

Форма 503. Развернутый научный отчет

3.1.Номер проекта

15-52-53070

3.2.Название проекта

Новые прецизионные гравитационные эксперименты в земной и орбитальной лабораториях

3.3. Коды классификатора

02-820, 02-810, 02-710

3.4. Объявленные ранее цели Проекта

Проект направлен на развитие новых экспериментальных методов прецизионных гравитационных измерений, проводимых в земной лаборатории и на орбите в гравитационном поле Земли, повышение точности определения фундаментальных физических и астрономических констант, экспериментальную проверку общей теории относительности.

В рамках фундаментальной научной проблемы в проекте будут реализованы два основных направления исследований. Первое из них составит разработка эксперимента по проверке фундаментальных положений ОТО: измерению ППН параметра “ γ ” и детектированию гравитационных волн кластером спутников в гравитационном поле Земли. Второе направление исследований составит проведение новых экспериментов по измерению Ньютоновской гравитационной постоянной двумя разными методами в лабораторных условиях на уровне точности 20-25 ppm.

3.5. Полученные в ходе выполнения Проекта важнейшие результаты

1. Проект гравитационно-волнового эксперимента с использованием кластерной системы в гравитационном поле Земли, ориентированный на регистрацию гравитационных волн в миллигерцовом диапазоне от известного источника.

Проект космического детектора гравитационно-волнового излучения в миллигерцовом диапазоне частот, идея которого была сформулирована российской стороной, разрабатывается в рамках российско-китайского сотрудничества ГФЕН –РФФИ. Проект получил название TianQin (в переводе с китайского это «цитра» - струнный музыкальный инструмент). В Китае работа на проекте проводится в двух университетах: Университете им. Сунь Ят-сена и Хуаджунском университете науки и технологии под руководством Президента Университета им. Сунь Ят-сена и научного руководителя Центра гравитационных исследований HUST академика Luo Jun при активном участии сотрудников ГАИШ МГУ. Целью проекта является вывод группировки КА на геоцентрическую орбиту и регистрацию ГВ излучения от выбранного источника. Эксперимент должен быть реализован в сроки 15-18 лет. Для развития и реализации космической миссии TianQin в г. Чжухае на новой территории Университета им. Сунь Ят-Сена создан TianQin Research Center, основной задачей которого является проведение

комплекса работ, связанных с миссией TianQin.

Целью проекта является регистрация гравитационных волн в миллигерцовом диапазоне (0.1 - 100 мГц). ГВ излучение в этом диапазоне частот может быть обусловлено множеством разных астрономических источников, таких как ультра-компактные галактические двойные звезды, слияния массивных черных дыр, захват массивной черной дырой звездных объектов, и др.

Уникальная особенность разрабатываемого проекта состоит в том, что инструменты, дизайн и алгоритмы обработки данных в эксперименте TianQin будут оптимизированы для обнаружения ГВ от одного наиболее перспективного источника гравитационного излучения («эталонный источник»). Соответственно, на первом этапе миссии упор делается на разработку космического детектора гравитационных волн от одного хорошо известного источника. Первая задача TianQin - прямое обнаружение гравитационных волн с ожидаемыми характеристиками этого источника. При этом детектор, который представляет собой кластер спутников, можно полностью контролировать и использовать его для детального изучения выбранного источника. На следующем этапе TianQin будет работать как гравитационно-волновая обсерватория, способная обнаруживать гравитационное излучение от других, как известных, так и неизвестных источников.

В качестве эталонного источника могут быть рассмотрены ультра-компактные галактические двойные звезды. Источник должен быть достаточно мощным, постоянно доступным и иметь предпочтительно короткий период (для источника с более коротким периодом легче достичь желаемой точности регистрации). Был проведен анализ возможных кандидатов, и согласно этим условиям, двойная звезда RX J0806.3+1527 является наиболее подходящим кандидатом среди всех известных источников, в силу того, что он имеет наиболее короткий период из известных двойных систем, его относительной близости к Солнцу и умеренных масс компонент.

Детальная разработка схемы орбитального эксперимента показала, что космический детектор должен быть реализован на трех идентичных космических аппаратах, размещенных на почти идентичных геоцентрических орбитах с большой полуосью $\sim 10^5$ км и формирующих почти равносторонний треугольник. Мы также показали, что мощность источника J0806 достаточна, так что интерферометр с такими относительно короткими плечами может быть использован для его регистрации. По сравнению с гелиоцентрическими орбитами, выбор более доступных геоцентрических орбит позволяет использовать более доступные технологии для КА, что значительно снижает общую стоимость миссии.

Аналогично другим проектам космических гравитационно-волновых экспериментов (например, LISA), TianQin использует лазерный интерферометр транспондерного типа для мониторинга изменения расстояний между пробными массами, расположенными внутри космических аппаратов, образующих кластер. На пробные массы действуют различные источники негравитационных шумов, как внутри, так и снаружи КА. Ключевым моментом космической гравитационной миссии является условие, чтобы пробная масса оставалась в инерциальном пространстве в измеряемой полосе частот, требуемой для достижения научной цели миссии. Эти соображения ведут естественным образом к системе компенсации негравитационных ускорений, которая обеспечивала бы наиболее

эффективную «развязку» пробной массы с окружающей средой космического аппарата, т.е. необходимо обеспечить пробной массе траекторию «свободного падения». Чтобы уменьшить вклад различных источников инструментальных шумов (в первую очередь лазерных шумов) предполагается использование технологии интерферометрии с временной задержкой (Time delay interferometry), реализуемой на борту каждого космического корабля.

Для источника RX J0806.3+1527 и интерферометра, с длинами плеч $L \sim 10^5$ км, отношение сигнал/шум порядка 10 может быть достигнуто в течение трех месяцев наблюдений. Есть два относительно спокойных временных окна в течение года, когда Солнце находится под большим углом по отношению к плоскости детектора и солнечный свет почти перпендикулярен плоскости орбиты спутников, что упрощает тепловой контроль.

Детальное описание концепции миссии TianQin, выбор источника, расчет орбит КА, необходимая чувствительность эксперимента, требования к двум ключевым инструментам: лазерному интерферометру и системе компенсации негравитационных ускорений, оценка бюджета ошибок этих ключевых инструментальных компонент, а также обзор текущего статуса этих ключевых технологий содержатся в работе [Jun Luo et al, TianQin: a space-borne gravitational wave detector // Class. Quantum Grav. 33 (2016); PDF файл: Milyukov_GW].

Проект TianQin неоднократно докладывался на международных и российских конференциях, в 2015-2016 г.г были проведены в Китае три рабочих совещания (workshops) по развитию работ по проекту.

2. Проект эксперимента для измерения ППН параметра «гамма» с использованием кластерной системы в гравитационном поле Земли

Кластерные технологии и прецизионная лазерная интерферометрия могут быть применены не только в экспериментах по детектированию ГВ излучения, но и в гравитационных экспериментах другого типа - измерении параметров параметризованного пост-ньютоновского формализма (ППН параметров). Измеряемой величиной в данном эксперименте является задержка распространения света в гравитационном поле (эффект Шапиро).

Современные технологии измерения времени и расстояний позволяют проводить эксперименты по измерению постньютоновских эффектов (ППН параметров) в ближнем космосе, на орбите вокруг Земли с точностью, которая позволит сделать выводы о возможности существования новой физики со скалярными полями. В настоящее время наиболее точное значение фундаментального ППН параметра «гамма» на уровне относительной ошибки 10^{-5} получено по данным миссии CASSINI (Bertotti B., Iess L., Tortora P., 2003). Целью разрабатываемого эксперимента является измерение параметра «гамма» на уровне точности $\sim 10^{-9}$.

Детальная разработка схемы орбитального эксперимента по определению ППН параметра «гамма» показала, что оптимальной с точки зрения реализуемости эксперимента и обеспечения измерений с необходимой точностью, является конфигурация 4-х спутников.

Все четыре КА выводятся в одну плоскость на круговую орбиту радиусом ~ 80000 км (соответствующий орбитальный период ~ 2.6 дня). Аппараты распределены по орбите в форме креста, исходные истинные аномалии аппаратов: для S1 – 0° , для S2 – 315° , для S3 – 45° и для S4 – $185\text{--}195^\circ$. В евклидовом пространстве такая геометрия избыточна, и измеряя только пять из шести расстояний, можно вычислить шестое. Если это шестое расстояние есть траектория луча, наиболее близко проходящего у Земли, вдоль которого гравитационное поле самое сильное, то разность измеренной и вычисленной величин расстояния дает оценку эффекта задержки Шапиро.

Основным инструментом измерения расстояния между спутниками является гетеродинная лазерная интерферометрическая система ретрансляционного типа. В ППН эксперименте лазерная система работает в режиме дальномера, который измеряет кумулятивный набег фазы при многократном проходе светового луча между спутниками. Смещение (межспутниковое расстояние) определяется измерением разности фаз между опорным и измеренным сигналом. Для достижения точности измерения параметра «гамма» порядка 10^{-9} ошибка измерения взаимных расстояний при накоплении сигнала в течение 1 сек должна быть не более 0.1 нм (соответственно 10 нм за время накопления 10^4 сек). В состав инструментальной базы, обеспечивающие требуемые измерения входят:

- Лазерный интерферометр (точность до 0.1 нм на расстоянии до 10^5 км за 1 сек);
- Высокоточный стандарт частоты (точность воспроизведения 10^{-13});
- Система редукиции (компенсации) негравитационных возмущений, основанная на высокоточных трехосевых электростатических акселерометрах (не хуже 10^{-9} м/с²).

Космический аппарат (КА) будет представлять собой шестигранную призму. «Крышей» аппарата является тепловая сотовая панель (ТСП), которая выступает относительно граней призмы, создавая тень и защищая тем самым телескопы лазерного интерферометра от прямого попадания на них солнечного излучения. На верхней части ТСП располагаются фотопреобразователи солнечной батареи и солнечный датчик.

В качестве головного обтекателя предполагается использовать ГО от ракет-носителя, принадлежащему семейству трёхступенчатых ракет-носителей (РН) среднего класса «Союз-2», модификация «Союз-2.1б». Для установки КА на РН предполагается использовать адаптер, который представляет собой металлическую конструкцию с местами для крепления выводимых КА.

Для выведения двух КА рассматривается однопусковая схема с использованием РН «Союз» и разгонного блока (РБ) «Фрегат». РН выводит головную часть (КА и РБ) на круговую опорную орбиту ИСЗ высотой 200 км. На первом витке опорной орбиты производится первое включение РБ (V_1), в результате чего головная часть переводится на первую переходную орбиту, у которой высота апогея равна 350 км, а аргумент перигея отличается от аргумента перигея рабочей орбиты первого типа на 180° . На этой орбите в районе апогея производится второе включение РБ (V_2) и головная часть переводится на вторую переходную орбиту. Высота апогея этой орбиты равна высоте апогея рабочей орбиты первого типа. РБ с четырьмя КА продолжает формирование рабочей орбиты с другим наклоном. Для этого в районе нисходящего узла второй переходной орбиты производится третье включение ДУ РБ и головная часть переводится на четвертую переходную орбиту, которая расположена практически в плоскости Земли с наклоном

~98 градусов. После все КА, выводимые на рабочую орбиту, отделяется от разгонного блока. Дальнейшие маневры этого КА осуществляются с помощью собственной двигательной установки.

Концепция эксперимента для измерения ППН параметра «гамма», конфигурация кластера малых космических аппаратов на околоземной круговой орбите в гравитационном поле Земли, инструментальной база для измерения межспутниковых расстояний, компоновочная схема малого КА с измерительной апертурой, технология выведения на орбиты кластера КА с использованием разгонного блока «Фрегат» и схема определения высокоточных координат КА для проведения гравитационных измерений описаны в работе [Барабанов и др. Релятивистский гравитационный эксперимент на околоземной орбите: концепция, технология и конфигурация космической группировки. // Вестник ФГУП «НПО им. С.А. Лавочкина», 2016, № 3; PDF файл: Milyukov_PPN]

Результаты работы неоднократно докладывались на международных и российских конференциях.

3. Новые эксперименты по измерению Ньютоновской гравитационной постоянной в лаборатории китайского партнера.

Работы по подготовке и проведению новых экспериментов для измерения ньютоновской гравитационной постоянной в Центре гравитационных исследований HUST (Huazhong University of Science and Technology), были начаты еще во время исполнения предыдущего гранта РФФИ-ГФЕН (2013-2014г.г.). Основанием для проведения экспериментов одновременно двумя разными независимыми методами послужили соображения получения статистически достоверного значения G . С одной стороны, в экспериментах для проведения «off line» измерений (измерение масс и размеров взаимодействующих тел) практически используется одинаковая метрология. В обоих экспериментах в качестве чувствительного элемента используют крутильные весы. С другой стороны, методика проведения эксперимента и «on line» измерения совершенно разные. Соответственно различны способы устранения систематических ошибок, в том числе, связанных с эффектом неэластичности нитей подвеса (так называемый эффект Куроды). Получение статистически совпадающих результатов измерения гравитационной постоянной в этих двух экспериментах даст основание считать, что новое значение G будет свободно от систематических ошибок, т.е. будет получено достоверное значение гравитационной постоянной на уровне статистической значимости, т.е. 20-25 ppm (ожидаемая точность). Для экспериментов были выбраны два метода: динамический метод (time-of-swing method) и метод компенсации угловых ускорений (angular acceleration feedback method).

3.1. Измерение гравитационной постоянной динамическим методом (time-of-swing method).

Новый эксперимент будет уже третьим экспериментом по измерению G динамическим методом, который выполняется в HUST. Первый был выполнен в 1999 г [Jun Luo et al., Phys. Rev. D. **59**, 042001 (1999)], второй в 2009 г. [Jun Luo, et al, Phys. Rev. Lett., **102**, 240801 (2009)]. Последний результат относится к лучшим мировым определениям гравитационной постоянной. После завершения эксперимента 2009 года были проанализированы источники ошибок, которые дают основной вклад в конечный

результат. Чтобы уменьшить влияние этих ошибок и получить более реальное значение гравитационной постоянной был выполнен ряд изменений в экспериментальной установке нового определения G . Общий вид экспериментальной установки показан на Рис.1. Детальное описание экспериментальной установки и предварительные результаты эксперимента были опубликованы в работе [Qing Li, ..., Vadim Milyukov, Jun Luo. G measurements with time-of-swing method at HUST// Phil. Trans. R. Soc. A, **372**, 20140141 (2014)].

3.2. Измерение гравитационной постоянной методом компенсации угловых ускорений (angular acceleration feedback method).

Если динамический метод измерения гравитационной постоянной является традиционным для наших китайских партнеров, то эксперимент, использующий метод компенсации угловых ускорений, является абсолютно новым. Идея эксперимента состоит в следующем. Вакуумная камера с крутильными весами помещена на нижней вращающейся платформе I между набором сферических притягивающих масс (Рис 2). Чтобы исключить влияние гравитационного поля окружающих масс, сферические притягивающие массы также помещены на вращающуюся платформу II, которая вращается с другой скоростью и независимо от нижней платформы. Вследствие гравитационного взаимодействия со сферическими массами, крутильные весы поворачиваются. Этот поворот измеряется, и система обратной связи меняет скорость вращения нижней платформы таким образом, чтобы минимизировать закручивание нити подвеса. В результате крутильные весы остаются неподвижными. Таким образом, реализуется идея компенсации угловых ускорений. Основной измеряемой величиной является амплитуда угловых ускорений, по которой выводится гравитационная постоянная (Рис 3). Детальное описание экспериментальной установки и предварительные результаты эксперимента были опубликованы в работе [Chao Xue, ..., Vadim Milyukov, Jun Luo. Preliminary determination of Newtonian gravitational constant with angular acceleration feedback method at HUST // Phil. Trans. R. Soc. A, **372**, 20140031-20140031 (2014)]. Результаты измерения гравитационной постоянной методом компенсации угловых ускорений и сравнение с результатами других измерений приведены на Рис. 4.

Оба эксперимента на настоящий момент завершены. Внутренняя сходимость результатов даже лучше заявленной цели в 20-25 ppm. Тем не менее, принято решение пока не публиковать окончательных результатов, сфокусировав основное внимание на выявлении, оценке и устранении возможных систематических эффектов, могущих исказить окончательный результат. В частности, в динамическом методе измерений G существует систематическая ошибка, связанная с нелинейностью упругих свойств крутильной нити, что выражается в зависимости частоты крутильных колебаний от добротности. Такая ошибка может достигать величины в несколько десятков ppm. В этой связи эксперименты HUST динамическим методом проводились с использованием различных нитей подвеса: вольфрамовой нити, и кварцевой нити, добротность которой на порядок выше, чем у вольфрама (8×10^4).

В экспериментах другого типа, при измерении гравитационной постоянной с помощью метода компенсации углового ускорения, также существуют систематические ошибки. В частности, положение равновесия крутильного маятника с вольфрамовым подвесом испытывает линейной медленный дрейф, который приводит к квадратичному медленному

дрейфу угловой скорости вращающейся платформы, на котором расположен крутильный маятник. В текущем году была выполнена оценка (теоретически и экспериментально) влияния линейного медленного дрейфа и соответственно комплексного каплинг-эффекта на величину гравитационной постоянной. Результаты показывают, что линейный дрейф смещает величину гравитационной постоянной на 7 ppm, а влияния каплинг-эффекта менее 1 ppm. Детали этой работы в публикации [Jie Luo, ..., Vadim Milyukov. Influence of tungsten fiber's slow drift on the measurement of G with angular acceleration method // Rev. Sci. Instrum. **87**, 084501 (2016)].

Планируется, что окончательный результат экспериментов будет объявлен в наступившем году.

3.6. Сопоставление полученных результатов с мировым уровнем

1. Проект ГВ детектора TianQin.

11 февраля 2016 года было объявлено, что наземная гравитационно-волновая обсерватория LIGO (международный ГВ проект) зарегистрировала гравитационный сигнал, предположительно, от слияния двух черных дыр с массами порядка 30 масс Солнца. Таким образом, начата эра гравитационно-волновой астрономии.

Конечно, будущее гравитационно-волновой астрономии за детекторами, реализуемыми в космическом пространстве. Размещение инструментов в космосе открывает доступ к условиям с особой динамической «чистотой», недостижимым в земных лабораториях, но имеющим важнейшее значение для успешного проведения прецизионных экспериментов. В силу слабости гравитационно-волнового сигнала космическое базирование ГВ детекторов становится неизбежным. Известен проект гравитационно-волновой обсерватории на околосолнечной орбите (миссия «LISA»). Детектор представляет собой три космических аппарата, образующих гигантский космический интерферометр (длина плеч $\sim 5 \times 10^6$ км). Проект гравитационно-волновой космической миссии в гравитационном поле Земли начал разрабатываться в рамках российско-китайского сотрудничества. Проект TianQin имеет ряд существенных преимуществ по сравнению с LISA.

Существенным отличием предлагаемого проекта TianQin является то, что он реализуется в гравитационном поле Земли, на геоцентрической орбите, в отличие от проекта LISA, который предполагает гелиоцентрическую орбиту. По сравнению с гелиоцентрическими орбитами, выбор более доступных геоцентрических орбит позволяет использовать более доступные технологии для КА, что значительно снижает общую стоимость миссии. Стоимость проекта LISA на сегодняшний день оценивается в более чем 2,5 млрд. долларов США. По сравнению с LISA, проект TianQin в несколько раз дешевле. Предварительные расчеты показывают, что его стоимость составит 500 – 800 млн. долларов США

Уникальная особенность разрабатываемого проекта состоит в том, что инструменты, дизайн и алгоритмы обработки данных в эксперименте TianQin будут оптимизированы для обнаружения ГВ от одного наиболее перспективного источника гравитационного излучения («эталонный источник»). Соответственно, на первом этапе миссии упор делается на разработку космического детектора гравитационных волн от одного хорошо

известного источника. Первая задача TianQin - прямое обнаружение гравитационных волн с ожидаемыми характеристиками этого источника. При этом детектор, который представляет собой кластер спутников, можно полностью контролировать и использовать его для детального изучения выбранного источника. Схема эксперимента показана на Рис. 5. На следующем этапе TianQin будет работать как гравитационно-волновая обсерватория, способна обнаруживать гравитационное излучение от других, как известных, так и неизвестных источников.

Расчеты показывают [Jun Luo et al, TianQin: a space-borne gravitational wave detector // Class. Quantum Grav. 33 (2016)], что в миллигерцовом диапазоне частот оба детектора (LISA и TianQin) имеют сравнимую чувствительность, в частности для регистрации ГВ от источника J0806 (частота 3.11 мГц) чувствительность детекторов практически одна и та же (Рис.6).

2. Измерение ППР параметра «гамма».

В настоящее время наиболее точное значение параметра «гамма» получено по данным миссии CASSINI (миссия к Сатурну трех космических агентств: ESA, ASI и NASA). Для определения возможной задержки радиосигнала в гравитационном поле Солнца были использованы данные по слежению за КА во время его сближения с Солнцем в 2002 г. По результатам эксперимента был определен параметр $\gamma = 1 + (2.1 \pm 2.3) \times 10^{-5}$.

Такая точность приближается к области, где многочисленные модели скалярно-тензорных теорий, согласующиеся с современными космологическими наблюдениями, предсказывают нижнюю границу изменения этих параметров на уровне $\gamma - 1 \approx 10^{-6} \div 10^{-7}$. Таким образом, улучшение измерения этого параметра должно предоставить решающую информацию для подтверждения справедливости либо ОТО, либо скалярно-тензорных теорий гравитации, проверки современных теорий космологической эволюции.

Ожидается, что уровень точности $10^{-6} - 3 \times 10^{-7}$ измерения параметра «гамма» будет получен в миссии GAIA (космическая обсерватория ESA для астрометрических наблюдений с разрешением в тысячные доли угловых секунд, выведенная на орбиту в декабре 2013 г.).

Существуют также проекты космических миссий разной степени проработанности, основной целью которых является экспериментальная проверка релятивистских теорий гравитации. Один из таких проектов - ASTROD (Astrodynamical Space Test of Relativity using Optical Devices), предложенный ESA в программу запусков 2015-2025. Цель миссии – проверка релятивистских гравитационных эффектов в гравитационном поле Солнца. Концепция ASTROD состоит из трех свободных от сноса КА, соединенных между собой лазерной связью. Два КА находятся на околосолнечных орбитах, а третий помещается в точку Лагранжа L_1 (или L_2). Одним из ожидаемых результатов миссии – измерение ППН параметров «гамма» и «бета» с точностью $\sim 3 \times 10^{-8}$.

Несколько лет назад был предложен проект BEACON «The Beyond Einstein Advanced Coherent Optical Network», целью которого является измерение параметра γ с беспрецедентной точностью, $\sim 10^{-9}$! Одним из авторов этого проекта является участник

данной работы (В.Г. Турышев). Архитектура проекта BEACON основана на формации из 4-х малых КА, находящихся на круговых орбитах вокруг Земли с радиусом $\sim 80,000$ км.

Концепция разрабатываемого в рамках данного Проекта эксперимента по измерению ППН параметра «гамма» во многом схожа с идеологией проекта BEACON. Геометрическая избыточность группировки 4-х КА является ключевым элементом, дающим возможность выявить отклонение от евклидовой геометрии. В эксперименте измеряются 6 расстояний (4 стороны трапеции и две диагонали). Между тем в евклидовом пространстве можно измерить только 5 расстояний, а шестое вычислить. Если это шестое расстояние есть траектория луча, наиболее близко проходящего у Земли, вдоль которого гравитационное поле самое сильное, то разность измеренной и вычисленной величин расстояния дает оценку эффекта задержки Шапиро. Кроме того, пока конфигурация остается плоской, такая схема эксперимента не требует никаких дополнительных дистанционных измерений, задача полностью решается измерением 6 межспутниковых расстояний. Однако спутники могут выходить из плоскости, поэтому необходим постоянный контроль положений КА на орбите. Простые вычисления показывают, что для обеспечения измерения расстояния между спутниками ~ 160000 км с точностью ~ 0.02 нм, необходимо знать положение КА с точностью ~ 1 см, т.е. это требование легко выполняется и не требует применения технологий «компенсации сноса».

Расчетные требования к концепции и схеме эксперимента ориентированы на измерение параметра «гамма» на уровне 10^{-9} , что соответствует точности лучших мировых проектов.

3. Измерение ньютоновской гравитационной постоянной

В 2015 году была опубликована новая редакция фундаментальных физических констант CODATA-2014, которая рекомендовала новое значение ньютоновской гравитационной постоянной: $G = (6.67408 \pm 0.00031) \times 10^{-11} \text{ м}^3 \text{ кг}^{-1} \text{ с}^{-2}$ с относительной ошибкой 47 ppm. Основываясь на всех экспериментах, доступных на 2014 год, CODATA сочла возможным уменьшить рекомендованную относительную точность почти в три раза (относительная точность G в CODATA-2010 было 120 ppm). Тем не менее, эта точность практически в два раза хуже, чем внутренняя сходимость отдельных результатов, на основе которых выводится значение CODATA. Проблема состоит в невыявленных систематических ошибках, которыми могут быть осложнены отдельные результаты. Поэтому проблема сходимости результатов экспериментальных определений ньютоновской гравитационной постоянной, получения достоверной оценки G , до сих пор не решена и остается актуальной.

Данный проект будет очередным шагом в решении этой проблемы. Проведенные в HUST эксперименты должны дать результат, в котором будут минимизированы систематические ошибки, что существенно повысит достоверность значения гравитационной постоянной.

3.7.1. Методы и подходы, использованные в ходе выполнения Проекта (описать, уделив особое внимание степени оригинальности и новизны)

В концепцию проекта гравитационно-волнового детектора TianQin заложен ряд новых оригинальных методов и подходов. Основной из них – реализация эксперимента типа

«квази» Герца – т.е. используется «управляемый» детектор, который оптимизирован на регистрацию ГВ излучения от выбранного источника с известными параметрами. С точки зрения фундаментальной науки эксперимент «квази» Герца является наиболее надежным средством детектирования гравитационных волн, поскольку отпадают все рассуждения о природе источника, и регистрируется сигнал с ожидаемыми параметрами, что является также тестом надежности и адекватности работы детектора.

Отказ от построения гравитационно-волновой обсерватории на первом этапе реализации проекта в пользу эксперимента «квази» Герца и выбор геоцентрической орбиты приводит к значительному уменьшению стоимости проекта.

Разработка проекта эксперимента по измерению ППН параметра «гамма» с беспрецедентной точностью $\sim 10^{-9}$ опирается на оригинальную концепцию проекта и новые технологические решения. Конфигурация орбитального эксперимента, состоящая из 4-х спутников, обеспечивает геометрическую избыточность в евклидовом пространстве, что позволяет измерить релятивистскую задержку лазерного луча в гравитационном поле Земли (эффект Шапино) по разности измеренного расстояния и вычисленного из остальных измерений. «Оптическая связка» позволяет всем четырем аппаратам вращаться в одной плоскости. Пока конфигурация остается плоской, такая схема эксперимента не требует никаких дополнительных дистанционных измерений, задача полностью решается измерением 6 межспутниковых расстояний. Такая конфигурация не требует применения сложной и дорогостоящей технологии «drag free».

Для обеспечения измерения межспутниковых расстояний в экспериментах по детектированию ГВ и измерению ППР параметра «гамма» в лаборатории китайского партнера разрабатываются новые методы, основанные на лазерных технологиях транспондерного (активного) типа и использованием технологии TDI (интерферометрия с временной задержкой).

Разработаны две методики измерения гравитационной постоянной. Если динамический метод является традиционным для измерения гравитационной постоянной, в том числе, и для китайских партнеров, и новые подходы в основном касались разработки новых технологических решений при реализации этого эксперимента, то разработка методики другого эксперимента (компенсация угловых ускорений) во многом была новой и оригинальной.

В качестве нового подхода еще раз упомянем, что впервые в одной лаборатории одновременно выполняются два эксперимента по измерению гравитационной постоянной разными методами.

3.7.2. Вклад каждого члена коллектива в выполнение Проекта в 2016 году (указать работу, выполненную каждым членом коллектива по Проекту в 2016 году с новой строки)

Милюков Вадим Константинович – научное руководство проектом, эксперименты по измерению гравитационной постоянной, организация рабочих совещаний по проекту TianQin с участием российской стороны.

Виноградов Михаил Петрович - проработка структуры и состава космической системы

для измерений ППН параметров, разработка компоновочных схем КА.

Дуев Дмитрий Андреевич – расчет параметров орбит в ГВ эксперименте.

Жаров Владимир Евгеньевич - анализ инструментальных требований для измерений параметра гамма, расчет параметров орбит.

Миронов Алексей Павлович – анализ бюджета ошибок лазерной интерферометрии в ГВ эксперименте.

Мясников Андрей Владимирович- анализ бюджета ошибок системы компенсации негравитационных возмущений в ГВ эксперименте.

Сажин Михаил Васильевич – анализ астрофизических источников ГВ, анализ требуемой чувствительности ГВ эксперимента.

Турышев Вячеслав Геннадьевич – разработка концепции космического эксперимента по измерению ППР параметров.

3.8.1. Количество научных работ по Проекту, опубликованных в 2016 году (цифрами) (пункт заполняется автоматически, выводится количество заполненных 509 форм)

6

3.8.1.1. Из них в изданиях, включенных в перечень ВАК

2

3.8.1.2. Из них в изданиях, включенных в библиографическую базу данных РИНЦ

2

3.8.1.3. Из них в изданиях, включенных в международные системы цитирования (библиографические и реферативные базы научных публикаций)

4

3.8.1.4. Из них в соавторстве с зарубежными участниками

4

3.8.2. Количество научных работ, подготовленных в ходе выполнения Проекта и принятых к печати в 2016 году (пункт заполняется автоматически, выводится количество заполненных 509 форм)

0

3.9. Участие в 2016 году в научных мероприятиях по тематике Проекта (каждое мероприятие с новой строки, указать названия мероприятий и тип доклада)

1. Сагитовские чтения - 2016, ГАИШ МГУ Москва, Россия, 15 февраля 2016 (Устный)

2. Ломоносовские чтения - 2016, МГУ им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия, 18-27 апреля 2016 (Устный)

3. The 4th Workshop on TianQin Science Mission, Ухань, Китай, 4-6 ноября 2016 (Приглашенный)

4. Современная космология и гравитационно-волновая астрономия . Международная конференция памяти Л.П. Грищука. 16-18 ноября 2016, ГАИШ МГУ Москва, Россия, 17 ноября 2016 (Пленарный)

5. Научно-практическая конференция с международным участием «Космонавтика XXI века», г.Королев, Россия, 29-30 ноября 2016 (Устный)

3.10. Участие в 2016 году в экспедициях по тематике Проекта, которые проводились при финансовой поддержке Фонда (указать номера проектов)

Не участвовали

3.11.1. Финансовые средства, полученные в 2016 году от Фонда
800

3.11.2. Финансовые средства, полученные в 2015 году от Фонда
600

3.12. Адреса (полностью) ресурсов в Интернете, подготовленных авторами по данному проекту, например, <http://www.somewhere.ru/mypub.html>

http://geo.sai.msu.ru/rfbr/report_155253070.htm

3.13. Библиографический список всех публикаций по проекту за весь период выполнения проекта, в порядке значимости: монографии, статьи в научных изданиях, тезисы докладов и материалы съездов, конференций и т.д.

1. Luo Jun, Chen Li-Sheng, Duan Hui-Zong, Gong Yun-Gui, Shoucun Hu, Jianghui Ji, Liu Qi, Mei Jianwei, Milyukov Vadim, Sazhin Mikhail, Zharov Vladimir E. TianQin: a space-borne gravitational wave detector // *Classical and Quantum Gravity*, 2016, V. 33, № 3, с. 035010 DOI

2. Jie Luo, Wei-Huang Wu, Chao Xue, Cheng-Gang Shao, Wen-Ze Zhan, Jun-Fei Wu, Vadim Milyukov. Influence of tungsten fiber's slow drift on the measurement of G with angular acceleration method // *Review of Scientific Instruments*, 2016, V 87, № 8, с. 084501 DOI

3. Барабанов А.А., Милюков В.К., Москатиньев И.В., Нестерин И.М., Сысоев В.К., Юдин А.Д. Релятивистский гравитационный эксперимент на околоземной орбите: концепция, технология и конфигурация космической группировки. // *Вестник ФГУП «НПО им. С.А. Лавочкина»*, 2016, № 3, с. 89-95

4. Бурданов А.В., Жамков А.С., Жаров В.Е., Милюков В.К., Сажин М.В. Новый подход к проведению гравитационных исследований на околоземной орбите // *Космонавтика и ракетостроение*, 2016, том 8, № 93, с. 5-16

5. И.Ю. Власов, О. С. Сажина, В. Н. Семенцов, М. В. Сажин. Двойные звезды — источники монохроматических гравитационных волн // *Астрономический журнал*, 2015, том 92, №6, с. 1–18

6. Vlasov I.Y., Sazhina O.S., Sementsov V.N., Sazhin M.V. Binary stars as sources of monochromatic gravitational waves // *Astronomy Reports*, V 59, No 6, 2015, 525-541 DOI: 10.1134/S1063772915060189

7. Luo Jun, Mei Jianwei, Shao Chenggang, Wang Yan, Yeh Hsien-Chi, Zhou Ze-Bing, Milyukov Vadim, Sazhin M.V. TianQin mission concept // *Gravitation, Astrophysics, and Cosmology - Proceedings of the Twelfth Asia-Pacific International Conference*, World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd Singapore, 2016, с. 44-48

8. Milyukov V.K., Sazhin M.V., Zharov V.E., Mironov A.P., Luo Jun. Measurement of the post Newtonian parameter gamma by the cluster of spacecrafts in the gravity field of the Earth: The mission concept // *Gravitation, Astrophysics, and Cosmology - Proceedings of the Twelfth Asia-Pacific International Conference, World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd Singapore, 2016, c. 362-363*

9. Iafolla, V, Fiorenza, E, Lefevre, C, Lucchesi, D M., Lucente, M, Magnafico, Nozzoli, S, Peron, R, Santoli, F, Lorenzini, E C., Milyukov, V, Shapiro, I I., Glashow, S. A proposal for a test of weak Equivalence Principle with improved accuracy using a cryogenic differential accelerometer installed on a pendulum // *Metrology for Aerospace , IEEE USA, 2015, c. 61 – 65. DOI 10.1109/MetroAeroSpace.2015.7180627*

10. Vadim Milyukov, Jun Luo, Michail Sazhin, Vladimir Zharov, Alexey Mironov. Measurement of the Post Newtonian Parameter Gamma by the Cluster of Spacecrafts in the Gravity Field of the Earth: the Mission Concept. // *XIIth International Conference on Gravitation, Astrophysics and Cosmology (ICGAC-12). Book of Abstracts. PFUR, Moscow, 2015, 130-131.*

11. Jianwei Mei, Jun Luo, Hsien-Chi Yeh, Chenggang Shao, Michail Sazhin, Vadim Milyukov. TIANQIN Mission Concept. // *XIIth International Conference on Gravitation, Astrophysics and Cosmology (ICGAC-12). Book of Abstracts. PFUR, Moscow, 2015, 22-23.*

3.14. Библиографический список совместных публикаций (в соавторстве с зарубежным партнером по проекту) за весь период выполнения проекта: монографии и статьи в научных изданиях с указанием импакт-фактора журнала по базе данных Web of Science (тезисы докладов и материалы съездов, конференций и т.д. не включать)

1. Luo Jun, Chen Li-Sheng, Duan Hui-Zong, Gong Yun-Gui, Shoucun Hu, Jianghui Ji, Liu Qi, Mei Jianwei, Milyukov Vadim, Sazhin Mikhail, Zharov Vladimir E. TianQin: a space-borne gravitational wave detector // *Classical and Quantum Gravity, 2016, V. 33, № 3, c. 035010 DOI. Impact Factor 2.837*

2. Jie Luo, Wei-Huang Wu, Chao Xue, Cheng-Gang Shao, Wen-Ze Zhan, Jun-Fei Wu, Vadim Milyukov. Influence of tungsten fiber's slow drift on the measurement of G with angular acceleration method // *Review of Scientific Instruments, 2016, V 87, № 8, c. 084501 DOI. Impact Factor 1.336.*

3.15. Приоритетное направление развития науки, технологий и техники РФ, которому, по мнению исполнителей, соответствуют результаты данного проекта

Транспортные и космические системы

3.16. Критическая технология РФ, которой, по мнению исполнителей, соответствуют результаты данного проекта

Технологии создания ракетно-космической и транспортной техники нового поколения

3.17. Основное направление технологической модернизации экономики России, которому, по мнению

исполнителей, соответствуют результаты данного проекта

Космические технологии, прежде всего связанные с телекоммуникациями, включая ГЛОНАСС и программу развития наземной инфраструктуры.

3.18. Преимущества, полученные в результате международного сотрудничества (использование оборудования, наработок, доступ к уникальным объектам и условиям и т.д.)

Центр гравитационных экспериментов HUST, руководимый академиком Луо Джином (Luo Jin) – признанный мировой лидер в области прецизионных гравитационных экспериментов. За 30 лет своего существования от лаборатории, в которой была одна установка для измерения гравитационной постоянной, он превратился в уникальный научный центр, который, по признанию мировых экспертов, не имеет аналогов в мире. В Центре одновременно ведется широкий круг экспериментов из разных областей физики. В Центре выполнен целый ряд фундаментальных экспериментов мирового уровня с использованием крутильных весов. В частности, проверка закона обратных квадратов в миллиметровой и субмиллиметровой областях, экспериментальный предел на массу покоя фотона, целая серия экспериментов по измерению Ньютоновской гравитационной постоянной.

Два новых эксперимента по измерению гравитационной постоянной реализуются, в том числе, в рамках данного проекта. Созданы две уникальные экспериментальные установки, на которых проводятся эксперименты. Центр оснащен самым современным метрологическим оборудованием, развиты многие методики, позволяющие проводить измерения на пределе точностных возможностей инструментов. В результате международного сотрудничества российские участники проекта имеют возможность работать на этих установках и оборудовании. В настоящий момент оба эксперимента завершены. Планируется, что конечный результат этих экспериментов – новое значение гравитационной постоянной, будет опубликован в высоко рейтинговом журнале с участием представителя российской стороны.

В последние два года в Российско-Китайском сотрудничестве появилось новое направление – анализ возможности выхода в лабораторию на орбите Земли. Развитие космических технологий предоставляет новые возможности в измерении тонких гравитационных эффектов, лежащих в основе релятивистских теорий гравитации, в том числе, и ОТО. Это направление развивается, в том числе, и в рамках данного Проекта. Речь идет о двух экспериментах: измерению ППН параметра γ и детектировании гравитационных волн.

Следует отметить, что идеологии обоих экспериментов были предложены российскими участниками. В случае ППН эксперимента – это геометрическая избыточность межспутниковых измерений, существенно упрощающая схему эксперимента и позволяющая выявить релятивистскую задержку (В.Г. Турышев). В ГВ эксперименте детектор оптимизируется на прием сигнала от конкретного ГВ источника (двойной звезды). В случае успешного приема ГВ сигнала расчетные параметры эксперимента совпадут с наблюдениями, и таким образом, будет получено прямое доказательство существования гравитационных волн (М.В. Сажин).

Китайскими партнерами интенсивно ведутся работы по развитию прецизионных измерений, которые составят экспериментальную базу для космических миссий. В Центре гравитационных экспериментов HUST и в новом исследовательском центре TianQin Research Center, созданном в 2015 г. в Чжухае специально для развития гравитационно-волнового проекта TianQin, разрабатывается гетеродинная техника межспутниковой лазерной локации, в которой в качестве оптического ретранслятора используется гомодинная цепь фазовой синхронизации. Ведутся работы по созданию бортового высокоточного трехосного акселерометра для космических миссий. На основе разработанной технологии был создан летный образец трехосного акселерометра, который был установлен на борт китайского космического аппарата, и в начале 2013 прошел успешные испытания на орбите вокруг Земли. Эти новые технологии составят основу для научного оборудования, которое будет разрабатываться для целей предлагаемого проекта.

Безусловно, это новое космическое направление нашего сотрудничества является достаточно амбициозным, требующим, как любой космический эксперимент, длительной подготовки, вложения больших финансовых ресурсов, и пр., и может быть реализовано только в рамках международного сотрудничества.