

РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК  
ФИЗИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ ИМ. П.Н. ЛЕБЕДЕВА РАН

СТЕНОГРАММА  
ЗАСЕДАНИЯ ДИССЕРТАЦИОННОГО СОВЕТА

Д002.023.01

09 июня 2022 года

Защита диссертации

Литвинова Дмитрия Александровича

на соискание учёной степени

кандидата физико-математических наук

по специальностям 01.03.02 «Астрофизика и звёздная астрономия»

и 01.04.03 «Радиофизика»

*“Проверка эйнштейновского принципа эквивалентности с  
помощью космического аппарата РадиоАстрон”*

## **Присутствовали члены диссертационного совета:**

Ковалев Ю.Ю., д.ф.-м.н., член-корр. РАН, 01.03.02, физ.-мат. науки, заместитель председателя диссертационного совета

Шахворостова Н.Н., к.ф.-м.н., 01.03.02, техн. науки, ученый секретарь диссертационного совета

Биленко И.А., д.ф.-м.н., 01.04.03, физ.-мат. науки

Богачев С.А., д.ф.-м.н., 01.03.02, физ.-мат. науки

Вятчанин С.П., д.ф.-м.н., 01.04.03, физ.-мат. науки

Дагкесаманский Р.Д., д.ф.-м.н., 01.03.02, техн. науки

Дорошкевич А.Г., д.ф.-м.н., 01.03.02, физ.-мат. науки (*присутствует в удаленном режиме*)

Иванов П.Б., д.ф.-м.н., 01.03.02, физ.-мат. науки

Каленский С.В., д.ф.-м.н., 01.03.02, техн. науки

Ларионов М.Г., д.ф.-м.н., 01.03.02, техн. науки (*присутствует в удаленном режиме*)

Лукаш В.Н., д.ф.-м.н., 01.03.02, физ.-мат. науки

Малофеев В.М., д.ф.-м.н., 01.03.02, физ.-мат. науки (*присутствует в удаленном режиме*)

Митрофанов В.П., д.ф.-м.н., 01.04.03, физ.-мат. науки

Новиков Д.И., 01.03.02, д.ф.-м.н., физ.-мат. науки (*присутствует в удаленном режиме*)

Попов М.В., д.ф.-м.н., 01.03.02, техн. науки (*присутствует в удаленном режиме*)

Троицкий С.В., д.ф.-м.н., 01.03.02, физ.-мат. науки (*присутствует в удаленном режиме*)

Тюльбашев С.А., д.ф.-м.н., 01.03.02, физ.-мат. науки (*присутствует в удаленном режиме*)

Чашей И.В., д.ф.-м.н., 01.03.02, техн. науки (*присутствует в удаленном режиме*)

Щекинов Ю.А., д.ф.-м.н., 01.03.02, физ.-мат. науки (*присутствует в удаленном режиме*)

**Председатель заседания** – доктор физико-математических наук, заместитель председателя диссертационного совета Ю.Ю. Ковалев (письменное поручение председателя диссертационного совета – в приложении №1 к стенограмме).

**Секретарь заседания** – кандидат физико-математических наук, ученый секретарь диссертационного совета Н.Н. Шахворостова.

Заседание проводится с участием членов диссертационного совета и оппонентов в удаленном интерактивном режиме. Распорядительный акт директора ФИАН Колачевского Н.Н. о проведении заседания диссертационного совета с участниками в удаленном интерактивном режиме находится в приложении №2 к стенограмме.

**ПРЕДСЕДАТЕЛЬ:** Я открываю заседание по защите Литвинова Дмитрия Александровича. Вы видите название диссертации на экране. Ученого секретаря прошу стартовать наше заседание. Запись в zoom я начал.

**СЕКРЕТАРЬ.** Здравствуйте, дорогие коллеги. У нас присутствует на заседании 19 человек, из них 10 присутствуют лично, 9 присутствует онлайн. Кворум есть. Всего в расширенном составе диссовета 25 человек, потому что у нас защита по двум специальностям, и мы пригласили трех внешних членов диссовета, в соответствии с Положением ВАК, по второй специальности 01.04.03 – радиофизика. Все они присутствуют в зале. Я напоминаю, что ведется запись, поэтому все члены совета, присутствующие удаленно, должны быть с включенными камерами. Если у вас есть технические проблемы, то сообщайте, пожалуйста, и мы будем объявлять технический перерыв. Организационные моменты я закончила.

**ПРЕДСЕДАТЕЛЬ.** Спасибо. Итак, сегодня у нас 19 человек, 10 на месте, 9 удаленно. Соискатель — Литвинов Дмитрий Александрович, название диссертации: «Проверка эйнштейновского принципа эквивалентности с помощью космического аппарата РадиоАстрон». Специальности две: 01.03.02 – астрофизика и звездная астрономия, и 01.04.03 – радиофизика. Отрасль наук — физико-математические науки. Диссертация выполнена в Физическом институте имени Лебедева РАН, ведущая организация — Институт космических исследований РАН. Оппоненты — Черепенин Владимир Алексеевич, доктор физико-математических наук, член-корреспондент РАН, профессор, главный научный сотрудник Института радиотехники и электроники имени Котельникова (ИРЭ РАН, Москва). Я правильно понимаю, что он по уважительной причине сегодня отсутствует?

**СЕКРЕТАРЬ.** Да, его сегодня не будет ни онлайн, ни лично.

**ПРЕДСЕДАТЕЛЬ.** Понятно, поэтому его отзыв будет зачитан целиком. И Барсуков Дмитрий Петрович. Здравствуйте, Дмитрий Петрович. Кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник Физико-технического института имени Иоффе. Я прошу секретаря огласить содержание документов соискателя.

**СЕКРЕТАРЬ.** Спасибо. В деле имеется полный комплект документов: заявление от соискателя, диплом об окончании Московского государственного университета имени Ломоносова, диплом с отличием, присуждена квалификация «Физик» по специальности «Физика». Также имеется справка о сдаче кандидатского минимума, их было два. Первый был по теоретической физике, и далее Дмитрий Александрович был зачислен в ФИАН в качестве экстерна и сдал кандидатский экзамен по астрофизике и звездной астрономии. Имеется положительное заключение организации, в которой была выполнена работа, Физического института имени Лебедева. Поступили все отзывы. Отзывы поступили в срок. Все документы удовлетворяют требованиям ВАК.

**ПРЕДСЕДАТЕЛЬ.** Замечательно. Спасибо. Дорогие друзья, переходим к выступлению соискателя с докладом по диссертации.

*(Начинается демонстрация презентации на экране в зале заседаний и на экране в зоот для участников в удаленном режиме).*

## **ДОКЛАД СОИСКАТЕЛЯ**

**СОИСКАТЕЛЬ:** *(Выступает с докладом. В докладе демонстрирует и комментирует слайды 1-43, номера которых даны в начале соответствующих строк ниже. Слайды к докладу приведены в Приложении №3 к стенограмме и приложены к аттестационному делу в бумажной и электронной форме).*

### *Слайд 1*

Диссертация посвящена проверке эйнштейновского принципа эквивалентности с помощью космического аппарата РадиоАстрон. Ряд моментов был связан с более техническими, радиофизическими аспектами этой задачи. Поэтому диссертация защищается по двум специальностям.

### *Слайд 2*

Диссертация состоит из трех глав, введения и заключения. Прежде чем рассказывать о содержании диссертации, я также напомню о том, что такое эйнштейновский принцип эквивалентности. Сами главы посвящены трем группам вопросов. Первый – это теоретические аспекты проблемы оценки точности экспериментов по проверке эйнштейновского принципа эквивалентности с космическими аппаратами, оборудованными

высокостабильными атомными стандартами частоты и времени. Второй вопрос – радиофизические аспекты проблемы учета движения фазового центра антенн в прецизионных экспериментах по доплеровскому слежению за космическими аппаратами. Третья глава посвящена результатам проверки эйнштейновского принципа эквивалентности с помощью РадиоАстро на основании данных однопутевых доплеровских измерений. В заключении я сформулирую полученные результаты.

### *Слайд 3*

Итак, эйнштейновский принцип эквивалентности в современной формулировке состоит из трех составных частей. Первая, наиболее известная, сводится к универсальности свободного падения или, иначе, равенству гравитационной и инертной масс. Два следующих утверждения связаны с локальной пространственно-временной инвариантностью – утверждением о том, что результаты негравитационных локальных экспериментов не зависят от места и времени их проведения, – и также что результаты таких экспериментов не зависят от скорости и ориентации лаборатории, в которой они проводятся. В совокупности эти три утверждения обеспечивают то, что теория гравитации, которая им удовлетворяет, является метрической, т.е., по сути, является проявлением геометрии пространства-времени.

### *Слайд 4*

Существуют, несмотря на кажущуюся очевидность этих утверждений, серьезные основания сомневаться в том, что этот принцип является фундаментальным, и поэтому активно ведутся поиски его нарушений. Мотивация поисков происходит от теорий, осуществляющих попытки объединения известных видов взаимодействий и квантования гравитации. Они неизбежно приводят к нарушению принципа эквивалентности. Существует несколько формализмов для параметризации возможных нарушений и различные группы экспериментов, которые проводят тесты этих параметров. Эксперимент, который проведен с РадиоАстроном и которому посвящена диссертация, относится к поискам нарушений той части принципа эквивалентности, которая относится к принципу локальной пространственно-временной инвариантности. Это – эксперименты по измерению эффекта гравитационного замедления времени или, иначе, гравитационного красного смещения. Сюда же относятся эксперименты по поиску дрейфа фундаментальных констант.

### *Слайд 5*

Парадигма, в рамках которой проводятся подобные эксперименты, представлена в верхней формуле: сравниваются скорости хода двух часов, высокостабильных или высокоточных, которые находятся в различных пространственно-временных точках – часы  $a$  и  $b$ . Они, соответственно, находятся под разными гравитационными потенциалами,  $U$ , и могут иметь различную скорость. Последние два слагаемых содержат коэффициенты  $\epsilon$  –

это как раз параметры нарушения. Все, что до этого, удовлетворяет общей и специальной теории относительности, а коэффициенты  $\epsilon$ , если они не равны 0, свидетельствуют о нарушении принципа эквивалентности. Различные варианты проверки этого соотношения – это, во-первых, нулевые тесты, которые проводятся в одной лаборатории с различными часами. Они проверяют возможность того, что коэффициенты нарушения зависят от типа атомного перехода, на котором основаны часы. Также эти коэффициенты, вообще говоря, могут зависеть от типа источника гравитационного поля. Такие «нулевые» эксперименты достигли достаточно высокой точности, но наш эксперимент – и такой вариант проверки считается более перспективным – это когда часы находятся в различных пространственных точках и, соответственно, под различными гравитационными потенциалами. В этом случае эффект является не нулевым, даже если нарушение принципа эквивалентности отсутствует. Такой тип эксперимента называется «классическим». Сигнал имеет форму, показанную в нижней формуле. Здесь группа экспериментов и среди них – наш с РадиоАстроном, который мы надеемся завершить уже в этом году.

#### *Слайд 6*

На этом я закончил с введением и хотел бы перейти к результатам первой главы.

#### *Слайд 7*

Простейшая формула для проверки эффекта содержит один коэффициент – случай когда нет зависимости ни от типа часов, ни от источника гравитационного поля, верхняя формула. Относительное гравитационное смещение частоты сигналов, которыми обмениваются часы, зависит, таким образом, от разности гравитационных потенциалов. В случае справедливости принципа эквивалентности коэффициент  $\epsilon$  равен 0. Именно этот коэффициент является объектом исследования. Более полная модель включает зависимость коэффициентов нарушения от источника гравитационного поля и типа квантового перехода. Нижний индекс отмечает источник, верхний – номер часов. Как правила, рассматривается случай двух часов. Проблема состояла в том, что до нашей работы не существовало парадигмы для корректной оценки точности подобных экспериментов. Все подобные оценки делались с различными приближениями, например, шум часов рассматривался как белый, не учитывались упомянутые зависимости коэффициентов и т.п. Мы математически сформулировали эту задачу, ввели (для случая одного параметра) все возможные источники гравитационных полей, ввели шум часов (слагаемое  $n$ ) и расстройку часов, т.е. тот факт, что их частота может немного отличаться (что наблюдается в реальных экспериментах).

#### *Слайд 8*

Таким образом, мы поставили задачу, и далее следовало ее дополнить моделью часов. Ее мы сформулировали в виде спектральной плотности

мощности их шума. Далее для оценки параметров можно было применить стандартные методы теории оценивания. Мы воспользовались неравенством Крамера-Рао. Также нами был выявлен неожиданный факт, а именно, то, что ковариационные матрицы шумов, которые входят в формулы для оценки точности этого параметра (в частности, в неравенство Крамера-Рао, и другие), для актуальных для существующих типов часов окрашенных шумов, – эти матрицы не были рассчитаны в естественной нормировке. Известны они были только с неудобными нормировками, подходящими для геофизических приложений. Нам пришлось проделать эту задачу и заново получить эти коэффициенты, приведенные на слайде. Думаю, это будет полезно для будущих приложений. Таким образом, мы сформулировали модель и как ею пользоваться, дальше задача состояла в том, чтобы ее применить к конкретным случаям. Мы это сделали для РадиоАстрона, что было исходной мотивацией этой деятельности, и для задачи поиска оптимальной конфигурации подобных экспериментов – до сих пор все они проводились в неоптимальных конфигурациях – и оценки предельной точности экспериментов с космическими аппаратами, оборудованными часами.

#### *Слайд 9*

Мы рассмотрели случай не самый общий, в частности, не рассматривался случай наземно-космического эксперимента. Нами был исследован случай перспективного эксперимента с двумя космическими аппаратами. В той конфигурации, которую мы выбрали, его преимущество состоит в том, что отсутствует прохождение сигнала через атмосферу и возможно непрерывное накопление данных. Произвольную конфигурацию космически-космического эксперимента мы не рассматривали, а сузили возможные варианты до случая космических аппаратов на двух геометрически одинаковых орбитах с «антисимметричным» прохождением перигеев и апогеев. Т.е., когда один аппарат проходит апогей, другой проходит перигей – и наоборот. Это обеспечивает максимизацию полезного сигнала. Для сужения возможных вариантов мы также использовали ряд других соображений, в частности, возможность непрерывного накопления данных и исключение влияния атмосферы. Это позволило сузить нам размерность пространства параметров до одного. Таким образом, пять параметров орбит были нами зафиксированы согласно таблице, и остался один свободный параметр орбиты – период, одинаковый для обоих космических аппаратов.

#### *Слайд 10*

Здесь нами был получен следующий интересный результат: для каждого из трех часов, которые мы рассмотрели (бортовые часы РадиоАстрона ВЧ-1010, часы PHARAO миссии ACES, планируемой к осуществлению на МКС, и лабораторные оптические часы JILA SrI – одни из лучших на сегодня атомных часов, со стабильностью и точностью порядка  $10^{-18}$  на часовых интервалах накопления), – для всех этих часов существует оптимальное значение периода, порядка 4-5 ч. Это существенное указание для всех

возможных будущих подобных экспериментов. Другой полученный нами важный результат состоит в том, что уже для существующих на сегодня типов часов точность измерения параметра нарушения принципа эквивалентности  $\epsilon$  может достигнуть порядка  $10^{-10}$ . Важность этого результата состоит в том, что это – выход на второй порядок разложения по слабому гравитационному полю Земли. Это требует расширения математического инструментария, и этой задачей мы в настоящее время начали заниматься.

#### *Слайд 11*

Для РадиоАстроны нами также была проведена данная оценка. На данном графике изображена кривая другого типа – зависимость точности эксперимента от времени накопления. Здесь я отмечу лишь тот важный результат, что этот расчет подтверждает наши более ранние приближенные оценки, указывавшие на то, что с использованием РадиоАстроны принципиально возможно достижение точности порядка  $10^{-6}$ .

#### *Слайд 12*

На этом я хотел бы завершить обзор результатов первой главы и перейти ко второй, посвященной исследованию эффекта движения фазового центра антенн.

#### *Слайд 13*

Данный эффект известен достаточно давно, как минимум, с 70-х годов прошлого века – и в РСДБ, и в задаче определения орбит межпланетных космических аппаратов. Эффект для наземных антенн связан с тем, что, при слежении за любым объектом (небесным телом или космическим аппаратом), если имеется смещение между осями вращения антенны, которое на слайде обозначено вектором  $\mathbf{L}$ , то возникает переменная задержка в распространении сигнала. Для РСДБ она важна именно как задержка, для доплеровского слежения за космическими аппаратами она транслируется в доплеровское смещение частоты. Новизна, которую мы привнесли в исследование данного эффекта, состоит в том, что, во-первых, мы уточнили формулы для его учета для случая, когда существуют ошибки наведения. Для околоземных аппаратов такие ошибки существенны и связаны с ошибками прогнозирования их орбит. И, во-вторых, мы рассмотрели вопрос об ошибках учета данного эффекта, что важно для прецизионных экспериментов. Например, параметр смещения осей  $\mathbf{L}$  для таких массивных конструкций, как антенны, используемые в РСДБ (их диаметр достигает 100 метров), не может быть известен с точностью, превышающей несколько миллиметров.

#### *Слайд 14*

Сверху на слайде приведена модифицированная формула для учета антенного эффекта. Модификация, которую мы привнесли, заключается в том, что нештрихованные величины в известной ранее формуле для антенного эффекта, заменяются на штрихованные. Например, вместо вектора

$s$  фактического направления антенны, нужно использовать истинное направление распространения волнового фронта  $s'$ . Вместо вектора  $L$  смещения осей нужно использовать вектор  $L'$ , направленный из референсной точки  $P$  в фокус антенны. Для практически важного случая малых ошибок наведения формулы еще больше становятся похожими на привычные. Вектор  $L'$  заменяется на скаляр  $L$ , а фактические углы наведения заменяются на истинные, что отмечено штрихами. Эта модификация, как мы далее выяснили, является существенной.

#### *Слайд 15*

На данном слайде приведена иллюстрация того, как углы конкретизируются для двух конкретных типов монтажей: альт-азимутальной и полярной. Примером первой является антенна РТ-22, второй – NRAO140. Обе эти антенны использовались в проекте РадиоАстрон. В первом случае угол является углом места, а во втором – склонением. Отмечу, что в обоих случаях их необходимо снабдить штрихами.

#### *Слайд 16*

Мы также рассмотрели случай бортовой антенны. Здесь роль вектора  $L$  смещения между осями наземной антенны играет вектор  $B$  смещения точки пересечения осей вращения антенны космического аппарата относительно его центра масс. Этих формул в литературе не было, но они достаточно простые. Важно то, что, как и выше, в них важно учитывать истинное направление на источник или приемник, а не фактическое направление антенны.

#### *Слайд 17*

Для оценки того, насколько существенны данные результаты, т.е. насколько важна наша модификация формул антенного эффекта, мы рассмотрели случай РадиоАстрона и перспективной миссии РСДБ, параметры которой были предложены несколько лет назад в китайском проекте. Для будущей миссии мы, естественно, предположили значения ошибок некоторых параметров лучше, чем они имели место для РадиоАстрона. Мы учли такие факторы, как смещение между осями наземной антенны, смещение точки пересечения осей космического аппарата и ошибки наведения (нижняя строка).

#### *Слайд 18*

Нами были учтены все эти параметры, посчитан сам эффект и величина поправки, связанной с переходом к нашей более точной формуле. Черная кривая – сам антенный эффект, который, как видно по левой вертикальной шкале, достигает  $10^{-11}$ . В терминах абсолютного смещения частоты, например, для РадиоАстрона, это соответствует долям герца, т.е. это весьма существенная величина, как для РСДБ, так и для задачи штатного определения орбиты космического аппарата. Зеленая кривая – поправка, связанная с нашей модификацией формул. Другие кривые изображают

ошибки учета эффекта. Графики относятся к перигею 10 января 2014 г. и наземной антенне Грин Бенк NRAO140. Видно, что ошибки весьма существенны. Их существенность заключается в том, что уже для эксперимента с РадиоАстроном требуемый уровень точности – это  $10^{-15}$ . Здесь и сам эффект превышает этот уровень (на 4-5 порядков), и ошибки его учета, и поправка, которую мы привнесли, – все они, таким образом, существенны.

#### *Слайд 19*

Здесь приведены те же графики, но в развертке на 1,5 витка орбиты. В таком виде эти результаты труднее воспринимать, но зато хорошо видно, что эффект более выражен вблизи перигеев. Тем не менее, и вне перигеев эффект существенен, и для будущих миссий его необходимо будет учитывать.

#### *Слайд 20*

Этот график иллюстрирует тот факт, что уже для задачи восстановления орбиты антенный эффект существенен. Слева – график невязок без учета эффекта, справа – с учетом.

#### *Слайд 21*

Тот же самый расчет мы провели для случая бортовой антенны. Здесь хорошо видно, насколько катастрофически проявляет себя проблема точности учета антенного эффекта: ошибка расчета эффекта, синяя кривая, превышает уровень  $10^{-14}$ . Это связано с неточностью знания положения центра масс космического аппарата, неточностью знания положения точки пересечения осей вращения его антенны.  $10^{-14}$  – это неприемлемо много уже для эксперимента с РадиоАстроном, тем более – для будущих экспериментов с бортовыми часами со стабильностью на уровне  $10^{-18}$ . Поэтому возникает проблема: либо отказываться от такого типа антенн, что во многих случаях невозможно, либо пытаться этот эффект как-то устранить.

#### *Слайд 22*

Мы рассмотрели возможность такого устранения, и оказалось, что, действительно, это возможно. По крайней мере, для задач, связанных с изучением гравитации, если имеется система связи с космическим аппаратом, в которой присутствуют как однопутевые сигналы (например, сигнал посылается с борта), так и двухпутевые (сигнал посылается с наземной станции, принимается на борту, когерентно ретранслируется и снова принимается на наземной станции), – если эти два типа сигналов одновременно имеют место, т.е. функционируют две линии связи, то можно составить такую комбинацию частотных измерений (приведена в верхней формуле), которая полностью сохраняет полезный гравитационный эффект, а антенный эффект, как показано в формуле внизу, по-видимому, должен существенно сокращаться. Из самой формулы это можно только предположить на основании того, что все слагаемые в ней имеют второй порядок по обратной скорости света.

### Слайд 23

Мы построили соответствующий график и убедились, что, действительно, антенные эффекты – как наземный, так и бортовой, – существенно уменьшились, на 5-6 порядков. Подчеркну, что это именно сам эффект, а не ошибки его расчета. Очевидно, что для РадиоАстрона это уже несущественно. Что касается будущих миссий, то точность расчета эффекта на уровне одного или нескольких процентов, конечно, достижима, что дает возможность использовать подобные антенны в будущих экспериментах (конечно, с применением схемы компенсации). Это третий наш результат по антенному эффекту.

### Слайд 24

На этом я хотел бы закончить с антенным эффектом и перейти к третьей главе – результатам проверки принципа эквивалентности с помощью РадиоАстрона.

### Слайд 25

Почему такой эксперимент оказался возможен? Благодаря двум факторам. Во-первых, это высокостабильные бортовые часы – атомный водородный стандарт. Его кривая стабильности приведена на правом графике, зеленая кривая. Видно, что она заметно лучше аналогичной для стандарта, который использовался в Gravity Probe A. Вообще, на сегодняшний день это – лучший водородный стандарт, стандарт активного типа, который когда-либо летал в космос. И второй фактор – это крайне вытянутая орбита, которая обеспечивает крайне глубокую модуляцию эффекта. Нижняя формула показывает, что глубина модуляции сравнима с самим эффектом: абсолютное значение величины эффекта находится на уровне  $7 \times 10^{-10}$  в терминах относительного смещения частоты, а модуляция достигает практически той же величины. По нашим оценкам это обеспечит нам итоговую точность эксперимента, т.е. оценки параметра  $\epsilon$ , не хуже  $10^{-4}$ .

### Слайд 26

В реальности, помимо гравитационного сдвига, частота сигнала также смещается за счет ряда других эффектов. Это кинематические эффекты (нерелятивистский и релятивистский эффекты Доплера, первая строка), далее на второй строке – ионосферный и тропосферный сдвиги частоты, различные тонкие эффекты (такие, как указанный выше антенный эффект), и, наконец, слагаемое  $\Delta f_0$  учитывает расстройку частоты между бортовым и наземным стандартами. Основную проблему, конечно, здесь представляет первое слагаемое – нерелятивистский эффект Доплера.

### Слайд 27

Этот эффект очень велик, как видно из следующего графика. Полезный гравитационный эффект, красная кривая, имеет порядок  $10^{-10}$ , тогда как нерелятивистский эффект Доплера достигает и даже превосходит  $10^{-5}$ , т.е.

превышает гравитационный на 5 порядков. Понятно, что выделение столь малого сигнала на фоне столь большого – это существенная проблема.

#### *Слайд 28*

Для ее решения нами было разработано три метода. Первый – тривиальный, и именно он был применен в той обработке, о результатах которой я буду далее рассказывать, – это просто расчет эффекта Доплера с помощью орбитальных данных. Он, конечно, имеет невысокую точность и не позволяет полностью реализовать потенциал водородного стандарта. Нами были также предложены две схемы компенсации эффекта Доплера, похожие на ту схему, которую я кратко изложил при рассказе об антенном эффекте: модифицированная схема Gravity Probe A на основе смешанного режима синхронизации (она входит в число основных результатов диссертации) и основанная на этих же идеях схема с чередованием режимов синхронизации радиолиний связи с космическим аппаратом.

#### *Слайд 29*

Кратко остановлюсь на схеме компенсации, основанной на смешанном режиме синхронизации радиолиний. Справа на слайде изображена схема радиолиний связи с космическим аппаратом. Сигналы, которые посылались с космического аппарата на наземную станцию и далее анализировались имели смешанную природу: модулирующий сигнал использовал в качестве опорного сигнал бортового водородного стандарта, а частота несущего сигнала была синхронизована по частоте сигнала восходящей линии, которая, в свою очередь, синхронизировалась по наземному стандарту. Спектр сигнала при этом имел гребенчатую форму, как видно на левой панели снизу, что позволяло легко анализировать его гармоники. Далее, либо с помощью радиотехнических средств на станции слежения может формироваться представленная в верхней части слайда комбинация гармоник, либо это может производиться (как мы это делали) в процессе постобработки. В этой формуле важно отметить то, что левая ее часть представляет собой комбинацию различных гармоник спектра принятого сигнала, а в правой части отсутствует нерелятивистский эффект Доплера, т.е. он сокращается. К сожалению, полностью реализовать потенциал данного метода нам с РадиоАстроном не удалось по причине узости полости приемника на станции слежения. Мы, однако, рассчитываем, что для будущих миссий он может найти применение, и поэтому мы его включили в число основных результатов диссертации.

#### *Слайд 30*

Переходя к результатам обработки, я хотел бы отметить, что было собрано три типа данных. Первый – однопутевые частотные измерения, которые были собраны с помощью штатных измерителей частоты на обеих станциях слежения миссии РадиоАстрон. Эти измерения сопровождали практически все сеансы радиоастрономических наблюдений, которые проводились с космическим аппаратом, – по крайней мере, до выхода из строя его

бортового водородного стандарта. Второй тип – данные, полученные при работе аппарата по смешанному режиму синхронизации, который я только что кратко изложил. Третий – основной тип данных, которые мы получали в специализированных сеансах и которые проводились в рамках заявок на время космического радиотелескопа и наземных сопровождающих радиотелескопов. О результатах обработки последних двух типов данных я рассказывать сегодня не буду, а первый пункт – это как раз то, что вошло в диссертацию.

#### *Слайд 31*

Слева изображена схема связи в однопутевом режиме: все сигналы – и несущий, и модулирующий – синхронизированы по бортовому водородному стандарту. Компенсация нерелятивистского эффекта Доплера в этом режиме невозможна, и он просто рассчитывается. Остальные указанные здесь эффекты также рассчитываются – ионосфера, тропосфера, эффекты движения фазового центра. Расстройка частоты между бортовым и наземным стандартами, слагаемое  $\Delta f_0$ , не учитывалось. Таким образом, левая часть – это измеренная частота, а в правой рассчитывалось все, за исключением гравитационного сдвига частоты,  $\Delta f_{\text{grav}}$ , и расстройки  $\Delta f_0$ .

#### *Слайд 32*

Мы априори ожидали, что слагаемое  $\Delta f_0$  будет вносить существенный вклад. Так оно и оказалось на самом деле. Здесь представлены результаты расчета по приведенной на предыдущем слайде формуле: это сумма гравитационного сдвига частоты и расстройки частоты между стандартами, все остальные эффекты рассчитаны и вычтены. Наблюдаемый здесь тренд связан с изменяющейся на больших интервалах времени расстройкой частоты между бортовым и наземным стандартами. Такой результат, как уже было сказано, ожидался, хотя и в меньшей степени.

#### *Слайд 33*

Мы параллельно проводили с помощью компенсационной схемы оценку этого параметра расстройки. На этом графике приведен результат этой работы, т.е. оценка дрейфа частоты бортового стандарта относительно наземного. Тем не менее, т.к. обработка однопутевых данных не предусматривает компенсацию эффекта Доплера, мы решили провести обработку по упрощенной схеме: не учитывать отстройку частоты, а просто вычестить ее с помощью дифференциальных измерений.

#### *Слайд 34*

Если посмотреть на приведенный выше график в более мелком масштабе, то видно, что (зеленая кривая – теоретическая, синие точки – экспериментальные) здесь дрейф практически себя не проявляет и заметно лишь смещение, на  $\Delta f_0$ , экспериментальных точек относительно теоретических. Для того чтобы убрать это смещение, мы разбили все сеансы на пары (каждая точка – это усредненное по сеансу значение частоты) с

помощью некоего оптимизационного алгоритма. В частности, оптимизации подвергалась разность гравитационных потенциалов между сеансами, а также использовался ряд других ограничений. Например, для того чтобы дрейф не давал существенного вклада, расстояние по времени между двумя сеансами ограничивалось величиной примерно 4,5 суток.

#### *Слайд 35*

Для каждой такой пары использовалась приведенная в центре слайда простейшая модель эффекта, в которую  $\Delta f_0$ , благодаря разностному методу, уже не входит.

#### *Слайд 36*

По каждой такой паре сеансов путем фитирования по методу наименьших квадратов был оценен параметр  $\epsilon$ . Таким образом, было построено множество оценок параметра  $\epsilon$ , средневзвешенное значение которых представлено в нижней части графика. Формально полученное значение свидетельствует о значимом нарушении принципа эквивалентности. Приведенная здесь ошибка, однако, является лишь статистической. Учет систематических ошибок, как показано на следующих слайдах, это исправляет.

#### *Слайд 37*

Этот же метод расчета был применен для антенны станции слежения Грин Бенк (предыдущий слайд относился к станции Пуцино): все сеансы были разбиты на группы и проведена оценка параметра  $\epsilon$ . Здесь, снова с учетом лишь случайных ошибок, согласие с принципом эквивалентности лучше. Нарушение принципа эквивалентности не превышает два стандартных отклонения.

#### *Слайд 38*

Основная часть ошибки является систематической и связана с нерелятивистским эффектом Доплера. Точность его расчета на уровне 3-4 мм/с, в терминах радиальной скорости, как раз и приводит к указанной здесь систематической ошибке. Поэтому нарушения принципа эквивалентности на таком уровне точности, как и ожидалось, мы не фиксируем. Итоговый результат обработки этого типа данных приведен на экране. Подтверждается справедливость принципа эквивалентности. Точность проверки составила 0,03.

#### *Слайд 39*

Это финальный результат, на котором я хотел бы закончить и огласить результаты, выносимые на защиту.

#### *Слайд 40*

Итак, первый результат. Разработана математическая модель космических экспериментов по проверке эйнштейновского принципа эквивалентности, основанных на измерении эффекта гравитационного замедления времени с

помощью высокостабильных часов. Модель учитывает гравитационное воздействие тел Солнечной системы, окрашенный характер шума часов и возможную зависимость нарушающего принцип эквивалентности вклада в гравитационное замедление времени от типа часов и источника гравитационного поля. С помощью данной модели произведена оценка предельной точности эксперимента по проверке эйнштейновского принципа эквивалентности с помощью космического аппарата РадиоАстрон, которая составила  $5 \times 10^{-6}$  при накоплении данных в течение 1 года.

Разработана концепция эксперимента по измерению эффекта гравитационного замедления времени и проверки эйнштейновского принципа эквивалентности с помощью двух околоземных спутников, оснащенных высокостабильными часами. Определена оптимальная конфигурация орбит спутников и показано, что точность эксперимента может достичь  $3 \times 10^{-10}$  с использованием существующих атомных часов при накоплении данных в течение 3 лет. Это на 5 порядков лучше достигнутого на настоящий момент результата.

Третье. Разработана математическая модель эффекта движения фазового центра бортовых и наземных остронаправленных антенн, учитывающая ошибки наведения. Показано, что в гравитационном эксперименте с РадиоАстроном эти ошибки могут на порядок превышать допустимые. Разработана схема компенсации данного эффекта, которая позволяет на 4-5 порядков уменьшить его вклад в сдвиг частоты сигналов.

Четвертое. Разработана схема компенсации нерелятивистского эффекта Доплера и тропосферы в экспериментах по доплеровскому слежению за космическими аппаратами, основанная на смешанном режиме синхронизации радиолинии космический аппарат – наземная станция (несущий сигнал – от наземного стандарта частоты, модулирующий – от бортового). Схема реализована на практике в гравитационных сеансах по доплеровскому слежению за космическим аппаратом РадиоАстрон.

Осуществлена проверка эйнштейновского принципа эквивалентности путем измерения эффекта гравитационного замедления времени с помощью космического аппарата РадиоАстрон с точностью  $3 \times 10^{-2}$ . Данная точность впервые достигнута на расстояниях, охватывающих диапазон от 10 до 350 тыс. км от центра Земли.

*Слайд 41*

Далее, представлены статьи с результатами. Все они опубликованы в рецензируемых журналах. В трех из них я являюсь первым автором.

*Слайд 42*

Конференции, на которых эти результаты были опробированы.

*Слайд 43*

На этом я хотел бы поблагодарить за внимание. Спасибо!

**ПРЕДСЕДАТЕЛЬ.** Спасибо, Дмитрий Александрович. Я так понимаю, что Ваш доклад закончен. Коллеги, вопросы. И я напоминаю, что вопросы желательно в микрофон, чтобы было под запись и слышно было коллегами, которые находятся удаленно. Прошу.

## **ВОПРОСЫ ПОСЛЕ ДОКЛАДА СОИСКАТЕЛЯ**

**ИВАНОВ П.Б.** У меня на самом деле несколько вопросов. Вы можете показать первый слайд?

**СОИСКАТЕЛЬ.** Самый первый?

**ИВАНОВ П.Б.** Да. Да, вот. Там, где вы определяли насчет принципа эквивалентности.

**СОИСКАТЕЛЬ** (*демонстрирует слайд 3*).

**ИВАНОВ П.Б.** Да. Вот здесь написано, что туда входит какая-то локальная позиционная инвариантность – независимость результатов негравитационного эксперимента от места и времени. Мне всегда казалось, что принцип эквивалентности он, грубо говоря, состоит в том, что одни и те же условно точечные незаряженные объекты движутся одинаковым образом в гравитационном поле, что позволяет строить метрические теории и так далее. Но, казалось бы, легко придумать теорию (более того, они обсуждаются, в т.ч. нашими коллегами), где, например, меняется со временем постоянная тонкой структуры (предположим, она зависит от какого-то поля, которое само как-то эволюционирует). И тогда очевидным образом негравитационный эксперимент меняется в зависимости от времени, но теория остается метрической и вполне себе принцип эквивалентности, как я его себе понимаю, там соблюдается.

**ПРЕДСЕДАТЕЛЬ.** Павел Борисович, надо каким-то образом вырuling на вопрос.

**ИВАНОВ П.Б.** Выруливаю. Непонятно, какое отношение имеет локальная позиционная инвариантность к принципу эквивалентности. Могли бы вы это пояснить? Это первый вопрос.

**ПРЕДСЕДАТЕЛЬ.** Нет, стоп, стоп, стоп. Если второй будет такой же длинный... Вначале послушаем ответ на первый.

**ИВАНОВ П.Б.** Хорошо.

СОИСКАТЕЛЬ. На самом деле, как я уже сказал, чтобы теория была метрической необходимы все три подпринципа. То, что было сказано по поводу дрейфа констант, это, естественно, нарушает второй подпринцип. Может соблюдаться универсальность свободного падения, но теория уже метрической не будет. Это быстро не покажешь на пальцах, но...

ИВАНОВ П.Б. Я с этим просто не согласен. С моей точки зрения это неправильно. Вот. Хорошо. Второй вопрос. Вы можете показать формулу для...

СОИСКАТЕЛЬ (*демонстрирует слайд 5*).

ИВАНОВ П.Б. Вот, вот эту вот. Казалось бы, что если параметр  $\epsilon$  отличен от нуля, то тогда нарушается знаменитый эйнштейновский аргумент, что энергия сохраняется, если выполнены два условия:  $E = mc^2$  и  $E = h\nu$ . Тогда вы можете пускать пару фотонов вверх, превращать их там в пару частиц и спускать вниз, и в результате вы получите избыток или недостаток энергии. Тогда у вас фотоны будут, например, двигаться в направлении вверх, превращаться там в частицы, а частицы вы можете сбрасывать вниз. Вот. Но этот аргумент, как я уже сказал, предполагает  $E = mc^2$  и закон сохранения энергии. А, соответственно,  $E = mc^2$ , насколько я понимаю, следует из локальной лоренц-инвариантности. В этом смысле локальная лоренц-инвариантность эквивалентна принципу эквивалентности? То, что вы говорили до этого.

СОИСКАТЕЛЬ. На самом деле эти подпринципы, я не стал об этом говорить, но они на самом деле, действительно, не являются независимыми. Т.е. если добавить требование о сохранении энергии и ряд еще достаточно естественных, практически только сохранение энергии, но можно ввести еще лагранжев формализм, и тогда можно показать, что из любого из этих принципов два других следуют автоматически. Т.е. они не являются независимыми. Но здесь нужно добавлять еще сохранение энергии.

ИВАНОВ П.Б. Я могу просто прояснить свой вопрос. Мне казалось, что если у меня нарушен принцип эквивалентности, то само понятие гравитационного потенциала, его еще надо как-то вводить разумным образом. Иначе непонятно, что это такое. Гравитационный потенциал он сам по себе понимает то, что у вас движение частиц, по крайней мере в ньютоновской теории, соответствует принципу эквивалентности.

СОИСКАТЕЛЬ. Да, с этим я соглашусь.

ИВАНОВ П.Б. Ладно, хорошо. Следующий вопрос по... там где вы обсуждаете гравитационный эксперимент с двумя спутниками.

СОИСКАТЕЛЬ (*демонстрирует слайд 9*).

ИВАНОВ П.Б. Он носит простой характер и связан вот с чем. На том пределе точности, в котором вы хотите померить сигнал, все равно будут какие-то возмущающие факторы. Ну, например, там еще есть магнитосфера, солнечный ветер. Это как-то учитывалось?

СОИСКАТЕЛЬ. Такие факторы, как солнечное давление, т.е. проблема расчета точности вот непосредственно космического аппарата, мы не рассматривали. Мы рассмотрели, какая точность расчета орбит, т.е. вопрос практической реализации, какая точность расчета орбит в плане положения и скорости на сегодняшний момент имеет место. И оказалось, что, действительно, для случая с часами JILA SrI, для них позиционной точности, которая обеспечивается, в частности, лазерной дальнометрией, ее достаточно. А вот для скорости, где-то полпорядка-порядок, той точности, которая имеет место – ее не хватает.

ИВАНОВ П.Б. А чисто плазменные эффекты? Просто связанные с тем, что там плазма есть какая-то.

СОИСКАТЕЛЬ. Для смещения частоты за счет прохождения в плазме, это не такая большая проблема, потому что связь можно на двух частотах организовывать, или даже на большем числе, и эти эффекты убираются.

ИВАНОВ П.Б. Хорошо, последний вопрос. Связан с заключением.

СОИСКАТЕЛЬ (*демонстрирует слайд 40*).

ИВАНОВ П.Б. Т.е. из тех цифр, которые приведены в заключении, сейчас точность определения, в других экспериментах, наверное, наземных, этого параметра  $\epsilon - 3 \times 10^{-5}$ . Так или нет?

СОИСКАТЕЛЬ. Формально, да, наилучшая точность – это эксперимент со спутниками Galileo, и там у них  $3 \times 10^{-5}$ .

ИВАНОВ П.Б. И существуют ли какие-то аргументы, теории, которые позволяют предполагать, что принцип эквивалентности может локально соблюдаться, а на расстояниях, на которых летал РадиоАстрон как-то нарушаться?

СОИСКАТЕЛЬ. Здесь как раз мы не зря подчеркнули, что проверка проведена в таком большом диапазоне расстояний. Т.е., что, действительно, есть, именно в связи с нарушением пространственно-временной инвариантности, есть некие достаточно, к сожалению, общие соображения, которые позволяют рассчитывать на то, что в какой-то локальной области может отсутствовать нарушение, а в других или на большем диапазоне оно может регистрироваться. Но здесь более, конечно, перспективны уже большие масштабы, скажем, в Солнечной системе. И подобные перспективы... в общем, это то, что мы дальше планируем исследовать.

ИВАНОВ П.Б. Хорошо, спасибо большое, я закончил.

ПРЕДСЕДАТЕЛЬ. Так, дорогие коллеги, пять вопросов от Павла Борисовича завершены. У меня есть поднятая рука от коллег из Пущинской обсерватории. Я не уверен, кто будет задавать вопрос. Коллеги, прошу Вас.

ЧАШЕЙ И.В. Это я хотел задать вопрос. Вот, ничего не было сказано в докладе о возможном влиянии флуктуаций показателя преломления на трассу распространения. Такие флуктуации могут возникать в ионосфере и в тропосфере. Они могут носить нерегулярный характер, но если есть крупномасштабная движущаяся неоднородность, она может просто приводить к смещению частоты. Можно ли как-то прокомментировать возможный вклад вот этих эффектов, о которых я говорил, на выводы, который сделаны в работе?

СОИСКАТЕЛЬ. Да. Вклад, собственно, рефракции, он достаточно небольшой по нашим оценкам. А смещение частоты за счет тропосферных и ионосферных регулярных и флуктуационных эффектов – он достаточно существенен, но не для того расчета, который проведен в этой работе. Несмотря на это, тропосферные эффекты мы учитывали с помощью данных метеостанций, которые на станциях слежения расположены, и ионосферный также учитывался – с помощью карт ионосферной плотности электронов. Но для более точного учета, уже на следующем этапе, с помощью данных специализированных сеансов, которые я упоминал, более важна, конечно, схема компенсации, которая позволяет, во-первых, практически полностью (по крайней мере, с нужной нам точностью) компенсировать тропосферные флуктуации и регулярную их часть и ионосферные также уменьшить, после чего уже их расчет по ионосферным картам обеспечивает нужную нам точность в большинстве случаев. И также еще имеет место двухчастотный метод. Он не только для плазмы, для ионосферы тоже работает, и мы его тоже используем, но это уже в плане обработки специализированных сеансов.

ПРЕДСЕДАТЕЛЬ. Так, спасибо, Дмитрий Александрович. Коллеги, еще вопросы. Раз коллеги думают, давайте я задам вопрос. Фактически он будет следовать... А, нет, Юрий Андреевич Ковалев. Да, Юрий Андреевич, прошу. Юрий Андреевич, вы у нас в кворуме не считаетесь.

КОВАЛЕВ Ю.А. Да, да, я сторонний пользователь.

ПРЕДСЕДАТЕЛЬ. Имейте в виду, что ваша камера включена и показывает непонятно куда. Но главное, мы вас слышим. Говорите.

КОВАЛЕВ Ю.А. Хорошо, я выключу, чтобы она не мешала. Меня результаты, выносимые на защиту, сильно впечатлили, и поэтому я имею, наверное, моральное право задать глупый вопрос. Я припоминаю, когда РадиоАстрон только запускался, то ли только был запущен, то присутствующий здесь Саша Бирюков подчеркивал, что у нас нет бортовых часов, а есть бортовой стандарт частоты. Здесь же фигурируют часы,

замедление, порядки, которые при этом достигаются. Возможно, вы об этом говорили в самом начале, но я опоздал, прошу прощения, но хотелось бы понять, как одно с другим увязать. Может быть, это неправильно тогда говорилось, а если правильно, то как вы из этой ситуации вышли, когда у нас нет бортовых часов, а вот этот эксперимент был поставлен. Спасибо.

СОИСКАТЕЛЬ. Я во многих случаях, действительно, упоминал термин «часы», но больше для краткости. «Бортовой стандарт частоты» – это немножко длиннее. Естественно, на РадиоАстроне у нас как таковых часов не было. Если бы они были, это бы тоже было бы достаточно интересно. И, в принципе, временной подход, т.е. измерение собственно замедления времени непосредственно, и частотный, т.е. измерение смещения частоты, – нетрудно показать, что они эквивалентны в плане точности, если все предпосылки соблюдены. Но фактически при обработке данных с РадиоАстроном и при моделировании перспективных экспериментов мы везде исходили из частоты, поэтому, фактически, то, что это – часы, нигде не использовалось и использовался только тот аспект, что у нас есть высокостабильные стандарты частоты. Для краткости, как я уже сказал, они просто назывались «часами».

КОВАЛЕВ Ю.А. Понял, спасибо большое.

ПРЕДСЕДАТЕЛЬ. Коллеги, еще вопросы. В зале и удаленно. Ну, все-таки я тогда задам свой вопрос. Он следует за заключительным вопросом Павла Борисовича и, соответственно, за заключительным пунктом результатов, выносимых на защиту. Я подозреваю, что Дмитрий Александрович не зря привел слайд со списком методов обработки данных с РадиоАстроны, выделив из них только первый жирным. Наверно, он хочет сказать, или я хочу дать ему возможность ответить на вопрос, а какую точность он с коллегами ожидает достигнуть после того, как будут реализованы все три метода обработки данных РадиоАстроны? Давайте произнесем эту цифру вслух.

СОИСКАТЕЛЬ. Сейчас мы готовим статью по результатам третьего типа данных. Но тоже...

ПРЕДСЕДАТЕЛЬ. Давайте на экран этот слайд тоже выведем. Спасибо.

СОИСКАТЕЛЬ (*демонстрирует слайд 30*). ...по результатам обработки третьего типа данных, но также неполного. Вот здесь сказано «штатного измерителя плюс РСДБ-данные». Это будет статья по результатам обработки данных штатных измерителей, но с компенсацией нерелятивистского эффекта Доплера и тропосферы. И у нас там получается точность на уровне  $3 \times 10^{-4}$ . Дальше мы планируем заняться статьей по более, существенно более точным данным РСДБ, и там мы надеемся уже перейти в область  $10^{-5}$ . И следующий, окончательный уже результат, это включить сюда данные приведенных здесь наземных радиотелескопов, которые также участвовали в

наших наблюдениях. Ну и там мы посмотрим, что получится, насколько успешно нам удастся побороться с лучшими на сегодня результатами.

**ПРЕДСЕДАТЕЛЬ.** Спасибо, Дмитрий Александрович. Коллеги, еще вопросы. Если нет, я буду завершать эту часть нашего заседания. Так, новых вопросов у нас нет, тогда двигаемся дальше. Так, Дмитрий Александрович, давайте я Вас попрошу выключить презентацию, чтобы мы видели уже наших коллег, удаленно участвующих в заседании, и мы переходим к выступлению научных руководителей. Их сегодня у нас целых двое. Давайте начнем с Пилипенко Сергея Владимировича, кандидата физико-математических наук, старшего научного сотрудника ФИАН. Да, у нас есть оба руководителя, поэтому мы будем отзывы не зачитывать, а будем слушать, что они нам расскажут. Да, микрофончик, стул, прошу вас.

## **ВЫСТУПЛЕНИЕ ПЕРВОГО НАУЧНОГО РУКОВОДИТЕЛЯ**

**ПИЛИПЕНКО С.В.** Я работаю с Дмитрием Александровичем с 2017 года, и все это время мы регулярно обменивались идеями по теме, которой занимается соискатель. У нас было много всяких интересных идей, и одна из этих идей вылилась в публикацию, о которой Дмитрий Александрович рассказывал в первой главе. Мы продолжаем активно работать вместе, у нас есть сейчас грант РНФ, который посвящен продолжению некоторых из поднятых в диссертации вопросов. И я считаю, что эта деятельность очень перспективна и может принести когда-нибудь важные экспериментальные результаты. Я бы хотел отметить, что в своей работе Дмитрий Александрович проявляет самостоятельность и выполняет задачи крайне аккуратно. На это иногда требуется много времени, но зато получаются очень качественные результаты. Я считаю, что диссертация выполнена на высоком уровне и он, конечно, заслуживает присуждения степени кандидата физико-математических наук.

**ПРЕДСЕДАТЕЛЬ.** Спасибо большое. Переходим ко второму научному руководителю. Валентин Николаевич Руденко, доктор физико-математических наук, профессор, заведующий отделом гравитационных измерений ГАИШ МГУ. Валентин Николаевич, Вам слово. Прошу Вас.

## **ВЫСТУПЛЕНИЕ ВТОРОГО НАУЧНОГО РУКОВОДИТЕЛЯ**

**РУДЕНКО В.Н.** Я буду в основном говорить о том, как работал Дмитрий Александрович. Я хочу сразу сказать, что я лично был приглашен участвовать в Радиоастроне двумя выдающимися людьми: Куртом Владимиром Гдалевичем и Николаем Семеновичем Кардашевым. Курт тоже работал в ГАИШе, и вот он предложил... И потом я пришел к Николаю

Семеновичу, которого очень хорошо знал раньше. И мне казалось наивным, что мы вполне можем поучаствовать и получить лучший результат, чем это сделано в Gravity Probe A, где  $\epsilon$ , о котором шла речь, на уровне  $10^{-4}$ , т. е. сотые доли процента. Потому что из простых соображений, что там это были измерения на ракете однократные, а здесь это будет на спутнике, есть возможность повторения измерений, накопления результатов, независимых отсчетов. Вы легко набираете 100 и на порядок увеличиваете точность. Вот эти наивные представления были тогда. Но это было развеяно реальной работой. И в это время в ГАИШ после окончания аспирантуры как теоретик-полевик Дмитрий Александрович появился. И он пришел ко мне в отдел и сказал, что он хочет заниматься чем-то более приближенным к практике, к эксперименту. И я предложил ему вот эту тему, которую он с энтузиазмом взял. И первые годы его работы проходили в ГАИШе над этой диссертацией. В отделе гравитационных измерений. Надо сразу сказать, что Радиоастрон был запущен в 2011 году, а мы начали работать по приглашению на 2 года позже, с конца 2013 года. Что потом сказало, конечно, потому что многое что не было осуществлено, и это связано с окончанием работы Радиоастрона. Мы наивно полагали, что запущенный аппарат будет работать достаточно долго. Не понимали, не чувствовали, что сначала умрет сам стандарт частоты, а потом будет невозможно слежение за самим аппаратом. Это отсутствие опыта. Тем не менее, то что нам удалось набрать, и поработать, и получить данные за два с половиной года... И здесь львиная доля усилий по организации специальных так называемых гравитационных сеансов, и это связано с возможностью одно или двух путевого слежения, о чем Дмитрий Александрович кратко говорил, когда рассказывал о проекте, связанном с модуляционной методикой измерения red shift, в виде теоретического предложения, а экспериментально не осуществленного. Опять же потому что все рано закончилось. Главное в том, что практика показала, что у него столько работы по организации и специальных гравитационных сеансов, и выбора всех сеансов на орбите, и взаимодействия с НПО имени Лавочкина, и это огромная работа, от которой я, к счастью, был свободен, и целиком это делал Дмитрий Александрович... Так вот практика показала, что оптимально ему было из ГАИШа перейти в АКЦ на работу. И вторая часть его работы уже проходила здесь. Вот это к вопросу как работал. Теперь по существу. По первому результату, это предложение эксперимента с двумя симметричными или асимметричными спутниками без участия земного стандарта. Эти идеи такого типа, эксперименты (*неразборчиво*) ... в теории относительности для регистрации релятивистских экспериментов, они были, предлагались в литературе, не были осуществлены. Но вот идея этого дифференциального эксперимента в литературе была высказана, но это первое ее приложение к red shift эффекту, т. е. к эффекту измерения гравитационного смещения частоты электромагнитных сигналов. Эйнштейновский принцип эквивалентности предполагает три ипостаси. А именно ... (*неразборчиво*), которого достаточно для того, чтобы вводить геометрическую интерпретацию гравитации, т. е. заменять геометрией гравитационное поле и

делать потенциалом метрику. В общем вот эти три ипостаси: пространственная инвариантность, red shift, независимость от места в пространстве-времени, где проводится эксперимент и наблюдается гравитационное смещение спектральных линий. И лоренцевская инвариантность, независимость от скорости системы отсчета. Вот эти все три ипостаси называются эйнштейновским принципом эквивалентности. Так что в этом смысле то, что Дмитрий Александрович подчеркивал, имеет основания в этом плане. Но я не имел никакого отношения к этой инициативе Дмитрия Александровича. Предложение этого дифференциального эксперимента с двумя спутниками – тут он больше взаимодействовал с другим научным руководителем, о чем он уже сказал. Это оригинальные вещи, в первый раз предложены для red shift эффекта, и я считаю, что это дает такую оценку, до какой степени точности мы на уровне современных стандартов частоты осуществляем этот эксперимент, от  $10^{-8}$  до  $10^{-10}$ . Сейчас мы говорим о Galileo, это  $10^{-5}$ . Но мое лично отношение к Galileo исключительно критическое. Я могу это отдельно сказать, но достаточно сказать, что Радиоастрон от Galileo отличается только тем, что там эксцентриситет одна десятая, а у нас эксцентриситет... куда мы летаем! В каком поле и какие потенциалы сравниваем. Почти 0.9, ну 0.8 точно. Очень далеко, 350 тысяч километров. Что касается второго результата. Здесь эффект был известен, что надо учитывать эффект движения, смещения фазового центра антенны и так далее. То есть это было в ряде работ указано. Но чтобы так скрупулезно и детально... нужно еще проявить настойчивость терпение и так далее, чтобы это все анализировать. Вот он это все продемонстрировал. И хотя это для нашего эксперимента с Радиоастроном не имело значения, потому что у нас была возможность одно и двух путевых измерений, когда вы автоматом этот эффект.. он говорил об этом.. Но для других экспериментов, которые сейчас проводят VLBI комьюнити.. вот эта ошибка и учет движения фазового центра очень существенен. Поэтому не зря это было оценено, и эта статья была опубликована в Advances in Space Research. То есть она была рассмотрена как существенный вклад в такого сорта системы дальней космической связи. Здесь целиком Дмитрия Александровича инициатива, настойчивость и так далее. Ну и последний результат однопутевых измерений, когда вы принимаете сигнал с борта, не используя возможность петлевой связи. Это тоже очень существенная и скрупулезная обработка, потому что здесь шли не специальные гравитационные сеансы в ход, а шли все радиоастрономические сеансы, которые проводились по многим программам Радиоастроны. Была связь и можно было их использовать. И там их было около пяти тысяч. Это очень важно почему. Потому что результат получен не по величине, не при измерении самого эффекта, а при измерении его модуляции по орбите. И модуляция большая. Он говорил о паре. То есть вы измеряете red shift на одном участке орбиты, и потом на другом, далеко расположенном. То есть вы все время смотрите эту самую вариацию. А это сильно убирает систематику, систематические ошибки и так далее. Но нужно много

измерений. У нас накопленных специальных гравитационных сигналов оказывается порядка 70, это то что мы успели, это надо было заказывать, для этого отслеживать орбиты. Это все делал Дмитрий Александрович. Если бы не было большого количества однопутевых сеансов, он бы не смог получить, систематика бы его забила. Даже тот результат, который у него на уровне  $10^{-2}$  эпсилон, который был выписан здесь. Так что инициативность была у него очень большая, это подтверждает и второй руководитель в его части. И полученные результаты.. вот главное в том, что при очень большом эксцентриситете измерения в другом гравитационном потенциале, которые у Galileo при одной десятой и радиусе орбиты 30 тысяч километров в лучшем случае ... Критика Galileo очень серьезная... Поэтому ожидать вот тех результатов, которые мы сейчас надеемся получить с выходом на уровень точности, это существенная очень вещь, но это уже будет другой диссертант делать. Все, спасибо.

ПРЕДСЕДАТЕЛЬ. Спасибо, Валентин Николаевич. Есть ли какие-то вопросы к нашим обоим научным руководителям. Нет. Двигаемся дальше. Тогда мы переходим к ученому секретарю. Надежда Николаевна, сейчас у нас время рассказать, поступили ли какие-то дополнительные отзывы на диссертацию, и, во-вторых, зачитать заключение организации, где выполнена работа. Спасибо.

СЕКРЕТАРЬ. Спасибо. Нет, дополнительных отзывов не поступало. Поступили отзывы только от оппонентов и ведущей организации. Сейчас я должна зачитать заключение организации, где была выполнена работа. Заключение Физического института имени Лебедева.

СЕКРЕТАРЬ. *Зачитывает Отзыв организации, где выполнена работа (ФИАН). Отзыв положительный, прилагается.*

ПРЕДСЕДАТЕЛЬ. Спасибо, Надежда Николаевна. Мы переходим к отзыву ведущей организации – Института космических исследований.

СЕКРЕТАРЬ. *Зачитывает Отзыв Ведущей организации (ИКИ РАН). Отзыв положительный, прилагается.*

ПРЕДСЕДАТЕЛЬ. Надежда Николаевна, спасибо. Дмитрий Александрович, каковы Ваши предпочтения, отвечать на все замечания вместе или после каждого отзыва отдельно?

СОИСКАТЕЛЬ. Я бы предпочел ответить вместе.

ПРЕДСЕДАТЕЛЬ. Хорошо. Тогда мы переходим к отзывам двух оппонентов, и после второго Вы дадите нам ответы на все замечания. Спасибо, Дмитрий Александрович. Начнем с присутствующего здесь оппонента. Тем более, что он первым указан в автореферате. Дмитрий Петрович, пожалуйста. Дмитрий Петрович у нас из ФТИ имени Иоффе. Прошу Вас.

## **ВЫСТУПЛЕНИЕ ПЕРВОГО ОППОНЕНТА**

*БАРСУКОВ Д.П. (Официальный оппонент, присутствует на заседании лично. Выступает с отзывом. Отзыв положительный, прилагается.)*

**ПРЕДСЕДАТЕЛЬ.** Дмитрий Петрович, громадное Вам спасибо. С одной стороны за лаконичность, а с другой стороны за глубочайшее прочтение диссертации и высказанные замечания. Но мыждемся ответов на них только после прочтения полного отзыва второго оппонента Владимира Алексеевича Черепенина, который по уважительной причине сегодня отсутствует. Соответственно, по правилам ВАК сейчас наш секретарь Надежда Николаевна нам его озвучит. Прошу Вас.

## **ВЫСТУПЛЕНИЕ ВТОРОГО ОППОНЕНТА**

*Оппонент Черепенин В.А. отсутствует на заседании по уважительной причине.*

**СЕКРЕТАРЬ.** *(Полностью зачитывает отзыв второго оппонента. Отзыв положительный, прилагается).*

**ПРЕДСЕДАТЕЛЬ.** Спасибо, Надежда Николаевна. Время на ответы на замечания. Дмитрий Александрович, насколько я понимаю, нужно снова не забыть нажать на кнопку о демонстрации экрана, а затем уже перейти на ваши слайды. Демонстрация есть, слайды видим, прошу вас.

*(Включается демонстрация экрана со слайдами 44-49, содержащими ответы на замечания в отзывах ведущей организации и оппонентов).*

## **ОТВЕТЫ НА ЗАМЕЧАНИЯ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ**

**СОИСКАТЕЛЬ.** Спасибо. Во-первых, я хотел бы ответить на замечания ведущей организации. Первое замечание касалось упоминания действительно важного эксперимента STEP по проверке принципа эквивалентности. Здесь хотел бы сказать, что в разделе 1.1.6 «Типы экспериментов по проверке эйнштейновского принципа эквивалентности» я рассматриваю лишь реализованные на настоящий момент эксперименты, но, тем не менее, я согласен, что такой важный эксперимент, как STEP, упрощенный вариант которого, кстати, недавно успешно завершился в эксперименте MICROSCOPE, следовало упомянуть. В этом смысле я согласен с замечанием ведущей организации, что это следовало бы упомянуть.

Второе замечание касалось того, что было бы более уместно перераспределить материал и, в частности, изложение методики компенсации, основанной на режиме «Частичный когерент» (смешанная синхронизация радиолиний), было бы уместно поместить в теоретическую главу, вместе с вводным изложением схемы Gravity Probe A. С этим замечанием я не вполне согласен. На мой взгляд, радиотехнические схемы компенсации нерелятивистского эффекта Доплера – Gravity Probe A и наша разработка – они относятся к области практической реализации гравитационного эксперимента с РадиоАстроном. И поэтому их, действительно, было уместно, как я сделал, изложить именно в третьей главе, посвященной особенностям эксперимента с РадиоАстроном.

И, наконец, третье замечание ведущей организации касалось того, что я не привожу никаких, даже предварительных результатов совместной обработки одно- и двухпутевых данных...

**ПРЕДСЕДАТЕЛЬ.** Дмитрий Александрович, мы на самом деле все замечания слышали, поэтому вы можете очень коротко на них сослаться, тем более, что вы их повторяете на экране. Давайте сразу ваши ответы. Спасибо.

**СОИСКАТЕЛЬ.** Да. В этом случае я не стал приводить эти результаты, потому что они, главным образом, не опубликованы. Как я уже говорил, готовится публикация по этим данным. Там точность, я тоже озвучивал, будет на уровне  $3 \times 10^{-4}$ . Это также не финальный результат. Как я уже говорил, будут статьи по РСДБ-данным, но, таким образом, я не вполне согласен с этим замечанием. Поскольку диссертация основана на опубликованных результатах, то я не стал приводить не опубликованные результаты.

Это все, что я мог бы сказать на замечания ведущей организации, и хотел бы далее перейти к замечаниям оппонента Черепенина Владимира Алексеевича.

## **ОТВЕТЫ НА ЗАМЕЧАНИЯ ОППОНЕНТА ЧЕРЕПЕНИНА В.А.**

**СОИСКАТЕЛЬ.** Здесь я, конечно, хотел бы тоже сделать предварительное... извиниться перед Владимиром Алексеевичем за опisku досадную, которая была сделана в автореферате в его отчестве. Ну и заодно заочно его поздравить с присуждением ему «академика». Так что он уже не член-корреспондент, как указано в автореферате, а академик. И дальше, переходя к его ценным замечаниям, первое его замечание по поводу точности оценки гравитационного потенциала. В разделе 3.5 мною рассмотрен вопрос о точности восстановления орбиты космического аппарата, которая необходима для расчета этой величины в эксперименте с РадиоАстроном. Но, тем не менее, я согласен, что этот вопрос был изложен достаточно кратко и его следовало изложить более подробно. В частности, следовало указать точность расчета орбиты, необходимую для расчета грав. потенциала на

дальностях до космического аппарата меньше 40 тыс. км. Там это не было сделано, было указано только, что она обеспечивается с помощью сеансов лазерной дальнометрии. И следовало привести более подробное обоснование требуемых точностей.

По поводу второго замечания, что следовало выделить геофизические факторы. Тоже эти вопросы рассматривались в разделе 3.5, но достаточно кратко. Т.е. кратко рассмотрен вопрос об учете ионосферного сдвига частоты, земных приливов, но в целом я согласен, что эти вопросы следовало изложить более подробно, и мы это замечание обязательно учтем в последующих статьях.

По поводу третьего замечания, что расчет графика был сделан в сильно упрощающих предположениях в разделе 1.4.2, я согласен, что это можно было сделать. Но мы осознанно это не сделали, т.к. это иллюстративный график, такой учет его бы только усложнил. Но подобный результат мы обязательно включим в статью по результатам обработки данных с РадиоАстроном, поэтому я согласен, что это ценное замечание, и оно будет учтено.

По поводу узости класса рассмотренных орбит, я полностью согласен с этим замечанием. Мы не рассчитываем, что это существенно изменит результат – например, позволит найти новый глобальный минимум в рассмотренной концепции эксперимента – скорее всего результат останется практически тем же. Но мы планируем обобщить рассмотренный класс орбит. Это будет сделано в ближайшее время, и будет соответствующая публикация.

По поводу недостаточно подробного, пятое замечание, изложения соотношений – здесь я не вполне согласен. Потому что многие соотношения, действительно, получаются в результате достаточно длинных выкладок и разложений по малым параметрам. Но мне эти вопросы кажутся техническими, и их в диссертацию можно было не включать. Единственно, конечно, можно было их включить в виде приложений, но я решил этого не делать. И, наконец, раздел о бортовых антеннах также во многом повторяет раздел о наземных, поэтому мне показалось вполне законным изложить этот вопрос более кратко, и с данным замечанием оппонента я лишь частично согласен.

По поводу шестого замечания, что формула (2.42) недостаточно четко прокомментирована. С этим я полностью согласен.

Еще два замечания, седьмое...

ПРЕДСЕДАТЕЛЬ. Извините, Вы же по этим обоим замечаниям согласны?

СОИСКАТЕЛЬ. Да.

**ПРЕДСЕДАТЕЛЬ.** Замечательно. Давайте будем обсуждать те, по которым вы не согласны.

## **ОТВЕТЫ НА ЗАМЕЧАНИЯ ОППОНЕНТА БАРСУКОВА Д.П.**

**СОИСКАТЕЛЬ.** Хорошо. Тогда это замечания следующего оппонента, Дмитрия Петровича Барсукова. По поводу первого замечания я согласен, поэтому не буду более подробно говорить.

По поводу второго замечания. Здесь я могу сказать, что мы рассматривали на начальной стадии реализации эксперимента возможность учета гравитомагнитных эффектов, но, к сожалению, эти эффекты требуют существенно более высокой точности эксперимента. Их мы не могли исследовать, но, действительно, их стоило бы обсудить в диссертации. И постньютоновские параметры, они требуют еще более высокой точности эксперимента и, по сути, второго порядка разложения. Поэтому они не могли быть нами исследованы, но также я согласен, что следовало об этом сказать.

По поводу третьего замечания я не согласен с замечанием оппонента. В действительности, формула (1.18) ошибок не содержит. Слагаемые с гравитационными потенциалами Солнца и Луны не дает вклада в (1.18), и это связано с отсутствием так называемого «noon-midnight redshift'a», т.е. наблюдатели на противоположных относительно Солнца сторонах Земли не ощущают, с точностью до приливных слагаемых, эффекта гравитационного замедления времени от поля Солнца – и то же самое для Луны. И это – прямое следствие принципа эквивалентности. Действительно, стоило упомянуть более подробно, почему эти слагаемые не учитываются, но ошибки в этой формуле нет. Вторая часть этого замечания, что приливные члены отсутствуют. Действительно, они там отсутствуют, но они не содержат параметров  $\varepsilon$ . Они регулярные, должны учитываться, но они не влияют существенно на модель. Но, наверно, я соглашусь, что стоило их как-то прокомментировать в тексте, что они в реальном эксперименте должны быть учтены.

По поводу четвертого замечания, что следовало оценить... с этим я согласен. С остальными замечаниями я тоже согласен, и по поводу последнего замечания, что было упущение – в презентации я эти периоды указал. Пожалуй, все.

**ПРЕДСЕДАТЕЛЬ.** Так, Вы закончили, Дмитрий Александрович, отвечать на все замечания оппонентов и ведущей организации. У нас присутствует один оппонент, и если у него есть желание продолжить дискуссию по поводу формулы... Вообще, я открываю сейчас возможность дискуссии, комментариев, выступлений для всех присутствующих, членов

диссертационного совета, любых желающих, оппонентов и так далее. Прошу. Дмитрий Петрович, Вы хотите что-то сказать? Дмитрий Петрович встает, чтобы сказать, что он согласен. Павел Борисович, прошу Вас.

## ОБЩАЯ ДИСКУССИЯ

ИВАНОВ П.Б. Я просто для ВАК хочу сказать, что я там выразил несогласие с одним утверждением, которое сделал оппонент, но, разумеется, оно никакого отношения к выводам диссертации не имеет. Поэтому его не стоит учитывать при оценке труда соискателя.

ПРЕДСЕДАТЕЛЬ. Оцениваем мы, но комментарий в протокол внесен. Большое спасибо. Коллеги, есть ли какое-нибудь желание выступить? Давайте я начну. Здесь в разных формулировках были сказаны такие правильные слова, что мы хотим всего и сразу, а именно мы хотим, чтобы в результате той громадной работы, которая, как мы видели, была проведена соискателем с его коллегами, научными руководителями, и не только с ними. Что в результате вот этого громадного, очень технически сложного эксперимента по проверке принципа эквивалентности на Радиоастроне, мы получили цифры, как минимум на уровне  $10^{-4}$  –  $10^{-5}$ . Но я хочу всем напомнить, что сегодня защищается кандидатская диссертация, хотя по времени ее защиты больше похожа на докторскую. И понятно, что такая тяжелая задача не может быть решена с наскока. И фактически то, что мы видим с Вами сегодня, дорогие коллеги, это очень серьезный глубокий труд, который фактически лег в основу того проекта по проверке принципа эквивалентности, который реализуется на Радиоастроне. По моему мнению, это очень качественная, крайне необходимая работа, которая получила первые результаты проверки принципа эквивалентности пока на сравнительно небольших точностях, на уровне  $10^{-2}$ , но на тех удалениях от Земли, которые раньше никогда реализованы не были. По моему мнению, эта работа несомненно заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук на стыке специальностей, как у нас это сегодня сделано на нетрадиционном заседании нашего диссовета. Можем только пожелать соискателю сегодня, а также его коллегам, продолжить работу в этом направлении, а нам – увидеть новые диссертации, кандидатские и докторские, где мы собственно услышим уже про ожидаемые нами цифры  $10^{-4}$  –  $10^{-5}$ . Поддерживаю эту диссертацию. Спасибо. Коллеги, есть ли еще какие-то пожелания выступить? Так, дорогой Леонид Ильич, Вы тогда включайте у себя видео. Так, замечательно, мы Вас теперь видим и слышим. Прошу Вас.

ГУРВИЦ Л.И. Спасибо. Прежде всего я должен обозначить свое место в обсуждаемой теме. Я в некотором смысле инсайдер эксперимента, который

сегодня представлен на защиту в этой работе. Экспериментом в целом занимается международная группа, в которой соискатель играет ключевую роль. Я хотел бы напомнить всем присутствующим, что Радиоастрон запускался вовсе не для этого эксперимента, а совсем для других целей, а тот факт, что с помощью космического аппарата Радиоастрон и его наземной инфраструктуры удалось провести эксперимент — это в чистом виде бонус, который дался очень нелегким трудом, и значительный вклад в успех этого эксперимента принадлежит сегодняшнему соискателю. Надо все-таки вспомнить, что эксперимент зарождался где-то в середине 90-х годов и происходило это совсем неоднозначным образом. Например, в 98-м году в результате совещания, которое специально было посвящено Радиоастрону и проходило в Массачусетском технологическом институте, практически все участники совещания, как российские, так и зарубежные, высказались против установки на борт Радиоастро́на водородных стандартов, а без таковых, естественно, эксперимента и не было бы. Помню, что Николай Семенович Кардашев был этим очень расстроен, и единственный аргумент в пользу установки был высказан Норбертом Бартелем из Йоркского университета в Канаде, и он обратил внимание именно на возможность проведения вот такого эксперимента. Помню также, что после этого совещания, рядом с 707 комнатой, где сейчас находятся члены совета, в 719 комнате у Николая Семеновича Кардашева была такая беседа неформальная с Владимиром Борисовичем Брагинским, я оказался свидетелем и участником. И Брагинский очень положительно высказался о перспективах такого эксперимента, это вдохновило многих. Я хочу еще отметить, что сам по себе эксперимент, который находится в центре представленной работы, вообще говоря, дело неблагодарное. Поскольку его главный положительный результат — это подтверждение того, во что все и так верят. Эйнштейн всегда прав, по крайней мере последние 100 лет никаких иных вариантов представлено не было. Вот если бы удалось показать, что эпсилон отличается от нуля, вот тогда это была бы обложка Nature, все газеты, вечерние новости и так далее. Ну а так все нормально, эпсилон около нуля и всем хорошо. Так вот, заниматься таким экспериментом — это дело сложное, неблагодарное, и я бы отметил, что Дмитрий Александрович продемонстрировал чрезвычайно широкий диапазон своих возможностей как исследователя. Он пришел в этот эксперимент как физик-теоретик, и по ходу дела освоил многие специальности как смежные, так и совсем не смежные. Об этом говорил Валентин Николаевич. Именно Дмитрий Александрович взял на себя основную нагрузку согласования всех экспериментальных операционных действий с НПО имени Лавочкина, с наземными станциями и так далее. Естественно, на это ушло много времени и много сил. Дмитрий Александрович проявил себя в этом деле, на мой взгляд, как очень серьезный и умелый и физик, и инженер, и в каком-то смысле организатор. Это безусловно положительные качества. Наконец, я хочу обратить внимание на то, что у представленной работы есть очень важный побочный результат, не очень-то звучавший. Совсем кратко. Валентин Николаевич сказал о том, что

исследование кинематики фазового центра антенны важно для РСДБ и космических РСДБ в будущем. Да, это так, безусловно. Но гораздо ближе перспектива применения описанного эффекта в радиофизических экспериментах в планетных проектах, которые сейчас находятся в стадии завершения запуска. Я, например, участвую в одном из них. Это европейский проект по исследованию Юпитера, также есть ряд интересных радиофизических экспериментов и уже сейчас ссылаются на.. точнее используются результаты публикации, которая сегодня была представлена как одна из глав диссертации. Это тип работы, который не будет связан с большим цитированием, поскольку это такая радиотехническая, радиоинженерная вещь, очень важная. Я бы отметил еще раз, что Дмитрием Александровичем продемонстрирован очень широкий диапазон владения материалом в самых разных областях, соответствующих специальностям, которые сегодня представлены. Тут и физика, и астрофизика, и прикладная радиотехника. Заключить свое выступление я хочу тем, что подчеркну безусловный, на мой взгляд, факт, что диссертация соответствует требованиям, предъявляемым к таковым, а диссертант, конечно, заслуживает степени кандидата физ-мат наук. Спасибо!

**ПРЕДСЕДАТЕЛЬ.** Спасибо, Леонид Ильич. Коллеги, еще желание выступить? Комментарии, вопросы? Прошу Вас, Владимир Николаевич.

**ЛУКАШ В.Н.** Я хотел бы обратить внимание, что Лоренцева симметрия проверяется уже более 10 лет на масштабах совсем другого уровня. Из Солнечной системы это ушло в расстояния пространственно-временные горизонта событий. Это расстояния гигапарсеки и по времени это времена стандартной космологической модели. Это основывается на лоренцевой симметрии. Что касается диссертации, я буду голосовать за, потому что я полностью согласен с тем, что сказал Дмитрий Петрович, что это точности часов спутников солнечной системы, что это чрезвычайно важная тяжелая работа и я, конечно, буду голосовать за. Спасибо.

**ПРЕДСЕДАТЕЛЬ.** Благодарю, Владимир Николаевич. Коллеги, еще желание выступить есть? [...] У Юрия Андреевича Щекинова были сложности с микрофоном, поэтому он свое выступление, которое он хотел сделать, только что закончил набивать и послал в чат нашего зума. Юрий Андреевич хотел отметить два обстоятельства. Во-первых, эксперимент безусловно сложный и неблагодарный. Но именно такие эксперименты иногда приводили к революциям в физике. Во-вторых, работа выполнена чрезвычайно обстоятельно, результаты убедительные и нет никаких сомнений в том, что претендент заслуживает степени кандидата наук. Все.

**ПРЕДСЕДАТЕЛЬ.** Я вижу каждого удаленного участника, если есть желание поднимайте руки. Больше я никого не вижу. Ну что, дорогие друзья, больше желающих выступить нет, задать вопросы, прокомментировать. Таким

образом, я закрываю общую дискуссию. Соискателю предоставляется заключительное слово. Прошу Вас, Дмитрий Александрович.

**СОИСКАТЕЛЬ.** Я хотел бы выразить благодарность достаточно большому количеству людей, потому что работа эта затрагивала очень многих. Без участия многих людей, я даже не смогу наверное всех упомянуть, эта работа просто бы не состоялась. Ну, конечно, в первую очередь я хотел бы поблагодарить моих научных руководителей, которые здесь присутствуют, за руководство и возможность осуществлять эту работу интересную. Оппонентов, ведущую организацию за внимательное прочтение работы, ценные указания, которые будут впоследствии обязательно учтены. Также я хотел бы поблагодарить Юрия Юрьевича Ковалева за внимательное отношение к этой работе, многочисленные ценные указания на протяжении длительного времени и советы. Я хотел бы поблагодарить Михаила Васильевича Попова за постоянную поддержку на протяжении всей организации этого эксперимента. Леонида Ильича Гурвица за поддержку, комфортную обстановку в нашей научной группе и за множество других вещей. Александра Владимировича Бирюкова за многочисленные обсуждения ценные, без которых бы также не состоялась эта работа, за поддержку, советы. Также Кауца Владимира Леонидовича, надеюсь он здесь присутствует за поддержку постоянную и тоже многочисленные советы. В общем, долго можно обсуждать, потому что работа многих очень затронула, очень многие помогали, по сути весь коллектив Астрокосмического центра мне стоило поблагодарить бы, я это хотел бы с удовольствием сделать. Ну и наконец членов семьи, без поддержки которых эта работа не состоялась бы. Спасибо большое.

**ПРЕДСЕДАТЕЛЬ.** Спасибо, Дмитрий Александрович. Ну что ж. На этом наша защита заканчивается в части выступлений и переходит в часть голосования. Мы сейчас переходим к тайному голосованию. Прошу, Надежда Николаевна, расскажите нам детали нашего особого тайного голосования.

**СЕКРЕТАРЬ.** Спасибо. В соответствии с обновленным положением ВАК при проведении заседания диссовета в удаленном режиме, то есть с участниками, присутствующими в удаленном режиме, тайное голосование проводится с использованием информационных технологий. Мы у нас в организации используем систему электронного голосования Криптовече. Всем членам совета на данный момент уже разосланы только что индивидуальные ссылки, на адреса электронной почты, с которыми все члены диссовета зарегистрированы в этой системе. Ссылки на голосование. Для того, чтобы проголосовать, нужно пройти по ссылке из письма, нажать кнопку зарегистрироваться, после чего будет доступна повестка голосования. Повестка голосования у нас – присуждение степени кандидата наук Литвинову Дмитрию Александровичу. Дальше нужно выбрать один из вариантов за или против. Если будут выбраны оба варианта или не выбрано

ни одного, то такой электронный бюллетень будет учтен в системе как недействительный. Все, кто имеет доступ к своим личным устройствам, смартфоны, ноутбуки, компьютеры, могут голосовать с них, у кого нет доступа к личному устройству, то у нас здесь есть специальный компьютер, ноутбук. Я помогу технически осуществить процесс голосования.

ВЯТЧАНИН С.П. Что, нам не дадут бумажные бюллетени?

СЕКРЕТАРЬ. Нет, Вы же регистрировались. Конфиденциальность гарантирована.

ПРЕДСЕДАТЕЛЬ. Прошу прощения у наших введенных членов совета, бумажки у вас не будет. Мы поможем вам без бумажек ваше решение нужным образом изъяснить. [...] Я официально объявляю о том, что мы расходимся на голосование.

## **ГОЛОСОВАНИЕ**

*Перерыв на голосование. Все члены диссовета голосуют со своих устройств с помощью системы для электронного тайного голосования “КриптоВече”. Трансляция не прерывается.*

ПРЕДСЕДАТЕЛЬ. Коллеги, мы вернулись после объявленного перерыва. И сейчас я прошу ученого секретаря объявить результаты голосования.

СЕКРЕТАРЬ. Так. Голосование успешно завершилось. Все 19 присутствующих членов диссовета проголосовали. Результаты вы видите на экране. *(На экране демонстрируются результаты голосования с помощью системы Криповече)*. Всего было роздано 19 электронных бюллетеней. ЗА – 19, ПРОТИВ – 0, недействительных бюллетеней – 0. Таким образом, единогласно.

ПРЕДСЕДАТЕЛЬ. Большое спасибо. Дорогие коллеги, теперь нам нужно утвердить итоги тайного голосования. Прошу поднять руки тех, кто за утверждение итогов голосования. Мы видим и удаленных участников. *(Все голосуют поднятием руки)*. Прошу опустить. Кто против, поднимаем руки. Кто воздержался? Решение принято единогласно. Утверждаем результаты голосования. Теперь давайте перейдем к обсуждению заключения диссовета по данной диссертации. Проект был разослан нам ранее электронно. Он также лежит сейчас в бумажном виде на столе. Многие из нас его не только видели, но даже правили. Поэтому он уже в очень неплохом виде. Если есть какие-то дополнительные предложения, сейчас самое время их озвучить. Слушаю вас внимательно.

СЕКРЕТАРЬ. Здесь я могу добавить, что комментарии от Юрия Юрьевича в этом варианте уже учтены. Все, что мне присылали, все было учтено.

ПРЕДСЕДАТЕЛЬ. Замечательно. Есть ли еще какие-то замечания? Нет. Тогда, дорогие друзья, я прошу вас проголосовать по вопросу принятия заключения по данной диссертации. Принимается простым большинством голосов. Прошу поднять руки кто за. Опускаем, спасибо. Кто против? Таких нет. Кто воздержался? Таких нет. Заключение принято. Вот теперь мы поздравляем соискателя. (*Аплодисменты*). Дмитрий Александрович, мы вас поздравляем. А также я благодарю за участие в нашем заседании всех членов диссертационного совета, кто у нас всегда участвует. А также благодарю введенных на данное заседание Сергея Петровича, Валерия Павловича и Игоря Антоновича. Громадное спасибо, что вы к нам приехали. Я объявляю заседание закрытым. Спасибо.

Председатель заседания, заместитель  
председателя диссертационного совета,  
доктор физико-математических наук

Ю.Ю. Ковалев

Ученый секретарь диссертационного совета,  
кандидат физико-математических наук

Н.Н. Шахворостова

*09 июня 2022 года.*