

Московский Государственный Университет им. М.В. Ломоносова
Государственный Астрономический Институт им. П.К. Штернберга

На правах рукописи
УДК 523.3

ТУРЫШЕВ Вячеслав Геннадьевич

**Высокоточные методы
релятивистской навигации, небесной механики и астрометрии
и их применение для экспериментальных проверок
современных теорий гравитации**

Специальность: 01.03.01 – *астрометрия и небесная механика*

АВТОРЕФЕРАТ:
диссертации на соискание учёной степени
доктора физико-математических наук

Москва – 2008

Работа выполнена в Лаборатории гравиметрии Государственного астрономического института имени П.К. Штернберга при Московском государственном университете имени М.В. Ломоносова и в Лаборатории реактивного движения Национального агентства США по авиации и космонавтике при Калифорнийском технологическом институте.

Официальные оппоненты:

Доктор физико-математических наук,
академик АН Республики Татарстан, профессор
Валеев Султан Галимзянович
зав. кафедрой прикладной математики и информатики
Ульяновского государственного технического университета

Доктор физико-математических наук,
Куимов Константин Владиславович
зав. отделом астрометрии и службы времени Государственного астрономического института имени П.К. Штернберга при МГУ имени М.В. Ломоносова

Доктор технических наук, профессор
Шаргородский Виктор Даниилович
генеральный конструктор Федерального государственного унитарного предприятия прецизионного приборостроения

Ведущая организация:

Институт Астрономии РАН

Научный консультант:

Доктор физико-математических наук, профессор
Жаров Владимир Евгеньевич

Защита диссертации состоится 13 ноября 2008 г. в 14 часов на заседании диссертационного совета Д501.001.86 при Московском государственном университете имени М.В. Ломоносова.

Адрес: 119991, г. Москва, Университетский проспект д. 13, ГАИШ МГУ

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Государственного астрономического института имени П.К. Штернберга при МГУ имени М.В. Ломоносова (Москва, Университетский проспект д. 13, ГАИШ МГУ).

Автореферат разослан « ____ » _____ 2008 г.

Ученый секретарь
Диссертационного совета
кандидат физ.-мат. наук

С.О. Алексеев

1. ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

25 ноября 2015 года исполнится сто лет со дня первой публикации общей теории относительности (ОТО), развитой А. Эйнштейном в период 1905-1915. Примечательно, что на протяжении более чем 90 лет эта теория продолжает быть областью активных исследований, как теоретических, так и экспериментальных.

Хорошо известно, что ОТО начала своё существование в 1915 году с эмпирического объяснения аномальной прецессии перигелия орбиты планеты Меркурий. Эта аномалия была известна задолго до Эйнштейна, составляя 43 угловые секунды в столетие, и не могла быть объяснена теорией гравитации Ньютона, бросая, тем самым, вызов физике и астрономии. Общая теория относительности разрешила эту проблему, открыв тем самым новую эру в физике гравитации.

Вслед за этим, астрометрические наблюдения, проведённые экспедицией А. Эддингтона во время солнечного затмения в 1919 году, подтвердили существование релятивистского эффекта отклонения света в гравитационном поле массивных тел. Кроме того, измерения Эддингтона подтвердили значение величины угла гравитационного отклонения в полном соответствии с предсказаниями ОТО. Эти наблюдения стали первым экспериментом, специально проведённым с целью проверки ОТО, принеся самой теории мгновенный успех.

Эддингтону также принадлежит первоначальная версия параметризованного пост-Ньютоновского (ППН) формализма, который в наши дни с успехом используется в целях постановки и объяснения результатов гравитационных экспериментов. В ППН формализме, различные теории отличаются друг от друга только значениями десяти безразмерных параметров. Два ППН параметра, представляющие особый интерес, это параметры γ и β , которые отражают соответственно меру кривизны пространства создаваемого единичной массой и степень нелинейности гравитационного взаимодействия. Эти параметры принимают значения $\gamma=\beta=1$ в ОТО; в рамках других теорий γ и β могут иметь иные значения.

Настоящая революция в экспериментальной проверке ОТО началась в 1970-х годах в связи с большими достижениями в многих областях науки и технологии. Прежде всего, это связано с развитием космических исследований, появлением

методов высокоточной навигации космических аппаратов (КА), улучшением точности астрономических измерений и лазерной дальнометрии Луны (ЛДЛ).

Так, анализ радиометрических данных, полученных с КА Viking 1 за 14 месяцев его работы на поверхности Марса, позволил существенно улучшить точность орбиты Марса. Что особенно важно, этот эксперимент позволил проверить ОТО с точностью 0.1%, тем самым подтвердив предсказания этой теории о том, что время следования радиосигналов от Земли до Марса и обратно увеличивается за счёт присутствия гравитационного поля Солнца. В 1978 году, соответствующее значение метрического параметра Эддингтона γ составило 1.000 ± 0.002 .

Следует отметить, что современные астрометрические измерения с использованием радиоинтерферометров со сверхдлинной базой (РСДБ) достигли точности лучше, чем 0.1 мс дуги, позволив использовать РСДБ в целях определения параметра кривизны пространства γ . В 2004 году, обработка данных РСДБ привела к улучшенному значению этого параметра, а именно, $\gamma = 0.99983 \pm 0.00045$, обеспечив точность в 0.045% в проверках теорий гравитации методами РСДБ.

В 2004 г. проведённая нами обработка данных наблюдений ЛДЛ эксперимента, ограничила комбинацию параметров $4\beta - \gamma - 3 = (4.0 \pm 4.3) \times 10^{-4}$, что привело к точности в 0.011% в проверках сильного принципа эквивалентности при помощи прецизионных измерений лунной орбиты.

Наконец, эксперимент, проведённый с использованием микроволновой системы связи, работающей на комбинации частот в 7.2 GHz и 34.3 GHz на борту КА Cassini, улучшил точность определения параметра γ до $\gamma - 1 = (2.1 \pm 2.3) \times 10^{-5}$. Этот результат, достигший точности в 0.002% в экспериментах, проведённых в Солнечной системе, является лучшей на сегодняшний день проверкой ОТО.

Отметим, что ОТО также хорошо согласуется и с данными экспериментов пульсарной астрономии. В частности, анализ измерений релятивистских посткеплеровских поправок к описанию орбитального движения двойной системы PSR J0737-3039A/B дал результаты, согласующиеся с ОТО с точностью 0.05% (3σ). На сегодняшний день, это то самая точная проверка ОТО с помощью пульсаров.

В результате, как в пределе слабого гравитационного поля (в Солнечной системе), так и в более сильных полях (в системах двойных пульсаров), выводы ОТО были хорошо проверены. Таким образом, на протяжении более чем 90 лет со времени своего появления, ОТО продолжает с лёгкостью преодолевать все испытания.

Тем не менее, несмотря на выдающиеся успехи ОТО, существует немало причин сомневаться в правильности этой теории. С теоретической точки зрения, существует сразу несколько проблемных направлений, в основном, касающихся режима сильного гравитационного поля, которые включают в себя появление пространственно-временных сингулярностей и невозможность классического описания физических процессов в очень сильных гравитационных полях. Решением целого круга таких проблем могло бы стать квантование гравитации. Но, несмотря на недавние успехи современных калибровочных теорий поля в описании электромагнитных, сильных и слабых взаимодействий, вопрос описания гравитации на квантовом уровне до сих пор остаётся неразрешённым. Более того, заметный прогресс, достигнутый в наблюдательной космологии, подталкивает к поиску новых, неэйнштейновых моделей эволюции Вселенной.

Сложности обоснования квантования гравитации, а также недавние космологические наблюдения показывают, что тензорная структура гравитации, лежащая в основе ОТО, возможно требует изменений. Заметим, что на больших пространственных масштабах, таких, например, как галактические и космологические, ОТО ещё не подвергалась серьёзным проверкам. Тем не менее, существует мнение, согласно которому наблюдения, подтверждающие наличие тёмной материи и тёмной энергии, указывают на несостоятельность ОТО в описании физических процессов происходящих на больших расстояниях и при малых ускорениях или малой кривизне. В теориях, пытающихся расширить или модифицировать ОТО для решения вышеуказанных проблем, в дополнение к ньютоновскому закону обратных квадратов, появляются новые далекодействующие силы.

Кроме того, вне зависимости от космологической постоянной, существуют причины для того, чтобы ввести в рассмотрение дополнительные поля, особен-

но скалярные. В то время как существование таких полей предполагается многими современными теориями, их наличие вызывает неэйнштейновское поведение гравитирующих систем. В частности, ожидаемые отклонения от ОТО приводят к нарушению принципа эквивалентности (ПЭ), изменению крупномасштабной структуры Вселенной и подвергают сомнению постоянство фундаментальных констант. Эти предсказания побуждают к поискам отклонений гравитационных явлений от поведения, предсказываемого ОТО, тем самым представляя собой важную причину для проведения новых гравитационных исследований и в особенности экспериментов космического базирования.

Исторически сложилось так, что эксперименты в области фундаментальной физики проводились, прежде всего, в земных условиях. В таких экспериментах научный прогресс зависит как от наличия хорошо продуманной экспериментальной стратегии, так и от использования технологий, позволяющих преодолеть ограничения, налагаемые окружающей средой. С недавнего времени экспериментальные условия в наземных лабораториях зачастую уже не могут быть улучшены до необходимого уровня «чистоты», поэтому проведение экспериментов в космосе является обоснованным шагом.

Размещение инструментов в космосе открывает доступ к условиям с особой динамической чистотой, недостижимым в земных условиях, но имеющим важнейшее значение для успешного проведения прецизионных экспериментов. В частности, для многих экспериментов в области фундаментальной физики, и в особенности тех, которые направлены на изучение гравитации, космологии, и атомной физики, космическое базирование становится неизбежным.

С точки зрения экспериментальной проверки теорий гравитации, наша Солнечная система является уникальной лабораторией, в которой присутствуют условия, необходимые для проведения важнейших фундаментальных исследований. Тщательно разработанный гравитационный эксперимент космического базирования может быть значительно точнее наземного. К благоприятным факторам относятся возможность компенсации негравитационных шумов (на сегодняшний день вплоть до $10^{-14} \text{ m/s}^2/\sqrt{\text{Hz}}$), доступность значительных перепадов

гравитационного потенциала (так, потенциалы около Солнца и в земных условиях отличаются 3000 раз) и соответствующих ускорений (существуют траектории Земля-Солнце, на которых ускорения могут изменяться в 10^4 раз), а также возможности достигать больших расстояний, скоростей и привязываться к инерциальным системам отсчёта – т.е. все те условия, которые принципиально недостижимы в земных лабораториях.

Таким образом, в сочетании с новейшими высокоточными измерительными технологиями, уникальные условия космического базирования принципиально важны для прогресса в гравитационных исследованиях.

1.1. Актуальность темы

На основании вышесказанного, поиск, регистрация и изучение гравитационных эффектов неэйнштейновского характера является принципиально важной научной задачей, представляющей необходимый шаг на пути к разрешению ряда ключевых проблем современной теоретической физики, астрофизики, и космологии. Такая задача может рассматриваться как конкретная *решаемая* проблема, исследование которой опирается на вполне развитый для этих целей современный аппарат математической физики и современных средств компьютерного моделирования. В то же время, в силу космической специфики поставленного круга задач, решение этой проблемы также опирается на значительный научно-технический потенциал, накопленный к настоящему времени во многих областях прикладной физики, передовых космических технологий и соответствующих промышленных разработок.

Поэтому, задачи разработки и проведения экспериментальных исследований в области фундаментальной гравитации с использованием новейших измерительных технологий и инструментов космического базирования являются весьма актуальными. Решение поставленных задач представляет интерес для широкого круга физиков, чьи интересы лежат, прежде всего, в области гравитационной физики, астрофизики и космологии, а также имеют важное практическое значение для астрометрии и небесной механики.

Настоящая диссертация представляет собою вклад в решение вышеперечисленных задач.

1.2. Цель исследования и постановка задачи

Основной целью исследования является создание и развитие высокоточных методов релятивистской навигации, небесной механики и астрометрии, а также их применение для экспериментальных проверок современных теорий гравитации в условиях космического базирования.

В диссертации ставятся и рассматриваются следующие задачи:

- Научное обоснование, разработка и построение моделей астрометрических измерений проводимых с использованием оптических интерферометров с длинной базой (ОИДБ).
- Создание и развитие методов оптимизации лазерных метрологических измерений и алгоритмов управления ОИДБ космического базирования.
- Построение теории астрономических систем координат для решения практических задач высокоточной навигации, небесной механики и астрометрии.
- Усовершенствование методов и релятивистской модели наблюдений лазерной дальнометрии Луны (ЛДЛ) с последующей обработкой данных.
- Разработка и проведение гравитационных экспериментов с использованием методов навигации КА, микроволновой и оптической дальнометрии Луны и планет, а также астрометрических наблюдений с применением ОИДБ.
- Научное обоснование и разработка новых гравитационных экспериментов космического базирования.

1.3. Основные положения, выносимые на защиту

1. Впервые предложен метод «регуляризации» базы ОИДБ, позволяющий использовать лазерно-метрологические измерения в целях компенсации вибраций протяжённой базы, вариаций её длины и изменения инерциальной ориентации базового вектора, неизбежных при конечном времени интегрирования сигнала в наблюдениях объектов малой звёздной величины.
2. Впервые разработан новый аналитический метод «фазоров» в целях определения фазы, контрастности и амплитуды интерференционной картины при

- работе с полихроматическим светом. Продемонстрировано преимущество метода для вычисления фазы сигнала в мультисканальном режиме работы.
3. Впервые разработана самосогласованная релятивистская теория локальных систем координат для решения задач навигации, небесной механики и астрометрии. Предложен новый теоретико-полевой подход для описания движения системы N тел в рамках метрических теорий гравитации.
 4. Установлены новые экспериментальные пределы на эффекты неэйнштейновской гравитации. Так, при проведении исследований с использованием данных ЛДЛ любые нарушения ПЭ были ограничены на уровне $\Delta[m_G/m_I]_{пэ} = (-1.0 \pm 1.4) \times 10^{-13}$. Любые нарушения сильного ПЭ (СПЭ) были ограничены на уровне $\Delta[m_G/m_I]_{спэ} = (-2.0 \pm 2.0) \times 10^{-13}$. Кроме того, определено значение параметра возможного нарушения СПЭ $\eta = 4\beta - \gamma - 3 = (4.4 \pm 4.5) \times 10^{-4}$, значение параметра β было определено на уровне $\beta - 1 = (1.2 \pm 1.1) \times 10^{-4}$. Геодезическая прецессия, выраженная как относительное отклонение от значения ОТО, была измерена: $K_{gp} = -0.0019 \pm 0.0064$. Был установлен новый предел на возможную временную зависимость гравитационной постоянной $(dG/dt)/G = (4 \pm 9) \times 10^{-13}$ в год. Результат интерпретирован как отсутствие локального (~ 1 а.е.) расширения масштаба Солнечной системы.
 5. Впервые предложено создание ЛДЛ эксперимента нового поколения, включающее размещение на Луне усовершенствованных уголкового отражателей и компактных лазерных трансиверов с ошибкой по цели не более 1 мм.
 6. Впервые предложен и разработан новый эксперимент по лазерной дальнометрии Марса (ЛДМ) предполагающий достигнуть точности в 1 мм при измерениях расстояния Земля-Марс. Впервые было предложено проведение такого эксперимента в рамках отдельной космической экспедиции на Марс.
 7. Впервые предложены и разработаны принципиально новые гравитационные эксперименты космического базирования в целях существенного улучшения проверок ОТО в Солнечной системе. В частности, предложены проекты LATOR и BEACON, позволяющие измерить ППН параметр γ с точностью в 10^{-9} .

8. Открытие нового физического эффекта ставшего известным как «Аномалия Пионеров». Суть эффекта, представляющего собою нарушение гравитационного закона обратных квадратов, состоит в присутствии небольшого и постоянного во времени сдвига Доплеровской частоты, обнаруженного при обработке данных КА Pioneer 10 и 11, полученных с расстояний 20-70 а.е. от Солнца. Этот аномальный сдвиг может быть объяснён постоянным и направленным к Солнцу ускорением обоих КА с величиной $a_p = (8.74 \pm 1.33) \times 10^{-10} \text{ м/с}^2$. Впервые сформулирована стратегия и основные задачи исследований, а также проведены широкомасштабные междисциплинарные исследования обнаруженного эффекта, с целью установления природы найденного явления.

1.4 Научная новизна

Практически все основные результаты диссертации получены впервые в мире.

1. Впервые разработаны новые методы оптимизации и алгоритмов управления оптическими интерферометрами космического базирования. В частности, предложен новый метод регуляризации базового вектора с учётом его динамики в локальной системе координат. Впервые новый метод успешно применен в рамках проекта космического интерферометра SIM.
2. Впервые разработаны аналитические и численные методы определения параметров интерференционной картины в случае работы с полихроматическим светом. Высокоточный метод эффективен для минимизации ошибок вычисления фазы в различных режимах модуляции сигналов.
3. Впервые обоснована необходимость и начато создание релятивистской модели наблюдений в проекте космического интерферометра SIM.
4. Впервые предложен и разработан итеративный теоретико-полевой метод решения полевых уравнений метрических теорий гравитации и создания, на его основе, иерархии астрономических систем координат в рамках решения задачи N протяжённых тел в ППН формализме. Выведены уравнения поступательного и вращательного движений массивных протяженных тел произвольной формы, состава и мультипольной структуры.

5. Впервые предложено и развито новое направление исследований, связанных с созданием эксперимента ЛДЛ нового поколения, включая разработку улучшенных уголкового отражателей и компактных лазерных трансиверов космического базирования для работы на расстояниях Земля-Луна.
6. Впервые научно обоснована необходимость развития методов межпланетной лазерной дальнометрии в целях проверок ОТО. В связи с этим, впервые предложен и разработан космический проект по реализации ЛДМ.
7. Впервые разработаны несколько новых крупномасштабных экспериментов космического базирования по проверке современных теорий гравитации методами лазерной дальнометрии и ОИДБ. В частности, научно обоснованы и разработаны проекты LATOR и BEACON поставившие своей задачей измерение значения ключевого ППН параметра γ с точностью на уровне 1×10^{-9} .
8. Открыт новый эффект «Аномалия Пионеров», обнаруженный при изучении траекторий КА Pioneer 10 и 11. Впервые проведено крупномасштабное исследование «Аномалии Пионеров», приведшее к установлению физической природы части обнаруженного эффекта.

1.5 Научная и практическая значимость, перспективы исследований

Предложен новый метод регуляризации базового вектора в целях оптимизации алгоритмов управления оптических интерферометров с длинной базой (ОИДБ). В применении к проекту SIM, наличие двух опорных интерферометров обеспечивает необходимую информацию об ориентации базы научного интерферометра. Изменения её ориентации будут отслеживаться системой внешней метрологии в комбинации с использованием опорных интерферометров. Полученные данные будут использоваться для восстановления инерциальной ориентации вектора базы научного интерферометра в течение всего времени наблюдения. Предложенный формализм упреждающего обновления динамической информации об ориентации базы позволяет концептуально обосновать работу всего инструмента SIM. В настоящее время созданный метод активно используется при разработке системных узлов и алгоритмов наблюдений в этом проекте.

Создан новый аналитический метод работы с полихроматическим светом, позволяющий определить информацию о фазе, контрастности и амплитуды интерференционной картины в ходе измерений ОИДБ. Модель учитывает большое количество физических и инструментальных эффектов, и справедлива в случае фильтра с произвольной полосой пропускания. Построение модели позволило существенно упростить и ускорить численное моделирование астрометрических измерений и внедрение этих разработок при создании проекта SIM.

Создан новый метод построения локальных систем координат протяженных массивных тел в рамках ППН формализма, который не требует для этого дополнительных предположений о характере движения материи внутри тел. Метод облегчает вывод уравнений поступательного движения системы из N тел, характеризуемых, в частности, массой, квадрупольным моментом и спином.

Существующий ППН формализм существенно расширен за счет создания завершенной и самосогласованной теории локальных систем координат протяженных массивных тел, входящих в систему из N тел. Использование локальных систем координат позволяет с последовательных позиций воспроизвести все известные результаты, касающиеся уравнений движения системы N тел в ППН формализме, а также получить целый ряд новых результатов.

Выведенные в работе уравнения поступательного и вращательного движений пробных частиц и массивных протяженных тел могут использоваться для практического моделирования движения ИСЗ и различных небесных тел в рамках ППН формализма. Выведенные уравнения движения относительно локальной системы координат позволили предложить новые гравитационные эксперименты с использованием КА на орбитах вокруг Меркурия и Марса.

Строительство APOLLO – станции ЛДЛ нового поколения вызвало необходимость создания методов для обеспечения теоретической и технической поддержки работы станции. В этих целях было проведено исследование основных особенностей управления этим инструментом и поиск решений для достижения его максимальной точности. Эта работа позволила APOLLO приступить к научной обработке данных значительно раньше предполагаемого срока.

Указанная выше работа привела также и к необходимости уточнённой постановки задачи проведения исследований по экспериментальной проверке современных теорий гравитации с помощью ЛДЛ. Работа включила в себя обновление модели наблюдений, калибровку систем и данных, полученных от APOLLO и обеспечение экспериментальных условий необходимых для вывода ЛДЛ экспериментов на уровень работы с точностью лучше, чем 1 мм.

Предложено и развито новое направление исследований связанных с разработкой и созданием новых инструментов для решения задач лазерной дальнометрии. В сочетании со значительно усовершенствованными ЛДЛ станциями, новые инструменты будут в состоянии обеспечить увеличение точности ЛДЛ в 25 раз (с 2.5 см до 1 мм). Такой прогресс, переведет ЛДЛ на новый режим работы и, тем самым, обеспечит условия для получения новых данных о внутреннем строении Луны, особенностей лунной геодезии, одновременно предоставив уникальные условия для проверок современных теорий гравитации.

Автором были впервые проанализированы возможности проверки нарушения СПЭ в эксперименте по дальномерным измерениям между Землёй и Марсом. Используя аналитические и численные методы, было впервые показано, что измерения дальности Земля-Марс с точностью в σ метров может обеспечить точность параметра $\eta = 4\beta - \gamma - 3$ на уровне $\sigma_\eta \sim (1-12) \times 10^{-4} \sigma$.

В развитие вышеуказанных идей, был предложен и разработан новый эксперимент по ЛДМ с ошибкой по дальности в 1 мм на расстоянии Земля-Марс. Ожидается, что ЛДМ приведёт к значительному увеличению точности в исследованиях орбитальной динамики Марса, особенностей его вращения, внутреннего строения, а так же в исследованиях его поверхности и атмосферы. Кроме того, ЛДМ приведёт к значительному улучшению точности проверок современных теорий гравитации. В частности, точность измерения ряда релятивистских параметров улучшится в 20-1000 раз по сравнению с нынешними пределами.

Впервые предложено создание нескольких новых экспериментов космического базирования в целях проверки современных теорий гравитации. Так, были обоснованы и разработаны эксперименты: LATOR (Laser Astrometric Test Of Rela-

tivity) и BEACON (Beyond Einstein Advanced Coherent Optical Network). Опираясь на методы лазерной дальнометрии и ОИДБ, эти эксперименты измерят значение ППН параметра γ с точностью на уровне 1×10^{-9} , тем самым обеспечив существенный прорыв в наших знаниях релятивистской гравитации и космологии.

При исследовании движения КА Pioneer 10 и 11 открыт новый физический эффект представляющий собой нарушение гравитационного закона обратных квадратов ставший известным как «Аномалия Пионеров». При изучении этого эффекта, впервые собрана и обработана уникальная коллекция Допплеровских данных полученных с Pioneer 10 и 11. Кроме того автору удалось обнаружить и сохранить телеметрическую информацию полученную от этих КА. Впервые предложена стратегия и основные цели нового исследования обнаруженного эффекта, призванного привести к установлению природы аномалии.

Впервые предложен новый метод снижения вклада шумов бортовых систем КА на точность определения его орбиты и ориентации. Суть метода состоит в создании термо-электро-динамической модели КА и использования полётной телеметрии с целью определения силы отдачи на аппарат, возникающей в результате процессов диссипации различных видов энергии на борту КА.

Полученные в работе результаты могут найти применение в астрономических учреждениях, где разрабатываются методы космической навигации и разрабатываются программы космических исследований, в частности в ГАИШ МГУ, институте астрономии РАН, АКЦ ФИАН, ИКИ РАН, ГАО РАН, и многих других.

1.6 Публикации по теме диссертации

Все результаты, представленные в диссертации, являются актуальными и новыми на момент их публикации. Результаты опубликованы в ведущих научных журналах, многократно докладывались и представлялись в публикациях крупных научных конференций, они широко известны в научном сообществе и цитируются в работах других авторов в близких областях теоретической физики, астрометрии, навигации и небесной механики. Результаты, лежащие в основе диссертации, были опубликованы в 127 статьях в 1996-2008 годах общим

объемом более 1500 страниц. Список основных 50 работ приведен в конце автореферата.

1.7 Личный вклад автора в проведенное исследование

Автору принадлежит постановка теоретических, прикладных и экспериментальных задач, определение метода решения и получение конкретных результатов. В диссертации использована лишь принадлежащая автору часть результатов работ, написанных в соавторстве.

1.8 Апробация результатов

Результаты, полученные в диссертации, неоднократно докладывались на научных семинарах в Лаборатории реактивного движения, Калифорнийском технологическом институте, и Государственном астрономическом институте им. П.К. Штернберга. Кроме того, основные результаты были представлены на более чем 90 международных научных конференциях по теоретической и математической физике, небесной механике и астрометрии, а также астрофизике и космологии.

Результаты диссертации были частично изложены в курсах лекций, прочитанных автором в Московском государственном университете им. М.В. Ломоносова (2008), на 1-ой Московской астрометрической школе-конференции (Звенигород, 2007), университете штата Калифорния в городах Лос Анжелес (2001-2003) и Сан Диего (2005-2007), в институте им. Галилео Галилея (Италия, 2006), а также на научных семинарах в Московском государственном университете им. М.В. Ломоносова, в Институте астрономии РАН, в АКЦ ФИАН (Россия), в Йельском, Гарвардском, Принстонском, Колумбийском, и других университетах, Калифорнийском и Массачусетском Технологических Институтах, в Штаб-квартире НАСА, в Центрах космических исследований им. Эймса, Годдарда, и Джонсона и в Лаборатории реактивного движения (США), а также, в университете г. Ватерлоо (Канада), университета г. Сент-Андрюс (Великобритания), в университетах гг. Бремен, Бонн, Олденбург (Германия), в Научно-технологическом центре Европейского космического агентства в г. Нордвайк (ESA/ESTEC), в институте им. Каптейна (Недерланды), в Парижском институте астрофизики (IAP), в лаборатории им. Кастлер Броссел в Париже (Франция) и многих других.

1.9 Структура и объём диссертации

Диссертация состоит из Введения, 6-и глав, Заключения, списка литературы, общим объёмом в 497 страниц. Список литературы содержит 310 наименований.

2 СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Во **Введении** обоснована актуальность темы диссертации, сформулированы цели работы, указана научная новизна, научная и практическая значимость результатов работы, перечислены результаты, выносимые на защиту.

В **Главе 1** обсуждаются гравитационные эксперименты в Солнечной системе, проведённые для исследования и развития современных теорий гравитации. Обосновывается необходимость космического базирования в целях проведения гравитационных экспериментов нового поколения, призванных улучшить точность проверок ОТО более пяти порядков по сравнению с нынешним уровнем.

Раздел 1.1 посвящен обсуждению основных положений ОТО и обзору результатов недавних экспериментов, направленных на проверку основ этой теории. Кроме того, здесь же представлен ППН формализм – феноменологическая концепция, которая с успехом используется для разработки экспериментов по проверке релятивистской гравитации и обработке полученных данных.

В этом же разделе предлагается перенормированная версия ППН формализма. Так, если принять ОТО в качестве стандартной теории гравитации, то любое неэйнштейновское поведение представляется как малое возмущение на фоне ОТО, приближение справедливое для условий в Солнечной системе. Эти возмущения пропорциональны перенормированным ППН параметрам (например, $\bar{\gamma} = \gamma - 1$, $\bar{\beta} = \beta - 1$, и т.д.), которые равны нулю в ОТО, но могут быть отличны от нуля в других теориях гравитации. Соответствующие уравнения движения приобретают форму уравнений ОТО, перенормированных с учётом возмущающих неэйнштейновских вкладов. Тем самым, все без исключения неэйнштейновские эффекты рассматриваются в расширенном ППН формализме как пост-эйнштейновское приближение ОТО. Преимущества такой перенормировки в

том, что она существенно облегчают мотивацию, описание и выработку стратегии для проведения гравитационных экспериментов.

В разделе 1.2 представлены основания для расширения теоретической модели гравитации в ОТО; приведены модели, появляющиеся в теории струн, обсуждаются скалярно-тензорные теории гравитации, и подчёркиваются феноменологические следствия данных моделей. Вкратце приводится обзор недавних предложений по модификации гравитации на больших масштабах, и обсуждаются их экспериментальные следствия. В частности, ряд теорий в рамках этих моделей, предсказывает присутствие малых наблюдаемых пост-эйнштейновских эффектов в Солнечной системе, обещая важные результаты в физике 21-го века.

Раздел 1.3 посвящен обсуждению будущих гравитационно-космических экспериментов, призванных обеспечить существенный прогресс в гравитационных исследованиях. Особое внимание уделяется экспериментам, ставящим своей целью проверку ПЭ, поиск эффектов временной зависимости фундаментальных констант, проверку гравитационного закона обратных квадратов, а также эффектов теорий модифицированной гравитации. Указывается, что эксперименты, создаваемые с целью измерить параметр Эддингтона $\bar{\gamma}$ с точностью до 10^{-9} , могут значительно повлиять на прогресс в фундаментальной физике.

Глава 2 посвящена решению актуальной задачи оптимизации алгоритмов управления оптическими интерферометрами космического базирования.

В разделе 2.1 кратко обсуждается проект SIM, являющийся ОИДБ космического базирования создаваемым в целях решения задач прецизионной астрометрии. Одна из главных целей SIM - это точное определение направлений на звезды, их собственные движения и параллаксы, и улучшение априорных знаний об этих параметрах более чем на три порядка, достигая при этом точностей вплоть до 1 микросекунду дуги для звёзд ярче 20 звёздной величины.

В разделе 2.2 обсуждаются новые методы, предложенные и развитые автором для обеспечения работы проекта SIM, в том числе метод регуляризации базового вектора оптического интерферометра. В частности, предложено использовать наличие двух опорных интерферометров для упреждающего обновления

информации, связанной с ориентацией базы научного интерферометра SIM. Изменения ориентации будут измеряться опорными интерферометрами и использоваться для восстановления инерциальной ориентации вектора базы научного интерферометра при конечном времени интегрирования сигнала при наблюдениях объектов малой звёздной величины. Предложенный метод регуляризации позволяет использовать единый базовый вектор при работе со всеми звездами в ходе реализации SIM. В этом же разделе обсуждаются аналитические методы построения алгоритмов работы системы внешней метрологии для ОИДБ космического базирования. Предложенный и разработанный формализм упреждающего обновления динамической информации об ориентации базы позволил концептуально обосновать работу всего инструмента в проекте SIM.

В разделе 2.3 обсуждаются новые аналитические методы работы с полихроматическим светом, которые позволяют определить информацию о фазе, контрастности и амплитуды интерференционной картины, необходимой для астрометрических измерений с ОИДБ. В частности, сформулирован метод «фазоров», позволяющий определить основные параметры интерференционной картины при использовании целого различных методов модуляции фазы. Модель учитывает большое количество физических и инструментальных эффектов, и справедлива в общем случае фильтра с произвольной полосой пропускания.

В разделе 2.4 продемонстрирована эффективность метода «фазоров» в целях определения оптической разности хода сигналов при наличии ошибок в определении волнового числа. Обсуждаются аналитические и численные методы расчета работы инструмента, а также алгоритмы компенсации ошибок ориентации протяжённой базы в астрометрических измерениях с ОИДБ. Продемонстрировано преимущество метода «фазоров» для вычисления фазы и фазовой задержки сигналов при мультиканальном режиме работы. Этот метод лёг в основу основных принципов разработки и будущей эксплуатации всего инструмента.

В разделе 2.5 обсуждаются элементы будущей релятивистской модели астрометрических наблюдений SIM. В частности, даются оценки основных гравитационных вкладов вносимыми телами Солнечной системы в оптическую разность

хода сигналов при проведении высокоточных дифференциальных астрометрических наблюдениях с использованием ОИДБ космического базирования. Дается реалистичная оценка возможного измерения параметра Эддингтона \bar{u} с точностью 7×10^{-6} и обсуждается возможность использования SIM для проведения астрометрической проверки ОТО методами оптической интерферометрии.

В **Главе 3** представлен разработанный автором новый итеративный метод построения локальных систем координат протяженных массивных тел и описания динамики системы N гравитирующих тел в расширенном ППН формализме.

В разделе 3.1 обсуждается существующий ППН формализм, его достоинства и недостатки. В частности, одним из недостатков классического ППН формализма является отсутствие самосогласованной теории локальных систем отсчета. Необходимость разработки такой теории была вызвана как чисто теоретическим интересом к построению собственной системы координат массивной материальной подсистемы, так и практическими требованиями астрономических наблюдений, точность которых возросла настолько, что их моделирование с использованием одной глобальной системы координат стало несостоятельным.

В разделе 3.2 обсуждается новый итеративный подход, облегчающий создание теории релятивистских отсчета для системы N протяженных массивных тел. В частности, в локальной системе координат протяженного тела, решения уравнений гравитационного поля представлены в виде суммы i) тензора плоского пространства-времени, ii) невозмущенного гравитационного поля рассматриваемого тела, iii) невозмущенными гравитационными полями каждого из тел системы преобразованными в координаты этой системы, и iv) вкладом, описывающим гравитационное взаимодействие между телами системы. Все вклады однозначно определяются из решения полевых уравнений гравитационной теории. В этой связи обсуждаются основные понятия общей теории релятивистских астрономических систем координат для работы с широким классом метрических теорий гравитации независимо от модели распределения материи в телах.

В разделе 3.3 выводятся уравнения поступательного движения системы N тел, характеризующихся массой и спином, и не требующих дополнительных пред-

положений о характере движения материи внутри тел. Разработана теория небесных систем координат, применимая к широкому классу метрических теорий гравитации с произвольной моделью распределения материи. Новый метод был применён для ОТО и успешно обобщен на случай присутствия двух параметров Эддингтона γ и β . Разработанный подход был использован для получения релятивистских уравнений движения КА в окрестностях протяженных тел, причём для описания тел была выбрана модель идеальной жидкости. Тела имеют произвольную массу и характеризуются мультипольными моментами, характеризующими внутреннюю структуру тел.

В разделе 3.4 построена локальная система координат для массивного протяженного тела в ППН формализме, позволяющая создать иерархию координатных систем в ППН формализме для системы N протяженных тел. Приводятся уравнения поступательного и вращательного движений массивных протяженных тел произвольной формы, состава и мультипольной структуры. Обсуждается применение нового метода в целях расчета гравитационных экспериментов с использованием КА на орбите вокруг Меркурия. Изучены возможности и разработаны ряд других гравитационных экспериментов космического базирования.

В **Главе 4** изучается задача построения новых высокоточных моделей наблюдений и обработки данных, полученных методом ЛДЛ. Обсуждаются предложенные автором эксперименты по ЛДЛ нового поколения и проект ЛДМ.

В разделе 4.1 представлены история создания и современное состояние эксперимента по лазерной дальнометрии Луны. В частности, обсуждается анализ результатов гравитационных экспериментов с ЛДЛ, давших ограничение $(-1.0 \pm 1.4) \times 10^{-13}$ на любые возможные отличия гравитационной и инерционной массы для Земли и Луны, $\Delta[m_G/m_I]$. Эти достижения, совместно с лабораторными экспериментами по проверке слабого ПЭ, дают для ПЭ соотношение $\Delta[m_G/m_I]_{ПЭ} = (-2.0 \pm 2.0) \times 10^{-13}$. Такой высокий уровень точности позволяет проводить дальнейшую проверку теорий гравитации. Эти результаты переведены в значение параметра нарушения СПЭ $\eta = 4\beta - \gamma - 3$, равного $(4.4 \pm 4.5) \times 10^{-4}$.

Используя значение параметра γ , полученное миссией Cassini, был установлен новый предел на значение ППН параметра β оказавшийся равным $\beta=1+(1.2\pm 1.1)\times 10^{-4}$. Показано, что величина геодезической прецессии, будучи выраженной как относительное отклонение от ОТО, равна $K_{gp}=-0.0019\pm 0.0064$. Кроме того, поиск временной зависимости в гравитационной постоянной привёл к результату в $dG/dt/G = (4\pm 9)\times 10^{-13}$ в год. Последний результат интерпретирован как отсутствие доказательств о наличии местного (~ 1 а.е.) расширения масштаба Солнечной системы.

В разделе 4.2 рассматривается задача улучшения построенной релятивистской модели наблюдений и обработки данных ЛДЛ. В частности, связи со сдачей в эксплуатацию нового инструмента APOLLO (Apache Point Observatory Lunar Laser-ranging Operation, New Mexico, США) в 2007, ЛДЛ эксперимент перешагнул важный рубеж: была продемонстрирована возможность достижения точности в 1 мм при определении расстояния между Землёй и Луной. В этой связи возникла необходимость улучшения существующей в JPL модель ЛДЛ наблюдений. Наряду с динамическими эффектами движения Луны, разработанная автором новая модель улучшила описание лунных либраций, релятивистских вкладов в орбитальное движение, эффектов светового давления Солнца, теплового расширения структуры отражателей и ряда других эффектов. В результате, систематическая и случайная ошибки индивидуальных вкладов вышли на уровень в 1 мм – условие, необходимое АПОЛЛО для достижения заявленной точности.

В этом же разделе предложен эксперимент нового поколения по ЛДЛ. Суть предложенного эксперимента состоит в создании и доставке на поверхность Луны инструментов нового поколения – усовершенствованных уголкового отражателей и активных лазерных трансиверов, направленных на Землю. Обсуждаются элементы конструкции и ожидаемый научный вклад от будущих инструментов.

В разделе 4.3 обсуждаются предложенные и развитые автором методы межпланетной лазерной дальнометрии. В частности, указывается, что существующий уровень технологий уже позволяет провести ЛДМ измерения с точностью в

несколько пикосекунд, что обеспечит миллиметровую точность в измерениях расстояния Земля-Марс. ЛДМ эксперимент позволит проверить сильный принцип эквивалентности с точностью 1×10^{-6} , измерить параметр ППН γ с точностью 3×10^{-7} , проверить закон обратных квадратов на расстояниях порядка 2 а.е. с точностью 1×10^{-14} , а так же провести ряд других экспериментов, значительно улучшив точность проверок современных теорий гравитации. Обсуждаются детали космической экспедиции с целью создания эксперимента по ЛДМ.

В **Главе 5** предлагаются новые гравитационные эксперименты в космосе. В частности, указывается, что параметр Эддингтона γ является наиболее фундаментальным ППН параметром. Так, величина $(\gamma-1)/2$ является мерой относительной величины скалярного взаимодействия в скалярно-тензорных теориях гравитации. Как известно, наилучшая точность в измерении этого параметра, $\gamma-1=(2.1 \pm 2.3) \times 10^{-5}$, была получена с использованием данных радиометрической навигации КА Cassini. В тоже время, скалярно-тензорные модели гравитации, согласующиеся с последними космологическими наблюдениями, предсказывают значения этого параметра на уровне $\gamma-1 \sim 10^{-6} - 10^{-7}$.

Таким образом, улучшение точности измерения этого параметра даст ключевую информацию в целях проверки состоятельности современных скалярно-тензорных теорий гравитации, рассмотрения возможных путей квантования гравитации и проверки современных космологических моделей. В силу этого улучшение точности измерения параметра γ представляется важной задачей.

В разделе 5.1 обсуждается предложенный автором новый эксперимент LATOR, разработанный в целях значительного улучшения точности проверок современных теорий гравитации в Солнечной системе. В ходе проекта предполагается запустить два небольших КА на орбиту вокруг Солнца и построить ОИДБ на Международной космической станции (МКС). Оба КА и интерферометр будут снабжены лазерными трансиверами, способными достигнуть точности в 1 мм при измерении расстояний в 2 а.е. Обмениваясь пучками лазерных импульсов, три КА сформируют гибкий равнобедренный световой треугольник, который является основным элементом архитектуры эксперимента LATOR.

В евклидовой геометрии построенная система измерений переопределена, то есть, измеряя длины сторон, сформированного таким образом равнобедренного светового треугольника, можно вычислить угол между ними. Этот же угол, будет напрямую измерен оптическим интерферометром с точностью в 0.01 микросекунды. Измерение угла обеспечит переопределённость геометрии LATOR, которая является ключом к достижению высокой точности этого эксперимента. Любое отклонение от евклидовости связано с кривизной Риманова пространства в окрестности Солнца, которая будет напрямую измерена в эксперименте.

В результате, LATOR будет способен измерить ППН параметр γ с точностью в 10^{-9} , что улучшит в 30 000 раз результат, объявленный миссией Cassini в 2003. Главная задача LATOR - обеспечение беспрецедентной точности проверок ряда новых скалярно-тензорных теорий гравитации мотивированных открытием тёмной энергии в ходе недавних космологических исследований. Ожидается, что LATOR приведёт к весьма существенному прогрессу в фундаментальной физике - с его помощью может быть обнаружено нарушение или дополнение ОТО, или открыто наличие дополнительного дальнедействующего взаимодействия.

В разделе 5.2 обсуждается эксперимент BEACON, разработанный, как и LATOR, для того, чтобы достигнуть точности в одну миллиардную при измерениях ППН параметра γ . Проект предполагает поместить четыре небольших КА на круговую орбиту вокруг Земли с радиусом 80 000 км так, чтобы все аппараты находились в одной плоскости. Каждый аппарат планируется оборудовать тремя наборами одинаковых лазерных трансиверов, которые будут использоваться для связи лазерными лучами между аппаратами так, чтобы образовать гибкую трапециевидную конструкцию. В евклидовой геометрии такая система переопределена; измеряя только пять из шести расстояний, можно вычислить шестое. Для достижения своей основной научной цели в проекте BEACON будут измеряться все шесть расстояний между аппаратами внутри трапеции с точностью в 0.1 нм. В сочетании с переопределённой архитектурой эксперимента, временные ряды точных дальномерных измерений позволят BEACON значительно улучшить точность гравитационных экспериментов в Солнечной системе.

В **Главе 6** исследуется новый физический эффект - «Аномалия Пионеров» и обсуждаются результаты исследований физической природы данного эффекта.

В разделе 6.1 приводится история открытия нового физического эффекта обнаруженного при исследованиях траекторий КА Pioneer 10 и 11. В частности, при детальной обработке радиометрических данных, полученных от обоих КА с расстояний между 20 и 70 а.е. от Солнца, было обнаружено присутствие небольшого, аномального, постоянного сдвига Допплеровской частоты 6×10^{-9} Гц/с. Этот сдвиг был истолкован как наличие постоянного и направленного к Солнцу ускорения, равного $a_p = (8.74 \pm 1.33) \times 10^{-10}$ м/с². Это наблюдаемое нарушение гравитационного закона обратных квадратов стало известно под названием «Аномалия Пионеров».

В разделе 6.2 изучается физика эффекта «Аномалия Пионеров». Обсуждаются некоторые физические модели, предложенные в целях объяснения обнаруженного эффекта. Предложены и внедрены новые модели для ряда эффектов, дающих вклад в радиометрические и оптические траекторные измерения КА. Улучшены модели малых сил, влияющих на траекторию и ориентацию КА, разработаны методы и алгоритмы для реализации этих моделей при создании новых навигационных программ и инструментов нового поколения.

В разделе 6.3 приводится описание стратегии и основных целей нового исследования аномалии, а именно 1) анализ данных, ранней фазы полёта КА Pioneer 10 и 11 на расстояниях до 20 а.е. от Солнца, которые могут помочь определить направление аномалии, 2) анализ пролёта планет Юпитера и Сатурна, с целью выяснения условий при которых аномалия была сформирована, 3) анализ всего набора данных, с целью лучшего определения временного поведения аномалии, 4) сравнительный анализ аномальных ускорений каждого из Пионеров, 5) детальное изучение бортовых шумов, связанных с работой систем КА и 6) развитие и построение конечно-разностной тепло-электро-динамической модели Пионеров, с использованием бортовой телеметрии.

Изучение обнаруженного эффекта привело к созданию новой области высокоточной навигации. В частности, обсуждается, предложенный автором, новый

метод компенсации динамических шумов возникающих на борту КА в целях снижения вклада шумов бортовых систем на точность определения его орбиты и ориентации. Метод опирается на реальную информацию о состоянии бортовых систем КА, включая электрическую и тепловую системы, а также системы связи, двигательной установки и др. Суть метода состоит в создании термо-электро-динамической модели КА для определения силы отдачи, действующей на аппарат в результате процессов диссипации различных видов энергии на борту КА.

Используя целый ряд методов, разработанных впервые, автору удалось построить конечно-разностную модель КА Pioneer 10 и 11 с целью изучения теплового излучения с этих КА. Эта модель позволила объяснить 30% аномалии за счет анизотропного теплового излучения энергетических систем КА. Природа оставшейся части аномалии остаётся по-прежнему не выясненной.

В разделе 6.4 кратко говорится о концепции экспериментальных проверок «Аномалии Пионеров». Невозможность объяснения поведения КА Pioneer обычными законами физики способствовала росту полемики о происхождении этого эффекта. Автором предложен ряд международных проектов по изучению «Аномалии Пионеров». В частности, были разработаны несколько проектов в рамках международной программы Deep Space Gravity Probe (DSGP), так называемой миссии по изучению «Аномалии Пионеров», возглавляемой автором.

Предложенные эксперименты предназначены для определения природы обнаруженной аномалии, изучению её свойств с точностью, по крайней мере, на три порядка лучше, чем величина самой аномалии. Такая миссия может стать прекрасной возможностью для демонстрации новых технологий в создании КА нового поколения, которые могли бы найти своё применение во многих областях фундаментальной физики и прикладных космических исследований.

В **Заключении** сформулированы основные результаты, полученные автором в диссертации.

3. СПИСОК ОСНОВНЫХ ПУБЛИКАЦИЙ АВТОРА ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

- [1]. **В.Г. Турышев**, “Экспериментальные проверки общей теории относительности: текущее состояние дел и перспективы”, в печати, Успехи Физических Наук **178**, XX (2008).
- [2]. **S.G. Turyshev**, “Relativistic gravitational deflection of light and its impact on the modeling accuracy for the Space Interferometry Mission,” в печати, Письма в Астрономический Журнал, **34**, XX (2008).
- [3]. **S.G. Turyshev**, “Experimental Tests of General Relativity,” *Annu. Rev. Nucl. Part. Sci.* **58**, 207-248 (2008).
- [4]. **S.G. Turyshev** and M. Shao, “Laser Astrometric Test of Relativity: Science, Technology, and Mission Design,” *Intern. J. Mod. Phys. D***16**(12a), 2191-2203 (2007).
- [5]. **S.G. Turyshev** and J.G. Williams, “Space-based tests of gravity with laser ranging,” *Intern. J. Mod. Phys. D***16**(12a), 2165-2179 (2007).
- [6]. **S.G. Turyshev**, U.E. Israelsson, M. Shao, N. Yu, A. Kusenko, E.L. Wright, C.W. F. Everitt, M. Kasevich, J.A. Lipa, J.C. Mester, R.D. Reasenberg, R.L. Walsworth, N. Ashby, H. Gould, and H.J. Paik, “Space-based research in fundamental physics and quantum technologies,” *Intern. J. Mod. Phys. D***16**(12a), 1879-1925 (2007).
- [7]. T.W. Murphy, K.L. Nordtvedt, **S.G. Turyshev**, “Reply to the Comment by Kopeikin on`The Gravitomagnetic Influence on Gyroscopes and on the Lunar Orbit.” *Phys. Rev. Lett.* **98**, 229002 (2007).
- [8]. **S.G. Turyshev**, M.M. Nieto, J.D. Anderson, “Lessons Learned from the Pioneers 10/11 for a Mission to Test the Pioneer Anomaly.” *Adv.Space Res.* **39**(2), 291-296 (2007).
- [9]. **S.G. Turyshev**, M. Shao, K.L. Nordtvedt, “Mission Design for the Laser Astrometric Test of Relativity Mission.” *Adv. Space Res.* **39**(2), 297-304 (2007).
- [10]. **S.G. Turyshev**, M. Shao, K. Nordtvedt, “Science, Technology and Mission Design for the Laser Astrometric Test Of Relativity Mission.” In “Lasers, Clocks and Drag-Free Control: Exploration of Relativistic Gravity in Space.” H. Dittus, C. Laemmerzahl, S.G. Turyshev, eds. (Springer Verlag), pp. 473-543 (2007).

- [11]. T.W. Murphy, Jr., K.L. Nordtvedt, **S.G. Turyshev**, “The Gravitomagnetic Influence on Gyroscopes and on the Lunar Orbit.” *Phys. Rev. Lett.* **98**, 071102 (2007).
- [12]. J.G. Williams, **S.G. Turyshev**, and D.H. Boggs, “Reply to the Comment by Y.V. Dumin on “Progress in Lunar Laser Ranging Tests of Relativistic Gravity.” *Phys. Rev. Lett.* **98**, 059002 (2007).
- [13]. V.T. Toth and **S. G. Turyshev**, “The Pioneer Anomaly: seeking an explanation in newly recovered data.” *Canadian J. Phys.* **84**(12), 1063-1087 (2006).
- [14]. **S.G. Turyshev**, V.T. Toth, L.R. Kellogg, E.L. Lau, and K.J. Lee, “The Study of the Pioneer Anomaly: New Data and Objectives for New Investigation,” *Int. J. Mod. Phys. D***15**(1), 1-55 (2006).
- [15]. J.G. Williams, **S.G. Turyshev**, D.H. Boggs, J.T. Ratcliff, “LLR Science: Gravitational Physics, Lunar Interior and Geodesy.” *Adv. Space Res.* **37**(1), 67-71 (2006).
- [16]. **S.G. Turyshev**, M.M. Nieto, J.D. Anderson, “Study of the Pioneer anomaly: A problem set.” *American J. Phys.* **73**(11), 1033-1044 (2005).
- [17]. M.M. Nieto, **S.G. Turyshev**, J.D. Anderson, “Directly Measured Limit on the Interplanetary Matter Density from Pioneer 10 and 11.” *Phys. Lett. B***613**, 11-19 (2005).
- [18]. **S.G. Turyshev**, M. Shao, and K. Nordtvedt, “Experimental Design for the LATOR Mission.” *Intern. J. Mod. Phys. D***13**, 2035-2063 (2004).
- [19]. J.G. Williams, **S.G. Turyshev**, D.H. Boggs, “Progress in Lunar Laser Ranging Tests of Relativistic Gravity.” *Phys. Rev. Lett.* **93**, 261101 (2004).
- [20]. **S.G. Turyshev**, M. Shao and K. Nordtvedt, “The Laser Astrometric Test of Relativity Mission.” *Nucl. Phys. Proc. Suppl.* **134**, 171-178 (2004).
- [21]. M.M Nieto and **S.G. Turyshev**, “Finding the Origin of the Pioneer Anomaly.” *Class. Quant. Grav.* **21**, 4005-4023 (2004).
- [22]. **S.G. Turyshev**, M. Shao and K. Nordtvedt, “The Laser Astrometric Test of Relativity (LATOR) Mission.” *Class. Quant. Grav.* **21**, 2773-2799 (2004).
- [23]. J.G. Williams, **S.G. Turyshev**, and T.W. Murphy, Jr., “Improving LLR Tests of Gravitational Theory.” *Inter. J. Mod. Phys. D***13**(3), 567-582 (2004).

- [24]. **S.G. Turyshev**, M. Shao, and K. Nordtvedt Jr., “New Concept for Testing General Relativity: The Laser Astrometric Test of Relativity (LATOR) Mission.” *Astron. Nachr.* **325**(4), 267–277 (2004).
- [25]. M. Milman, **S.G. Turyshev**, “Observational Model for Microarcsecond Astrometry with the Space Interferometry Mission.” *Optical Engineering* **42**(7), 1873-1883 (2003).
- [26]. **S.G. Turyshev**, “Analytical Modeling of the White Light Fringe.” *Applied Optics* **42**(1), 71-90 (2003).
- [27]. J.D. Anderson, **S.G. Turyshev** and M.M. Nieto, “A Mission to Test the Pioneer Anomaly.” *Intern. J. Mod. Phys. D***11**(10), 1545-1551 (2002).
- [28]. J.D. Anderson, E.L. Lau, **S.G. Turyshev**, P.A. Laing and M.M. Nieto, “The Search for a Standard Explanation of the Pioneer Anomaly.” *Intern. J. Mod. Phys. A***17**(14), 875-885 (2002).
- [29]. M. Milman, J. Catanzarite, **S.G. Turyshev**, “The effect of wavenumber error on the computation of path-length delay in white-light interferometry.” *Applied Optics* **41**(23), 4884-4890 (2002).
- [30]. J.D. Anderson, P.A. Laing, E.L. Lau, A.S. Liu, M.M. Nieto, **S.G. Turyshev**, “Study of the anomalous acceleration of Pioneer 10 & 11.” *Phys. Rev. D***65**, 082004. (2002).
- [31]. J.D. Anderson, P.A. Laing, E.L. Lau, A.S. Liu, M.M. Nieto, **S.G. Turyshev**, “Reply to the Comment of E. M. Murphy on ‘Indication, from Pioneer 10/11, Galileo, and Ulysses Data, of an Apparent Anomalous, Weak, Long-Range Acceleration’.” *Phys. Rev. Lett.* **83**(9), 1891-1891 (1999).
- [32]. J.D. Anderson, P.A. Laing, E.L. Lau, A.S. Liu, M.M. Nieto, **S.G. Turyshev**, “Reply to the Comment of J. I. Katz on ‘Indication, from Pioneer 10/11, Galileo, and Ulysses Data, of an Apparent Anomalous, Weak, Long-Range Acceleration’.” *Phys. Rev. Lett.* **83**(9), 1893-1893 (1999).
- [33]. J.D. Anderson, P.A. Laing, E.L. Lau, A.S. Liu, M.M. Nieto, and **S.G. Turyshev**, “Indication, from Pioneer 10/11, Galileo, and Ulysses Data, for an Anomalous, Weak, Long-Range Acceleration’.” *Phys. Rev. Lett.* **81**(14), 2858-2861 (1998).

- [34]. **S.G. Turyshev**, "Relativistic Navigation: A Theoretical Foundation." JPL Publication # 96-13. Pasadena, CA. (July 15, 1996).
- [35]. P.K. Silaev, **S.G. Turyshev**, "Are the singularities stable?" *Gen. Rel. Grav.* **29**(4), 417-433 (1997).
- [36]. J.D. Anderson, **S.G. Turyshev**, S.W. Asmar, A.S. Konopliv, T.P. Krisher, E.L. Lau, L. Maleki, J.D. Prestage, W.L. Sjogren, and M.K. Bird, "Radio Science Investigation on a Mercury Orbiter Mission." *Planetary & Space Sciences* **45**(1), 21-29 (1997).
- [37]. **S.G. Turyshev**, "Black holes with regular horizons in Maxwell-scalar gravity." *Canad. J. Phys.* **74**(1-2), 17-28 (1996).
- [38]. J.D. Anderson, M. Gross, K. Nordtvedt, and **S.G. Turyshev**, "The Solar Test of the Equivalence Principle." *Astrophys. J.* **459**(1), 365-370 (1996).
- [39]. **S.G. Turyshev**, "New solution for dilaton-Maxwell gravity." *Gen.Rel.Grav.* **27**(9), 981-987 (1995).
- [40]. J.G. Williams, **S.G. Turyshev**, D.H. Boggs, "Lunar Laser Ranging Tests of the Equivalence Principle with the Earth and Moon". In proc. "Testing the Equivalence Principle on Ground and in Space," C. Lämmerzahl, C.W.F. Everitt and R. Ruffini, eds., in print, *Lect. Notes Phys.*, (2008) [arXiv:gr-qc/0507083].
- [41]. **S.G. Turyshev**, B. Lane, M. Shao, A. Girerd, "A Search for New Physics with the BEACON Mission," In Proc. "SPIE Astronomical Telescopes & Instrumentation: Synergies Between Ground & Space," 23-26 June 2008, Marseilles, France. Paper #: 7010-71, SPIE Tracking #: AS08-AS04-137 (2008) arXiv:0711.0150 [gr-qc].
- [42]. **S.G. Turyshev**, James G. Williams, Dale H. Boggs, and Thomas W. Murphy, Jr., "Lunar Laser Ranging Science: Recent Progress and Future Plans," 2007 AGU Fall Meeting, 1--14 December 2007, San Francisco, CA, paper #P43C-01 (2007).
- [43]. V.T. Toth, **S.G. Turyshev**, "Pioneer Anomaly: Evaluating Newly Recovered Data," in Proc. "III Mexican Meeting on Mathematical & Experimental Physics", 10-14 Sept. 2007, El Colegio Nacional, Mexico D.F., Mexico, ed. A. Macias, C. Laemmerzahl, A. Camancho. *AIP Conf. Proc.* **977**, 264-283 (Melville, New York, 2008).
- [44]. **S.G. Turyshev**, M. Shao, K. Nordtvedt, "Optical Design for the Laser Astrometric Test Of Relativity." "The XXII Texas Symposium on Relativistic Astrophysics,"

- Stanford University, Dec. 13-17, 2004, ed. P. Chen et al. *SLAC-R-752*, Stanford e-Conf #CO41213, paper #0306: <http://www.slac.stanford.edu/econf/CO41213/>
- [45]. **S.G. Turyshev**, M.M. Nieto, J.D. Anderson, “A Route to Understanding of the Pioneer Anomaly.” “The XXII Texas Symposium on Relativistic Astrophysics,” Stanford Univ., Dec. 13-17, 2004, ed. P. Chen et al. *SLAC-R-752*, Stanford e-Conf #CO41213, paper #0310, see: <http://www.slac.stanford.edu/econf/CO41213/>.
- [46]. **S.G. Turyshev**, “Modeling the White Light Fringe.” Presented at SPIE 1998 Meeting on “Interferometry in Space.” Waikoloa, HI 23-28 August 2002. In proc. of *Interferometry in Space*, ed. by Michael Shao. *SPIE Proceed.* **4852**, 855-866 (2003).
- [47]. M. Milman and **S.G. Turyshev**, “Observational Model for the Space Interferometry Mission.” SPIE 2000 Meeting on “Interferometry in Optical Astronomy.” Munich, Germany (27-30 March 2000). Eds. P.J. Lena, A. Quirrenbach, *SPIE Proceedings* [4006-99], 828-837 (2000).
- [48]. **S.G. Turyshev**, “Relativistic Stellar Aberration Requirements for the Space Interferometry Mission.” In “Working on the Fringe: An International Conference on Optical and IR Interferometry from Ground and Space.” S.C. Unwin, R.V. Stachnick, eds. *ASP Confer. Series* **194** (1999). (San Francisco: ASP), p. 142-146.
- [49]. **S.G. Turyshev**, J. D. Anderson, P. A. Laing, E. L. Lau, A. S. Liu, and M. M. Nieto, “The Apparent Anomalous, Weak, Long-Range Acceleration of Pioneer 10 and 11.” In: “Gravitational Waves and Experimental Gravity, Proceedings of the XVII-th Workshop of the Rencontres de Moriond, Les Arcs, Savoie, France (January 23-30, 1999), ed. by J. Dumarchez and J. Tran Thanh Van (World Publishers, Hanoi-Vietnam, 2000), pp.481-486 (1999) [arXiv:gr-qc/9903024].
- [50]. **S.G. Turyshev**, “Frames of Reference in Relativistic Celestial Mechanics.” In proc. of the VII-th Marcel Grossmann Meeting on General Relativity,” Stanford University, USA, 24-30 July, 1994, eds. R.T. Jantzen G.M.Keiser (World Scientific, Singapore, 1996), pp.1527-1528 (1996).