \beta_0^2} dt_1 - T, \quad (17)$$

где T – период вращения по эллиптической орбите.

Тогда само ускорение хода времени на КО в пространстве с дипольной анизотропией можно оценить, сравнивая значения временных интервалов в выражениях (14) и (15):

$$\delta\tau = \int_0^T \sqrt{1 - \beta_0^2} \left(\frac{1}{1 + \beta_{\perp} \cos \varphi (\beta_{||} \cos \theta - \beta_{\perp} \sin \theta)} - 1 \right) dt_1. \quad (18)$$

Ускорение хода времени на КО в пространстве с дипольной анизотропией приводит к появлению дополнительной ошибки определения координат КО, которая накапливается с каждым новым витком движения КО по орбите, а также может в больших пределах изменяться при движении КО в течение одного витка. Оценить эту дополнительную ошибку можно как:

$$\delta r = \int_0^T v_0 \sqrt{1 - \beta_0^2} \left(\frac{1}{1 + \beta_{\perp} \cos \varphi (\beta_{||} \cos \theta - \beta_{\perp} \sin \theta)} - 1 \right) dt_1. \quad (19)$$

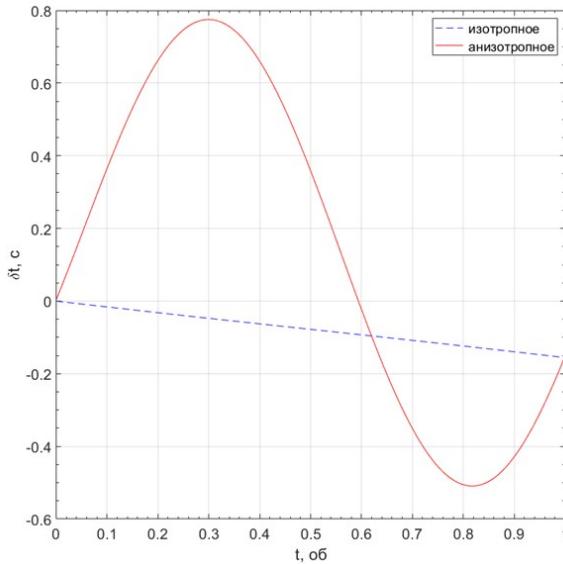


Рис. 2. Разность показания часов $\delta t_{\text{аниз}}$ и $\delta t_{\text{изот}}$ на Земле относительно Солнца при ее движении по орбите.

Ускорение хода времени на КО и соответствующую дополнительную ошибку определения координат КО в пространстве с дипольной анизотропией можно определить для любого промежутка времени движения, заменяя пределы интегрирования в выражениях (18) и (19) на необходимые.

3. Ускорение хода циклически движущихся физических процессов в пространстве с дипольной анизотропией на примере реальных объектов

Произведем расчеты разности показания часов $\delta t_{\text{аниз}}$ и $\delta t_{\text{изот}}$ для объектов с различными гелиоцентрическими орбитами. В качестве объектов для анализа выбраны планеты Земля [18] и Меркурий [19], а также самый быстрый искусственный спутник в Солнечной системе – солнечный зонд «Паркер» [20]. В табл. 1 приведены параметры орбит для данных объектов.

На рис. 2 представлены результаты расчетов разности показания часов $\delta t_{\text{аниз}}$ и $\delta t_{\text{изот}}$ на Земле относительно Солнца при ее движении по орбите. В начальный момент времени Земли находится в перигелии. Земля двигается почти по круговой орбите, эксцентриситет которой близок к нулю. Величина орбитальной скорости Земли изменяется в небольших пределах. Результаты представлены для пространства с дипольной анизотропией, а также для «изотропного» варианта с обычным релятивистским замедлением времени относительно неподвижного наблюдателя. На

	Земля [18]	Меркурий [19]	«Паркер» [20]
Период обращения T, сут.	365,3	88	88
Расстояние до перигелия r_p, млн. км	147,1	46	69
Расстояние до афелия r_a, млн. км	152,1	69,8	109,3
Эклиптическая долгота перигелия λ_p, °	103	78	240
Угол θ, °	69	94	68
Эксцентриситет ϵ	0,017	0,206	0,881
Средняя скорость v_{av}, км/с	29,8	47,4	36,5
Максимальная скорость v_{max}, км/с	30,3	59,0	190,5

Таблица 1. Параметры гелиоцентрических орбит для различных объектов.

одном полном обороте часы на Земле начинают отставать на $\delta t_{\text{аниз}} = 152,1$ мс. В «изотропном» приближении часы на Земле отставали бы на $\delta t_{\text{изот}} = 155,7$ мс. Учет дипольной анизотропии пространства на каждом одном полном витке Земли вокруг Солнца вносит изменение в разность показания часов $\delta\tau = 3,6$ мс относительно «изотропного» случая. Это приводит к появлению накапливающейся дополнительной ошибки определения координат КО на одном полном витке $\delta r = 1,0$ км. При движении в течение одного витка максимальное изменение разности показания часов на Земле и Солнце вследствие дипольной анизотропии пространства $\delta\tau_{\text{max}} = 822,9$ мс достигается через время $0,31T$. В этот момент максимальная дополнительная ошибка определения координат КО будет достигать $\delta r_{\text{max}} = 24,8$ км.

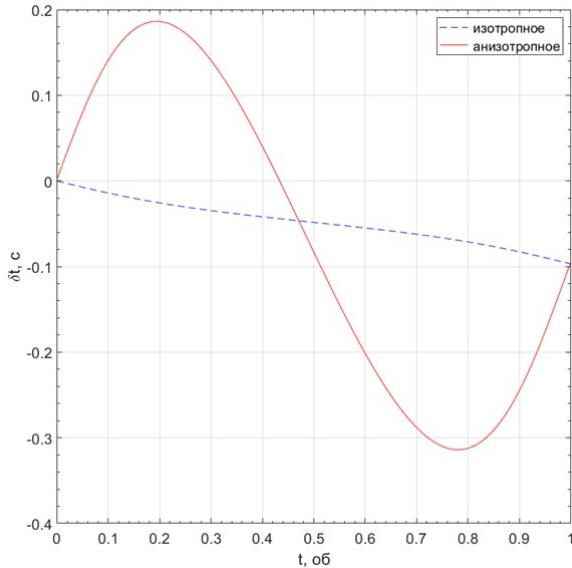


Рис. 3. Разность показания часов $\delta t_{\text{аниз}}$ и $\delta t_{\text{изот}}$ на Меркурии относительно Солнца при ее движении по орбите.

На рис. 3 представлены результаты расчетов разности показания часов $\delta t_{\text{аниз}}$ и $\delta t_{\text{изот}}$ на Меркурии относительно Солнца при его движении орбите. В начальный момент времени Меркурий находится в перигелии. Меркурий двигается по эллиптической орбите с максимальным эксцентриситетом и максимальной орбитальной скоростью среди планет Солнечной системы. На одном полном обороте часы на Меркурии начинают отставать на $\delta t_{\text{аниз}} = 95,1$ мс. В «изотропном» приближении часы на Меркурии отставали бы на $\delta t_{\text{изот}} = 96,9$ мс. Учет дипольной анизотропии пространства на каждом одном полном витке Меркурия вокруг Солнца вносит изменение в

разность показания часов $\delta\tau = 1,8$ мс относительно «изотропного» случая. Это приводит к появлению накапливающейся дополнительной ошибки определения координат КО на одном полном витке $\delta r = 7,3$ км. При движении в течение одного витка максимальное изменение разности показания часов на Меркурии и Солнце вследствие дипольной анизотропии пространства $\delta\tau_{\max} = 211,9$ мс достигается через время $0,21T$. В этот момент максимальная дополнительная ошибка определения координат КО будет достигать $\delta r_{\max} = 12,0$ км.

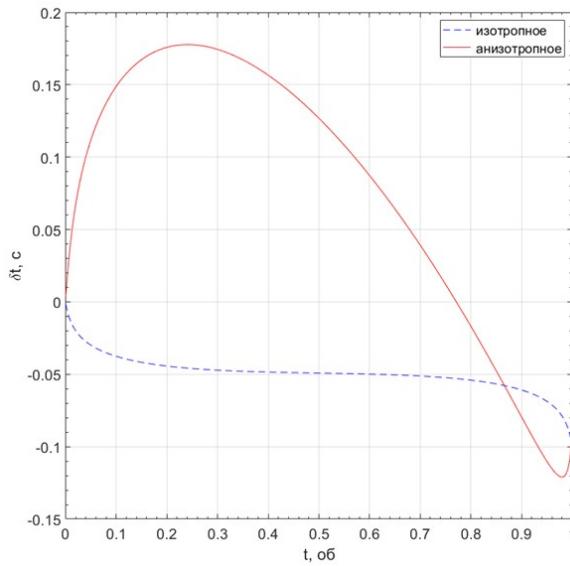


Рис. 4. Разность показания часов $\delta t_{\text{аниз}}$ и $\delta t_{\text{изот}}$ на солнечном зонде «Паркер» относительно Солнца при ее движении по орбите.

На рис. 4 представлены результаты расчетов разности показания часов $\delta t_{\text{аниз}}$ и $\delta t_{\text{изот}}$ на солнечном зонде «Паркер» относительно Солнца при его движении орбите. В начальный момент времени «Паркер» находится в перигелии. «Паркер» двигается по сильно вытянутой эллиптической орбите с максимальным эксцентриситетом и максимальной орбитальной скоростью среди искусственных объектов Солнечной системы. На одном полном обороте часы на «Паркере» начинают отставать на $\delta t_{\text{аниз}} = 92,9$ мс. В «изотропном» приближении часы на Земле отставали бы на $\delta t_{\text{изот}} = 98,3$ мс. Учет дипольной анизотропии пространства на каждом одном полном витке «Паркера» вокруг Солнца вносит изменение в разность показания часов $\delta\tau = 5,4$ мс относительно «изотропного» случая. Это приводит к появлению накапливающейся дополнительной ошибки определения координат КО на одном полном витке $\delta r = 23,6$ км. При движении в течение одного витка максимальное изменение разности показания часов на «Паркере» и Солнце вследствие дипольной анизотропии пространства $\delta\tau_{\max} = 223,7$ мс достигается через время $0,25T$. В этом момент максимальная дополнительная ошибка определения координат КО будет достигать $\delta r_{\max} = 22,6$ км.

В табл. 2 сведены рассчитанные значения разности показания часов для Земли, Меркурия и солнечного зонда «Паркер».

Заключение

Изотропное ФП, в котором наблюдатель движется с постоянной скоростью, эквивалентно пространству с дипольной анизотропией. Часы, циклически движущиеся в пространстве с подобной дипольной анизотропией, могут осуществлять ускоренный ход в сравнении с аналогичными часами, движущимися в обычном ФП. Данный эффект был рассмотрен на примере естественных и искусственных объектов, движущихся по различным гелиоцентрическим орбитам, с учетом

	Земля	Меркурий	«Паркер»
Разность показания часов относительно Солнца на одном полном витке (анизотропное приближение) $\delta t_{\text{аниз}}$, мс	-152,1	-95,1	-92,9
Разность показания часов относительно Солнца на одном полном витке (изотропное приближение) $\delta t_{\text{изот}}$, мс	-155,7	-96,9	-98,3
Изменение в разности показания часов на КО на одном полном витке $\delta\tau$, мс	3,6	1,8	5,4
Ошибка определения координат КО на одном полном витке δr , км	1,0	7,3	23,6
Временное положение на витке с максимальной разностью показания часов на КО t_{max} , об	0,31	0,21	0,25
Максимальное изменения разности показания часов в течение одного витка $\delta\tau_{\text{max}}$, мс	822,9	211,9	223,7
Максимальная ошибка определения координат КО в течение одного витка δr_{max} , км	24,8	12,0	22,6

Таблица 2. Рассчитанные значения разности показания часов для Земли, Меркурия и солнечного зонда «Паркер».

нену-левой пекулярной скорости Солнечной системы. Результаты расчетов, приведенные в табл. 2, показали циклическое изменение разности показания часов при движении по орбите, а также изменение разности показания часов на КО на одном полном витке при учете дипольной анизотропии пространства. Для объектов Солнечной системы накапливающееся отклонение показаний часов определяется периодом вращения вокруг Солнца, эллиптичностью орбиты и орбитальной скоростью и составляет единицы миллисекунд на одном полном витке. С отклонением показаний часов связана дополнительная ошибка определения координат КО, зависящая так-же от орбитальной скорости КО. Для наиболее скоростных КО ошибка определения координат может достигать десятков километров. Исследованные эффекты требует обязательного учета при контроле траектории и управлении движением пилотируемых КЛА, особенно при межпланетном перемещении на длительных промежутках времени.

Список литературы

- Гладышев В.О., Морозов А.Н. Низкочастотный оптический резонанс в многолучевом интерферометре Фабри-Перо. *Письма в Журнал технической физики*, 1993, т. 19, № 14, с. 38–42.
- Gladyshev V.O., Morozov A.N. The theory of Fabry-Perot interferometer in a gravitational-wave experiment. *Journal of Moscow Physical Society*, 1996, vol. 6. pp. 209–222.
- Гладышев В.О. *Необратимые электромагнитные процессы в задачах астрофизики: физико-технические проблемы*. Москва: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2000, с. 276.
- Гладышев В.О., Тиунов П.С. Математическое моделирование процессов синхронной регистрации сигналов детекторами, движущимися в разных квазинерциальных системах отсчета. *Вестник Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана. Серия «Естественные науки»*, 2010, № 2, с. 16–30.
- D’Inverno R. *Introducing Einstein’s relativity*. Oxford: Oxford University Press, 1992, p. 383.
- Kogut A. et al. Dipole anisotropy in the COBE differential microwave radiometers first-year sky maps. *The Astrophysical Journal*, 1993, vol. 419, pp. 1–6.
- Pizzella G. Correlations among gravitational wave and neutrino detector data during SN1987A. *Il Nuovo Cimento B (1971-1996)*, 1990, vol. 105, pp. 993–1007.

8. Pizzella G. Correlation between gravitational-wave detectors and particle detectors during SN1987A. *Il Nuovo Cimento C*, 1992, vol. 15, pp. 931-941.
9. Adam T. et al. Measurement of the neutrino velocity with the OPERA detector in the CNGS beam. *Journal of High Energy Physics*, 2012, vol. 2012, no. 10, pp. 1-37.
10. MacMillan D.S. Quasar apparent proper motion observed by geodetic VLBI net-works, 2003. <https://doi.org/10.48550/arXiv.astro-ph/0309826>.
11. McClure M.L., Dyer C.C. Anisotropy in the Hubble constant as observed in the HST extragalactic distance scale key project results. *New Astronomy*, 2007, vol. 12, no. 7, pp. 533-543.
12. Струков И.А., Брюханов А.А., Скулачев Д.П., Сажин М.В. Анизотропия фонового радиоизлучения. *Письма в Астрономический журнал*, 1992, т. 18, № 5, с. 387-395.
13. Smoot G.F. et al. Structure in the COBE differential microwave radiometer first-year maps. *Astrophysical Journal*, 1992, vol. 396, pp. L1-L5.
14. Hinshaw G. et al. Three-year Wilkinson Microwave Anisotropy Probe (WMAP) observations: Temperature analysis. *The Astrophysical Journal Supplement Series*, 2007, vol. 170, no. 2, p. 288.
15. Эйнштейн А. О принципе относительности и его следствиях. *Сборник научных трудов*, т. 1, Москва: Наука, 1965, с. 65-114.
16. Охочимский Д.Е., Сихарулидзе Ю.Г. *Основы механики космического полета*. Москва: Наука, 1990, с. 448.
17. Reid M.J., Brunthaler A. The proper motion of Sagittarius A*. II. The mass of Sagittarius A. *The Astrophysical Journal*, 2004, vol. 616, no. 2, pp. 872.
18. Williams D.R. Earth fact sheet [Электронный ресурс]. <https://nssdc.gsfc.nasa.gov/planetary/factsheet/earthfact.html>. (дата обращения: 17.04.2025).
19. Williams D.R. Mercury fact sheet [Электронный ресурс]. <https://nssdc.gsfc.nasa.gov/planetary/factsheet/mercuryfact.html>. (дата обращения: 17.04.2025).
20. Parker solar probe [Электронный ресурс]. <https://parkersolarprobe.jhuapl.edu>. (дата обращения: 17.04.2025).

References

1. Gladyshev V.O., Morozov A.N. Low-frequency optical resonance in a Fabry-Perot multibeam interferometer. *Letters to the Journal of Technical Physics*, 1993, vol. 19, no. 14, pp. 38-42. (in Russian).
2. Gladyshev V.O., Morozov A.N. The theory of Fabry-Perot interferometer in a gravitational-wave experiment. *Journal of Moscow Physical Society*, 1996, vol. 6. pp. 209-222.
3. Gladyshev V.O. *Irreversible electromagnetic processes in astrophysics problems: physical and technical problems*. Moscow: Bauman Moscow State Technical University Publishing House, 2000, p. 276.
4. Gladyshev V.O., Tiunov P.S. Mathematical modeling of the processes of synchronous registration of signals by detectors moving in different quasi-inertial reference frames. *Bulletin of Bauman Moscow State Technical University. Series "Natural Sciences"*, 2010, no. 2, pp. 16-30.
5. D'Inverno R. *Introducing Einstein's relativity*. Oxford: Oxford University Press, 1992, p. 383.
6. Kogut A. et al. Dipole anisotropy in the COBE differential microwave radiometers first-year sky maps. *The Astrophysical Journal*, 1993, vol. 419, pp. 1-6.
7. Pizzella G. Correlations among gravitational wave and neutrino detector data during SN1987A. *Il Nuovo Cimento B (1971-1996)*, 1990, vol. 105, pp. 993-1007.
8. Pizzella G. Correlation between gravitational-wave detectors and particle detectors during SN1987A. *Il Nuovo Cimento C*, 1992, vol. 15, pp. 931-941.
9. Adam T. et al. Measurement of the neutrino velocity with the OPERA detector in the CNGS beam. *Journal of High Energy Physics*, 2012, vol. 2012, no. 10, pp. 1-37.
10. MacMillan D.S. Quasar apparent proper motion observed by geodetic VLBI net-works, 2003. <https://doi.org/10.48550/arXiv.astro-ph/0309826>.
11. McClure M.L., Dyer C.C. Anisotropy in the Hubble constant as observed in the HST extragalactic distance scale key project results. *New Astronomy*, 2007, vol. 12, no. 7, pp. 533-543.

12. Strukov I.A., Bryukhanov A.A., Skulachev D.P., Sazhin M.V. Anisotropy of the background radio emission. *Letters to the Astronomical Journal*, 1992, vol. 18, no. 5, pp. 387-395. (in Russian).
13. Smoot G.F. et al. Structure in the COBE differential microwave radiometer first-year maps. *Astrophysical Journal*, 1992, vol. 396, pp. L1-L5.
14. Hinshaw G. et al. Three-year Wilkinson Microwave Anisotropy Probe (WMAP) observations: Temperature analysis. *The Astrophysical Journal Supplement Series*, 2007, vol. 170, no. 2, p. 288.
15. Einstein A. On the principle of relativity and its consequences. *Collection of scientific works*, vol. 1, Moscow: Nauka, 1965, pp. 65-114. (in Russian).
16. Okhotsimskiy D.E., Sikharulidze Yu.G. *Fundamentals of space flight mechanics*. Moscow: Nauka, 1990, p. 448.
17. Reid M.J., Brunthaler A. The proper motion of Sagittarius A*. II. The mass of Sagittarius A. *The Astrophysical Journal*, 2004, vol. 616, no. 2, pp. 872.
18. Williams D.R. Earth fact sheet [Electronic resource]. https://nssdc.gsfc.nasa.gov/planetary/fact_sheet/earthfact.html. (date of reference: 17.04.2025).
19. Williams D.R. Mercury fact sheet [Electronic resource]. https://nssdc.gsfc.nasa.gov/planetary/fact_sheet/mercuryfact.html. (date of reference: 17.04.2025).
20. Parker solar probe [Electronic resource]. <https://parkersolarprobe.jhuapl.edu>. (date of reference: 17.04.2025).

Авторы

Гладышев Владимир Олегович, д.ф.-м.н., профессор, Московский Государственный Университет им. Н.Э. Баумана, улица 2-я Бауманская, д. 5, стр. 1, г. Москва, 105005, Россия.
E-mail: gladyshev@bmstu.ru

Николаев Павел Петрович, к.ф.-м.н., вед. инженер, Московский Государственный Университет им. Н.Э. Баумана, улица 2-я Бауманская, д. 5, стр. 1, г. Москва, 105005, Россия.
E-mail: ppn@bmstu.ru

Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:

Гладышев В. О., Николаев П. П. Расчёт пространственно-временных координат космических объектов в пространстве с дипольной анизотропией. *Пространство, время и фундаментальные взаимодействия*. 2025. № 2. С. 21–31.

Authors

Gladyshev Vladimir Olegovich, Full Doctor, Professor, Bauman Moscow State Technical University, 2-nd Baumanskaya str., 5-1, Moscow, 105005, Russia.
E-mail: gladyshev@bmstu.ru

Nikolaev Pavel Petrovich, Ph.D., Senior Engineer, Bauman Moscow State Technical University, 2-nd Baumanskaya str., 5-1, Moscow, 105005, Russia.
E-mail: ppn@bmstu.ru

Please cite this article in English as:

Gladushev V. O., Nikolaev P. P. Computing spacetime coordinates of outer space objects in a space characterized by dipole anisotropy. *Space, Time and Fundamental Interactions*, 2025, no. 2, pp. 21–31.