

ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА

Черепенина Владимира Алексеевича

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»

Диссертация Д.А. Литвинова посвящена проблеме поиска нарушений эйнштейновского принципа эквивалентности (ЭПЭ) путем измерения эффекта смещения частоты электромагнитных сигналов, распространяющихся в гравитационном поле. Благодаря значительному прогрессу в технике создания высокостабильных и высокоточных атомных часов, радиотехнических средств передачи высокостабильных сигналов на большие расстояния и увеличения точности навигационного обеспечения космических аппаратов, данный тип экспериментов становится одним из наиболее перспективных способов поиска отклонений от предсказаний ЭПЭ и общей теории относительности (ОТО). Обнаружение и оценка величины таких отклонений, оказывающихся неизбежным следствием попыток объединения ОТО и квантовой теории, позволят заложить основы более полной физической картины мира и, возможно, достичь объединения всех четырех известных типов физических взаимодействий.

Диссертационная работа Д.А. Литвинова направлена на решение нескольких задач в рамках этой глобальной проблемы. Во-первых, это разработка математических методов оценки точности подобных экспериментов и нахождение с их помощью конфигураций орбит спутников, которые обеспечивают достижение максимально возможной точности эксперимента. Во-вторых, разработка методов компенсации и учета сопутствующих данному типу измерений паразитных эффектов (нерелятивистский эффект Доплера, эффект движения фазового центра антенн и др.). И, наконец, применение данных методов (а также ряда других) для проверки ЭПЭ с помощью космического аппарата (КА) РадиоАстрон. Структура диссертационной работы соответствует описанному кругу задач.

Диссертация состоит из введения, трех глав и заключения. Объем диссертации составляет 120 страниц и включает 35 рисунков и 8 таблиц. Список литературы содержит 109 наименований.

В первой главе представлен разработанный автором математический аппарат для оценки точности экспериментов по проверке ЭПЭ путем измерения эффекта гравитационного замедления времени с помощью высокостабильных атомных часов. Кроме того, здесь представлена разработанная автором концепция подобного эксперимента с двумя космическими аппаратами на околоземной орбите и оценена его точность. Предложенная оригинальная конфигурация околоземных орбит (геометрия орбит одинакова, но аргументы перицентров отличаются на 180 градусов, моменты прохождения перицентров сдвинуты на полпериода) обеспечивает непрерывную связь между спутниками и исключает воздействие атмосферы на частоту передаваемых сигналов. Весьма интересен следующий полученный автором результат: для любого типа часов (независимо от доминирующего в их выходном сигнале типа шума – белого, фликкера, броуновского) всегда существует оптимальное значение периода орбиты спутников. Данные результаты несомненно окажутся полезны при проектировании будущих экспериментов по проверке ЭПЭ и измерению гравитационного замедления времени. Как показано автором, доступная уже сегодня точность измерения гравитационного замедления времени (3×10^{-10}) открывает дорогу для оценки эффектов 2-го порядка по гравитационному полю Земли.

Вторая глава посвящена исследованию эффекта движения фазового центра остронаправленных антенн. Сам эффект не является новым, он хорошо известен в задачах слежения за межпланетными космическими аппаратами и в РСДБ. Но в работе, тем не менее, получены новые результаты, касающиеся особенностям данного эффекта, которые возникают в прецизионных экспериментах по доплеровскому слежению за космическими аппаратами (КА). Автором показано, что необходимо учитывать неточность наведения наземных и бортовых антенн – ошибка оценки частотного сдвига за счет ошибки прогноза орбиты КА может превышать 4×10^{-14} (для относительной частоты, $\Delta f/f$), что существенно превышает допустимый уже для РадиоАстроны уровень $\sim 10^{-15}$. Также для случая РадиоАстроны и возможного будущего проекта космической РСДБ проведен анализ ошибок, связанных с погрешностями в таких параметрах, как расстояние между осями вращения наземной антенны, расстояние между точкой пересечения осей вращения бортовой антенны и центром масс КА, неточность задания ориентации КА и др. Показано, что данные ошибки могут приводить к ошибкам оценки эффекта движения фазового центра, значительно превышающим уровень 10^{-15} . Наконец, предложена схема компенсации данного эффекта, основанная на использовании

многоканальных линий связи (типа Gravity Probe A), что позволяет снизить его максимальную величину с $\sim 10^{-11}$ до 10^{-16} (для относительного сдвига частоты). Все эти результаты имеют несомненную важность как для гравитационного эксперимента с РадиоАстроном, так и для будущих прецизионных космических экспериментов по доплеровскому слежению за КА.

Третья глава посвящена результатам проверки принципа эквивалентности Эйнштейна и измерения эффекта гравитационного красного смещения (гравитационного замедления времени) с помощью спутника РадиоАстрон. Детально изложена методология эксперимента, в том числе оригинальная радиотехническая схема компенсации эффекта Доплера 1-го порядка по v/c . Данная разработка, несомненно, может быть использована в будущих космических гравитационных экспериментах. В работе представлены результаты обработки части экспериментальных данных гравитационного эксперимента с РадиоАстроном – данные «однопутевых» частотных измерений, сопровождавших сеансы РСДБ-наблюдений со спутником (а именно, те из них, в которых источником опорного сигнала служил бортовой водородный стандарт частоты). Подробно изложены и обоснованы алгоритмы обработки данных. Точность оценки безразмерного параметра нарушения ЭПЭ составила 0.03, результат согласуется со справедливостью ЭПЭ. Доминирующий вклад в ошибку вносит неточность реконструированной орбиты КА, использованной для расчета эффекта Доплера. Данный результат является ожидаемым и подтверждает необходимость компенсации эффекта Доплера 1-го порядка по v/c . Обработка данных специализированных гравитационных сеансов с РадиоАстроном, допускающих подобную компенсацию, входит в число ближайших планов автора.

Научная новизна результатов диссертации заключается в том, что:

1. Впервые построена модель эксперимента по проверке ЭПЭ с помощью высокостабильных атомных часов, полностью учитывающая шумовые характеристики часов, а также возможную зависимость нарушающего ЭПЭ вклада в гравитационное замедление времени от типа часов и источника гравитационного поля.
2. Впервые предложена и разработана идея эксперимента по проверке ЭПЭ с помощью двух околоземных спутников, оснащенных высокостабильными часами. Определена оптимальная конфигурация орбит спутников и показано, что точность измерения гравитационного замедления времени в таком эксперименте может достичь 3×10^{-10} .

3. Впервые разработана математическая модель эффекта движения фазового центра бортовых и наземных остронаправленных антенн, учитывающая ошибки наведения. Также впервые разработана схема компенсации данного эффекта с помощью многоканальных линий связи.
4. Впервые разработана схема компенсации нерелятивистского эффекта Доплера в экспериментах по доплеровскому слежению за космическими аппаратами, основанная на использовании широкополосных сигналов с синхронизацией несущего и модулирующего сигналов от различных источников.
5. Впервые осуществлена проверка ЭПЭ путем измерения эффекта гравитационного замедления времени с точностью 3×10^{-2} на расстояниях от 10 до 350 тыс. км от Земли.

Достоверность и обоснованность представленных в диссертации результатов. Все выносимые на защиту положения хорошо обоснованы, их достоверность не вызывает сомнений. Достоверность результата по проверке ЭПЭ с помощью спутника РадиоАстрон подтверждается тщательным анализом ошибок и согласием полученной оценки с результатами экспериментов Gravity Probe A и GREAT. Достоверность теоретических результатов обеспечивается их независимой проверкой различными методами. Достоверность представленных результатов также подтверждается апробацией на российских и зарубежных международных конференциях.

Полнота представления результатов. Результаты диссертации опубликованы в пяти научных статьях. Все эти статьи опубликованы в высокорейтинговых изданиях, входящих в международные базы данных (WOS, Scopus) и рекомендованных ВАК для представления результатов диссертаций. В трех работах диссертант является первым автором. Во всех работах личный вклад автора обозначен как основной или равный вкладу соавторов. Результаты диссертации прошли солидную апробацию на научных семинарах, отечественных и международных конференциях. Автореферат правильно отражает содержание диссертации.

Соответствие диссертации заявленным специальностям. Диссертация посвящена исследованию распространения электромагнитного излучения в космическом пространстве под действием гравитации со стороны тел Солнечной системы, что соответствует специальности 01.03.02 («Астрофизика и звездная астрономия»). Кроме того, исследуются вопросы приема, передачи и распространения радиоволн, что соответствует специальности 01.04.03 («Радиофизика»). Построенная в диссертации математическая модель

гравитационного эксперимента по проверке ЭПЭ с учетом шумовых параметров часов, новая концепция эксперимента по проверке ЭПЭ с помощью двух космических аппаратов и новые результаты проверки ЭПЭ с помощью спутника РадиоАстрон вносят вклад в области науки, соответствующие специальности 01.03.02. Разработанная математическая модель эффекта ДФЦ бортовых и наземных остронаправленных антенн и новая схема компенсации нерелятивистского эффекта Доплера составляют вклад диссертации в исследования антенных систем и способов передачи радиосигналов, что соответствует специальности 01.04.03. Отнесение диссертации к двум специальностям (01.03.02 – «Астрофизика и звездная астрономия» и 01.04.03 – «Радиофизика») является, таким образом, обоснованным.

Замечания по диссертации:

1. В диссертации хотелось бы видеть более подробное изложение проблем, относящихся к точности определения величины гравитационного потенциала предлагаемого в работе автора.
2. При изложении материала работы следовало бы выделить геофизические факторы, влияющие на измерения, например, ионосферные возмущения, турбулентность и т.п.
3. В разделе 1.4.2 при оценке достижимой точности эксперимента по измерению эффекта гравитационного замедления времени с РадиоАстроном и наземной станцией Грин Бенк автор исходит из нереалистического предположения о непрерывном приеме сигнала со спутника. Не представляло бы существенных трудностей учесть условия видимости спутника со станции и получить более реалистическую оценку точности эксперимента.
4. При оценке точности возможного будущего эксперимента с двумя спутниками рассмотрен довольно узкий класс орбит с фиксированной высотой перигея порядка 1000 км. Следовало бы рассмотреть более широкий класс орбит, в том числе менее вытянутых. Это позволило бы оценить возможность совместного проведения подобных экспериментов с другими космическими проектами, в первую очередь, космической РСДБ.
5. Вывод некоторых соотношений в главе 2 представлен недостаточно подробно (например, (2.17)). Также схематично изложен раздел 2.2.2. «Бортовые антенны».
6. Формула (2.42) получена в предположении неподвижности вектора \mathbf{i} в системе координат, жестко связанной с Землей. Ясно, что итоговый вывод о компенсации эффекта движения фазового центра от этого не изменится, но

следовало бы более четко отметить, для каких случаев применима эта формула.

7. При оценке параметра нарушения ЭПЭ не учтены чувствительность бортового стандарта к вариациям температуры и магнитного поля. Возможно эти эффекты малы по сравнению с ошибкой расчета нерелятивистского эффекта Доплера, но, тем не менее, это следовало бы оговорить.
8. Приведенные под формулой (3.21) на с. 101 утверждения о малости ионосферного сдвига частоты, приливных эффектов и т.п. имело бы смысл проиллюстрировать графиками.

Указанные замечания не умаляют значимости диссертационной работы и не влияют на ее общую высокую оценку. Текст написан хорошим научным языком, практически не содержит орфографических ошибок и хорошо иллюстрирован.

Заключение. Таким образом, диссертация «Проверка эйнштейновского принципа эквивалентности с помощью космического аппарата РадиоАстрон» является научно-квалификационной работой, которая удовлетворяет всем требованиям положения о порядке присуждения учёных степеней ВАК, предъявляемым к кандидатским диссертациям, а её автор, Литвинов Дмитрий Александрович, безусловно, заслуживает присвоения учёной степени кандидата физико-математических наук по специальностям 01.03.02 – «Астрофизика и звездная астрономия» и 01.04.03 – «Радиофизика».

Официальный оппонент
доктор физ.-мат. наук,
член-корр. РАН, профессор,
главный научный сотрудник,
руководитель лаборатории математических методов
в радиофизике
Институт радиотехники и электроники
им. В.А. Котельникова РАН

Черепенин В.А.

12 мая 2022 г.

Контактные данные:

тел.: +7 (495) 629-3491 e-mail: cher@cplire.ru

Специальность, по которой официальным оппонентом защищена диссертация:
01.04.01 – «Экспериментальная физика»

Адрес места работы:

125009, Москва, ул. Моховая 11, корп.7

тел.: +7 (495) 629 3574, e-mail: ire@spire.ru

Отзыв В. А. Черепенина удостоверено

Ученый секретарь ИРЭ РАН,

кандидат физ.-мат. наук

И. И. Чусов

Список основных работ оппонента по теме защищаемой диссертации в рецензируемых научных изданиях за последние 5 лет:

1. Кулагин В. В., Валуев, В. В., Конторов, С. М., Прохоров, Д. А., Черепенин, В. А. Формирование широкополосных СВЧ сигналов и многоканальное преобразование частоты с помощью радиофотонного генератора сетки опорных частот // Известия Российской академии наук. Серия физическая. – 2021. – Т. 85. – №. 1. – С. 91-97.
2. Кулагин В. В., Корниенко, В. Н., Черепенин, В. А., Гупта, Д. Н., & Сак, Х. Генерация интенсивного когерентного электромагнитного излучения при взаимодействии мультитераваттного лазерного импульса с нанопроволочной мишенью // Квантовая электроника. – 2021. – Т. 51. – №. 4. – С. 323-332.
3. Кулагин В. В., Валуев, В. В., Конторов, С. М., Корниенко, В. Н., Прохоров, Д. А., & Черепенин, В. А. Многомодовый режим в оптоэлектронном осцилляторе и генерация оптической гребенки частот // Фотон-экспресс. – 2021. – №. 6 (174). – С. 164-165.
4. Кулагин В.В., Валуев В.В., Конторов С.М., Прохоров Д.А., Черепенин В.А. Высокочастотный радиофотонный АЦП с многоканальным измерением сигнала в спектральных интервалах // Известия Российской академии наук. Серия физическая. 2020. – № 1 (84). – С. 67-72.
5. Гуляев Ю.В., Мошков А.В., Пожидаев В.Н., Черепенин В.А. Некоторые проблемы распространения в атмосфере радиоволн терагерцевого диапазона // Доклады Академии наук. – 2018. – № 5 (483). – С. 495-497.
6. Черепенин В.А., Кокошкин А.В., Коротков В.А., Коротков К.В., Новичихин Е.П. Восстановление изображений искаженных аппаратной функцией с неизвестными боковыми лепестками // Радиотехника и электроника. 2018. – № 3 (63). – С. 234-241.