

УДК 521.9

Прецизионное измерение гравитационного смещения частоты электромагнитных сигналов в миссии «РадиоАстрон»

Руденко Валентин Николаевич^{1(*)}

rvn@sai.msu.ru

*Белоненко Алексей Вячеславич*¹

av.belonenko@physics.msu.ru

*Гусев Андрей Викторович*¹

mta-kuskovo@mail.ru

Гурин Федор Сергеевич^{1,2}

fedor.gurin@mail.ru

*Попов Сергей Михайлович*¹

serg@sai.msu.ru

¹ МГУ имени М.В. Ломоносова, Государственный астрономический институт имени П.К. Штернберга, Москва, Россия

² МИРЭА — Российский технологический университет, Москва, Россия

Аннотация. Представлены результаты прецизионного измерения гравитационного смещения частоты электромагнитных сигналов в миссии космического радиотелескопа «РадиоАстрон». Предложена методика компенсации эффекта Доплера первого порядка и учета остаточных возмущающих факторов, таких как приливные потенциалы Луны и Солнца, несферичность Земли и атмосферные эффекты. Показано, что параметр нарушения (отклонение от формулы «редшифт» в общей теории относительности) составил $1,57 \pm 3,96 \cdot 10^{-5}$, что подтверждает предсказания ОТО с высокой точностью. Сделан вывод о значимости таких измерений для проверки принципа эквивалентности Эйнштейна.

Ключевые слова: гравитационное смещение частоты, ОТО, принцип эквивалентности, «РадиоАстрон», прецизионные измерения «редшифт»

Введение. Гравитационное смещение частоты электромагнитных сигналов является одним из ключевых эффектов экспериментальных оснований общей теории относительности (ОТО) и важным аспектом принципа эквивалентности Эйнштейна. Значимость работы заключается в повышенной точности измерений этого эффекта, что позволяет тестировать ОТО на фоне альтернативные теории гравитации. В миссии «РадиоАстрон» использовались водородные стандарты частоты со стабильностью ($\Delta f/f = 10^{-14}$) при времени усреднения $\tau \sim 10^2$ с, что обеспечило высокую точность измерений.

Материалы и методы; результаты. Эксперимент проводился на космическом аппарате «Спектр-Р» двигавшемся по вытянутой орбите с апогеем $\sim 350\,000$ км. Для компенсации эффекта Доплера первого порядка применялась схема с чередованием режимов синхронизации коммуникационных сигналов с опорой на бортовой стандарт (однопутевой режим) и с опорой на наземный бортовой стандарт (двухпутевой режим). Основное уравнение измеряемого сигнала включало как гравитационный сдвиг, так и поправки

возмущающих эффектов: релятивистского Доплера второго порядка, приливных потенциалов и атмосферных шумов мерцания. Обработка данных выполнялась с использованием принципа максимального правдоподобия, что позволило минимизировать систематические ошибки. Из сорока гравитационных сеансов по техническим причинам были отобраны 14, которые показали, что параметр нарушения ϵ составил $1,57 \cdot 10^{-5}$ с ошибкой $\pm 3,96 \cdot 10^{-5}$, что согласуется с предсказаниями ОТО.

Заключение. Проведенные измерения подтвердили предсказания общей теории относительности с точностью, превышающей результаты предыдущих экспериментов, таких как GP-A и Galileo. Полученные данные важны для дальнейших исследований в области фундаментальной физики, включая проверку принципа эквивалентности и поиск «новой физики». Результаты также могут быть применены в навигационных системах для учета релятивистских эффектов при расчете траекторий космических аппаратов.

Список источников

- [1] Kardashev N.S. et al. “RadioAstron” — A Telescope with a Size of 300 000 km: Main Parameters and First Observational Results. *Astron. Rep.*, 2013, vol. 57, pp. 153–194. <https://doi.org/10.1134/S1063772913030025>
- [2] Will C.M. The Confrontation between General Relativity and Experiment. *Living Rev. Relativity*, 2014, vol. 17, art. no. 4. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1403.7377>
- [3] Vessot R.F.C. et al. Test of Relativistic Gravitation with a Space-Borne Hydrogen Maser. *Phys. Rev. Lett.*, 1980, vol. 45, pp. 20–34.
- [4] Delva P. et al. Gravitational Redshift Test Using Eccentric Galileo Satellites. *Phys. Rev. Lett.*, 2018, vol. 121, art. no. 231101.
- [5] Herrmann S. et al. Test of the Gravitational Redshift with Galileo Satellites in an Eccentric Orbit. *Phys. Rev. Lett.*, 2018, vol. 121, art. no. 231102.