

# Дорога к открытию гравитационных волн

С.П. Вятчанин, В.П. Митрофанов и Ф.Я Халили

Кафедра физики колебаний, физический факультет МГУ

Москва, 5 дек. 2016



- 1 Прямое Детектирование Гравитационных Волн
- 2 ОТО и немного истории
- 3 Вклад группы физфака МГУ



# 14 сент. 2015: первое прямое детектирование ГВ

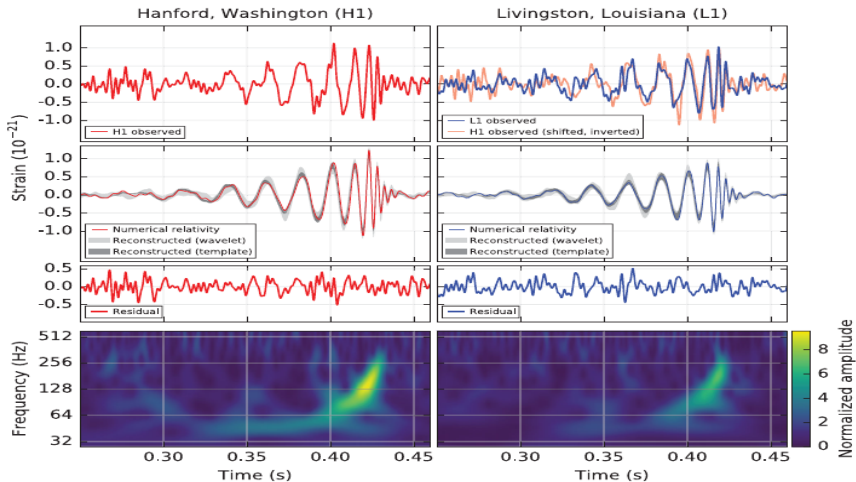
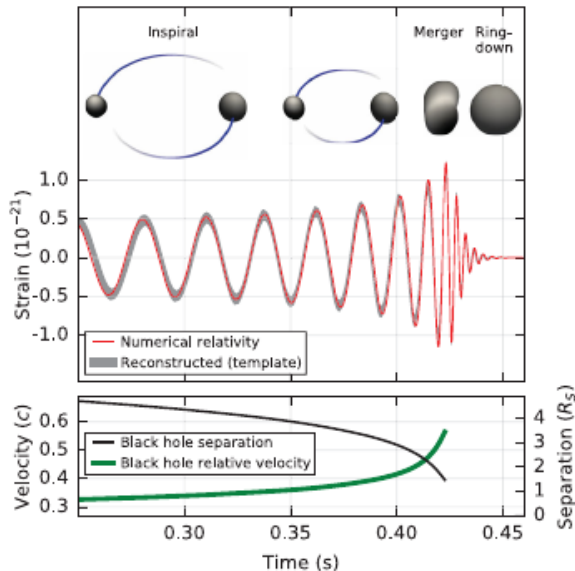


Рис.: По строкам: 1) записи на детекторах в Хэнфорде и Ливингстоне, 2) записи пропущенные через фильтр 35 - 350 Гц, 3) что осталось после фильтра, 4) частотно-временные диаграммы.



# Источник: слияние двух черных дыр



Массы чёрных дыр  
 $29 M_{\odot}$ ,  $36 M_{\odot}$   
За доли сек.  $\approx 3 M_{\odot}$   
превратились в ГВ  
1,3 миллиарда лет назад

Внизу: расстояние в единицах радиуса Шварцшильда  $R_c = 2GM/c^2$   
и отн. скорость  
 $v/c = (GM\pi f/c^3)^{1/3}$

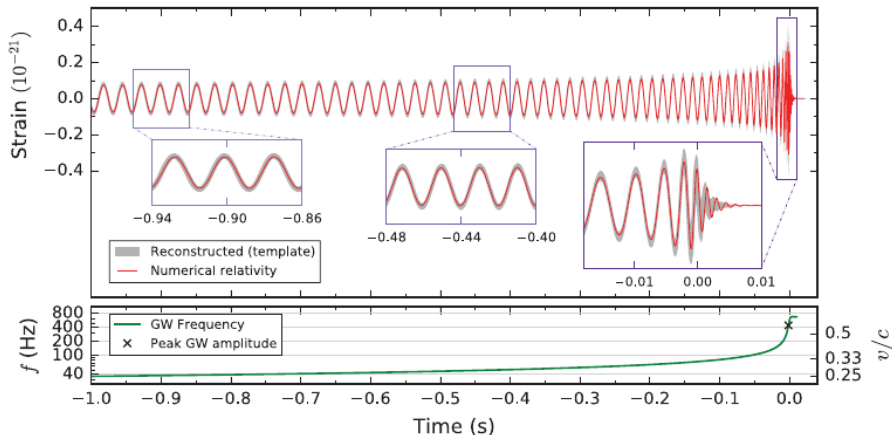


Рис.: Зарегистрированный сигнал: слияние двух черных дыр  $m_1 \simeq 14,2 M_\odot$ ,  $m_2 \simeq 7.5 M_\odot$  на расстоянии около 1.3 млрд световых лет. Энергия ГВ излучения — около  $1 M_\odot c^2$ .



# Схема антенны aLIGO

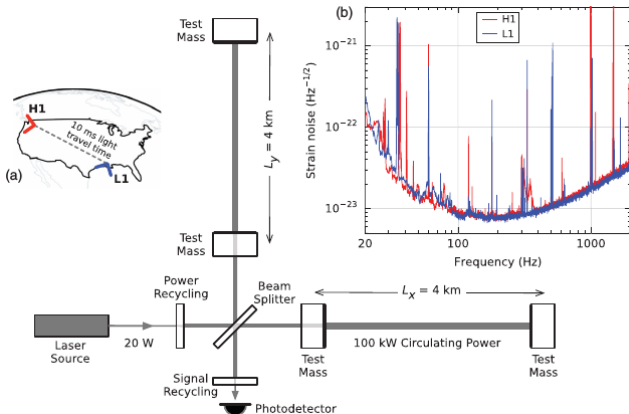


Рис.: Схема лазерных интерферометров aLIGO. Узкие пики: калибровка (33–38, 330, and 1080 Гц), моды упругих колебаний нитей подвеса (500 Гц и гармоники), 60 Гц (и гармоники) электропитания.



1 Прямое Детектирование Гравитационных Волн

2 ОТО и немного истории

3 Вклад группы физфака МГУ

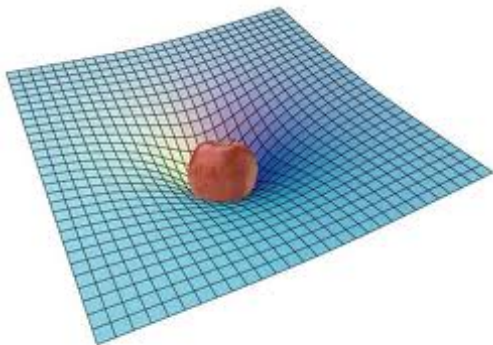
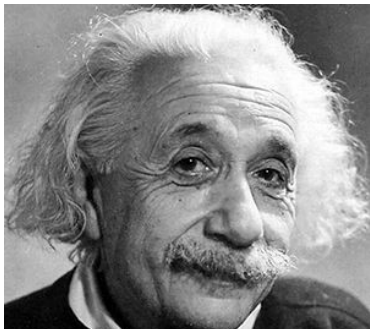


## Альберт Эйнштейн

1915 – 1916 формулировка ОТО<sup>a</sup>:

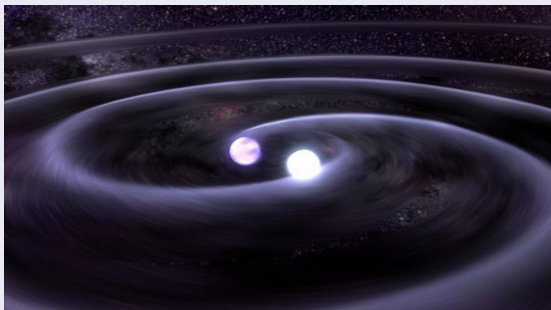
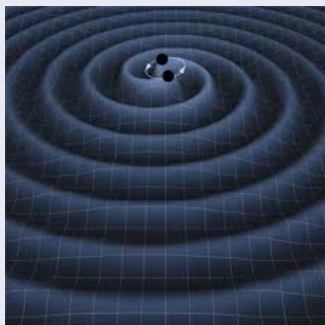
- Тяготение как кривизна пространства-времени.
- Кривизну создает присутствующая материя.

<sup>a</sup>Albert Einstein, Annalen der Physik (1916) 354





## Летающие волны кривизны пространства-времени



Прошло 100 лет с формулировки ОТО А. Эйнштейном...



## Джеймс Максвелл (1831 – 1879)

Уравнения Максвелла (1864) предсказывают электромагнитные волны.

Генрих Герц – первые опыты (1885 – 1889), э.м. волны существуют!

Александр С. Попов (1905) – открытие радио (**приемник – передатчик**).

## Гравитационное взаимодействие — слишком слабое

На Земле невозможен опыт с приемником и передатчиком.

Остается возможность регистрации ГВ от космологических катастроф:

- Взрывы сверхновых.
- Слияние двух черных дыр, двух нейтронных звезд, черной дыры с нейтронной звездой.
- ...

## 1993 г. Нобелевская премия (Рассел Халс и Джозеф Тейлор)

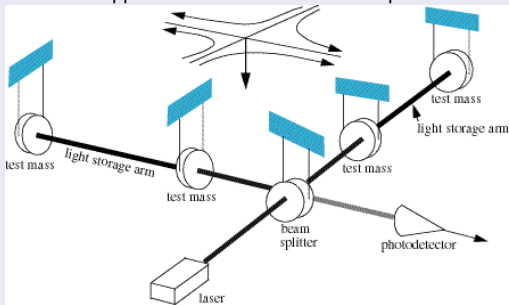
Открытие гравитационных волн по изменению частоты двойных пульсаров.

Это **косвенное** подтверждение существования грав. волн

# Современная лазерная гравитационная антенна

## Схема и вид

1992 г. — Kip Thorne, Ronald Driver (CIT) and Rainer Weiss (MIT) предложили LIGO (Laser Interferometric Gravitational Observatory).  
Рабочий диапазон: 30 — 1000 Гц



## Группа на физфаке МГУ

Группа В.Б. Брагинского работает в проекте LIGO с 1992 г.

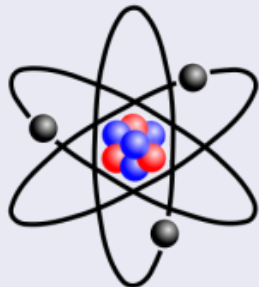
## От Земли до атома



$\sim 13\,000$  км



$\sim 10^{-1}$  м



$\sim 3 \cdot 10^{-10}$  м

## Флуктуации поверхности зеркал

LIGO: средняя координата лазерного пятна  $D = 6$  см флуктуирует за время  $\tau \simeq 0.01$  с  $\Delta X_{\text{тепл.}} \simeq 10^{-19}$  м  $\simeq \frac{r_{\text{proton}}}{10\,000}$

Это почти почти во столько же раз меньше размера атома, во сколько атом меньше апельсина. **Это измеримо!**

# Что мы можем измерять?

В.Б. Брагинский, В.И. Панов, В.Д. Попельнюк, 1981

Сверхпроводящий емкостной датчик:

$$\Delta X \simeq 10^{-19} \text{ м, зазор } d = 4 \text{ мкм, за } \tau = 10 \text{ с}$$

“Initial” LIGO, 2011

Лазерный луч измеряет усредненную по пятну координату зеркала

$$\Delta X \simeq 4 \times 10^{-18} \text{ м, расстояние } L = 4 \text{ км, за время } \tau \simeq 0.01 \text{ с}$$

Advanced LIGO, 2015

$$\Delta X \simeq 10^{-19} \text{ м, расстояние } L = 4 \text{ км, за время } \tau \simeq 0.01 \text{ с (!)}$$

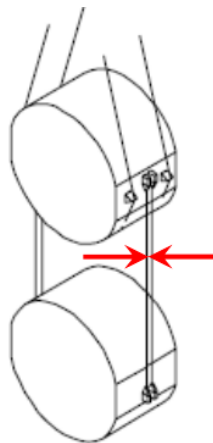
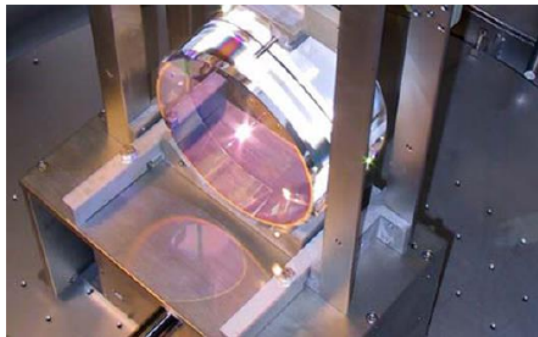


1 Прямое Детектирование Гравитационных Волн

2 ОТО и немного истории

3 Вклад группы физфака МГУ

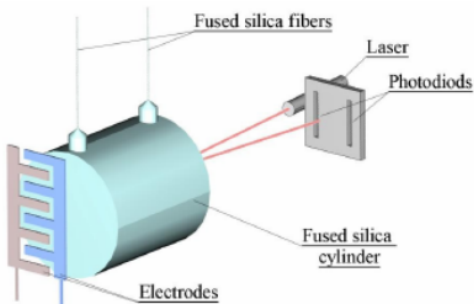
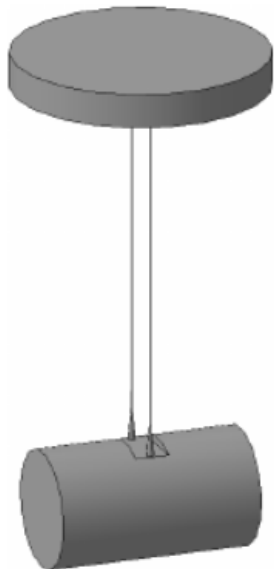




Стальные проволоки (подвес Initial LIGO) – экспериментально обнаружены «потрескивания» – избыточные шумы, связанные с большой запасенной упругой энергией.

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

# Кварцевые маятники (В.П. Митрофанов)



Увеличение времени затухания  
— снижение тепловых шумов

Время затухания **> 5 лет**

С.П. Вятчанин (Физфак МГУ)

Грав. волны...

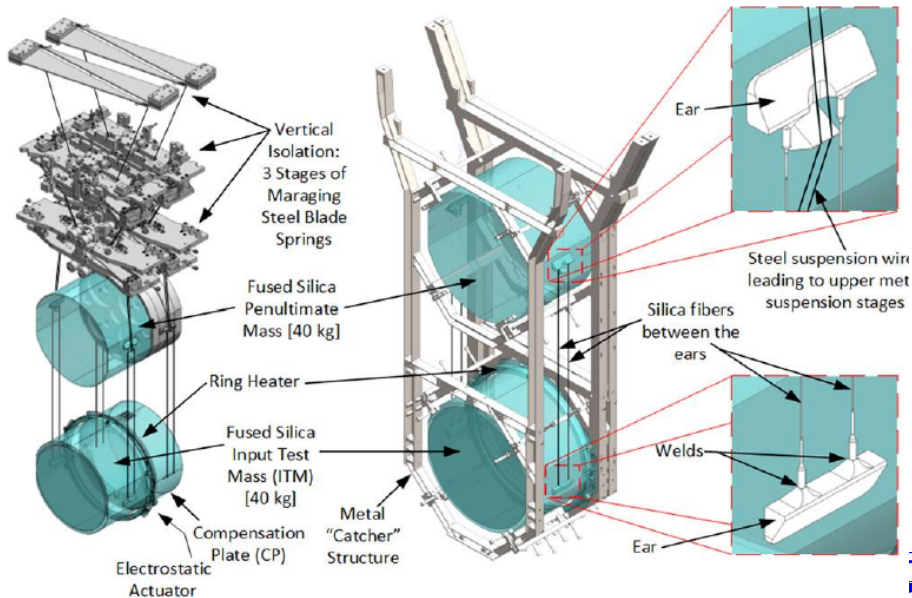
5 дек 2016

14 / 24

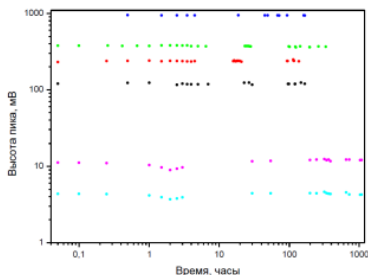
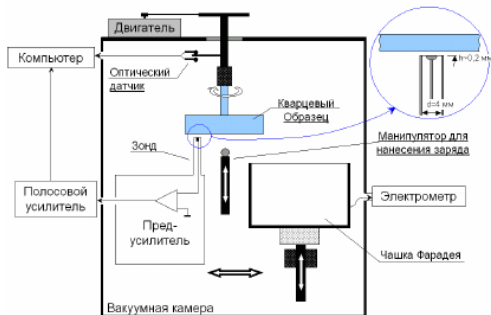




# Подвес “в полный рост” (aLIGO)



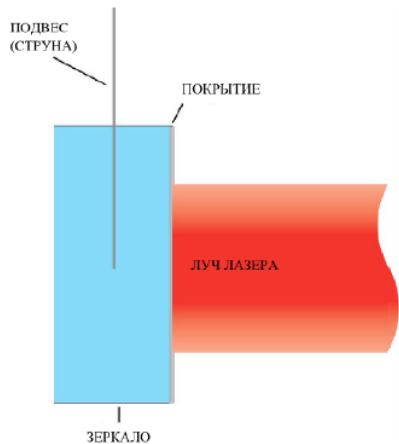
# Электрические заряды на кварцевых пробных массах



**Увеличение времени растекания зарядов - ключевой фактор снижения шумов, связанных с электрическими зарядами.**

Измеренное время релаксации электрического заряда составило **более 3 лет**

# Тепловые шумы поверхности зеркал (С.П. Вятчанин)



# Шумы в пробных массах и отражающих покрытиях

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

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

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

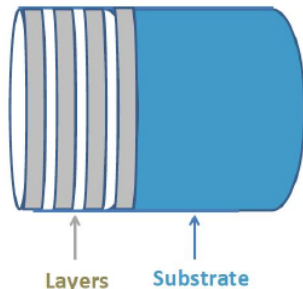
$$S_{PTR}^{coat} = \frac{8\sigma_B k_B T^5 \beta_{eff}^2 \lambda^2}{\pi^2 \rho_s C_s \kappa_s w^2 f}$$

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

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

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

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



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

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

# Из чего делать зеркала aLIGO?



САПФИР



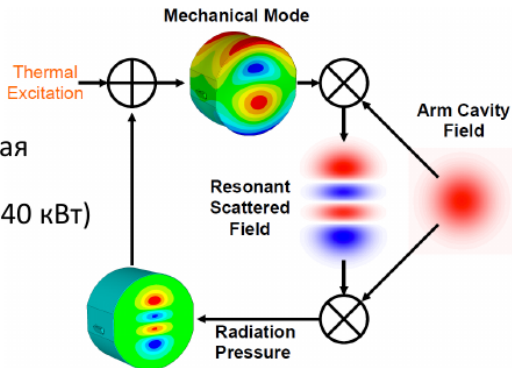
или ПЛАВЛЕННЫЙ КВАРЦ

Мы показали, что кварц шумит меньше сапфира.  
“Открыты” термоупругие и терморелрактивные шумы, их причина — фундаментальные термодинамические флуктуации температуры.



# 2001 г.: предсказано явление параметрической неустойчивости в интерферометрах (С.П. Вятчанин)

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 при большой мощности светового излучения. Планируемая циркулирующая мощность – до 800кВт. Разработаны методы подавления.



## Соотношение неопределенностей

$$\Delta x_{\text{изм}} \Delta p_{\text{возм}} \geq \frac{\hbar}{2}$$

При непрерывном квантовом измерении координаты прибор возмущает импульс — вносит дополнительные шумы.

**Стандартный квантовый предел** (В.Б. Брагинский, 1968).

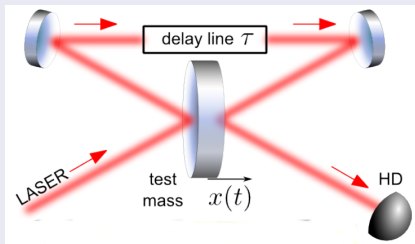
Цель aLIGO — достичь СКП и, возможно, преодолеть ...

Нужна циркулирующая в плечах мощность:  $P = 800$  кВт, сейчас  $\sim 100$  кВт

Как преодолеть СКП? Предложено нами:

- QND измерения
- Квантовый измеритель скорости (Ф.Я. Халили)
- Вариационное измерение (С.П. Вятчанин)
- Оптическая жесткость (Ф.Я. Халили)

## Квантовый измеритель скорости (Ф.Я. Халили)



Измерение разности:

$$x(t) - x(t - \tau) \simeq \tau \dot{x}(t) + \dots$$

Измеряем скорость (не координату!)

Можно преодолеть СКП

## Оптическая жесткость (Ф.Я. Халили)

- Низкие шумы (механическая жесткость шумит дополнительно)
- СКП для осциллятора меньше, чем СКП св. массы

Если удастся преодолеть СКП, получим

**макроскопический (4 км, 40 кг !) квантовый прибор.**



## Вклад группы в тематику ГВ детектирования

- Системы с малой диссипацией, кварцевые подвесы
- Измерение электрических зарядов на пробных массах
- Расчет тепловых шумов зеркал
- Параметрическая колебательная неустойчивость
- QND измерения, оптическая жесткость, квантовый спидометр, квантовые вариационные измерения

## Публикации

За 10 лет нашей группой опубликовано более **100** статей в реферируемых научных журналах.

Средний индекс Хирша членов группы – **45** (Web of Science).



## Вся группа (кафедра физики колебаний физфака МГУ):

- проф. В.П. Митрофанов (нынешний руководитель)
- проф. И.А. Биленко
- проф. С.П. Вятчанин
- проф. М.Л. Городецкий
- проф. Ф.Я. Халили
- доц. С.Е. Стрыгин
- асс. Л.Г. Прохоров
- Студенты, аспиранты и тех. персонал кафедры.

*В.Б. Брагинский:*

**“Экспериментальная установка мудрее своих создателей”**

