

**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 посредством исследования гравитационного смещения частоты электромагнитных волн.

В настоящее время для решения проблем ускоренного расширения Вселенной на внегалактических масштабах, а также наличия тёмной материи в галактиках как следствия нарушения ранее предсказанных кривых вращения активно развиваются различные подходы к расширению общей теории относительности. Наиболее перспективным кандидатом считаются модели Хорндески и расширенные модели Хорндески --- наиболее общий теории скалярно-тензорной гравитации с уравнениями поля не выше второго порядка. Важной особенностью подобных моделей является нарушение принципа эквивалентности, когда гравитационная масса становится функцией скалярного поля. Именно по этой причине экспериментальная проверка гравитационных эффектов и поиск отклонений от предсказаний общей теории относительности приобретает особую важность, делая тему диссертации чрезвычайно актуальной. Замечу, что ситуация чем-то похожа на события в начале XXI века, когда развитие моделей гравитации с некомпактными дополнительными измерениями вызвало к жизни необходимость более точной проверки закона Ньютона, и ошибка была уменьшена на несколько порядков. Так и в результате работы А.В. Белоненко и его коллег точность параметра нарушения принципа эквивалентности возросла в 5 раз, что является самым главным результатом обсуждаемой диссертации.

Диссертация состоит из введения, трёх глав, заключения, списка литературы, списка рисунков и таблиц.

В первой главе описан разработанный метод онлайн-компенсации доминирующего доплеровского сдвига первого порядка в данных миссии «РадиоАстрон». Проведен системный анализ технических ограничений эксперимента, включая оценку погрешностей из-за невозможности одновременной работы в одно- и двух-путевом режимах. Особое внимание уделено компенсации доплеровского эффекта второго порядка: выведена формула для остаточного сдвига и предложен метод его подавления с использованием астрономических библиотек. Даны количественная оценка остаточных погрешностей. В конце главы обсуждаются факторы,

ограничивающие потенциальную точность эксперимента, а также обзор наземных экспериментов и перспективных космических миссий по проверке гравитационного красного смещения.

Вторая глава посвящена изучению атмосферных факторов и шумов стандарта частоты, влияющих на измеряемый сигнал. Подробно рассмотрено действие ионосферы, включая физические принципы влияния и методы компенсации задержек с использованием модели однослоиной тонкой ионосферы. Для тропосферных эффектов дана количественная оценка частотных сдвигов применительно к «РадиоАстрону», показавшая их независимость от несущей частоты. Проведено сравнение моделей тропосферных задержек. Заключительный раздел содержит анализ вклада фликкер-шума в общую погрешность измерений и обсуждает методы его учета для задач фундаментальной физики.

Третья глава представляет итоговые результаты эксперимента по измерению гравитационного смещения частоты в миссии «РадиоАстрон». Целью является оценка параметра нарушения ϵ по совокупности гравитационных сеансов. Представлен алгоритм объединения независимых измерений, обеспечивающий оптимальную оценку параметра. Методика включает спектральное детектирование частоты и анализ преобразований сигнала. Теоретическая точность оценена с использованием информационной матрицы Фишера. Главным результатом диссертации является оценка параметра нарушения принципа эквивалентности Эйнштейна $\epsilon = (1.57 \pm 3.96) \times 10^{-5}$, полученная по данным экспериментальных сеансов.

Автореферат правильно отражает содержание диссертации.

Среди замечаний к диссертации можно отметить следующие (выписывают их в порядке следования, а не в порядке значимости):

- В начале параграфа 1.2 хорошо бы добавить, при каких условиях реализуется обсуждаемое в диссертации приближение общей теории относительности, приведя значения гравитационного потенциала на Земле и оговорив, что в этих условиях $g^{0a} = 0$ и, следовательно, обсуждаемая синхронизация часов допустима.

- Было бы логично перед началом обсуждения оговорить используемое разложение: $g_{\mu\nu} = \eta_{\mu\nu} + h_{\mu\nu}$

- В конце параграфа 1.2 утверждается, что «в условиях околоземного пространства ... гравитационный потенциал существенно отличается от поверхностного...» хорошо бы привести конкретные значения, хотя бы по порядку величины. Все-таки, обсуждаемая работа - экспериментальная.

- На стр.29 обсуждается учёт влияния эффекта Доплера в первом и втором порядках теории возмущений. При этом просто утверждается, что вклад на этих порядках существенен. А что происходит дальше? Оценивалось ли (и, если да, то как), до какого порядка вклад эффекта Доплера выше измеряемой величины?

- На стр. 44 обсуждается чередование режимов 1w и 2w. Это чередование помогает устраниТЬ вклад от эффекта Доплера полностью или только в каких-то порядках, и в дальнейшей работе, при учёте следующих порядком, нужно будет искать новые методы?

- В диссертации приводятся различные цифры содержания элементов в атмосфере Земли и температуры на различных высотах. Это экспериментально измеренные данные или модель? Если модель, то как в ней учитывается конкретное расположение НСС (наземных станций слежения), кроме введения их точных координат?

- На стр.87 обсуждается оценка дисперсии Аллана. Судя по описанию в диссертации, эта оценка делалась графически, когда на построенном графике «...определили участок, где дисперсия Аллана остаётся примерно постоянной...» и потом оттуда извлекалась искомая величина. Или был реализован строгий математический алгоритм с оценкой значений производной и поиском участков, где её значение ниже какого-то, наперёд заданного?

- На стр.94 обсуждается анализ значений на главной диагонали обратной матрицы Фишера. В связи с этим стоило бы пояснить, как именно считалась эта обратная матрица: аналитически или численно? Если численно, с какой точностью? И ещё, значение $m=3$ - это так постоянно или это только в обсуждаемом примере?

- Вопрос к формуле (3.18): из каких соображений ряд оборвали на члене t^2 ?

- После формулы (3.40) содержится утверждение, что «... в дальнейшем анализе полагается, что SNR в полосе сигнала оказывается большим...». Это положение является математическим, используемым просто для определённости без потери общности или за этим стоит какая-то физическая реальность?

- В формуле (3.48) рассматривается полином до t^3 . Хотелось бы узнать причину именно такой формы полинома.

- Это не замечание, а пожелание на будущее. Так как вклад дополнительных членов в лагранжиане гравитационного поля можно аппроксимировать с помощью скалярного поля модели Бранса-Дикке, в литературе принято оценивать вклад пост-эйнштейновских членов с помощью характеристик этого скалярного поля (например, его массы). В этом случае появляется способ сравнения вкладов от различных теорий и его экспериментального ограничения.

Оценивая работу в целом, замечу, что диссертация представляет законченное научное исследование, в котором получен конкретный результат мирового уровня: в пять раз улучшена оценка отклонения принципа эквивалентности, лежащего в основе общей теории относительности. Диссертация написана ясным и хорошим русским языком, её приятно читать.

Указанные выше замечания не умаляют значимости диссертационного исследования. Диссертация отвечает требованиям, установленным Московским государственным университетом имени М.В.Ломоносова к работам подобного рода. Содержание диссертации соответствует специальности 1.3.1. Физика

космоса, астрономия, а также критериям, определенным пп. 2.1-2.5 Положения о присуждении ученых степеней в Московском государственном университете имени М.В.Ломоносова, а также оформлена согласно требованиям Положения о совете по защите диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук Московского государственного университета имени М.В.Ломоносова.

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

Официальный оппонент:

доктор физико-математических наук, ведущий научный сотрудник отдела релятивистской астрофизики Государственного астрономического института имени П. К. Штернберга Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова», профессор кафедры квантовой теории и физики высоких энергий Физического факультета Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова»

Алексеев Станислав Олегович

07.10.2025

Контактные данные:

tel.: +7-495-939-16-26, alexeyev@physics.msu.ru

Специальность, по которой официальным оппонентом защищена диссертация:
01.04.02 - Теоретическая физика

Адрес места работы:

119234, г. Москва, Университетский проспект, д. 13, ГАИШ МГУ

Тел.: +7-495-939-28-58; e-mail: director@sai.msu.ru

Подпись сотрудника МГУ С. О. Алексеева удостоверяю: