

ОТЗЫВ официального оппонента
на диссертацию на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук
Белоненко Алексея Вячеславича
на тему «Экспериментальное исследование релятивистских гравитационных
эффектов на космических аппаратах с квантовыми стандартами времени и
частоты» по специальности 1.3.1. Физика космоса, астрономия

Диссертация А.В. Белоненко посвящена экспериментальной проверке принципа эквивалентности Эйнштейна (ПЭЭ) — эмпирической базы ОТО — посредством исследования гравитационного смещения частоты электромагнитных волн или, кратко, «редшифт эффекта». Этот эффект является составной частью (ПЭЭ) и других расширенных релятивистских теорий гравитации, что стимулирует его новые экспериментальные проверки с возрастающей точностью. Работа Белоненко А.В. как раз относится к исследованию такого типа, которое ориентировано не столько на подтверждение основных положений ОТО, сколько на поиск возможных отклонений от этой теории. Диссертация состоит из введения, трех глав, заключения, списка литературы, списка рисунков и таблиц.

Введение содержит типичные информационные пункты: анализ проблемы, обоснование актуальности, четкие формулировки цели, степень новизны исследования и личный вклад соискателя. **В первой главе** решается ключевая проблема методики эксперимента — разработан метод онлайн-компенсации доминирующего доплеровского сдвига первого порядка, затрудняющего фильтрацию гравитационного эффекта из измерительных данных миссии «РадиоАстрон». Проведён системный анализ технических ограничений присущих выбранной конфигурации эксперимента, включая оценки систематических погрешностей связанных с отсутствием возможности одновременной работы в одно-путевом (1w) и двух-путевом (2w) режимах передачи сигнала. Подробно представлен сам математический аппарат компенсации доплеровского эффекта первого порядка. Выполнен детальный сравнительный анализ режимов передачи коммуникационных сигналов между наземной станцией слежения и космическим аппаратом. В результате спрогнозирована

оценка предельной точности измерений гравитационного сдвига на основе стабильности бортового водородного стандарта с привлечением измеренных данных его дисперсии Аллана. Особое внимание уделено компенсации эффекта Доплера второго порядка. Выведена аналитическая формула для остаточного сдвига и предложен метод его подавления с применением стандартных астрономических библиотек (SOFA, astropy). Дана количественная оценка отдельных остаточных погрешностей с наглядной графической визуализацией. В конце главы представлен список ключевых факторов, ограничивающих точность измерения параметра нарушения ϵ . В заключительном разделе описаны заявленные наземные эксперименты по проверке гравитационного красного смещения и перспективы планируемых космических миссий в этой области. **Вторая глава** диссертации сфокусирована на изучении атмосферных факторов, воздействующих на частотную стабильность сигнала, а также шумов стандарта частоты. Последовательно рассматривается воздействие ионосферы и тропосферы, а также оценивается влияние фликкер-шума. В блоке, освещающем вопросы ионосферного воздействия, детально разобраны физические принципы влияния ионизированных слоев атмосферы на прохождение радиоизлучения. Центральное место занимают существующие методики компенсации ионосферных задержек, в том числе с применением модели однослойной тонкой ионосферы. При рассмотрении тропосферных эффектов дана количественная оценка вызываемых ими сдвигов частоты в приложении к миссии «РадиоАстрон». Результаты показали независимость величины тропосферного от частоты для несущих частот «РадиоАстрона»; также выполнено сопоставление различных моделей, описывающих тропосферные задержки. Финальный раздел главы посвящён анализу фликкер-шума в совокупной погрешности измерений. Обсуждаются теоретические аспекты учёта шумов данного класса при проведении высокоточных измерений, нацеленных на тестирование основ фундаментальной физики. **Третья глава** содержит итоговые результаты эксперимента по определению гравитационного смещения частоты в ходе миссии «РадиоАстрон». Целью этой главы является оценка параметра нарушения ϵ по совокупности проведенных гравитационных сеансов, соответствующая критерию максимального правдоподобия. Условие независимых из-

мерений в отдельных сеансах и некоррелированность их шумов, дает логарифм интегрального отношения правдоподобия как сумму вкладов каждого сеанса. Максимально правдоподобная оценка неизвестного параметра ϵ при объединении всех сеансов является решением уравнений на экстремум по отношению сигнал-шум. Это ключевой алгоритм объединения, дающий оптимальную несмещенную и эффективную (минимальную) оценку параметра ϵ . Методика анализа данных включает алгоритм спектрального детектирования частоты и процессов преобразований сигнала в наземном приёмном комплексе. Теоретическая оценка предельной точности измерений выполнена на основе информационной матрицы Фишера и неравенства Крамера-Рао. Диссертантом было проведено также численное моделирование с учётом орбитальной динамики аппарата, которое показало, что погрешность алгоритмической обработки (включая процедуру останковки фазы и частотный анализ) не превышает нестабильности бортового стандарта частоты. Расчёты гравитационного потенциала были выполнены на основе геофизической модели EGM2008. Главным результатом диссертации является оценка параметра нарушения принципа эквивалентности Эйнштейна $\epsilon = (1.57 \pm 3.96) \times 10^{-5}$, полученная по данным экспериментальных сеансов. Полученное значение демонстрирует значительный прогресс точности измерений и устанавливает новые ограничения для экспериментальной проверки гравитационного красного смещения в дальней зоне гравитационного поля Земли на лунной дистанции. **В заключении** перечислены основные результаты, полученные в диссертации.

Автореферат правильно отражает содержание диссертации. Среди замечаний к диссертации можно отметить следующие:

1. Невнятный рисунок 1.2 компоновки радиотелескопа. Много деталей и нет акцента на главные. Расположение блока водородных стандартов, играющих ключевую роль в гравитационном эксперименте, непонятно.
2. Не ясно использовались ли измерительные данные других программ астрофизических наблюдений в режиме 1w с РадиоАстрон.
3. Стр.94: Идет оценка обратных значений на главной диагонали матрицы Фишера. Почему выбрана матрица 3x3?

4. В формуле (3.48) рассматривается кинематический полином до t^3 ; между тем, в формуле (3.18) ряд обрывается на члене t^2 . Из каких соображений возникает это различие?

Вместе с тем, указанные замечания не умаляют значимости диссертационного исследования. Содержание диссертации соответствует специальности 1.3.1. Физика космоса, астрономия (по физико-математическим наукам), а также критериям, определенным пп. 2.1-2.5 положения о присуждении ученых степеней в Московском государственном университете имени М.В.Ломоносова. Сама диссертация оформлена согласно требованиям Положения о совете по защите диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук Московского государственного университета имени М.В.Ломоносова.

Таким образом, соискатель Белоненко Алексей Вячеславович заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.1. Физика космоса, астрономия.

Официальный оппонент:

доктор физико-математических наук, доцент, заведующий кафедрой теории относительности и гравитации Института физики Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Казанский (Приволжский) федеральный университет»

Сушков Сергей Владимирович

07.10.2025

Контактные данные:

тел.: +7-843-233-70-61, e-mail: Sergey.Sushkov@kpfu.ru

Специальность, по которой официальным оппонентом защищена диссертация:

01.04.02 – Теоретическая физика

Адрес места работы: 420008, г. Казань, ул. Кремлевская, д. 16а, ФГАОУ ВО «Казанский (Приволжский) федеральный университет», Институт физики

Тел.: +7-843-233-72-82; e-mail: phys.dep@kpfu.ru

Подпись сотрудника ФГАОУ ВО КФУ С. В. Сушкова удостоверяю: