

Поиск гравитационных сигналов коллапсирующих объектов в Галактике*

В.Н. Руденко, А.В. Гусев, Н.Л. Квашинин, С.М. Попов, С.И. Орешкин

Выполнялся мониторинг импульсных возмущений наземного фона гравитационного градиента, порождаемых астрофизическими и внутриземными катаклизмами. Основной целью являлась регистрация всплесков гравитационного излучения от релятивистских катастроф в Галактике, а также скрытых взрывных процессов внутренних земных структур. Экспериментальные исследования проводились с помощью оптоакустической гравитационной антенны ОГРАН, лазерного гравитационного интерферометра VIRGO и вспомогательной сейсмической аппаратуры в главной штольне Баксанской нейтринной обсерватории (БНО ИЯИ РАН). Выполнены измерения баланса акустических, оптических и электронных шумов антенны ОГРАН по отношению к шумам окружения. Проведены измерения сейсмического фона в БНО в низкочастотном диапазоне от 0.1 Гц до 10 Гц. Завершена обработка данных многолетних измерений низкочастотных гравитационных возмущений на интерферометре VIRGO с базой 3 км. Получена мажорирующая оценка магнитуды возмущений для колебаний внутреннего земного ядра. Решенные в данном проекте задачи демонстрируют его мультидисциплинарный характер, обеспечивающий получение новых знаний в астрофизике (уточнение физических процессов при слияниях звезд и коллапсах), ядерной физике (уточнение уравнений состояния нейтронных звезд) и геодинимике (процессы внутренней Земли и сейсмоакустики).

Ключевые слова: гравитационные детекторы, многоканальная астрономия.

*Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект №19–29–11010).

Введение

Поиски гравитационного излучения от космических объектов начинались с использования массивных твердотельных болванок (акустических резонаторов) в качестве детекторов гравитационных волн (знаменитые опыты Вебера в конце 60-х годов XX в. [1]). Далее осознание того, что оптическая интерферометрия является гораздо более чувствительной методикой регистрации слабых возмущений пробных тел и сред, привело к отказу от твердотельных детекторов и их замене на оптические интерферометры длинной базы с подвесными массами-зеркалами. Возникли международные научные коллаборации LIGO, VIRGO, реализовавшие проекты больших интерферометров с базами в 4 и 3 км.

Первая регистрация в 2016 г. гравитационно-волнового сигнала от слияния двойной, образованной двумя черными дырами с массами порядка 30 масс Солнца, с расстояния в

400 Мрс явилась знаковым событием, подтверждающим реальность надежд на гравитационно-волновую астрономию как нового уникального канала информации в нашем познании Вселенной [2]. Величина сигнала, зафиксированного детекторами LIGO, составила $h \approx 10^{-21}$ по безразмерной амплитуде гравитационной волны (или вариации пространственной метрики на геометрическом языке) при средней несущей частоте в 150 Гц. По форме сигнал укладывался в хрестоматийный портрет так называемого «чирпа»: радиопуга с меняющейся несущей и тремя характерными фазами: скручивание (inspiral), слияние (merging) и релакса-



РУДЕНКО
Валентин Николаевич
профессор,
Государственный астро-
номический институт
им. П.К. Штернберга МГУ



ГУСЕВ
Андрей Викторович
Государственный астро-
номический институт
им. П.К. Штернберга МГУ



КВАШИН
Николай Леонидович
Институт лазерной
физики СО АН



ПОПОВ
Сергей Михайлович
Государственный астро-
номический институт
им. П.К. Штернберга МГУ



ОРЕШКИН
Сергей Иванович
Государственный астро-
номический институт
им. П.К. Штернберга МГУ

ция (ring-down). До конца 2016 г. была зарегистрирована еще пара подобных сигналов, но с меньшей амплитудой [3]. Это достижение породило новый всплеск активности вовлеченных научных коллабораций и отдельных групп с выдвижением ряда предложений по новым долгосрочным проектам детекторов повышенной чувствительности, таких как Einstein Telescope [4], Voyager и Cosmic Endower [5]. Перечисленные выше уже действующие детекторы, как и будущие проекты, весьма затратные финансово. В этом отношении российский проект создания оригинальной установки ОГРАН (Оптоакустическая Гравитационная Антенна) требовал финансирования доступного в рамках типичных программ развития институтов РАН.

Идея гравитационной антенны как некоторой комбинации принципов твердотельных резонансных детекторов и лазерных интерферометров на свободных массах обсуждалась в середине 1980-х годов. Ее относительно законченная формулировка была представлена в работе [6], где анализировался веберовский детектор с оптическим резонатором Фабри – Перо (ФП), закрепленным на его поверхности и питающимся от внешнего стабилизированного лазера. Масштаб обеих степеней свободы – акустической и оптической – предполагался одинаковым (зеркала ФП фиксировались на торцах цилиндрического тела детектора), поэтому при расчете его реакции на гравитационную волну следовало учитывать мультипликативный характер взаимодействия. Для детекторов с оптическим сенсором в виде мини-ФП-резонатора с микронным зазором этого не требовалось, сенсор был только датчиком акустических колебаний.

В результате комбинированный детектор имел сложный отклик, содержащий оптическую и акустическую части, что, в принципе, должно было облегчать процедуру его фильтрации из шумового фона. Вторым важным аспектом такой конфигурации была малость «обратного флуктуационного влияния» оптической

степени свободы на акустическую [7]. Это влияние проявлялось через флуктуации светового давления на зеркала интерферометра, которое становится критическим только при очень больших мощностях накачки (>10 кВт). При средних значениях порядка единиц ватт оно пренебрежимо мало, и можно наращивать коэффициент преобразования полезного сигнала, увеличивая амплитуду накачки. При этом также корневым образом должен был снижаться уровень фотонного шума. В итоге оптическая (интерферометрическая) система регистрации является самой прецизионной на сегодняшний день, что доказано на практике установками LIGO и VIRGO, в которых измеряются абсолютные смещения зеркал на рекордно малом уровне ~ 10 – 16 см.

В комбинированной антенне уровень фотонного шума может быть столь низким, что основным шумовым фоном становится тепловые броуновские колебания акустического детектора (датчик выглядит идеальным регистратором). Здесь методы борьбы хорошо известны: требуется высокая акустическая добротность и охлаждение детектора. Но даже при комнатной температуре и средней добротности $\sim 10^5$ чувствительность детектора к метрическим вариациям может достигать $\sim 10^{-20}$ в полосе порядка единиц герц вокруг резонансной частоты детектора. Интересно, что это сравнимо с чувствительностью криогенных твердотельных детекторов, но достигается без глубокого охлаждения.

Расчет конкретных параметров комбинированной оптоакустической гравитационной антенны, оптической и механической ее частей был выполнен в работе [8]. Выяснилось, что для необходимого снижения влияния оптического шума требуется весьма высокая резкость ФП резонатора (Финесс) $F \geq 10^4$, то есть нужны высоко рефлективные зеркала с ничтожно малым поглощением (единицы ппм). Впоследствии такие зеркала были изготовлены для ОГРАН в Лионе на оптическом предприятии (Laboratoire Matériau Avancé).

Разработка антенны ОГРАН была начата в 2005 г. как совместный проект МГУ и Академии наук в составе трех институтов: ГАИШ МГУ, ИЯИ РАН и ИЛФ СО РАН с конечной целью создания гравитационной антенны оригинальной конструкции при размещении ее для долговременных наблюдений в подземных условиях БНО ИЯИ РАН. Финансирование осуществлялось в рамках ЦНТП РАН по созданию новой техники. Работы в основном завершились в 2012 г.: антенна была собрана и протестирована на базе ГАИШ МГУ, показав характеристики, близкие к проектным. В 2014 г. состоялась ее передислокация в БНО, где к этому времени закончилось строительство специальной лаборатории на отметке 1 500 м от входа в штольню Главную. Около 5 лет потребовалось для доработки и адаптации антенны к подземным условиям БНО. К моменту начала исследований по гранту МК РФФИ проводились работы по автоматизации поддержания рабочего режима антенны и ее прецизионной термостабилизации. Подробное описание ОГРАН с техническими характеристиками можно найти, например, в [9]. Принципиальная схема антенны ОГРАН представлена на рис. 1.

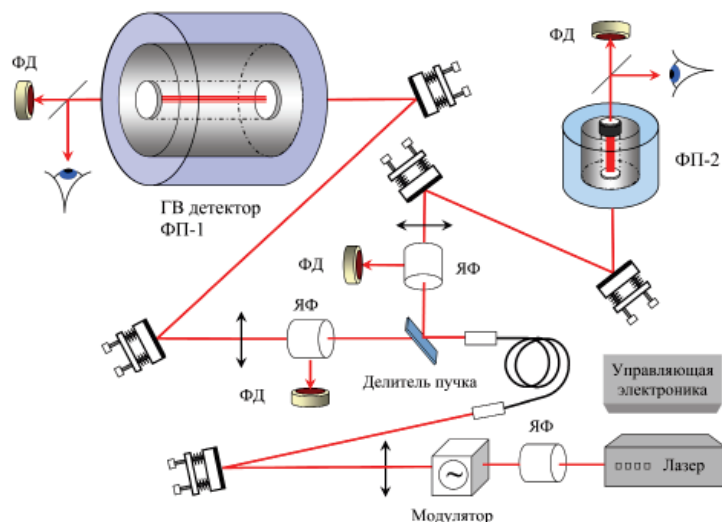


Рис. 1. Принципиальная схема установки ОГАН. На рисунке используются следующие обозначения: ФП-1 и ФП-2 – интерферометры Фабри – Перо сформированные зеркалами, закреплёнными на торцах гравитационного детектора (ГВ детектор ФП-1) и опорного эталона (ФП-2), расположенных в вакуумных камерах; ЯФ – ячейки Фарадея; ФД – фотодетекторы; модулятор – фазовый модулятор лазерной накачки на частоте 10.7 МГц. «Глазом» обозначены камеры контроля модового состава лазерного излучения.

Принцип действия антенны ОГАН

Принцип действия антенны базируется на классической схеме, известной как «компаратор частотных эталонов», в которой детектируемый сигнал появляется в результате сравнения пары высокостабильных оптических резонаторов (рис. 1). Внешний одномодовый лазер, используемый для оптической накачки антенны, замкнут цепью обратной связи с протяженным высокодобротным оптическим эталоном – интерферометром Фабри – Перо (ФП-1). Зеркала этого эталона закреплены на торцах акустического резонатора, – большой алюминиевой болванки (стержня) длиной $L=2$ м и массой $M\approx 2$ т, имеющего центрально-осевой канал для прохода оптического излучения.

Гравитационная волна вызывает возмущение как акустической, так и оптической степеней свободы, сдвигая частоту оптического резонанса. Система обратной связи соответственно перестраивает частоту генерации лазера, удерживая резонансную настройку ФП-1. Таким образом, гравитационные возмущения кодируются в вариациях частоты накачки антенны. Эти вариации регистрируются с помощью дифференциальной схемы (компаратора), содержащей второй короткий ФП-резонатор (эталон ФП-2) ($l=45$ см), который работает как оптический частотный дискриминатор. Для увеличения температурной стабильности тело короткого эталона выполнено из материала со сверхнизким коэффициентом теплового расширения – ситалла СО-115М [10].

Выходной сигнал этой схемы пропорционален разности частот лазера (или эталона ФП-1) и дискриминатора (эталона ФП-2). В результате частота лазерного излучения содержит информацию о гравитационных возмущениях оптоакустического детектора ОГАН, это изменения базы зеркал ФП-1 или вариации показателя преломления между ними.

Исходный рабочий режим, или «рабочая точка антенны», в точности соответствует резонансной настройке обоих оптических резонаторов. Для большого резонатора ФП-1 это достигается путем изменения частоты накачки лазера. Одно из зеркал ФП-2 опорного резонатора (дискриминатора) закреплено на пьезокерамике, которая по низкой частоте управляется напряжением цепи обратной связи. Таким образом, резонансная частота дискриминатора фиксируется на низких частотах (ниже 100 Гц). На сигнальных частотах, близких к 1 кГц, зеркала дискриминатора оказываются свободными и разностный сигнал компаратора пропорционален величине возмущения гравитационной волны (ГВ). Сигнал ошибки в обоих плечах (детектора и дискриминатора) получается с помощью известной схемы Паунда – Дривера – Холла, которая предполагает введение фазовой модуляции на радиочастоте (10.7 МГц) входного оптического излучения. Отраженный от опорного резонатора (дискриминатора) луч синхронно демодулируется на фотодетекторе. Амплитуда фототока пропорциональна разнице между частотой лазерного излучения и собственной частотой ФП-2 эталона дискриминатора, которая предполагается достаточно стабильной. Для устойчивого функционирования всей антенны предусмотрена также стабилизация амплитуды лазерной накачки.

Оптическая схема ОГАН при отсутствии внешних гравитационных возмущений должна работать в режиме нулевого выходного сигнала (работа «в темном пятне», как принято во всех больше-базовых лазерных гравитационных интерферометрах). В то же время она не требует непосредственной интерференции между двумя лучами, что существенно облегчает техническую реализацию детектора.

Программа наблюдений наземного гравиградиентного фона на установке ОГАН предусматривает ее совместную работу с подземным сцинтилляционным нейтринным телескопом, также установленным в БНО. Поиск

нейтрино-гравитационных событий – совпадающих возбуждений обоих детекторов в реальном времени призван заменить традиционную «схему совпадений» тождественных, но разнесенных приемников. Это соответствует идее мультиканального поиска релятивистских катастроф [11]. Подземное расположение ОГРАН резко снижает поток высоко энергичных космических частиц, которые создают «негравитационные срабатывания» антенны. Это устраняет необходимость параллельного контроля и фильтрации по принципу «антисовпадений» радиационного космического фона соответствующими датчиками, как это было в случае наземных криогенных антенн. Однако для фильтрации гравитационных возбуждений геофизической природы рядом с ОГРАН установлен детектор веберовского типа (УЛИТКА), который участвовал в эксперименте по проверке опытов Вебера в 1970-х годах и был возвращен в строй в 1990-х на базе ГАИШ МГУ. Его чувствительности не хватает для регистрации ГВ-сигналов из космоса. По «антисовпадениям» с ним можно существенно снизить фон подозрительных шумовых всплесков ОГРАН [9]. Интересно, что данные УЛИТКИ в том же качестве фильтра геофизических сигналов привлекались для проверки эффекта «избыточных совпадений в плоскости Галактического диска» на криогенных детекторах Explorer и Nautilus.

Конструктивные особенности ОГРАН

Вернемся к принципиальной оптоэлектронной схеме установки, представленной на рис. 1. Как уже отмечалось, ее дизайн относится к типу конструкции, называемому компаратором оптических эталонов. Она состоит из двух контуров обратной связи. Первый связывает оптический резонатор ФП-1 на большой болванке (условно «акустический детектор») с лазером оптической накачки, частота которого автоматически настраивается в оптический резонанс с полостью ФП-1.

Любое изменение оптической длины ФП преобразуется в изменение частоты излучения накачки.

Второй контур является измерительным. Он состоит из дополнительной полости ФП-2 (закрепленной на малой твердотельной болванке), именуемой «частотный дискриминатор», освещаемой тем же лазером накачки, но настраиваемой в резонанс с помощью независимого пьезокерамического драйвера, прикрепленного к одному из зеркал дискриминатора. Его выходной сигнал пропорционален разности частот между лазерной накачкой и полостью дискриминатора. Любое изменение длины болванки акустического детектора (выше частоты среза обратной связи 100 Гц) отражается в выходном сигнале дискриминатора. Стоит еще раз подчеркнуть физическую специфику ОГРАН: гравитационная волна взаимодействует не только с акустической степенью свободы, но и с электромагнитным полем в полости ФП. Это приводит к сложной структуре сигнального отклика с оптической и акустической частями. Платой за эту оригинальность является проблема создания крупногабаритной полости ФП с большой резкостью, жестко связанной с акустическим резонатором без потери его высокой механической добротности Q .

Первоначальный вариант антенны ОГРАН был подробно описан в статье [9]. Она имела следующие физико-технические характеристики: акустический детектор – эффективная масса $M=2 \cdot 10^3$ кг, длина $L=2$ м, акустическая резонансная частота – 1.3 кГц при механической добротности $Q=10^5$. Параметры оптической части были следующими: длина волны лазера 1064 нм, полная мощность лазера $W=2$ Вт, эффективная мощность в петлях FP полостей 0.05 Вт, резкость $F=3\,000$ полости детектора, $F=1\,500$ полости дискриминатора, контраст интерференции $C=0.2$. Экспериментальная кривая чувствительности в виде спектральной плотности шума изображена на рис. 2 и была представлена в [12]. Она сводится к минимальной обнаружимой деформации $(\Delta L/L)f=10^{-18}$ Гц $^{-1/2}$ в полосе пропускания $\Delta f=30$ Гц и $(\Delta L/L)f \cdot 10^{-19}$ Гц $^{-1/2}$ в полосе пропускания $\Delta f=4$ Гц вокруг центральной частоты приемника 1.3 кГц.

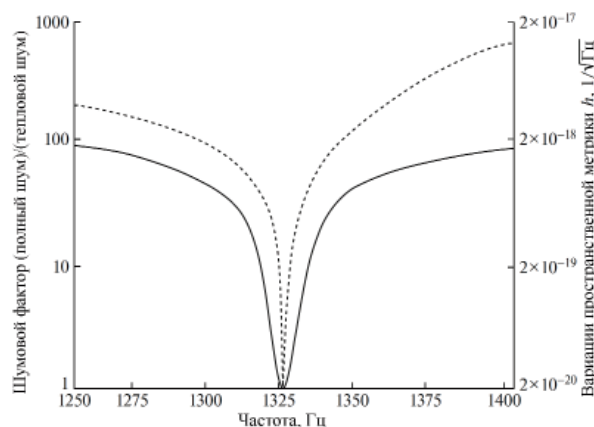


Рис. 2. Чувствительность установки ОГРАН после модернизации в единицах вариации метрики пространства.

Описанная первоначальная версия оптоакустической гравитационной антенны была радикально модернизирована.

вана, что привело к существенному улучшению ее рабочих характеристик. Основные работы по модернизации были выполнены в рамках проекта РФФИ №19-29-11010.

Результаты исследований

Основные результаты, полученные при исполнении плана работ над проектом, кратко представлены ниже. Первые 5 пунктов непосредственно касаются установки ОГРАН; следующие пять пунктов содержат исследования, ассоциированные с наземным гравитационно-волновым экспериментом:

1. Оригинальная установка ОГРАН – комбинированная оптоакустическая гравитационная антенна, сочетающая в себе принципы твердотельных резонансных градиометров и оптических гравитационных интерферометров, функционирует в режиме непрерывных наблюдений. Эквивалентное увеличение базы ОГРАН, ведущее к росту чувствительности антенны, достигается за счет применения резонаторов Фабри – Перо с рекордно большой резкостью $\sim 10^5$ при использовании зеркал высоких технологий с малыми потерями. Это потребовало модернизировать цепи фотоприемников в составе антенны (переход на фотодиоды InGaAs) для адаптации к возросшей величине гравитационного-оптического преобразования). В итоге достигнут уровень чувствительности (спектральной плотности мощности шума), изображенный на *рис. 2*, достаточный для регистрации всплесков ГВ от источников, расположенных в нашей Галактике. Результаты модернизации представлены в [12].

Новые фотоприемники выполнены на основе полупроводникового материала InGaAsP с большим квантовым выходом на рабочей длине волны излучения лазера. Вследствие этого увеличилась их чувствительность и расширилась рабочая полоса частот, что привело к большей устойчивости электронных цепей к самовозбуждению. Для уменьшения наводок цепи питания были дистанционно разнесены в монтажном блоке. Кроме того, непосредственно в корпусе фотоприемника установлены дополнительные стабилизаторы питающих напряжений. Модернизации подверглась также система синхронного детектирования в обоих плечах ОГРАН. Были использованы компактные микросхемы внешних синхронных детекторов, которые крепятся прямо на подводящий кабель в непосредственной близости от фотоприемника.

Сигналы опорных частот 10.7 МГц (для питания электрооптического модулятора), а также синхронного детектирования в обоих каналах в новом варианте подаются от высокостабильных лабораторных генераторов RIGOL DG822. Эти генераторы имеют внешний вход синхронизации для согласования сигналов. Один из генераторов (питающий модулятор) – ведущий. Он ставится в режим внутренней синхронизации. Его фаза принята за нулевой отсчет. Два других генератора (для синхронного детектирования в обоих каналах) являются ведомыми, включены в режим внешней синхронизации от первого генератора. Их фазы устанавливаются по максимуму сигналов Паунда – Дривера на выходах синхронных детекторов.

Все генераторы предусматривают возможность дистанционного управления, поэтому контроль фаз может осуществляться удаленно, что облегчает настройку системы регистрации сигнала без появления оператора в подземной лаборатории на ПК-14, неизбежно влекущего за собой некоторое изменение температурного фона в районе установки.

2. Важным экспериментальным достижением является создание цифровой системы автоматического управления (включая удаленный текущий контроль) установкой ОГРАН с автозахватом рабочей точки после случайных срывов. В качестве линии контроля организован и функционирует отдельный канал связи с малыми задержками.

3. Многократные измерения акустических, оптических и электронных шумов ОГРАН показали существенную зависимость их относительной роли от качества юстировки ФП-резонаторов в обоих плечах антенны (плечи детектора и дискриминатора). При оптимальной настройке спектральная амплитуда акустического пика превышает уровень оптоэлектронных шумов на два порядка. Шумы окружения в отсутствие явных механических и электрических возмущений не создают гравитационно-деформационного фона в окрестности резонансной частоты антенны 1.3 кГц, превышающего $10^{-18} \text{ Гц}^{-1/2}$ [12].

4. Обнаружены эффекты длительной тепловой релаксации ОГРАН [13]. За 12 мес. непрерывной работы установки вскрыты особенности ее тепловой релаксации, показавшие необходимость активной термостабилизации камеры ВК-10 (камера подвески большого акустического детектора). Фактически ФП-резонаторы акустического детектора и дискриминатора имеют сильно отличающиеся времена релаксации. Алюминиевый твердотельный детектор релаксирует по температуре гораздо быстрее тела ситалового дискриминатора. Даже слабые вариации температуры акустического детектора влияют на положение цен-

тральной частоты броуновского пика и стабильность захвата рабочей точки. В результате требуется прецизионный температурный контроль теплового режима камеры ВК-10 с помощью активного термочехла с активной системой управления.

Потребность прецизионной термостабилизации акустического резонатора детектора ОГАН явно просматривается при слежении за спектральной плотностью теплового броуновского пика. Измерения спектра многократно проводились со спектральным разрешением 10^{-3} Гц. Центр резонансного пика ОГАН приходится на частоту 1.3 КГц. Даже очень слабые вариации (в пределах динамического диапазона) температуры акустического детектора ОГАН влияют на положение центральной частоты броуновского пика. Отношение сигнала к шуму в таких измерениях зависит от точности оптических настроек и при удовлетворительной настройке достигает 60. Ширина резонансного пика составляет 0.002 Гц. Для его качественного спектрального разрешения необходимо накапливать сигнал не менее 1 000 с. При этом в спектре внутри полосы резонансного пика попадут три точки дискретизации. Стабильность положения пика и полосы приема гравитационного сигнала важны для качественной работы детектора, в частности для накопления слабых сигналов.

Первые эксперименты обнаружили необходимость системы прецизионного активного удержания центральной частоты и обеспечения стабильного теплового фона в прилегающих помещениях, при этом скорость релаксации температуры в режиме полного захвата составляет порядка 700 ч. На предыдущих этапах развития установки ОГАН во всех боксах пикета ПК-14 была смонтирована система стабилизации температуры с точностью 0.1° . При этом выход системы слежения (по рабочим точкам) за границы контрольного диапазона был довольно частым явлением. Проблема заключалась в том, что основной акустический детектор выполнен из алюминиевого

сплава – материала с высоким коэффициентом температурного расширения. Расчет показывал, что для выхода системы регистрации за границы диапазона слежения достаточно изменения температуры детектора на 0.01° . В связи с этим было принято решение экранировать вакуумную камеру основного детектора термочехлом с внутренним подогревом (рис. 3).

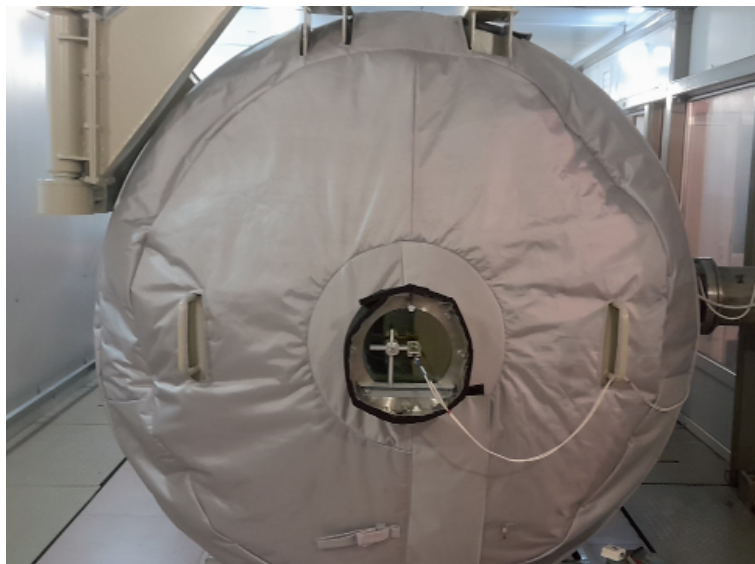


Рис. 3. Термочехол с подогревом, установленный на вакуумную камеру детектора гравитационных волн.

Чехол был изготовлен по индивидуальному проекту. Он представляет собой многослойную конструкцию. Наружный и внутренний слой (примыкающий к стенкам камеры) выполнены из ткани OXFORD – синтетического безворсового материала, устойчивого к перепадам температур. Между этими слоями установлено четыре слоя синтепона с плотностью 100 г/м^2 и два слоя майларовой пленки с металлизированным покрытием для уменьшения потока теплового излучения от внешней среды к стенкам камеры. На внешней поверхности камеры под термочехлом были установлены ленточные нагреватели суммарной мощностью 50 Вт. Питание нагревателей осуществлялось от внешнего управляемого источника постоянного тока. Входным управляющим сигналом для этого источника является сигнал ошибки слежения за напряжением на пьезокерамике, подстраивающей частоту лазера. Для того, чтобы предотвратить нежелательную конвекцию воздуха под чехлом, пространство между ребрами жесткости на вакуумной камере было разделено горизонтальными перегородками из пенополистирола. После монтажа термочехла на вакуумную камеру основного детектора температурная стабильность установки повысилась на два порядка. Уходы за границы диапазона слежения прекратились, установка перестала чувствовать тепловой фон от присутствия человека рядом с камерой (тепловой поток порядка 100 Вт). Срывы слежения в обновленной установке происходят крайне редко и в основном из-за внешних сейсмических воздействий или электрических наводок.

5. Измерен сейсмический фон в Главной штольне БНО [14]. По этим измерениям выполнен расчет соответствующего

гравитационного шума. Данные сейсмического фона по длине 4-километрового туннеля БНО напрямую используются для фильтрации аномальных геофизических выбросов установки ОГРАН. Однако более тонкая обработка предполагает учет также индуцированных сейсмикой гравитационных возмущений или так называемого «ньютоновского шума», от которого нет экранировки, и поэтому этот тип шума принципиально ограничивает предельную чувствительность гравитационных антенн. Поиск европейских подземных лабораторий с низким уровнем ньютоновского шума актуален в связи с проблемой размещения гравитационно-волновых интерферометров нового поколения. В рамках исследований по данному проекту выполнен статистический анализ многолетнего банка данных по сейсмо-гравитационным шумам в БНО в предположении, что детектором служит одномерный оптический интерферометр на свободных массах (зеркалах). Вычисления потенциального вклада в ньютоновский шум по микросейсмическим данным, полученным в главной штольне БНО, показывают, что этот предел значительно ниже требований, предъявляемых к такому известному детектору третьего поколения как Телескоп Эйнштейна. В целом подтверждается высокое качество площадки БНО как сайта для размещения будущих поколений гравитационных антенн.

6. В новой постановке была решена задача оптимизации планируемой Евро-Азиатской сети ГВ-интерферометров, включая детектор в Новосибирске. Интегральный критерий эффективности сети рассчитывался под модельный ГВ-всплеск, сопровождающий коллапсы с образованием сверхплотного остатка. Ввиду слабости таких всплесков, по сравнению с «чирп-сигналами» от слияния релятивистских двойных, зона расположения возможных излучателей ограничена областью нашей Галактики. При расчете критерия эффективности нельзя использовать изотропию. Следует учитывать угловую зону покрытия источников по диску Млечного Пути. Параметры диаграммы направленности зависят от времени, поэтому вычисляется средняя суточная эффективность за 24 ч. Графические результаты расчетов приведены в [15]. Максимальное значение интегрального критерия эффективности достигается при угловой ориентации детектора в Новосибирске, составляющей $\sim 40^\circ$, то есть оптимальный угол заметно отличается от случая сигналов слияния.

7. Выполнен анализ комбинированного гравитационно-интерферометра Саньяка – Майкельсона как инструмента обхода квантовых ограничений чувствительности гравитационно-волновых детекторов. В такой системе реализуется измерение скоростей свободных масс-зеркал вместо измерения их координат. Импульс свободной пробной массы является ее интегралом движения и его измерение позволяет понизить порог квантовых ограничений чувствительности к приему гравитационных волн. Общая теория процессов в таких системах достаточно сложна. Однако на уровне физических рассуждений, представленных в [16], удастся оценить уровень подавления границы квантового предела в меру фактора $\Omega\tau < 1$, где Ω –

частота ГВ, а τ – время путешествия фотонов в плечах комбинированного интерферометра.

Комбинированные конфигурации интерферометра Саньяка – Майкельсона, сохраняя основные сигнальные свойства традиционной майкельсоновской схемы, увеличивают ее помехоустойчивость по отношению к внешним шумам окружения.

В этой конструкции концевые зеркала майкельсоновских плеч наклонены, так что отраженные лучи с помощью вспомогательного зеркала направляются через делитель к выходу интерферометра по симметричным замкнутым контурам, которые они обходят во встречных направлениях. Обибаемая лучами площадь (с учетом их направления) в идеале равна нулю, и обычный «эффект Саньяка», обусловленный вращением платформы интерферометра, отсутствует. В то же время реакция интерферометра на динамические приливные деформации плеч, индуцированные гравитационной волной, сохраняется. Сравнение основных характеристик приема антенн двух типов приводит к следующим выводам. Майкельсоновский интерферометр имеет наибольший отклик на квазистатических частотах и во вторичных зонах приема, определенных трансцендентным уравнением, связывающим длительность сигнального цуга с его несущей частотой. Интерферометр Саньяка – Майкельсона обладает сдвинутой спектральной характеристикой. Первый и самый высокий пик имеет место на частоте примерно обратной времени обхода «контур Саньяка». Настройка позволяет в принципе подогнать частоту максимума к середине полосы гравитационно-волнового сигнала. Пиковый отклик комбинированного интерферометра больше, чем у чистого майкельсоновского из-за большего накопления фазы при прохождении лучей через оба плеча. При геометрических параметрах, близких к работающим установкам LIGO, середина зоны наилучшего приема приходится на 690 Гц с шириной (по уровню 3 дБ) примерно 220–1 250 Гц. Спек-

тральная плотность фотонного шума фазовой переменной, отвечающая предельной регистрируемой ГВ, составит $10^{-11} \text{ rad} \cdot \text{Гц}^{-1/2}$. Однако независимо от цифр уже качественная картина сравнения гравитационно-волновых лазерных детекторов традиционного и модернизированного типа обнаруживает преимущества последних, заставляя перейти к их более скрупулезному изучению. Такими преимуществами среди прочего являются снижение требований к частотным флуктуациям оптической накачки, сейсмическим возмущениям пробных масс-зеркал и системам их квазистатического взаимного позиционного контроля. Вопрос о новой модификации ГВ-интерферометров возник в связи с проблемой создания третьего поколения гравитационных детекторов в проектах «Телескоп Эйнштейна», «Вояджер» и «Космический эксплорер».

Важную роль комбинированный интерферометр играет в проблеме «невозмущающих измерений», так называемых QND, quantum non demolition measurement. Его конфигурация оказывается полезной для решения другой принципиальной задачи – преодоления квантовых пределов чувствительности в прецизионных экспериментах.

При подавлении механического броуновского шума за счет охлаждения и высокой добротности маятниковых подвесок пробных масс-зеркал основным источником флуктуаций в системе становятся квантовый шум оптической накачки. Его роль уменьшается с увеличением интенсивности накачки, однако при этом нарастают шумы пробных масс, индуцированные давлением электромагнитных квантов света (эффект обратного влияния датчика-измерителя). В итоге возникает квантовый предел чувствительности гравитационной антенны, определяемый так называемым «квантовым стандартом», или минимальным регистрируемым смещением пробных масс

$$\Delta x = (h/m\tau)^{1/2}.$$

Здесь h – константа Планка, m – пробная масса, τ – время измерения, порядка обратной частоты ГВ. Оценки показывают, что для типичных параметров антенн LIGO, VIRGO квантовая граница чувствительности имеет порядок 10^{-17} – 10^{-18} см по абсолютным смещениям и $DL/L=10^{-23}$ – $10^{-24} \text{ Гц}^{-1/2}$ по деформациям в частотном диапазоне 100–1 000 Гц.

Возможные пути преодоления квантового предела, связанные с изменением самой измерительной процедуры, – переход к QND. Вопрос о «квантово-состоятельных» QND, наблюдаемых в общем виде, изучен. Было показано, что такими наблюдаемыми являются интегралы движения квантовой системы. Операторы этих наблюдаемых интегралов коммутируют сами с собой в различные моменты времени, а неопределенность начального состояния редуцирует к нулю в результате первого квантового измерения. Этот рецепт явился важным индикатором практических схем QND-измерений.

Лазерные интерферометры на подвесных зеркалах в диапазоне частот, заметно превышающих маятниковую частоту подвесок, рассматриваются как ГВ-детекторы на свободных пробных массах. Для свободной массы зеркала квантово-механическим интегралом движения является ее импульс. Понимание этого факта стимулировало поиск QND регистратора состояния пробной массы как измерителя ее скорости, то есть это должен быть спидометр, или «speed meter».

Комбинированный интерферометр Саньяка – Майкельсона здесь выступает как QND-измеритель скорости, понижая порог квантового предела чувствительности с фактором $\Omega\tau_{\text{arm}} < 1$, где Ω – частота гравитационно-волнового сигнала (типичный диапазон 10^2 – 10^3 Гц для действующих ГВ-детекторов); τ_{arm} – время обхода комбинированного контура. В комбинированном интерферометре с системами рециркуляции света в портах накачки (вход) и сигнала (выход) прогнозируемая чувствительность ГВ-детекторов в топологии Саньяка – Майкельсона для проектов «Телескоп Эйнштейна» и «Вояджер» должна быть на уровне $3 \cdot 10^{-25} \text{ Гц}^{-1/2}$ в полосе принимаемых частот 70–00 Гц, что находится в рамках проектных заданий.

8. Предложен метод совместного анализа данных гравитационного детектора ОГРН и нейтринного телескопа БПСТ с целью объединенного (двухканального) поиска коллапсирующих объектов в Галактике, что повышает вероятность правильного обнаружения и находится в русле современной тенденции мультисканальной астрономии. Задача формулировалась как уточнение стратегии параллельных наблюдений на ОГРН и БПСТ для фильтрации сигналов коллапсаров. Требовалась конкретизация схемы анализа данных при совместном поиске нейтрино-гравитационных корреляций. Конечной целью являлся выход на режим непрерывного мониторинга (nu-gw) событий на детекторах БПСТ и ОГРН.

Вид нейтринного сигнала, сопровождающего процесс коллапса массивной звезды, обсуждался неоднократно. Наиболее активная фаза процесса развивается за короткое время порядка единиц секунд. На кривой светимости нейтрино имеется большой начальный пик и следующие за ним более слабые пики, отвечающие излучению при отскоках

в процессе монотонного сжатия звезды. Существуют также сценарии многоступенчатого коллапса с присутствием нейтринных импульсов на более длинных временных интервалах порядка 20 с. В связи с этим разумно исследовать алгоритмы совместной регистрации событий, в которых пачки нейтринных импульсов значимо коррелируют во времени с выбросами (сигналами) гравитационного детектора. Фактически подобный алгоритм был использован при обработке нейтрино-гравитационных данных, полученных при вспышке сверхновой SN 1987A.

В таком подходе реперными точками считаются моменты t_k появления «нейтринных сигналов» БПСТ на «подозрительных наблюдательных интервалах» в 20 с, фиксирующих аномально повышенную скорость счета «нейтринного фона». Далее на тех же временных интервалах исследуются сигналы (выбросы) гравитационного детектора ОГРАН. Априори предполагается, что гравитационные выбросы могут опережать (или преследовать) нейтринные сигналы (метки). Для модели ГВ-излучения в виде цуга конечной длительности момент появления гравитационного всплеска оценивается как $t_k + \tau$ с некоторым сдвигом между нейтринными и гравитационными событиями. Задача заключается в обнаружении корреляции между регистрируемыми пачками нейтрино и гравитационными сигналами. На выходе детектора ОГРАН они представляются суммой k импульсов, возникших на интервале наблюдения на фоне гауссова шума $n(t)$. Упрощенный вариант модели содержит также предположение о равенстве длительностей отдельных импульсов и универсальности сдвигов запаздывания между гравитационными и нейтринными сигналами. Кроме того, возникшие нейтрино-гравитационные события считаются независимыми. Тогда логарифмы отношений правдоподобия отдельных событий складываются. Критерий максимума отношения правдоподобия удобно применить в нашем случае, поскольку его математический аппарат хорошо разработан для задач обнаружения на фоне гауссова шума. В частности, известно, что для узкополосного нормального шума логарифм отношения правдоподобия пропорционален квадрату огибающей выходного сигнала ОГРАН – $R(t)$ для одного импульса и сумме квадратов огибающих для пачки импульсов. Процедура получения решения, то есть «регистрация наличия корреляции», соответствует отысканию максимума интегрального отношения правдоподобия или «достаточной статистики» D при вариации временного сдвига между нейтрино-гравитационными событиями. Для расчета требуется знание функции распределения достаточной статистики D . Принимая во внимание, что при гауссовом шумовом фоне достаточная статистика подчиняется «хи-квадрат» распределению, для которого интегральная плотность вероятности хорошо известна, статистические ошибки обнаружения могут быть рассчитаны.

Указанный алгоритм, кроме расчета вероятности наличия корреляции, дает также оценку запаздывания нейтринного сигнала относительно гравитационного (сдвиг потоков, соответствующий максимуму) и тем самым оценку массы по-

кой нейтрино (при световой скорости ГВ). Полное описание алгоритма есть в работе, опубликованной в [17].

Следует, однако, заметить, что предлагаемый алгоритм является упрощенной схемой первого приближения. В частности, он ограничен предположениями, что рассматриваемые пуассоновские потоки однородны (с постоянной средней частотой следования импульсов), как однородно и запаздывание между нейтринными и гравитационными сигналами.

Модель, в которой поток нейтринных сигналов имеет переменную во времени среднюю частоту следования импульсов, по-видимому, будет более адекватной физике работы БПСТ в режиме «поиск коллапсаров». Однако это заметно усложнит расчеты статистических характеристик обнаружения такой схемы.

9. Завершена обработка данных регистрации низкочастотных геофизических деформаций приливного типа на гравитационных лазерных интерферометрах с подвесными зеркалами. Реализована новая методика измерения взаимного углового отклонения отвесных линий зеркал больших интерферометров. При этом происходит автоматическая фильтрация гравитационных возмущений из общего деформационного фона. Метод является абсолютно оригинальным. По измерениям, выполненным на интерферометре VIRGO, дана оценка верхней границы колебаний внутреннего земного ядра [18].

Итог исследований на гравитационном интерферометре VIRGO по плану проекта:

1) Экспериментально доказана возможность использования лазерного гравитационно-волнового интерферометра VIRGO в качестве геофизического прибора (двухкоординатного тензометра) за счет сигналов в цепях управления положением зеркал пробных масс.

2) Впервые выполнена реконструкция приливной деформации с использованием 3-километрового интерферометра с подвесными зер-

калами и плечами, ориентированными по параллельным и меридиональным направлениям. Полученные спектры подтверждают теорию прилива (показана возможность корректного восстановления относительных амплитуд основных приливных гармоник S2, M2, S1, M1, зарегистрированных в плечах интерферометра). Большие абсолютные значения приливных смещений (150–200 мкм) позволяют в принципе достичь высокого разрешения при наблюдении деталей спектров.

3) Для интерферометра VIRGO получены теоретические оценки отношения сигнал/шум, необходимые для обнаружения слабых гравитационных возмущений, вызванных колебаниями внутреннего ядра Земли. На основе тренда данных наблюдательного цикла VSR-2 проведен поиск следов трансляционной моды внутреннего ядра. Экспериментально установлен верхний предел амплитуды этого эффекта.

4) На принципиальном уровне доказана возможность использования установки VIRGO в качестве нового геофизического прибора «углового гравитационного градиентометра». Он может измерять чистые гравитационные возмущения производной вектора силы тяжести вдоль поверхности геоида. Таким образом, новый инструмент является дополнением к геодезическим инструментам для отклонения отвесной линии. Разработана схема компенсации деформационной составляющей во взаимном угле подвесов переднего и концевых зеркал.

10. Проведены измерения интегральных оптических характеристик ФП-резонаторов (на пилотной модели ОГАН) при охлаждении до гелиевых температур с зеркалами на подложках различных оптических материалов. Сделан вывод о преимуществе подложек фторида кальция. Результаты опубликованы в [19]. Выполнены тестовые эксперименты с криогенной моделью ОГАН азотной температурой [20].

Эксперименты выполнялись с оптическими резонаторами Фабри – Перо в вакууме при низких температурах. Зеркала наносились на подложки из различных оптических материалов. Использовался инфракрасный лазер с длиной волны 1.064 мкм. Мощность накачки в максимуме могла достигать 450 мВт. Эволюция оптических свойств ФП-резонатора прослеживалась в диапазоне температур от 300 до 10 °К. Основными измеряемыми параметрами были интегральные характеристики резонаторов ФП – резкость (Финесс) и контрастность интерференции. Испытывались три типа подложек: ситалл – оптическое стекло со сверхнизким тепловым расширением (аналог ULE), сапфир и фторид кальция. При охлаждении наблюдалась деградация интегральных характеристик резонатора ФП для ситалловых зеркал из-за потери свойств материала, для сапфировых зеркал из-за эффекта двулучепреломления. Показано удовлетворительное постоянство интегральных характеристик резонаторов ФП на фториде кальция CaF_2 во всем исследованном диапазоне температур.

Зеркала на фториде калия использовались далее в тестовом эксперименте с пилотной моделью ОГАН для проверки гипотезы о возможности повышения чувствительности оптоакустической гравитационной антенны до уровня 10^{-20} – 10^{-21} при охлаждении ее акустического звена до температуры жидкого азота. Схема оптической и электронной частей эксперимента соответствовала схеме установки ОГАН.

Параметры криогенной пилотной модели: масса ~50 кг, длина ~50 см, акустическая добротность 8 000, резкость ФП эталона ~ 10^3 , мощность оптической накачки 0.2 Вт. Модель подвешивалась в вакуумной камере, окружалась активно охлаждаемой медной оболочкой, образуя простейший азотный криостат.

При охлаждении тела детектора до температуры ~78 °К акустическая добротность на частоте продольной моды ~4 кГц увеличилась до 90 000, то есть более чем на порядок относительно неохлажденного детектора. Можно прогнозировать, что для большого детектора она увеличится со 150 тысяч при комнатной температуре до полутора миллионов при азотной температуре. Ожидается, что эта цифра еще возрастет за счет снижения потерь в креплениях зеркал к детектору. Позитивным результатом эксперимента с прототипом криогенной модели следует считать подтверждение пригодности зеркал из фторида кальция для охлаждаемых вариантов оптоакустической гравитационной антенны. За несколько часов сеанса измерений (и при его повторении) не наблюдалось существенного ухудшения резкости и контрастности охлаждаемого резонатора ФП на детекторе.

Заключение

Заканчивая изложение исследований выполненных по данному проекту, сделаем несколько замечаний.

Приведены оригинальные результаты, связанные с уникальной гравитационно-волновой антенной ОГАН. Инструментально это измеритель высокочастотных (кило-

герцы) вариаций гравитационного градиента, которые могут иметь как астрофизическое, так и геофизическое происхождение. Конструкция представляет комбинацию акустического и оптического резонаторов с лазерной накачкой. Подобные установки создавались в мировых лабораториях, но после первой регистрации гравитационного излучения от сливающихся двойных релятивистских звезд уступили место длиннобазовым лазерным интерферометрам на подвесных зеркалах как более широкополосным приемникам гравитационных волн. С точки зрения техники прецизионной оптической интерферометрии антенна ОГРАН во многом близка к известным гравитационным антеннам LIGO и VIRGO и использует ряд ключевых приемов, разработанных для этих антенн (например, технику захвата рабочих режимов Паунда – Дривера – Холла). Чувствительность ОГРАН ограничена тепловым броуновским шумом его акустической степени свободы. Тем не менее, ОГРАН остается полезным гравитационным детектором пригодным для регистрации всплесков гравитационного излучения, порождаемых коллапсирующими звездами в нашей Галактике.

Другие ассоциированные с ГВ-астрономией результаты также оригинальны. Среди них измерения низкочастотных вариаций гравитационного градиента на интерферометре VIRGO, измерение сейсмо-гравитационных шумов в главной штольне БНО, разработка алгоритма поиска нейтрино-гравитационных корреляций на детекторах ОГРАН и БПСТ, измерения характеристик оптических резонаторов при охлаждении до гелиевых температур. Возможность выполнения этих исследований обеспечивалась тесной связью с научными коллективами БНО ИЯИ РАН и VIRGO коллаборацией.

По вопросу об актуальности проведенных исследований можно заметить следующее.

Феномен первой регистрации всплеска гравитационно-волнового излучения от сливающихся двойных черных дыр (ЧД) наземными антеннами – оптическими интерферометрами на подвесных пробных массах-зеркалах (установки LIGO и VIRGO) открыл новый канал астрофизической информации о Вселенной и может считаться началом гравитационно-волновой астрономии. За короткий период 2015–2020 гг. был зарегистрирован еще ряд слияний двойных черных дыр, в том числе тремя ГВ детекторами с улучшенной оценкой локализации источника, а затем двойных нейтронных звезд. Наконец, зафиксированы слияния, сопровождавшиеся параллельно гравитационным и электромагнитным (гамма-) излучениями, что позволило установить скорость распространения гравитации, равной скорости света, что является наглядной демонстрацией продуктивности идеи «мультиканальной астрономии».

На текущий момент научные работы в этом направлении достаточно хорошо организованы с планом на ближайшие годы. Общая стратегия функционирования международных групп и проспект исследований до 2030 г. изложены в документе [21].

Возвращаясь к задачам установки ОГРАН, заметим, что все известные регистрации относятся к сигналам слияния релятивистских двойных космических объектов. Между тем существенный интерес представляет регистрация ГВ-излучения, сопровождающего гравитационный коллапс. Эта проблема является одной из центральных в упомянутых выше программах.

Гравитационный коллапс (ГК) с образованием сверхплотного остатка, горячей нейтронной звезды и сбросом внешней оболочки относится к явлениям сверхновых первого типа (1a). Такой объект будет источником нейтрино (антинейтрино) с энергией отдельной частицы порядка 10–15 МэВ. От него прогнозируется также выход всплесков гравитационного излучения. Параллельная регистрация нейтринного и гравитационно-волнового сигналов, кроме самого подтверждения теории коллапса, позволила бы установить еще и тип релятивистского излучателя. Даже при отсутствии оптической вспышки (коллапс без сброса оболочки) параллельное детектирование «нейтрино-гравитационных потоков» от одного и того же объекта означало бы регистрацию редкого события – явления коллапса в Галактике.

Основным научным направлением данного проекта, поддержанного грантом РФФИ, являлось как раз использование установки ОГРАН для детектирования коллапсирующих звезд в галактике Млечный Путь. Однако по своим возможным приложениям установка ОГРАН мультидисциплинарная, поскольку с ее помощью возможно получение новых знаний в следующих областях: астрофизики (уточнение физических процессов в коллапсе), ядерной физики (уточнение уравнений состояния нейтронных звезд, природы нейтринных всплесков) и геодинамики (описание динамических процессов внутренней земли, эффектов сейсмоакустики, гравитационных (ньютоновских) возмущений).

Литература

1. J. Weber
Phys. Rev. Lett., 1968, **20**, 1307.
DOI: 10.1103/PhysRevLett.20.1307.
2. B.P. Abbott, R. Abbot, T.D. Abbot et al.
Phys. Rev. Lett., 2016, **116**, 061102.
DOI: 10.1103/PhysRevLett.116.061102.
3. B.P. Abbott, R. Abbot, T.D. Abbot et al.
Phys. Rev. Lett., 2017, **116**, 241103.
DOI: 10.1103/PhysRevLett.116.241103.
4. M. Punturo
Class. Quantum Grav., 2010, **27**, 084007.
DOI: 10.1088/0264-9381/27/8/084007.
5. LSC
LIGO Document T1500290-v3, Instrument Science White Paper 2015. (<https://dcc.ligo.org/public/0120/T1500290/003/T1500290.pdf>).
6. B.B. Кулагин, А.Г. Полнарев, В.Н. Руденко
ЖЭТФ, 1986, **91**(5), 1553.
7. В.Б. Бразинский
УФН, 1965, **86**(3), 433. DOI: 10.3367/UFNr.0086.196507e.0433.
8. A.V. Gusev, V.V. Kulagin, V.N. Rudenko
Grav. Cosmol., 1996, **2**(1), 68.
9. S.N. Bagaev, L.B. Bezrukov, N.L. Kvashnin, V.A. Krysanov, S.I. Oreshkin, A.M. Motylev, S.M. Popov, V.N. Rudenko, A.A. Samoilenko, M.N. Skvortsov, I.S. Yudin
Rev. Sci. Instrum., 2014, **85**, 065114.
DOI: 10.1063/1.4883901.
10. Ситалл оптический CO-115M. (<https://www.lzos.ru/products/steklokristallicheskie-materialy-s-nizkim-koeffitsientom-tklr/sitall-opticheskiy-so-115m>).
11. V.N. Rudenko, Yu.M. Gavriluk, A.V. Gusev, D.P. Krichevskiy, S.I. Oreshkin, S.M. Popov, I.S. Yudin
Int. J. Mod. Phys. A, 2020, **35**, Nos.2&3, 2040007–1.
DOI: 10.1142/S0217751X20400072.
12. V.N. Rudenko, N.L. Kvashnin, A.A. Lugovoi, S.I. Oreshkin, S.M. Popov, A.A. Samoilenko, M.N. Skvortsov, I.S. Yudin
Phys. At. Nucl., 2020, **83**, 12, 1682.
DOI: 10.1134/S1063778820110071.
13. Y.M. Gavriluk, A.V. Gusev, N.L. Kvashnin, A.A. Lugovoi, S.I. Oreshkin, S.M. Popov, N.V. Rudenko, V.V. Semenov, I.A. Syrovatskiy
Phys. At. Nucl., 2022, **85**, 9, 1557. DOI: 10.1134/S1063778822090113.
14. L. Naticchioni, N. Iudochkin, V. Yushkin, E. Majorana, M. Perciballi, F. Ricci, V. Rudenko
Eur. Phys. J. Plus, 2022, **137**, 124.
DOI: 10.1140/epjp/s13360-021-02317-8.
15. V. Rudenko, S. Andrusenko, D. Krichevskiy, G. Manucharyan
J. Phys. Conf. Ser., 2021, **2081**, 012011.
DOI: 10.1088/1742-6596/2081/1/012011.
16. В.Н. Руденко, С.И. Орешкин, К.В. Руденко
УФН, 2022, **192**(9), 984. DOI: 10.3367/UFNr.2021.12.039128.
17. S. Andrusenko, Yu. Gavriluk, A. Gusev, D. Krichevskiy, S. Oreshkin, S. Popov, V. Rudenko
Universe, 2022, **8**(9), 446. DOI: 10.3390/universe8090446.
18. A.V. Gusev, E. Majorana, V.N. Rudenko, V.D. Yushkin
Int. J. Mod. Phys. D, 2020, **29**(7), 2050050.
DOI: 10.1142/S0218271820500509.
19. M.V. Kuvshinskii, S.I. Oreshkin, S.M. Popov, V.N. Rudenko, I.S. Yudin, V.V. Azarova, S.V. Blagov
Appl. Sci., 2019, **9**(2), 230. DOI: 10.3390/app9020230.
20. N.N. Kvashnin, M.V. Kuvshinskii, S.I. Oreshkin, S.M. Popov, V.N. Rudenko, M.N. Skvortsov, I.S. Yudin, S.V. Blagov
Phys. At. Nucl., 2017, **80**(10), 1606. DOI: 10.1134/S1063778817100039.
21. LSC
The LSC-Virgo-KAGRA Observational Science White Paper (Summer 2021 edition). (<https://dcc.ligo.org/public/0177/T2100289/005/OBS-WP21-public.pdf>).

English

Search for Gravitational Signals of Collapsing Objects in the Galaxy*

Valentin N. Rudenko

Professor,

Sternberg Astronomical Institute, Moscow State University
13, room 8, Universitetsky Ave., Moscow, 119234, Russia
valentin.rudenko@gmail.com

Andrei V. Gusev

Sternberg Astronomical Institute, Moscow State University
13, room 8, Universitetsky Ave., Moscow, 119234, Russia
avg@sai.msu.ru

Nikolai L. Kvashnin

Institute of Laser Physics, SB RAS
15B, Ac. Lavrentiev Ave., Novosibirsk, 630090, Russia
knl@laser.nsc.ru

Sergei M. Popov

Sternberg Astronomical Institute, Moscow State University
13, room 8, Universitetsky Ave., Moscow, 119234, Russia
serg@sai.msu.ru

Sergei I. Oreshkin

Sternberg Astronomical Institute, Moscow State University
13, room 8, Universitetsky Ave., Moscow, 119234, Russia
sioresh@yahoo.com

Abstract

Monitoring of pulsed disturbances of the ground background of the gravitational gradient generated by both astrophysical and intra-terrestrial cataclysms was performed. The main goal was to register bursts of gravitational radiation from relativistic catastrophes in the Galaxy, as well as hidden explosive processes of the internal terrestrial structures. Experimental studies were carried out using the OGRAN optoacoustical gravitational antenna, the VIRGO gravitational interferometer and auxiliary seismic equipment in the main

tunnel of the BNO INR RAS. Measurements of the balance of acoustic, optical and electronic noises of the OGRAN antenna in relation to the noise of the environment were performed. Measurements of the seismic background in the main tunnel of the BNO in the low-frequency range from 0.1 Hz to 10 Hz were carried out. The processing of long-term measurements of low-frequency gravity gradient disturbances on the VIRGO laser gravitational interferometer with a 3 km base was completed. A majorizing estimate of the magnitude of disturbances for oscillations of the inner Earth's core was obtained. The set of problems solved in this project demonstrates its multidisciplinary nature, providing new knowledge in the fields of: astrophysics (refining the physical processes during stellar mergers and collapses), nuclear physics (refining the equations of state of neutron stars) and geodynamics (processes of the inner earth and seismoacoustics).

Keywords: gravitational-wave detectors, multimessaging astronomy.

**The work was financially supported by RFBR (project 19-29-11010).*

Images ●

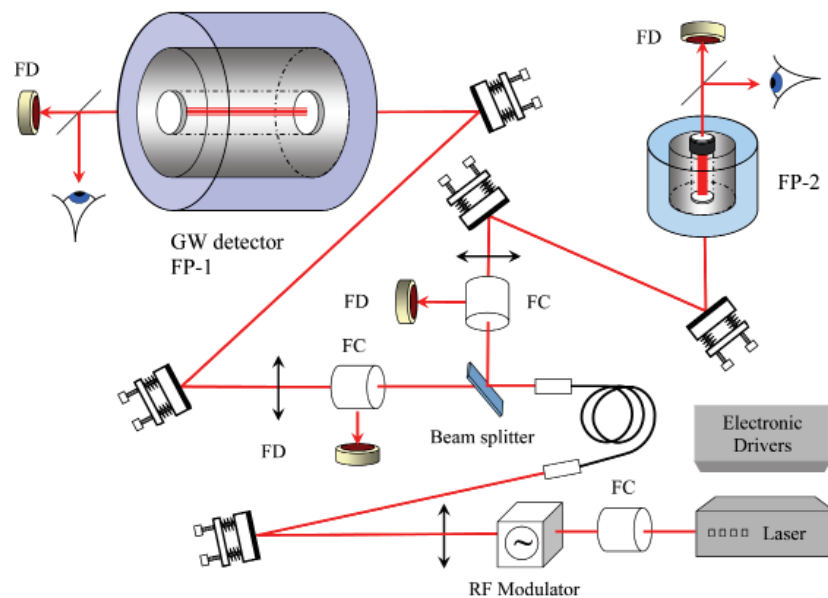


Fig. 1. Diagram of the OGRAN setup. The following notations are used on the figure: FP-1 u FP-2 – Fabri – Perrot interferometers formed by the mirrors attached to the ends of the gravity detector (GW detector FP-1) and the reference standard (FP-2) located in vacuum chambers; FC – Faraday cells; FD – photodetectors; RF modulator – 10.7 MHz phase modulator of laser pumping. The “eye” depicts the cameras controlling the mode composition of the laser radiation.

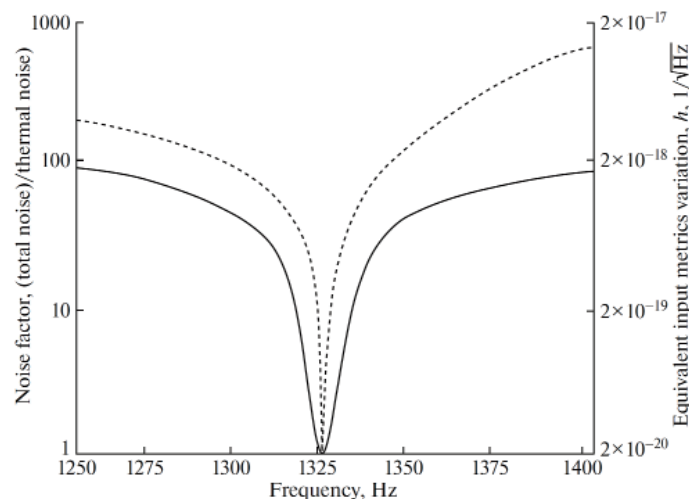


Fig. 2. Sensitivity of the OGRAN setup after modernization in variation of the space metric units.

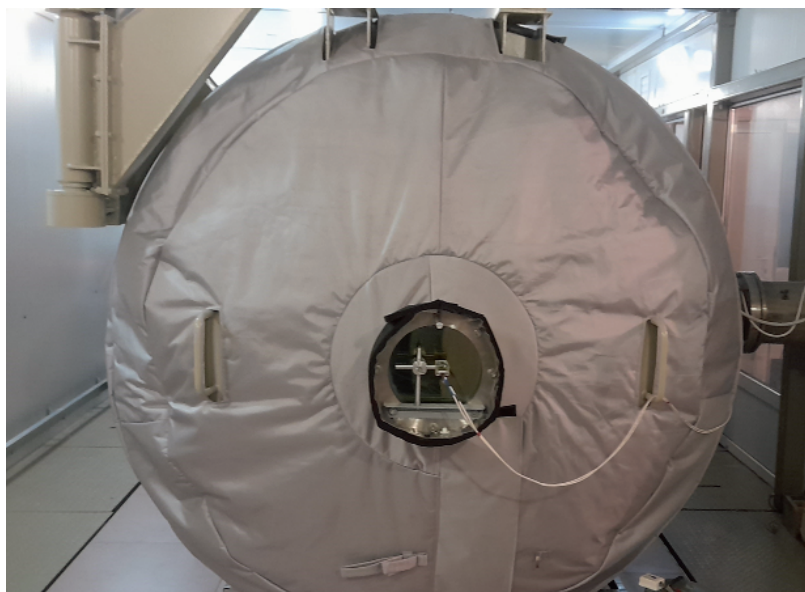


Fig. 3. Heated thermal cover for the vacuum chamber of the gravitational wave detector.

References

1. J. Weber
Phys. Rev. Lett., 1968, **20**, 1307.
DOI: 10.1103/PhysRevLett.20.1307.
2. B.P. Abbott, R. Abbot, T.D. Abbot et al.
Phys. Rev. Lett., 2016, **116**, 061102.
DOI: 10.1103/PhysRevLett.116.061102.
3. B.P. Abbott, R. Abbot, T.D. Abbot et al.
Phys. Rev. Lett., 2017, **116**, 241103.
DOI: 10.1103/PhysRevLett.116.241103.
4. M. Punturo
Class. Quantum Grav., 2010, **27**, 084007.
DOI:10.1088/0264-9381/27/8/084007.
5. LSC
LIGO Document T1500290-v3, Instrument Science White Paper 2015.
(<https://dcc.ligo.org/public/0120/T1500290/003/T1500290.pdf>).
6. V.V. Kulagin, A.G. Polnarev, V.N. Rudenko
JETP, 1986, **64**(5), 915. (http://jetp.ras.ru/cgi-bin/dn/e_064_05_0915.pdf).
7. V.B. Braginskii
Sov. Phys. Usp., 1966, **8**, 513.
DOI 10.1070/PU1966v008n04ABEH002989.
8. A.V. Gusev, V.V. Kulagin, V.N. Rudenko
Grav. Cosmol., 1996, **2**(1), 68.
9. S.N. Bagaev, L.B. Bezrukov, N.L. Kvashnin, V.A. Krysanov, S.I. Oreshkin, A.M. Motylev, S.M. Popov, V.N. Rudenko, A.A. Samoilenko, M.N. Skvortsov, I.S. Yudin
Rev. Sci. Instrum., 2014, **85**, 065114. DOI: 10.1063/1.4883901.
10. Optical glass ceramic [Sitall opticheskiy SO-115m] (in Russian).
(<https://www.lzos.ru/products/steklokristallicheskie-materialy-s-nizkim-koeffitsientom-tklr/sitall-opticheskiy-so-115m/>).
11. V.N. Rudenko, Yu.M. Gavriluk, A.V. Gusev, D.P. Krichevskiy, S.I. Oreshkin, S.M. Popov, I.S. Yudin
Int. J. Mod. Phys. A, 2020, **35**, Nos.2&3, 2040007–1.
DOI: 10.1142/S0217751X20400072.
12. V.N. Rudenko, N.L. Kvashnin, A.A. Lugovoi, S.I. Oreshkin, S.M. Popov, A.A. Samoilenko, M.N. Skvortsov, I.S. Yudin
Phys. At. Nucl., 2020, **83**, 12, 1682. DOI: 10.1134/S1063778820110071.
13. Y.M. Gavriluk, A.V. Gusev, N.L. Kvashnin, A.A. Lugovoy, S.I. Oreshkin, S.M. Popov, N.V. Rudenko, V.V. Semenov, I.A. Syrovatskiy
Phys. At. Nucl., 2022, **85**, 9, 1557. DOI: 10.1134/S1063778822090113.
14. L. Naticchioni, N. Iudochkin, V. Yushkin, E. Majorana, M. Perciballi, F. Ricci, V. Rudenko
Eur. Phys. J. Plus, 2022, **137**, 124.
DOI: 10.1140/epjp/s13360-021-02317-8.
15. V. Rudenko, S. Andrusenko, D. Krichevskiy, G. Manucharyan
J. Phys. Conf. Ser., 2021, **2081**, 012011.
DOI: 10.1088/1742-6596/2081/1/012011.
16. V.N. Rudenko, S.I. Oreshkin, K.V. Rudenko
Phys.-Usp., 2022, **65**(9), 920. DOI: 10.3367/UFNe.2021.12.039128.
17. S. Andrusenko, Yu. Gavriluk, A. Gusev, D. Krichevskiy, S. Oreshkin, S. Popov, V. Rudenko
Universe, 2022, **8**(9), 446. DOI: 10.3390/universe8090446.
18. A.V. Gusev, E. Majorana, V.N. Rudenko, V.D. Yushkin
Int. J. Mod. Phys. D, 2020, **29**(7), 2050050.
DOI: 10.1142/S0218271820500509.
19. M.V. Kuvshinskii, S.I. Oreshkin, S.M. Popov, V.N. Rudenko, I.S. Yudin, V.V. Azarova, S.V. Blagov
Appl. Sci., 2019, **9**(2), 230. DOI: 10.3390/app9020230.
20. N.N. Kvashnin, M.V. Kuvshinskiy, S.I. Oreshkin, S.M. Popov, V.N. Rudenko, M.N. Skvortsov, I.S. Yudin, S.V. Blagov
Phys. At. Nucl., 2017, **80**(10), 1606.
DOI: 10.1134/S1063778817100039.
21. LSC
The LSC-Virgo-KAGRA Observational Science White Paper (Summer 2021 edition).
(<https://dcc.ligo.org/public/0177/T2100289/005/OBS-WP21-public.pdf>).