

ОТЗЫВ  
официального оппонента Барсукова Дмитрия Петровича  
на диссертацию  
Дмитрия Александровича Литвинова  
«Проверка эйнштейновского принципа эквивалентности  
с помощью космического аппарата РадиоАстрон»  
на соискание степени кандидата физико-математических наук  
по специальностям  
01.03.02 – «Астрофизика и звездная астрономия»  
01.04.03 — «Радиофизика»

Проверка предсказаний общей теории относительности (ОТО) и поиск всевозможных отклонений от них является одной из центральных задач современной астрофизики. Такие проверки позволяют наложить ограничения на параметры альтернативных теорий гравитации и возможно дадут ключ к пониманию природы темной энергии. В этом плане очень важно иметь как можно более сильные ограничения на отклонения от ОТО на максимально большом диапазоне расстояний, масс и энергий. Все это делает тему диссертации, несомненно, актуальной.

Также хочу отметить практическую значимость полученных в диссертации результатов. Представленные в ней рекомендации пригодятся в проектировании космических аппаратов (КА) для будущих миссий.

Диссертация состоит из введения, 3 глав и заключения.

Во введении дается краткий обзор текущего состояния проблемы, обосновывается актуальность темы диссертации, формулируется её цель и научная новизна. Здесь же указан личный вклад автора в получение результатов, вошедших в диссертацию.

Первая глава состоит из двух частей. Первая часть является вводной. Она содержит введение в проблему проверки и поиска нарушений эйнштейновского принципа эквивалентности (ЭПЭ). В разделе 1.1.5 рассматривается простая аналитическая модель, позволяющая рассмотреть проявления нарушения ЭПЭ. Стоит отметить, что в рамках этой модели нарушение ЭПЭ будет по-разному влиять на разные тела. Также стоит отметить, что в рамках данной модели продемонстрировано, что измерение красного смещения, чему и посвящена диссертация, может давать на 5-6 порядков более жесткие ограничения на допустимую величину нарушения ЭПЭ, чем прямые наблюдения за траекториями движения тел. Также в этом разделе приведено выражение, позволяющее учесть, что гравитационные поля, созданные разными телами Солнечной системы, могут давать различные вклады в отклонение величины красного смещения от предсказаний ОТО.

Вторая часть первой главы посвящена двум экспериментам по проверке ЭПЭ с помощью измерения сдвига частоты электромагнитных волн из-за гравитационного красного смещения. Сначала рассматривается будущий

эксперимент с двумя часами, расположенными на двух спутниках на околоземной орбите. Получены, в частности, рекомендации по выбору орбиты спутников и используемых стандартов частоты, сделаны оценки достижимой точности. Показано, что при определенном выборе стандартов частоты точность измерения параметра  $\varepsilon$ , описывающего степень нарушения ЭПЭ, в таком эксперименте за 3 года может достичь  $3 \cdot 10^{-10}$ . Далее рассматривается проведенный аналогичный эксперимент с КА «РадиоАстрон». Проведена предварительная обработка наблюдательных данных и получена оценка принципиально достижимой точности измерения параметра  $\varepsilon$ , которая составила  $5.1 \cdot 10^{-6}$  при накоплении данных в течение 1 года.

Вторая глава посвящена эффекту движения фазового центра (ДФЦ) остронаправленных следящих антенн, как наземных, так и установленных на КА. Предложена улучшенная методика учета эффекта ДФЦ при слежении за КА. Показано, что влияние этого эффекта можно уменьшить, если использовать одновременно одно- и двухпутевые линии связи КА с наземными станциями. Я считаю, что результаты данной главы найдут в применении как при дальнейшей обработке результатов с КА «РадиоАстрон», так и будут полезны при проектировании будущих космических радиотелескопов.

Третья глава посвящена проверке ЭПЭ с помощью наблюдения за КА «РадиоАстрон». Детально обсуждается методика эксперимента и рассматриваются различные факторы, влияющие на полученный результат. Проведена обработка наблюдений и получено ограничение на возможное нарушение ЭПЭ:  $\varepsilon = -0.016 \pm 0.003_{stat} \pm 0.030_{syst}$ . Данный результат на два порядка хуже, чем полученный в результате экспериментов Gravity Probe A и GREAT. Однако, я должен отметить важность этого результата, поскольку он ограничивает величину нарушения ЭПЭ в большом диапазоне расстояний от центра Земли, как на расстоянии 7000 км так и на 350 000 км от него. Данный результат позволяет наложить дополнительные ограничения на параметры альтернативных теорий гравитации и его, безусловно, нужно будет учитывать при их дальнейшем развитии.

В заключении перечислены основные результаты, полученные в диссертации.

Полученные в диссертации результаты являются оригинальными. Научная новизна диссертации в первую очередь определяется тем, что:

1. Впервые предложена математическая модель эксперимента по измерению величины эффекта гравитационного замедления времени с помощью высокостабильных часов, – с одной стороны детально учитывающая влияние спектральной плотности мощности шумов в часах, а с другой стороны включающая возможность того, что гравитационные поля, созданные различными телами, могут оказывать различный эффект на замедление часов.
2. Разработана улучшенная модель учета ДФЦ для бортовых и наземных антенн, учитывающая в том числе и ошибки наведения антенны. Впервые показано, что схема компенсации нерелятивистского эффекта Доплера типа Gravity Probe A позволяет уменьшить эффект ДФЦ до  $10^{-16}$  для КА

«РадиоАстрон» и практически полностью скомпенсировать вклад бортовой антенны в сдвиг частоты передаваемых сигналов.

3. Впервые проведена проверка ЭПЭ с помощью измерения эффекта гравитационного замедления времени с точностью  $3 \cdot 10^{-2}$  в диапазоне расстояний от 10 до 350 тыс. км от Земли.

Основные результаты и выводы диссертации вполне надежны и достоверны, так как базируются на использовании хорошо зарекомендовавших себя методов статистической обработки наблюдательных данных и методик расчета характеристик работы приемно-передающих устройств КА, сравнении полученных с их помощью результатов с результатами эксперимента Gravity Probe A.

Данная диссертация выполнена на высоком профессиональном уровне. У меня есть лишь несколько замечаний по диссертации:

1. Стоило бы, опираясь на полученные результаты, привести оценки ограничений на сдвиги частот вызванные негравитационными эффектами, например, на сдвиги из-за возможной пространственной вариации постоянной тонкой структуры.
2. В диссертации стоило бы обсудить возможность получить ограничения на величину других эффектов ОТО, например, на величину эффекта увлечения инерциальных систем отсчета и значения постньютоновских поправок к гравитационному потенциалу.
3. В диссертации стоило бы обсудить, почему в формуле (1.18) отсутствуют слагаемые  $\frac{U_s^{(1)} - U_s^{(2)}}{c^2}$  и  $\frac{U_M^{(1)} - U_M^{(2)}}{c^2}$ . Также в формуле (1.18) пропущены приливные члены.
4. В диссертации стоило бы более подробно обсудить вклад поправок, связанных с гравитационным полем Солнца и Луны, в частности привести оценки сдвига частоты из-за вносимых ими искажений в орбиту КА.
5. Стоило бы обсудить, могут ли быть связаны упомянутые на с. 100 выбросы с пролетами комков темной материи.
6. Стоило бы привести значения периода  $T$ , которые соответствуют минимумам кривых на рис. 1.3.

Оценивая диссертацию в целом, можно утверждать, что работа выполнена на высоком научном уровне и свидетельствует о достаточной квалификации автора. Основные работы диссертанта опубликованы в ведущих научных журналах с высоким импакт-фактором. Сделанные замечания относятся в основном к оформлению диссертации и принятому в ней стилю изложения и не влияют на общую высокую оценку данной диссертационной работы. Автореферат диссертации соответствует ее содержанию.

Полученные результаты могут быть использованы в ПОМИ РАН, ПИЯФ, ГАИШ, ФТИ им. А.Ф.Иоффе и других организациях, ведущих исследования в области физики высоких энергий и космологии. Также они могут быть использованы в ФИАН, ИКИ РАН, НПО им. Лавочкина, ЦНИИМАШ и других организациях, разрабатывающих КА и аппаратуру для них для будущих космических проектов.

Диссертация «Проверка эйнштейновского принципа эквивалентности с помощью космического аппарата РадиоАстрон» Д.А. Литвинова удовлетворяет всем требованиям, предъявляемым к диссертациям на соискание степени кандидата физико-математических наук по специальностям 01.03.02 – «Астрофизика и звездная астрономия» и 01.04.03 – «Радиофизика», а ее автор Д.А. Литвинов, несомненно, заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата физико-математических наук по данным специальностям.

Официальный оппонент,  
кандидат физ.-мат. наук  
01.03.02 – астрофизика и радиоастрономия  
с.н.с. сектора «Теоретической астрофизики»  
ФТИ им. А.Ф. Иоффе  
194021, Санкт-Петербург, Политехническая ул., 26  
bars.astro@mail.ioffe.ru  
(812) 292-71-80

Д.П. Барсуков

13 мая 2022

Подпись Д.П. Барсукова удостоверяю  
ученый секретарь ФТИ им. А.Ф.Иоффе,  
кандидат физ.-мат. наук

М.И. Патров