

## Гравитационно-волновой эксперимент в России

В.Н. Руденко

*Дан краткий обзор экспериментальных работ по детектированию гравитационного излучения внеземного происхождения, выполненных в России с конца 1960-х годов. Представлены различные аспекты этой тематики, включая эксперименты с резонансными детекторами, геофизические методы регистрации низкочастотных гравитационных волн, высокочастотные схемы гравитационного "опыта Герца". Описана текущая ситуация, связанная с оригинальным оптоакустическим гравитационным детектором ОГРАН, установленным в подземной лаборатории Баксанской нейтринной обсерватории Института ядерных исследований РАН. Обсуждается перспектива создания большебазового гравитационно-волнового интерферометра на территории России, интегрированного в мировую сеть гравитационных антенн.*

**Ключевые слова:** гравитационно-волновой эксперимент, регистрация гравитационных волн, гравитационные детекторы

PACS numbers: 04.30. – w, 04.80.Nn, 95.55.Ym

DOI: <https://doi.org/10.3367/UFNr.2016.11.038088>

## Содержание

1. Введение (892).
  2. От предсказаний к эксперименту (892).
  3. Поиск совпадающих сигналов (894).
  4. Детектирование низкочастотных гравитационно-волновых сигналов (896).
  5. Высокочастотное излучение (898).
  6. Оптоакустическая гравитационная антенна (900).
  7. Заключение (902).
- Список литературы (904).

## 1. Введение

Первая регистрация гравитационно-волнового сигнала от слияния двойной, образованной двумя чёрными дырами с массами порядка 30 масс Солнца, с расстояния в 400 Мпк явилась знаковым событием, подтвердившим реальность надежд на гравитационно-волновую астрономию как новый уникальный канал информации в нашем познании Вселенной [1]. Величина сигнала, зарегистрированного детекторами LIGO (Laser Interferometer Gravitational Wave Observatory), составила  $h \approx 10^{-21}$  по безразмерной амплитуде гравитационной волны (или вариации пространственной метрики на геометрическом языке) при средней несущей частоте 150 Гц.

По форме сигнал укладывался в хрестоматийный портрет так называемого чирпа — радиоцуга с изменяющейся несущей и тремя характерными фазами: скручивание (insprial), слияние (merging) и релаксация (ring down). До конца 2016 г. были зарегистрированы ещё два подоб-

ных сигнала, но с меньшей амплитудой [2]. Естественно, такое достижение породило новый всплеск активности вовлечённых в эту область исследований научных коллабораций и отдельных групп с выдвиганием ряда предложений по новым долгосрочным проектам детекторов повышенной чувствительности, таких как Einstein Telescope [3], Voyager и Cosmic Endeavour [4].

В состав коллаборации LSC (LIGO Scientific Collaboration) вошли также две российские группы, из Московского государственного университета (МГУ) им. М.В. Ломоносова (В.Б. Брагинский и его сотрудники с физического факультета) [5] и из Института прикладной физики (ИПФ) РАН<sup>1</sup> (А.М. Сергеев, Е.А. Хазанов и др.) [6], которые являлись ответственными за отдельные конструктивные узлы установок LIGO, и они по праву разделяют общий успех.

В данной статье, однако, мы хотим напомнить историю развития проблемы поиска гравитационных волн от космических объектов, которая началась, по грубой оценке, более 50 лет тому назад и в которой российской науке принадлежала весьма заметная роль на первом этапе. Здесь следует подчеркнуть существенное стимулирующее влияние ведущих учёных Отделения общей физики и астрономии Академии наук (АН) СССР В.Л. Гинзбурга и Я.Б. Зельдовича и Отделения ядерной физики АН СССР А.А. Логунова и М.А. Маркова, которые были убеждёнными сторонниками и инициаторами проведения гравитационно-волновых экспериментальных исследований, — благодаря двум последним учёным работы по гравитационным детекторам стали развиваться в Баксанской нейтринной обсерватории (БНО) Института ядерных исследований (ИЯИ) РАН на Северном Кавказе.

## 2. От предсказаний к эксперименту

Предсказав существование гравитационных волн (ГВ) в работе [7] 1916 г., Эйнштейн сам усомнился в возможности их практической регистрации. Выполненный им расчёт простейшего генератора гравитационной вол-

**В.Н. Руденко.** Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова,

Государственный астрономический институт им. П.К. Штернберга, Университетский просп. 13, 119992 Москва, Российская Федерация; Институт ядерных исследований РАН, просп. 60-летия Октября 7а, 117312 Москва, Российская Федерация E-mail: [rvn@sai.msu.ru](mailto:rvn@sai.msu.ru)

Статья поступила 18 января 2017 г.

<sup>1</sup> В статье даны современные названия институтов.

ны — вращающегося стержня — дал ничтожно малый выход гравитационного излучения: при массе 500 т, длине 20 м и предельной (по разрыву) частоте вращения  $\omega \approx 30 \text{ рад с}^{-1}$  получалась оценка полной выходной мощности  $\sim 10^{-23} \text{ эрг с}^{-1}$ , что соответствовало, согласно геометрической интерпретации общей теории относительности (ОТО), искажению плоской метрики на относительную величину  $h \sim 10^{-35}$ . Возможность построить лабораторный детектор для такого слабого сигнала априори исключалась.

В то же время этот результат послужил стимулом для поисков источников гравитационных волн среди релятивистских астрофизических объектов, обладающих большими массами, сильными гравитационными полями и релятивистскими скоростями в моменты их космических катастроф. Соответственно, проблема регистрации таких источников сводилась к созданию достаточно чувствительной наземной антенны космического гравитационного излучения.

Практическая возможность построения подобных антенн появилась во второй половине XX в. благодаря быстрому развитию техники физического эксперимента, в том числе появлению атомных стандартов частоты, созданию инструментов прецизионных радиофизических и оптических измерений, орбитальных космических аппаратов, их радио- и оптической локации и др.

Советскими учёными проблема регистрации гравитационного излучения внеземного происхождения начинает обсуждаться примерно с 1960 г. С этого времени стали периодически проводиться Всесоюзные гравитационные конференции (по инициативе Научно-технического совета Министерства высшего и среднего специального образования СССР), на которых этой тематике уделялось серьёзное внимание. Первая конференция прошла в Москве летом 1961 г. на базе МГУ; одним из её главных организаторов был профессор физического факультета Д.Д. Иваненко. Накануне конференции была опубликована книга *Новейшие проблемы гравитации* [8] под редакцией Д.Д. Иваненко — сборник переводов статей из ведущих мировых журналов, в частности статей Ф. Бонди [9] и Дж. Вебера [10].

В теоретических работах Бонди (по-видимому, впервые) рассматривался приёмник гравитационного излучения в виде двух пробных масс, соединённых пружиной, так называемая осциллирующая гантель, которая в последующем стала эквивалентной схемой (моделью) всех резонансных твердотельных детекторов ГВ. Такая структура отвечает основной специфической черте ГВ-воздействия на окружающую среду: его квадрупольному (или приливному) характеру — следствию принципа эквивалентности, которому подчиняется гравитация, а также факту отсутствия отрицательных масс (гравитационного отталкивания).

В оригинальной работе Дж. Вебера [10] (позднее появилась его монография [11]) была представлена теория взаимодействия гравитационного излучения с резонансным детектором, дана оценка отклика детектора на монохроматическую волну заданной интенсивности, а также показана нереальность лабораторного опыта Герца с резонансным (механическим) детектором и передатчиком (инвертированный детектор) и предложена методика регистрации космических ГВ-сигналов по схеме выделения совпадающих откликов пространственно разнесённых детекторов.

В России в это же время появились работы, предлагавшие электромагнитный принцип детектирования ГВ. В статье М.Е. Герценштейна и В.И. Пустовойта [12]

в качестве детектора рассматривался оптический интерферометр Майкельсона. Основным мотивом авторов [12] было стремление увеличить эффективность воздействия гравитационной волны на приёмник, заменив нерелятивистское пробное тело — механическую осциллирующую гантель Бонди–Вебера — релятивистским объектом, а именно светом в оптическом интерферометре. В радиофизике подобная идея известна как условие согласования приёмника с излучением (требование сравнимости длины волны с эффективным размером приёмника). Веберовский механический детектор при лабораторных размерах, очевидно, был сильно не согласован с длиной гравитационной волны в килогерцевом диапазоне частот.

Используя уравнения ОТО, авторы [12] рассчитали отклик интерферометра (смещение полос интерференции) как эквивалентное изменение оптического показателя преломления среды (вакуума) в плечах интерферометра. Для гравитационного излучения двойных звёзд отклик продолжал оставаться ничтожно малым. Оценить возможность его регистрации объективно авторы [12] не могли ввиду недостаточной развитости методов прецизионных оптических измерений в то время.

Другим замечательным вкладом российской науки явилась работа М.Е. Герценштейна [13] по резонансной конверсии бегущей гравитационной волны в электромагнитную при наличии постоянного магнитного поля. Указанный эффект немедленно ассоциировался с задачей регистрации гравитационного излучения далёких звёзд. Гравитационная волна, проходя до наземного приёмника сквозь магнитное поле Галактики (межзвёздной среды), должна была рождать и "тащить за собой", постоянно усиливая, когерентную электромагнитную волну, которую можно было бы регистрировать чувствительным электромагнитным приёмником (например, радиотелескопом в сверхвысокочастотном (СВЧ) диапазоне). Позднее вышла работа Я.Б. Зельдовича [14], посвящённая "обратному эффекту Герценштейна", т.е. генерации ГВ электромагнитным излучением в сильном магнитном поле. Вместе эти работы позволили в дальнейшем вернуться к проблеме лабораторного гравитационного опыта Герца на новой основе (см. раздел 5).

Веберу также принадлежит идея [8, 11] использования Земли как резонансного детектора на квадрупольных модах с системой регистрации в виде распределённой сети гравиметров и сейсмографов, размещённых на земной поверхности. Это, конечно, совсем другой частотный диапазон: низшая квадрупольная мода Земли имеет период около 54 мин и добротность  $\approx 400$ . В этой области частот при участии Вебера был сконструирован высокочувствительный гравиметр [15, 16] и экспериментально установлен первый верхний предел плотности потока гравитационного излучения космического происхождения — порядка  $10^8 \text{ эрг с}^{-1} \text{ см}^{-2} \text{ Гц}^{-1}$  для частоты  $\omega \sim 10^{-3} \text{ рад с}^{-1}$  [14], который потом несколько раз пересматривался, в том числе советскими учёными. Сам по себе этот предел не был значимым, поскольку существенно превосходил теоретические оценки наземной мощности гравитационного излучения от двойных звёзд в Галактике.

Селективный список наиболее интересных в этом отношении двойных был дан в обзоре В.Б. Брагинского [17]. Более детальный анализ гравитационного излучения от галактического населения двойных систем позднее провёл В.И. Мироновский [18], обнаружив спектральный пик на удвоенной частоте обращения двойных звёзд типа звезды W Большой Медведицы (W Ursae Majoris —

WUMa) (орбитальный период около 8 ч). Спектральная амплитуда пика в максимуме достигала  $10^{-19}$  Гц<sup>1/2</sup> в терминах метрических вариаций или порядка  $10^{-8}$  эрг с<sup>-1</sup> см<sup>-2</sup> по плотности наземного потока энергии.

Обзор В.Б. Брагинского [17] фактически явился информационной заявкой по образованию на физическом факультете МГУ научной группы, имевшей целью создание наземных детекторов гравитационного излучения внеземного происхождения. В обзоре [17], в частности, была высказана идея (позднее развитая в монографии [19]) о том, что эти детекторы должны являться приёмниками параметрического типа с внешней высокоэнергетической накачкой, которая модулируется внешним (гравитационно-волновым) возмущением. Реакция подобных детекторов на гравитационную волну может быть значительно более сильной, чем у преобразователей пассивного типа (без внешней накачки). Лазерные интерферометры LIGO и Virgo служат примерами детекторов такого типа.

### 3. Поиск совпадающих сигналов

Сенсацией 1968 г. явились публикации Вебера о наблюдении совпадающих импульсных сигналов (возбуждений) на двух резонансных гравитационных детекторах [20], пространственно разнесённых вначале на сравнительно небольшое расстояние (2 км), но затем на вполне значимое — от Чикаго до Мэриленда, около 1000 км. В России тем человеком, который быстро осознал значение происходящего и активно отреагировал, был Яков Борисович Зельдович, собравший по этому случаю возглавляемую им группу теоретиков из Института прикладной математики (ИПМ) РАН и группу экспериментаторов В.Б. Брагинского из МГУ. По мнению Зельдовича, произошло знаковое событие фундаментального характера, которое могло означать начало пути к новому каналу получения астрофизической информации: гравитационно-волновой астрономии. Поэтому следовало безотлагательно включиться в этот процесс с двух сторон: 1) в разработку теоретических вопросов, касающихся гравитационно-волновой астрофизики (источники ГВ-излучения, их свойства и параметры сигналов); 2) в создание эффективных наземных приёмников ГВ. Самым первым шагом должны были стать анализ и проверка результатов опыта Вебера. Здесь Яков Борисович инициировал написание короткой (в качестве быстрой реакции) статьи [21], в которой, однако, содержались существенные выводы, повлиявшие на дальнейшее развитие ГВ-эксперимента (термин, введённый для всех экспериментов по поиску ГВ).

Во-первых, было показано, что сигналы, зарегистрированные в опытах Вебера, не могут быть результатом ГВ-воздействия. Их амплитуда и так называемая частота появления противоречат по энергетическим потерям принятому времени жизни Галактики (и Вселенной в целом). Реалистичной для источника в центре Галактики может быть амплитуда ГВ (метрических вариаций), не превышающая  $10^{-18}$ , что противоречит оценке сигналов в опытах Вебера  $10^{-16}$ .

Во-вторых, эффективными импульсными источниками могут быть только релятивистские (сверхплотные) звёзды в катастрофические моменты их эволюции: рождения как остатка сверхновой, слияния релятивистской двойной и сферически-асимметричных коллапсов. Более подробно реакция резонансного веберовского детектора на типичные сигналы: короткий "резонансный цуг", т.е.

"цуг с меняющейся частотой" (или чирп-сигнал в современной трактовке), "видеовсплеск" (с длительностью, равной периоду несущей) — была рассчитана в последующей работе [22], где также была подчеркнута существенная роль высокой добротности детектора для успешной регистрации ГВ. В качестве источников непрерывного сигнала были указаны нейтронные звёзды (только что открытые пульсары), однако вероятность их регистрации детекторами веберовского типа признавалась малой. Фактически в ранней работе [22] в значительной мере уже была сформулирована программа поиска гравитационного излучения внеземного происхождения с ориентацией на конкретные типы источников, которая до сих пор не утратила актуальности. Не было упомянуто только одно весьма амбициозное сегодня направление поиска, а именно детектирование реликтового ГВ-фона как следа Большого взрыва расширяющейся Вселенной, подобного реликтовому микроволновому электромагнитному фону, но отделившемуся от первородной плазмы на существенно более ранних временах. Очевидно, однако, что на относительно грубом уровне чувствительности, который тогда обсуждался, об этом трудно было даже мечтать.

Малая интенсивность ожидаемых ГВ-возмущений заставляла обращаться к методам оптимальной фильтрации — области, в которой отечественной наукой и техникой был уже накоплен значительный опыт, отражённый в обширной научной литературе по разработкам в задачах радиолокации и дальней космической связи. Теперь всё это можно было распространить на регистрацию и фильтрацию ГВ-сигналов. Первым таким примером явилась рекомендация для веберовской антенны по выделению импульсных возмущений с длительностью, много меньшей времени релаксации детектора. Оптимальным являлся переход от измерения амплитуды отклика к измерению его производной (или к "разностному звену"), что и было предложено в работах [23, 24]. В общем случае выбор конкретного алгоритма фильтрации теоретически определялся априорной информацией о характере сигналов. Это стимулировало постановку и анализ различных модельных задач по астрофизическим ГВ-излучателям. Зельдович считал правдоподобной такую модель скопления сверхплотных звёзд (нейтронных или чёрных дыр) в центре Галактики, которая позволяла дать детальный прогноз интенсивности, спектра и частоты появления ГВ-всплесков [25]. Временная структура ГВ-всплесков (форма импульса), в частности, была рассчитана в работе [26]. Известная форма импульсов давала в свою очередь возможность использовать алгоритм согласованной линейной фильтрации (matching filtering), который впоследствии стал основным при поиске сигналов от сливающихся двойных. При ссылке на этот алгоритм все работы по анализу данных гравитационных антенн в то время цитировали монографию Вайнштейна и Зубакова [27].

В конце 1960-х годов группа Я.Б. Зельдовича из ИПМ РАН продолжала активную работу над теорией астрофизических источников. Результаты, которые включали в себя важную оценку коэффициента конверсии в гравитационное излучение полной массы-энергии участвующих в космической катастрофе компонентов (этот коэффициент мог достигать 1%), вошли в монографию [28]. Опираясь на эту оценку, можно было сформулировать общий, но достаточно надёжный прогноз наземного фона астрофизических ГВ-всплесков [29]. Амплитуда короткого цуга длительностью  $\tau$  с квазирезонансной несущей,  $\omega \sim \omega_0$ , содержащего единичное число колебаний,

$\omega t \sim 1$ , могла достигать величины метрических вариаций  $10^{-19}$  Гц $^{-1/2}$  при вероятности генерации источником в центре Галактики  $p \sim 10^{-2}$  (частота вспышек сверхновых на галактику), т.е. такой цуг представлял собой достаточно редкое событие. Более интересная частота, до нескольких событий в год, прогнозировалась для волн с гораздо меньшей амплитудой,  $h \sim 10^{-21}$ , от источников, находящихся на том же расстоянии, что и созвездие Девы,  $\sim 15$  Мпк. Такова была теоретическая основа ГВ-эксперимента, построенная с середины 1970-х годов усилиями отечественной школы.

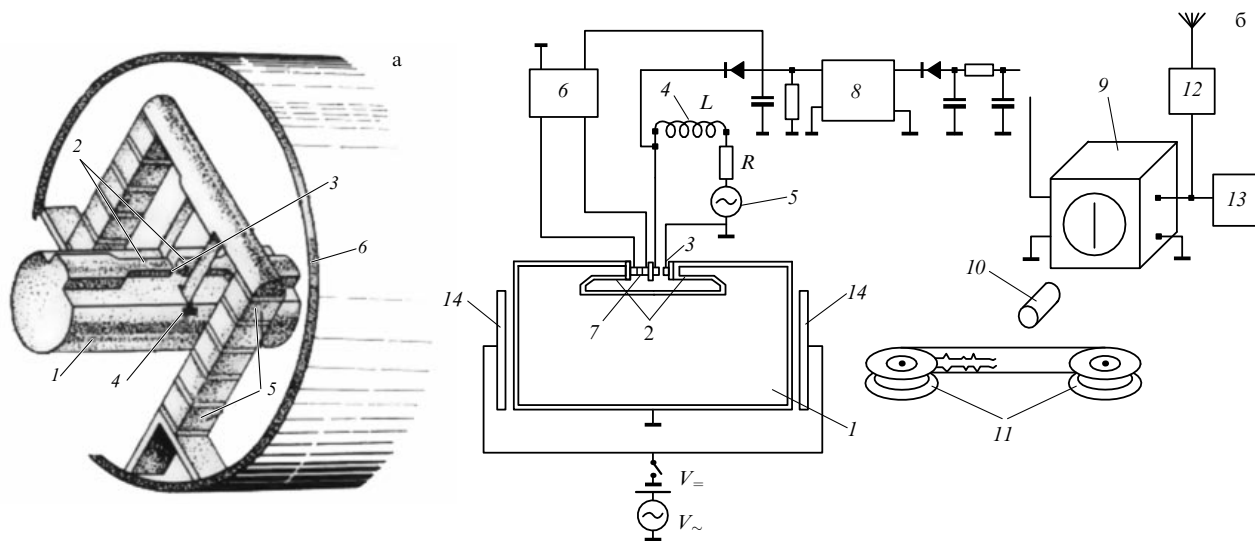
Первые экспериментальные шаги в эти же годы были сделаны группой В.Б. Брагинского из МГУ совместно с Институтом физики Земли (ИФЗ) РАН (отдел гравинерциальных приборов Е.И. Попова). Был повторён "поиск совпадающих сигналов" на антеннах веберовского типа, разнесённых на расстояние около 30 км [30]. Параметры твердотельных (из дюрала) резонансных детекторов были близки к веберовским, однако система регистрации отличалась от веберовской. Была реализована идея параметрического преобразователя (датчика) с внешней накачкой. Для этого акустическим резонаторам (болванкам) был придан специфический профиль с горизонтальными консолями на поверхности цилиндров (рис. 1). Между консолями устанавливались пластины ёмкостного датчика, включённого в радиофизический колебательный контур. Малый рабочий зазор ( $\approx 0,1$  см) удерживался следящей системой с тепловым драйвером (управляемый нагрев), т.е. это была антенна с активным удержанием "рабочей точки" (явившаяся предтечей современных гравитационных интерферометров, охваченных обратными связями). Кроме увеличенного коэффициента электромеханического преобразования (за счёт амплитуды электромагнитной накачки контура), такая конструкция обладала повышенной защищённостью от космических лучей (прямого воздействия на датчик потоков заряженных частиц) по сравнению с конструкцией Вебера, в которой использовалось пьезокристаллическое покрытие поверхности болванки. Впоследствии такая

"русская антенна" ввиду наличия консолей ("рогов") получила название "Улитка" (Snail).

Наблюдения на паре таких детекторов в течение нескольких месяцев показали отсутствие значимых совпадающих откликов с амплитудой  $\sim 10^{-16}$  [30–32], в противоположность экспериментам Вебера, в которых фиксировалось до пяти событий в месяц [20]. Отсутствие регистрации значимых откликов соответствовало теоретическому анализу [21, 22], прогнозирующему разумный уровень астрофизических ГВ-сигналов, не превышающий  $h \sim 10^{-18}$ . Все большие сигналы имеют либо техногенное, либо в лучшем случае геофизическое происхождение. Аналогичные подтверждения пришли из США [33, 34], Италии [35] и Англии [36], итоговый обзор представлен в [37]. Таким образом, в середине 1970-х годов остро встал проблема увеличения чувствительности гравитационных антенн по меньшей мере на два-три порядка по метрическим вариациям.

Поскольку чувствительность твердотельных ГВ-антенн принципиально ограничена тепловым (броуновским) шумом акустического резонатора, необходимо глубокое охлаждение резонатора (до температур жидкого гелия и меньших). Было предложено два пути достижения этой цели. Первый — прямое ("лобовое") решение проблемы посредством создания больших криостатов, допускающих охлаждение массивных металлических болванок (массой 2–5 т) до температур ниже 1 К [38, 39]. Такой техники на момент выдвижения идеи в физических лабораториях не было. Её требовалось разработать, используя принцип "рефрижераторов растворения"  $^3\text{He}$  в  $^4\text{He}$ , что являлось весьма дорогостоящим предприятием. Наибольшего успеха в такой разработке добились итальянские группы [40], построив два детектора в Италии и один в ЦЕРНе [41].

Второй, оригинальный и менее затратный, путь, предложенный российской группой [42], был связан с использованием диэлектрических болванок с умеренной массой, но с повышенной акустической добротностью. Как следует из формулы для предельной чувствительно-



**Рис. 1.** (а) Общий вид гравитационного детектора: 1 — алюминиевый цилиндр-детектор, 2 — консольные стержни — "рога", 3 — место крепления измерительной ёмкости датчика смещений, 4 — крепление лент типа "ласточкин хвост", 5 — антисейсмический фильтр, 6 — вакуумная камера. (б) Блок-схема измерительной системы: 1 — алюминиевый цилиндр, 2 — "рога", 3 — измерительная ёмкость, 4 — индуктивность контура ёмкостного датчика, 5 — кварцевый генератор накачки, 6 — следящая система, 7 — управляющий элемент следящей системы — электрическая печь, 8 — узкополосный усилитель, 9 — двухлучевой осциллограф, 10 — объектив, 11 — лентопротягивающий механизм, 12 — приёмник радиосигналов точного времени, 13 — кварцевый генератор меток времени (кварцевые часы), 14 — система калибровки.

сти [42], ограниченной только броуновскими колебаниями резонансного детектора, минимальная регистрируемая величина метрических вариаций пропорциональна следующей комбинации ключевых параметров детектора:  $h_{\min} \sim (T/MQ)^{1/2}$ . Одно и то же значение этой комбинации может быть достигнуто при охлаждении до  $T \sim 1$  К больших масс,  $M \sim (2-5) \times 10^6$  г, при умеренной добротности,  $Q \sim 10^6$ , либо существенно меньших масс,  $M \sim 10^4$  г, но при большой добротности,  $Q \sim 10^8-10^9$ . Добротностью такого уровня для колебаний продольной моды обладали цилиндрические образцы из рубина и сапфира, специально выращиваемые для лазерных резонаторов.

В совместных экспериментах МГУ и Института кристаллографии (ИК) РАН для подобных образцов сапфира была достигнута рекордно высокая добротность:  $5 \times 10^9$  [43, 44]. Изготовление и эксплуатация суперкристала для вполне лабораторных масс  $\sim 10^4$  г не представлялись неподъемной проблемой. Для превращения в детектор образец должен был быть подвергнут обработке и профилированию для сдвига его резонансной частоты в область  $\sim 1$  кГц.

К сожалению, эта программа в дальнейшем не получила развития, частично из-за начавшегося дефицита финансирования Академии наук в конце 1980-х годов, но главным образом из-за смещения акцента в развитии гравитационных антенн в сторону большебазовых лазерных интерферометров. Напротив, европейская программа криогенных детекторов была доведена до конца: её история представлена в недавнем обзоре одного из её лидеров Гвидо Пицеллы [41]. Здесь можно отметить, что в качестве сенсора на криогенных антеннах использовался сквид (от англ. SQUID — Superconducting Quantum Interference Device) постоянного тока как современный вид параметрического датчика с самонакачкой на сверхвысокой джозефсоновской частоте,  $\sim 10^{10}$  Гц [38], т.е. были реализованы идеи В.Б. Брагинского по эффективному преобразованию ГВ-возмущения в электромагнитную форму [19]. Теория применения квантовых магнитометров (сквидов) на криогенных резонансных ГВ-детекторах была представлена также в отечественных работах [45, 46].

#### 4. Детектирование низкочастотных гравитационно-волновых сигналов

Идея Вебера об использовании Земли как резонансного детектора [10, 11] на квадрупольных модах также имела продолжение. Следует упомянуть работу Буха и Куна [47], в которой по результатам сейсмических и гравиметрических наблюдений за шумовым уровнем земных квадрупольных мод были уточнены оценки спектральной плотности ГВ-фона в частотной области  $10^{-3}-10^{-4}$  Гц. Эти оценки в лучшем случае оказывались на уровне  $10^6-10^8$  эрг  $\text{с}^{-1} \text{см}^{-2} \text{Гц}^{-1}$ , т.е. несколько меньшими веберовской оценки.

Отечественной научной школой была выдвинута альтернативная программа сейсмографического детектирования всплесков гравитационного излучения в более высокочастотном диапазоне (0,01–1,0 Гц) [48]. Отчасти это направление было стимулировано работой Ф. Дайсона [49], в которой обсуждалась возможность детектирования ГВ-излучения от пульсаров с помощью наземных сейсмографов в случае благоприятной локальной геологии. Интригующим фактором послужили также сообщения (позднее не подтвердившиеся) об экспериментальной сейсморегистрации возбуждений на пульсарных

частотах зарубежными [50] и отечественными [51] группами исследователей.

Решающим мотивом, однако, явилась теория блочного строения земной коры, развитая школой М.А. Садовского в ИФЗ РАН [52]. Согласно этой теории тектоническая подоснова земной коры имеет не монолитный характер, а является разбитой на отдельные блоки (зоны повышенной плотности) со среднестатистическим размером 50–100 км. При скорости звука  $\sim 3$  км  $\text{с}^{-1}$  такой блок может рассматриваться как резонансный гравитационный детектор с частотой  $\sim 0,01$  Гц и типичной добротностью  $\sim 500$ . Сенсором (датчиком), регистрирующим колебания такого детектора, должен быть чувствительный сейсмограф. Знаменательно также, что именно в этой частотной зоне имеется провал спектральной плотности сейсмического шума (понижение более чем на порядок на кривой Петерсона [53]). Кроме того, астрофизический прогноз ожидаемых ГВ-всплесков из космоса с понижением частоты становится более благоприятным. В частности, для интервала 0,1–0,01 Гц предсказывались всплески с амплитудой  $h \sim 10^{-16}-10^{-17}$  [54].

Данная программа была реализована в работе [55]. Использовались алгоритмы оптимальной фильтрации сигналов сейсмической антенной решётки, разработанные ранее в [56]. Базовыми данными явились полугодовые записи шести сейсмографов из сети Teggscope в южной Калифорнии (отечественных данных в оцифрованном виде в тот период было недостаточно). Модель Земли, требуемая для расчётов, выбиралась согласно работе [57], но с трансляцией (предельным переходом) на более высокий частотный интервал от модовых частот. Учитывались индивидуальные координаты каждого сейсмографа при фильтрации коррелированной части шума. Результаты оказались следующими: значимых низкочастотных ГВ-возбуждений на уровне метрических вариаций  $h \sim 10^{-14}$  не было обнаружено. Данная экспериментальная оценка соответствует амплитуде сейсмосмещений  $\sim 10^{-8}$  см и плотности потока ГВ-излучения  $\sim 10^8$  эрг  $\text{с}^{-1} \text{см}^{-2} \text{Гц}^{-1}$ . Экспериментальная оценка оказалась на два порядка грубее оптимистического астрофизического прогноза  $h \sim 10^{-16}$ , но на порядок лучше предшествующей оценки Дайсона [49]. Очевидно, что дальнейший прогресс в решении данной задачи может быть связан с использованием глобальной сети сейсмографов и большей длительностью наблюдений.

Данные сейсмостанций в Москве и в Обнинске тоже привлекались, но по другому поводу — для поиска аномальных возбуждений во время феномена сверхновой 1987А. Здесь имеется в виду сенсационное обнаружение коррелированных нейтринных сигналов в конце февраля 1987 г. сразу на четырёх подземных нейтринных телескопах: IMB (Irvine–Michigan–Brookhaven) (США), Kamiokande (Япония), Mont Blanc Laboratory (Италия) и БНО ИЯИ РАН, — совпавших по времени со вспышкой сверхновой в Большом Магеллановом Облаке ( $\sim 52$  кпк) [58]. Было заявлено также об обнаружении "совпадающих всплесков" на резонансных гравитационных детекторах без охлаждения в Риме и Мэриленде [59]. Таким образом, имело место редкое для Галактики событие — "релятивистская космическая катастрофа", — сопровождавшееся мультисканальной регистрацией излучений по оптическому, нейтринному и, как казалось, гравитационному каналам. Сейчас подтверждённым считается только детектирование коррелированных нейтринных всплесков, т.е. имела место первая регистрация нейтрино от коллапса. Скрупулёзный апостериорный анализ "совпа-

дений" по записям гравитационных детекторов породил сомнения в их надёжности [60, 61].

В процессе критического рассмотрения этого события привлекались разные контрольные тесты, в том числе тест на наличие реакции сейсмодатчиков, коррелированной с сигналами резонансных гравитационных детекторов. Эта работа была выполнена совместно группой из Государственного астрономического института им. П.К. Штернберга (ГАИШ) МГУ и ИФЗ РАН [62]. Использовались данные сейсмообсерватории в Обнинске и сейсмостанции "Москва". Была найдена значимая корреляция с датчиками в Обнинске, но со станцией "Москва" корреляция отсутствовала, что не позволило однозначно интерпретировать эффект. Дополнительным тестом стали проверка ориентации совместной диаграммы направленности детекторов в Риме и Мэриленде на Магеллановы Облака в момент подозрительных "гравитационных совпадений". Хотя анализ, проведённый в работе [63], дал положительный результат (направленность имела место), это не устраняло других серьёзных противоречий. Тем не менее случай с SN 1987A имел непреходящее значение как первый пример мультисканальной регистрации релятивистской катастрофы, указавший на необходимость развития алгоритмов совместного анализа данных различных наблюдательных инструментов и положивший тем самым начало развитию так называемой *всесигнальной астрономии* (multi-messenger astronomy).

Выше отмечено, что сейсмодетектирование ГВ было привлекательным, поскольку использовались "естественные антенны" на низких частотах, на которых астрофизический прогноз давал возрастающую интенсивность ожидаемых ГВ-всплесков. Это послужило мотивом для поиска способов понижения частоты твердотельных детекторов посредством изменения их конфигурации, перехода от продольных мод к поперечным, профилирования и др. Так появились "рамочные" и "дисковые" детекторы с собственными частотами порядка 100 Гц. В этом направлении наибольшего успеха добились японские группы. В стремлении расширить диаграмму направленности для увеличения зон небесного покрытия (области видимых источников ГВ-сигналов) разрабатывался сферический детектор как всенаправленный резонансный приёмник. Описание и анализ детекторов этих типов, так же как и ссылки на оригинальные публикации, можно найти в монографии [64].

Из отечественных проектов интересно отметить маятниковый вариант резонансного квадрупольного детектора на кварцевых (монокристаллических) маятниковых подвесках с большой добротностью для поиска излучения пульсаров на частотах  $\sim 1$  Гц, впервые предложенный в работе [65] и затем более детально разработанный в [66]. Общий вид конструкции этого детектора представлен на рис. 2. В монокристаллическом блоке сформированы концевые маятники на ленточных подвесках с собственной частотой, подбираемой под конкретный пульсар, с ёмкостным параметрическим датчиком колебаний в зазорах между массами маятников  $m$  и блоком. Общие сейсмические возмущения в такой конструкции компенсированы. Тепловые шумы подавляются благодаря высокой акустической добротности кварца (несколько десятков миллионов). Расчётная чувствительность могла бы достигать  $h \sim 10^{-20}$  при линейном размере блока (базы)  $l = 10$  м.

Данный проект, однако, не был реализован. Несмотря на использование низкочастотных маятниковых подвесок, он относился к категории резонансных узкополос-

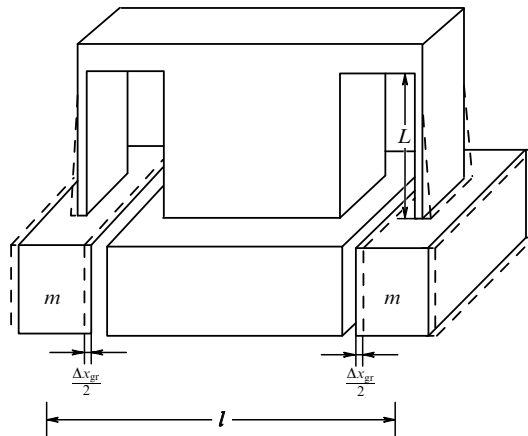


Рис. 2. Низкочастотный гравитационный детектор для регистрации ГВ-излучения пульсаров ( $\sim 1$  Гц) на двух резонансных высокодобротных маятниках [65].

ных детекторов. Переход к широкополосному приёмнику был возможен при отказе от работы на резонансной частоте и компенсации потерь в коэффициенте преобразования за счёт сильного увеличения базы детектора. При этом требовалось принципиальное изменение системы регистрации колебаний, к чему авторы проекта в то время не были готовы.

Фактически такой переход был осуществлён в первых предложениях [12] и пилотных моделях лазерных интерферометрических гравитационных детекторов [67] (регистрация по оптической интерферометрии). Справедливо ради следует сказать, что идея "свободных пробных масс" в этих работах не высказывалась, она появилась позднее в работе Р. Вайса [68] вместе с идеей многократных отражений  $N$  между массами-зеркалами интерферометра для эффективного увеличения оптической длины:  $L_{\text{eff}} = NL_0$ . Понятно, что большая база даёт возможность регистрировать меньшие деформации при той же величине измеряемых абсолютных смещений зеркал, т.е.  $h = \Delta L/L_{\text{eff}} \rightarrow 0$  при  $L_{\text{eff}} \rightarrow \infty$ . Однако эффективная база всё же является ограниченной и не может превзойти половины длины гравитационной волны без потери самого эффекта "накопления отклика", или нарушения приближения "медленности движений" зеркал. На частотах, заметно превышающих маятниковую частоту масс-зеркал 0,1–1,0 Гц, последние могут рассматриваться как свободные, что обеспечивает широкополосность построенного на них детектора. Для коротких воздействий (всплесков), содержащих лишь несколько периодов несущей частоты, потеря возможности "резонансного" усиления отклика незначительна. Сам метод регистрации отклика с помощью когерентной лазерной интерферометрии не только не уступает по ряду характеристик методам, используемым в других радиофизических измерительных устройствах, включая криогенные, но и превосходит их.

Эти качества "антенны на свободных массах" очевидным образом подчёркивали её преимущество перед твердотельными резонансными детекторами, и лишь одно — необходимость прецизионного удержания рабочей точки в середине полосы интерференции — являлось сдерживающим обстоятельством, делающим неясной перспективу надёжной реализации такой антенны. Однако успешная демонстрация пилотного 40-метрового прототипа в Калифорнийском технологическом институте

[69] в начале 1980-х годов сняла основные вопросы, и большой проект LIGO получил финансирование в начале 2000-х годов. Как упоминалось во введении, группы с физического факультета МГУ и из ИПФ РАН присоединились к этому проекту.

Между тем группа ГАИШ МГУ вместе с ИЯИ РАН активизировали работы в БНО. Был построен и запущен лазерный 100-метровый деформограф геофизического назначения в штольне Главная [70, 71] как предварительная ступень на пути к ГВ-интерферометру (на начальном этапе в этих работах участвовала группа из Государственного оптического института им. С.И. Вавилова [72]). Далее был разработан промежуточный проект ЛИНГАН-100 (аббр. от "Лазерный интерферометр гравитационных волн Академии наук") [73, 74]. В нём предлагалось создание лазерного ГВ-интерферометра комбинированного типа (Майкельсон–Фабри–Перо) с чувствительностью  $h \sim 10^{-21}$  в полосе приёма 100–1000 Гц при подземном размещении в имеющихся туннелях БНО. К сожалению, экономическая ситуация конца 1990-х не позволила добиться финансирования такого проекта.

В этих условиях группа ГАИШ, имея рабочие контакты с проектами ТАМА-300 (Национальная астрономическая обсерватория Японии) и Virgo (Национальный институт ядерной физики (INFN) (Италия) и Национальный центр научных исследований (CNRS) (Франция)), исследовала проблему регистрации гравитационными интерферометрами низкочастотных сигналов как астрофизического, так и геофизического происхождения. Было выдвинуто оригинальное предложение использовать интерферометр на подвесных зеркалах как угловой градиентометр наземного гравитационного поля [75]. Идея состояла в прецизионном измерении вариаций относительного угла двух отвесных линий (подвесок зеркал), разнесённых на большое, 3–4 км, расстояние. При этом репером служит сам лазерный луч. Если источник луча (лазер) тоже подвешен (injection bunch), то такая система реагирует только на гравитационные возмущения (вариации вектора силы тяжести) и фильтрует деформации (продольные и наклонные). Более детально такая возможность исследована в работах [76, 77] применительно к специфике конструкции интерферометра Virgo, имеющего благоприятный тип подвесок (сводящийся к "однонитевой" конфигурации), который допускает осуществление амбициозной программы по измерению колебаний внутреннего земного ядра (как побочного продукта функционирования ГВ-интерферометра). Прямое высокоточное измерение приливных деформаций инструментом Virgo было выполнено группой ГАИШ совместно с группой INFN (из отделения в Пизе) через "сигнал ошибки" в цепях обратных связей, удерживающих рабочий режим инструмента [78].

Возможность регистрации низкочастотных гравитационных сигналов исследовалась также на интерферометре LIGO. Экспериментально было обнаружено, что "след" медленных приливных вариаций присутствует на основном "сигнальном" выходе интерферометра (дифференциальный выход деструктивной интерференции) в виде модуляции гармоники на частоте межмодового интервала плеч интерферометра Фабри–Перо (ФП) [79]. Поскольку длина плеч удерживается с высокой точностью цепями обратных связей, этот эффект выглядел интригующе: казалось, имеет место непосредственное измерение релятивистского эффекта гравитационного смещения частоты электромагнитного (ЭМ) луча, или эквивалентное гравитации изменение показателя пре-

ломления вдоль плеч [80]. Однако более тщательное исследование, выполненное группой ГАИШ, показало, что причиной служит остаточная деформация плеч, меньшая точности их удержания  $10^{-12}$  м [81]. Тем не менее возможность использования канала на частоте межмодового интервала (частота циркуляции фотонов в ФП-плечах) для регистрации низкочастотных гравитационных волн и слабых геофизических возмущений до сих пор продолжает обсуждаться [82].

## 5. Высокочастотное излучение

Как упоминалось, частотный диапазон гравитационно-волновых лазерных интерферометров ограничен сверху,  $\omega \leq \omega_{\max}$ , условиями накопления сигнала и "медленности движений". Однако существует специальный режим, в котором возможен когерентный приём для частот, превышающих  $\omega_{\max} \sim 10^5$  рад  $\text{с}^{-1}$ . Оригинальной работой, впервые обратившей внимание на такую возможность, была работа Л.П. Грищука [83], в которой рассматривалось ускорение пробных частиц (шаров) в пространстве между двумя упруго отражающими поверхностями в поле падающей гравитационной волны. Было показано, что при специальном условии резонанса, когда частота ГВ кратна частоте циркуляции шаров между поверхностями, имеет место монотонное ускорение шаров за счёт энергии гравитационной волны.

В статье [84] эта идея была применена к фотонам в оптическом интерферометре ФП, где отмечалась зависимость эффекта от направления падения монохроматической ГВ на интерферометр, что даёт в принципе возможность определения этого направления. Наконец, ГВ-интерферометр в полной конфигурации при указанном условии "гравитационно-оптического резонанса" был проанализирован в работе [85] с помощью расчёта спектральных полос (зон) высокочастотного приёма. Тестирования этого режима на установках LIGO и Virgo пока не проводилось, главным образом в связи с нетривиальной проблемой существования самих высокочастотных астрофизических источников ГВ-излучения. Некоторые соображения на эту тему можно найти в статье [86], однако каких-либо конкретных источников с известными координатами в настоящее время указать не удаётся.

Тем не менее высокочастотное гравитационное излучение рассматривалось достаточно активно в связи с анализом возможности выполнения лабораторного опыта Герца на гравитационных волнах.

Дж. Вебер [10, 11] рассматривал связь генератор–приёмник гравитационного излучения на основе вынужденных резонансных акустических колебаний твердотельного пьезоэлектрического образца (цилиндрической формы) с размерами  $l \sim d \sim (0,5–1)$  м и характерной частотой  $\sim 10^4$  Гц. Он нашёл, что для амплитуды колебаний на пороге разрушения образца генерируемая мощность достигает  $10^{-13}$  эрг  $\text{с}^{-1}$ , что много меньше возможной чувствительности детектора, которая достигает лишь до  $\sim 10^{-3}$  эрг  $\text{с}^{-1}$ . Российскими учёными неоднократно пересматривались вычисления Вебера и делались попытки проведения реальных экспериментов.

Так, в работе [42] был оптимизирован механический (акустический) вариант гравитационного генератора в виде когерентного набора излучателей на частоте  $\sim 10^7$  Гц, ожидаемая ГВ-мощность которого была на два порядка больше:  $\sim 10^{-11}$  эрг  $\text{с}^{-1}$ . Однако согласовать этот уровень с возможностями резонансного акустического детектора, даже с подстановкой экстремаль-

ных значений параметров (добротность  $10^{14}$ , температура  $10^{-2}$  К) не удавалось. Предположение о том, что это можно сделать в связке электромагнитных (ЭМ) резонаторов СВЧ-диапазона, исследованное в работе [87], также не привело к успеху.

В 1970-е годы экспериментальные работы по реализации гравитационного опыта Герца выполнялись в Институте радиотехники и электроники (ИРЭ) АН СССР (ныне ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН) (группа М.Г. Голубцова) на основе магнитоэластичных материалов [88]. При этом использовался оригинальный подход. Понимание противоречия между стремлением к высокой частоте раскачки и сохранением условия акустического резонанса (для максимизации её амплитуды) привело к компромиссному решению — так называемому параметрическому растяжению длины акустической волны. За счёт преобразования частоты в ЭМ-резонаторе, содержащем нелинейный элемент — магнитоэластичный образец (генератор), к последнему прикладывалась раскачивающая сила, возбуждающая вынужденные колебания (однородно по объёму) с высокой частотой, но по форме совпадающие с основной поперечной модой. Простая раскачка высокочастотной силой возбудила бы моду высшего порядка, при которой соседние полуволновые участки дают взаимно компенсирующиеся вклады ГВ-излучения и эффективными оказываются только конечные области с существенно меньшей массой (что отмечалось ещё Вебером [10]). Таким образом, происходила бы параметрическая перекачка энергии низкочастотных акустических мод на высокие частоты в нелинейной магнитоэластичной среде.

Для детектирования ГВ-излучения предлагался обращённый вариант гравиакустомагнитного преобразователя. Была собрана пилотная модель установки на частоте  $\approx 100$  МГц (образец объёмом  $1 \text{ м}^3$  и массой  $\approx 10$  кг) (рассматривался вариант при  $T = 4,5$  К), которая исследовалась до середины 1980-х годов. Затем работы прекратились в связи с уходом лидеров.

В Объединённом институте ядерных исследований (ОИЯИ) (Дубна) развивался подход, основанный на взаимодействии бегущих волн (оптических, акустических и гравитационных) в нелинейной среде [89, 90]. Для того чтобы сохранить резонанс и амплитуду раскачки на высоких частотах, надо уменьшить размер и массу элементарных участвующих квадрупольей, перейдя в принципе на молекулярный уровень. При этом дефицит массы будет покрываться большим числом когерентно участвующих излучателей, вплоть до  $10^{22} - 10^{24}$  на  $1 \text{ см}^3$ . Причём следует выбирать молекулы (среды) с большим квадрупольным моментом. Среда должна быть сильнонелинейной (оптопьезоактивной), чтобы обеспечить взаимодействие оптических, акустических и гравитационных волн в процессе их распространения при условии соответствующего волнового синхронизма. А.Ф. Писарев и П.Н. Боголюбов предлагали [91] в качестве среды матричные кристаллы — искусственные образования, в частности растровёрнутый в аргоне молекулярный водород, переходящий в твёрдое состояние при температуре жидкого гелия. Прогнозируемый выход ГВ-генерации  $1 \text{ эрг с}^{-1}$  при мощности оптической накачки до  $1 \text{ ГВт}$  в импульсном режиме. Работы были начаты и развивались до 2000 г., но были остановлены в связи с экономическим кризисом.

Фактически предлагаемый принцип и методика эксперимента идеологически соответствуют цитируемым во введении работам М.Е. Герценштейна [13], Я.Б. Зельдовича [14], но перенесены из естественных астрофизиче-

ских условий в искусственно созданные лабораторные. К этому же типу герц-экспериментов относится проект Копвиллема и Нагибарова по использованию взаимодействия мощных световых (лазерных) лучей в оптически нелинейной среде [92].

Ещё одной, качественно новой, идеей, относящейся к лабораторной генерации гравитационного излучения, явилось предложение В.А. Белокопы по импульсной генерации ГВ в результате лазерных минивзрывов [93]. Поскольку мощность генерации  $P_g$  пропорциональна шестой степени частоты резонансных акустических колебаний или скорости звука в материале излучателя, следует искать среды с повышенной скоростью звука или добиваться этого искусственно, например за счёт взрывного сжатия мишени. При адиабатическом сжатии скорость звука  $v_s$  возрастает с увеличением плотности  $\rho$  как  $v_s \propto \rho^{1/3}$ , а излучаемая мощность — как  $P_g \propto \rho^2 v_s^6 = \rho^4$ . В этих предположениях рассматривается ГВ-излучение от мишени в виде мультислойного пирога (книги) из алюминиевой фольги, зажатого между встречными лазерными лучами. При большой мощности гигантское световое давление сжимает пластины, превращая их в высокоэнергетическую плазму, в которой ударные волны, многократно переотражаясь, рожают короткий импульс ГВ-излучения. Результат расчёта следующий. При мощности лазеров  $P \sim 1$  Вт скорость звука достигнет  $10^8 \text{ см с}^{-1}$ , а давление —  $10^{10} - 10^{11}$  атм. Мощность излучённого импульса составит  $P_g \sim 1$  Вт при его длительности  $10^{-10} - 10^{-11}$  с. Признавая оригинальность этого предложения, следует отметить, что нет ясности в том, каким детектором такое импульсное ГВ-излучение достаточно высокой мощности может быть зарегистрировано. До сих пор экспериментов такого рода не проводилось.

Заканчивая этот раздел, приведём результаты анализа гравитационного опыта Герца в оптическом диапазоне частот на основе эффекта Герценштейна–Зельдовича, проведённого в недавней работе [94]. Это представляет дополнительный интерес в связи с проектом детектора такого типа для регистрации реликтового ГВ-фона на оптических частотах [95].

Лабораторный генератор ГВ-излучения рассматривается согласно принципу прямого эффекта Герценштейна, т.е. интенсивная ЭМ-накачка (лазерный луч) проходит через область с сильным магнитным полем, в котором когерентно рождается гравитационная волна, распространяющаяся параллельно ЭМ-волне. На следующем этапе образовавшаяся гравитационная волна проходит зону сильного магнитного поля (лазерный луч отводится в сторону). При этом, по принципу обратного эффекта Герценштейна–Зельдовича, в этой зоне индуцируется слабая вторичная когерентная ЭМ-волна, которую можно зарегистрировать с помощью фотодетектирования. Такие прямые схемы рассматривались и ранее, но с негативным результатом — при разумных параметрах интенсивности накачки, величины магнитного поля, реалистичной геометрии (масштабе установки) и величины шумов фотоприёмника "состыковать" выход генератора с чувствительностью детектора не удавалось.

Для преодоления указанного затруднения была проведена принципиальная модификация структурной схемы. В зоне магнитного поля как генератора, так и детектора размещался высокодобротный оптический ФП-резонатор. Ставилась цель увеличить оптический путь в области взаимодействия волн накачки (в 1-й зоне) и сигнальной (ГВ) (во 2-й зоне) с магнитным полем, поскольку



величина эффекта генерации пропорциональна длине взаимодействия. Этот шаг требует специального обоснования, поскольку прямой и обратный конверсионные эффекты изначально были сформулированы для свободного пространства. На качественном уровне такое обоснование проведено в работе [94], но строгая аналитическая аргументация ещё ждёт своей разработки.

Другой принципиальной технической деталью является использование в детекторе ФП-резонатора с модулированной добротностью, которая резко выключается (убывает) по окончании времени наблюдения (измерения). Накопленная "сигнальная" ЭМ-энергия в виде короткого импульса поступает на фотодетектор и там регистрируется.

В [94] приведена только оценка возможной чувствительности регистрации на квантовом фоне вакуумного излучения. Технические характеристики ещё должны быть исследованы. Тем не менее на теоретическом уровне удаётся согласовать передатчик и приёмник ГВ при следующих значениях величин, входящих в расчёты: физическая длина (трубка) области взаимодействия  $L = 100$  м, напряжённость магнитного поля  $H = 10^5$  Гс (10 Тл), длина ЭМ-волны 1 мкм, резкость (fineness) ФП-резонаторов  $F = 10^8 - 10^9$ . При таких весьма экстремальных параметрах "состыковка" пары опыта Герца происходит на предельно малом уровне амплитуды ГВ,  $h \sim 10^{-31}$ , при времени накопления порядка нескольких суток. Такой уровень соответствует реликтовому ГВ-фону на оптических частотах в процессе параметрического усиления гравитонов на метрике расширяющейся Вселенной [96].

## 6. Оптоакустическая гравитационная антенна

Сложность работы в российской фундаментальной науке в конце XX в. – начале XXI в., помимо прочего, была связана с нарастающим дефицитом её финансирования. Особенно от этого страдала экспериментальная деятельность. Научная группа в любой стране, предлагая инициативный проект, должна учитывать реалистичность его экономической составляющей. Но в России этот фактор стал решающим для судьбы проекта. Причём требование фундаментальности, авантажности и мировой значимости ожидаемых результатов никто не отменял. Короче говоря, нужно было делать что-то "очень серьёзное за очень скромные деньги". Упомянутый в разделе 4 проект ЛИНГРАН этому условию не удовлетворял (хотя по мировым меркам он был неслыханно дешёвым: 5 млн долларов в течение пяти лет). В итоге к моменту открытия гравитационных волн мы не имеем даже собственного 100-метрового прототипа большебазового ГВ-интерферометра. На этом фоне создание оптоакустической установки ОГРАН с подземным размещением в БНО РАН следует рассматривать как относительный, но всё же очевидный экспериментальный успех.

Идея гравитационной антенны как воплощения некоторой комбинации принципов твердотельных резонансных детекторов и лазерных интерферометров на свободных массах обсуждалась в середине 1980-х годов. Её относительно законченная формулировка была представлена в работе [97], где анализировался веберовский детектор с закреплённым на его поверхности оптическим ФП-резонатором, питающимся от внешнего стабилизированного лазера. Масштаб обеих степеней свободы, акустической и оптической, предполагался одинаковым (зеркала ФП-резонатора фиксировались на торцах ци-

линдрического детектора), поэтому при расчёте реакции детектора на гравитационную волну следовало учитывать мультипликативный характер взаимодействия. Для детекторов с оптическим сенсором в виде мини-ФП-резонатора с микрометровым зазором, как в [98], этого не требовалось — сенсор являлся только датчиком акустических колебаний. В результате в комбинированном детекторе возникал сложный отклик, содержащий оптическую и акустическую компоненты, что в принципе должно было облегчить процедуру его фильтрации из шумового фона. Другим важным свойством такой конфигурации была малость обратного флуктуационного влияния оптической степени свободы на акустическую [17]. Это влияние проявлялось через флуктуации светового давления на зеркала интерферометра, которое становится критическим только при очень больших мощностях накачки (более 10 кВт). При средних значениях мощности накачки, порядка нескольких ватт, такое влияние пренебрежимо мало и можно наращивать коэффициент преобразования полезного сигнала, увеличивая амплитуду накачки. При этом также корневым образом должен снижаться уровень фотонного шума. В итоге оптическая (интерферометрическая) система регистрации является самой прецизионной на сегодняшний день, что доказано на практике установками LIGO, Virgo, в которых измеряются абсолютные смещения зеркал рекордно малого уровня — порядка  $10^{-16}$  см.

В комбинированной антенне уровень фотонного шума может быть настолько низким, что основным шумовым фоном становятся тепловые броуновские колебания акустического детектора (датчик выглядит идеальным регистратором). Здесь методы борьбы с шумами хорошо известны: требуются 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 нескольких герц вблизи резонансной частоты детектора. Интересно, что это сравнимо с чувствительностью криогенных твердотельных детекторов, но может быть достигнуто без глубокого охлаждения.

Расчёт конкретных параметров комбинированной антенны ОГРАН для её оптической и механической частей был выполнен в работе [99]. Выяснилось, что для необходимого снижения влияния оптического шума требуется весьма высокая резкость ФП-резонатора:  $F \geq 10^4$ , т.е. нужны высокорезонансные зеркала с ничтожно малым поглощением (не более нескольких ppm (parts per million)). Впоследствии такие зеркала были изготовлены для ОГРАН на оптическом предприятии Laboratoire des Matériaux Avancés (Лион, Франция).

Разработка ОГРАН как совместного проекта МГУ и Российской академии наук тремя институтами: ГАИШ МГУ, ИЯИ РАН и Институтом лазерной физики (ИЛФ) СО РАН, была начата в 2005 г. с конечной целью создания гравитационной антенны оригинальной конструкции при размещении её для долговременных наблюдений в подземных условиях БНО РАН. Финансирование осуществлялось в рамках Центра новых перспективных технологий (ЦНТП) РАН по созданию новой техники. Работы в основном завершились в 2012 г.: антенна была собрана и её тестирование на базе ГАИШ МГУ показало характеристики, близкие к проектным. В 2014 г. состоялась передислокация ОГРАН в БНО, где к тому времени уже закончилось строительство специальной лаборатории на отметке 1500 м от входа в штольню Главная. На момент написания данной статьи заканчивались работы по авто-

матизации поддержания рабочего режима и прецизионной термостабилизации. Подробное описание ОГРАН с техническими характеристиками можно найти, например, в [100, 101]. Ниже кратко представлено устройство ОГРАН.

Конструкция антенны основывается на известной как "компаратор частотных эталонов" классической схеме, в которой детектируемый сигнал появляется в результате сравнения пары высокостабильных оптических резонаторов (рис. 3). Внешний одномодовый лазер, используемый для резонансной оптической накачки антенны, включён в цепь обратной связи с высокодобротным оптическим эталоном Фабри–Перо. Зеркала этого эталона закреплены на торцах детектора — большого алюминиевого цилиндра (акустического резонатора) длиной  $L = 2$  м и массой  $M = 2$  т, имеющего центральноосевую канал для прохождения 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. Таким образом гравитационные возмущения кодируются в вариациях частоты накачки антенны. Эти вариации регистрируются с помощью дифференциальной схемы (компаратора), содержащей второй короткий ФП-эталон ( $l = 15$  см), работающий как оптический частотный дискриминатор. Для увеличения температурной стабильности тело эталона изготовлено из материала со сверхнизким коэффициентом теплового расширения — ситалла СО-115М [102].

Исходный рабочий режим, или рабочая точка антенны, в точности соответствует резонансной настройке обоих оптических резонаторов. Для большого (детекторного) резонатора это достигается изменением частоты накачки лазера. Одно из ФП-зеркал опорного резонатора (дискриминатора) закреплено на пьезокерамике, которая по низкой частоте управляется напряжением цепи обратной связи. Резонансная частота дискриминатора фиксируется на низких значениях (менее 100 Гц). На сигнальных частотах, близких к 1 кГц, зер-

кала дискриминатора оказываются свободными и разностный сигнал компаратора пропорционален величине ГВ-возмущения. Сигнал ошибки в обоих плечах (детектора и дискриминатора) получается с помощью известной схемы Паунда–Драйвера–Холла, которая предполагает введение фазовой модуляции на радиочастоте (порядка 10 МГц) входного оптического излучения [103]. Отражённый от опорного резонатора (дискриминатора) луч синхронно демодулируется на фотодетекторе. Амплитуда фототока пропорциональна разнице между частотой лазерного излучения и собственной частотой ФП-эталона дискриминатора, которая предполагается достаточно стабильной. Таким образом, выходной сигнал зависит только от возмущений резонансного ГВ-детектора. Для устойчивого функционирования всей антенны предусмотрена также стабилизация амплитуды лазерной накачки.

Оптическая схема ОГРАН при отсутствии внешних гравитационных возмущений должна работать в режиме нулевого выходного сигнала (работа "в тёмной полосе", как принято во всех длинноволновых лазерных гравитационных интерферометрах). В то же время она не требует непосредственной интерференции двух лучей, что существенно облегчает техническую реализацию детектора.

Программа наблюдений наземного гравиградиентного фона на установке ОГРАН предусматривает её 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 разнесённых приёмников. Это соответствует идее мультисканального поиска релятивистских катастроф [104].

Подземное расположение ОГРАН резко снижает поток высокоэнергичных космических частиц, которые вызывают негравитационные срабатывания антенны. Это устраняет необходимость параллельного контроля и фильтрации по принципу антисовпадений радиационного космического фона соответствующими датчиками,

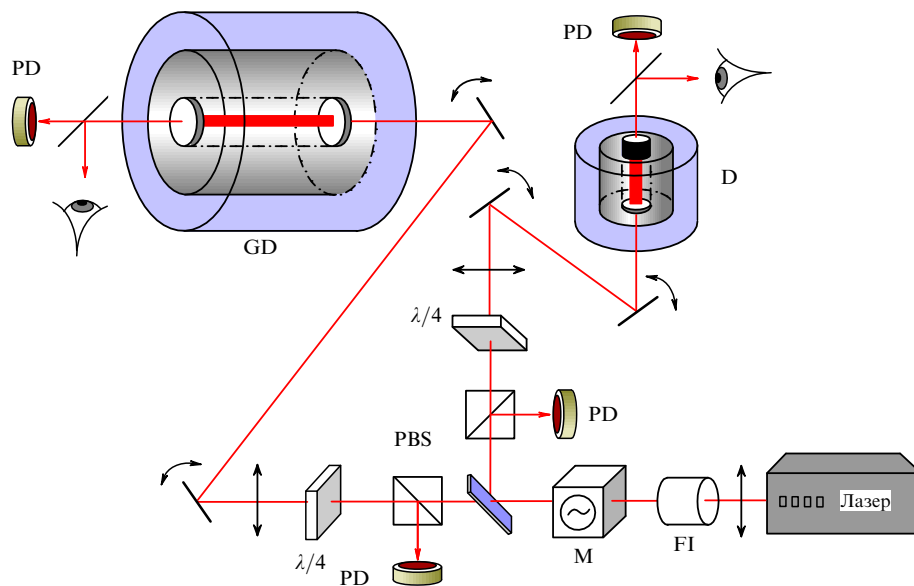


Рис. 3. Принципиальная оптоэлектронная схема установки ОГРАН. GD — гравитационный детектор, PD — фотоприёмник, D — дискриминатор, FI — фарадеевский изолятор, М — модулятор, PBS — поляризационный делитель пучка.

как в случае наземных криогенных антенн [41]. Однако для фильтрации гравитационных возмущений геофизической природы рядом с ОГРАН установлен детектор веберовского типа ("Улитка"), который использовался в эксперименте по проверке опытов Вебера в 1970-х годах и был реанимирован в 1990-х на базе ГАИШ [105]. Его чувствительности недостаточно для регистрации ГВ-сигналов из космоса. По антисовпадениям с ним можно существенно снизить фон подозрительных шумовых всплесков ОГРАН [106]. 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 [107].

Дальнейшее развитие антенны ОГРАН в рамках доступного финансирования ассоциируется с модернизацией, предусматривающей охлаждение её акустического детектора до температуры жидкого азота (около 77 К). При этом интенсивность броуновского шума детектора должна снизиться в четыре раза за счёт уменьшения температуры и более чем на порядок за счёт увеличения его акустической добротности (до 3–6 млн, как показывает опыт криогенных резонансных антенн). В результате ожидается достижение чувствительности порядка  $3 \times 10^{-21} \text{ Гц}^{-1/2}$  в полосе частот около 10 Гц, т.е. зона действия ОГРАН "дотянется" до скопления галактик Девы. Ключевой технологической проблемой "криогенного ОГРАН", конечно, является проблема криогенных зеркал, т.е. возможность сохранения эффективности ФП-резонаторов при низких температурах (аналогичная задача решается в японском проекте KAGRA (Kamioka Gravitational Wave Detector)).

К настоящему времени выполнены тестовые эксперименты с пилотной моделью крио-ОГРАН с зеркалами на подложках из флюорита кальция [108], подтвердившие реалистичность такого подхода.

## 7. Заключение

Представленный обзор работ, выполненных российскими группами в области гравитационно-волнового эксперимента (в период его зарождения и начального развития), показывает, что, несмотря на ясное понимание значимости проблемы, это научное направление не имело в России достаточной поддержки, сравнимой (хотя бы частично) с той, которую получили группы, занимавшиеся такими исследованиями в Европе и США. Тем не менее в этих условиях в России были выполнены многие исследования, представляющие интерес для мировой науки. К ним можно отнести, прежде всего, разработку принципиальных теоретико-прикладных вопросов по астрофизическим источникам ГВ-излучения, радиофизическим аспектам теории ГВ-детекторов, оптимизации анализа данных в ГВ-эксперименте. Оригинальными следует признать работы по геофизическому детектированию низкочастотных ГВ, развитию гравитационно-волнового опыта Герца, созданию комбинированной оптоакустической гравитационной антенны.

В то же время группы, вошедшие в состав LIGO, внесли существенный вклад в разработку физических основ будущих поколений ГВ-интерферометров. В частности, были выполнены важные исследования по тепловым ограничениям в оптических элементах и узлах интерферометра при больших мощностях оптической накачки [6], а также по проблеме избыточных шумов и устойчивости рабочих режимов таких интерферометров [5].

Весьма актуальными являются отечественные разработки по замене зеркал с отражающим покрытием дифракционными (структурами с периодической вариацией диэлектрической проницаемости) как решающего способа снижения потерь при больших оптических мощностях [109]. Особенно важным вкладом представляется развитие теории и методов квантовых невозмущающих измерений в приложении к ГВ-эксперименту [110].

Следует напомнить, что вообще тема квантово-механических ограничений чувствительности в прецизионных экспериментах с пробными телами была инициирована В.Б. Брагинским ещё в ранней работе [19] и изложена в современном представлении в [111, 112]. В течение длительного времени данная проблема оставалась чисто теоретической, исследуемой на уровне мысленных экспериментов. Однако успехи LIGO, Virgo и GEO-600 в создании установок, регистрирующих смещения пробных масс-зеркал на уровне  $\sim 10^{-16}$  см, перевели эту проблему в практическую плоскость. Сейчас неясно, какая из принципиальных схем обхода квантово-механических ограничений, изложенных в [110], найдёт воплощение в антеннах третьего поколения, но ведущая роль российской школы в этом вопросе неоспорима уже сегодня.

Конечно, главным аспектом исследований в ГВ-эксперименте остаётся его астрофизическая часть, фактически служившая мотивацией всех остальных работ по развитию техники ГВ-детектирования. На текущий момент имеется заметное число публикаций в отечественных журналах по астрофизике источников и косвенным астрофизическим схемам обнаружения ГВ. Здесь надо упомянуть способ обнаружения сверхдлиннопериодных ГВ,  $\sim 10^7 - 10^8$  с, по таймингу (хронометрированию) пульсаров. Следует отметить, что сама идея метода впервые обсуждалась в работе М.В. Сажина [113] и независимо в работе С. Детвейлера [114]. Детальное развитие выполнено австралийскими радиоастрономами из Обсерватории Паркса (проект PPTA (Parkes Pulsar Timing Array)) с целью детектирования стохастического фона ГВ во Вселенной [115]. В нашей статье [116] нерегулярные моменты прибытия пульсарных импульсов исследовались с целью обнаружения ГВ от сверхмассивных двойных объектов. Работы продолжаются (совместно с коллаборацией PPTA) в направлении увеличения чувствительности за счёт привлечения группового тайминга (средняя оценка интенсивности ГВ-фона по группе независимых пульсаров) [115].

Вдохновение астрофизиков и теоретиков-релятивистов после объявления о первом детектировании ГВ от слияния двойных чёрных дыр (ЧД) связано с надеждой на появление нового инструмента для исследования свойств пространства-времени в его экстремальных областях. Действительно, факт регистрации означает сразу два фундаментальных открытия: 1) доказательство реальности гравитационных волн, предсказанных ОТО; 2) решающее доказательство существования ЧД среди звёздного населения Вселенной [117] (другое предсказание ОТО). Если ранее кандидаты в ЧД-объекты звёздного типа обнаруживались по их рентгеновскому аккреционному излучению, а параметры оценивались по динамике их партнёра в двойной системе, то теперь возможно прямое, гравитационно-волновое, отслеживание последней стадии эволюции двойной звезды.

Принципиальные основы (физический смысл) таких наблюдений в значительной мере были разработаны российскими астрофизиками в тот же период, с конца 1960-х годов.

В частности, в работах И.Д. Новикова, В.П. Фролова, А.М. Черепашука [118–120] вполне конкретно указывается, какую информацию о природе объекта можно извлечь из наблюдений по ГВ-каналу. Перечислим только некоторые из возможностей. При слиянии двойной чёрная дыра – нейтронная звезда (BH – NS) по структуре ГВ-сигнала можно оценить уравнение состояния вещества нейтронной звезды. Для двойной BH – NS в финальной стадии (стадии "послезвона" — *ringdown*) можно по ГВ-всплеску наблюдать моды колебаний ЧД и судить о горизонте событий, т.е. фиксировать наличие или отсутствие (физическое состояние) горизонта событий, исследовать проблему "голой" сингулярности, проверять теорему об отсутствии волос у ЧД (можно сказать, изучать динамику пустого искривлённого пространства). По сигналам от слияния сверхмассивных ЧД (фактически столкновения галактик) в принципе возможно наблюдение сверхдлинных ГВ, образовавшихся в ранней Вселенной [121] при смене инфляционной (де-ситеровской) стадии стадией фридмановского расширения, когда Вселенной было всего  $10^{-36}$  с от роду (длина волны более 1 Мпк) [122] и т.д. Наконец, сигналы ГВ-излучения могут стать решающим инструментом для поиска таких экзотических объектов, как кротовые норы [116].

Последние годы в стратегии поиска ГВ от космических объектов доминирует уже упомянутый в разделе 4 подход всеканальной астрономии (*multi-messenger astrophysics*), фактически являющийся стремлением к реализации многоканального слежения за стохастически возникающими космическими катастрофами [123]. Значительно ранее подобную методику использовала группа ГАИШ МГУ (в терминологии "поиск астрогравитационных корреляций" [124]). Анализ данных итальянских гравитационных антенн выполнялся параллельно с анализом данных подземных нейтринных телескопов и детекторов гамма-всплесков на космическом аппарате BATSE (*Burst and Transient Source Experiment*) [125–127]. Основным мотивом являлось уменьшение объёма данных ГВ-антенн, подлежащих обработке, — брались только те временные интервалы записей, которые находились в окрестности зарегистрированных нейтринных и гамма-всплесков. В настоящее время преобладающим является обратный "триггерный подход" — поиск сопутствующих транзиентов электромагнитной или радиационной природы, возникающих сразу после зарегистрированного ГВ-всплеска (следствие отсутствия массы покоя гравитона). Здесь ГАИШ МГУ в последние годы занял лидирующую позицию благодаря глобальной сети оптических робот-телескопов МАСТЕР, установленной группой В.М. Липунова [128].

Завершая изложение истории ГВ-эксперимента в отечественной науке, попытаемся представить, каким может быть его дальнейшее развитие. Предыдущий период можно условно назвать периодом первооткрывателей. Ведущие группы в разных странах работали в конкурентной атмосфере, стремясь стать первыми регистраторами нового вида излучения. Поскольку это было связано с дорогостоящими установками, преимущественно обладали группы с высоким финансированием, что в конце концов привело их к успеху.

Теперь, когда открытие состоялось и первооткрыватель известен, можно спокойно приступать к планомерной рутинной работе по изучению нового феномена (нового вида материи) и его использованию для расширения наших знаний о Вселенной. Такое понимание текущей ситуации означает, что российская наука стоит перед необходимостью создания своего инструмента —

собственного большебазового гравитационного интерферометра, который, конечно, в дальнейшем будет встроено в глобальную сеть ГВ-антенн. Параллельным выходом (научным продуктом) такой установки может быть мониторинг квазистатистических гравитационных возмущений для решения фундаментальных задач геофизики и геодинамики.

Вопрос о Российской гравитационно-волновой обсерватории периодически обсуждался с зарубежными коллегами на различных конференциях и совещаниях, в частности на последней международной конференции ICGAC-12 (XII International Conference on Gravitation, Astrophysics and Cosmology), состоявшейся 28 июня – 5 июля 2015 г. в Москве в Российском университете дружбы народов [129]. В соответствии с расчётами признано, что с точки зрения расширения зон небесного покрытия мировой сетью ГВ-детекторов оптимальным было бы расположение нового интерферометра в центре Сибири, т.е. местом российской ГВ-обсерватории мог бы стать Академгородок в Новосибирске. Вместе с тем с позиций желательности подземного размещения следует выбирать БНО РАН на Северном Кавказе. Очевидно, что вопрос о месторасположении гравитационной обсерватории требует дополнительного анализа и обсуждения.

Несомненно, соответствующий долгосрочный проект должен быть мультидисциплинарным с привлечением ряда институтов РАН, отраслевых научно-производственных объединений (НПО) и главных вузов страны. Именно с последними можно связывать надежду на формирование перспективной команды заинтересованных исследователей, которые "поташат проект через годы". Не секрет, что 20-летний период распада РАН дорого обошёлся российской науке — прежде всего произошла потеря молодых кадров, без которых большие долгосрочные проекты невыполнимы. Тем не менее ещё достаточно активно старшее поколение "релятивистских" экспериментаторов, с помощью которых можно привлечь и обучить новую научную молодёжь.

Что касается технологий и ноу-хау, то здесь полного разрушения, к счастью, не произошло. Например, сохранилась культура производства мощных одномодовых лазеров, стабилизированных различными методами, в том числе по высокочастотным ФП-резонаторам (техника Паунда – Дривера – Холла [101]) (Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, Институт лазерной физики СО РАН), культура изготовления высокоотражательных зеркал с малыми потерями (НПО "Полнос"), получения высокочастотных акустических резонаторов и подвесок (Физический факультет МГУ, Институт кристаллографии им. А.В. Шубникова РАН) и многого другого. Конечно, сюда же надо отнести и опыт создания антенны ОГРАН, оптоэлектронная и оптомеханическая техника которой во многом соответствует используемой в установках LIGO и Virgo.

ОГРАН может оставаться тренажёрной испытательной площадкой для отработки узлов новых ГВ-интерферометров. В отношении индустриальных компонентов, требуемых для проекта, положение также не является безнадежным. В России сохранились предприятия и технологии изготовления вакуумных труб большого диаметра из нержавеющей стали, техника высоковакуумной (безмасленной) откачки больших объёмов (НПО "Гелий-маш", НПО "Вакуумная техника"), не говоря уже о мощностях и технологиях строительства подземных туннелей. Всё это может быть собрано воедино и направлено для решения высокой научной задачи. Требуются только

решение компетентных органов, эффективное управление и достаточное финансирование.

В ожидании этого, к сожалению не слишком вероятного, события существующие научные группы, конечно, будут продолжать исследования на пути к ГВ-астрономии в рамках возможного, рассчитывая на гранты Российской академии наук и Российского фонда фундаментальных исследований, а также на скромную помощь западных коллег.

Автор выражает благодарность А.М. Черепашуку за предложение по написанию данной статьи и многочисленные научные обсуждения. Работа поддержана Программой перспективного развития МГУ им. М.В. Ломоносова и частично грантами РФФИ 14-02-00567 и 14-22-03036.

## Список литературы

- Abbott B P et al. (LIGO Sci. Collab. and Virgo Collab.) *Phys. Rev. Lett.* **116** 061102 (2016)
- Abbott B P et al. (LIGO Sci. Collab. and Virgo Collab.) *Phys. Rev. Lett.* **116** 241103 (2016); *Phys. Rev. Lett.* **118** 221101 (2017)
- Punturo M *Class. Quantum Grav.* **27** 084007 (2010)
- LIGO Sci. Collab. "Instrument Science White Paper 2015", LIGO Document T1500290; <https://dcc.ligo.org/LIGO-T1500290/public>
- Брагинский В Б и др. *УФН* **186** 968 (2016); Braginsky et al. *Phys. Usp.* **59** 879 (2016)
- Хазанов Е А *УФН* **186** 975 (2016); Khazanov E A *Phys. Usp.* **59** 886 (2016)
- Einstein A *Sitzungsber. Konig. Preuß. Akad. Wiss. Berlin* 688 (1916); Пер. на англ. яз.: *The Collected Papers of Albert Einstein* Vol. 7 *The Berlin Years: Writings, 1918–1921* (Princeton, NJ: Princeton Univ. Press, 2002) p. 9; Пер. на русск. яз.: Эйнштейн А, в сб. *Собрание научных трудов* Т. 1 (М.: Наука, 1965) с. 631
- Иваненко Д Д (Ред.) *Новейшие проблемы гравитации* (М.: ИЛ, 1961)
- Bondi H *Rev. Mod. Phys.* **29** 423 (1957); Пер. на русск. яз.: Бонди Г, в сб. *Новейшие проблемы гравитации* (Под ред. Д Д Иваненко) (М.: ИЛ, 1961) с. 306
- Weber J *Phys. Rev.* **117** 306 (1960); Пер. на русск. яз.: Вебер Дж, в сб. *Новейшие проблемы гравитации* (Под ред. Д Д Иваненко) (М.: ИЛ, 1961) с. 446
- Weber J *General Relativity and Gravitational Waves* (New York: Interscience Publ., 1961); Пер. на русск. яз.: Вебер Дж *Общая теория относительности и гравитационные волны* (М.: ИЛ, 1962)
- Герценштейн М Е, Пустовойт В И *ЖЭФТ* **43** 605 (1962); Gertsenshtein M E, Pustovoyt V I *Sov. Phys. JETP* **16** 433 (1963)
- Герценштейн М Е *ЖЭФТ* **41** 113 (1962); Gertsenshtein M E *Sov. Phys. JETP* **14** 84 (1962)
- Зельдович Я Б *ЖЭФТ* **65** 1311 (1973); Zel'dovich Ya B *Sov. Phys. JETP* **38** 652 (1974)
- Weber J *Phys. Today* **21** (4) 34 (1968)
- Weber J, Larson J V *J. Geophys. Res.* **71** 6005 (1966)
- Брагинский В Б *УФН* **86** 433 (1965); Braginskii V B *Sov. Phys. Usp.* **8** 513 (1966)
- Мироновский В Н *Астрон. журн.* **42** 977 (1965); Mironovskii V N *Sov. Astron.* **9** 752 (1966)
- Брагинский В Б *Физические эксперименты с пробными телами* (М.: Наука, 1970)
- Weber J *Phys. Rev. Lett.* **20** 1307 (1968)
- Брагинский В Б, Зельдович Я Б, Руденко В Н *Письма ЖЭФТ* **10** 437 (1969); Braginskii V B, Zel'dovich Ya B, Rudenko V N *JETP Lett.* **10** 280 (1969)
- Брагинский В Б, Зельдович Я Б, Руденко В Н, в сб. *Определение постоянной тяготения и измерение некоторых тонких гравитационных эффектов* (Отв. ред. Ю Д Буланже, М Ю Сагитов) (М.: Наука, 1973) с. 8
- Gibbons G W, Hawking S W *Phys. Rev. D* **4** 2191 (1971)
- Rudenko V N *Phys. Lett. A* **35** 409 (1971)
- Зельдович Я Б, Полнарев А Г *Астрон. журн.* **51** 30 (1974); Zel'dovich Ya B, Polnarev A G *Sov. Astron.* **18** 17 (1974)
- Панов В И, Руденко В Н *Докл. АН СССР* **221** 573 (1975); Panov V I, Rudenko V N *Sov. Phys. Dokl.* **20** 206 (1975)
- Вайнштейн Л А, Зубаков В Д *Выделение сигналов на фоне случайных помех* (М.: Советское радио, 1960); Пер. на англ. яз.: Wainstein L A, Zubakov V D *Extraction of Signals from Noise* (Englewood Cliffs, N.J.: Prentice-Hall, 1962)
- Зельдович Я Б, Новиков И Д *Релятивистская астрофизика* (М.: Наука, 1967) с. 586; Пер. на англ. яз.: Zel'dovich Ya B, Novikov I D *Relativistic Astrophysics* Vol. 2 (Chicago: Univ. of Chicago Press, 1983)
- Руденко В Н *УФН* **126** 361 (1978); Rudenko V N *Sov. Phys. Usp.* **21** 893 (1978)
- Брагинский В Б и др. *ЖЭФТ* **66** 801 (1974); Braginskii V B et al. *Sov. Phys. JETP* **39** 387 (1974)
- Брагинский В Б и др. *Письма в ЖЭФТ* **16** 157 (1972); Braginskii V B et al. *JETP Lett.* **16** 108 (1972)
- Braginsky V B, Manukin A B, Popov E I, Rudenko V N *Phys. Lett. A* **45** 271 (1973)
- Douglass D H et al. *Phys. Rev. Lett.* **35** 480 (1975)
- Levine J L, Garwin R L *Phys. Rev. Lett.* **33** 794 (1974)
- Bramanti D, Maisberger K, Parkinson D *Nuovo Cimento Lett.* **7** 340 (1973)
- Drever R et al. *Nature* **246** 340 (1973)
- Lee N et al. *Phys. Rev. D* **14** 893 (1976)
- Amaldi E et al. *Nuovo Cimento* **18** 425 (1977)
- Boughn S P et al. *Phys. Rev. Lett.* **38** 454 (1977)
- Amaldi E et al. *Nuovo Cimento C* **9** 829 (1986)
- Pizzella G *Eur. Phys. J. H* **41** 302 (2016)
- Braginsky V B, Rudenko V N *Phys. Rep.* **46** 165 (1978)
- Багдасаров Х С, Брагинский В Б, Митрофанов В П *Кристаллография* **19** 883 (1974)
- Брагинский В Б, Митрофанов В П, Панов В И *Системы с малой диссипацией* (М.: Наука, 1981); Пер. на англ. яз.: Braginsky V B, Mitrofanov V P, Panov V I *Systems with Small Dissipation* (Chicago: Univ. of Chicago Press, 1985)
- Гусев А В, Руденко В Н *ЖЭФТ* **72** 1218 (1977); Gusev A V, Rudenko V N *Sov. Phys. JETP* **45** 637 (1977)
- Гусев А В, Руденко В Н *ЖЭФТ* **74** 819 (1978); Gusev A V, Rudenko V N *Sov. Phys. JETP* **47** 428 (1978)
- Bough S P, Kuhn J R *Astrophys. J.* **289** 387 (1984)
- Брагинский В Б и др. *УФН* **147** 422 (1985); Braginskii V B et al. *Sov. Phys. Usp.* **28** 938 (1985)
- Dyson F J *Astrophys. J.* **156** 529 (1969)
- Sadeh D, Meidav M *Nature* **240** 30 (1972)
- Колесников Ю А и др. *Численная сейсмология* (7) 46 (1974)
- Садовский М А, Болховитинов Л Г, Писаренко В Ф *Изв. АН СССР. Физика Земли* (12) 3 (1982)
- Aki K, Richards P G *Quantitative Seismology: Theory and Methods* Vol. 1 (San Francisco: W.H. Freeman, 1980)
- Thorne K S, in *Three Hundred Years of Gravitation* (Eds S W Hawking, W Israel) (Cambridge: Cambridge Univ. Press, 1987) p. 330
- Кравчук В К, Гусев А В, Руденко В Н *Астрон. журн.* **74** 354 (1997); Kravchuk V K, Gusev A V, Rudenko V N *Astron. Rep.* **41** 306 (1997)
- Гусев А В, Кравчук В К *Изв. РАН. Физика Земли* (4) 78 (1994)
- Ashby N, Dreitlein J *Phys. Rev. D* **12** 336 (1975)
- Aglietta M et al. *Nuovo Cimento C* **12** 75 (1989)
- Amaldi E et al. *Europhys. Lett.* **3** 1325 (1987)
- Dickson C A, Schutz B F *Phys. Rev. D* **51** 2644 (1995)
- Руденко В Н и др. *ЖЭФТ* **118** 979 (2000); Rudenko V N et al. *JETP* **91** 845 (2000)
- Кравчук В К, Старовойт О Е, Руденко В Н *Изв. РАН. Физика Земли* (9) 57 (1995)
- Кучик Е К, Руденко В Н *Астрон. журн.* **68** 732 (1991); Kuchik E K, Rudenko V N *Sov. Astron.* **35** 361 (1991)
- Бичак И, Руденко В Н *Гравитационные волны в ОТО и проблема их обнаружения* (М.: Изд-во МГУ, 1987)
- Брагинский В Б, Руденко В Н *УФН* **100** 395 (1970); Braginskii V B, Rudenko V N *Sov. Phys. Usp.* **13** 165 (1970)
- Брагинский В Б, Манукин А В *Измерение малых сил в физических экспериментах* (М.: Наука, 1974); Braginsky V B, Manukin A B *Measurement of Weak Forces in Physics Experiments* (Chicago: Univ. of Chicago Press, 1977)
- Moss G E, Miller L R, Forward R L *Appl. Opt.* **10** 2495 (1971)
- Weiss R "Electromagnetically coupled broadband gravitational antenna", Quarterly Progress Report No. 105 (Cambridge, Mass.: MIT, Research Laboratory of Electronics, 1972); <https://dcc.ligo.org/P720002/public>
- Whitcomb S E et al., *Proc. of the Third Marcel Grossmann Meeting on General Relativity, 30 August–3 September, 1982, Shanghai, China* Vol. 2 (Ed. H Ning) (Amsterdam: North-Holland Publ. Co., 1983) p. 1399
- Buklenskii A V et al. *Measur. Tech.* **38** 1073 (1996)

71. Милюков В К и др. *Изв. РАН. Сер. физ.* **63** 1192 (1999); Milyukov V K et al. *Bull. Russ. Acad. Sci. Phys.* **63** 948 (1999)
72. Белоусова И М и др. *УФН* **134** 170 (1981); Belousova I M et al. *Sov. Phys. Usp.* **24** 441 (1981)
73. Chirkin A S et al. *Grav. Cosmology* **5** 145 (1999)
74. Руденко В Н и др. *Изв. РАН Сер. физ.* **63** 1198 (1999); Rudenko V N et al. *Bull. Russ. Acad. Sci. Phys.* **63** 952 (1999)
75. Rudenko V N *Phys. Lett. A* **223** 421 (1996)
76. Rudenko V N, Serdobolskii A V, Tsubono K *Class. Quantum Grav.* **20** 317 (2003)
77. Grishchuk L P, Kulagin V V, Rudenko V N, Serdobolskii A V *Class. Quantum Grav.* **22** 245 (2005)
78. Gusev A V et al. *Measur. Tech.* **52** 111 (2009)
79. Melissinos A (LIGO Sci. Collab.), in *The Twelfth Marcel Grossmann Meeting. On Recent Developments in Theoretical and Experimental General Relativity, Astrophysics and Relativistic Field Theories. Proc. of the MG12 Meeting on General Relativity UNESCO Headquarters, Paris, France, 12–18 July 2009* Pt. C (Ed. A H Chamseddine) (Singapore: World Scientific Publ., 2012) p. 1718
80. Гусев А В, Руденко В Н *Письма в ЖЭТФ* **91** 543 (2010); Gusev A V, Rudenko V N *JETP Lett.* **91** 495 (2010)
81. Гусев А В, Руденко В Н, Юдин И С *ЖЭТФ* **146** 779 (2014); Gusev A V, Rudenko V N, Yudin I S *JETP* **119** 687 (2014)
82. Kostelecký V A, Melissinos A C, Mewes M *Phys. Lett. B* **761** 1 (2016)
83. Гришук Л П *ЖЭТФ* **67** 825 (1974); Grishchuk L P *Sov. Phys. JETP* **40** 409 (1975); Гришук Л П *ЖЭТФ* **66** 833 (1974); Grishchuk L P *Sov. Phys. JETP* **39** 402 (1974)
84. Руденко В Н, Сажин М В *Квантовая электроника* **7** 2344 (1980); Rudenko V N, Sazhin M V *Quantum Electronics* **10** 1366 (1980)
85. Kolosnitsyn N I, Rudenko V N *J. Phys. Conf. Ser.* **243** 012003 (2010)
86. Bisnovaty-Kogan G S, Rudenko V N *Class. Quantum Grav.* **21** 3347 (2004)
87. Гришук Л П, Сажин М В *ЖЭТФ* **68** 1569 (1975); Grishchuk L P, Sazhin M V *Sov. Phys. JETP* **41** 787 (1975)
88. Голубцов М Г, Хлебников Н Х *Радиотехника и электроника* **17** 275 (1972)
89. Писарев А Ф, Препринт P13-12845 (Дубна: ОИЯИ, 1979)
90. Акишкин П Г и др., Препринт P13-85-968 (Дубна: ОИЯИ, 1985)
91. Боголюбов П Н, Писарев А Ф, Шавахина Н С "Излучение и детектирование гравитационных волн в лабораторных условиях", Сообщение N13-81-95 (Дубна: ОИЯИ, 1981)
92. Копвиллем У Х, Нагибаров В Р *Письма в ЖЭТФ* **2** 529 (1965); Korvillem U Kh, Nagibarov V R *JETP Lett.* **2** 329 (1965)
93. Белоконов В А, Ильинский Ю А, Хохлов Р В *Письма в ЖЭТФ* **24** 569 (1976); Belokon' V A, Il'inskii Yu A, Khokhlov R V *JETP Lett.* **24** 525 (1976)
94. Kolosnitsyn N I, Rudenko V N *Phys. Scripta* **90** 074059 (2015)
95. Li F et al. *Phys. Rev. D* **80** 064013 (2009)
96. Гришук Л П *УФН* **121** 629 (1977); Grushchuk L P *Sov. Phys. Usp.* **20** 319 (1977)
97. Кулагин В В, Полнарев А Г, Руденко В Н *ЖЭТФ* **91** 1553 (1986); Kulagin V V, Polnarev A G, Rudenko V N *Sov. Phys. JETP* **20** 319 (1977)
98. De Rosa M et al. *Class. Quantum Grav.* **19** 1919 (2002)
99. Gusev A V, Kulagin V V, Rudenko V N *Grav. Cosmol.* **2** 68 (1996)
100. Bagaev S N et al. *Rev. Sci. Instrum.* **85** 065114 (2014)
101. Багаев С Н et al. *ПТЭ* (2) 95 (2015); Bagaev S N et al. *Instrum. Exp. Tech.* **58** 257 (2015)
102. Лыткаринский завод оптического стекла, <http://lzos.ru/content/view/129/>
103. Drever R W et al. *Appl. Phys. B* **31** 97 (1983)
104. Rudenko V N, Popov S B, in *The Thirteenth Marcel Grossmann Meeting: On Recent Developments in Theoretical and Experimental General Relativity, Astrophysics and Relativistic Field Theories. Proc. of the MG13 Meeting on General Relativity* (Eds R Kjell et al.) Vol. 1, Pt. C (Singapore: World Scientific, 2015) p. 2012
105. Гусев А В и др. *Астрон. журн.* **74** 287 (1997); Gusev A V et al. *Astron. Rep.* **41** 248 (1997)
106. Гаврилюк Ю М и др. *Астрон. журн.* **89** 1 (2012); Gavriilyuk Yu M et al. *Astron. Rep.* **56** 638 (2012)
107. Гусев А В, Руденко В Н, Сердобольский А В, Пищелла Г *Измерительная техника* (10) 3 (2004)
108. Kulagin V V et al. *Grav. Cosmol.* **22** 374 (2016)
109. Пустовойт В И *УФН* **186** 1133 (2016); Pustovoit V I *Phys. Usp.* **59** 1034 (2016)
110. Халили Ф Я *УФН* **186** 1059 (2016); Khalili F Ya *Phys. Usp.* **59** 968 (2016)
111. Брагинский В Б, Воронцов Ю И *УФН* **114** 41 (1974); Braginskii V B, Vorontsov Yu I *Sov. Phys. Usp.* **18** 644 (1975)
112. Braginsky V B, Khalili F Ya *Quantum Measurement* (Cambridge: Cambridge Univ. Press, 1992)
113. Сажин М В *Астрон. журн.* **55** 65 (1978); Sazhin M V *Sov. Astron.* **22** 36 (1978)
114. Detweiler S *Astroph. J.* **234** 1100 (1979)
115. Hobbs G B, Edwards R T, Manchester R N *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **369** 655 (2006)
116. Gusev A V, Porayko N K, Rudenko V N *Grav. Cosmol.* **20** 290 (2014)
117. Черепашук А М *УФН* **186** 1001 (2016); Cherepashchuk A M *Phys. Usp.* **59** 910 (2016)
118. Новиков И Д *УФН* **186** 790 (2016); Novikov I D *Phys. Usp.* **59** 713 (2016)
119. Новиков И Д, Фролов В П *УФН* **171** 307 (2001); Novikov I D, Frolov V P *Phys. Usp.* **44** 291 (2001)
120. Черепашук А М *УФН* **186** 778 (2016); Cherepashchuk A M *Phys. Usp.* **59** 702 (2016)
121. Горбунов Д С, Рубаков В А *Введение в теорию ранней Вселенной: Космологические возмущения Инфляционная Теория.* (М.: КРАСАНД, 2010); Пер. на англ. яз.: Gorbunov D S, Rubakov V A *Introduction to the Theory of the Early Universe: Cosmological Perturbations and Inflationary Theory* (Singapore: World Scientific, 2011)
122. Старобинский А А *Письма в ЖЭТФ* **30** 719 (1979); Starobinskii A A *JETP Lett.* **30** 682 (1979)
123. Abbott B P et al. *Living Rev. Relat.* **19** 1 (2016); arXiv:1304.0670
124. Rudenko V N, in *Moriond Workshop Series, Gravitational Waves and Experimental Gravity* Vol. 34 (World Sci. Publ., 2000) p. 269
125. Gusev A V et al., in *Gravitational Waves. Proc. of the Second Edoardo Amaldi Conf., Switzerland, 01–04 July 1997* (Eds E Coccia, G Pizzella) (Singapore: World Scientific, 1998) p. 512
126. Gusev A V, Rudenko V N *Int. J. Mod. Phys. D* **9** 353 (2000)
127. Gusev A V et al. *Grav. Cosmol.* **12** 69 (2006)
128. Липунов В М *УФН* **186** 1011 (2016); Lipunov V M *Phys. Usp.* **59** 918 (2016)
129. Melnikov V, Hsu J-P (Eds) *Proc. of the Twelfth Asia-Pacific Intern. Conf. on Gravitation, Astrophysics, and Cosmology. Dedicated to the Centenary of Einstein's General Relativity* (Hackensack, NJ: World Scientific Publ., 2016)

### Gravitational-wave experiment in Russia

V.N. Rudenko

Lomonosov Moscow State University, Sternberg Astronomical Institute, Universitetskii prosp. 13, 119992 Moscow, Russian Federation; Institute for Nuclear Research, Russian Academy of Sciences, prosp. 60-letiya Oktyabrya 7a, 117312 Moscow, Russian Federation  
E-mail: rvm@sai.msu.ru

A brief summary is given of the experimental research into the detection of extraterrestrial gravitational radiation performed in Russia since the late 1960s. Various aspects of this topic are reviewed, including experiments with resonant detectors, geophysical methods for detecting low-frequency gravitational waves, and high frequency versions of the gravitational 'Hertz experiment'. A description is given of the current situation concerning the unique optoacoustic gravitational detector OGRAN mounted in the underground laboratory of the Baksan neutrino observatory, Institute for Nuclear Research, Russian Academy of Sciences. Prospects are examined for building a Russian Federation based long base gravitational wave interferometer integrated into the global network of gravitational antennas.

**Keywords:** gravitational wave experiment, gravitational wave detection, gravitation detectors

PACS numbers: **04.30**, –w, 04.80.Nn, 95.55.Ym

Bibliography — 129 references

*Uspekhi Fizicheskikh Nauk* **187** (8) 892–905 (2017)

DOI: <https://doi.org/10.3367/UFNr.2016.11.038088>

Received 18 January 2017

*Physics – Uspekhi* **60** (8) (2017)

DOI: <https://doi.org/10.3367/UFNe.2016.11.038088>