

Гравитационные волны и их детектирование

Профессор В.П.Митрофанов

28 июня 2016 года

Регистрация гравитационных волн

- Гравитационные волны были впервые зарегистрированы **14 сентября 2015 года** на двух детекторах Лазерной интерферометрической гравитационно-волновой обсерватории (**LIGO – Laser Interferometric Gravitational Wave Observatory**), расположенных в Ливингстоне, штат Луизиана, и в Хэнфорде, штат Вашингтон, США.
- **26 декабря 2015 года** ученые во второй раз обнаружили гравитационные волны – возмущения метрики пространства-времени, вызванные слиянием двух черных дыр далеко во Вселенной.

План лекции

- Природа гравитационных волн и их источники
- История поиска гравитационных волн
- Как устроены гравитационно-волновые детекторы
- Вклад ученых физического факультета МГУ
в Проект LIGO
- Что зарегистрировали детекторы LIGO
- Значение открытия и дальнейшее развитие
гравитационно-волновой астрономии

Гравитация в Ньютонской физике и в ОТО

- **Пространство в Ньютонской физике:**

- ✓ Жесткая сеть декартовых координат + время
- ✓ Закон всемирного тяготения

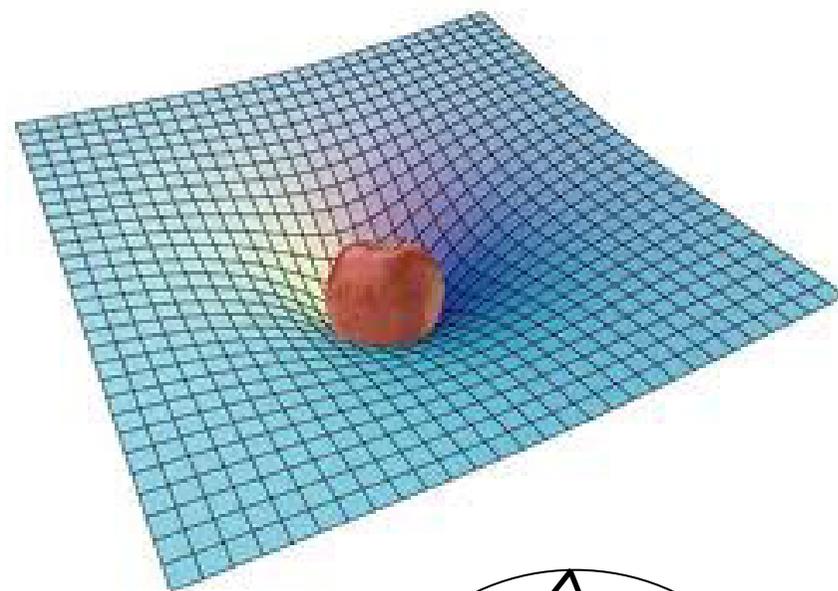
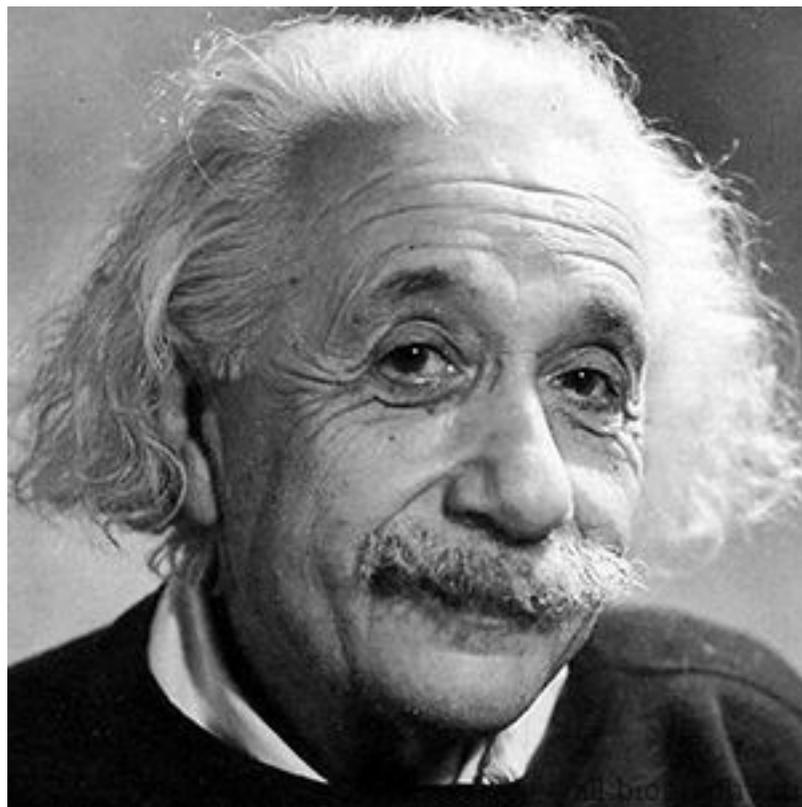
$$F = G \frac{m_1 m_2}{r^2} -$$

- **Пространство в ОТО:**

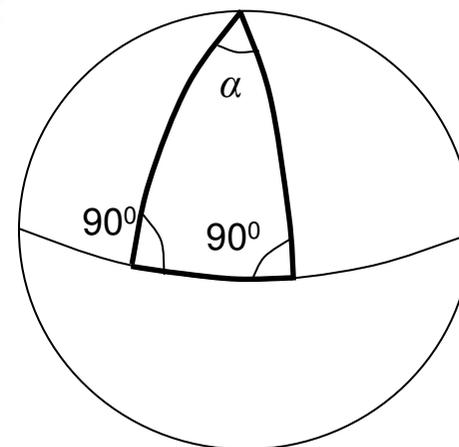
- ✓ 4-х мерное пространство-время
(динамическое и деформируемое)
- ✓ Тяготение, как кривизна пространства-времени
- ✓ Кривизну создает присутствующая материя

1916 год

Альберт Эйнштейн предсказывает существование гравитационных волн



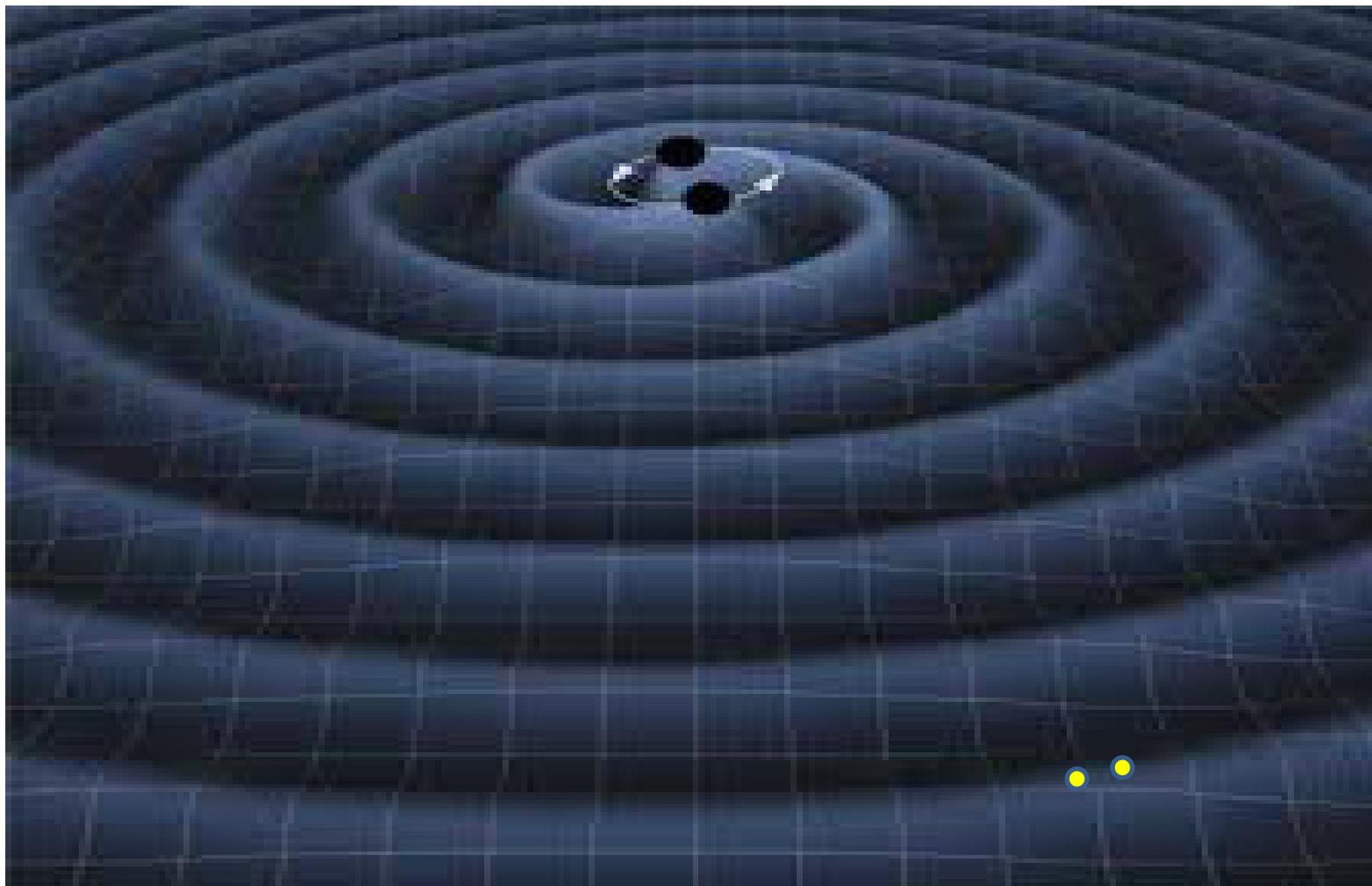
$$C = \frac{(\Sigma - \pi)}{A}$$



$$\Sigma = 90^\circ + 90^\circ + \alpha > 180^\circ$$

Пространство-время подобно упругой среде.
В нем возможно распространение волн кривизны

Гравитационные волны – волны кривизны пространства-времени



Действие гравитационной волны на пробные массы

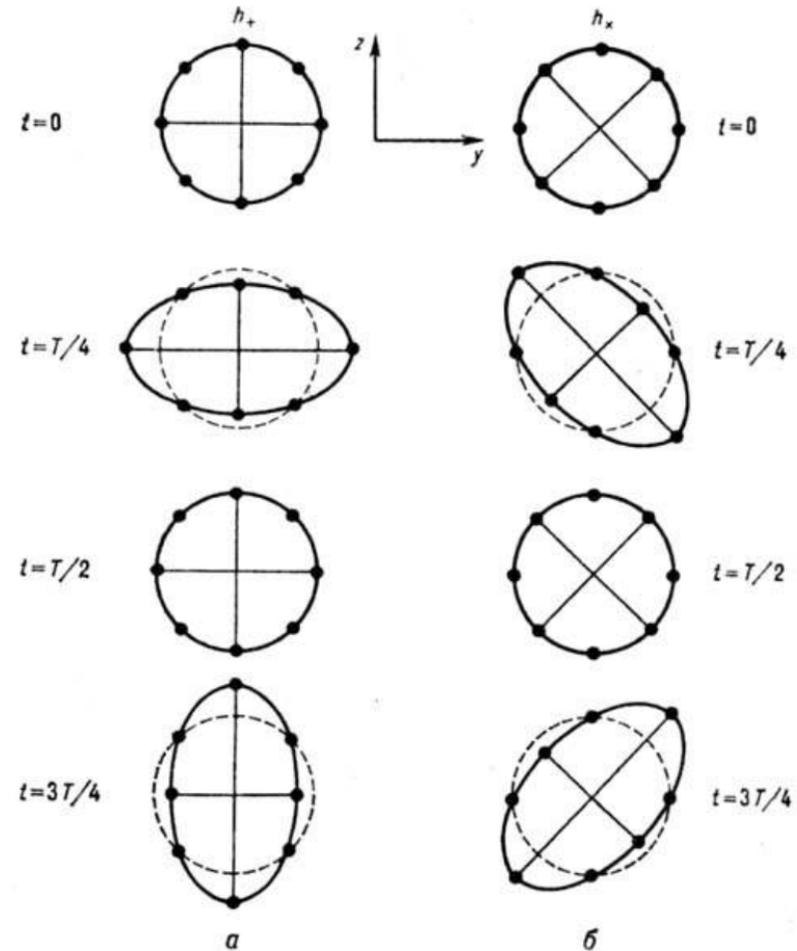
Гравитационная волна характеризуется безразмерной вариацией метрики: $h_{\mu\nu}$

Изменение расстояние между пробными массами:

$$\delta L \approx 0,5 h(t)L$$

Поток энергии:

$$S = \frac{c^3}{32\pi G} (|\dot{h}_+|^2 + |\dot{h}_\times|^2)$$

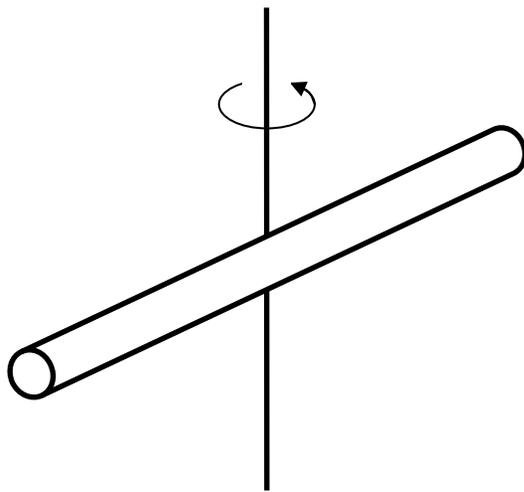


Излучение гравитационных волн

Гравитационные волны генерируются ускоренно движущейся материей

$$h \approx \frac{2G}{3c^4 R} \frac{d^2 D}{dt^2} \quad D - \text{квадрупольный момент системы масс}$$

Можно ли осуществить опыт Герца с гравитационными волнами?



$$M = 10^4 \text{ кг}$$

$$L = 2 \text{ м}$$

$$\Omega = 10 \text{ об/с}$$

$$P_{\text{грав}} = 10^{-25} \text{ Вт}$$

$$h = 10^{-40}$$

Источники гравитационных волн:

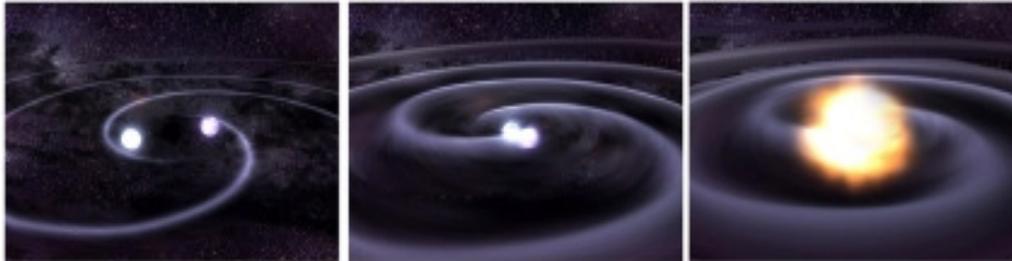
Непрерывные гравитационные волны

- Двойные звезды или черные дыры, вращающиеся друг относительно друга
- Вращающиеся несимметричные нейтронные звезды, в частности пульсары

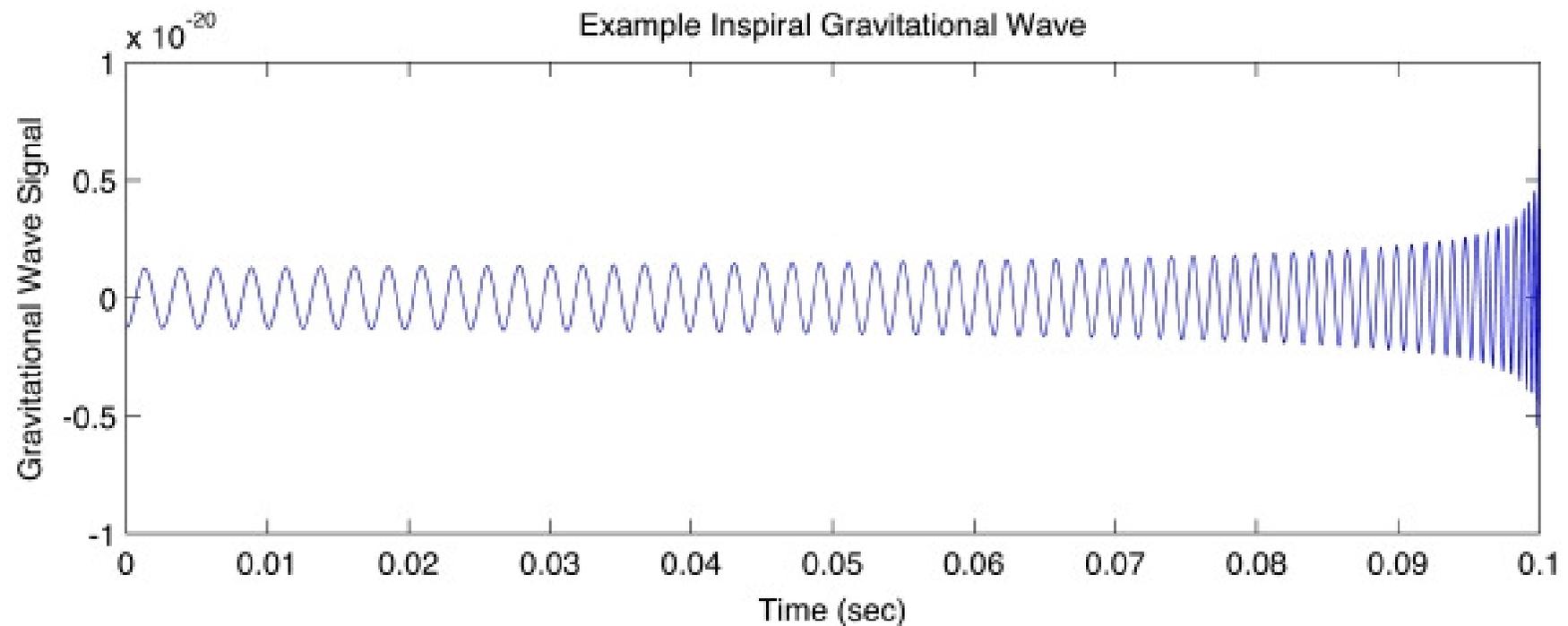
Всплески гравитационного излучения

- Взрыв сверхновой
- Неизвестные, непредвиденные источники малой длительности

Источники: сливающиеся двойные системы

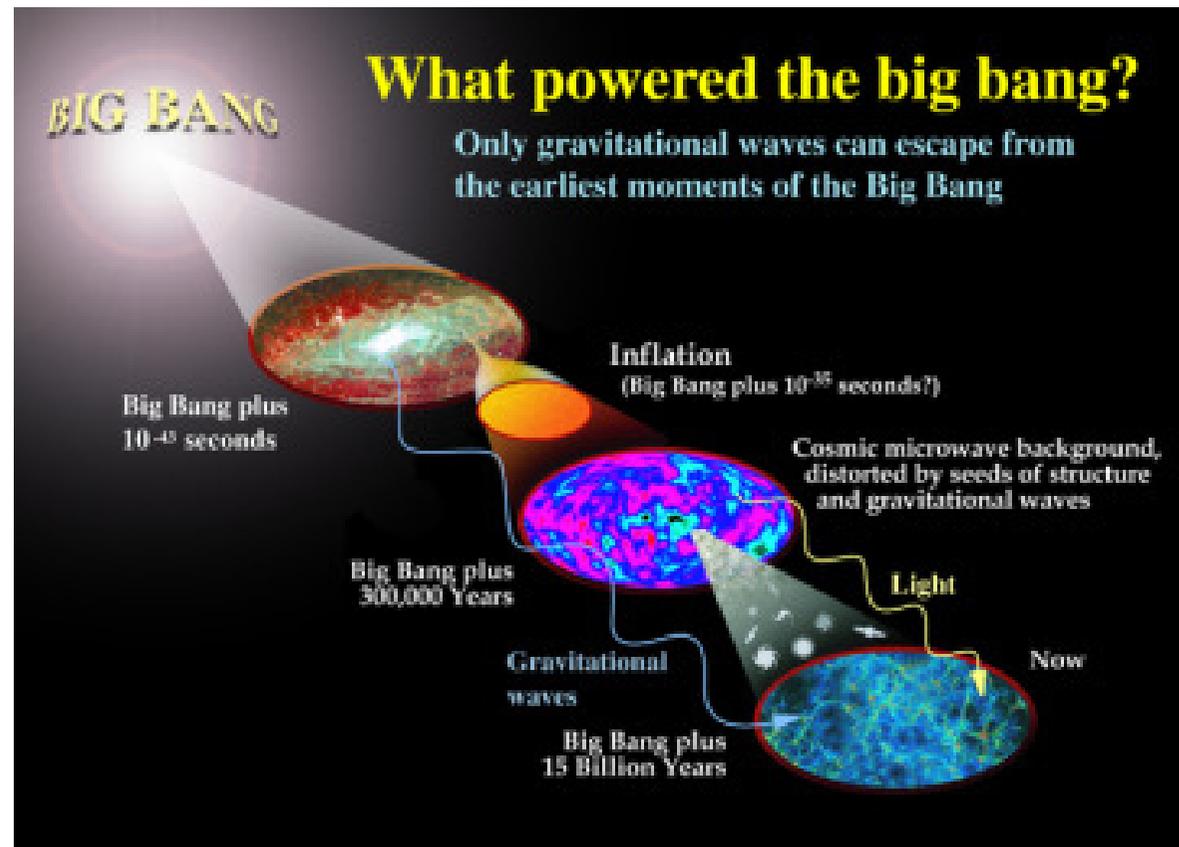


- 1) Две нейтронных звезды
- 2) Нейтронная звезда и черная дыра
- 3) Две черных дыры



Источники: стохастические гравитационные волны

Волны, оставшиеся с времени эволюции ранней Вселенной, возникли из множества случайных, независимых событий.



Могут рассказать нам о самом начале образования Вселенной, тогда как микроволновое реликтовое излучение возникло через 300,000 лет после Большого Взрыва

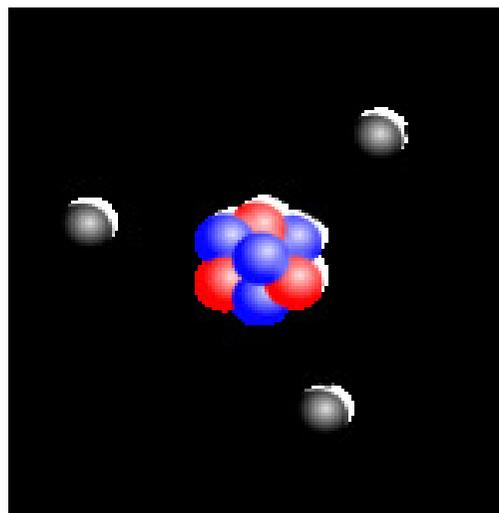
От размера земного шара
до амплитуды колебаний поверхности зеркала
гравитационно-волнового детектора $\delta L \approx h(t)L$



13 тыс. км



10 см



10^{-10} м

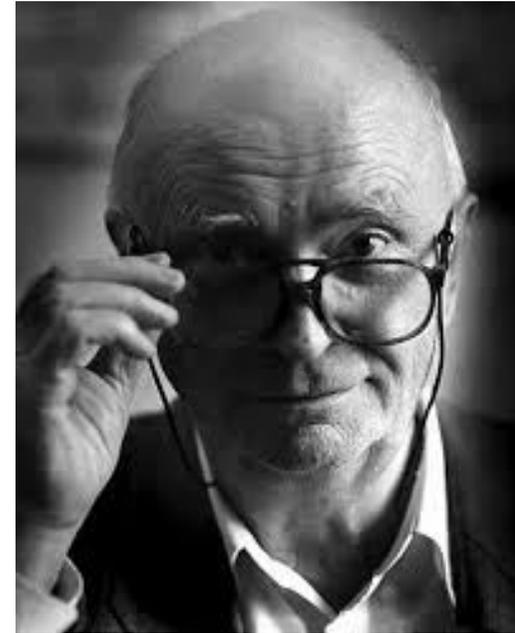


10^{-19} м

«Bar» детекторы гравитационных волн



Детектор Дж. Вебера 1968
 $h \approx 10^{-16}$



Член-корр. РАН профессор
физического факультета МГУ
В.Б. Брагинский

«Bar» детекторы гравитационных волн (параметры)

группа	антенна	преобразователь	Чувствительность (h)
Рим/Церн	Al – 2,3 т; 2,5 К	Емкостной + сквид	7×10^{-19}
Церн	Al – 2,3 т; 0,1 К	Емкостной + сквид	2×10^{-18}
Луизиана	Al – 2,3 т; 4,2 К	Емкостной + сквид	7×10^{-19}
Стенфорд	Al – 1,4 т; 4,2 К	Емкостной + сквид	10^{-18}
Австралия	Nb – 1,5 т; 5 К	Радиочастотный резонатор	7×10^{-19}
Япония	Al – 1,2 т; 4,2 К	Емкостной	4×10^{-22} (60 Гц)

Косвенное доказательство существования гравитационных волн

Косвенное доказательство существования ГВ связано с работами американских радиоастрономов *Дж. Тейлора и Р.Халса*.

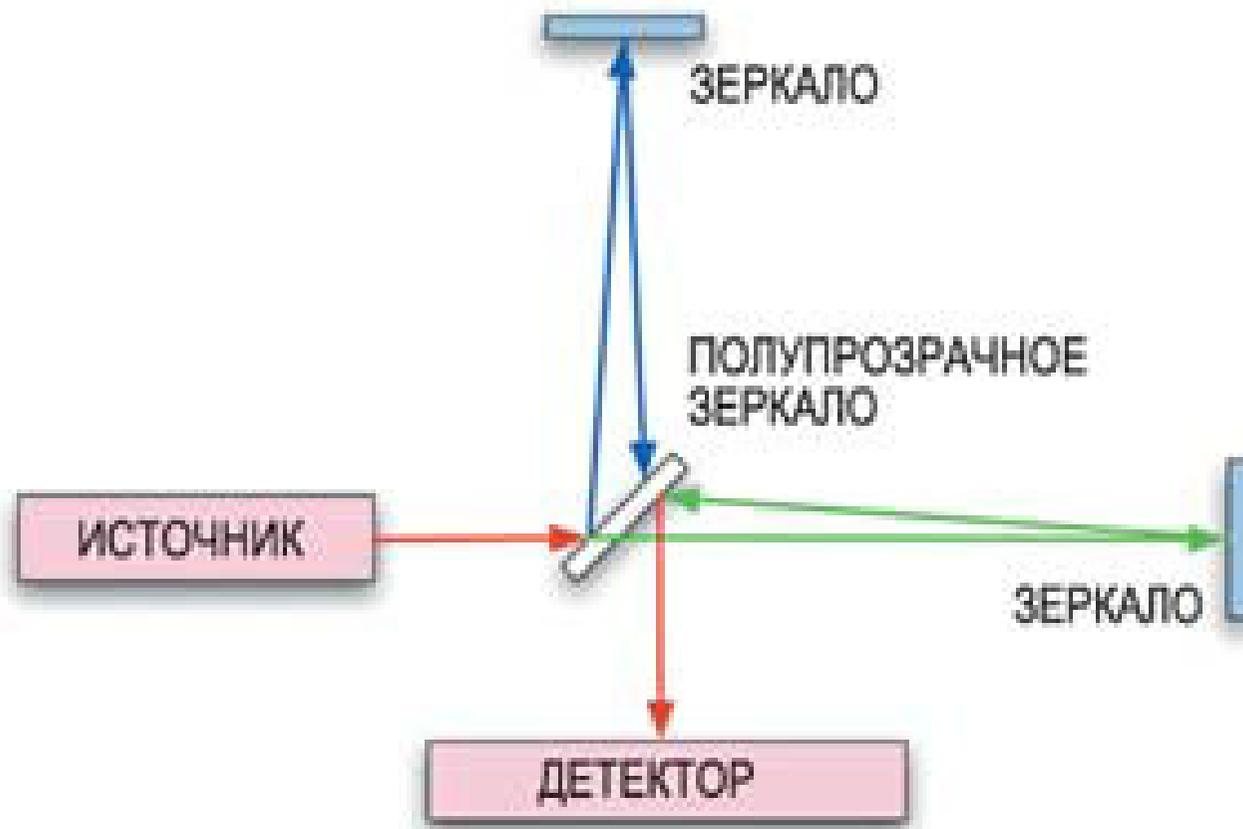
В 1974 году они впервые обнаружили пару обращающихся друг вокруг друга нейтронных звезд **PSR B1913+16**. Одна из них излучала в радиодиапазоне (радиопульсар).

Пулсар вращается вокруг своей оси со стабильной угловой скоростью и поэтому служит исключительно точными часами.

Эта особенность и позволила чрезвычайно точно измерить массы обеих звезд и выяснить характер их орбитального движения. Период вращения составляет 3 часа 45 мин и ежегодно сокращается на **70 мс**.

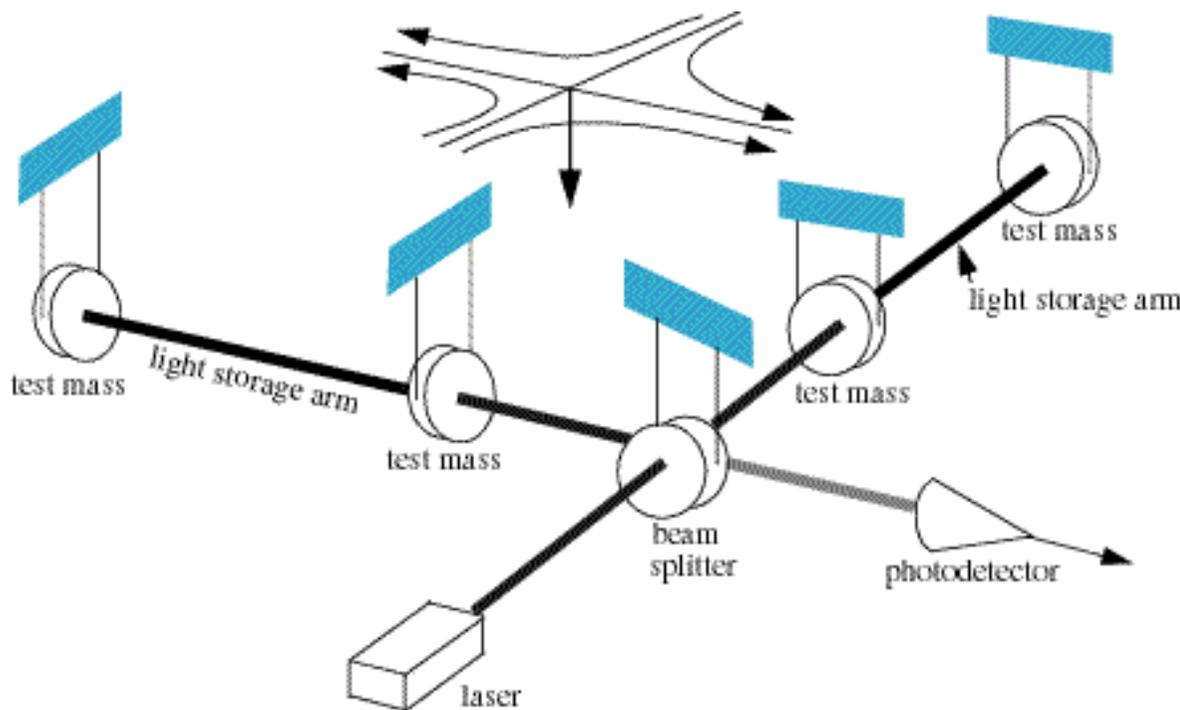
Эта величина хорошо согласуется с решениями уравнений ОТО, описывающих потерю энергии звездной пары, обусловленную гравитационным излучением.

Лазерный интерферометрический детектор гравитационных волн



М.Е. Герценштейн, В.И. Пустовойт, ЖЭТФ 43, 605 (1962)

Лазерный интерферометрический детектор гравитационных волн LIGO



1970-е R. Weiss (MIT)
K. Thorne, R. Drever
(Caltech) создали экспериментальные группы для разработки детектора

1980 г. 40 м прототип в Caltech

1984 г. решение о создании LIGO

1992 - 1998 строительство LIGO

2002 - 10^{-19}

2010 - 1.5×10^{-22} Initial LIGO

2015 - 7×10^{-23} Advanced LIGO

Лазерный интерферометрический детектор гравитационных волн LIGO



Хэнфорд, штат Вашингтон, США



Ливингстон, штат Луизиана, США

Длина плеч – **4 км**, диаметр трубы – **1,2 м**, вакуум в трубах и камерах – **10^{-8} Торр**
Расстояние между детекторами – **3000 км**

Коллаборация LIGO

Коллаборация LIGO

– около 1000 ученых
из университетов США и 15 других стран
(включая группы из МГУ им. М.В.
Ломоносова и Института прикладной
физики РАН в Нижнем Новгороде).

- ✓ Два раза в год проводятся конференции по обмену информацией о деятельности различных групп
- ✓ Сменное дежурство на детекторах LIGO
- ✓ Регулярные публикации в ведущих научных журналах

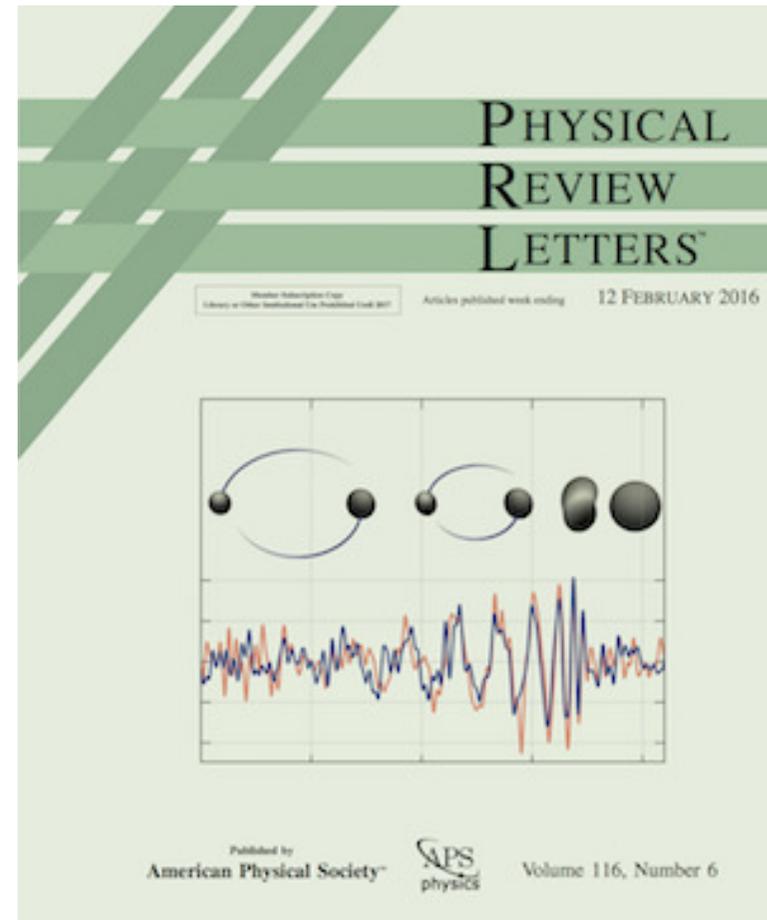
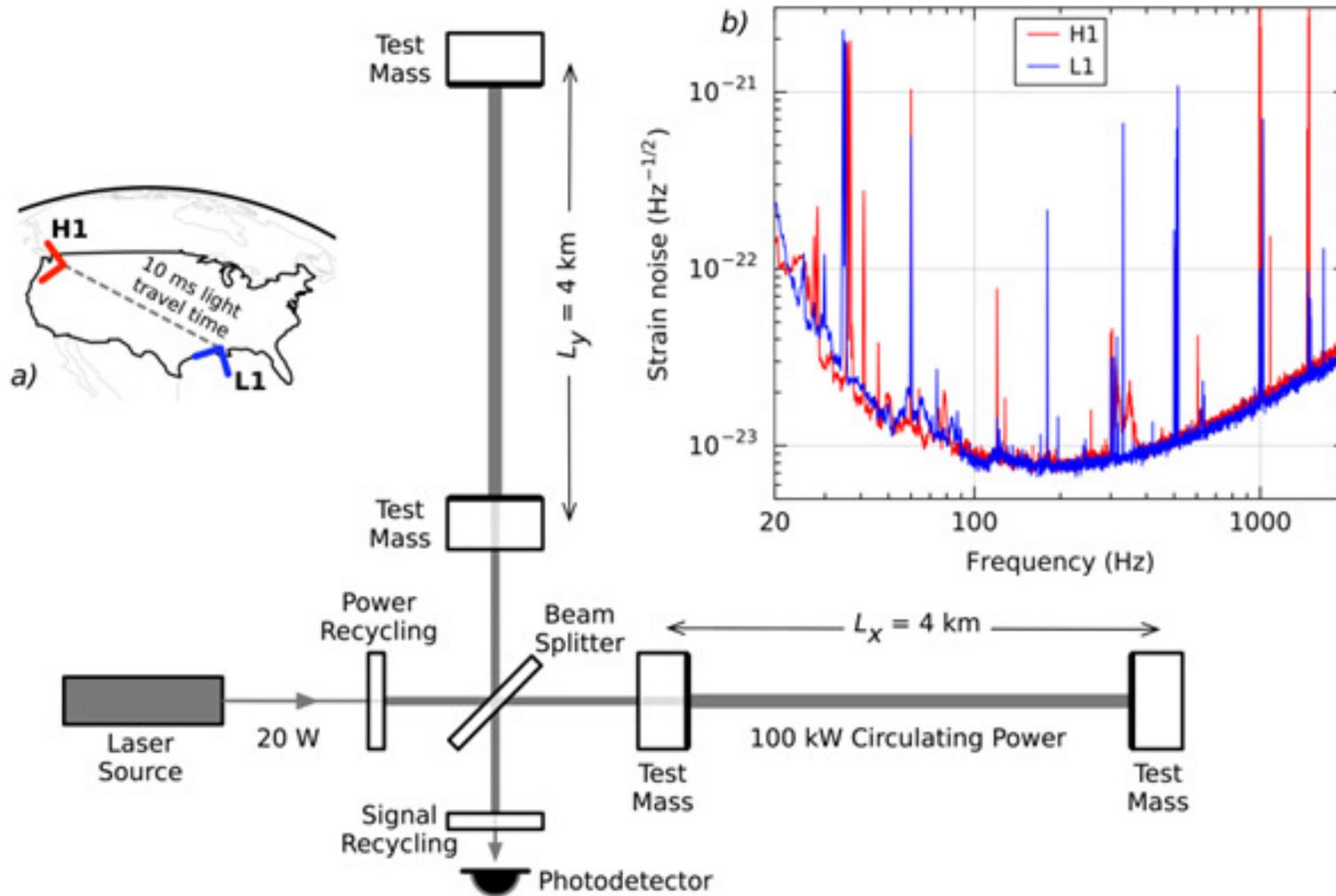
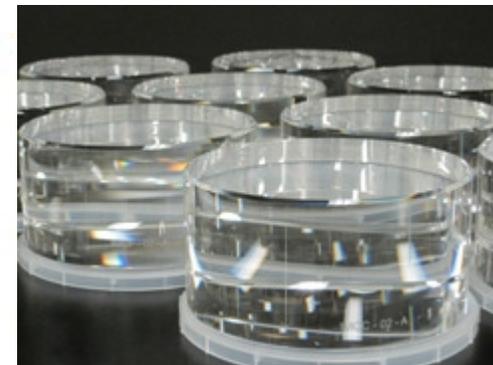
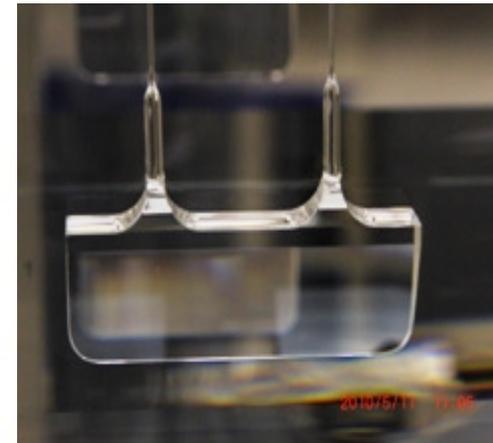


Схема гравитационно-волнового детектора Advanced LIGO



Пробные массы – зеркала интерферометра



<https://www.google.ru/search?q=Зеркала+детектора+LIGO>

Какими должны быть пробные массы

Зачем нужны большие пробные массы?

$$\frac{M\overline{V^2}}{2} = \frac{M\Omega^2\overline{(X^2)}}{2} = k_B T \quad \longrightarrow \quad \overline{(X^2)} = \frac{2k_B T}{M\Omega^2}$$

Зачем нужна большая добротность колебаний пробных масс?

$$\overline{\Delta X_\tau^2} = \frac{2k_B T}{M\Omega^2} \times \frac{2\tau}{\tau^*}$$

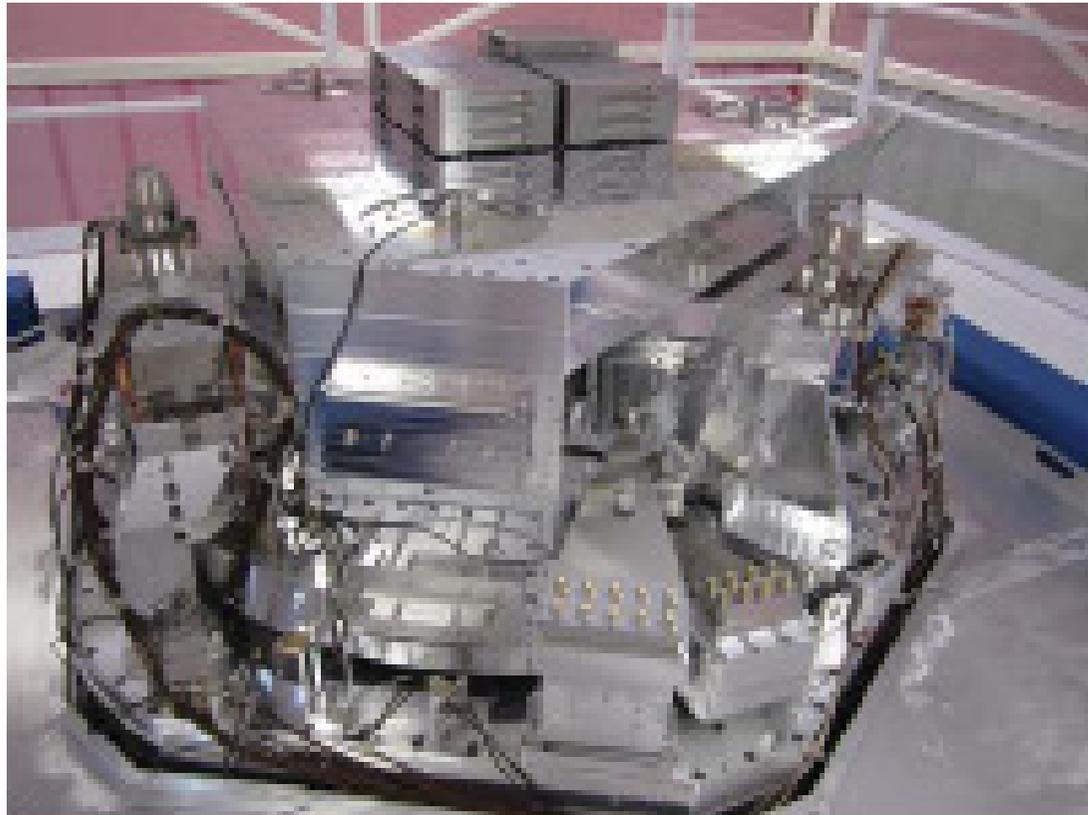
τ – время измерения

τ^* – время затухания колебаний

Сейсмическая изоляция пробных масс

- 1) Активная
- 2) Пассивная

На частотах до 10 Гц
движение
платформы
меньше 10^{-11} м



Основной лазер гравитационно-волнового детектора ($\lambda=1,064$ мкм)

Сдвиг фаз:

$$\Delta\varphi_{min} \sim \frac{1}{\sqrt{N_{\text{ФОТОНОВ}}}}$$

В настоящее время:

мощность лазера

$P_{\text{лазера}} = 20 \text{ Вт},$

в плечах интерферомента

$P_{\text{реактивная}} = 100 \text{ кВт}$

Планируется:

$P_{\text{лазера}} = 160 \text{ Вт},$

$P_{\text{реактивная}} = 800 \text{ кВт}$



Вычислительный комплекс

Настройку положения зеркал и других оптических элементов обеспечивают более 1000 следящих систем, записывается вся информация о состоянии детектора и окружения.

Для обработки поступающей информации (порядка 1 терабайта в сутки) задействованы тысяче процессорные кластеры и глобальная распределенная вычислительная сеть.



Вклад в проект LIGO научной группы физического факультета МГУ

Научную группу МГУ создал и вплоть до последнего времени возглавлял член-корреспондент РАН

Владимир Борисович Брагинский – всемирно известный ученый, один из пионеров гравитационно-волновых исследований в мире.

Группа участвует в Проекте с 1992 года.

В состав научной группы, включенной в число соавторов научного открытия, входят сотрудники кафедры физики колебаний Физического факультета МГУ:

профессора: **И.А. Биленко, С.П. Вятчанин, М.Л. Городецкий, В.П. Митрофанов, Ф.Я. Халили,**
доц. **С.Е. Стрыгин**, асс. **Л.Г. Прохоров.**

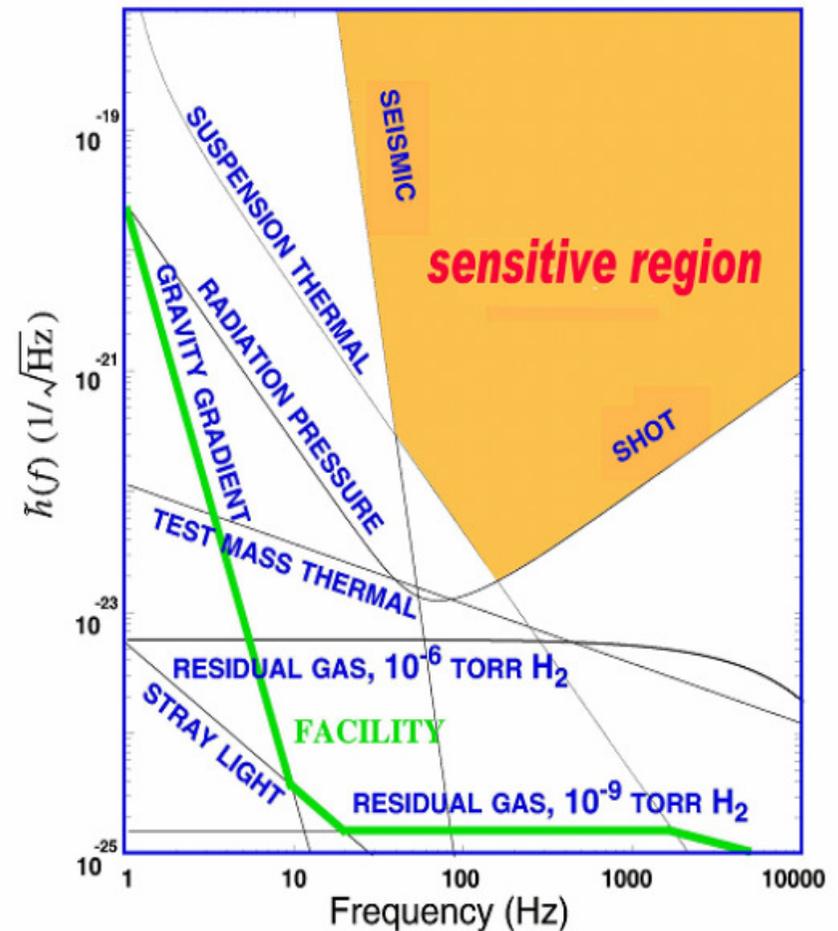
Неоценимый вклад в исследования внесли студенты, аспиранты и технический персонал кафедры

Основные направления исследований группы:

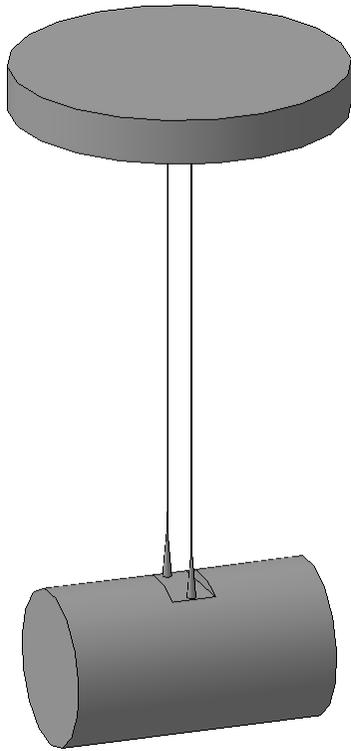
- Определение фундаментальных квантовых ограничений чувствительности измерений в механических системах, в частности, гравитационно-волновых детекторах. Разработка новых методов измерений.
- Анализ термодинамических ограничений чувствительности гравитационно-волновых детекторов
- Экспериментальная реализация основных элементов для высокочувствительных измерительных систем

Ограничения чувствительности лазерных гравитационно-волновых детекторов

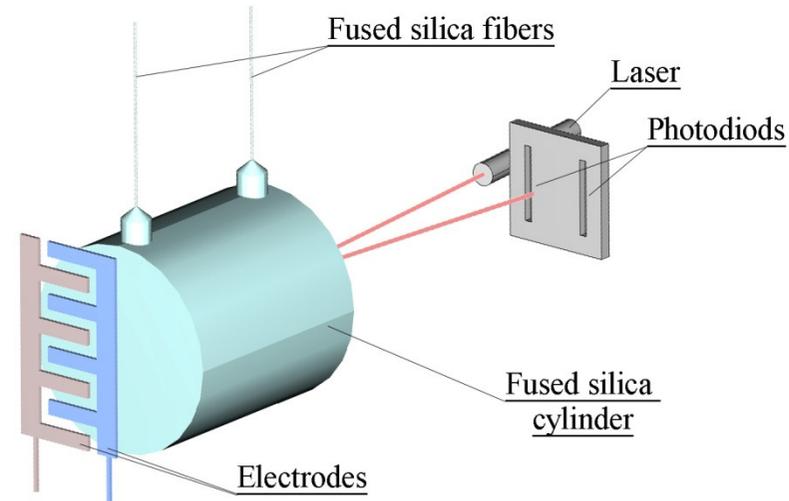
1. Фазовые шумы измерительного лазера (дробовой шум)
 2. Флуктуации давления лазерного излучения
- ⇒ 1+2 : Стандартный квантовый предел чувствительности(СКП)
3. Шумы подвеса
 4. **Шумы зеркал**
 5. Сейсмические шумы
 6. Флуктуации гравитационного поля
 7. Технические шумы



Кварцевые маятники МГУ



Время затухания колебаний
 ≈ 5 лет



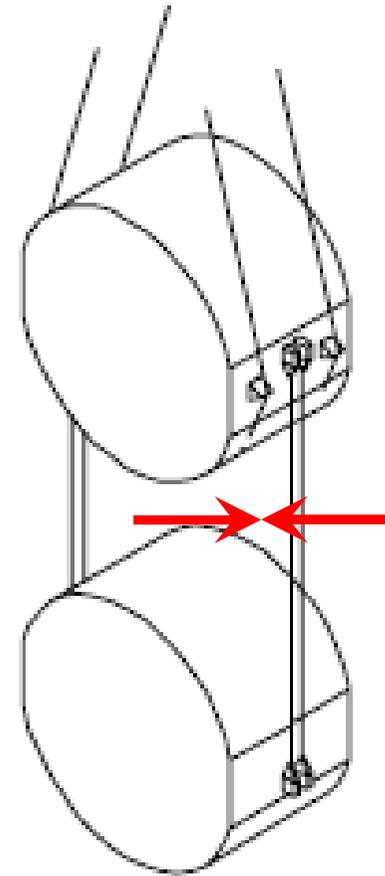
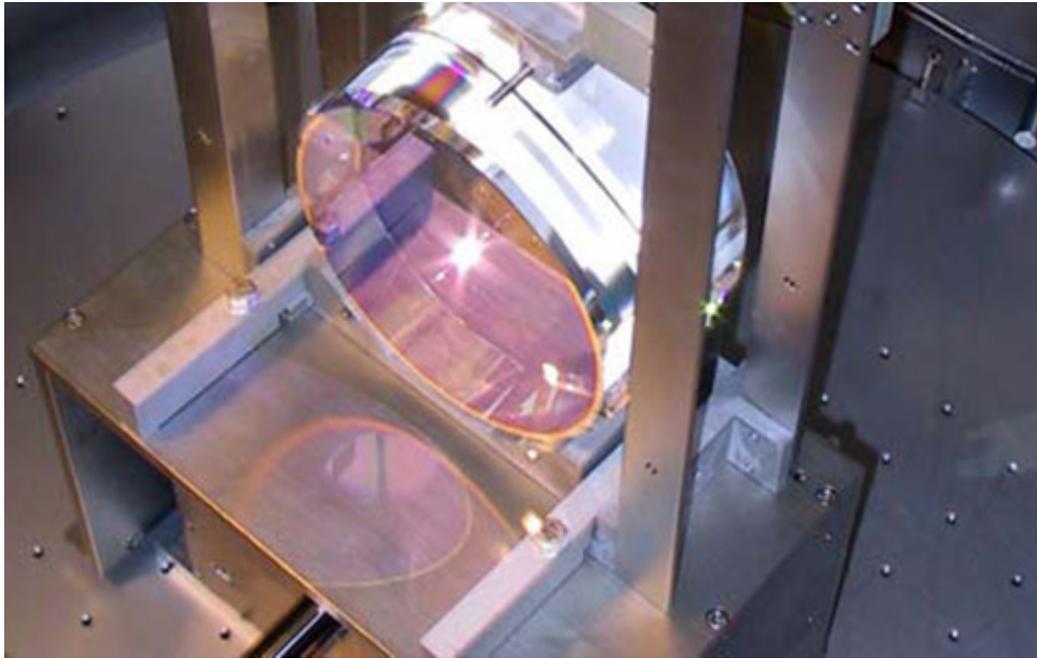
Квазимонолитный маятник

**Калтех – изготовление кварцевых нитей подвеса,
Университет Глазго – соединение пробной массы
с конусами,**

**МГУ – сборка маятника и измерение рекордного
времени затухания колебаний**

**Увеличение времени затухания колебаний или добротности
подвесов - ключевой фактор снижения тепловых шумов.**

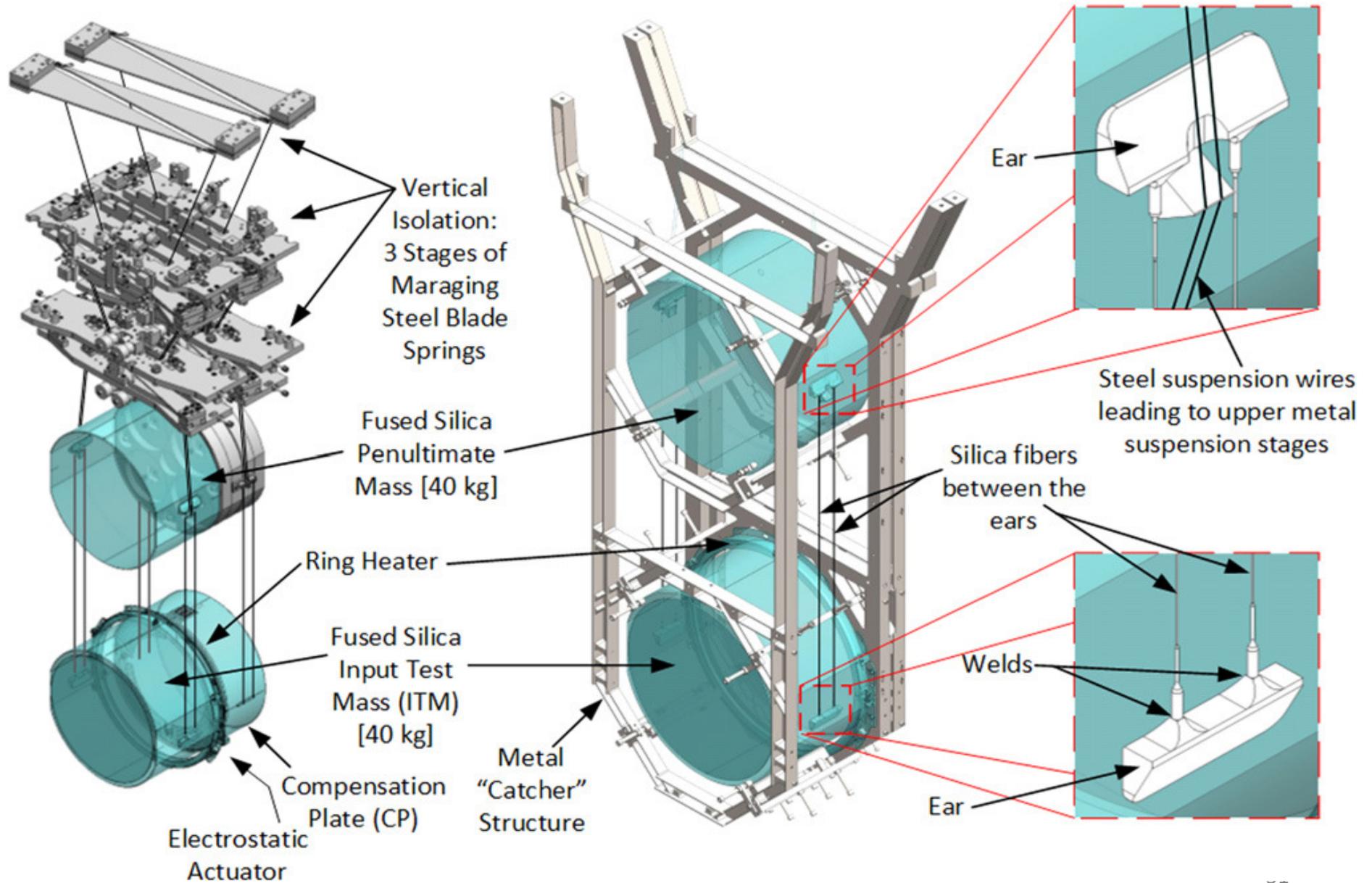
Шумы в подвесах зеркал



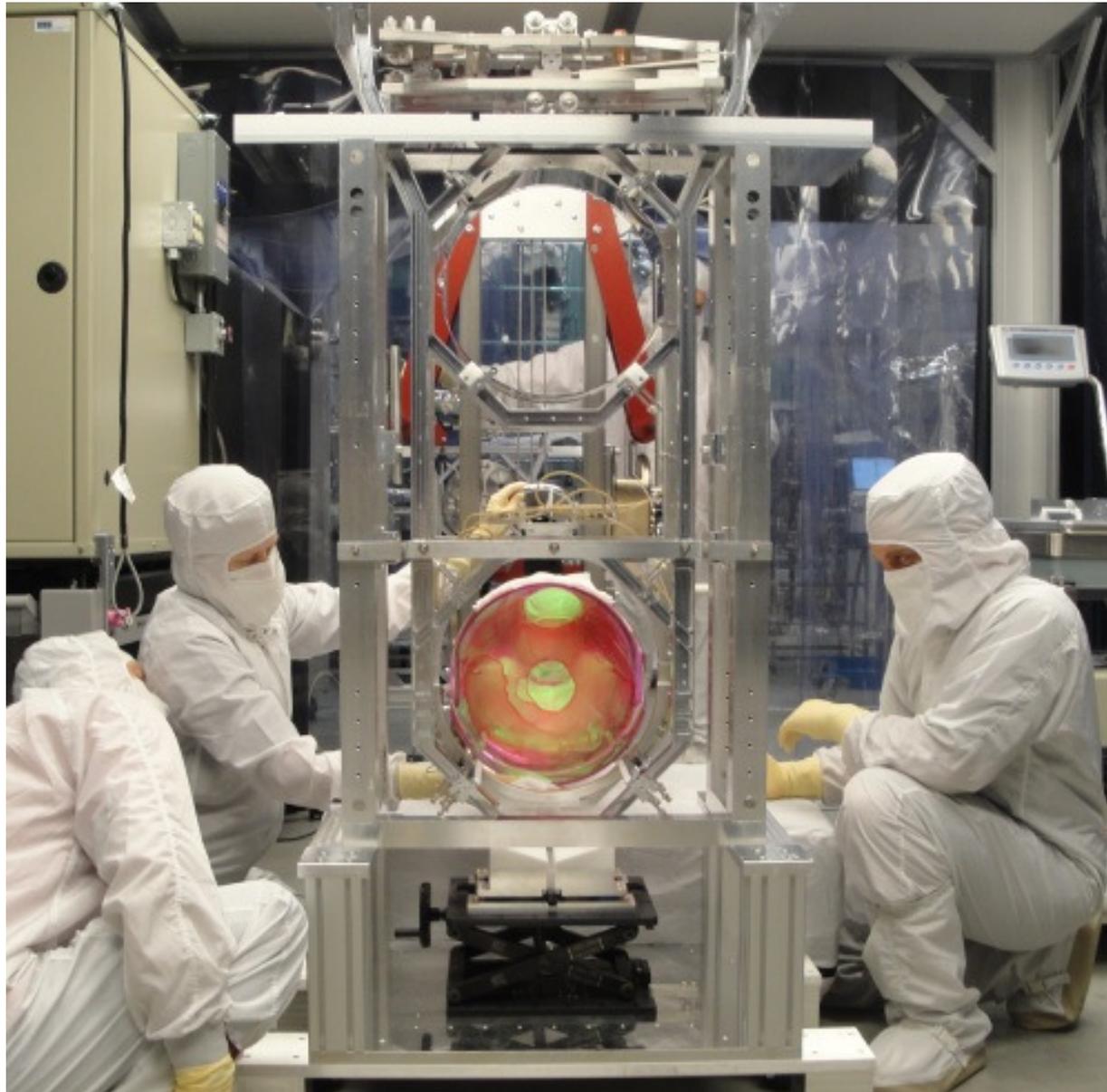
Стальные проволоки (подвес Initial LIGO) – экспериментально обнаружены «потрескивания» – избыточные шумы, связанные с большой запасенной упругой энергией.

Кварцевые нити (подвес Advanced LIGO) – такого эффекта нет.

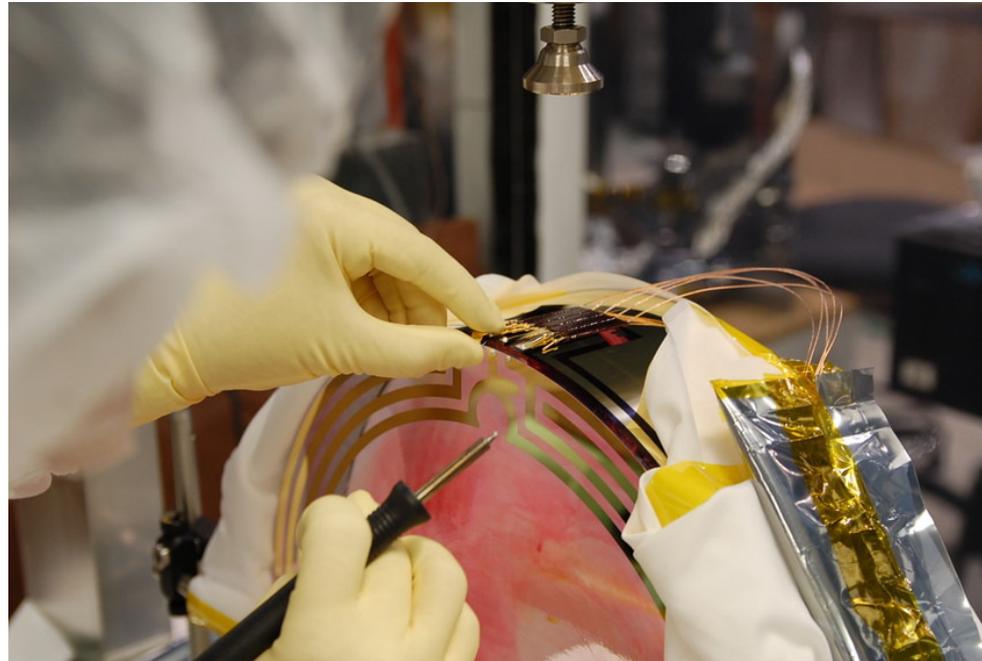
Подвес кварцевых пробных масс Advanced LIGO



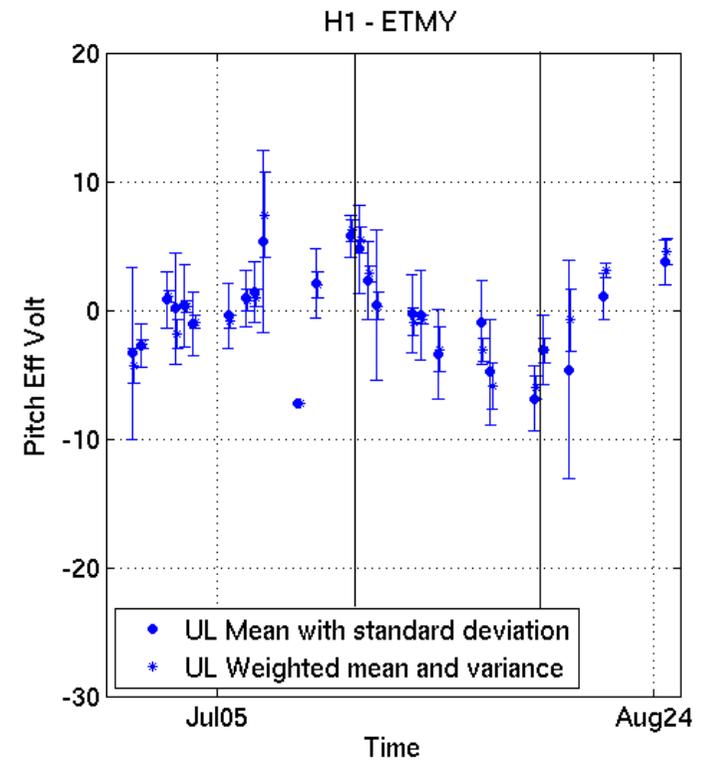
Подвес кварцевых пробных масс Advanced LIGO



Исследование эволюции распределения электрических зарядов на зеркалах Advanced LIGO

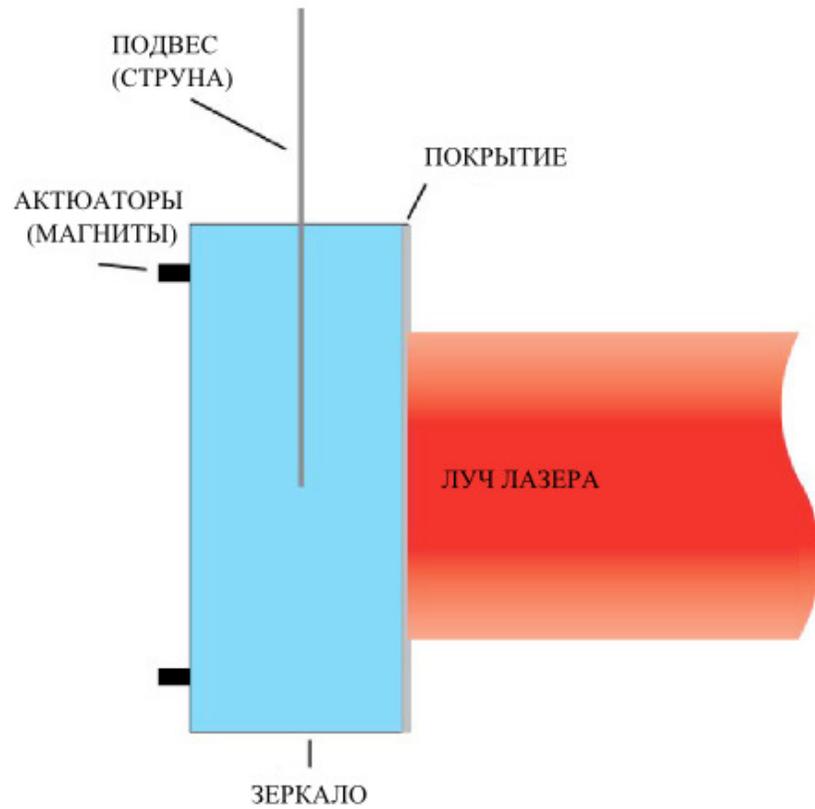


Электростатический актюатор Advanced LIGO



Миграция электрических зарядов

Шумы в зеркалах резонаторов



Множество разнообразных видов шумов, в которых, в конце концов, разобрались.

ШУМНЫЙ ЗООПАРК

$$S_{SD}^{bulk} = \frac{4k_B T \phi(f)(1 - \nu^2)}{f \sqrt{2\pi}^{3/2} E r_0}$$

$$S_{SD}^{coat} = \frac{4k_B T \phi_{coat}(f)(1 - \nu^2)}{f \sqrt{2\pi}^{3/2} E r_0}$$

$$S_{RTE}^{coat} = \frac{32\sigma_B k_B T^5 (1 + \sigma_s)^2 \alpha_f^2 d_N^2}{\pi^2 \rho_s C_s \kappa_s w^2 f}$$

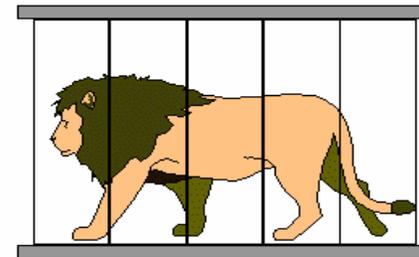
$$S_{RTR}^{coat} = \frac{8\sigma_B k_B T^5 \beta_{eff}^2 \lambda^2}{\pi^2 \rho_s C_s \kappa_s w^2 f}$$

$$S_{PTE}^{coat} = \frac{4S_{abs}(1 + \sigma_s)^2 \alpha_c^2 d_N^2}{\pi^3 \rho_s C_s \kappa_s w^4 f} G_{surf}^{coat}(\omega)$$

$$S_{PTR}^{coat} = \frac{S_{abs} \beta_{eff}^2 \lambda^2}{\pi^3 \rho_s C_s \kappa_s w^4 f} G_{surf}^{coat}(\omega)$$

$$S_{TE}^{coat} = \frac{2\sqrt{2} k_B T^2 d_\Sigma^2 (1 + \nu^2) \alpha^2 (C_f \rho_f)^2}{\sqrt{f} \pi^{3/2} r_0^2 \sqrt{\kappa C \rho}} \frac{\Delta^2}{(C \rho)^2}$$

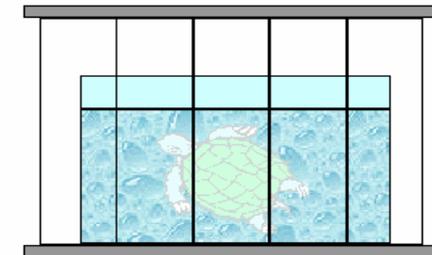
$$S_{TR}^{coat} = \frac{k_B T^2 \beta_{eff}^2 \lambda^2}{\sqrt{f} \pi^{3/2} r_0^2 \sqrt{\kappa C \rho}}$$



Броун



Поверхностные зверушки



Термоупругие в среде

$$S_{PTE}^{bulk} = \frac{\alpha^2 \hbar \omega_0 W_0}{2f^2 \pi^4 \rho^2 C^2 r_0^4} \quad S_{RTE}^{bulk} = \frac{8\sigma_B k_B T^5 \alpha^2}{\pi^3 \rho_s^2 C_s^2 w^2 f^2},$$

$$S_{TE}^{sub} = \frac{4k_B T^2 \alpha_s^2 (1 + \sigma_s)^2 \kappa_s}{\pi^{5/2} (C_s \rho_s)^2 w^3 f^2},$$

Из чего делать зеркала интерферометра? Дискуссия в коллаборации LIGO



САПФИР

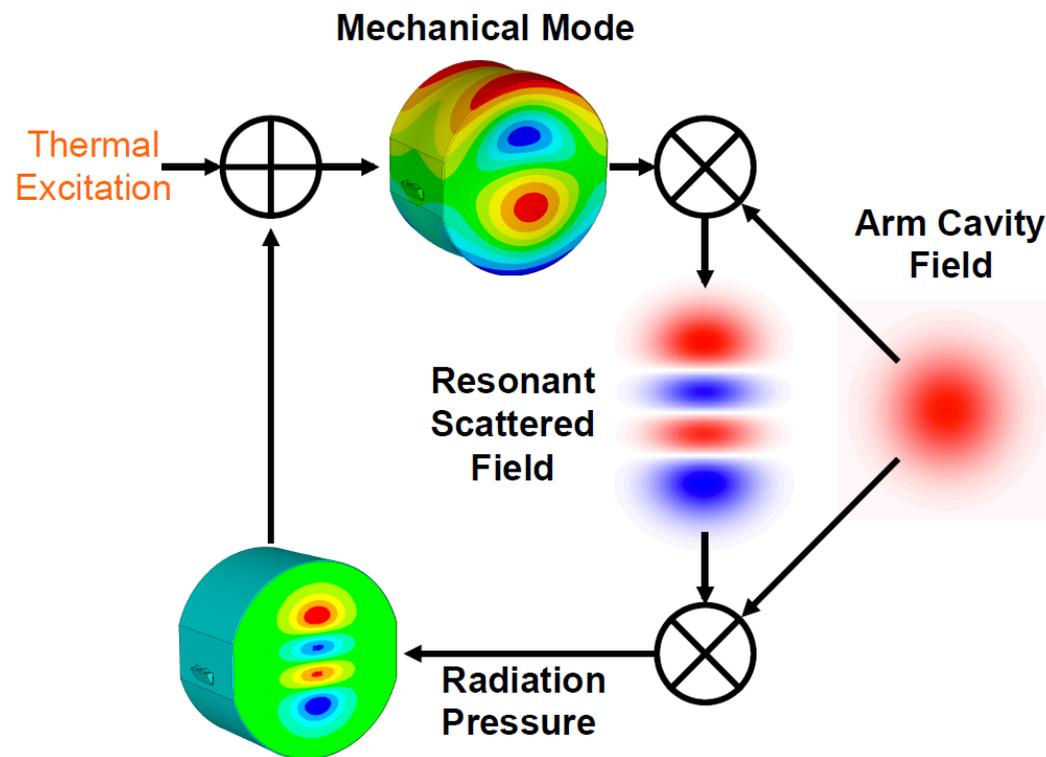


или ПЛАВЛЕННЫЙ КВАРЦ

Физики МГУ доказали, что при комнатной температуре кварц шумит меньше, открыв при этом новый класс фундаментальных термодинамических флуктуаций!

2001 г. :предсказано явление параметрической неустойчивости в интерферометрах

В 2015 г. в детекторе LIGO обнаружена параметрическая неустойчивость (ПН) (циркулирующая мощность 40 кВт)

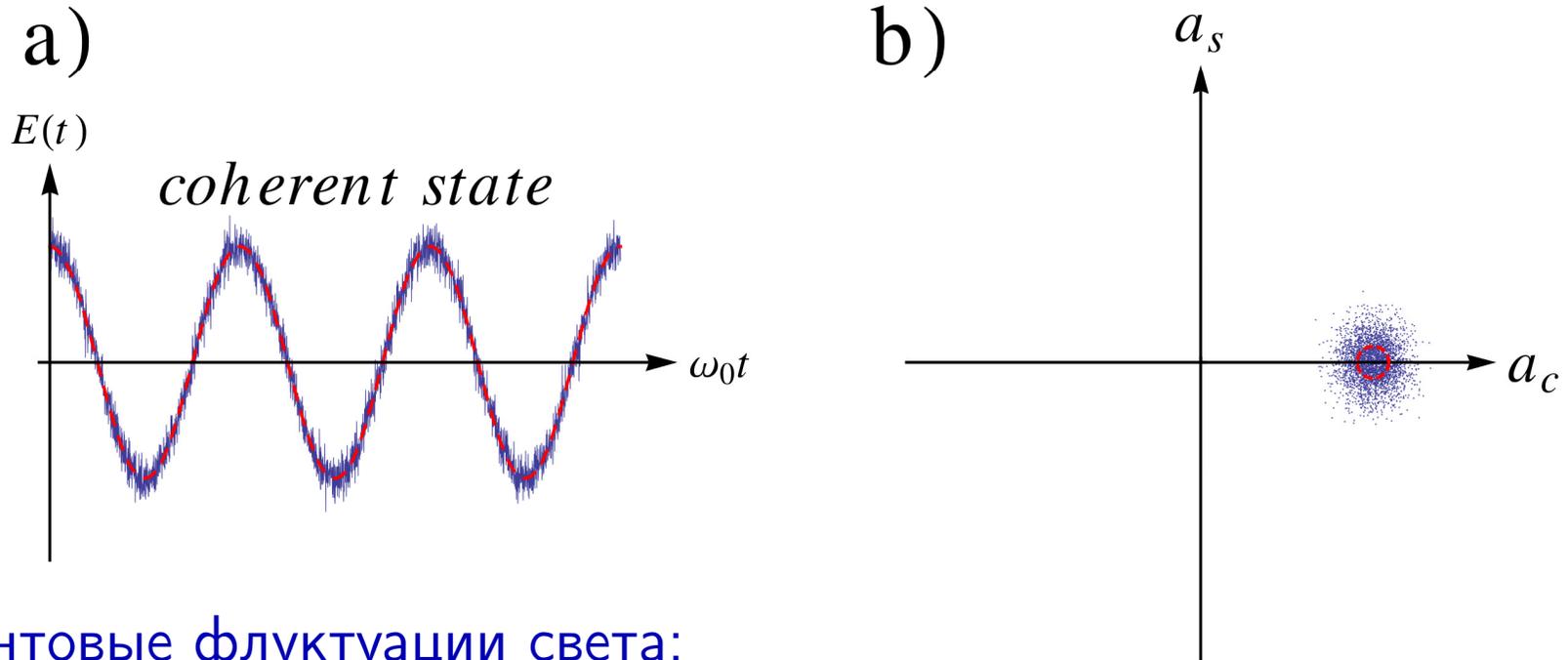


Параметрическая неустойчивость – нежелательное возбуждение оптических мод интерферометра и механических мод зеркал из-за огромной мощности светового излучения.

Планируемая циркулирующая мощность – до **800кВт**

Разрабатываются методы подавления ПН

Стандартный квантовый предел чувствительности (СКП)



Квантовые флуктуации света:

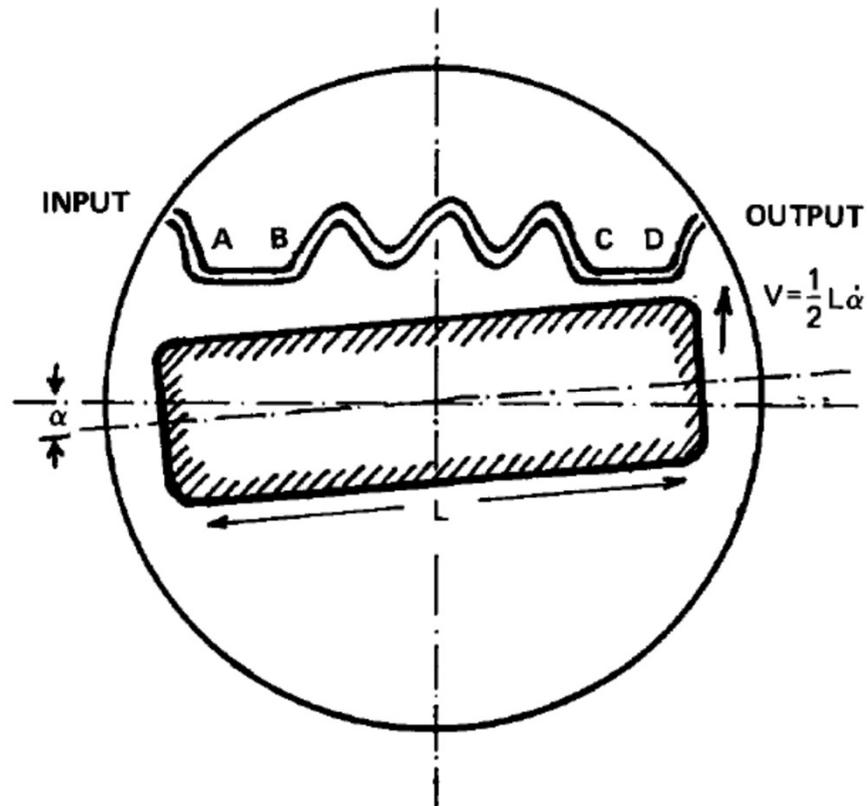
- Мешают точно измерять положение зеркал интерферометра: $\Delta x_{\text{meas}} \propto 1/\sqrt{P}$
- Создают случайную силу давления на них, маскирующую сигнал: $\Delta x_{\text{pert}} \propto \sqrt{P}$

При оптимальном подборе мощности:

$$\Delta x_{\text{meas}} = \Delta x_{\text{pert}} = \frac{\Delta x_{\text{СКП}}}{\sqrt{2}} = \sqrt{\frac{\hbar t}{2m}} \quad (\text{Брагинский, 1968})$$

Квантовый измеритель скорости

Обойти СКП можно, измеряя скорость вместо координаты:



Начальная идея
(Брагинский, Халили, 1990)

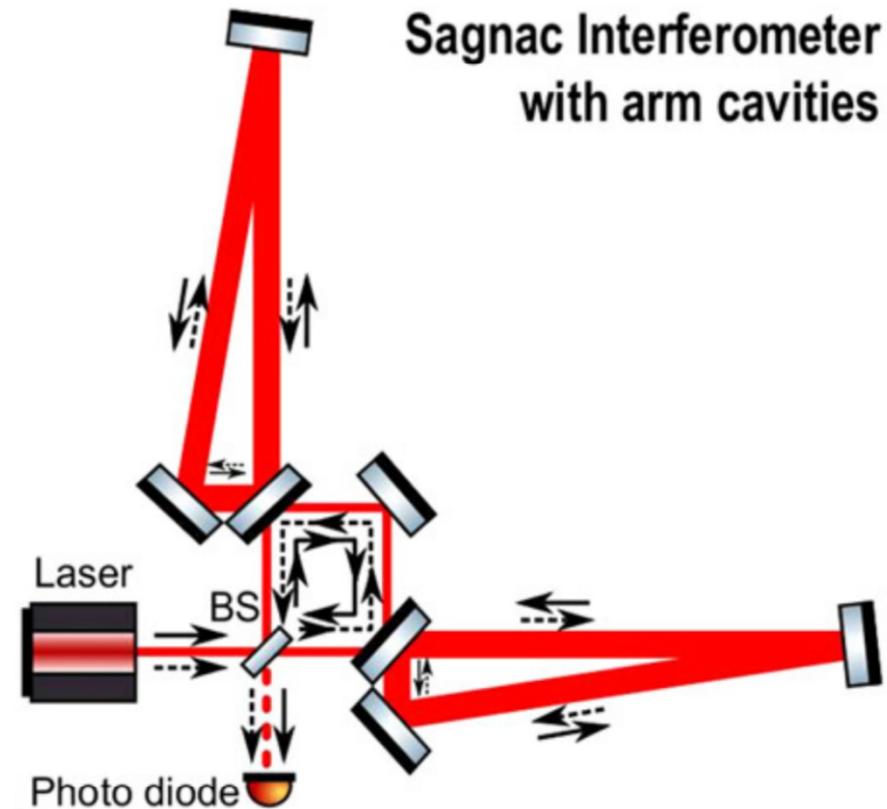
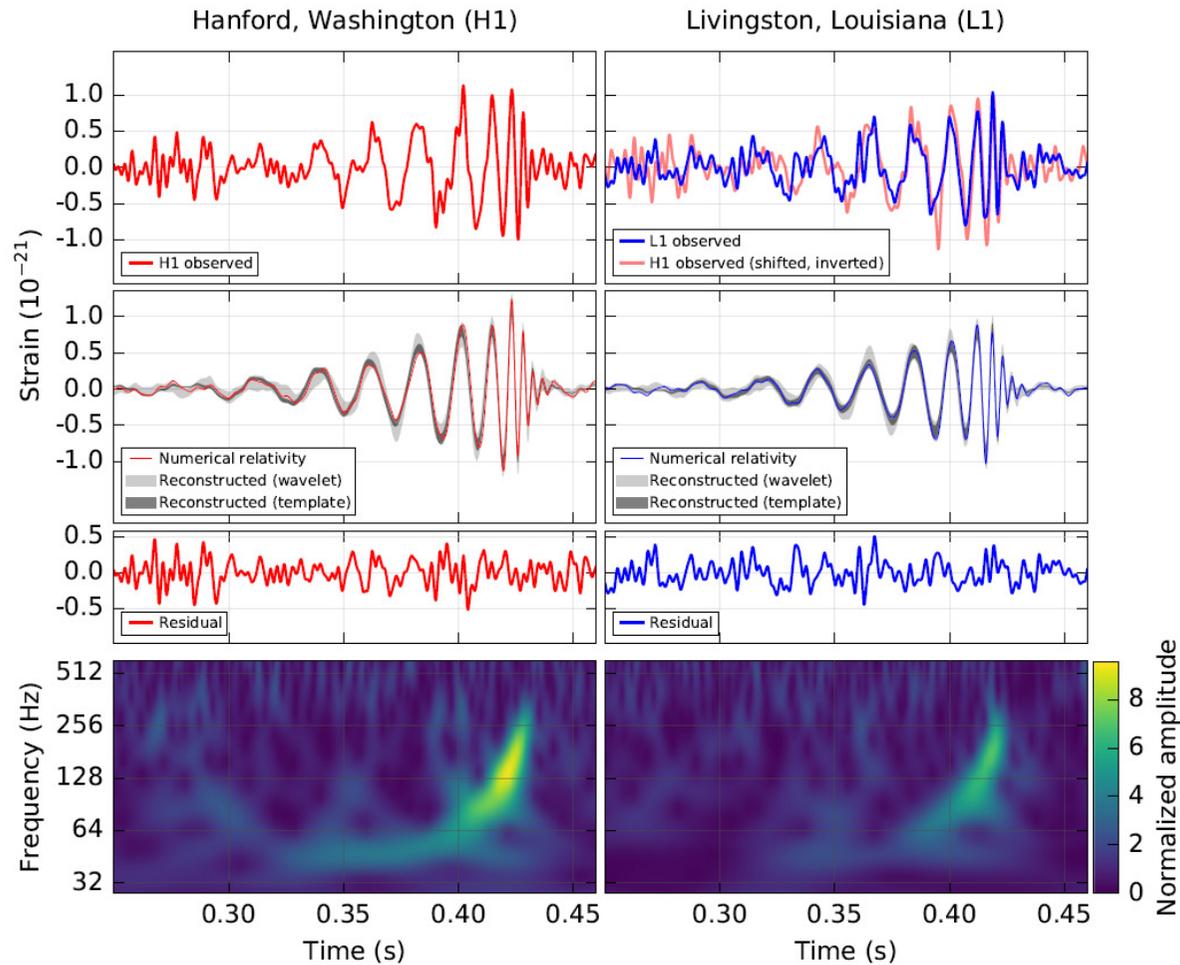


Схема экспериментального
интерферометра
(Университет Глазго, 2015)

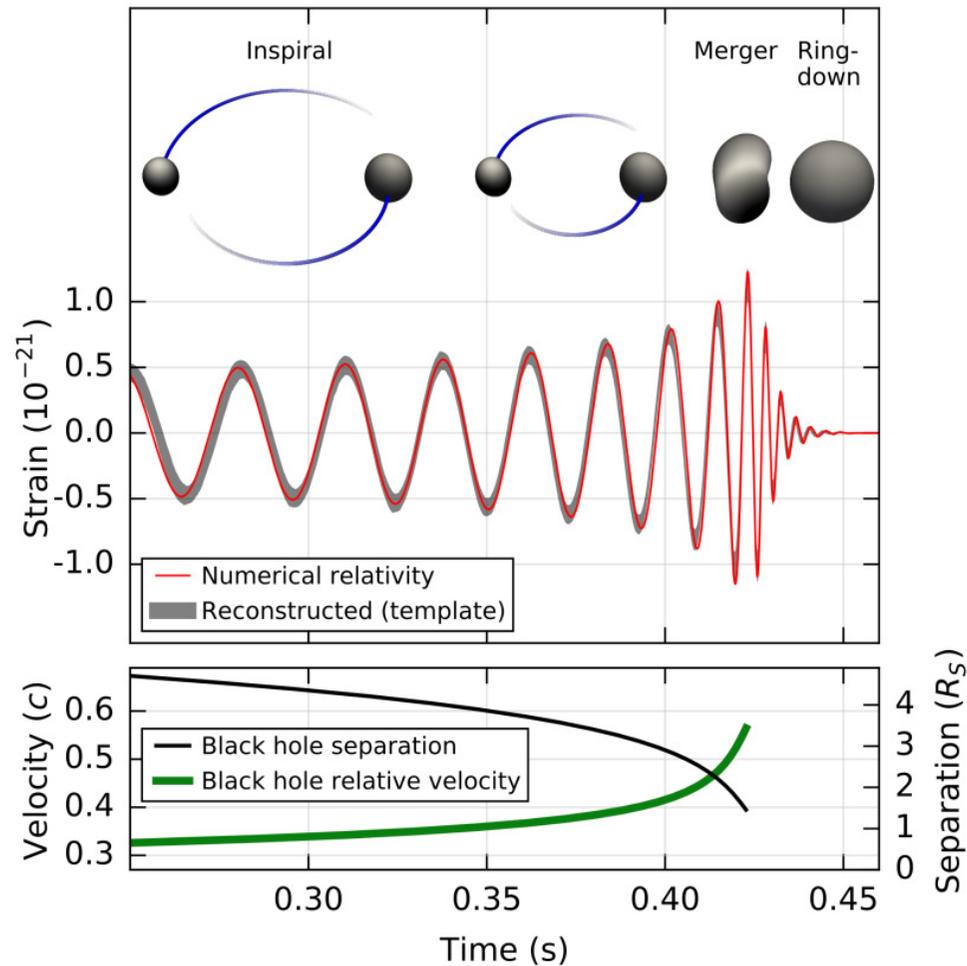
Квантовый измеритель скорости “в железе” (начало 2016)



Первое прямое детектирование гравитационных волн



Модель источника гравитационных волн: две сливающиеся черные дыры



Начальные массы чёрных дыр
 $\approx 29 M_{\odot}$ и $36 M_{\odot}$

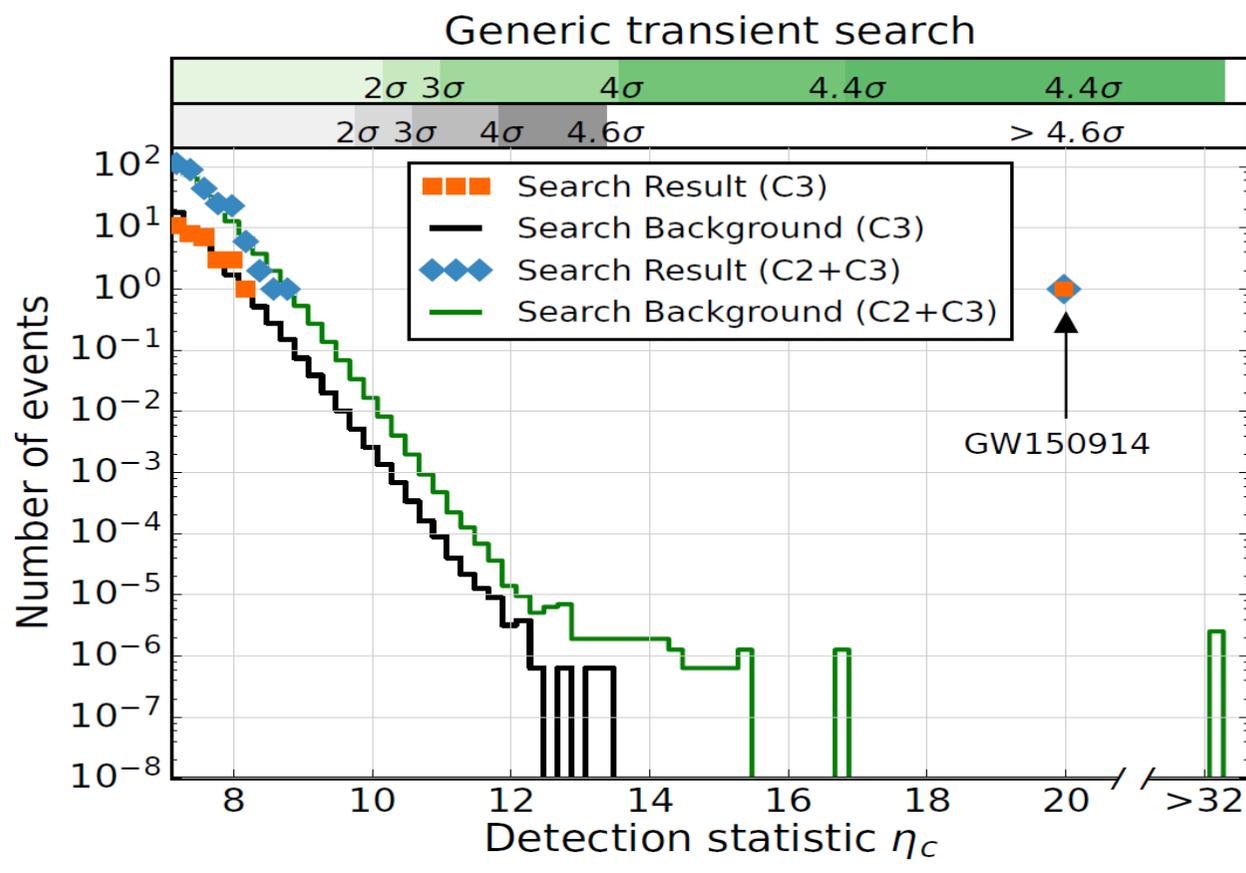
За доли секунды
 $\approx 3 M_{\odot} c^2$ превратились в
гравитационные волны

Событие произошло
1,3 миллиарда лет назад.

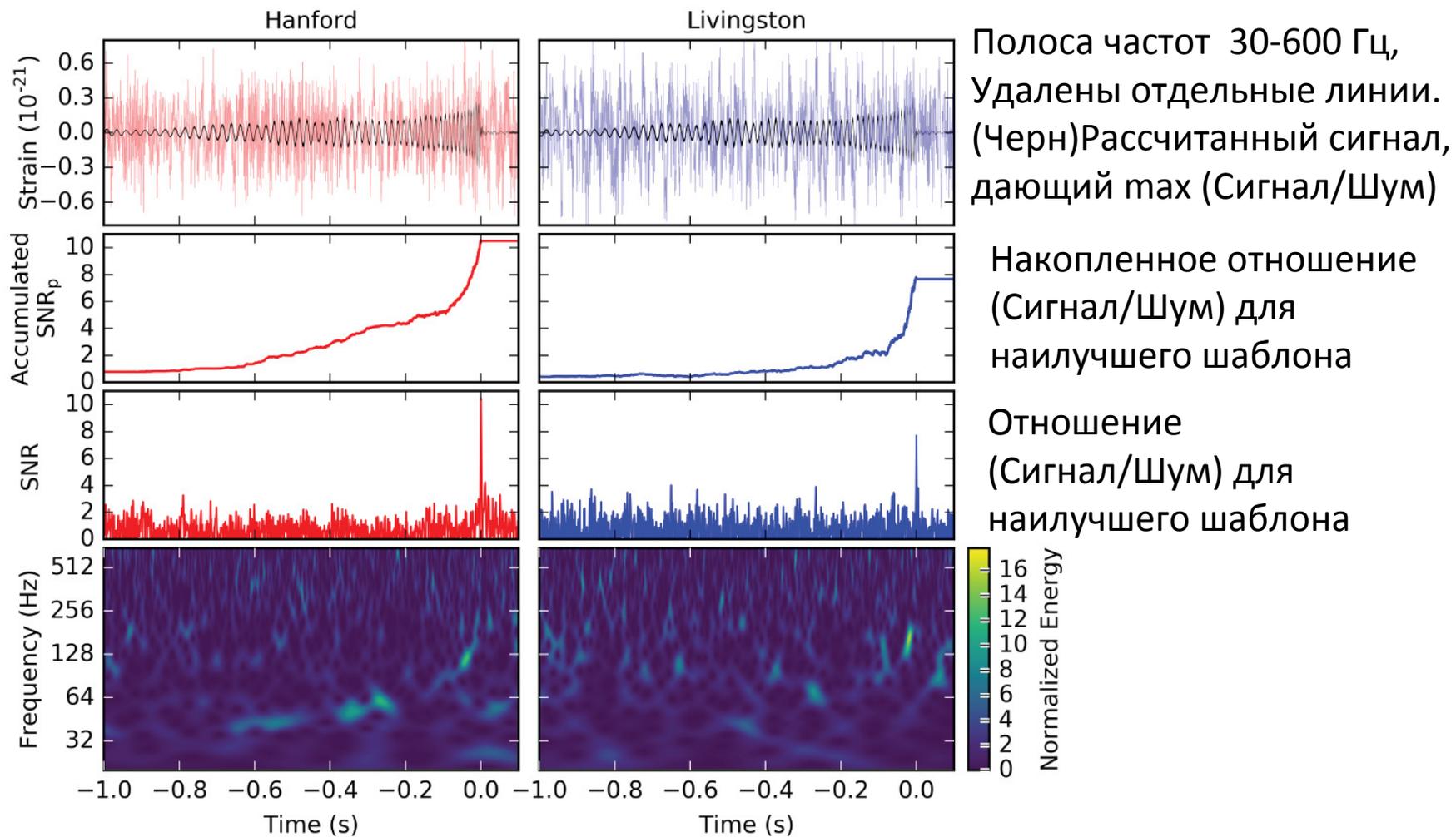
Достоверность обнаружения

гравитационных волн

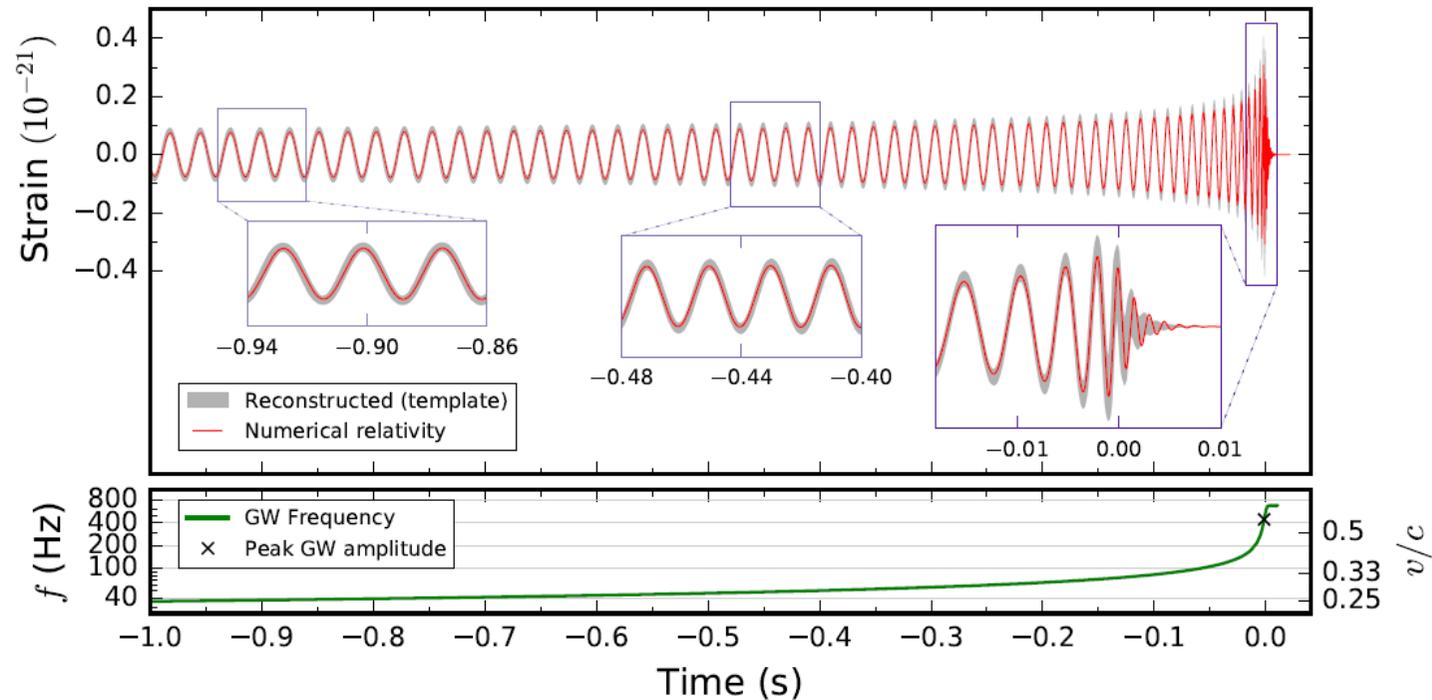
Вероятность случайного появления зарегистрированного события –
1 в 200 тыс.лет



Второе прямое детектирование гравитационных волн



Модель источника гравитационных волн: две сливающиеся черные дыры



Начальные массы чёрных дыр $14,2^{+8,3}_{-3,7} M_{\odot}$ и $7,5^{+2,3}_{-2,3} M_{\odot}$
 $1 M_{\odot}$ излучилась в виде гравитационных волн
По крайней мере одна ЧД имела спин $> 0,2$
Событие произошло $\approx 1,4$ миллиарда лет тому назад
Локализация источника 850 град 2

Значение открытия

- Регистрация гравитационных волн явилась еще одним экспериментальным подтверждением ОТО;
- Впервые было обнаружено слияние черных дыр.
- Гравитационные волны (ГВ) открывают новую эру в астрономии. Вселенная прозрачна для ГВ. С их помощью можно заглянуть в области, неподвластные традиционной астрономии.
- Гравитационно-волновая астрономия поможет ответить на интересные и важные вопросы:
 - как формируются черные дыры;
 - правильно ли ОТО описывает гравитацию в пределе сильных полей;
 - как ведет себя материя при экстремальных температурах и давлениях

Поможет ли гравитационно-волновая астрономия найти ответы на фундаментальные вопросы?

Что такое:

- темная материя;
- темная энергия;
- как квантовать гравитацию

Примечание: Обычная материя составляет всего около 5% от общей массы-энергии наблюдаемой Вселенной; темная материя – 27%; темная энергия – 68%.

Ждем новую физику ?!!

Всемирная сеть интерферометрических гравитационно-волновых детекторов



Другие интерферометрические детекторы гравитационных волн коллаборации LIGO

Коллаборация LIGO – около 1000 человек из 16 стран



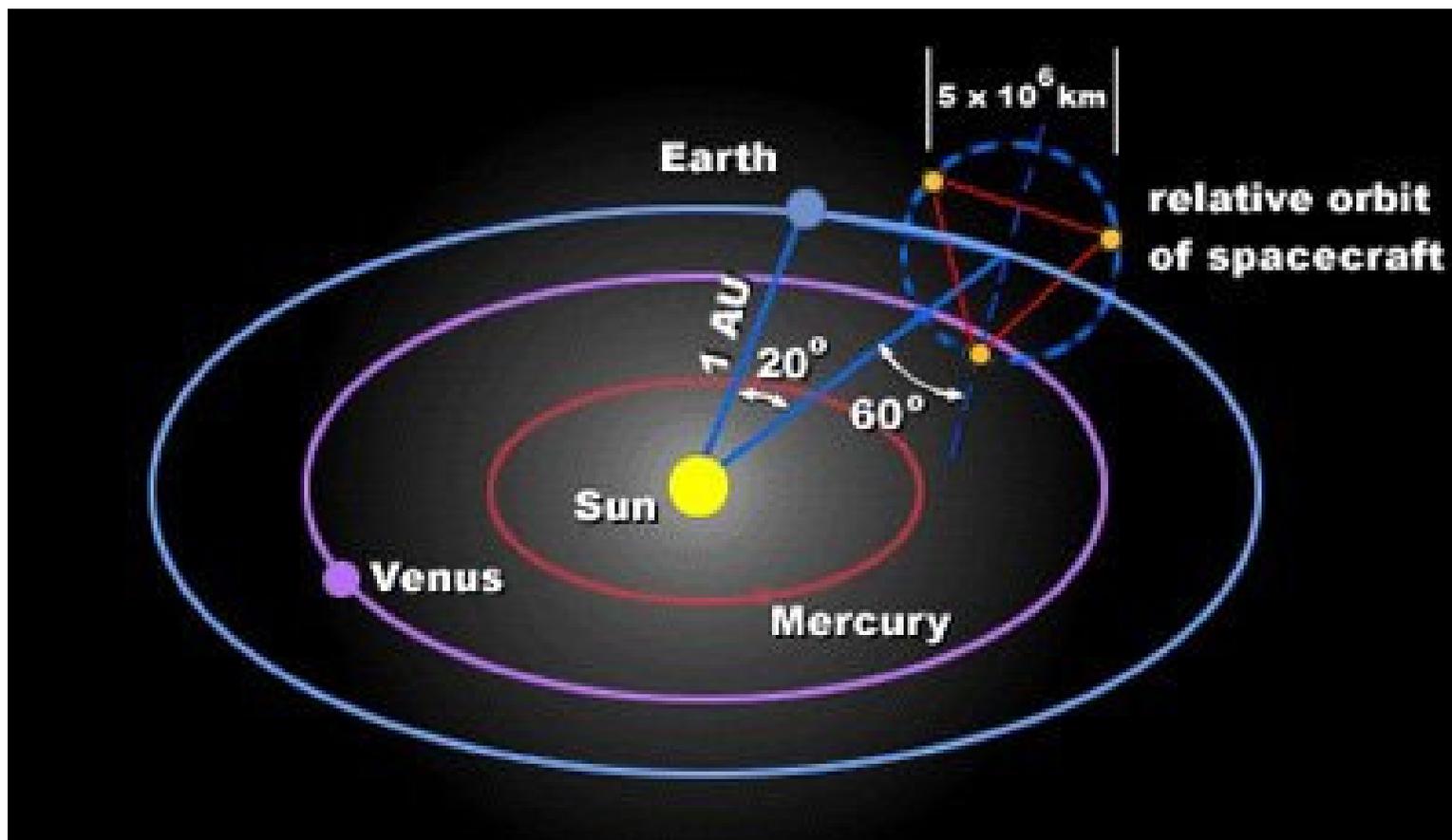
VIRGO, Италия, Франция (3 км)



GEO, Великобритания, Германия (600 м)

Криогенный детектор KAGRA, Япония
Эйнштейн-телескоп, Евросоюз
Детектор в космосе LISA

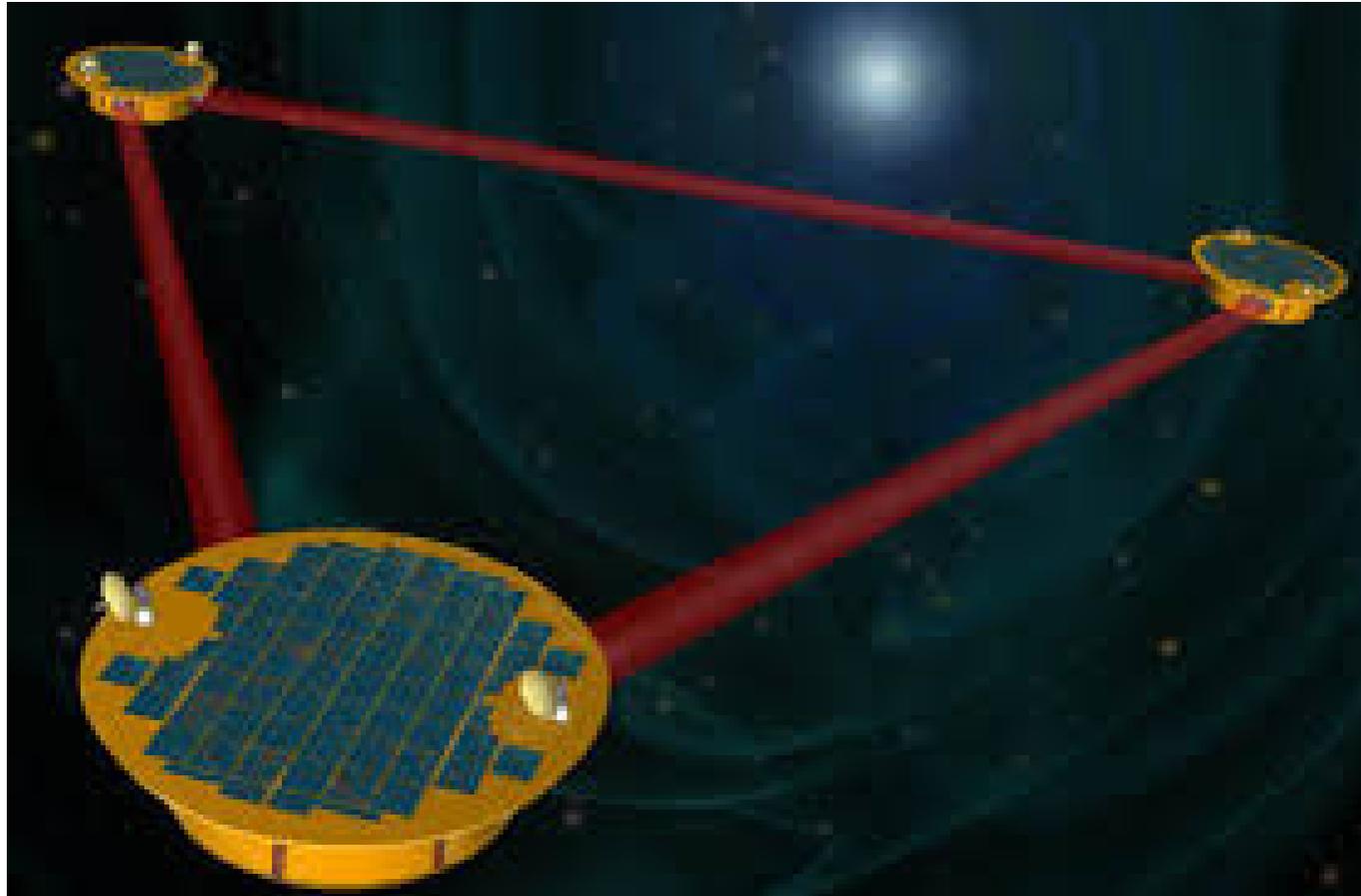
Космический гравитационно-волновой детектор LISA



Длина плеча $L = 5 \times 10^6$ км Частотный диапазон $10^{-4} - 10^{-1}$ Гц, Запуск - 2034

http://www.esa.int/spaceinimages/Images/2007/09/Schematic_of_LISA_s_Orbit

Laser Interferometer Space Antenna



Благодарю за внимание!