

## Модель геостационарного детектора гравитационных волн

И.П. ОХРИМЕНКО, П.В. ПЕТРОВ, Н.Н. КОЛЬЧЕВСКИЙ

На сегодняшний день во всем мире функционируют 3 обсерватории, предназначенные для детектирования гравитационных волн – зарегистрировано 67 событий. Рассмотрены будущие проекты гравитационных детекторов. В работе представлена модель космического детектора гравитационных волн на основе системы геостационарных спутников «S-LIGO8R-G2». Выполнены расчеты и моделирование параметров орбит данной системы для 8 планет Солнечной системы. Выполнен расчет и анализ ключевых характеристик космического детектора гравитационных волн S-LIGO8R-G2.

**Ключевые слова:** интерферометр, гравитационные волны, спутниковые системы, космический детектор, LIGO, LISA, DECIGO.

There are 3 observatories operating around the world, designed to detect gravitational waves. 67 detections were made. Future projects of gravitational detectors are considered. A model of a space gravitational wave detector based on a system of geostationary satellites «S-LIGO8R-G2» is presented. Calculations and modeling of the orbits parameters of the system presented have been performed for 8 planets of the Solar System. The calculation and analysis of the key characteristics of the space detector of gravitational waves S-LIGO8R-G2 are presented.

**Keywords:** interferometer, gravitational waves, satellite systems, space detector, LIGO, LISA, DECIGO.

**Введение.** Впервые, о том, что гравитационное взаимодействие носит волновую природу, было предсказано О. Хэвисайдом в 1865 г., когда было получено волновое аналитическое решение для гравитационного аналога известных уравнений Максвелла из динамической теории электромагнитного поля [1]. Теорией предсказано, что гравитационные волны (ГВ) излучаются движущимися с переменным ускорением массами, и, воздействуя на тела, они вызывают относительное смещение их частей (деформацию  $\Delta L$ ) согласно поляризации волны. Было предложено множество теорий гравитации, например, [3]–[5], до всеобще принятой Общей Теории Относительности Эйнштейна, в рамках которой была описана теория гравитационного поля [6], предсказывающая существование ГВ.

Вплоть, до сентября 2015 г. ГВ оставались теоретическим аспектом. 14 сентября зарегистрирована первая ГВ в обсерватории LIGO, США – специально разработанной и построенной для детектирования ГВ [7], [8]. За «решающий вклад в детектор LIGO и наблюдение гравитационных волн» в 2017 г. была присуждена Нобелевская Премия в области физики трем ученым: Кип Торну, Барри Бэришу – CalTech и Райнер Вайссу – MIT [9]. Гравитационно-волновым детектором считается любая система пробных масс (тел) или протяженное тело и сенсор, реагирующие и записывающие малые относительные смещения масс или силы, которые их вызвали. Наибольшее распространение получили два типа наземных детекторов гравитационных волн: массивный цилиндр длиной от 1 до 3 метров, регистрирующий низкочастотные механические колебания (Weber bar) – детектор резонансного типа [10], и лазерный интерферометр, регистрирующий сдвиг интерференционных полос – детектор электромагнитного типа [11]. Реализация гравитационных детекторов, действительно способных зарегистрировать гравитационные волны, стала возможной лишь в XX веке [12], [13]. Регистрация ГВ производилась от реальных астрофизических источников больших масс (например, двух черных дыр в несколько масс Солнца), в результате процесса их столкновения-слияния. Предсказанная амплитуда ГВ от источников такого типа составляет порядка  $\Delta L/L=10^{-21}$ .

На сегодняшний день, функционируют 3 гравитационно-волновые обсерватории: LIGO (USA), Virgo (Italy) и KAGRA (Japan) [14], и зарегистрировано 67 событий ГВ во время наблюдательных запусков LIGO, а также LIGO+Virgo [15]. Запуск сети из трех ГВ обсерваторий LIGO+Virgo+KAGRA планируется на 2020–2021 гг. [16].

**Текущие разработки.** В настоящее время ведутся разработки наземных детекторов третьего поколения, а также космических детекторов гравитационных волн (таблица 1).

Таблица 1 – Разрабатываемые наземные и космические детекторы ГВ и планируемые даты запуска

Наземные детекторы ГВ		Космические детекторы ГВ	
<b>IndIGO</b> (Индия)	2023	<b>DECIGO</b> (Япония)	2027
<b>Einstein Telescope</b> (Евросоюз)	2030	<b>LISA</b> (Евросоюз)	2034
<b>Cosmic Explorer</b> (США)	2030	<b>BBO</b> (Евросоюз)	2035

Einstein Telescope (ET) и Cosmic Explorer (CE) – это проекты наземных детекторов гравитационных волн третьего поколения. Длины плеч ET составят 10 км (3 плеча), а CE – 40 км (2 плеча). Конфигурация ET отличается от LIGO-подобной конфигурации CE тем, что образует равносторонний треугольник и будет располагаться под землей. CE располагается на поверхности земли имея два перпендикулярных плеча. В 2021 или 2022 г. будет объявлено местоположение телескопа Эйнштейна.

LISA, DECIGO и BBO – это проекты космических детекторов гравитационных волн мировых лидеров в области гравитационно-волновой астрономии. Объединяющим фактором данных проектов является одинаковость конфигурации и принципа детектирования: все они представляют из себя различный набор детекторов в виде равностороннего треугольника, расположенного на орбите солнца (гелиоцентрическая орбита) и используют электромагнитный принцип детектирования – лазерный интерферометр Майкельсона с углом  $60^\circ$  между плечами. Отличиями между проектами являются количество треугольных систем из спутников, количество спутников, задействованных в системе детектора, различная длина плеч интерферометра, а также количество интерферометров, их ориентация и др. У LISA длина плеч составит 2,5 млн. км. между 3 спутниками, размещенными в точках Лагранжа. В случае DECIGO длина плеч составит всего 1 тыс. км. Обсерватория BBO будет состоять из 12 спутников, разбитых на подсистемы по 3, 3 и 6 спутников, образующих два равносторонних треугольника и правильный шестиугольник. В каждой подсистеме длина ребра, или плеча интерферометра – 50 тыс. км, а сами подсистемы размещаются в вершинах равностороннего треугольника, вписанного в гелиоцентрическую орбиту [17]–[23].

Другой принцип детектирования основан на контроле группы пульсаров (ЕРТА, ІРТА, SKA), звездных остатков, которые испускают повторяющиеся импульсы излучения, и ищут тонкие временные сдвиги, вызванные прохождением гравитационных волн. Этот подход применяется для обнаружения низкочастотных волн, возникающих при слиянии сверхмассивных черных дыр – одного из самых энергетических событий в космосе, а также реликтового излучения (рисунок 1).

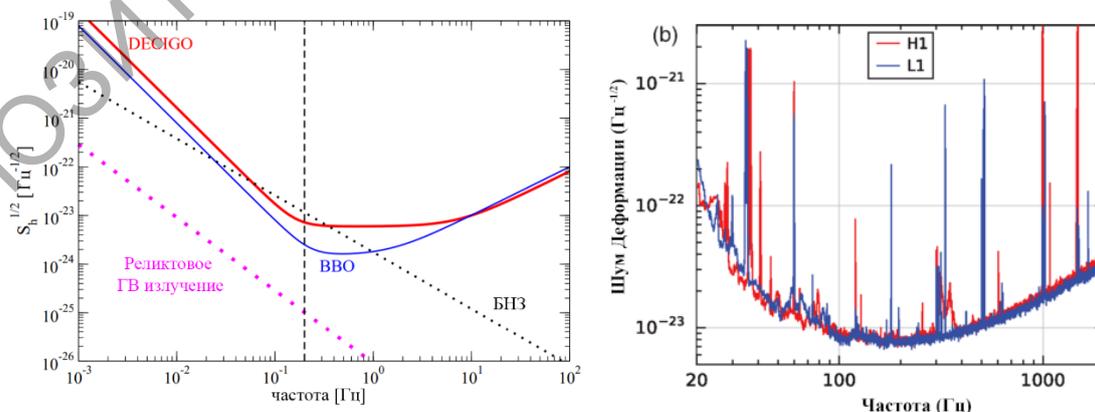


Рисунок 1 – График чувствительности планируемых космических детекторов ГВ DECIGO и BBO, а также астрофизические источники. BH3 – бинарные нейтронные звезды;  $S_h^{1/2}$  – шум деформации. График чувствительности LIGO (справа). LI – установка в Луизиане; H1 – установка в Хэнфорде

**Разработанная модель космического детектора гравитационных волн.** Космос – условно неограниченное пространство по сравнению с Землей, в котором можно разместить детектор большего размера и трехмерной конфигурации. Этот факт открывает доступ к областям спектра ГВ, недоступных для LIGO детекторов, размещенных на Земле. К другим преимуществам относятся сверхнизкие давления и отсутствие сейсмических вибраций. В LIGO детекторах наземного типа характерна сложная и затратная система глубокого вакуума и амортизации вибраций. В Солнечной системе имеется множество космических объектов, хорошо изученных с точки зрения кинематических характеристик, которые являются естественным ресурсом для будущего использования в целях детектирования ГВ.

В качестве космического детектора ГВ предлагается космическая измерительная система искусственных спутников (ИС), расположенная на орбитах планет, естественных спутников планет или планетоидах. Для постоянного наземного взаимодействия с космической измерительной системой предложено использовать спутники, расположенные на геостационарных орбитах. Выделяют четыре типа орбит спутников (рисунок 2): LO (от англ. Low Orbit) – низкоорбитальные ИС; MO (от англ. Medium Orbit) – среднеорбитальные; GO (от англ. Geosynchronous Orbit) – геостационарные; HO (от англ. High Orbit) – высокоорбитальные. Для GO, в случае Земли (GEO), высоты около 36 тыс. км., период обращения – 23 ч 56 м 4.09 с, либо в пределах 22–24 ч. Орбиты могут быть высокоэллиптическими или близкими к круговым. Запуски спутников выполнены многими ведущими ВУЗами мира. БГУ (Минск) 29 октября 2018 г. разработал и осуществил запуск спутника «BSUSat-1». Спутник «BSUSat-1» успешно выведен на орбиту высотой более 500 километров над поверхностью Земли (LEO) (рисунок 2). На сайтах БГУ [satellite.by](http://satellite.by) и [bsusat.com](http://bsusat.com) работает сервис по приему и размещению текущей телеметрии спутника. Отслеживание местоположения спутника можно с помощью программы «Orbitron» с настройками для спутника BSUSat-1.

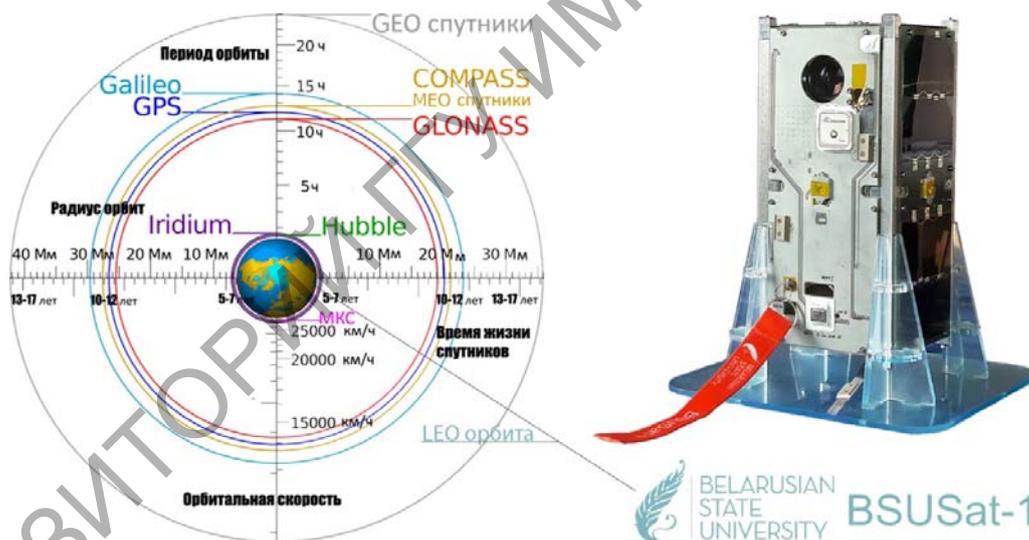


Рисунок 2 – Классификация орбит ИС Земли, их краткие характеристики и первый спутник БГУ «BSUSat-1», запущенный в 29 октября 2018 г.

Если рассматривать возможность создания подобной системы (классического интерферометра Майкельсона) на основе ИС – необходимо как минимум 3 спутника: 1 источник излучения и еще 2 с отражающими элементами и расположенные на перпендикулярных равных расстояниях, образуя треугольник. Если добавить еще один спутник в систему и допустить возможность, что каждый спутник может работать одновременно в качестве источника, отражателя, а также приемника, то возможное число одновременных космических интерферометров в системе равняется 4. Данная конфигурация плоская – 2D-конфигурация, для перехода в 3D конфигурацию необходимо добавить спутники с орбитой, характеризующейся другими углами наклона.

Предлагается модель космического детектора ГВ «S-LIGOxR-Gy» в виде системы из  $X$  спутников, расположенных на  $Y$  орбитах (рисунок 3), тип орбит также варьируется: LO, MO, GO и HO. В работе исследуется детектор S-LIGO8R-G2 (Space – Laser Interferometer Gravitational-Wave Observatory) 8 (общее число спутников) Regular (правильной формы) Geostationary (тип орбит) 2 (число орбит). Для космического детектора S-LIGO8R-G2 первые 4 спутника выводятся на геостационарную орбиту и отстоят друг от друга на одинаковом расстоянии так, что образуют квадрат, вписанный в круговую орбиту. Вторая конфигурация спутников на ортогональной орбите аналогична первой (рисунок 3). В первом приближении 4 спутника одной орбиты вращаются вокруг планеты с одинаковой угловой скоростью и сохраняют конфигурацию перпендикулярных плеч интерферометра Майкельсона. Как говорилось выше, всего получается 4 возможных детектора для одной орбиты: каждая вершина является угловой станцией детектора ГВ. Добавление второй орбиты ортогональной первой, переводит систему из двухмерной в более сложную трехмерную, где необходимо учитывать возможные совместные конфигурации в 3D пространстве. Это усложнение системы обеспечивает увеличение числа интерферометров и расширяет диаграмму направленности космического ГВ детектора. Изменения взаимного расположения спутников вызвано их орбитальным вращением. Взаимное расположение спутников и их орбитальное движение рассчитывалось теоретически, а также моделировалось в специализированной программе AGI STK (рисунок 3).

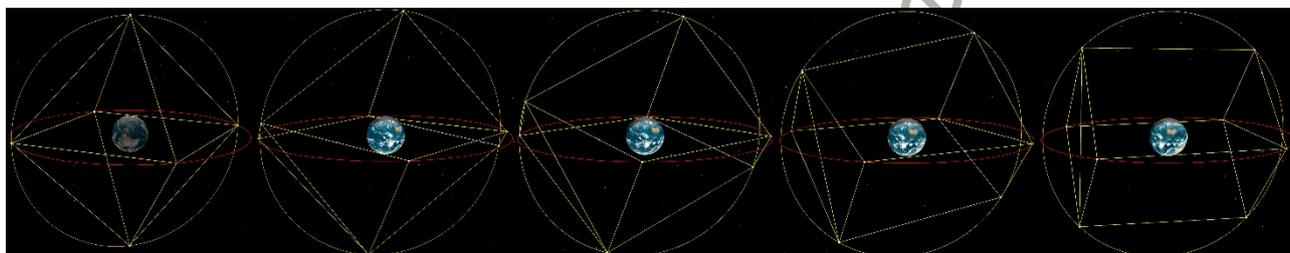


Рисунок 3 – Этапы процесса эволюции системы космического детектора гравитационных волн «S-LIGO8R-G2». В исходной фазе правильная трехмерная фигура октаэдр, и в заключительной фазе: образование правильной фигуры куб

Положение спутников в пространстве математически описывается декартовыми координатами  $x, y, z$  геоцентрической системы, среднее движение  $w$  и начальной фазой  $f$ . Для каждой плоскости орбиты вводится система координат, где радиус вектор спутников описывается матрицей:

$$\begin{pmatrix} x_{01} \cos[f_1 + tw_1] \\ y_{01} \sin[f_1 + tw_1] \\ 0 \end{pmatrix}, \tag{1}$$

где  $x_{01} y_{01}$  – полуоси орбиты, 1 – номер спутника. Для описания взаимного положения двух спутников на разных орбитах используется матрица поворота  $M$  с учетом  $\alpha$  угол между плоскостями орбит. Тогда взаимное положение двух спутников 1 и 2 описывается матрицей:

$$\begin{pmatrix} x_{01} \cos[f_1 + tw_1] - x_{02} \cos[f_2 + tw_2] \\ y_{01} \sin[f_1 + tw_1] - y_{02} \cos[\alpha] \sin[f_2 + tw_2] \\ -y_{02} \sin[f_2 + tw_2] \sin[\alpha] \end{pmatrix}. \tag{2}$$

Рассмотрим первое положение системы спутников, изображенное на рис.3, и назовем данное положение исходным или началом эволюции системы. В исходном положении спутники системы S-LIGO8R-G2 образуют трехмерную фигуру октаэдра – это продемонстрировано на рис.3, где спутники соединили линиями. Следующая фаза, после оборота спутников по орбите на 45 градусов, спутники эволюционируют в трехмерную форму куба (рисунок 3). Далее, процесс эволюции системы спутников вновь возвращает ее в форму октаэдра. Период эволюции форм приблизительно равен 1/8 периода обращения планеты вокруг своей оси.

Правильные фигуры, выстраиваемые системой S-LIGO8R-G2 в двух периодически повторяющихся фазах октаэдра и куба, дают множество одновременно функционирующих детекторов ГВ классической конфигурации: интерферометр Майкельсона с перпендикулярными плечами и с углом 60 градусов между ними. Соответственно, система из спутников, расположенных в вершинах куба, расширяют возможности космического детектора ГВ и позволяют переключаться между системами с большим количеством одновременно работающих детекторов (до 24 LIGO-подобных детекторов) и выбором самых «перспективных» детекторов по ряду определяющих факторов: ориентация в пространстве, длина плеч, взаимное расположение и т. д. В соответствии с этим, предлагается размещение не менее 3-х источников излучения и 3-х отражателей на каждом из спутников.

Кроме длины плеча интерферометра, ключевым фактором для космического детектора ГВ может оказаться близость к объекту, сильно-искажающему пространство-время – например, Солнцу. В связи с этим, следует учитывать массу планеты, на орбите которой располагается такая система, и время обращения данной планеты вокруг Солнца. Возможно, для детектирования далеких астрофизических источников, излучающих ГВ, необходимо поместить детектор как можно дальше от источника сильных искажений пространства-времени. И наоборот, если необходимо измерить влияние ГВ излучения Солнца – размещать систему из спутников как можно ближе к Солнцу.

В общем случае, данную систему можно развернуть на геостационарных орбитах (геоорбит) любой планеты Солнечной системы. Как описывалось выше, интерес представляет планеты с наибольшим радиусом гео-орбит, так как это даст большие длины плеч интерферометра – расширит частотный спектр ГВ-детектора. Для расчета геостационарных орбит 8 планет Солнечной системы воспользуемся следующей формулой:

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

В таблице 2 представлены результаты расчета гео-орбит для 8 планет Солнечной системы, а также результаты расчета ключевых параметров космического детектора ГВ S-LIGO8R-G2.

Таблица 2 – Значения радиусов геостационарных орбит и ключевых параметров космического детектора S-LIGO8R-G2, размещенного на этих орбитах, для 8 планет Солнечной системы

Планета	Масса планеты, $M_3$	Время вращения, с	Радиус геоорбит, м	Длина плеча интерферометра, тыс. км	Длина плеча в длинах LIGO (300 км)	Максимальная чувствительность детектора, Гц	Период эволюции форм системы спутников, с
Меркурий	$5,50 \cdot 10^{-2}$	$5,08 \cdot 10^6$	$2,43 \cdot 10^8$	$3,44 \cdot 10^2$	1150	$900 \cdot 10^{-3}$	$6,35 \cdot 10^5$
Венера	$8,15 \cdot 10^{-1}$	$2,10 \cdot 10^7$	$1,54 \cdot 10^9$	$2,17 \cdot 10^3$	7240	$150 \cdot 10^{-3}$	$2,62 \cdot 10^6$
Земля	1,00	$8,61 \cdot 10^4$	$4,22 \cdot 10^7$	$5,96 \cdot 10^1$	199	$500 \cdot 10^{-2}$	$1,08 \cdot 10^4$
Марс	$1,07 \cdot 10^{-1}$	$8,86 \cdot 10^4$	$2,04 \cdot 10^7$	$2,88 \cdot 10^1$	96	$100 \cdot 10^{-1}$	$1,11 \cdot 10^4$
Юпитер	$3,18 \cdot 10^2$	$3,58 \cdot 10^4$	$1,60 \cdot 10^8$	$2,26 \cdot 10^2$	755	$130 \cdot 10^{-2}$	$4,47 \cdot 10^3$
Сатурн	$9,50 \cdot 10^1$	$3,84 \cdot 10^4$	$1,12 \cdot 10^8$	$1,59 \cdot 10^2$	529	$189 \cdot 10^{-2}$	$4,80 \cdot 10^3$
Уран	$1,40 \cdot 10^1$	$6,22 \cdot 10^4$	$8,18 \cdot 10^7$	$1,16 \cdot 10^2$	386	$260 \cdot 10^{-2}$	$7,78 \cdot 10^3$
Нептун	$1,70 \cdot 10^1$	$5,80 \cdot 10^4$	$8,32 \cdot 10^7$	$1,18 \cdot 10^2$	392	$255 \cdot 10^{-2}$	$7,25 \cdot 10^3$

Из таблицы 2 видно, что самый большой радиус геостационарной орбиты у планеты Венера и составляет 1 млн. 536 тыс. 477 километров. Соответственно, плечо интерферометра будет в корень из двух раз больше и составит 2 млн. 172 тыс. 906 км. В сравнение, для Юпитера длина плеча интерферометра составляет 226 тыс. км. В сравнении, у детектора ГВ наземного типа LIGO плечо составляет лишь 300 км с учетом переотражений полученных в полости Фабри-Перо. Таким образом, длина плеча космического интерферометра Венеры S-LIGO8R-G2 равносильна 7240 длинам плеча LIGO интерферометра. Максимальная частота ГВ, которую способен зарегистрировать такой космический детектор, около 0,15 Гц и будет изменяться в зависимости от эволюции системы, так как изменится длина плеча интерферометра.

Для изучения гравитационного излучения Солнца, космический ГВ детектор S-LIGO8R-G2 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 доступных в Солнечной системе 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 гео-орбиты составляет 83 тыс. км, длина плеча интерферометра – 118 тыс. км, а максимальная частота чувствительности данного детектора около 2,55 Гц. Для планеты Меркурий, период вращения вокруг Солнца 88 дней, а период вращения вокруг своей оси 58 дней. Радиус гео-орбиты 243 тыс. км, длина плеч интерферометра – 344 тыс. км., максимальная частота чувствительности детектора 0,9 Гц.

**Заключение.** Существующие наземные детекторы ограничены в линейных размерах, что обуславливает диапазон чувствительности 10–1000 Гц ГВ, однако, они уже зарегистрировали 67 событий гравитационных волн. Для расширения частотного диапазона ГВ детекторов необходимо размещать измерительные установки в космосе.

Для решения поставленной задачи, предлагается отдельная система космического детектирования ГВ на основе системы спутников. Для описания системы предложено обозначение «S-LIGOxR-Gy». В работе исследуется эволюция системы S-LIGO8R-G2, состоящей из 8 спутников на 2 ортогональных орбитах. Проведен расчет и моделирование такой системы спутников для 8 планет Солнечной системы. Выполнен расчет ключевых характеристик космического детектора ГВ для этих планет. В работе обсуждаются результаты расчетов и возможности подобных детекторов.

Система из 8 спутников будет периодически выстраиваться в виде правильных трехмерных геометрических фигур. Для рассмотренной системы S-LIGO8R-G2 такими фигурами являются октаэдр и куб. Период перестроения октаэдр-куб зависит от планеты, на которой будет располагаться космический детектор. Согласно расчетам (таблица 2), в рамках Солнечной системы, самое длинное плечо космического интерферометра S-LIGO8R-G2 получается на орбите Венеры: 2 172 906 км. Значение максимальной частоты чувствительности такого космического детектора составит 0,15 Гц для фазы куба и будет изменяться в процессе эволюции системы, так как будет изменяться длина плеча. На самой удаленной от Солнца планете – Нептун характеристики S-LIGO8R-G2 следующие: длина плеча 118 000 км, максимальная частота чувствительности 2,55 Гц.

## Литература

1. Heaviside, O. A Gravitational and Electromagnetic Analogy. Part II / O. Heaviside // The Electrician. – 1893. – № 31. – P. 359.
2. Abraham, M. Zur Theorie der Gravitation / M. Abraham // Physikalische Zeitschrift. – 1912. – Vol. 13. – P. 1–4.
3. Mie, G. Grundlagen einer Theorie der Materie / G. Mie // Annalen der Physik. – 1912. – Vol. 37. – P. 511–534.
4. Mie, G. Grundlagen einer Theorie der Materie / G. Mie // Annalen der Physik. – 1913. – Vol. 40. – P. 1–65.
5. Einstein, A. Gravitationswellen / A. Einstein // Preussische Akademie der Wissenschaften Sitzungsberichte. – 1918. – Part 1. – P. 154–167.
6. Abbot, B. P. Observation of Gravitational Waves from a Binary Black Hole Merger / B. P. Abbot [et al.] // Phys. Rev. Lett. – 2016. – Vol. 116, iss. 6. – 061102.
7. Weber, J. Gravitational-wave-detector events / J. Weber // Physical Review Letters. – 1968. – Vol. 20, iss. 23. – P. 1307–1308.
8. Gertsenshtein, M. E. On the detection of low frequency gravitational waves / M. E. Gertsenshtein, V. I. Pustovoit // JETP. – 1962. – Vol. 43, № 2. – P. 605–607.
9. Abbot, B. P. Exploring the sensitivity of next generation gravitational wave detectors / B. P. Abbott [et al.] // Class. Quantum Grav. – 2017. – Vol. 34, № 4. – 044001.
10. Weiss, R. Electromagnetically coupled broadband gravitational antenna / R. Weiss // Quarterly Report of the Research Laboratory for Electronics. – 1972. – № 105. – P. 54–76.

11. 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.
12. 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.
13. 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.
14. The Nobel Prize [Electronic resource] : The Nobel Prize in Physics 2017. – Mode of access : [nobelprize.org](http://nobelprize.org). – Date of access : 12.12.2019.
15. 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.
16. Abbott, B. P. Prospects for observing and localizing gravitational-wave transients with Advanced LIGO, Advanced Virgo and KAGRA / B. P. Abbott, R. Abbott, T. D. Abbott [et al.] // Living Rev Relativ. – 2018. – Vol. 21, iss. 3. – DOI: 10.1007/s41114-018-0012-9.
17. Hild, S. Sensitivity studies for third-generation gravitational wave observatories / S. Hild [et al.] // Class. Quantum Grav. – 2011. – Vol. 28, № 9. – 094013.
18. Laser Interferometer Space Antenna : A proposal in response to the ESA call for L3 mission concepts / K. Danzmann [et al.]. – Hannover, 2017. – 41 p.
19. 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.
20. Kawamura, S. The Japanese space gravitational wave antenna – DECIGO / S. Kawamura [et al.] // J. Phys.: Conf. Ser. – 2008. – Vol. 122. – DOI: 10.1088/1742-6596/122/1/012006.
21. Harry, G. M. Laser interferometry for the Big Bang Observer / G. M. Harry [et al.] // Class. Quantum Grav. – 2006. – Vol. 23. – P. 4887–4894.
22. Reitze D. 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. – arXiv: 1907.04833.
23. 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.

Белорусский государственный университет

Поступила в редакцию 15.09.2020