

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ
БЮДЖЕТНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ НАУКИ

**Физический
ИНСТИТУТ**



*имени
П.Н. Лебедева*

Российской академии наук

Ф И А Н

119991, ГСП-1, Москва
Ленинский проспект, 53 ФИАН
Телефон: (499) 135 1429
(499) 135 4264
Телефакс: (499) 135 7880
<http://www.lebedev.ru>

Дата 25.02.2022 г.

УТВЕРЖДАЮ

Директор ФИАН
член-корр. РАН, д.ф.-м.н.

_____ Н.Н. Колачевский

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Федерального государственного учреждения науки
Физический институт им. П.Н. Лебедева Российской академии наук

Диссертация «Проверка эйнштейновского принципа эквивалентности с помощью космического аппарата РадиоАстрон» выполнена в Астрокосмическом центре Федерального государственного учреждения науки Физический институт им. П. Н. Лебедева Российской академии наук. В период подготовки диссертации соискатель Литвинов Дмитрий Александрович работал в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Физический институт имени П. Н. Лебедева Российской академии наук, Астрокосмический центр (АКЦ ФИАН), в должности младшего научного сотрудника.

В 2007 г. окончил Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова», физический факультет, по специальности «Физика».

Литвинов Д. А. обучался в очной аспирантуре физического факультета МГУ в период с 1 марта 2007 г. по 28 февраля 2010 г. по специальности «Теоретическая физика» (01.04.02). Удостоверение о сдаче кандидатских экзаменов № 17 выдано 18.02.2010 Федеральным государственным бюджетным образовательным учреждением высшего образования «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова». Был зачислен в Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Физический институт имени П.Н. Лебедева Российской академии наук в качестве экстерна в период с 1 июня 2021 г. по 30 ноября 2021 г. для сдачи кандидатского экзамена по специальности «Астрофизика и звездная астрономия» (01.03.02). Справка о сдаче кандидатского экзамена по специальности «Астрофизика и звездная астрономия» (01.03.02) № 16-21 выдана 29.11.2021 Федеральным государственным бюджетным учреждением науки Физический институт им. П.Н. Лебедева Российской академии наук.

Научные руководители: Пилипенко Сергей Владимирович, кандидат физико-математических наук, высококвалифицированный старший научный сотрудник отдела теоретической астрофизики АКЦ ФИАН; Руденко Валентин Николаевич, доктор физико-математических наук, профессор, заведующий отделом гравитационных измерений ГАИШ МГУ.

Рецензентами выступили: Ковалев Юрий Юрьевич, доктор физико-математических наук, член-корреспондент РАН, профессор РАН, главный научный сотрудник лаборатории внегалактической радиоастрономии АКЦ ФИАН; Кауц Владимир Леонидович, кандидат

физико-математических наук, доцент кафедры «Физика» МГТУ им. Н. Э. Баумана.

Доклад Д.А. Литвинова по результатам диссертационной работы был заслушан и обсужден на общем астрофизическом семинаре АКЦ ФИАН 6 декабря 2021 г., который поддержал ее выдвижение к защите. По итогам обсуждений на семинаре и ученом совете АКЦ ФИАН принято следующее заключение.

Актуальность темы. Общая теория относительности (ОТО) и квантовая теория составляют основу современной физической картины мира. Тем не менее, классический характер эйнштейновской теории гравитации, а также имеющиеся в ней внутренние противоречия, такие как проблема сингулярности, свидетельствуют о том, что ОТО не является окончательной теорией гравитации. Попытки объединения ОТО с квантовой теорией, предпринимаемые в рамках теории струн, петлевой квантовой гравитации и др., неизбежно приводят к нарушению лежащего в основе ОТО эйнштейновского принципа эквивалентности (ЭПЭ). Экспериментальное обнаружение отклонений от предсказаний ОТО и ЭПЭ является поэтому принципиально важной задачей, решение которой позволит заложить экспериментальный базис единой теории фундаментальных взаимодействий. Одним из перспективных способов проверки ОТО, а также любой другой метрической теории гравитации, является измерение эффекта гравитационного замедления времени, который является прямым следствием ЭПЭ.

Целью данной диссертационной работы является усовершенствование математических моделей, описывающих эксперименты по проверке эйнштейновского принципа эквивалентности (ЭПЭ), основанные на измерении эффекта гравитационного замедления времени с помощью размещаемых на космических аппаратах высокостабильных атомных часов, и использование этих моделей для проверки ЭПЭ с помощью космического аппарата (КА) «Спектр-Р». Для достижения этой цели были поставлены и решены следующие задачи. 1) Разработать математическую модель космических и наземно-космических экспериментов по проверке ЭПЭ, основанных на измерении эффекта гравитационного замедления времени с помощью высокостабильных часов, учитывающую гравитационное воздействие тел Солнечной системы, окрашенный характер шума часов и возможную зависимость нарушающего ЭПЭ вклада в гравитационное замедление времени от типа часов и источника гравитационного поля. 2) Оценить точность эксперимента по измерению эффекта гравитационного замедления времени, достижимую с помощью КА «Спектр-Р». 3) Разработать методологию эксперимента по измерению эффекта гравитационного замедления времени с помощью КА «Спектр-Р», учитывающую его аппаратные ограничения. 4) Разработать математическую модель эффекта движения фазового центра (ДФЦ) бортовых и наземных остроуправленных антенн, учитывающую ошибки наведения и схему компенсации нерелятивистского эффекта Доплера типа Gravity Probe A. Апробировать созданную модель на данных, полученных с помощью КА «Спектр-Р». 5) Измерить параметр нарушения ЭПЭ, связанный с эффектом гравитационного замедления времени, используя данные доплеровского слежения за КА «Спектр-Р», полученные в сеансах связи КА с наземными станциями слежения.

Личный вклад. Во всех основных результатах, выносимых на защиту, личный вклад автора является основным или равным вкладу соавторов.

Достоверность. Высокая достоверность полученного экспериментального результата по проверке ЭПЭ подтверждается его согласием с опубликованными ранее результатами экспериментов Gravity Probe A и GREAT. Достоверность теоретических результатов обеспечивается надежностью методик, реализованных в программном обеспечении, которое использовалось при моделировании, и независимой проверкой результатов различными методами. Достоверность представленных результатов также подтверждается апробацией на российских и зарубежных международных конференциях и семинарах.

Новизна. Все полученные результаты являются новыми. Отметим следующее. Впервые построена математическая модель эксперимента по измерению эффекта гравитационного замедления времени с помощью высокостабильных часов, основанная на использовании

полной информации об их шумовых параметрах в виде спектральной плотности мощности шума. Впервые предложена концепция эксперимента по измерению гравитационного замедления времени и проверке ЭПЭ с помощью двух околоземных спутников, оснащенных высокостабильными часами, и оценена его точность. Впервые разработана математическая модель эффекта движения фазового центра бортовых и наземных остронаправленных антенн, учитывающая ошибки наведения, и показана возможность компенсации величины данного эффекта на 4—5 порядков с помощью конфигурации линий связи с КА типа Gravity Probe A. 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.

Ценность научных работ соискателя. Предложенная усовершенствованная математическая модель экспериментов по проверке ЭПЭ, основанных на измерении эффекта гравитационного замедления времени, может быть использована для оценки точности, обработки и интерпретации данных наземно-космических, полностью космических и полностью наземных экспериментов с атомными часами текущего и следующего поколений (с относительной частотной стабильностью до порядка 10^{-18} на временах усреднения порядка 1 ч). Предложенная концепция эксперимента с двумя околоземными спутниками открывает возможность нового типа измерения постньютоновских параметров β и γ и улучшения точности проверки ЭПЭ на 5 порядков.

Практическая значимость. Разработанная математическая модель эффекта движения фазового центра антенн, учитывающая ошибки наведения, а также демонстрация компенсации данного эффекта с помощью схемы Gravity Probe A закладывают основу для будущих высокоточных экспериментов по доплеровскому слежению за КА с помощью остронаправленных антенн. Разработанная схема компенсации нерелятивистского эффекта Доплера и тропосферного сдвига частоты, основанная на смешанном режиме синхронизации несущего и модулирующего сигналов линии связи с КА, может быть использована в будущих экспериментах по измерению гравитационного замедления времени. Проведенное измерение эффекта гравитационного замедления времени с помощью КА «Спектр-Р» подтверждает справедливость ЭПЭ с точностью 3×10^{-2} на расстояниях от 10 до 350 тыс. км от Земли и закладывает основания для дальнейших экспериментальных проверок данного принципа.

Соответствие специальностям. Цель диссертационной работы находится в русле исследований по созданию и совершенствованию физической картины мира, раскрытию природы процессов и явлений в космическом пространстве, поэтому соответствует специальности 01.03.02 («Астрофизика и звездная астрономия»). Диссертация посвящена исследованию распространения электромагнитного излучения в космическом пространстве под действием гравитации со стороны тел Солнечной системы, что соответствует паспорту специальности 01.03.02, а также исследованию приема и распространения радиоволн, что соответствует паспорту 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 по данным проекта «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 относится к специальности 01.04.03.

Диссертация соответствует всем требованиям, установленным пунктами 9-14 Положения о порядке присуждения ученых степеней, утвержденного постановлением Правительства РФ от 24 сентября 2013 г. № 842. Диссертация соответствует специальностям «астрофизика и звездная астрономия» (01.03.02) и «радиофизика» (01.04.03) по физико-математическим наукам. Материалы диссертации представлены соискателем в пяти научных статьях, опубликованных в рецензируемых журналах из списка ВАК. Содержание диссертации изложено доступно, корректно и полно.

Диссертация Литвинова Дмитрий Александровича «Проверка эйнштейновского принципа эквивалентности с помощью космического аппарата РадиоАстрон» рекомендуется к защите на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальностям «астрофизика и звездная астрономия» (01.03.02) и «радиофизика» (01.04.03).

Заключение принято на заседании ученого совета АКЦ ФИАН. Присутствовало на заседании 13 чел. Результаты голосования: "за" - 13 чел., "против" - 0 чел., "воздержалось" - 0 чел., протокол № 2/22 от "24" февраля 2022 г.

Руководитель АКЦ ФИАН,
д.ф.-м.н.

С.Ф. Лихачев