

# Программа LIGO и вклад группы В.Б. Брагинского

С.П. Вятчанин

Кафедра физики колебаний, физический факультет МГУ

Москва, 16 октября 2017



- 1 Первое прямое детектирование ГВ: GW150914
- 2 Немного истории
- 3 Какие смещения?
- 4 Вклад группы В.Б. Брагинского



1 Первое прямое детектирование ГВ: GW150914

2 Немного истории

3 Какие смещения?

4 Вклад группы В.Б. Брагинского



14 сентября 2015 (GW150914)

14 сентября 2015 г. в США на двух детекторах-близнецах LIGO (Laser Interferometric Gravitational Observatory) в Ливингстоне (Луизиана), и в Хэнфорде (Вашингтон).

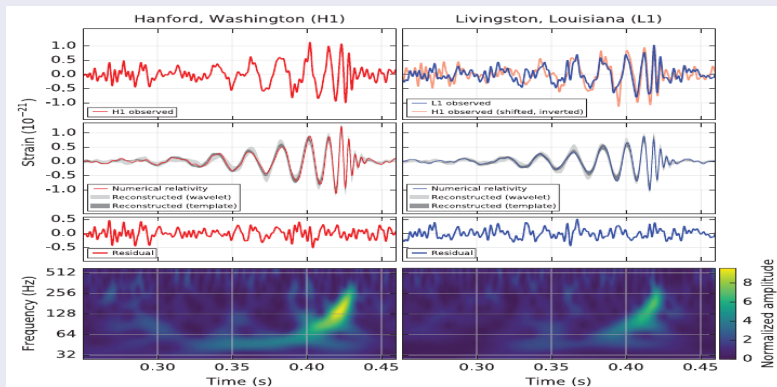
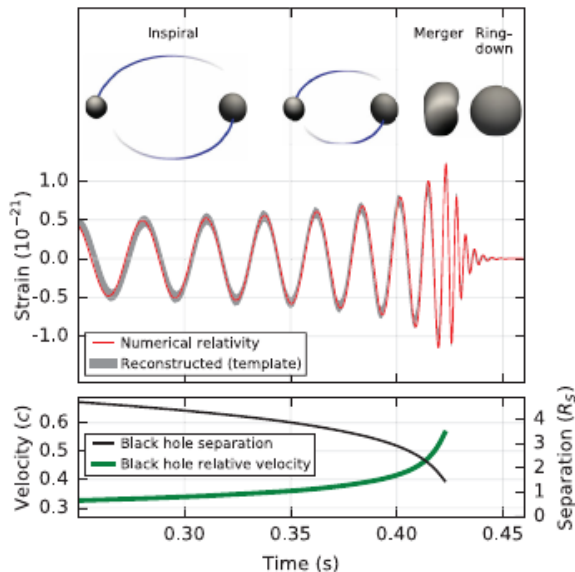


Figure: По строкам: 1) записи на детекторах в Хэнфорде и Ливингстоне, 2) записи пропущенные через фильтр 35 - 350 Гц, 3) что осталось после фильтра,

# Источник: слияние двух черных дыр



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

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

# Зарегистрировано 4 слияния черных дыр

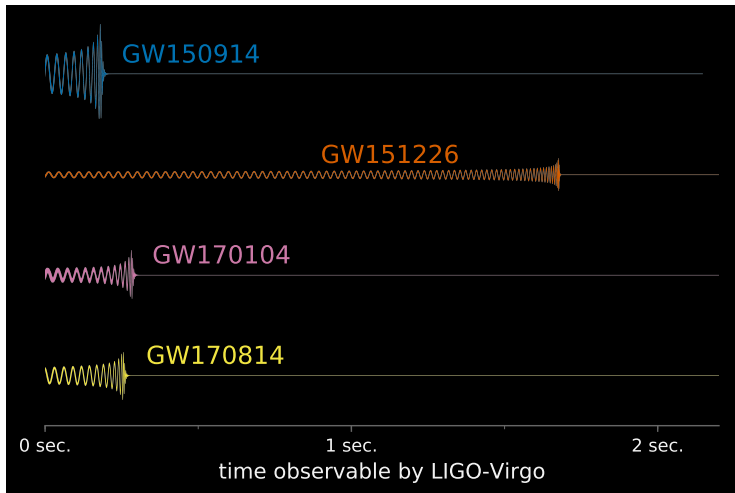


Figure: Последнее (GW170814) обнаружено еще и детектором Virgo.



# Схема антенны aLIGO

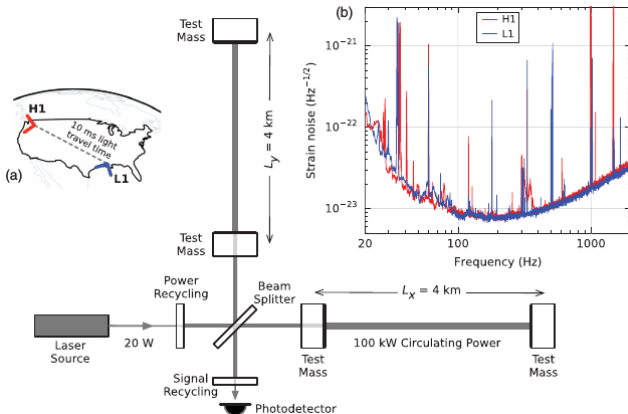


Figure: Схема лазерных интерферометров aLIGO. Узкие пики: калибровка (33–38, 330, and 1080 Гц), моды упругих колебаний нитей подвеса (500 Гц и гармоники), 60 Гц (и гармоника) электропитания.



1 Первое прямое детектирование ГВ: GW150914

2 Немного истории

3 Какие смещения?

4 Вклад группы В.Б. Брагинского





## 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**).

## Альберт Эйнштейн (1916) — ОТО

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)

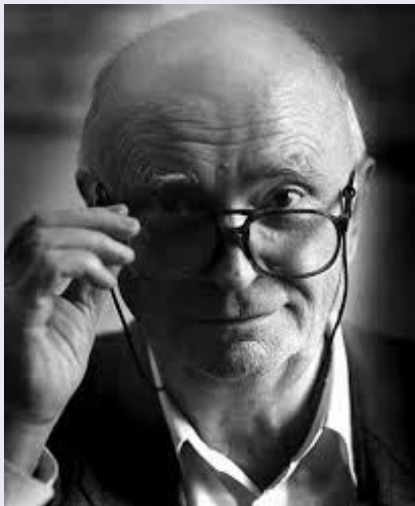
Открытие гравитационных волн по изменению частоты двойных пульсаров.  
Это **косвенное** подтверждение существования грав. волн

Ты помнишь, как все начиналось...

## Твердотельные антенны (1970 – 1990)



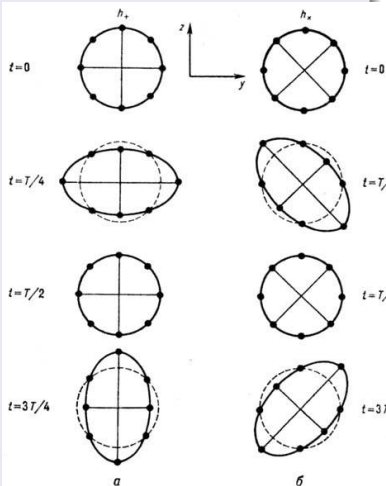
Дж. Вебер в лаборатории



Владимир Борисович Брагинский

# Лазерная гравитационная антенна

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



## LIGO: две антенны (4 км)

1992 г. — гр. В.Б.Брагинского начала сотрудничать с LIGO.

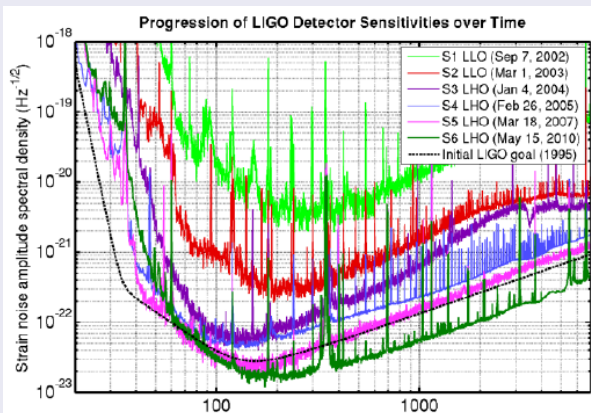
2002 г. — Initial LIGO: S1 (scientific run), начаты записи детектируемого сигнала.



2010 г. — остановка Initial LIGO, начал переход на Advanced LIGO.

2015 г. — инженерный и научный запуск Advanced LIGO

## Пройден тяжелый путь (2002 – 2010)



- S6, 2010 г. – Запланированная чувствительность достигнута и превышена
- Более 2 лет непрерывной записи
- **Гравитационные волны не были обнаружены ...**



## VIRGO, GEO600

Virgo (Италия, Франция)  
Антенна (3 км) в Кошине (Италия)



GEO (Великобритания, Германия)  
Антенна (600 м) в Ганновере



## Cryogenic

KAGRA (Japan) — зеркала при криогенной температуре.

1 Первое прямое детектирование ГВ: GW150914

2 Немного истории

3 Какие смещения?

4 Вклад группы В.Б. Брагинского



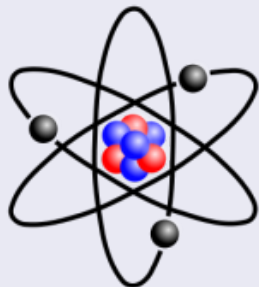
## От Земли до атома



$\sim 13000$  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

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, зазор 4 микрона:

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

“Initial” LIGO, 2011

Лазерный луч измеряет усредненную 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 Первое прямое детектирование ГВ: GW150914

2 Немного истории

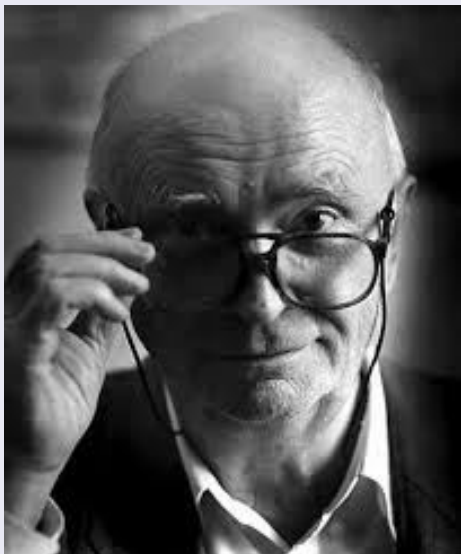
3 Какие смещения?

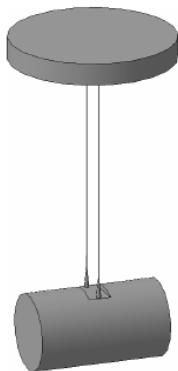
4 Вклад группы В.Б. Брагинского



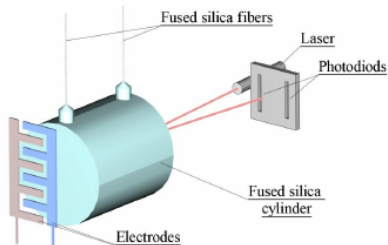
## Сотрудники группы (кафедра физики колебаний физфака МГУ):

- проф. В.П. Митрофанов (нынешний руководитель коллектива)
- 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.





Время затухания колебаний  
**≈ 5 лет**

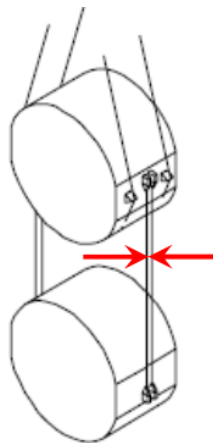
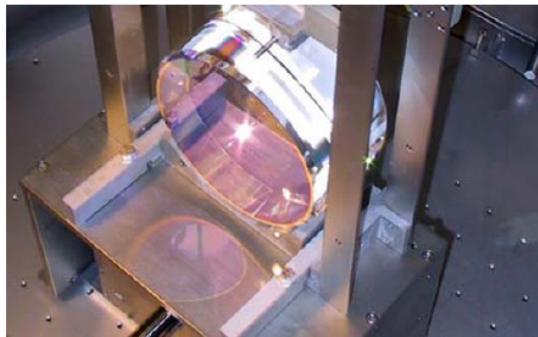


Квазимонолитный маятник

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.**

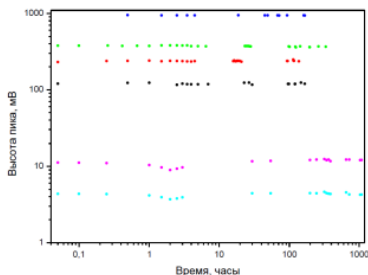
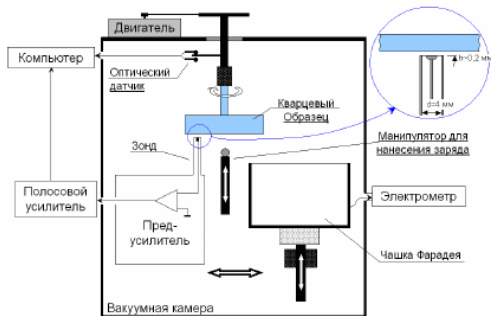




Стальные проволоки (подвес Initial LIGO) – экспериментально обнаружены «потрескивания» – избыточные шумы, связанные с большой запасенной упругой энергией.

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

# Электрические заряды на кварцевых пробных массах

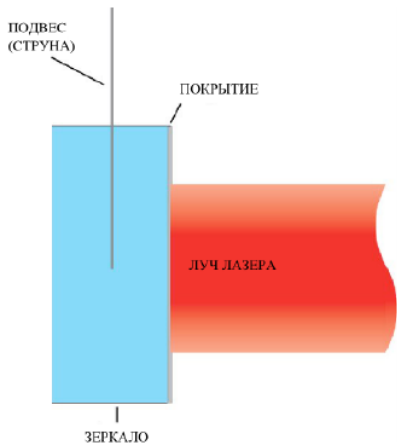


**Увеличение времени растекания зарядов - ключевой фактор снижения шумов, связанных с электрическими зарядами.**

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



# Тепловые шумы поверхности зеркал аLIGO



# Из чего делать зеркала aLIGO?



САПФИР



ПЛАВЛЕННЫЙ КВАРЦ

или

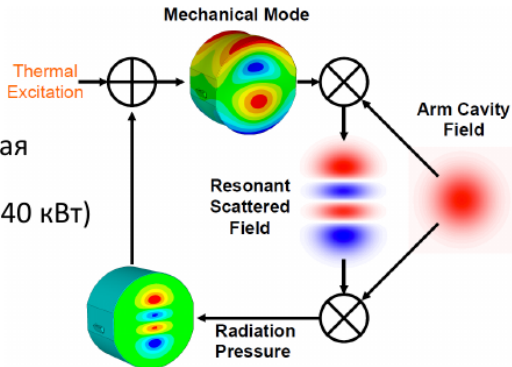
Группа физфака МГУ доказала, что кварц шумит меньше сапфира. “Открыты” термоупругие и терморелрактивные шумы, их причина — фундаментальные термодинамические флуктуации температуры.





# 2001 г.: предсказано явление параметрической неустойчивости в интерферометрах

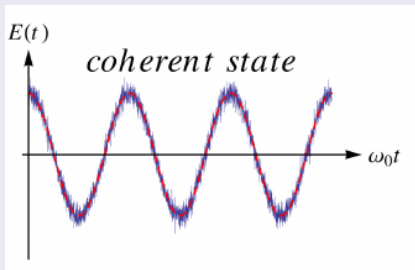
В 2015 г. в детекторе LIGO обнаружена параметрическая неустойчивость (ПН) (циркулирующая мощность 40 кВт)



Нежелательное возбуждение оптических мод интерферометра и механических мод зеркал при большой мощности светового излучения,  $\omega_0 \simeq \omega_s + \omega_m$ . Планируемая циркулирующая мощность – до 800кВт. Разрабатываются методы подавления.



# Стандартный квантовый предел в Adv. LIGO?



Квантовые флуктуации света:

- Мешают точно измерять положение зеркал,  $x_{\text{meas}} \sim 1/\sqrt{P}$
- Создают случайную силу давления света  $x_{\text{pert}} \sim \sqrt{P}$

При оптимальной мощности – СКП (Брагинский, 1968)

$$x_{\text{meas}} = x_{\text{pert}} = \frac{x_{\text{СКП}}}{\sqrt{2}} = \sqrt{\frac{\hbar t}{2m}} \quad (1)$$

Как преодолеть СКП? Группа физфака МГУ:

- Строблирующее измерение
- Вариационное измерение
- Измеритель скорости
- Оптическая жесткость