

## ОТЗЫВ

**официального оппонента, члена-корреспондента РАН, доктора физ.-мат. наук Колачевского Николая Николаевича на диссертацию Юдина Ивана Сергеевича "Длиннобазовые оптические интерферометры как детекторы слабых гравитационных возмущений", представленную на соискание степени кандидата физико - математических наук по специальности 01.04.21 Лазерная физика.**

Современное понимание физической природы материи представлено двумя фундаментальными теоретическими концепциями в форме релятивистской теории гравитации (ОТО) и квантовой теории микромира. Задача их объединения являет собой вызов современной теоретической физики, связанный с преодолением ряда противоречий, изначально заложенных в этих концепциях. На этом пути решающая роль принадлежит прецизионным экспериментам тестирующим основные положения этих теорий, особенно на границах справедливости базисных утверждений, принятых в качестве их аксиоматической структуры.

Здесь следует выделить прецизионные эксперименты, связанные с эффектами взаимодействия электромагнитного и гравитационного полей. Действительно, большинство подтверждающих ОТО тестов было выполнено с использованием электромагнитного излучения, распространяющегося в околосолнечном или космологическом гравитационном поле.

При этом набор радио и оптических измерительных методик и инструментов, таких как радиолокационное и лазерное зондирование спутников и планет, оптическая и радио интерферометрия, спектрографы высокого разрешения, наземные и бортовые телескопы мониторинга дальнего космоса и др. показали не только адекватность поставленным задачам, но и перспективу возможного роста их разрешающей способности. Существенная революция в измерительной технике в последние годы произошла благодаря замене микроволновых стандартов частоты на оптические, и оптических интерферометров на атомные: при этом скачок в точности измерения временных и пространственных интервалов, лежащих в основе гравитационных измерений, достиг трех порядков величины.

Представленная диссертация Юдина И.С. относится к разряду экспериментальных работ, в которых современная оптическая техника используется для регистрации и измерения тонких гравитационных эффектов.

В диссертации выделяются два крупных раздела: исследование резонатора Фабри-Перо с большой (километры) оптической длиной как принципиального сенсорного звена нового гравитационно - волнового детектора ОГРАН (Оптоакустическая Гравитационная Антенна) с целью поиска гравитационного излучения астрофизической природы, а также исследование большебазовых гравитационно-волновых оптических



интерферометров (LIGO, VIRGO) для регистрации низкочастотных гравитационных сигналов космического и геофизического происхождения. Первая часть является экспериментальной, отражающей участие автора в коллективе, создавшем антенну ОГРАН. Вторая часть имеет характер теоретико-прикладного исследования, объясняющего эффект появления низкочастотных приливных сигналов на выходе в целом высокочастотных детекторов, какими являются установки LIGO и ВИРГО. Выполненный здесь анализ позволил автору предложить оригинальную модернизацию этих установок, которая расширяет их частотный диапазон в зону низкочастотных (квазистатических) сигналов.

Диссертационная работа состоит из введения, трех глав и списка литературы. По объему она содержит 120 страниц, включает в себя 24 рисунка и 69 наименований в списке литературы.

Во **введении** обоснована актуальность диссертационной работы, сформулирована цель, основные положения, выносимые на защиту, обоснованы научная новизна и практическая значимость.

В **первой главе**, являющейся обзорной, представлены основные положения релятивистской теории гравитационно-волнового излучения. Даны определения характеристик гравитационных волн, которые в принципе могут измеряться, и которые используются в дальнейшем исследовании. Кратко сделан обзор основных астрофизических моделей для релятивистских звезд, катастрофы которых могут порождать мощные всплески гравитационного излучения. Более детально рассмотрен механизм взаимодействия гравитационных волн с электромагнитным полем и твердыми телами. В последнем случае акцент сделан на модели твердотельного детектора в форме цилиндра (в приближении тонкого стержня), которая используется при описании чувствительных элементов резонансных гравитационно-волновых детекторов. Определяющей характеристикой такого детектора является его чувствительность в терминах спектральной плотности выходных шумов, пересчитанных ко входу и представляющей тогда минимально обнаружимую амплитуду гравитационной волны. Анализ природы избыточных шумов в первой главе уделяется достаточно большое внимание. Для акустического детектора принципиально некомпенсируемым шумом является его тепловой шум, борьба с которым возможна на пути уменьшения его внутренних потерь. Существенный вклад вносит и шум системы регистрации, зависящий от искусства экспериментатора. Наличие акустического резонанса приводит к узкополосному характеру зоны максимальной чувствительности твердотельных детекторов. Напротив, для детекторов на свободных массах (в виде оптических интерферометров на подвесных зеркалах) зона приемлемой чувствительности оказывается весьма широкой, но имеет вид отдельных окон между тепловыми пиками резонансов маятниковых подвесок зеркал. В этих зонах повышенной



чувствительности ограничивающие шумы имеют различную природу, но неустранимым является только фотонный шум оптической накачки интерферометра. Особое внимание в обзоре уделено источником низкочастотных помех и методам борьбы с ними, поскольку в дальнейшем исследуется механизм проникновения низкочастотных гравитационных (главным образом геофизических) сигналов на основной высокочастотный выходной порт интерферометрических детекторов. С точки зрения принципиального предназначения интерферометров как детекторов гравитационных волн геофизические сигналы являются помехой. В LIGO и VIRGO на частотах от одного герца и выше для их ослабления используются анти сейсмические фильтры. На частотах ниже одного герца геофизические помехи компенсируются автоподстройкой взаимного положения зеркал активными драйверами отслеживания рабочей точки, управляемыми сигналом оптической отстройки. Эта часть обзора используется автором при оценке возможности детектирования низко частотных гравитационных возмущений. В заключении обзорной части автор достаточно детально и ясно формулирует задачи диссертационного исследования.

**Во второй главе** проводится исследование экспериментальной установки ОГРАН, разработанной и собранной при участии соискателя. Антенна ОГРАН как оригинальный гравитационный детектор комбинированного типа совмещает в себе принципы интерферометрических и твердотельных детекторов. Данная экспериментальная установка, по-видимому, является уникальной в своем роде. Похожий проект AURIGA (INFN, Italy) также имел в своей конструкции резонансный твердотельный детектор с оптической системой регистрации, представлявшей интерферометр Фабри-Перо (ФП) с микроазором, укрепленный на механическом трансформаторе смещений на торце тела детектора. Это увеличивало коэффициент опто-механической трансформации акустических возмущений, но полностью исключало часть сигнала за счет прямого гравитационного воздействия на свет внутри ФП интерферометра. Кроме того добавляются помехи за счет теплового шума трансформатора. В отличии от AURIGA антенна ОГРАН имеет дополнительную оптическую степень свободы, реагирующую на гравитационно-волновое воздействие, что усложняет структуру отклика, облегчая тем самым процедуру фильтрации полезного сигнала на фоне разнообразных помех. Важным преимуществом ОГРАН в семействе резонансных детекторов является его повышенная чувствительность благодаря высокотехнологичной оптической системе регистрации с малым обратным флюктуационным влиянием на акустическую степень свободы. Это позволяет существенно увеличить коэффициент опто-механической связи и без охлаждения достигнуть чувствительности близкой к криогенным резонансным детекторам (EXPLORER, NAUTILUS).

Основная часть второй главы посвящена исследованию оптической системы ОГРАН. Автор провел детальный анализ факторов, ограничивающих чувствительность антенны, разработал и реализовал ряд технических



приемов, понижающих шумовой фон в частотном диапазоне антенны. Подробно описан механизм избыточного шума за счет паразитной амплитудной модуляции в технике стабилизации частоты методом Паунда-Дривера. Предложен и внедрен в установку механизм подавления амплитудной модуляции с помощью автоматической юстировки лазерного пучка на вход оптоволокну, выступающего в качестве фильтра мод. В заключении этой главы приведена спектральная плотность шума установки ОГРАН, снятая в тестовом режиме и демонстрирующая достижение проектного уровня чувствительности антенны  $10^{-19}$  по метрическим вариациям при полосе приема порядка единиц герц. Расширение полосы автор ожидает при использовании ФП зеркал с резкостью (финессе) увеличенной на порядок ( $\sim 10^4$ ), что не вызывает сомнений.

**В третьей главе** представлено теоретическое исследование механизма проникновения медленных геофизических возмущений на основной выход гравитационно-волновых интерферометров, представляющих собой сложные комбинации схемы Майкельсона с эталонами Фабри-Перо. Автор, используя метод комплексных огибающих, показывает, что механизм появления геофизических сигналов на выходе деструктивной интерференции связан с параметрической модуляцией передаточной функции оптического тракта интерферометра. Используя типичную для радиофизики параметрическую модель, автор выполнил расчеты индекса модуляции выходных реализаций в двух режимах: в режиме наблюдения за гармоникой на частоте циркуляции фотонов в ФП плечах интерферометра (она же - частота межмодового интервала для ФП эталона), а также в стандартном режиме наблюдения за гармониками в рабочей полосе частот. Полученные численные оценки для сигналов от остаточных приливных деформаций плеч (за порогом чувствительности следящих систем поддержания рабочей точки), регистрируемых на частоте циркуляции фотонов, хорошо совпадают величинами, зафиксированными в научных сериях установки LIGO. Появление самой гармоники межмодового интервала автор правдоподобно объясняет шумовой засветкой моды соседней главному резонансу. Таким образом внесена ясность в вопрос о возможности регистрации медленных гравитационных возмущений с помощью относительно высокочастотного оптического инструмента.

Обнаружение механизма низкочастотной модуляции позволило автору предложить рецепт модернизации больших гравитационных интерферометров для увеличения их отклика на геофизическую составляющую полного сигнала. Такая модернизация при сохранении общей конфигурации установки предполагает введение дополнительной оптической накачки для одной из мод, соседних по отношению к главному оптическому резонансу. При этом величина геофизического отклика возрастает пропорционально амплитуде дополнительной подсветки. Это не затрагивает работу интерферометра как гравитационной антенны, добавляя, однако, ему



новые возможности геофизического инструмента.

Результативные главы, вторая и третья, заканчиваются констатацией полученных результатов и формулировкой положений, выносимых на защиту.

Суммируя представленный выше анализ работы Юдина И.С. уместно кратко отметить **наиболее интересные и значимые новые результаты**, полученные диссертантом:

1. Создана опто-акустическая антенна ОГРАН, измеритель вариаций гравитационного градиента, в которой оптические шумы регистрации на два порядка меньше тепловых шумов акустического детектора. При этом абсолютная величина измеряемой амплитуды колебаний детектора оценивается как  $5 \cdot 10^{-16}$  см за время измерения 1 сек, что является рекордом для отечественной измерительной техники и сравнимо с результатами LIGO и VIRGO.

2. Обнаружен механизм появления медленных гравитационных возмущений в выходном сигнале интерферометров на свободных массах-зеркала как параметрическое преобразование электромагнитных волн в связанных оптических резонаторах. Предложен и просчитан метод усиления этого эффекта за счет применения двухкомпонентной оптической накачки, что позволяет использовать гравитационно-волновые интерферометры для параллельной регистрации геофизических сигналов.

Результаты, полученные в диссертационной работе достаточно **обоснованы**. Их достоверность доказана рядом тестовых экспериментов и проведением независимых калибровок с подачей имитационных сигналов с заданными характеристиками.

**Теоретическая и практическая ценность** представленной диссертации обусловлена тем, что это первая реализация оригинальной отечественной идеи комбинированной гравитационной антенны. Наличие работающей установки

ОГРАН в подземных условиях БНО РАН создает возможность участия в программах «мультиканальной астрономии», предполагающих одновременный мониторинг релятивистских космических катастроф по наблюдательным каналам различной физической природы. Для БНО это параллельный поиск коллапсаров в Галактике по гравитационному и нейтринному каналам (установки ОГРАН и БПСТ).

Вместе с позитивной оценкой диссертационной работы в целом следует сделать ряд **критических замечаний**.

1. Резкость ФП резонаторов используемых в антенне ОГРАН является



одним из ключевых параметров, влияющих на чувствительность антенны. Эксперимент проведен диссертантом для резкости около 2 тысяч: упоминается о резервных зеркалах, обеспечивающих резкость 30 тысяч. Между тем сейчас доступны зеркала, обеспечивающие резкость 300 тысяч и более. Непонятно, почему использование таких зеркал даже не обсуждается в работе.

2. Современное решение проблемы светопровода сложных оптических конфигураций ассоциируется с использованием волоконной оптики, в которую могут быть встроены нелинейные активные элементы типа модуляторов, частотных фильтров и др. Это повышает надежность функционирования и помехоустойчивость таких систем. Непонятно, почему диссертант не проанализировал использование волоконных компонентов для ОГРАН.

3. В диссертации не затронут вопрос неизбежного температурного дрейфа акустического детектора, что влечет за собой частотные уходы оптических ФП резонансов. На больших временах этот эффект должен разрушить рабочий режим ОГРАН. Непонятно, почему эта проблема никак не обсуждается в диссертации.

Сделанные замечания не влияют на общую положительную оценку выполненной работы и не ставят под сомнение выводы диссертации. Материалы работы могут быть использованы такими организациями как институты ФАНО, в частности ИОФАН, ИНАСАН, ИФЗ, а также физическим факультетом МГУ, МГТУ, МИФИ, МФТИ и др.

Автореферат правильно отражает содержание диссертации. Основные результаты опубликованы в открытой печати в зарубежных и отечественных журналах, внесенных в список ВАК.

Работа удовлетворяет требованиям п.9 Приложения о присуждении ученых степеней, утвержденного постановлением Правительства РФ (№842 от 24.09.2013), а ее автор заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.21 - лазерная физика.

член-корреспондент РАН, доктор физ.-мат. наук,  
директор Федерального государственного бюджетного  
учреждения науки Физического института  
им. П.Н.Лебедева Российской академии наук  
тел.: +7(499) 132-68-10

e-mail: [kolachevsky@sci.lebedev.ru](mailto:kolachevsky@sci.lebedev.ru)

12 января 2016

Подпись заверяю  
Ученый секретарь ФИАН,  
к.ф.-м.н.



*Kolachevsky*  
Н.Н. Колачевский

*[Signature]*  
М.М. Цвентух