

УДК 520.607

Исследование эффектов второго порядка по гравитационному полю и возможности детектирования темной материи в космических экспериментах с атомными часами

Литвинов Дмитрий Александрович^{1,2} litvirq@yandex.ru

SPIN-код: 7017-1441

Пилипенко Сергей Владимирович¹

spilipenko@asc.rssi.ru

¹Астрокосмический центр ФИАН, Москва, Россия

²МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия

Аннотация. Работа посвящена теоретическому исследованию возможности экспериментальной проверки общей теории относительности (ОТО) и эйнштейновского принципа эквивалентности (ЭПЭ) с использованием атомных часов, размещаемых на космических аппаратах. Построена модель преобразования частоты сигналов в экспериментах с компенсацией нерелятивистского эффекта Доплера, учитывающая релятивистские поправки второго порядка по гравитационному потенциалу и четвертого порядка по скорости аппарата. Показано, что с помощью космических аппаратов, оснащенных высокостабильными атомными часами, можно достичь существенного повышения точности измерения постньютоновских параметров. Также рассматривается потенциал подобных экспериментов для измерения спина Солнца и поиска темной материи. Предложены оптимальные орбитальные конфигурации для ряда сценариев.

Ключевые слова: гравитационное замедление времени, атомные часы, темная материя

Введение. Поиск отклонений от эйнштейновского принципа эквивалентности и основанной на нем ОТО имеет огромное значение как для фундаментальной физики, так и для задачи построения глобальных навигационных спутниковых систем нового поколения [1]. Одним из следствий принципа эквивалентности является эффект гравитационного замедления времени, или гравитационного смещения частоты, который имеет практическое значение и для существующих навигационных систем ГЛОНАСС, GPS, Galileo, Beidou. Отклонение величины гравитационного замедления времени от предсказываемой в рамках ОТО является неизбежным следствием большинства теорий объединенных взаимодействий, вследствие чего прецизионное измерение данного эффекта является сферой активного экспериментального исследования [2].

Методы и материалы; результаты. Атомные часы являются необходимым элементом значительного числа экспериментов по поиску отклонений от ОТО. В связи с недавним прогрессом в технике их создания (ростом стабильности и точности до 10^{-18} и выше, в терминах относительной частоты) в ближайшее десятилетие ожидается увеличение на несколько порядков точности уже известных экспериментов, а также появляется возможность проведения измерений качественно нового типа. Разработка теоретического

базиса для планирования и интерпретации результатов подобных экспериментов, исследование доступных для измерения эффектов и оценка предельной точности их измерения являются поэтому крайне важными задачами.

В работе разработана теоретическая модель, описывающая преобразование частоты сигналов в космических экспериментах с использованием схемы компенсации нерелятивистского эффекта Доплера и учитывающая эффекты 2-го порядка по гравитационному полю и 4-го порядка по скорости космических аппаратов. С ее помощью обоснована возможность и оценена точность измерения ряда параметров, характеризующих отклонения от ОТО в рамках метрических и неметрических теорий гравитации, с помощью космических аппаратов, оснащенных различными типами атомных часов. Например, параметр ϵ , характеризующий отклонение от ЭПЭ, в гравитационном поле Земли может быть измерен с точностью $\sim 10^{-10}$, что на 5 порядков лучше результата GREAT [3], а постньютоновский параметр γ — с точностью $\sim 10^{-8}$, что на 3 порядка лучше результата Cassini [4]. Также появляется возможность проведения принципиально нового типа измерения спина Солнца [5] и детектирования темной материи, состоящей из легких скалярных частиц [6]. Для некоторых из этих экспериментов нами найдены оптимальные конфигурации орбит космических аппаратов.

Заключение. Проведенное исследование демонстрирует высокую значимость и перспективность использования современных атомных часов в космических экспериментах по тестированию фундаментальных принципов гравитационной физики. Построенная нами модель позволяет не только уточнить существующие оценки отклонений от ОТО, но и предлагает новые методы измерения ключевых физических параметров с беспрецедентной точностью. Полученные результаты могут служить основой для проектирования будущих миссий, направленных на проверку метрических и неметрических теорий гравитации, исследование спина Солнца и поиск проявлений темной материи. Все это делает подобные эксперименты важным направлением в развитии как фундаментальной науки, так и прикладных технологий, включая системы навигации нового поколения.

Список источников

- [1] Damour T. Theoretical aspects of the Equivalence principle. *Classical and Quantum Gravity*, 2012, vol. 29, art. no. 184001.
- [2] Derevianko A. et al. Fundamental physics with a state-of-the-art optical clock in space. *Quantum Science and Technology*, 2022, vol. 7, no. 4, art. no. 044002.
- [3] Litvinov D., Pilipenko S. Testing the Einstein equivalence principle with two Earth-orbiting clocks. *Classical and Quantum Gravity*, 2021, vol. 38, no. 13, art. no. 135010.
- [4] Litvinov D.A. Prospects for Measuring the Post-Newtonian Parameter Using Two Satellites Equipped with Highly Stable Atomic Clocks. *Astronomy Letters*, 2024, vol. 50, no. 4, pp. 221–229.
- [5] Pilipenko S.V. et al. Measuring the Sun's Angular Momentum Using the Gravitomagnetic Frequency Shift Effect. *Bulletin of the Lebedev Physics Institute*, 2024, vol. 51, no. 2, pp. 70–76.

- [6] Pilipenko S.V. et al. Principles of the wave dark matter detection in gravitational redshift experiments in the Solar System. *Astronomy Reports*, 2024, vol. 68, no. 3, pp. 300–311.

Exploring gravitational effects of second-order in the gravitational potential and the possibility of dark matter detection in space-based experiments with atomic clocks

Litvinov Dmitry Aleksandrovich^{1,2}

litvirq@yandex.ru

SPIN-code: 7017-1441

*Pilipenko Sergey Vladimirovich*¹

spilipenko@asc.rssi.ru

¹ASC LPI, Moscow, Russia

²BMSTU, Moscow, Russia

Abstract. The paper is devoted to a theoretical study of the possibility of experimental verification of the general theory of relativity (GR) and the Einstein equivalence principle (EEP) using atomic clocks placed on spacecraft. A model of signal frequency conversion in experiments with compensation for the nonrelativistic Doppler effect is constructed, taking into account relativistic corrections of the second order in the gravitational potential and the fourth order in the velocity of the spacecraft. It is shown that using spacecraft equipped with highly stable atomic clocks, it is possible to achieve a significant increase in the accuracy of measuring post-Newtonian parameters. The potential of such experiments for measuring the spin of the Sun and searching for dark matter is also considered. Optimal orbital configurations are proposed for a number of scenarios.

Keywords: gravitational time dilation, atomic clocks, dark matter

Introduction. The search for deviations from Einstein's equivalence principle (EEP) and general relativity (GR) based on it is of great importance both for fundamental physics and for the task of constructing a new generation of global navigation satellite systems [1]. One of the consequences of the equivalence principle is the effect of gravitational time dilation, or gravitational frequency shift, which is of practical importance for the existing navigation systems GLONASS, GPS, Galileo, Beidou. The deviation of the magnitude of gravitational time dilation from that predicted within the framework of GR is an inevitable consequence of most theories of unified interactions, as a result of which the precision measurement of this effect is an area of active experimental research [2].

Methods and materials; results. Atomic clocks are an essential element of a significant number of experiments searching for deviations from GR. Due to recent progress in the technology of their creation (increased stability and accuracy up to 10^{-18} and higher, in terms of relative frequency), an increase in the accuracy of already known experiments by several orders of magnitude is expected in the next decade, and the possibility of conducting qualitatively new types of measurements will also appear. Laying a theoretical basis for planning and interpreting the results of such experiments, studying the effects accessible for measurement and assessing

the ultimate accuracy of their measurement are therefore extremely important tasks. We have constructed a theoretical model describing the conversion of signal frequencies in space experiments using a compensation scheme for the nonrelativistic Doppler effect and taking into account the effects of the 2nd order in the gravitational field and the 4th order in the velocity of spacecraft. With its help, the possibility is substantiated and the accuracy of measuring a number of parameters characterizing deviations from GR within the framework of metric and nonmetric theories of gravitation, using spacecraft equipped with various types of atomic clocks. For example, the parameter ϵ , which characterizes the deviation from EEP, in the gravitational field of the Earth can be measured with an accuracy of $\sim 10^{-10}$, which is 5 orders of magnitude better than the GREAT result [3], and the post-Newtonian parameter γ — with an accuracy of $\sim 10^{-8}$, which is 3 orders of magnitude better than the Cassini result [4]. It also becomes possible to conduct a fundamentally new type of measurement of the Sun's spin [5] and detect dark matter consisting of light scalar particles [6]. For some of these experiments, we have found optimal configurations of spacecraft orbits.

Conclusion. The conducted research demonstrates the high significance and prospects of using modern atomic clocks in space experiments to test the fundamental principles of gravitational physics. The model we have constructed allows us not only to refine the existing estimates of deviations from the general theory of relativity, but also offers new methods for measuring key physical parameters with unprecedented accuracy. The results obtained can serve as a basis for designing future missions aimed at testing metric and non-metric theories of gravity, studying the spin of the Sun and searching for manifestations of dark matter. All this makes such experiments an important direction in the development of both fundamental science and applied technologies, including new-generation navigation systems.

References

- [1] Damour T. Theoretical aspects of the Equivalence principle. *Classical and Quantum Gravity*, 2012, vol. 29, art. no. 184001.
- [2] Derevianko A. et al. Fundamental physics with a state-of-the-art optical clock in space. *Quantum Science and Technology*, 2022, vol. 7, no. 4, art. no. 044002.
- [3] Litvinov D., Pilipenko S. Testing the Einstein equivalence principle with two Earth-orbiting clocks. *Classical and Quantum Gravity*, 2021, vol. 38, no. 13, art. no. 135010.
- [4] Litvinov D.A. Prospects for Measuring the Post-Newtonian Parameter Using Two Satellites Equipped with Highly Stable Atomic Clocks. *Astronomy Letters*, 2024, vol. 50, no. 4, pp. 221–229.
- [5] Pilipenko S.V. et al. Measuring the Sun's Angular Momentum Using the Gravitomagnetic Frequency Shift Effect. *Bulletin of the Lebedev Physics Institute*, 2024, vol. 51, no. 2, pp. 70–76.
- [6] Pilipenko S.V. et al. Principles of the wave dark matter detection in gravitational redshift experiments in the Solar System. *Astronomy Reports*, 2024, vol. 68, no. 3, pp. 300–311.