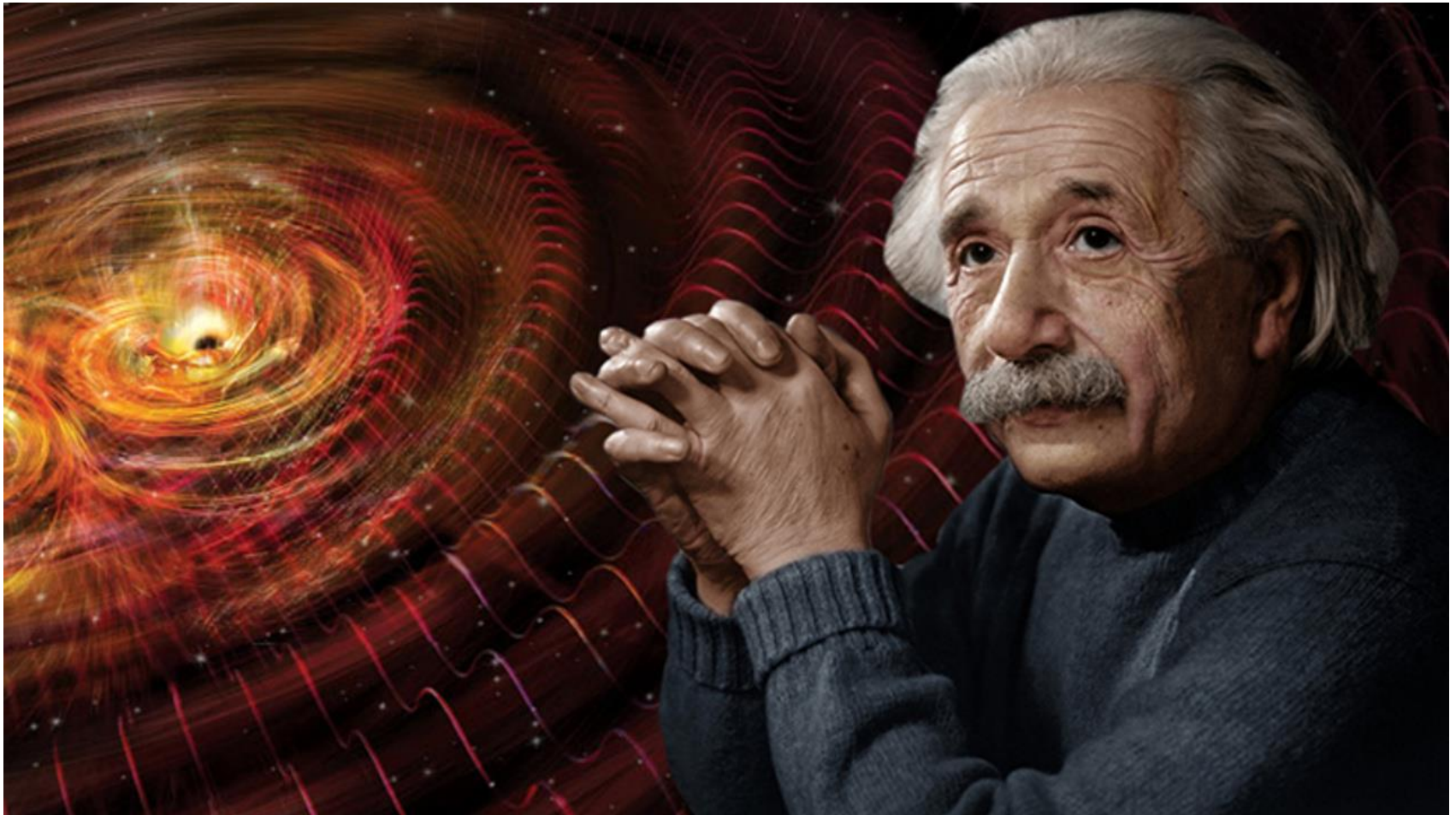


ГРАВИТАЦИОННЫЕ ВОЛНЫ. ПОИСКИ И ОТКРЫТИЯ.

В.В.Сулимов
(НИЦ КИ ПИЯФ)



1879– 1955

1915 ОТО

1918 из уравнений ОТО следует
существование гравитационных волн

Слабость гравитационного взаимодействия удобно “проиллюстрировать” на примере двух протонов: их притяжение из-за гравитационных масс в $1,6 \times 10^{34}$ раз меньше чем электростатическое отталкивание. Землянам уместно помнить, что только наличие у нашей планеты массы 6×10^{21} тонн создает ускорение вблизи ее поверхности $9,8 \text{ м / с}^{-2}$ для всех тел без различия.

Если, например, раскрутить гантель с двумя массами по тонне каждая и мощным метровым их скрепляющим стержнем то, используя лучшие стали, можно достичь частоты вращения гантели около 100 Гц и, по формуле А. Эйнштейна окажется, что мощность гравитационного излучения не превысит $10^{-23} \text{ эрг / сек} = 10^{-30} \text{ Ватта} !$



В конце 1969 года профессор физики Мэрилендского университета Джозеф Вебер (Joseph Weber) заявил, что обнаружил волны тяготения космического происхождения.

Джозеф Вебер настраивает свой детектор гравитационных волн. Изображение с сайта physics.aps.org

15-летние высокоточные наблюдения пульсара

- после открытия нейтронных звезд-пульсаров Дж. Тэйлор и Р. Халс открыли двойной пульсар (обе звезды – нейтронные, PSR B1913+16) со сравнительно коротким периодом обращения. Тщательные измерения монотонного увеличения частоты обращения (сближение компонентов за счет потери ньютоновской энергии на гравитационное излучение) позволило проверить формулу А. Эйнштейна для этого излучения. Для параметров двойного пульсара PSR 1913+16 теория предсказывает уменьшение орбитального периода со скоростью всего 75.8 микросекунд в год. Полученные к 1991 году Тэйлором результаты дали значение 76 ± 0.3 микросекунды в год , погрешность измерений – около 3%. В 1993 г. Халс и Тейлор получили за эту работу Нобелевскую премию.



Russel A. Hulse

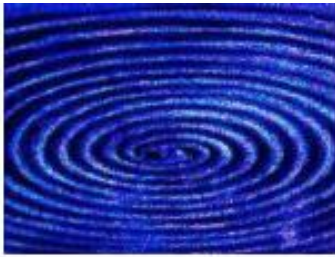


Joseph H. Taylor J

Наблюдения Халса и Тейлора, хотя и косвенные, предоставили самое убедительное доказательство существования гравитационного излучения. Их открытия послужили толчком к разработке серии детекторов гравитационных волн, целью которых является регистрация гравитационного излучения от астрономических явлений, таких как черные дыры или две сливающиеся нейтронные звезды, более прямыми способами, когда волны достигают Землю.

LIGO

- LIGO (лазерная интерферометрическая гравитационно-волновая обсерватория) — крупнейшая в мире гравитационно-волновая обсерватория и один из самых сложных физических экспериментов в мире. LIGO состоит из двух лазерных интерферометров, расположенных на расстоянии тысяч километров друг от друга: один в Ливингстоне, штат Луизиана, а другой в Хэнфорде, штат Вашингтон. LIGO использует физические свойства света и самого пространства для обнаружения гравитационных волн. Он финансируется Национальным научным фондом США и управляется Калифорнийским технологическим институтом и Массачусетским технологическим институтом. Сотни ученых в Научном сотрудничестве LIGO во многих странах вносят свой вклад в астрофизическую и инструментальную науку LIGO.
- 1991 г. Конгресс выделил первый год финансирования.
- В 1992г. Хэнфорд штат Вашингтон и Ливингстон штат Луизиана были выбраны в качестве площадок для интерферометров LIGO.



LIGO: Laser Interferometer Gravitational-wave Observatory



- Managed and operated by Caltech & MIT with funding from NSF
- Ground breaking 1995
- 1st interferometer lock 2000
- LIGO Scientific collaboration: 45 institutions, world-wide



March 2, 2007



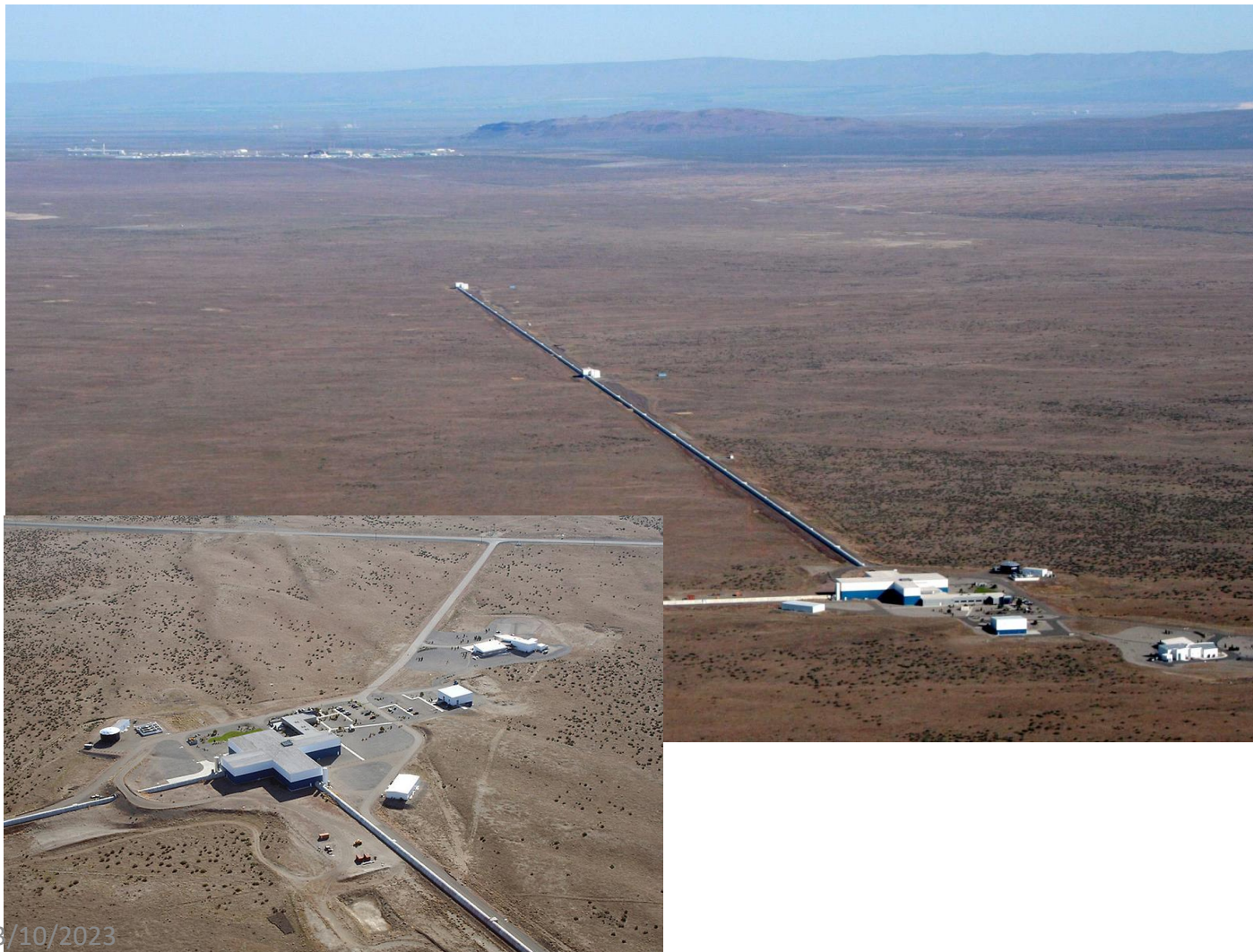
Гравитационно-волновой детектор в Ливингстоне



03/10/2023

10

Гравитационно-волновой детектор в Ханфорде

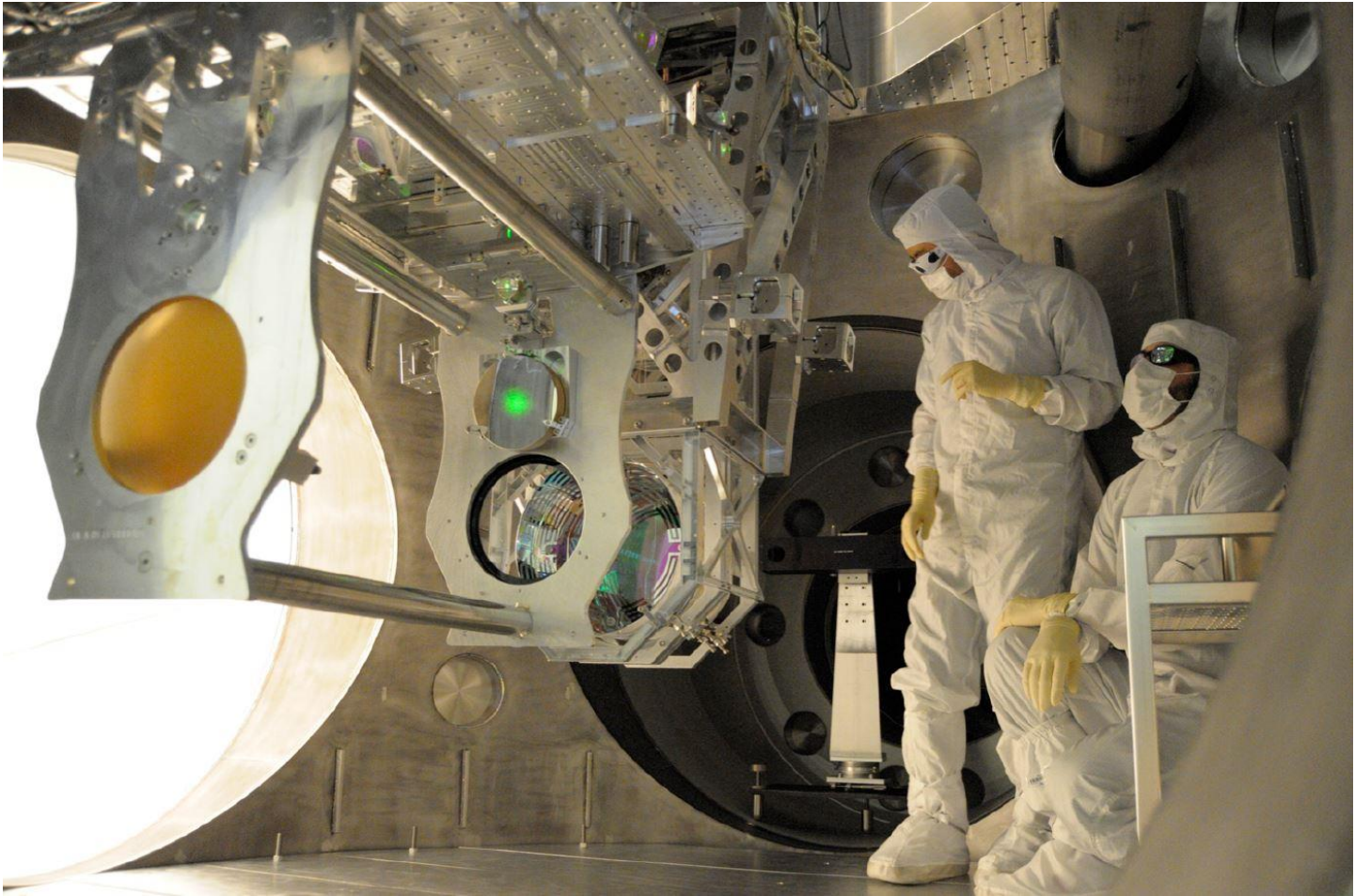


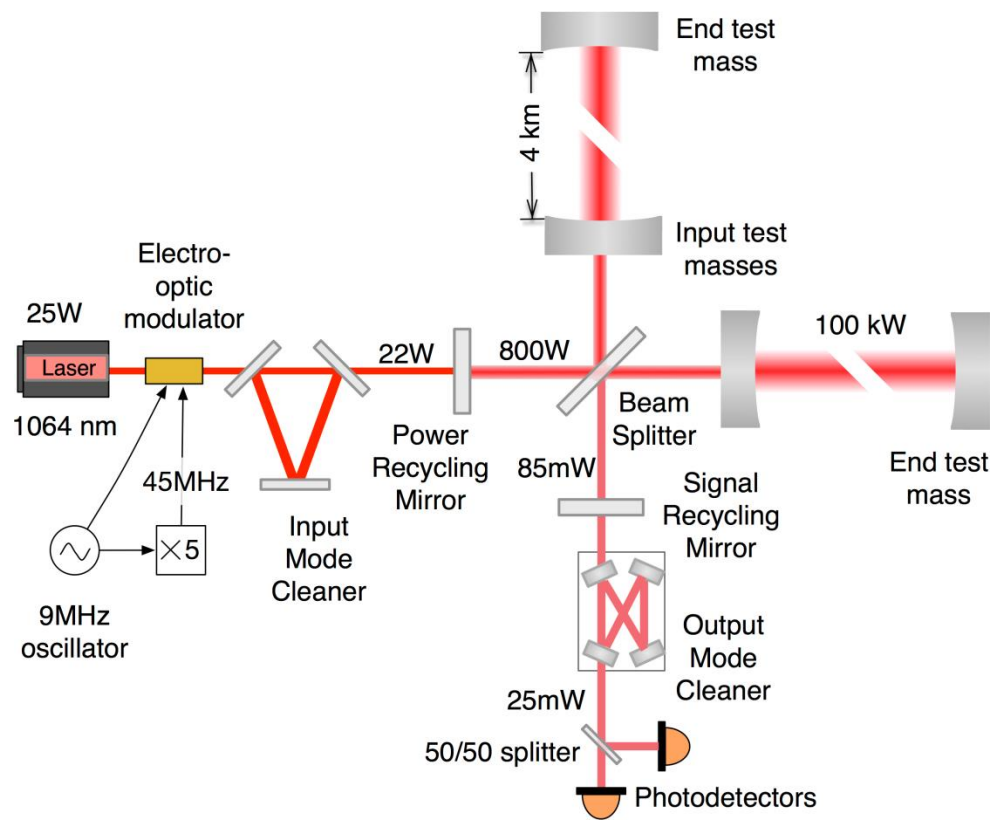
03/10/2023

LIGO

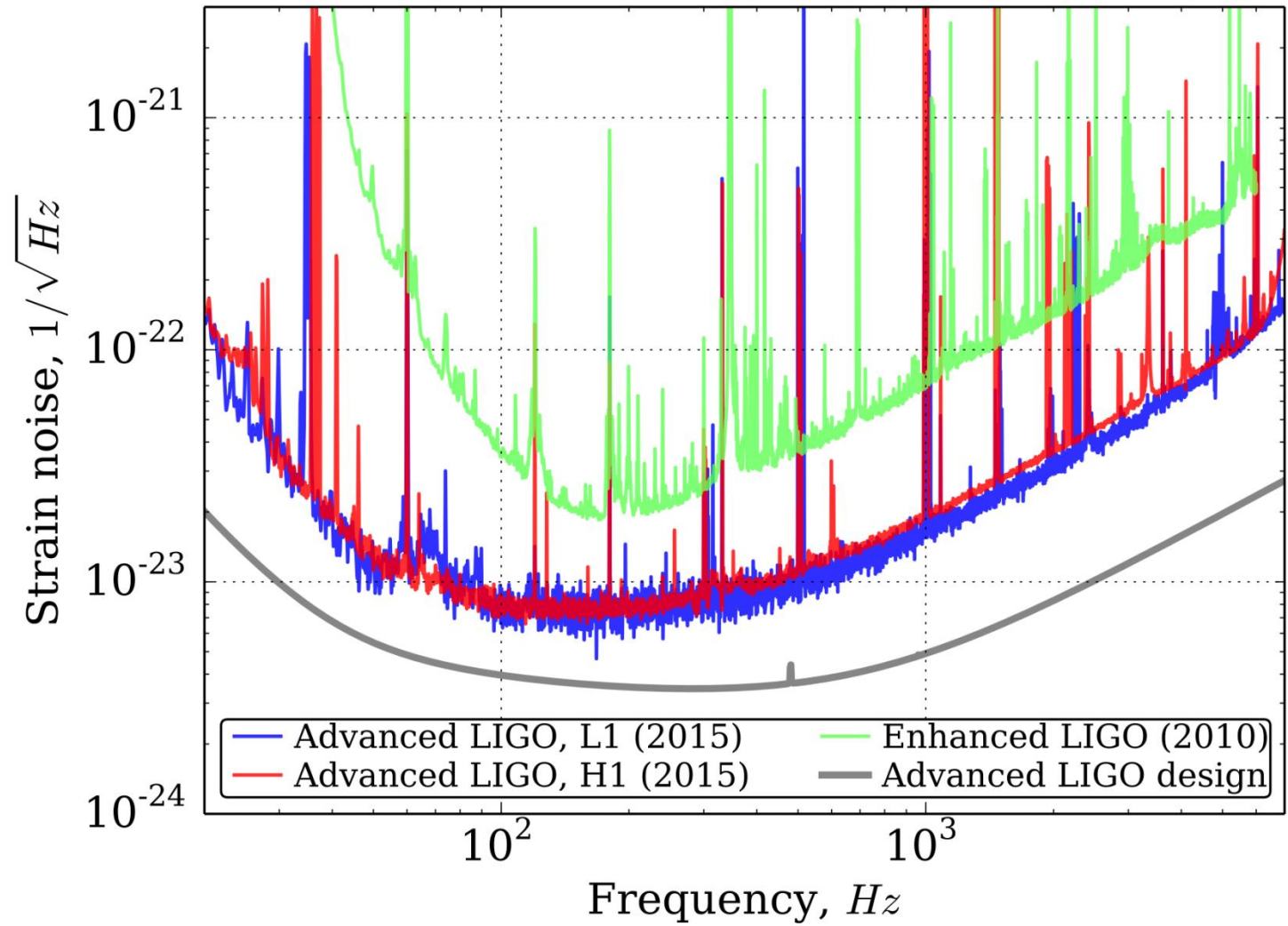


LIGO



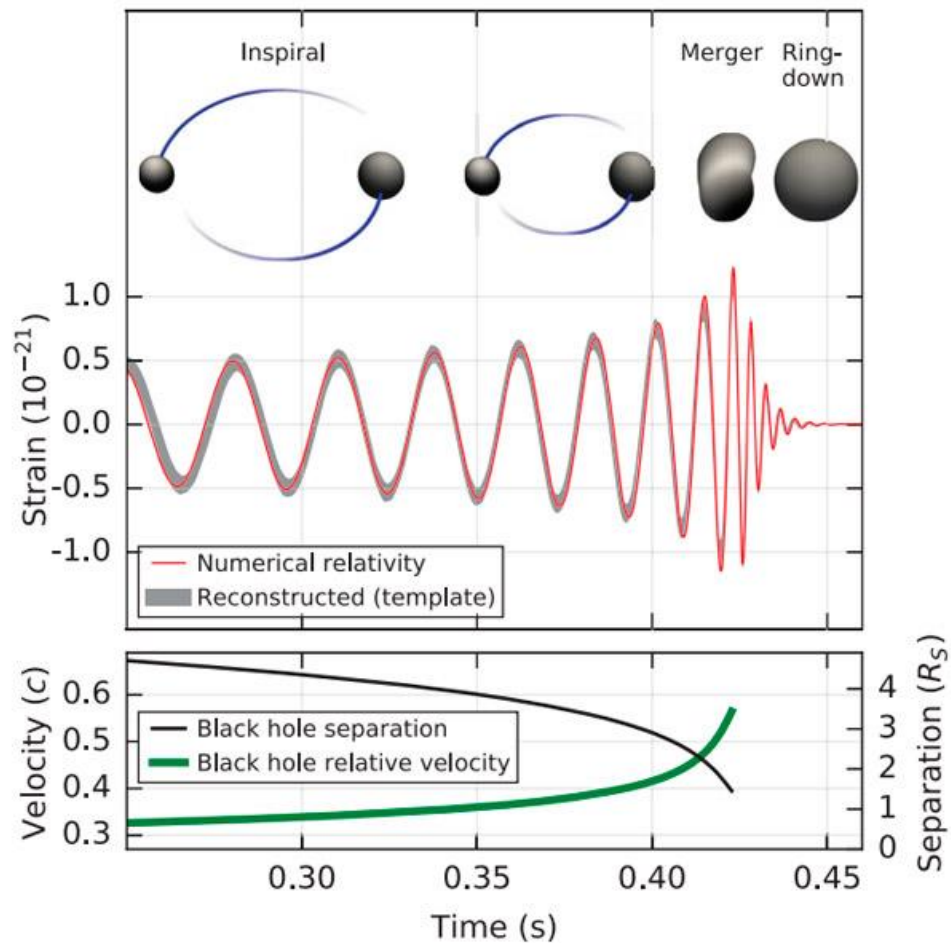


Детекторы Advanced LIGO представляют собой интерферометры Майкельсона с плечами длиной 4 км. Плечи содержат оптические резонаторы Фабри-Перо, усиливают сигнал гравитационной волны. Электромагнитное поле лазера модулируется на радиочастотах (9 и 45 МГц) для генерации сигналов, используемых для управления детектором, а пространственный профиль луча очищается с помощью оптического резонатора (очиститель входного режима). Зеркало, расположенное между очистителем входных мод и светоделителем (зеркало рециркуляции мощности), используется для рециркуляции мощности лазера, которая повторно отражается плечами, а другое зеркало (зеркало рециркуляции сигнала) между светоделителем и фотодетекторами считывания используется для рециркуляции. изменить частотную характеристику интерферометра. Очиститель режима вывода удаляет излишки лазерного излучения до того, как сигнал будет измерен фотодетекторами.

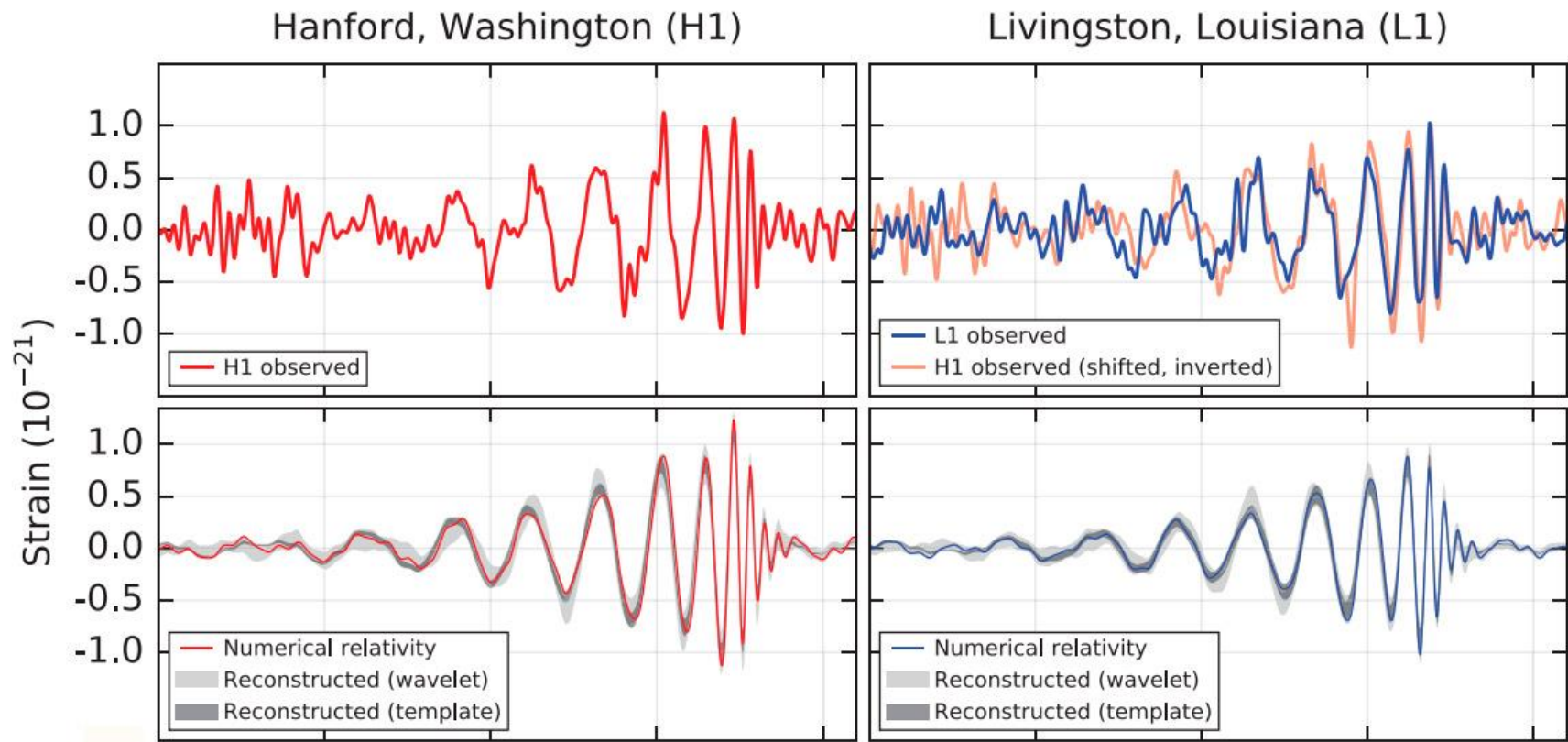


- Одним из усовершенствований является размещение оптических компонентов LIGO в вакууме. На поверхностном уровне это не позволяет воздушным потокам воздействовать на зеркала (даже в хорошо изолированной и изолированной системе разница температур вдоль плеч детектора может вызвать ветер), но в основном это необходимо для обеспечения того, чтобы лазерный луч мог двигаться по прямой траектории. в объятиях. Незначительные перепады температур на плече заставят свет преломляться из-за температурно-зависимого показателя преломления (мера того, насколько свет изгибается при прохождении через среду). Даже незначительное изгибание светового пучка в ветвях приведет к тому, что лазер попадет внутрь лучевой трубки диаметром примерно 1,2 метра на ее длине 4000 метров. В конечном счете, LIGO является самым большим в мире устойчивым сверхвысоким вакуумом (в 8 раз больше космического вакуума), вмещающим 300 000 кубических футов (около 8.300 кубических метров).

Другой мерой является добавление систем сейсмоизоляции внутри и снаружи LIGO. Внутри к задней части каждого зеркала прикреплены крошечные магниты, и положение этих магнитов определяется тенями, которые они отбрасывают от светодиодных источников света. Если зеркала двигаются слишком сильно, электромагнит создает противодействующее магнитное поле, чтобы толкать или тянуть магниты и зеркало обратно в исходное положение. Этот метод хорош не только для противодействия движению зеркал из-за местных вибраций, но также используется для противодействия приливной силе Солнца и Луны, когда они тянут зеркала к себе так же, как они тянут воду в воде. океан. Снаружи есть гидравлические системы, которые противодействуют вибрациям поверхности Земли (обнаруживаемым близлежащими сейсмометрами), прежде чем они смогут вызвать вибрации во внутренних компонентах LIGO.



Интерпретация зарегистрированного сигнала. Вверху: профиль гравитационно-волнового излучения и соответствующие ему стадии слияния двух черных дыр; внизу: изменение эффективных орбитальных параметров пары с течением времени до момента слияния. Изображение из обсуждаемой статьи в Physical Review Letters



Вверху: сигнал от события GW150914, зарегистрированный двумя детекторами LIGO, *внизу:* результат численного моделирования процесса для наиболее подходящих масс черных дыр. *Physical Review Letters*

GW150914 слияние двух черных дыр

Primary black hole mass	$36_{-4}^{+5} M_{\odot}$
Secondary black hole mass	$29_{-4}^{+4} M_{\odot}$
Final black hole mass	$62_{-4}^{+4} M_{\odot}$
Final black hole spin	$0.67_{-0.07}^{+0.05}$
Luminosity distance	$410_{-180}^{+160} \text{ Mpc}$
Source redshift z	$0.09_{-0.04}^{+0.03}$

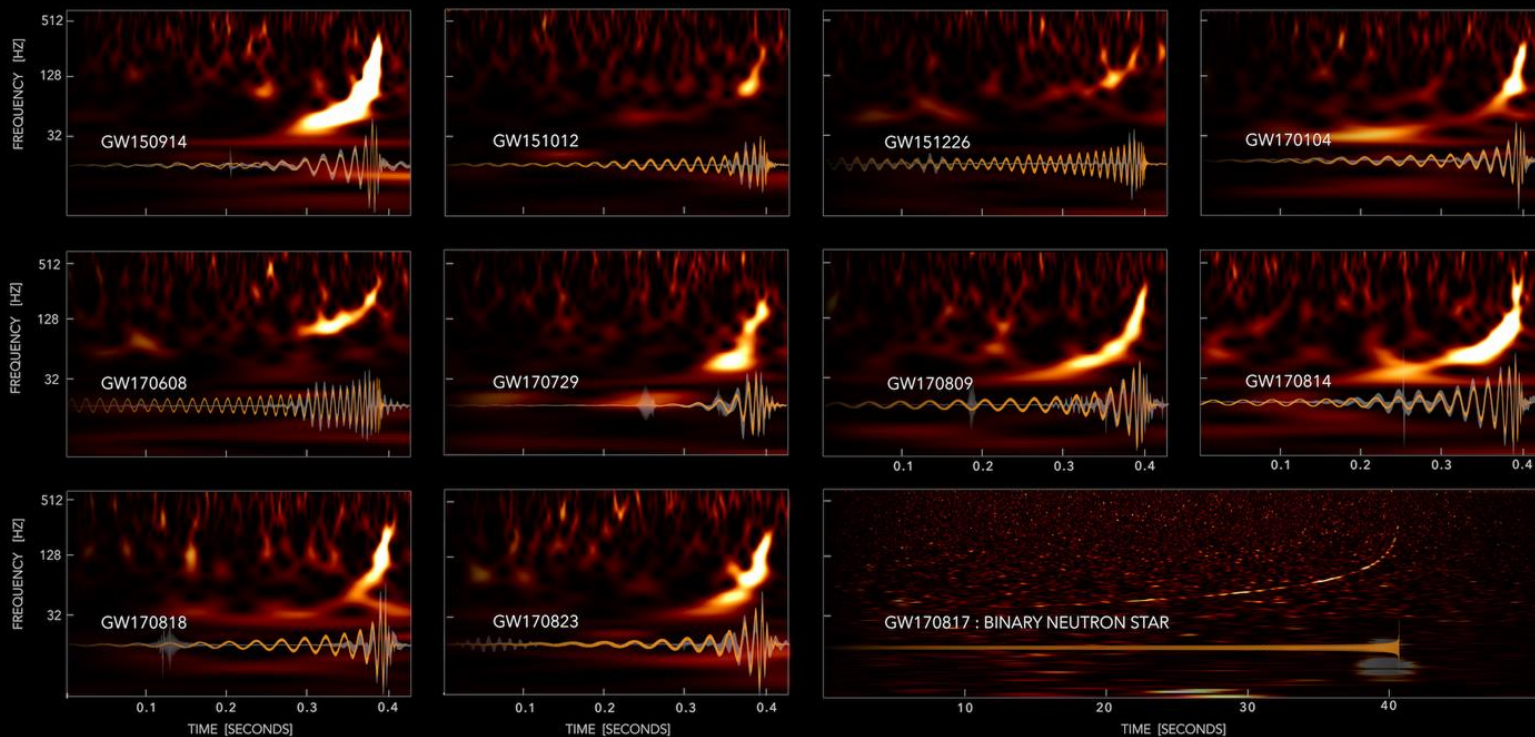
$$\mathcal{M} = \frac{(m_1 m_2)^{3/5}}{(m_1 + m_2)^{1/5}} = \frac{c^3}{G} \left[\frac{5}{96} \pi^{-8/3} f^{-11/3} \dot{f} \right]^{3/5},$$

Компьютерный кластер для анализа данных



Высокопроизводительный компьютерный кластер для анализа данных Atlas в AEI в Ганновере, Германия.
Изображение: М. Фиорито/AEI.

GRAVITATIONAL-WAVE TRANSIENT CATALOG-1



LIGO-VIRGO DATA: [HTTPS://DOI.ORG/10.7935/82H3-HH23](https://doi.org/10.7935/82H3-HH23)

WAVELET (UNMODELED)

EINSTEIN'S THEORY

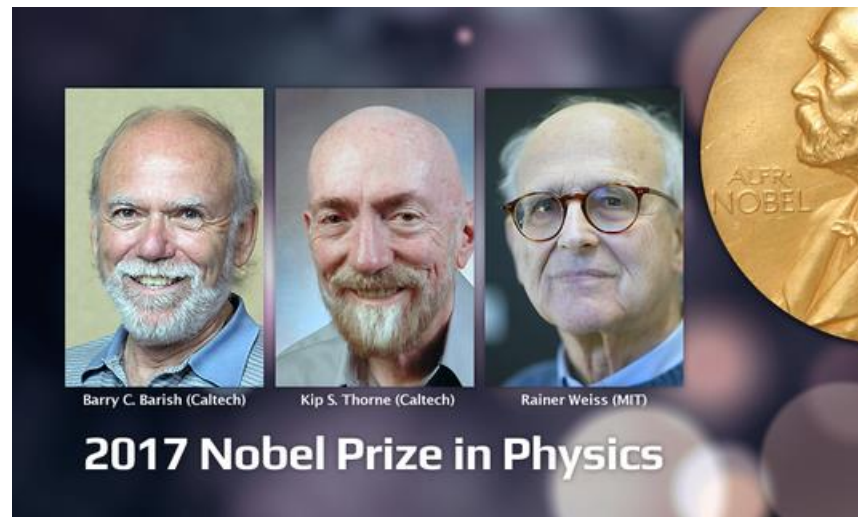
S. GHONGE, K. JANI | GEORGIA TECH

Каталог пойманных в 2015–2017 годах слияний в двойных системах черных дыр и нейтронных звезд (внизу справа). Для каждого события показана зависимость частоты гравитационно-волнового сигнала от времени (верхняя часть на каждом графике) и реконструкция самой гравитационной волны. Изображение с сайта ligo.org



Лауреаты Нобелевской премии по физике за 2017 год. Слева направо: [Райнер Вайсс \(Rainer Weiss\)](#), [Кип Торн \(Kip Thorne\)](#) и [Барри Бэриш \(Barry Barish\)](#). Фото с сайтов [haaretz.com](#), [ndtv.com](#) и [indianexpress.com](#)

Нобелевская премия по физике за 2017 год была присуждена с формулировкой «за решающий вклад в создание детектора LIGO и регистрацию гравитационных волн».



Проект VIRGO носит латинское название созвездия Девы (находится примерно в 10 млн св. лет от Земли). Проект изначально италяно-французский. Находится недалеко от Пизы (Италия). Плечи интерферометра имеют размер 3 км



Строительство комплекса Virgo закончено в июне 2003 года (расходы составили 72 миллиона евро), а первые научные данные получены в мае 2007 года. В 2012 году разработан проект обновления детектора до Advanced Virgo. Запуск модернизированной установки состоялся в 2017 году, чувствительность удалось повысить примерно в 10 раз.

- **Virgo** — франко-итальянский детектор гравитационных волн, расположенный в EGO (Европейская гравитационная обсерватория, вблизи итальянского города Пиза), а также одноимённая коллаборация, занимающаяся его разработкой и обслуживанием. В 2016 году в обсерватории работало 338 сотрудников.

- Основной частью детектора является лазерный [интерферометр Майкельсона](#), каждое плечо которого имеет длину 3 километра. Переотражения сигнала на концах плеч увеличивают их эффективную длину до 120 километров. Диапазон чувствительности Virgo — от 10 до 6 000 [Герц](#), в оптимуме точность измерений достигает 10 – 22 . Ширина диапазона в совокупности с высокой чувствительностью детектора позволяет надеяться зафиксировать с его помощью гравитационное излучение от [взрывов сверхновых](#) и слияний [двойных систем](#) в нашей [Галактике](#) и во многих близких к ней, например, из всего [скопления Девы](#).
- Чтобы достичь необходимой высокой чувствительности, для Virgo были разработаны уникальные высокомоощные [ультрастабильные лазеры](#), [зеркала со сверхвысоким коэффициентом отражения](#), [сейсмические изоляторы](#) и контроллеры положения и направления.
- В оптической части Virgo используется один из самых стабильных когда-либо построенных лазеров (2009). Для производства зеркал с [коэффициентом отражения](#) свыше 99,999 % и нанометровой точностью формы была построена специальная фабрика оптических покрытий. Изоляция оптических частей интерферометра от сейсмических шумов обеспечивается десятиметровыми в высоту многоступенчатыми маятниковыми системами. Внутренняя часть интерферометра вакуумирована до давления 10 – 10 [миллибара](#), чтобы исключить шумы, возникающие в воздухе. Эта часть включает в себя две трубы длиной по 3 километра и диаметром 1,2 метра, и таким образом является самой большой по объёму вакуумной установкой в Европе (6800 м³) и третьей по размеру в мире (после интерферометров [LIGO](#)). Трубы покоятся на 20-метровых бетонных элементах, которые поддерживаются примерно тысячей бетонных свай, углубленных на 20—50 метров для достижения слоёв, не подверженных поверхностной вибрации. Для достижения столь низкого давления трубы были изготовлены по специальной технологии, включающей десорбцию водорода из металла труб; кроме того, перед каждым циклом работы интерферометра для удаления водяного пара трубы прогреваются до 150 °С в течение нескольких суток.

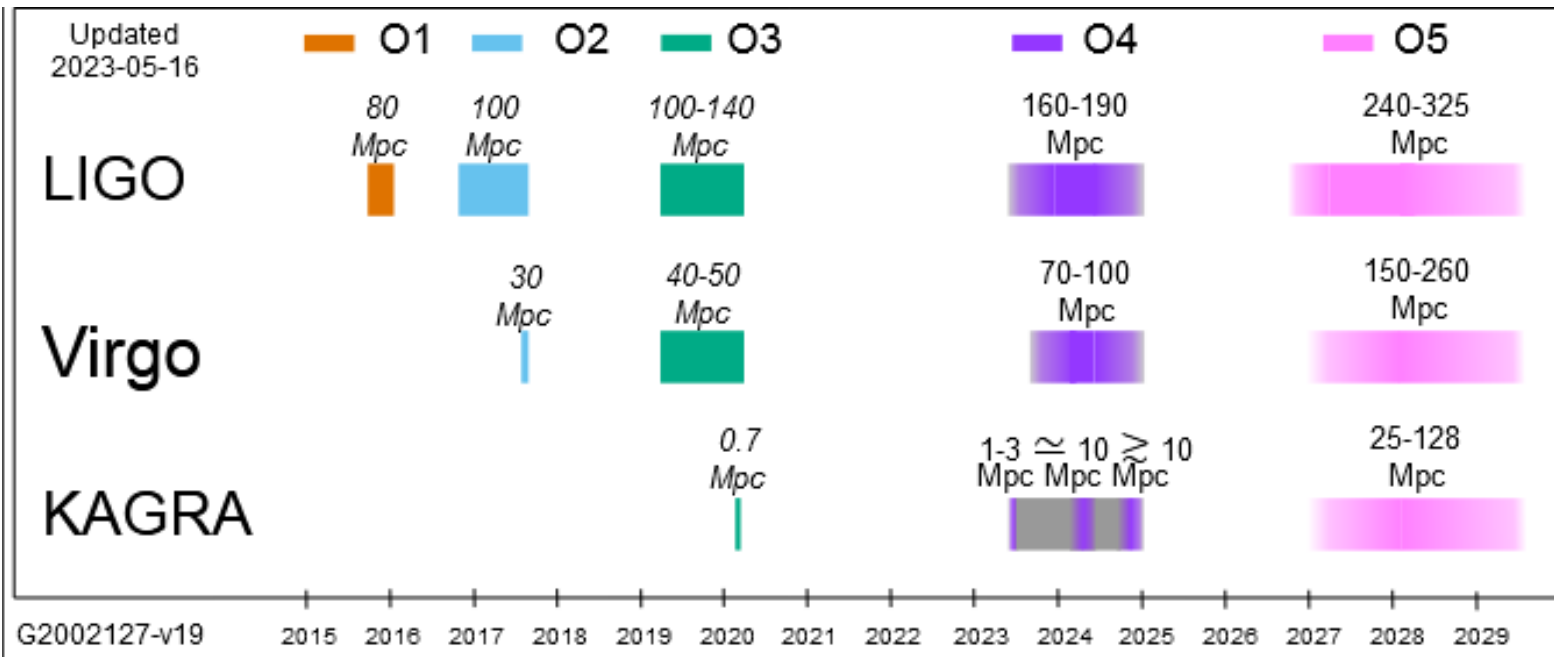
KAGRA

- **KAGRA** (*Kamioka Gravitational Wave Detector* - *Детектор Гравитационных Волн Камиока*), ранее называемый **LCGT** (*Large Cryogenic Gravity Telescope* - *Большой Криогенный Гравитационно-Волновой Телескоп*) — японский детектор гравитационных волн, расположенный примерно в 200 км к западу от Токио, в подземной шахте Камиока в бывшем посёлке Камиока (ныне часть города [Хида](#)). Он управляется [Институтом исследований космических лучей^{\[en\]}](#) (ICRR — Institute for Cosmic Ray Research) [Токийского университета](#).^[1] Это первый в Азии [детектор гравитационных волн](#), первый в мире, построенный под землёй, в подземной шахте, и первый в мире детектор в котором используются криогенные зеркала изготовленные из [сапфира](#) и охлаждаемые до 20 градусов выше [абсолютного нуля](#) $-253,15\text{ }^{\circ}\text{C}$ (20 K) для уменьшения теплового шума.^[2]

KAGRA

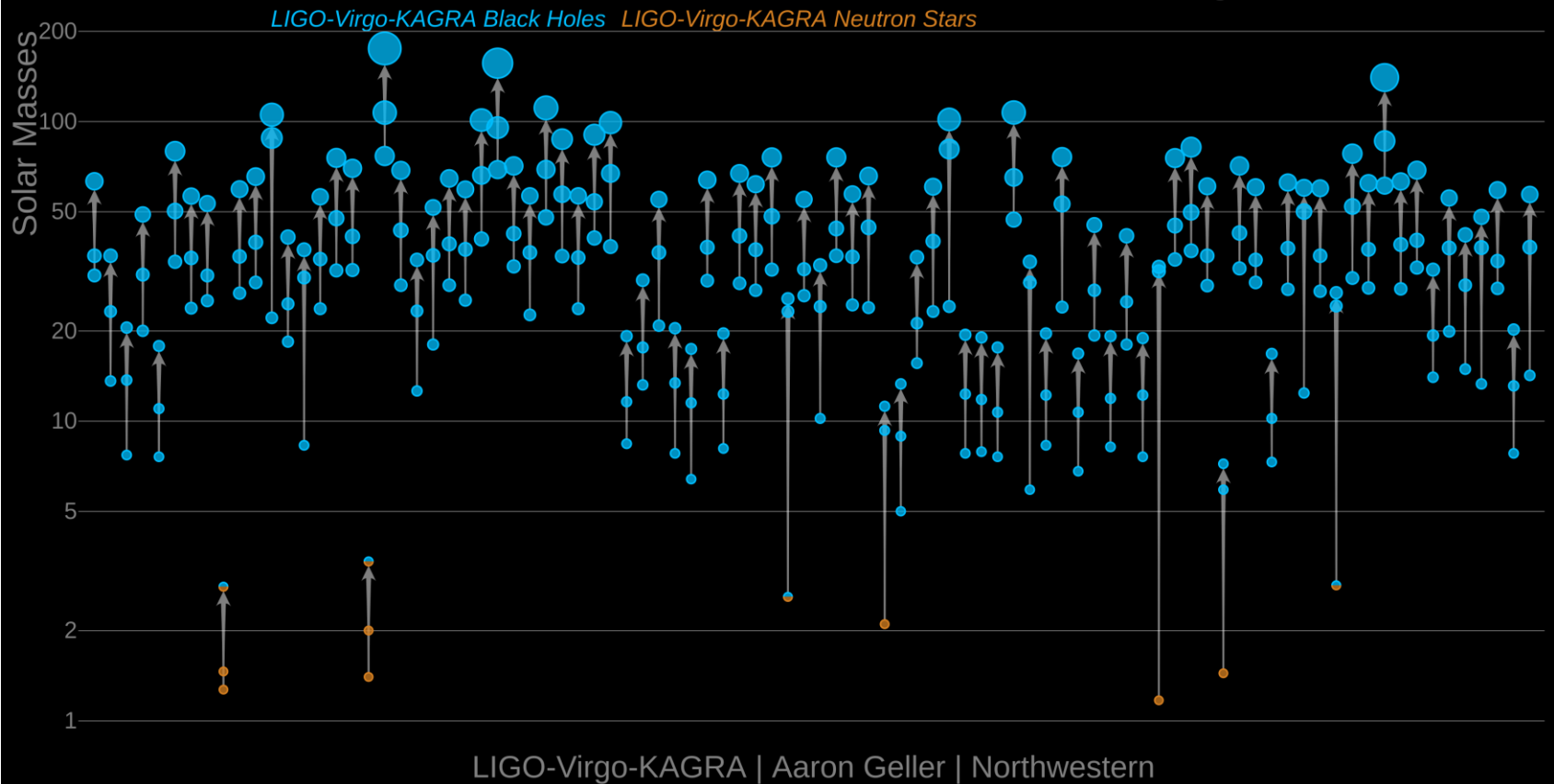
- KAGRA имеет два плеча длиной 3 км, которые образуют лазерный интерферометрический детектор гравитационных волн. Используемый лазер имеет мощность около 80 Вт. Нижний предел обнаружения детектора — при амплитудах $3 \cdot 10^{-24}$ на частоте 100 Гц.





Мы планируем, что после месячного инженерного запуска 24 мая начнется наблюдательный прогон 4 (O4). Во время O4 мы ожидаем, что четыре объекта (LHO, LLO, Virgo и KAGRA) внесут свой вклад. LIGO Хэнфорд и Ливингстон планируют начать наблюдения 24 мая 2023 года; хотя текущая чувствительность для слияний двойных нейтронных звезд составляет 130-150 Мпк, работа по улучшению чувствительности будет продолжаться в ходе эксперимента. VIRGO планирует присоединиться к нам ближе к концу июня, после того как ей будет поручено устранить поврежденное зеркало, которое ограничивает производительность. KAGRA начнет работу с LIGO, а затем вернется к расширенному вводу в эксплуатацию, чтобы снова присоединиться к концу O4 с большей чувствительностью.

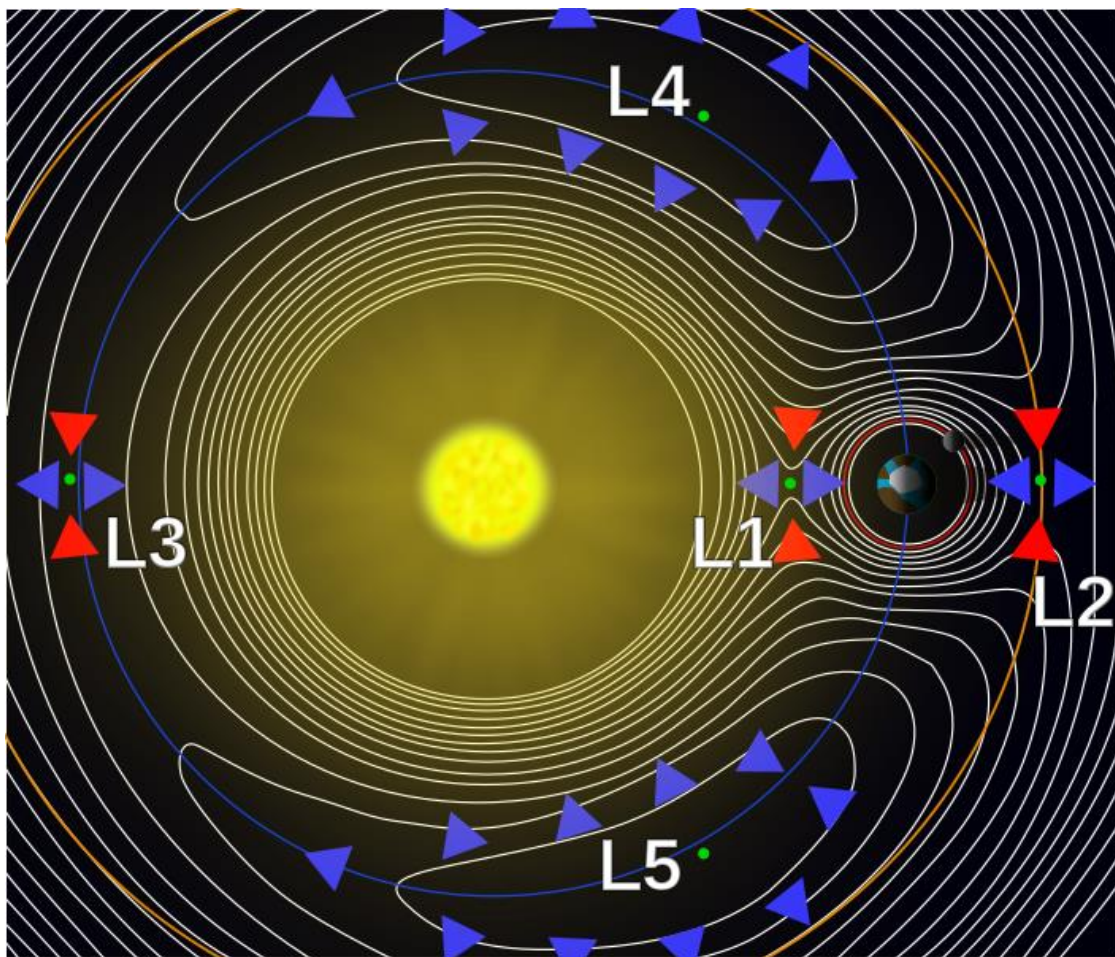
Masses in the Stellar Graveyard



Массы обнаруженных компактных двойных систем LIGO/Virgo. На этом графике показаны массы всех компактных двойных систем, обнаруженных LIGO/Virgo, с черными дырами синего цвета и нейтронными звездами оранжевого цвета. Объекты расположены в порядке даты обнаружения. (ligo.org)

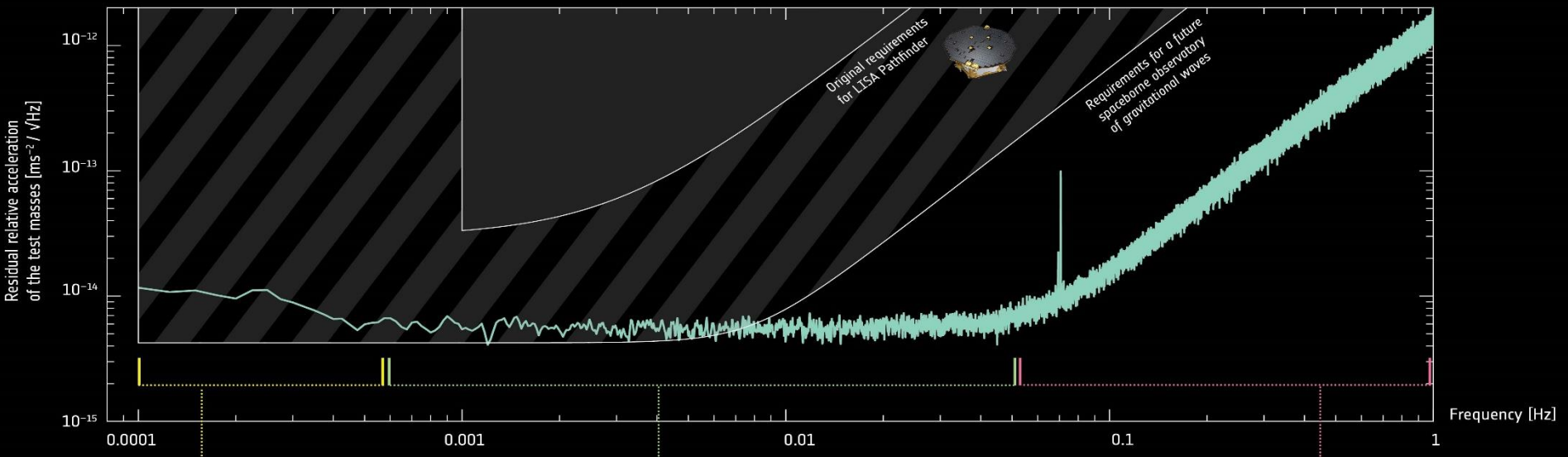
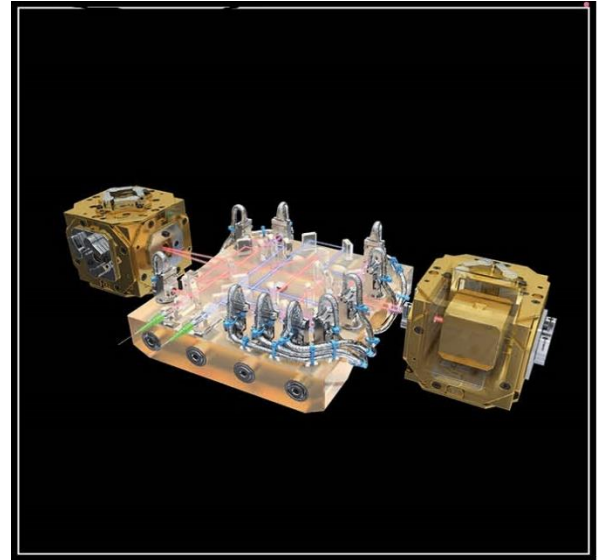
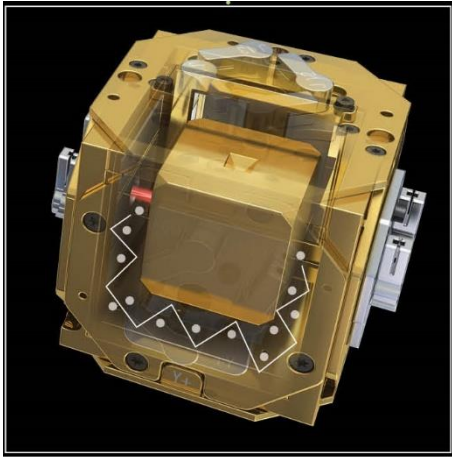
. Внеземные гравитационно-волновые антенны (проект LISA)

- Проект LISA (Laser Interferometer Space Antenna) сходен с проектами LIGO и VIRGO. В нем также используются свободные массы, удаленные на большое расстояние l , и лазерный интерферометр для измерения малых вариаций расстояния Δl , вызванных гравитационными волнами. Количественное различие заключается в величине l и рабочем диапазоне частот гравитационного излучения: диапазон частот от 0.1 мГц до 1 Гц (т. е. много ниже чем в LIGO и VIRGO), а $l = 5 \times 10^6 \text{ km}$ (т. е. на 6 порядков больше чем в наземных антеннах). Соответственно проект LISA рассчитан на совершенно другие типы астрофизических источников (см. ниже). Пробными массами в этом проекте являются три спутника, которые находятся друг от друга на расстоянии 5 млн. километров, а все вместе на орбите Земли (вокруг Солнца). Эта “группа” спутников будет “размещена” примерно на расстоянии 20 млн. км от Земли (см. рис.3). В отличие от LIGO и VIRGO лазерные интерферометры LISA смогут использовать только одно отражение (из-за ослабления оптического потока, вызванного дифракцией).



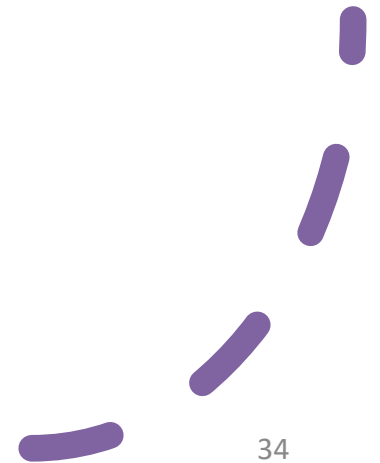
Точки Лагранжа, точки либрации ([лат. *librātiō*](#) — раскачивание) или **L-точки** — [точки](#) в системе из двух [массивных](#) тел, в которых третье тело с пренебрежимо малой массой, не испытывающее воздействия никаких [сил](#), кроме [гравитационных](#) со стороны двух первых тел, может оставаться неподвижным относительно этих тел.

- В этих точках третье тело, размеры и масса которого относительно малы, вроде космического спутника, будет оставаться неподвижным относительно первых двух массивных тел.



BACK UP

03/10/2023



- **Nd:YAG лазер** — твердотельный лазер. В качестве активной среды используется алюмо-иттриевый гранат («YAG», $Y_3Al_5O_{12}$), легированный ионами неодима (Nd).

- (Standard Quantum Limits – SQL), возникают, если в измерительной системе выбрана “неправильная” наблюдаемая координата (они известны более тридцати лет [10]). Происхождение SQL пределов очень простое: они есть следствие соотношений неопределенностей Гейзенберга для координаты и импульса, и конечности времени измерения t_{meas} . В соответствии с этими соотношениями при протяженном во времени измерении координаты непрерывно немного возмущается импульс (т. е. и скорость, если пробная масса свободная). В течение полного времени измерения t_{meas} возмущение в начале интервала превращается в добавочное возмущение координаты. В результате за полное время измерения t_{meas} координату свободной массы m нельзя измерить точнее чем
-
- (5)
- Эта величина очень близка к планируемой в LIGO-II $1.6 \cdot 10^{-17}$! Иными словами, на втором этапе LIGO экспериментаторы должны вплотную приблизиться к “зоне” квантового “поведения” макроскопических зеркал и к тому же при комнатной температуре.
- Как обойти препятствие SQL известно давно: например не следует измерять \hat{p} , но сделать измеритель, который регистрировал бы только изменение скорости (или импульса) одного зеркала относительно другого.

(Standard Quantum Limits – SQL), возникают, если в измерительной системе выбрана “неправильная” наблюдаемая – координата (они известны более тридцати лет [10]). Происхождение SQL пределов очень простое: они есть следствие соотношений неопределенностей Гейзенберга для координаты и импульса, и конечности времени измерения τ_{meas} . В соответствии с этими соотношениями при протяженном во времени измерении координаты непрерывно немного возмущается импульс (т. е. и скорость, если пробная масса – свободная). В течение полного времени измерения τ_{meas} возмущение в начале интервала превращается в добавочное возмущение координаты. В результате за полное время измерения τ_{meas} координату свободной массы m нельзя измерить точнее чем

$$\Delta x_{SQL} \cong \sqrt{\frac{\hbar \tau_{meas}}{2m}} = 1,6 \times 10^{-17} \text{ см} \left(\frac{\tau_{meas}}{5 \times 10^{-3} \text{ s}} \right)^{\frac{1}{2}} \times \left(\frac{m}{10^4 \text{ gram}} \right)^{-\frac{1}{2}} \quad 5)$$

Эта величина очень близка к планируемой в LIGO-II $\Delta x \cong 2 \times 10^{-17} \text{ см}$! Иными словами, на втором этапе LIGO экспериментаторы должны вплотную приблизиться к “зоне” квантового “поведения” макроскопических зеркал и к тому же при комнатной температуре.

Астрономические величины

Наименование	Величина (среднее значение)
Радиус Земли	$6,37 \cdot 10^6$ м
Масса Земли	$5,98 \cdot 10^{24}$ кг
Радиус Солнца	$6,95 \cdot 10^8$ м
Масса Солнца	$1,98 \cdot 10^{30}$ кг
Радиус Луны	$1,74 \cdot 10^6$ м
Масса Луны	$7,33 \cdot 10^{22}$ кг
Расстояние от центра Земли до центра Солнца	$1,49 \cdot 10^{11}$ м
Расстояние от центра Земли до центра Луны	$3,84 \cdot 10^8$ м
1 астрономическая единица	149597868 км
Световой год	63240 а.е.
1 парсек	3,26 световых года

И еще. Чувствительность гравитационной антенны близка к квантовому пределу. Есть так называемый стандартный квантовый предел: если вы измеряете координату, то по принципу неопределенности Гейзенберга вы тут же ее и возмущаете. Если вы непрерывно измеряете координату, то вы все время ее возмущаете. Очень точно измерять координату нехорошо: будет большое обратное флуктуационное влияние. Это показал в 1968 году Брагинский. Подсчитали для LIGO. Оказалось, что для initial LIGO чувствительность выше стандартного квантового предела примерно в десять раз.