

УДК 530.122

СОВРЕМЕННЫЕ МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЯ ГРАВИТАЦИОННЫХ ВОЛН И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ ТЕХНОЛОГИЙ

Зеленков В.А., студент гр. ПИБ-241, II курс, Моисеев И.С., студент гр. ПИБ-241, II курс, Новиков К.С., студент гр. ПИБ-241, II курс
Научный руководитель: Елкин И.С., к.т.н., доцент

Кузбасский государственный технический университет
имени Т.Ф. Горбачева, г. Кемерово

Аннотация. В работе представлен обзор современных подходов к детектированию гравитационного излучения, а также анализ технологических решений, определяющих развитие данной области экспериментальной физики. Рассматриваются принципы работы лазерных интерферометров, методы снижения тепловых и сейсмических шумов, перспективы использования криогенных детекторов и ультразвуковых методик. Отдельное внимание уделено теоретическим аспектам квантования гравитации и возможностям лабораторной генерации гравитационных волн. В статье также затрагиваются вопросы изучения внутренних гравитационных волн в атмосферах планет как смежной области геофизических исследований.

Ключевые слова: гравитационные волны, лазерная интерферометрия, криогенные детекторы, гравитоны, ультразвуковой метод, механические потери.

MODERN METHODS OF MEASURING GRAVITATIONAL WAVES AND PROSPECTS FOR TECHNOLOGY DEVELOPMENT

Zelenkov V.A., student, II year, Moiseev I.S., student, II year,
Novikov K.S., student, II year

Supervisor: Elkin I.S., Ph.D. in Engineering Science, Associate Professor
Kuzbass State Technical University named after T.F. Gorbachev, Kemerovo

Annotation

The paper provides an overview of current approaches to detecting gravitational radiation, as well as an analysis of technological solutions that determine the development of this field of experimental physics. The principles of operation of laser interferometers, methods of reducing thermal and seismic noise, prospects for the use of cryogenic detectors and ultrasonic techniques are considered. Special attention is paid to the theoretical aspects of gravity quantization and the possibilities of laboratory generation of gravitational waves. The article also addresses the issues of studying internal gravitational waves in planetary atmospheres as a related field of geophysical research.

Keywords: gravitational waves, laser interferometry, cryogenic detectors, gravitons, ultrasonic method, mechanical losses.

Фундаментальная физика последних десятилетий переживает период бурного развития, обусловленный переходом от сугубо теоретических построений к высокоточным экспериментальным подтверждениям общей теории относительности. Одним из наиболее значимых событий в современной науке стала регистрация возмущений кривизны пространства-времени, предсказанных А. Эйнштейном еще в начале XX века.

Регистрация гравитационного излучения открыла человечеству новый канал получения информации о Вселенной, позволяющий наблюдать за катастрофическими астрофизическими процессами, недоступными для электромагнитных телескопов. Однако фиксация столь слабых сигналов требует преодоления колоссальных технических трудностей, связанных с необходимостью измерения смещений, меньших диаметра атомного ядра. В связи с вышесказанным, разработка и совершенствование методов измерения гравитационных волн выступает одной из приоритетных задач современной экспериментальной физики и метрологии.

Гравитационные волны представляют собой распространяющиеся со скоростью света возмущения метрики пространства-времени, возникающие при ускоренном движении массивных объектов с переменным квадрупольным моментом. В рамках классической общей теории относительности данные возмущения носят непрерывный характер. Тем не менее, современная теоретическая физика стремится к объединению гравитации с квантовой механикой, что порождает дискуссии о корпускулярной природе рассматриваемого явления.



Рисунок 1 – KAGRA

Существует гипотеза, согласно которой гравитоны могут рассматриваться как дискретная проекция гравитационных волн, что позволяет по-новому взглянуть на процессы переноса энергии в гравитационном поле. Анализ дуализма волна-частица в контексте гравитации способствует более глубокому пониманию фундаментальных взаимодействий [1]. Подобные теоретические изыскания не только обогащают фундаментальную науку, но и указывают на потенциальные пределы чувствительности измерительных приборов, обусловленные квантовой природой самого пространства-времени.

Основным инструментом регистрации гравитационных волн на сегодняшний день выступают наземные лазерные интерферометры, такие как LIGO, Virgo и KAGRA (рис. 1).

Принцип действия данных установок основан на измерении разности фаз двух лазерных лучей, распространяющихся в перпендикулярных плечах интерферометра Майкельсона (рис. 2). Прохождение гравитационной волны вызывает изменение длины плеч, что приводит к сдвигу интерференционной картины на выходе фотодетектора. Длина плеч LIGO и Virgo составляет 4км, KAGRA составляет 3км [2]. Чувствительность современных установок достигла уровня, позволяющего регулярно фиксировать события слияния черных дыр и нейтронных звезд.

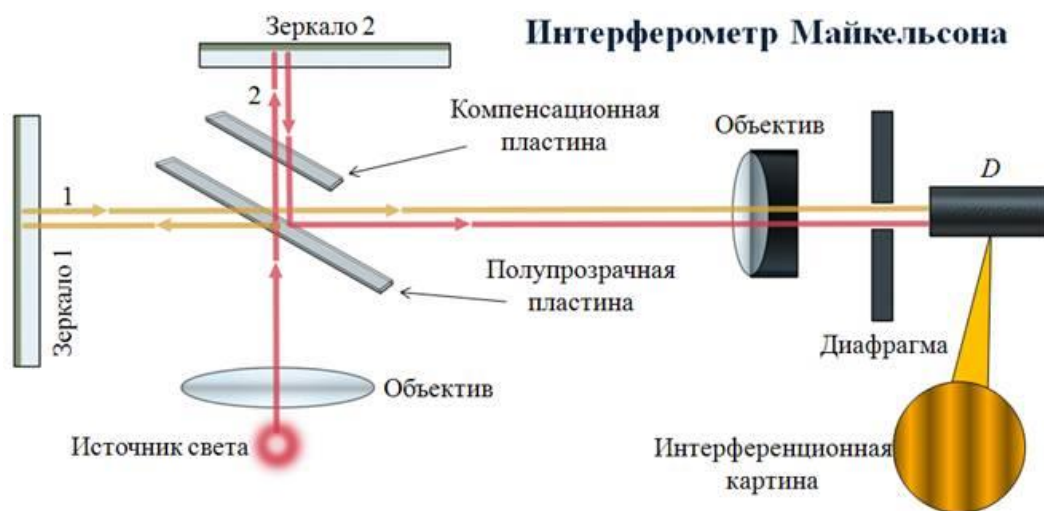


Рисунок 2 - Интерферометр Майкельсона

Влияние гравитационно-волновой астрономии на понимание устройства Вселенной трудно переоценить. Регистрация сигналов от слияния компактных объектов предоставила ученым уникальные данные о физике экстремальных состояний материи, эволюции звездных систем и скорости расширения Вселенной, массы источников составляют от 10М до 100М, а расстояние до источников составляет сотни мегапарсек [3]. Астрономия гравитационных волн позволила проверить предсказания общей теории относительности в режиме сильных полей, где гравитация проявляет себя наиболее ярко. Данная область знаний продолжает стремительно расширяться, трансформируя представления человечества о космосе и открывая ранее неизвестные классы астрофизических объектов [4, 5]. Накопленная статистика событий позволяет уточнять модели формирования галактик и распределения темной материи.

Ключевым фактором, ограничивающим чувствительность наземных детекторов, является наличие различных шумов: сейсмических, гравитационно-градиентных, фотонных и, в особенности, тепловых, например, влияние теплового шума около 50Гц [2]. Тепловые флуктуации в зеркалах и элементах подвеса приводят к хаотическим смещениям пробных масс, маскирующим полезный сигнал.

Помимо лазерной интерферометрии (рис. 3), научное сообщество продолжает развивать иные подходы к регистрации гравитационного излучения. Одним из перспективных направлений считается использование резонансных детекторов нового типа, работающих на ультразвуковых частотах в диапазоне от 10кГц – 1 МГц [6, 7]. Идея восходит к первым экспериментам Джозефа Вебера, однако современные реализации используют значительно более совершенные сенсоры и методы обработки сигнала.

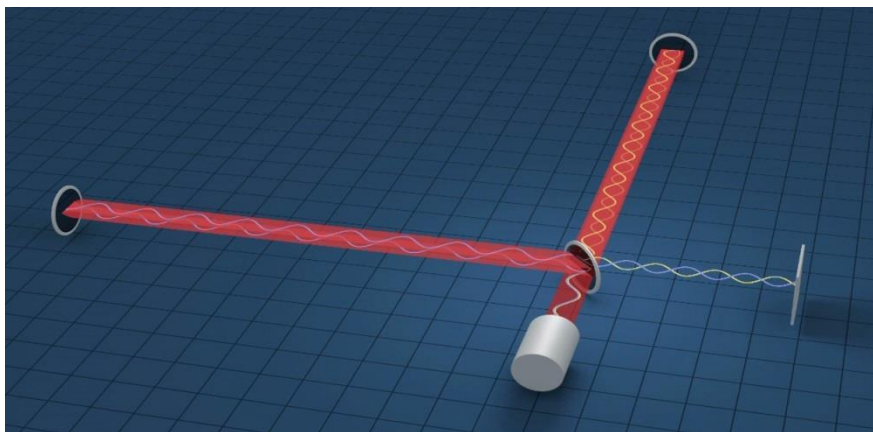


Рисунок 3 – Лазерная интерферометрия

Задачей экспериментальной гравитации выступает не только прием, но и генерация гравитационных волн в лабораторных условиях. Классическая формула квадрупольного излучения показывает, что для генерации волн заметной амплитуды требуются астрофизические массы и скорости. Однако существуют теоретические модели, предлагающие использовать электромагнитные системы для создания высокочастотных гравитационных волн.

Метод генерирования гравитационных волн посредством системы стоячих электромагнитных волн основывается на эффекте Герценштейна, описывающем превращение фотонов в гравитоны и обратно во внешнем магнитном поле. Создание мощных резонансных электромагнитных полей в ограниченном объеме может приводить к генерации гравитационного излучения на частотах, соответствующих частоте электромагнитного поля [8].

Отметим, изучение атмосферных гравитационных волн имеет важное значение для прогнозирования погодных условий, понимания процессов переноса импульса в атмосфере и обеспечения безопасности полетов авиации. Радиозондирование остается одним из наиболее эффективных методов дистанционного мониторинга волновой активности в различных слоях атмосферы [9].

Будущее экспериментальной гравитационной физики неразрывно связано с созданием детекторов следующего поколения. Проекты, такие как Einstein Telescope в Европе и Cosmic Explorer в США, предполагают строительство подземных интерферометров с длиной плеч в десятки километров, ожидаемый рост чувствительности повысится примерно в 10 раз по сравнению с детекторами нынешнего поколения [10].

Таким образом, современные методы измерения гравитационных волн представляют собой сложный комплекс технологий, объединяющий достижения в области лазерной физики, вакуумной техники, материаловедения и систем управления. Переход от первых попыток детектирования к регулярным наблюдениям астрофизических событий ознаменовал начало новой эры в изучении Вселенной. Дальнейшее развитие технологий, включающее внедрение криогенных систем, использование квантовых методов подавления шума и выход в космическое пространство, обещает значительно увеличить чувствительность инструментов.

Список литературы:

1. Гибадуллин, А. А. Гравитоны и гравитационные волны, гравитоны как дискретная проекция гравитационных волн / А. А. Гибадуллин // Академическая публицистика. – 2023. – № 12-1. – С. 32-35..
2. Вятчанин, С.П, Лазерная гравитационно-волновая антенна. Большая российская энциклопедия [Электронный ресурс]. URL: <https://bigenc.ru/c/lazernaia-gravitatsionno-volnovaia-antenna-ea7f35> (дата обращения: 28.02.2023).
3. Иванов, И. LIGO поймала новые всплески гравитационных волн // Новости науки на «Элементах» // Астрофизика, Черные дыры, Физика [Электронный ресурс]. URL: https://elementy.ru/novosti_nauki/432777/LIGO_poymala_novye_vspleski_gravitatsionnykh_voln (дата обращения: 20.06.2016).
4. Зубец, В. В. Гравитационные волны: обсуждение недавних открытий и влияния астрономии гравитационных волн на наше понимание Вселенной / В. В. Зубец // Современные исследования и тренды в науке: сборник статей Международной научно-практической конференции, Пенза, 25 января 2024 года. – Пенза: Наука и Просвещение (ИП Гуляев Г.Ю.), 2024. – С. 12-14. – EDN VEOHPU.
5. Гальченко, Л. Д. Измерение механических потерь в соединениях элементов подвесов пробных масс криогенных детекторов гравитационных волн / Л. Д. Гальченко, М. В. Тимохин, В. П. Митрофанов // Пространство, время и фундаментальные взаимодействия. – 2025. – № 1(50). – С. 75-78. – DOI 10.17238/issn2226-8812.2025.1.75-78.
6. Новый метод регистрации гравитационных волн открывает миллигерцевый диапазон. [Электронный ресурс] URL: <https://dzen.ru/a/aOK0fJjuDC-3yFLB> (дата обращения: 06.10.2025).
7. Чернобай, И. А. Развитие возможностей ультразвукового метода детектирования гравитационных волн / И. А. Чернобай // Deutsche Internationale Zeitschrift für Zeitgenössische Wissenschaft. – 2021. – № 23. – С. 23-36. – DOI 10.24412/2701-8369-2021-23-23-36.
8. Метод генерирования гравитационных волн посредством системы стоячих электромагнитных волн / А. Н. Морозов, И. В. Фомин, В. О. Гладышев [и др.] // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Серия Естественные науки. – 2022. – № 6(105). – С. 90-105. – DOI 10.18698/1812-3368-2022-6-90-105.

9. Губенко, В. Н. Развитие методов исследования внутренних гравитационных волн в атмосфере Земли с помощью радиозондовых измерений / В. Н. Губенко, И. А. Кириллович // Всероссийские открытые Армандовские чтения. Современные проблемы дистанционного зондирования, радиолокации, распространения и дифракции волн: материалы Всероссийской открытой научной конференции, Муром, 23–25 июня 2020 года / Научный совет ОФН РАН по распространению радиоволн. – Муром: Муромский институт (филиал) ФГОУВО «ВладГУ им. А.Г. и Н. Г. Столетовых», 2020. – С. 85-91.

10. Будущие проекты детекторов | Астрофизика. Учебник // Physics42.ru. [Электронный ресурс]. URL: <https://physics42.ru/tutorials/astrofizika/budushchie-proekty-detektorov/>