

Утверждаю
Директор ИКИ РАН
член-корресподент РАН

_____ Петрукович А.А.

«___» мая 2022 г.

ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

Института космических исследований Российской академии наук (ИКИ РАН)
на диссертацию Литвинова Дмитрия Александровича «Проверка эйнштейновского принципа эквивалентности с помощью космического аппарата РадиоАстрон», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальностям 01.03.02 – «Астрофизика и звездная астрономия» и 01.04.03 – «Радиофизика»

К настоящему времени Общая теория относительности (ОТО), главной целью создания которой является релятивистская теория гравитации, не имеет противоречий с какими-либо существующими экспериментами или астрономическими наблюдениями, в пределах их ошибок. В то же время существующие эксперименты и наблюдения относятся к ситуациям, в которых гравитационный потенциал V заметно меньше квадрата скорости света, что позволяет использовать в теоретических расчетах пост-ньютоновские разложения. В теории ОТО применяется для любых V , но эти результаты не могут быть подтверждены с достаточной точностью экспериментами или наблюдениями. В связи с этим, не прекращаются попытки построения многочисленных модификаций ОТО, которые в пределе сильной гравитации могли бы давать большие отличия от ОТО.

Другой нерешенной проблемой классической теории ОТО является неизбежность возникновения сингулярности, когда становится необходимым учитывать эффекты квантовой гравитации, построить которую еще никому не удалось. Поэтому, несмотря на имеющееся согласие с экспериментальными данными, теоретические работы по модификации ОТО становятся все более популярными. Запуск научных спутников и лабораторий позволил начать эксперименты, связанные с проверкой справедливости аксиоматических постулатов, на которых основана ОТО. Одним из важнейших таких постулатов является утверждение о неразличимости между силами гравитации и инерционными силами, который известен под именем «принципа эквивалентности» (ПЭ). Проверка ПЭ на основе космических экспериментов ведется уже десятки лет, однако достигнутые в них ограничения, накладываемые возможные нарушения ПЭ, не слишком сильны, и можно ожидать появления более слабых нарушений, поиски которых проводятся до сих пор. Диссертация Д.А. Литвинова посвящена, главным образом, анализу некоторых возможных космических экспериментов для поиска более слабых нарушений ПЭ, а также

изложению предварительных результатов по ограничению нарушения ПЭ, полученных на спутнике РадиоАстрон. Таким образом, тематика диссертации весьма актуальна.

Диссертация состоит из введения, трех глав, заключения и списка цитируемой литературы. Первая глава посвящена разработанному автором подходу к оценке точности экспериментов по проверке ПЭ путем измерения эффекта гравитационного красного смещения (или гравитационного замедления времени), являющегося одним из проявлений ПЭ. Здесь получены оригинальные результаты. В частности, разработан математический аппарат, который позволяет оценивать точность экспериментов с космическими аппаратами, оснащенными бортовыми атомными часами, применимый к любым возможным моделям нарушения ПЭ. Представлены результаты использования этой методики в задаче оценки точности эксперимента с двумя космическими аппаратами на околоземной орбите. Показано, что уже с имеющимися сегодня атомными часами при оптимальной конфигурации орбит спутников такой эксперимент увеличивает точность проверки ПЭ на несколько порядков. Этот результат стимулирует дальнейшие исследования эффекта гравитационного сдвига частоты стандартов с точностью второго порядка по гравитационному полю Земли.

Вторая глава посвящена новым исследованиям эффекта движения фазового центра узконаправленных наземных и бортовых антенн. Данное исследование было стимулировано выполнением эксперимента по проверке ПЭ с помощью космического аппарата РадиоАстрон. В этом смысле оно являлось вспомогательным. Однако здесь были получены важные результаты не только для эксперимента с КА РадиоАстрон, но также для широкого класса текущих и будущих экспериментов по доплеровскому слежению за космическими аппаратами. Так, впервые была исследована предельная точность расчета данного эффекта, а также рассмотрен практически важный случай, когда бортовая и наземная антенны не совсем соосны (не точно направлены друг на друга). Такая ситуация является типичной из-за ошибок прогнозирования орбиты космических аппаратов. Существенным результатом исследования здесь можно считать вывод о том, что эффект движения фазового центра можно практически устранить (уменьшить на 4-5 порядков) при использовании двух одновременно работающих линий связи с космическим аппаратом: однопутевой линии спутник-Земля, и двухпутевой – Земля-спутник-Земля.

Третья глава посвящена экспериментальным результатам проверки ПЭ путем измерения эффекта гравитационного замедления времени с помощью космического аппарата РадиоАстрон. Подробно представлена методика реализации данного эксперимента. Детально изложен способ компенсации нерелятивистского эффекта Доплера с помощью оригинальной схемы, основанной на смешанном режиме синхронизации, которая может иметь приложения к будущим подобным экспериментам. Данный результат, как и вся предыдущая глава, относятся в значительной степени к области радиофизики. Представленные результаты измерения эффекта гравитационного замедления времени, что применительно к РадиоАстрону сводится к измерениям гравитационного смещения частот радиосигналов, основаны на части собранных экспериментальных данных при однопутевых доплеровских измерениях частоты сигнала со спутника. Эти измерения проводились во время большинства радиоастрономических сеансов наблюдений с РадиоАстроном до выхода из строя его бортового водородного стандарта. Используемые алгоритмы обработки данных описаны достаточно подробно. Полученная точность оценки безразмерного параметра нарушения ПЭ составила примерно 0.03, что на 2 порядка ниже, чем результат эксперимента Gravity Probe

А. Сам результат ожидаемо согласуется со справедливостью ПЭ, т.е. с нулевым значением параметра нарушения. Несмотря на невысокую точность проверки, оригинальность данного эксперимента состоит в том, что он впервые был проведен на расстояниях, охватывающих диапазон от 7 до 350 тыс. км от центра Земли. Эта особенность существенна в связи с тем, что подобные эксперименты представляют собой проверку той части принципа эквивалентности, которая утверждает «пространственную универсальность ПЭ», т.е. независимость результатов опыта от места его проведения. Автором обсуждаются перспективы и планы улучшения точности проверки на 2-3 порядка по результатам обработки всех имеющихся данных специализированных гравитационных сеансов. Интерес представляет также изложенная в главе 3 методология экспериментов по проверке ПЭ путем измерения эффекта гравитационного смещения частоты коммуникационных радиосигналов со спутника, что может быть использовано в будущих экспериментах.

Перечисленные выше результаты являются новыми и представляют научную ценность, образуя основу для дальнейших экспериментальных поисков отклонений от предсказаний ПЭ. Достоверность представленных результатов доказывается тщательностью анализа систематических и случайных ошибок, а также поддержкой публикаций в высокорейтинговых журналах.

Отметим недостатки данной работы.

1. При рассмотрении теоретических схем спутниковых экспериментов для проверки ПЭ, нет ссылки и обсуждения высокоточного эксперимента “STEP” по спутниковой проверке ПЭ, предложенной в США [Advances in Space Research, 39, 254 (2007); Adv. Space Res. 43, 1532 (2009); Class. Quantum Grav. 29 184012 (2012)]

2 В третьей главе даны результаты обработки измерений одно-путевых данных, с использованием схемы компенсации. Автор подробно излагает схему компенсации проекта Gravity Probe A, а также разработанную автором методику компенсации «частичный когерент», которая на практике не была реализована. Эту методику было бы более уместно поместить в предыдущую теоретическую главу.

3. Непонятно, почему автор не приводит никаких (даже предварительных) результатов совместной обработки одно и двух путевых данных, что должно существенно улучшить оценку параметра соответствия измерений формулам ОТО.

Отметим, что указанная в диссертации точность проверки эйнштейновского принципа эквивалентности (3×10^{-2}) на порядки ниже наилучшего на сегодня результата. Автором, однако, заявлены планы значительного улучшения данного результата путем обработки данных специализированных гравитационных сеансов, не использовавшихся в диссертационной работе. Существенно также, что подобный эксперимент впервые проведен на расстояниях, охватывающих диапазон от 7 до 350 тыс. км от центра Земли.

Текст диссертации ясно изложен, проиллюстрирован графиками и таблицами.

Результаты диссертационной работы апробированы на научных семинарах и конференциях, в том числе международных. По теме диссертации опубликованы пять научных работ в отечественных и зарубежных рецензируемых журналах, входящих в перечень ВАК. Отнесение диссертации к двум специальностям (01.03.02 – «Астрофизика и звездная астрономия» и 01.04.03 – «Радиофизика») является обоснованным. Автореферат соответствует содержанию диссертации.

Диссертационная работа «Проверка эйнштейновского принципа эквивалентности с помощью космического аппарата РадиоАстрон» является законченным научно-исследовательским трудом и удовлетворяет всем требованиям положения о порядке присуждения учёных степеней, предъявляемым к кандидатским диссертациям, а её автор, Д.А. Литвинов, безусловно, заслуживает присвоения учёной степени кандидата физико-математических наук по специальностям 01.03.02 – «Астрофизика и звездная астрономия» и 01.04.03 – «Радиофизика».

Отзыв обсужден и одобрен на заседании НТС отдела 64 ИКИ РАН 30.03.2022 г.

Отзыв подготовил

Главный научный сотрудник ИКИ РАН,
профессор, доктор физ.-мат. наук
зав. лаб. Магнитоплазменных процессов
в релятивистской астрофизике
отдела 64

Г. С. Бисноватый-Коган

11 мая 2022 г.

тел.: +7 495 3331011

e-mail: gkogan@iki.rssi.ru

адрес места работы: Москва, 117997, Профсоюзная ул., 84/32

Подпись Г. С. Бисноватого-Когана удостоверяю,
Ученый секретарь ИКИ РАН,
кандидат физ.-мат. наук

А. М. Садовский

Сведения о ведущей организации:

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт космических исследований Российской академии наук (ИКИ РАН)

тел.: +7 495 3335212

e-mail: iki@cosmos.ru

Почтовый адрес: Москва, 117997, Профсоюзная ул., 84/32

Список основных работ сотрудников ведущей организации Института космических исследований Российской академии наук (ИКИ РАН) по теме защищаемой диссертации в рецензируемых научных изданиях за последние 5 лет:

1. Tsupko O. Y., Bisnovatyι-Kogan, G. S., Rogers, A., & Er, X. An examination of geometrical and potential time delays in gravitational lensing // Classical and Quantum Gravity. – 2020. – Т. 37. – №. 20. – С. 205017.
2. Bisnovatyι-Kogan G. S., Tsupko O. Y. Shadow of a black hole at cosmological distances // Physical Review D. – 2018. – Т. 98. – №. 8. – С. 084020.

3. Perlick V., Tsupko O. Y., Bisnovatyi-Kogan G. S. Black hole shadow in an expanding universe with a cosmological constant // *Physical Review D*. – 2018. – T. 97. – №. 10. – C. 104062.
4. Novikov I. D., Bisnovatyi-Kogan G. S., Novikov D. I. Stars creating a gravitational repulsion // *Physical Review D*. – 2018. – T. 98. – №. 6. – C. 063528.
5. Tsupko O. Y., Bisnovatyi-Kogan G. S. Hills and holes in the microlensing light curve due to plasma environment around gravitational lens // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. – 2020. – T. 491. – №. 4. – C. 5636-5649.
6. Bisnovatyi-Kogan G. S., Patraman E. A. White Dwarfs in a Uniform Sphere Approximation, with General Relativity Effects Taken into Account // *Astrophysics*. – 2021. – T. 64. – №. 4. – C. 504-511.
7. Tsupko O. Y., Fan Z., Bisnovatyi-Kogan G. S. Black hole shadow as a standard ruler in cosmology // *Classical and Quantum Gravity*. – 2020. – T. 37. – №. 6. – C. 065016.