

УДК 530.122.1

**Иван Петрович Охрименко<sup>1</sup>, Николай Николаевич Кольчевский<sup>2</sup>,  
Павел Васильевич Петров<sup>3</sup>**

<sup>1</sup>аспирант каф. физической электроники и нанотехнологий  
Белорусского государственного университета

<sup>2</sup>канд. физ.-мат. наук, доц. каф. физической электроники и нанотехнологий  
Белорусского государственного университета

<sup>3</sup>ст. преподаватель каф. физической электроники и нанотехнологий  
Белорусского государственного университета

**Ivan Ohrymenko<sup>1</sup>, Nikolai Kolchevsky<sup>2</sup>, Pavel Petrov<sup>3</sup>**

<sup>1</sup>Postgraduate Student of the Department of Physical Electronics and Nanotechnology  
at the Belarusian State University

<sup>2</sup>Candidate of Physical and Mathematical Sciences,  
Associate Professor of the Department of Physical Electronics and Nanotechnology  
at the Belarusian State University

<sup>3</sup>Senior Lecturer, of the Department of Physical Electronics and Nanotechnology  
at the Belarusian State University  
e-mail: [ivan.ohrymenko@gmail.com](mailto:ivan.ohrymenko@gmail.com)

## ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ДЕТЕКТОРА ГРАВИТАЦИОННЫХ ВОЛН LIGO

*Рассмотрены функционирующие детекторы гравитационных волн и проекты разрабатываемых детекторов. Предложена модель космического детектора гравитационных волн на основе системы ортогональных геостационарных спутников. Предложена модификация детектора гравитационных волн на основе интерферометра Майкельсона с осциллирующим и отражающими зеркалами. Разработана программа LIGO-RM, моделирующая работу детектора гравитационных волн с осциллирующими зеркалами с функцией интерактивного управления численным экспериментом, имитацией распространения волн в интерферометре и анимацией движения зеркал. Обсуждаются принципы имитационного моделирования детектора гравитационных волн.*

### Simulation Modelling of the Gravitational Wave Detector Ligo

*The operating gravitational waves detectors and projects of the developing detectors are considered in this paper. A model of a space gravitational wave detector based on a system of orthogonal geostationary satellites is proposed. The paper introduces modification of the gravitational wave detector based on the Michelson interferometer with oscillating reflecting mirrors. The LIGO-RM software simulating the operation of the gravitational wave detector with oscillating mirrors with the function of interactive control of a numerical experiment, imitation of wave propagation in an interferometer and animation of mirror movement available has been developed. The simulation modeling of the gravitational wave detector principles are discussed.*

### Введение

Вопрос природы взаимодействия тел без посредства чего-либо и без физического контакта беспокоит ученых еще со времен Ньютона. После успеха в теории электромагнитного (ЭМ) поля, где тела взаимодействуют между собой без видимого контакта, Джеймс Клерк Максвелл рассуждает о применении сути теории поля к теории гравитации [1]. Теория поля оказалась весьма успешной и популярной, что дало толчок развитию теории гравитации: в 1893 г. известный физик Оливер Хэвисайд получил аналитическое решение гравитационного аналога уравнений Максвелла в виде волн [2; 3]. А в работе французского физика Генри Пуанкаре впервые появляется термин «Гравитационные волны» (фр. *Ondes Gravifiques*) [4]. Пуанкаре рассматривал проблему с точки зрения релятивизма и полагал, что гравитационное поле будет основано на принципе близкодействия. Эйнштейн опубликовал две работы по гравитационным волнам (ГВ) в 1911 и 1918 гг. [5; 6]. Во второй работе в рамках общей теории относительности

(ОТО) гравитация определяет решетку в пространстве-времени, и требуется 10 тензорных уравнений для описания гравитационного поля, что делает его теорию более сложной, чем векторная динамическая теория электромагнитного поля Максвелла.

В конце 1950-х гг. совместная работа физиков Германа Бонди, Феликса Пирани, Ивора Робинсона и польского ученого Анджея Траутмана окончательно установила реальность гравитационных волн в ОТО [7–14]. Потребовалось еще 60 лет теоретического, экспериментального и инструментального прогресса, прежде чем ученые смогли непосредственно обнаружить гравитационные волны и исследовать их свойства в реальном мире [15]. Реализация гравитационных детекторов, действительно способных зарегистрировать гравитационные волны, стала возможной лишь в XX в. За «решающий вклад в детектор LIGO и наблюдение гравитационных волн» была присуждена Нобелевская премия 2017 г. в области физики трем ученым: Кипу Торну (CalTech), Райнеру Вайссу (MIT) и Барри Бэришу (CalTech) [16]. По состоянию на декабрь 2019 г. обсерватория LIGO зарегистрировала 50 всплесков гравитационных волн [17].

### Детекторы гравитационных волн

Наибольшее распространение получили два типа наземных детекторов гравитационных волн:

- 1) массивный цилиндр длиной от 1 до 3 метров (рисунок 1), регистрирующий низкочастотные механические колебания (Weber bar) – резонансный детектор [18];
- 2) лазерный интерферометр [19].

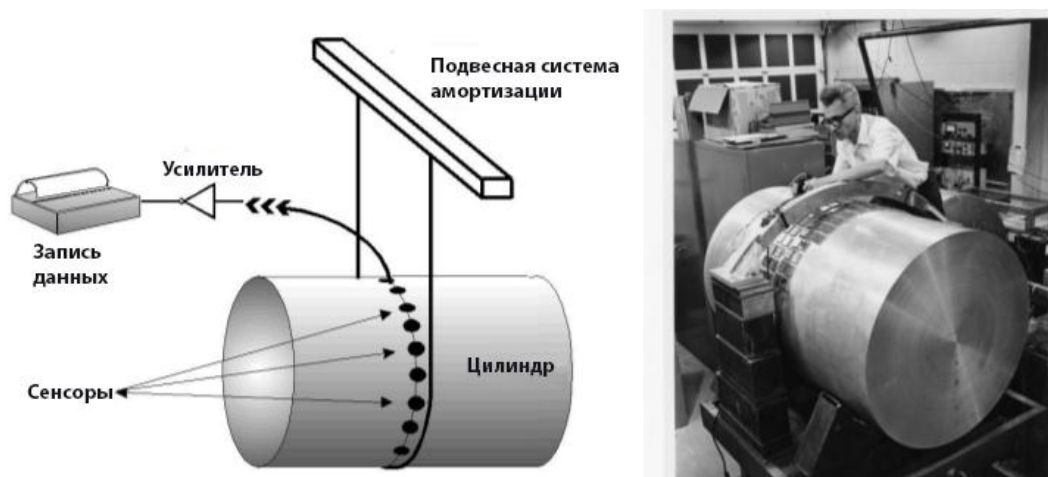


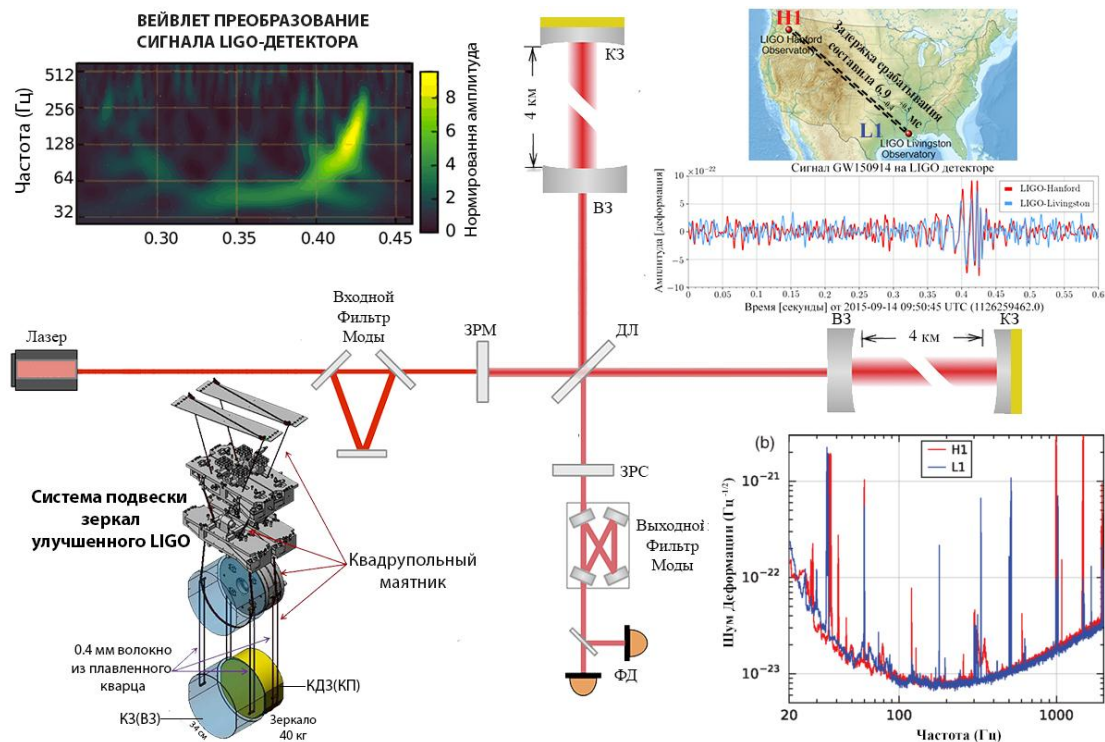
Рисунок 1. – Схема детектора гравитационных волн механического типа («Вебер бар») и Дж. Вебер с разработанным им первым детектором (1965 г.)

Амплитуда возмущений, вызванных гравитационной волной от реальных астрономических источников, обратно пропорциональна расстоянию до источника и является малой величиной порядка  $1 \cdot 10^{-21}$  и меньше. Соответственно, основной проблемой детекторов первого типа являются тепловые колебания, а в случае детекторов второго типа – сейсмические [20]. В 1965 г. Дж. Вебер из университета Мэриленда построил детектор: цилиндрический стержень размером 1 м × 2 м и весом 1,5 т, изготовленный из твердого алюминия. Идея эксперимента заключалась в следующем: гравитационная волна сжимала и растягивала «стержень Вебера», вызывая вибрации, которые при совпадении с резонансной частотой стержня вызывали бы измеримые возбуждения. В 1969 г. Вебер объявил, что он обнаружил гравитационные волны на двух подобных установках, разделенных на 1 000 км: в Чикаго и Мэриленде [21]. Однако эти результа-

ты не были воспроизведены другими экспериментальными группами, а амплитуда заявленных сигналов была на несколько порядков выше, чем предсказано для предположительных астрофизических источников. В результате на сегодняшний день физическое сообщество подвергает сомнению, что полученные Вебером сигналы являются следствием гравитационных волн [22; 23]. Экспериментальная работа и методы Вебера привлекли внимание многих ученых. В частности, Райнер Вайсс в 1972 г. написал 23-страничную заметку в одном из ежеквартальных информационных журналов Массачусетского технологического института (MIT), в которой впервые подробно описана экспериментальная установка и проанализированы источники шума лазерного интерферометра, способного обнаруживать и регистрировать гравитационные волны с амплитудой порядка  $1 \cdot 10^{-21}$ , что впоследствии станет основой лазерной интерферометра и гравитационно-волновой обсерватории (LIGO) [24].

### LIGO-детектор

LIGO (*Laser-Interferometer Gravitational-wave Observatory*) – крупнейшая в мире гравитационно-волновая обсерватория. LIGO обсерватория построена в 2002 г. и состоит из двух детекторов второго типа, разнесенных в разные концы Соединенных Штатов Америки на 3 002 км: один в Ливингстоне (Луизиана), а другой в Хэнфорде (Вашингтон). LIGO использует физические свойства света (рисунок 2) и самого пространства для обнаружения гравитационных волн. Проект финансируется Национальным научным фондом США, управляется CalTech и MIT.



*КЗ – концевое зеркало; КДЗ – концевое дублирующее зеркало; ВЗ – входное зеркало; КП – корректирующая пластина; ДЛ – делитель луча; ЗРМ – зеркало рециркуляции мощности; ЗРС – зеркало рециркуляции сигнала; ФД – фотодетекторы*

**Рисунок 2. – LIGO обсерватория, ее местоположение, график ее чувствительности и данные первой зарегистрированной гравитационной волны GW150914**

Детекторы LIGO представляют из себя модернизированный интерферометр Майкельсона за счет добавления резонаторов Фабри – Перо (рисунок 2) в каждое из

плеч интерферометра, что фактически увеличило оптический хода луча с 4 км до 300 км. Основа интерферометра Майкельсона включает в себя (рисунок 2):

- 1) источник – лазер;
- 2) делитель луча ДЛ;
- 3) два перпендикулярных плеча, по которым распространяются лучи;
- 4) фотодетектор ФД, на котором два луча смешиваются обратно в один.

Идея эксперимента заключается в следующем: когда гравитационная волна проходит через детектор, растяжение и сжатие пространства заставляет плечи интерферометра удлиняться и укорачиваться в силу поляризации ГВ, что приводит к изменению в интерференции между волнами лазера [25]. Более детальную информацию можно найти в публикации [26]. Весь проект LIGO детектора обошелся примерно в \$ 820 млн.

Наблюдательный запуск обсерватории LIGO с 2002 по 2010 г. результатов не дал. После этого его работа была приостановлена до 2015 г. для внедрения ряда усовершенствований. Сразу после запуска усовершенствованного детектора, 14.09.2015, была задетектирована первая ГВ, названная *GW150914* [15; 27]. На сегодняшний день функционируют три гравитационно-волновые обсерватории: LIGO (USA), Virgo (Italy) и KAGRA (Japan) [28]. Данные детекторы относятся ко второму поколению ГВ-детекторов, но уже ведутся перспективные разработки будущих детекторов третьего поколения и космических детекторов гравитационных волн (таблица 1). Совместный запуск трех обсерваторий планируется на 2020–2021 гг. [29].

Таблица 1. – Классификация детекторов и планируемые даты запуска

Первое поколение	Второе поколение	Третье поколение (2030-е гг.)	Космические обсерватории
Weber bar (США, 1965)	GEO 600 (Германия, 2010)	«Телескоп Эйнштейна» (Евросоюз)	DECIGO, B-DECIGO (Япония, 2027)
	Усовершенствованный LIGO (США, 2015)		Taiji (Китай, 2030)
	Усовершенствованный Virgo (Италия, 2016)	«Космический исследователь» (Евросоюз)	LISA (Евросоюз, 2034)
	KAGRA (LCGT, Япония, 2020)		TianQin (Китай, 2035)
	IndIGO (LIGO, Индия, 2023)		

Наземные детекторы ГВ (LIGO-детектор и др.) в основном работают в области частот гравитационных волн от 10 Гц до 10 кГц. Смещение рабочего диапазона в сторону низких частот достигается увеличением длины плеч лазерного интерферометра. Переход к размещению подобного детектора в космическом пространстве сместит рабочий диапазон в сторону низких частот: между 0,1 мГц и 1 Гц (LISA). Размещение ГВ-детектора в космосе открывает возможность для обнаружения широкого диапазона астрофизических источников, например, ультракомпактных бинарных звезд, слияния сверхмассивных черных дыр и закручивающихся объектов, имеющих экстремальные массовые отношения.

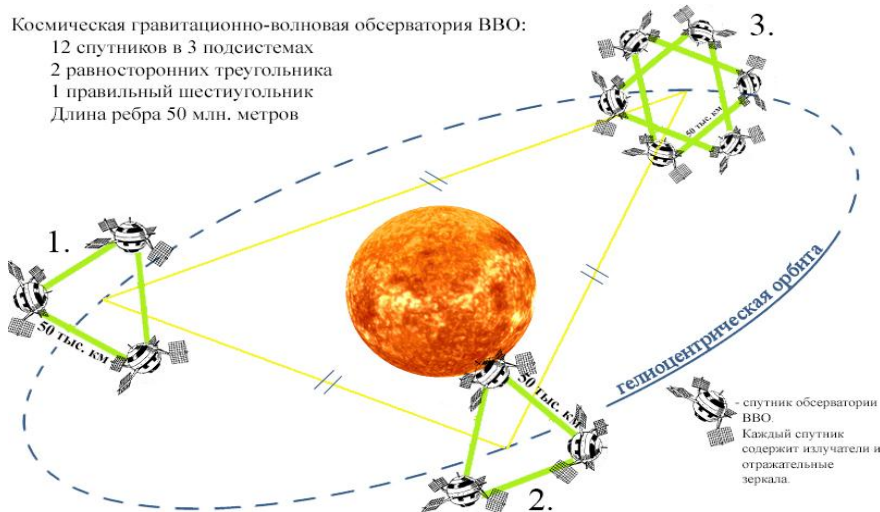
«Космический исследователь» (CE) – проект наземной гравитационно-волновой обсерватории третьего поколения. Космический исследователь имеет конфигурацию LIGO с длиной плеч 40 км. Это значительно повысит чувствительность обсерватории и гипотетически позволит наблюдать слияния первых черных дыр во Вселенной [30; 31].

«Телескоп Эйнштейна» (ET), или обсерватория Эйнштейна, – это проект Евросоюза. Он разрабатывается для проверки теории сильного поля в общей теории относительности и для расширения спектра детектирования источников ГВ. Детектор будет располагаться под землей, длина плеч детектора составит 10 км. Плечи образуют равносторонний треугольник, в каждом углу будет по два вложенных детектора: один рассчитан на высокие частоты от 10 Гц до 10 кГц – второй на низкие частоты от 1 до 250 Гц. Испытательный комплекс, называемый ET-Pathfinder, будет построен в Маастрихтском университете в Нидерландах. В 2021–2022 г. будет объявлено местоположение телескопа Эйнштейна [32].

«Лазерная интерферометрическая космическая антенна» (LISA) – проект Европейского космического агентства (ESA). Концепция LISA представляет собой систему из трех космических аппаратов, расположенных в равностороннем треугольнике с плечами длиной 2,5 млн км и находящихся на гелиоцентрической орбите в точках Лагранжа [33; 34].

«Интерферометрическая гравитационно-волновая обсерватория Децигерца» (DECIGO, B-DECIGO, Япония) – два проекта для работы в космическом пространстве. Название детектора говорит о полосе частот 0,1–10 Гц. Полоса частот находится между полосой частот детекторов LIGO и LISA. Конструкция детектора подобна LISA: три спутника в треугольном расположении. Первый проект – длина плеч 1000 км. Второй проект (B-DECIGO) – длина плеч 100 км на околоземной орбите со средней высотой 2 000 км [35; 36].

«Наблюдатель Большого Взрыва» (BBO) – проект-преемник LISA от Европейского космического агентства (ESA). Основная научная цель – наблюдение реликтовых гравитационных волн, излучившихся в результате «Большого Взрыва». Полоса частот детектора перекроет спектры детекторов LIGO, LISA, DECIGO. Его предельная чувствительность будет определяться мощностью лазеров и корреляцией сигналов с другими интерферометрами, которые будут размещены вокруг Солнца. Космическая обсерватория BBO состоит из двенадцати космических аппаратов, разбитых на системы по три и шесть спутников, равномерно распределенных на солнечной орбите (каждые 120°) (рисунок 3). Системы представляют из себя спутники, расположенные в вершинах двух равносторонних треугольников и одном правильном шестиугольнике соответственно (рисунок 3). Длина плеч составит около 50 тыс. км. Отдельные спутники будут отличаться более мощными лазерами в сравнении с LISA [36; 37].



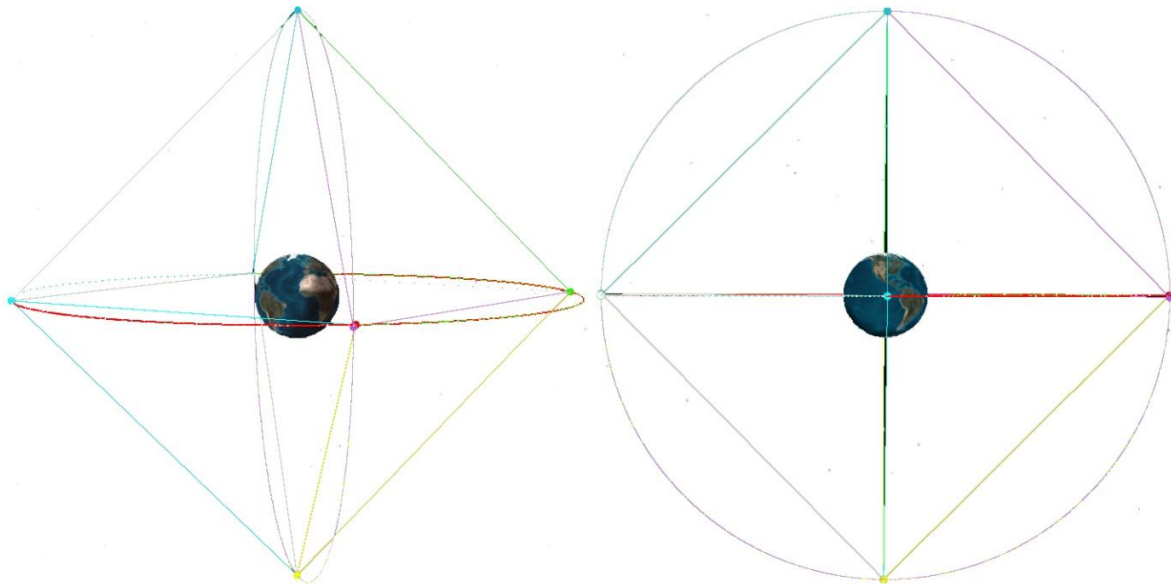
**Рисунок 3. – Конфигурация космического детектора гравитационных волн Европейского космического агентства, именуемого «ВВО» (англ. *Big Bang Observer*)**

Обнаруженные гравитационные волны уже успели оказать большое влияние на фундаментальную физику, астрофизику и ядерную физику. Ожидается, что в ближайшие десятилетия будут получены важные научные результаты в теории гравитационного поля. Например, в США запатентован генератор высокочастотных гравитационных волн [38].

**Модель спутниковой системы**

Космос – пространство, в котором можно разместить детектор огромных размеров и получить доступ к областям спектра гравитационных волн, недоступных для LIGO-детекторов, размещенных на Земле. К другим преимуществам можно отнести сверхнизкие давления и отсутствие сейсмических вибраций. Для LIGO-детекторов наземного типа характерна сложная и затратная система глубокого вакуума и амортизации.

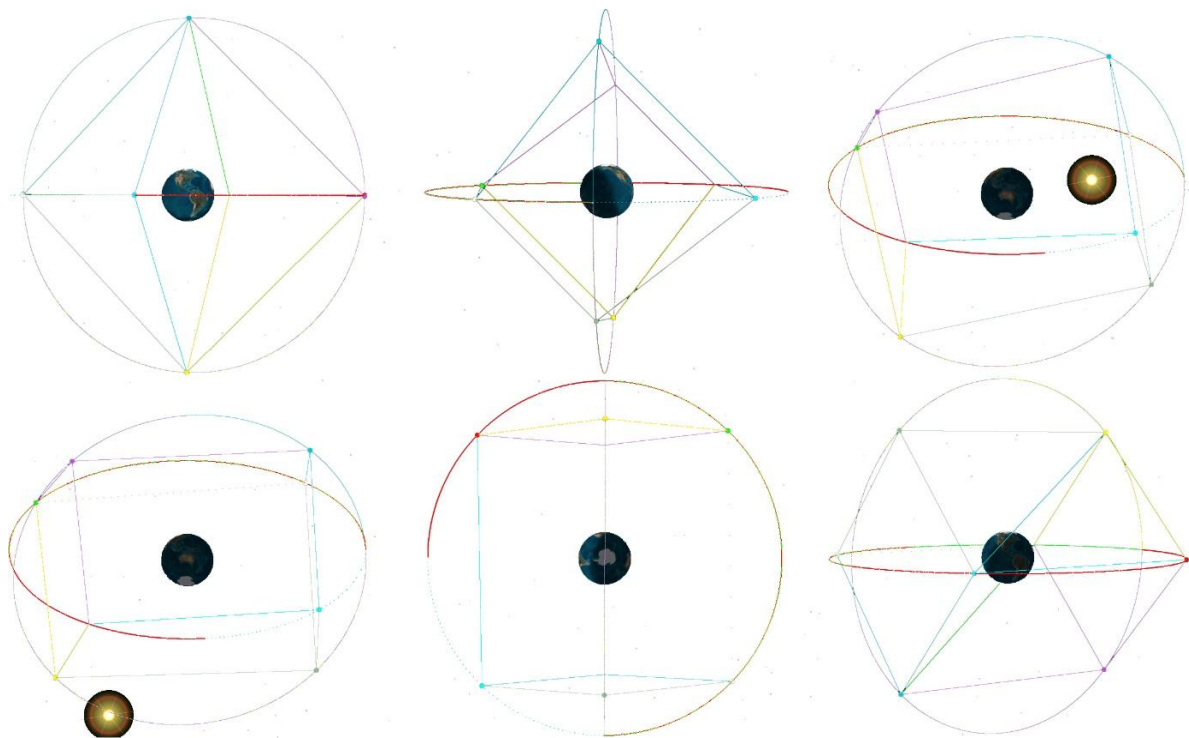
В качестве космического детектора ГВ может выступать космическая измерительная система спутников, расположенная на орбитах планет, естественных спутниках, планетоидах. Для постоянного взаимодействия с космической измерительной системой возможно использовать геостационарные спутники. Геостационарный тип орбит обеспечивает постоянную связь с наземным комплексом для передачи данных и доступа к управлению детектором ГВ. Подразумевается наличие наземной составляющей спутникового детектора ГВ: центр управления, обработки и передачи данных высокопотребляемой энергией. Для расширения диаграммы чувствительности детектора LIGO предложена система из восьми спутников, расположенных на ортогональных геостационарных орбитах. Как показано на рисунке, первые четыре спутника располагаются на геостационарной орбите, образуя квадрат, еще четыре спутника расположены на ортогональной орбите в углах квадрата (рисунок 4).



**Рисунок 4. – Модель космического детектора гравитационных волн в виде системы из восьми спутников, расположенных на двух круговых ортогональных геостационарных орбитах (спутники образуют фигуру октаэдра)**

Четыре спутника выводятся на одну орбиту и отстоят друг от друга на одинаковом расстоянии. В первом приближении, т. к. спутники находятся на одной орбите, они вращаются вокруг планеты с одинаковой угловой скоростью. Данный факт означает, что каждые три спутника из четырех, расположенных на одной орбите, образуют пер-

пендикулярные плечи интерферометра по типу Майкельсона. Всего получается четыре возможных детектора для одной орбиты: каждая вершина является угловой станцией детектора ГВ подобно LIGO-детектору. Добавление второй орбиты, ортогональной первой, обеспечивает увеличение числа интерферометров и широкую диаграмму направленности всей системы. Орбитальное вращение приводит к изменению взаимного расположения спутников. Взаимное расположение спутников и их орбитальное движение моделировалось в специализированной программе AGI STK, которая часто используется учеными и инженерами в производстве космических аппаратов. Расположение спутников может образовать правильные фигуры: куб и октаэдр. Эволюция геометрических фигур показана на рисунке 5. Правильные фигуры характеризуются большим числом интерферометров типа LIGO. Конфигурация в виде куба сразу дает до 24 классических интерферометров LIGO, однако возможно создать большее число комбинаций интерферометров с неперпендикулярными плечами.



**Рисунок 5. – Эволюция геометрических фигур, выстраиваемых системой спутников космического детектора, построенных в программе AGI STK (системы спутников периодически образуют правильные фигуры – октаэдр и куб)**

Предлагается размещение не менее трех источников излучения и трех антенн на каждом из спутников. Рассмотренная система из спутников позволяет в один момент времени иметь сразу несколько интерферометров различной ориентации в пространстве, что повышает чувствительность и достоверность детектирования гравитационных волн.

Данную систему можно развернуть на геостационарных орбитах (геоорбитах) любой из планет Солнечной системы. Очевидно, что интерес представляет наибольший радиус геоорбит, т. к. это даст большие длины плеч интерферометра, что напрямую связано с чувствительностью ГВ детектора и его спектром охвата источников. В таблице 2 представлены результаты расчета геостационарных орбит для восьми планет Солнечной системы по формуле:

$$R = \sqrt[3]{\frac{G \cdot M_3}{\omega^2}} \quad (1)$$

Таблица 2. – Значения радиусов геостационарных орбит и соответствующих им длин плеч интерферометра космического детектора гравитационных волн в виде системы из восьми спутников, размещенных на данных орбитах, для планет Солнечной системы

Планета	Масса, $M_3$	Время вращения, с	Угловая скорость, рад/с	G	$M_3$ , кг	Радиус георбит, м	Плечо интерферометра, км
Меркурий	0.055	$5.1 \cdot 10^6$	$1.237 \cdot 10^{-6}$	$6.67 \cdot 10^{-11}$	$5.97 \cdot 10^{24}$	$243 \cdot 10^6$	$344 \cdot 10^3$
Венера	0.815	$21 \cdot 10^6$	$2.993 \cdot 10^{-7}$			$1537 \cdot 10^6$	$2172 \cdot 10^3$
Земля	1	$0.0861 \cdot 10^6$	$7.294 \cdot 10^{-5}$			$42.2 \cdot 10^6$	$59.6 \cdot 10^3$
Марс	0.107	$0.0887 \cdot 10^6$	$7.088 \cdot 10^{-5}$			$20.4 \cdot 10^6$	$28.9 \cdot 10^3$
Юпитер	318	$0.0358 \cdot 10^6$	$176 \cdot 10^{-6}$			$16.0 \cdot 10^6$	$227 \cdot 10^3$
Сатурн	95	$0.0384 \cdot 10^6$	$164 \cdot 10^{-6}$			$112 \cdot 10^6$	$159 \cdot 10^3$
Уран	14	$0.0622 \cdot 10^6$	$101 \cdot 10^{-6}$			$81.8 \cdot 10^6$	$116 \cdot 10^3$
Нептун	17	$0.0580 \cdot 10^6$	$108 \cdot 10^{-6}$			$83.3 \cdot 10^6$	$118 \cdot 10^3$

Из таблицы 2 видно, что самый большой радиус орбиты у планеты Венера: он составляет 1 млн 536 тыс. 477 км. Соответственно, плечо интерферометра будет в корень из двух раз больше и составит 2 млн 172 тыс. 906 км. Для сравнения: длина плеча интерферометра для Юпитера составляет 226 тыс. км, а у LIGO-детектора длина плеча составляет лишь 300 км.

Для регистрирования гравитационных волн Солнца гравитационный детектор необходимо размещать как можно ближе к исследуемому объекту, т. е. на орбите Меркурия. Для регистрации гравитационных волн из дальнего космоса необходимо гравитационный детектор размещать как можно дальше от любых источников возмущений, т. е. на орбите планеты Нептун или планетоида Плутон.

Период вращения планеты Нептун вокруг Солнца составляет 165 лет, а период вращения вокруг своей оси – 15 ч 57 мин 59 с. Радиус георбиты и длина плеча интерферометра – 83 тыс. км и 117 тыс. км соответственно.

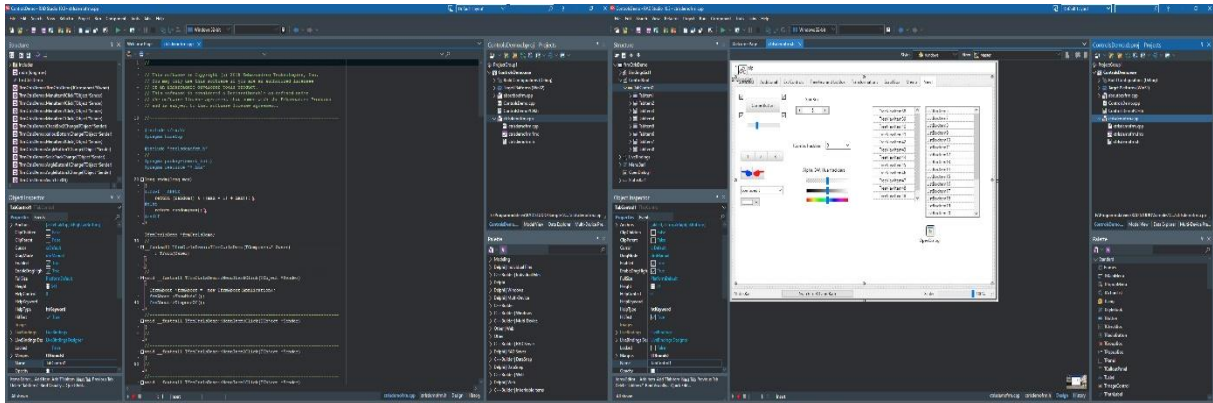
Для планеты Меркурий период вращения вокруг Солнца составляет 88 дней, а период вращения вокруг своей оси – 58 дней. Радиус георбиты 243 тыс. км, а длина плеч интерферометра – 344 тыс. км.

### Моделирование детектора гравитационных волн LIGO-RM

Исходя из высокой стоимости детекторов ГВ, появляется необходимость в программном обеспечении, которое моделирует детекторы гравитационных волн и рассчитывает чувствительность детектора в зависимости от конфигурации.

Для изучения работы ГВ-детектора и численной оценки его разрешающей способности разработано программное обеспечение «LIGO-RM». Программа написана на языке C++ в кроссплатформенной среде разработки Embarcadero RAD Studio, запускается на ОС Windows, но также может быть скомпилирована для ОС Mac, Linux и на мобильные платформы Android и iOS. В среде разработки Rad Studio можно выделить две рабочих области (рисунок 6), в которых ведется основная разработка – это редактор кода и графический редактор, или GUI разрабатываемой программы. Эти рабочие области напрямую связаны, т. к. любой базовый класс имеет графическое пред-

ставление, что значительно упрощает разработку графического интерфейса. Поддержка нескольких языков программирования делает среду разработки Rad Studio привлекательной для разработки научного программного обеспечения.



**Рисунок 6. – Снимок среды разработки Embarcadero Rad Studio: слева – редактор кода, справа – графический редактор интерфейса разрабатываемой программы**

Приложение «LIGO-RM» позволяет управлять конфигурацией интерферометра, моделировать сигнал детектора, а также проводить численные эксперименты для оценки чувствительности детектора. При запуске программы пользователь вводит исходные параметры детектора гравитационных волн и параметры гравитационной волны. В приложении «LIGO-RM» пользователь может задавать и контролировать следующие параметры: частоту излучения в детекторе, длины плеч интерферометра, количество полуволн в плече, положение зеркал, запуск колебания зеркала по заданному закону с заданной частотой, выбор закона, по которому происходит колебание зеркала, положение зеркал с точностью фазы излучателя от 0 до  $2\pi$ , запуск гравитационной волны, тип гравитационной волны, параметры выбранной ГВ.

Для расчета фазового сдвига волны источника излучения в детекторе, вызванного деформацией плеч интерферометра от взаимодействия с ГВ, предлагается следующее выражение:

$$T = t_0 \cdot \left( 1 + \frac{\int_0^T g(t) dt}{T} \right), \quad (2)$$

где  $t_0$  – время обычное, или неизменное, которое волна излучателя затрачивает на прохождение плеча интерферометра при отсутствии возмущающей гравитационной волны,  $g(t)$  – функция комплексной амплитуды гравитационной волны,  $T$  – фаза волны в момент ее возврата на делитель луча. Формула (2) используется в LIGO-RM для проведения численных экспериментов.

Приложение «LIGO-RM» имеет графический интерфейс GUI (рисунок 7), что значительно повышает эффективность проведения численного эксперимента (моделирования). Графический интерфейс позволяет оперативно управлять настройками эксперимента, изменяя параметры детектора за счет ввода новых значений или использования интерактивных функций: перетаскивания зеркал с помощью мыши, поворота регуляторов управляющих параметров и т. д. Для отображения результатов численного эксперимента и образовательной части приложение поддерживает интерактивный режим с анимацией, отображающий распространение излучения в плечах интерферометра, движение зеркал, а также построение графиков в реальном времени, имитируя работу осциллографа. Все это дает возможность пользователю наблюдать работу детектора с возможностью непосредственного вмешательства.



Рисунок 7. – Снимок окна приложения «LIGO-RM»

После того как пользователь ввел параметры, программа производит расчет анимации и физический расчет интерференции сигналов. В LIGO-RM анимировано распространение волны в интерферометре до зеркал и обратно, положение зеркал и их движение. Пользователь может динамически управлять положением зеркал и характером их движения. Произведенные изменения сказываются на сигнале детектора и позволяют визуализировать принципы работы LIGO-детектора. Пользователь может активировать колебания зеркал по определенному закону, выбирая из «выпадающего списка» и задавать частоту колебаний. Графики законов колебания зеркал при их активации отображаются в правом нижнем углу программы. Сигналы ГВ-детектора отображаются в отдельном окне в виде построения динамических графиков в режиме реального времени с шагом, который задается пользователем (по умолчанию – 1 мс). Динамическими графиками являются: график результирующей амплитуды сигнала на детекторе, график результирующей интенсивности сигнала, графики колебания зеркал. Анимации движения зеркал и распространения волны разработаны при помощи стандартных библиотек Rad Studio, что повышает надежность кода программы.

Численные расчеты в программе являются основой для анимации. После каждого этапа расчета происходит запуск анимации. Для реализации бегущей волны в плече интерферометра схематически изображены плечи интерферометра с помощью встроенного класса и соответствующему ему графического компонента TRectangle, а для прорисовки самой волны лазера использовался класс TPath внутри компонента TLayout. Волна прорисовывается по точкам ( $x$  и  $y$ ), полученным из физического расчета, производимого внутри программы с помощью метода  $TPath \rightarrow Data \rightarrow LineTo(TPointF(float y, float x))$ , и автоматически прорисовывается в его графическом компоненте.

Интервал, с которым производится расчет, и прорисовка анимации реализуются при помощи класса TTimer, где явно задается периодичность запуска исполняемого блока кода или функции (например, 1 мс). Когда точки фронта волны достигают координат отражающего зеркала (границы графического компонента TPath), происходит отражение волны и начинается прорисовка распространения волны (волна зеленого цве-

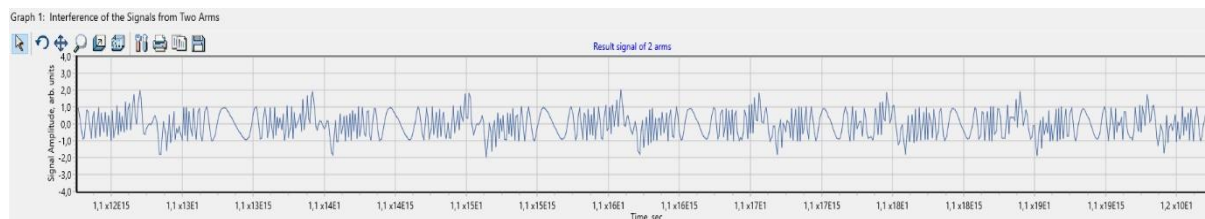
та) (рисунок 7) в обратном направлении. Цикл повторяется многократно. Все это позволяет пользователю визуализировать принцип работы детектора относительно распространения волн лазера в интерферометре. В LIGO-RM можно увидеть наложение прямых и отраженных лучей, наблюдать сдвиг фаз на детекторе (рисунок 7). Помимо этого, можно визуально наблюдать изменение длины волны источника, если пользователь изменяет частоту излучателя, и прямо увидеть, какое число полуволн укладывается в плечи интерферометра для заданных им размеров плеча. Действия пользователя на моделируемый детектор моментально отображаются графически, что помогает восприятию и пониманию, как устроен и функционирует LIGO-детектор.

Анимация колебания зеркал реализована с помощью прорисовки движения зеркала, прорисованного с помощью готового компонента `TRectangle`, где пользователь с помощью GUI просто указывает значение высоты, ширины и различные цветовые настройки. Прорисовка движения реализована с помощью встроенного класса `TFloatAnimation`, который привязывается к компоненту, для которого нужна анимация (в нашем случае `TRectangle`), и указывается переменная компонента, которая изменяется во время анимации – в нашем случае это положение зеркала: координата  $x$  или  $y$ . У компонента `TFloatAnimation` имеются встроенные законы интерполяции: *линейная, квадратичная, экспоненциальная, синусоидальная, кубическая* и др., по которым происходят изменения от начального *StartValue* до конечного *StopValue* значения анимированной переменной, и время, за которое эта переменная должна измениться. Несмотря на то, что это быстрая реализация анимации, ее недостатками является то, что нет полного контроля процесса, и если задать большое изменение переменной за минимальное время, то исчезнет гладкость кривых и полученные данные будет невозможно интерпретировать с точки зрения физики. В LIGO-RM реализованы функции, которые отслеживают курсор и нажатия клавиш мыши компьютера. Реализован обработчик событий по перемещению зеркал с помощью мыши по принципу «нажал и переместил». Это позволяет пользователю даже во время запущенной симуляции динамически изменять положение отражающих зеркал интерферометра, моделируемого ГВ-детектора. Новая длина плеч интерферометра отображается численно в окне-индикаторе. Пользователь может перемещать зеркала только в разрешенных осях. Движения зеркал изменяют сигнал детектора ГВ и отображаются на динамических графиках с частотой в 1мс. Пользователь может исследовать разнообразные колебательные движения зеркал, не останавливая численный эксперимент. Если пользователь включает опцию колебания зеркал по выбранному им закону, то LIGO-RM анимирует характер движения, что позволяет визуально соотнести характер колебаний зеркала и сигнал детектора.

Построение динамических графиков реализовано с помощью встроенной коммерческой библиотеки `TeeChart` и компонента `TTimer`. Библиотека `TeeChart` поддерживает множество встроенных функций для построения и обработки графиков. Компонент `TTimer` управляет частотой обновления графика. Ограничение компонента `TTimer` – это минимальная частота обновления, равная 1 мс. После запуска моделирования производится физический расчет интерференции детектора ГВ и данные сразу же поступают в компонент `TChart`, где отображаются сигналы детектора. При запуске колебания зеркал их координаты также передаются в другой экземпляр `TChart` и отображаются в GUI. Динамические графики передают изменения сигнала детектора с частотой в 1 мс, что значительно быстрее человеческого восприятия, и обеспечивают анимированную работу детектора ГВ.

Созданное ПО было численно протестировано на известных задачах, которые имеют аналитическое решение: 1) при разной длине плеч интерферометра наблюдался постоянный сигнал; 2) при одинаковой длине плеч сигнал был равен нулю. Анимирование тестовых задач может быть использовано для визуализации принципов работы

LIGO-детектора и для проведения численных экспериментов. На рисунке 8 показан рассчитанный в программе сигнал детектора в зависимости от колебаний зеркал.



**Рисунок 8. – График сигнала на детекторе гравитационных волн, когда оба зеркала движутся в противофазе по закону, где изменение координаты определяется законом 5-ой степени ( $x^5$ )**

### Заключение

В работе рассмотрены два вида детекторов гравитационных волн: наземные и космические. Показано, что космос является очень притягательной и перспективной площадкой для размещения будущих гравитационно-волновых детекторов.

В работе предложен космический детектор гравитационных волн в виде системы из восьми спутников, расположенных на геостационарных орбитах (рисунок 5). Такая система позволяет иметь от 4 до 24 детекторов гравитационных волн различной ориентации, функционирующих одновременно. Подобные системы могут быть основой для создания мультidetекторов и новых принципов регистрации гравитационных волн. Показаны результаты расчетов параметров георбит и параметров космического детектора для восьми планет Солнечной системы (таблица 2). Обсуждаются результаты данных расчетов. Наиболее перспективной планетой для размещения данной системы космического детектора гравитационных волн является Венера. Длина плеч такого интерферометра составит 2 млн 172 тыс. 906 км.

В работе рассмотрен новый тип детектора гравитационных волн – детектор с осциллирующими отражающими зеркалами на базе интерферометра Майкельсона. Разработано программное обеспечение «LIGO-RM», моделирующее детектор гравитационных волн с осциллирующими зеркалами и позволяющее проводить численный эксперимент. LIGO-RM имеет графический интерфейс и позволяет управлять расчетом в интерактивном режиме, не останавливая моделирования. LIGO-RM содержит наглядную часть в виде анимации распространения электромагнитных волн в интерферометре моделируемого детектора гравитационных волн и анимации движения-колебания отражающих зеркал и системы управления детектором. Интерактивная реализация позволяет пользователю влиять на параметры конфигурации детектора: положение зеркал, включение осцилляций зеркал, частоту излучателя, тонкую подстройку – и наблюдать результат на сигнале детектора в режиме реального времени. Анимирование в разработанном приложении LIGO-RM позволяет визуализировать принципы работы LIGO-детектора. Численные эксперименты по расчету сигнала детектора гравитационных волн с колеблющимися зеркалами показывают, что графики будут содержать периодические участки с высокой и низкой частотой сигнала (рисунок 8) и определяются характером движения зеркал.

### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Maxwell, J. C. A Dynamical Theory of the Electromagnetic Field / J. C. Maxwell // Phil. Trans. R. Soc. Lond. – 1865. – Vol. 155, nr VIII. – P. 459–512.

2. Heaviside, O. A Gravitational and Electromagnetic Analogy. Part I / O. Heaviside // *The Electrician*. – 1893. – Vol. 31. – P. 281–282.
3. Heaviside, O. A Gravitational and Electromagnetic Analogy. Part II / O. Heaviside // *The Electrician* 31. – 1893. – P. 359.
4. Poincare, H. Sur la dynamique de l'électron / H. Poincare // *Rend. Circ. Mat. Palermo*. – 1906. – Vol. 21, ser. 1. – P. 129–176.
5. Einstein, A. On the Influence of Gravitation on the Propagation of Light / A. Einstein // *Annalen der Physik*. – 1911. – Vol. 35. – P. 898–908.
6. Einstein, A. Gravitationswellen / A. Einstein // *Preussische Akademie der Wissenschaften Sitzungsberichte*. – 1918. – Part 1. – P. 154–167.
7. Trautman, A. Sur la propagation des discontinuités du tenseur de Riemann / A. Trautman // *CR Acad. Sci. Paris*. – 1958. – Vol. 246. – P. 1500–1502.
8. Trautman, A. Boundary conditions at infinity for physical theories / A. Trautman // *Bull. Acad. Polon. Sci., sér. sci. math., astr. et phys.* – 1958. – Vol. 6. – P. 403–406.
9. Trautman, A. Radiation and boundary conditions in the theory of gravitation / A. Trautman // *Bull. Acad. Polon. Sci., sér. sci. math., astr. et phys.* – 1958. – Vol. 6. – P. 407–412.
10. Trautman, A. On gravitational radiation damping / A. Trautman // *Bull. Acad. Polon. Sci., sér. sci. math., astr. et phys.* – 1958. – Vol. 6. – P. 627–633.
11. Trautman, A. Lectures on General Relativity / A. Trautman // *Lectures at King's College London*. – 1958.
12. Robinson, I. Spherical gravitational waves / I. Robinson, A. Trautman // *Phys. Rev. Lett.* – 1960. – Vol. 4. – P. 431–432.
13. Bondi, H. Plane gravitational waves in general relativity / H. Bondi // *Nature*. – 1957. – Vol. 179. – P. 1072–1073.
14. Bondi, H. Gravitational waves in general relativity III: Exact plane waves / H. Bondi, F. A. E. Pirani, I. Robinson // *Proc. R. Soc. London*. – 1959. – Vol. 251, Ser. A. – P. 519–533.
15. Observation of Gravitational Waves from a Binary Black Hole Merger / B. P. Abbott [et al.] // *Phys. Rev. Lett.* – 2016. – Vol. 116, iss. 6.
16. The Nobel Prize [Electronic resource] : The Nobel Prize in Physics 2017. – Mode of access: [Nobelprize.org](https://www.nobelprize.org). – Date of access: 12.12.2019.
17. LIGO NEWS [Electronic resource] : LIGO Suspends Third Observing Run (O3). – Mode of access: <https://www.ligo.caltech.edu/news/ligo20200326>. – Date of access: 01.04.2020.
18. Weber, J. Gravitational-wave-detector events / J. Weber // *Physical Review Letters*. – 1968. – Vol. 20, iss. 23. – P. 1307–1308.
19. Gertsenshtein, M. E. On the detection of low frequency gravitational waves / M. E. Gertsenshtein, V. I. Pustovoit // *JETP*. – 1962. – Vol. 43, nr 2. – P. 605–607.
20. Exploring the sensitivity of next generation gravitational wave detectors / B. P. Abbott [et al.] // *Class. Quantum Grav.* – 2017. – Vol. 34, nr 4.
21. Weber, J. Evidence for discovery of gravitational radiation / J. Weber // *Phys. Rev. Lett.* – 1969. – Vol. 22. – P. 1320–1324.
22. Kafka, P. Are Weber's Pulses Illegal? / P. Kafka. – Babson Park MA : Gravity Research Foundation, 1972.
23. Allen, W. D. Gravitational radiation experiments at the University of Reading and the Rutherford Laboratory / W. D. Allen, C. Christodoulides // *J. Phys. A Math. Gen.* – 1975. – Vol. 8. – P. 1726–1733.
24. Weiss, R. Electromagnetically coupled broadband gravitational antenna / R. Weiss // *Quarterly Report of the Research Laboratory for Electronics*. – 1972. – nr 105. – P. 54–76.

25. LIGO [Electronic resource] : Laser Interferometer Gravitational-Wave Observatory. – Mode of access: <https://www.ligo.caltech.edu/>. – Date of access: 29.05.2020.
26. Advanced LIGO [Electronic resource] : LIGO Scientific Collaboration / LIGO – Livingston : Laser Interferometer Gravitational-Wave Observatory, 2014. – Mode of access: <https://arxiv.org/ftp/arxiv/papers/1411/1411.4547.pdf>. – Date of access: 01.01.2020.
27. Cervantes-Cota, J. L. A Brief History of Gravitational Waves / J. L. Cervantes-Cota, S. Galindo-Uribarri, G. F. Smoot // Universe. – 2016. – Vol. 2, iss. 3. – P. 22–52.
28. KAGRA Observatory News [Electronic resource] : KAGRA Gravitational-wave Telescope Starts Observation. – Mode of access: <https://gwcenter.icrr.u-tokyo.ac.jp/en/archives/1381>. – Date of access: 25.02.2020.
29. Prospects for observing and localizing gravitational-wave transients with Advanced LIGO, Advanced Virgo and KAGRA / B. P. Abbott [et al.] // Living Rev Relativ. – 2018. – Vol. 21, iss. 3.
30. Cosmic Explorer: The U.S. Contribution to Gravitational-Wave Astronomy beyond LIGO / D. Reitze [et al.] // Bulletin of the American Astronomical Society. – 2019. – Vol. 51, iss. 7, id. 35.
31. Laser Interferometer Gravitational Wave Observatory. Instrument Science White Paper : LIGO-T1600119–v4 : adopted 27.10.16. – Cambridge : Technical Note : LIGO Scientific Collaboration, 2016. – 116 p.
32. Sensitivity studies for third-generation gravitational wave observatories / S. Hild [et al.] // Class. Quantum Grav. – 2011. – Vol. 28, nr 9.
33. Laser Interferometer Space Antenna : A proposal in response to the ESA call for L3 mission concepts / K. Danzmann [et al.]. – Hannover, 2017. – 41 p.
34. NGO, Revealing a hidden Universe: opening a new chapter of discovery (New Gravitational wave Observatory) : Assessment Study Report / O. Jenrich [et al.]. – Paris, 2011. – 153 p. – № ESA/SRE (2011) 19.
35. The Japanese space gravitational wave antenna – DECIGO / S. Kawamura [et al.] // J. Phys.: Conf. Ser. – 2008. – Vol. 122.
36. Laser interferometry for the Big Bang Observer / G. M. Harry [et al.] // Class. Quantum Grav. – 2006. – Vol. 23. – P. 4887–4894.
37. Yagi, K. Detector configuration of DECIGO/BBO and identification of cosmological neutron-star binaries / K. Yagi, N. Seto // Phys. Rev. D. – 2011. – Vol. 83. – 20 p.
38. High frequency gravitational wave generator [Electronic resource] : pat. US 10,322,827 B2 / Salvatore Cezar Pais. – Publ. date 18.01.2019. – Mode of access: [https://pdfpiw.uspto.gov/.piw?docid=10322827&SectionNum=1&IDKey=59C80614D29C&-HomeUrl=http://patft.uspto.gov/netacgi/nphParser?Sect1=PTO2%2526Sect2=HITOFF%2526u=%25252Fneta-html%25252FPTO%25252Fsearchadv.htm%2526r=2%2526f=G%2526l=50%2526d=PTXT%2526p=1%2526S1=\(2019\\$.PD.%2526BAND%2526%252522LIGO%252522\)%2526OS=ISD/2019%2526BAND%2526%252522LIGO%252522%2526RS=\(ISD/2019%2526BAND%2526%252522LIGO%252522\)](https://pdfpiw.uspto.gov/.piw?docid=10322827&SectionNum=1&IDKey=59C80614D29C&-HomeUrl=http://patft.uspto.gov/netacgi/nphParser?Sect1=PTO2%2526Sect2=HITOFF%2526u=%25252Fneta-html%25252FPTO%25252Fsearchadv.htm%2526r=2%2526f=G%2526l=50%2526d=PTXT%2526p=1%2526S1=(2019$.PD.%2526BAND%2526%252522LIGO%252522)%2526OS=ISD/2019%2526BAND%2526%252522LIGO%252522%2526RS=(ISD/2019%2526BAND%2526%252522LIGO%252522)). – Date of access: 01.02.2020.