

Прямое детектирование гравитационных волн

В.Б. Брагинский, И.А. Биленко, С.П. Вятчанин, М.Л. Городецкий,
В.П. Митрофанов, Л.Г. Прохоров, С.Е. Стрыгин, Ф.Я. Халили

Кафедра физики колебаний, физический факультет МГУ

Москва, 20 сентября 2016



Outline

- 1 Прямое детектирование гравитационных волн
- 2 Немного истории
- 3 Какие смещения?
- 4 Квантовые шумы
- 5 Вклад группы В.Б. Брагинского



1 Прямое детектирование гравитационных волн

2 Немного истории

3 Какие смещения?

4 Квантовые шумы

5 Вклад группы В.Б. Брагинского

С.П. Вятчанин (Физфак МГУ)

Грав. волны...



Первое прямое детектирование ГВ: GW150914

- 14 сентября 2015 г. в 5:51 утра EST (13:51 МСК) в США на двух детекторах-близнецах LIGO (Laser Interferometric Gravitational Observatory) в Ливингстоне (Луизиана), и в Хэнфорде (Вашингтон).
- Обсерватория LIGO построена и эксплуатируется Калифорнийским и Массачусетским технологическими институтами (Caltech и MIT). Финансируется NSF (США).
- Опубликовано в Physical Review Letters **116** (2016) 061102 от имени LSC (LIGO Scientific Collaboration), включающей коллаборации Virgo (Италия, Франция), GEO (Германия и Великобритания), KAGRA (Япония) и Австралийский консорциум интерферометрической гравитационной астрономии.



1-ый сигнал: Phys.Rev.Lett. v.116, 061102 (2016)

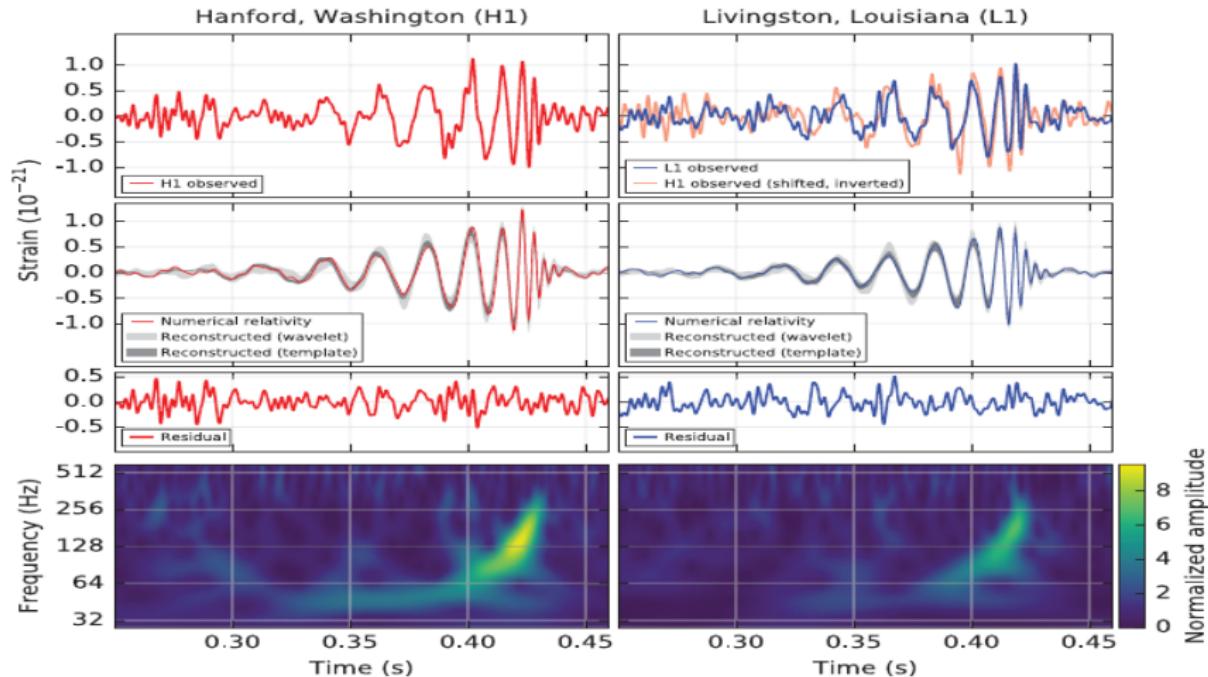
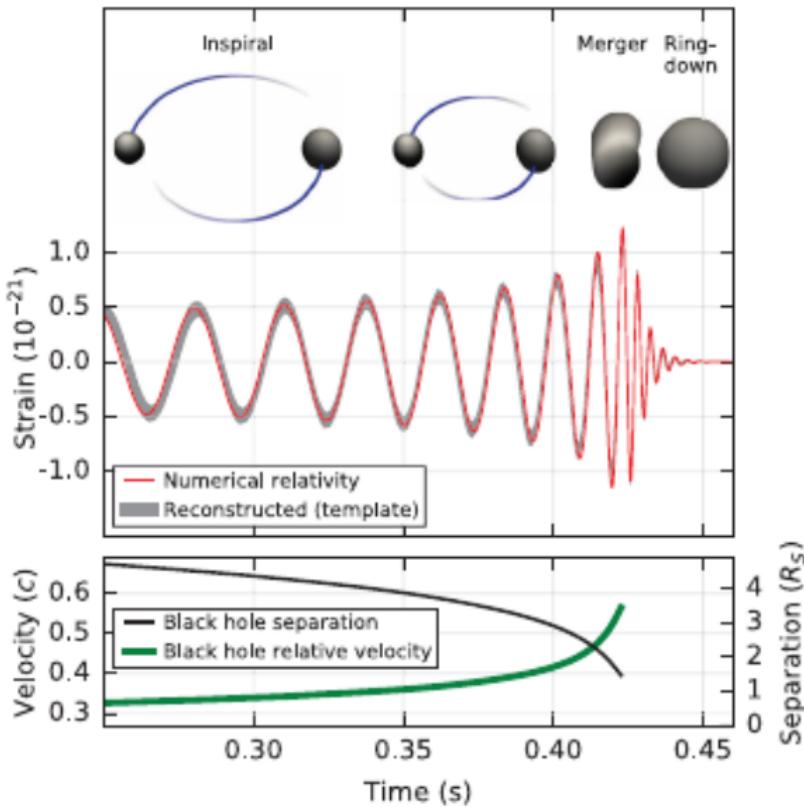


Figure: По строкам: 1) записи на детекторах в Хэнфорде и Ливингстоне, 2) записи пропущенные через фильтр 35 - 350 Гц, 3) что осталось после фильтра.



Источник события 1: слияние двух черных дыр



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

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

Надежность обнаружения события 1: 5.1σ

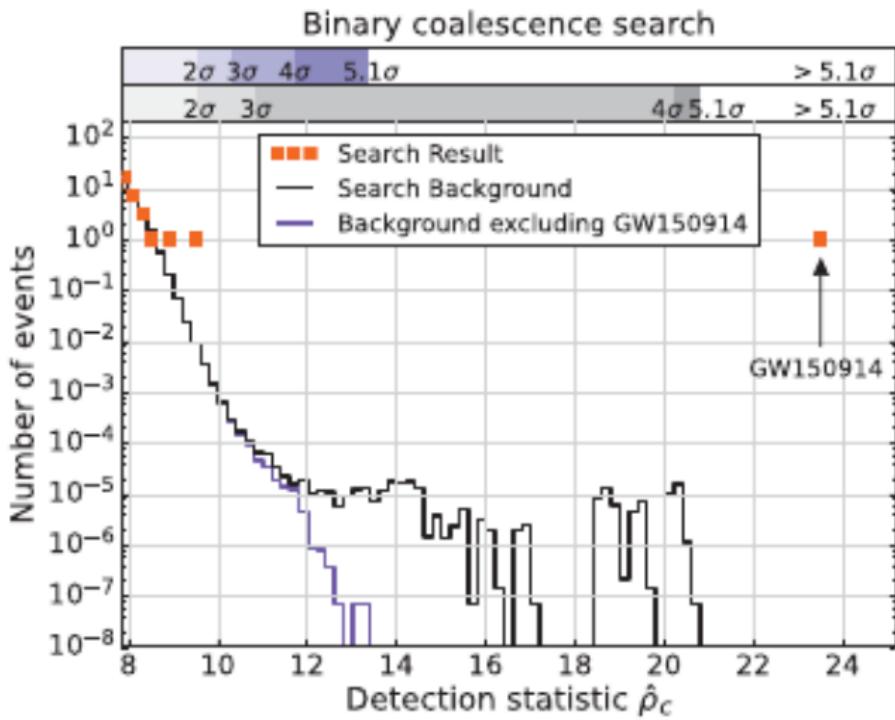


Figure: Поиск событий среди двойных слияний. Хвост (черный) – из-за случайных совпадений GW150914 на одном детекторе со случайным шумом на другом.



Второе прямое детектирование ГВ: GW151226

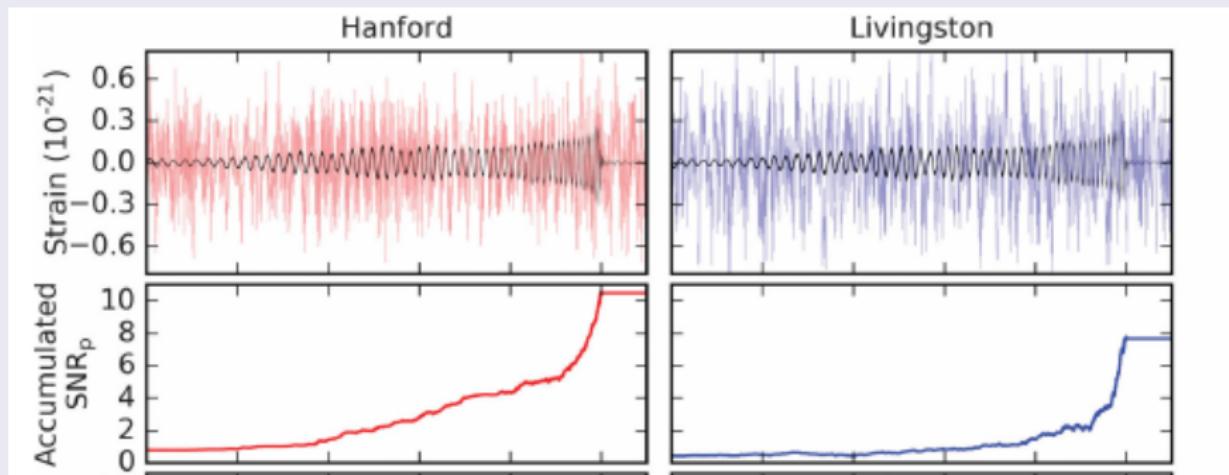


Figure: Записи на детекторах в Хэнфорде и Ливингстоне по строкам: 1 – оригинальные записи и они же, пропущенные через фильтр 30 - 600 Гц, 2 – отношение сигнала к шуму, как функция времени интегрирования.

Источник события 2: слияние двух черных дыр

Моделирование

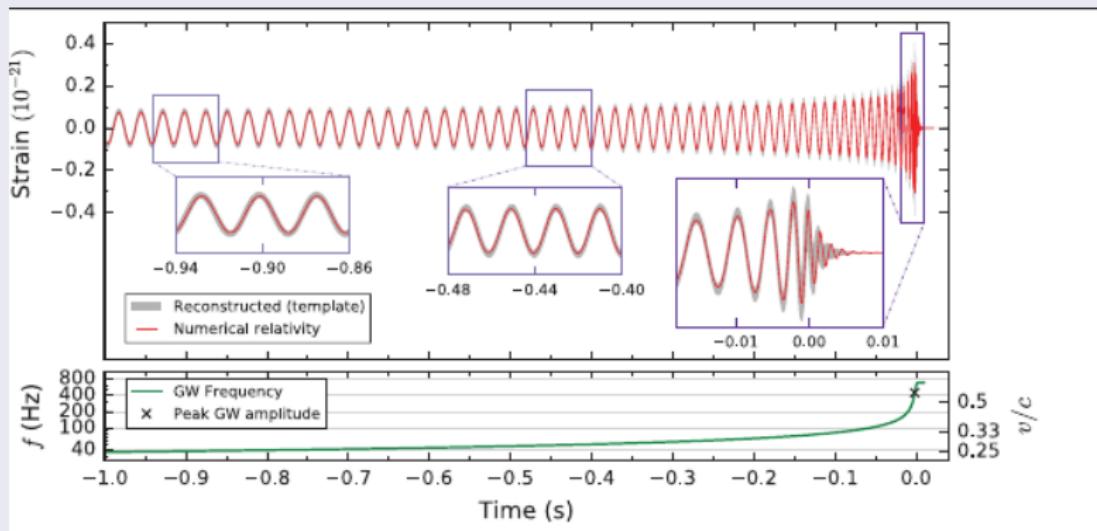


Figure: Результат моделирования гравитационного сигнала.

Массы чёрных дыр $14. M_{\odot}$, $7.5 M_{\odot}$. За доли сек. $\simeq 1 M_{\odot}$ превратились в ГВ на расстоянии 440 Мпс от Земли (около 1,3 млрд св. лет)

Схема антенны aLIGO

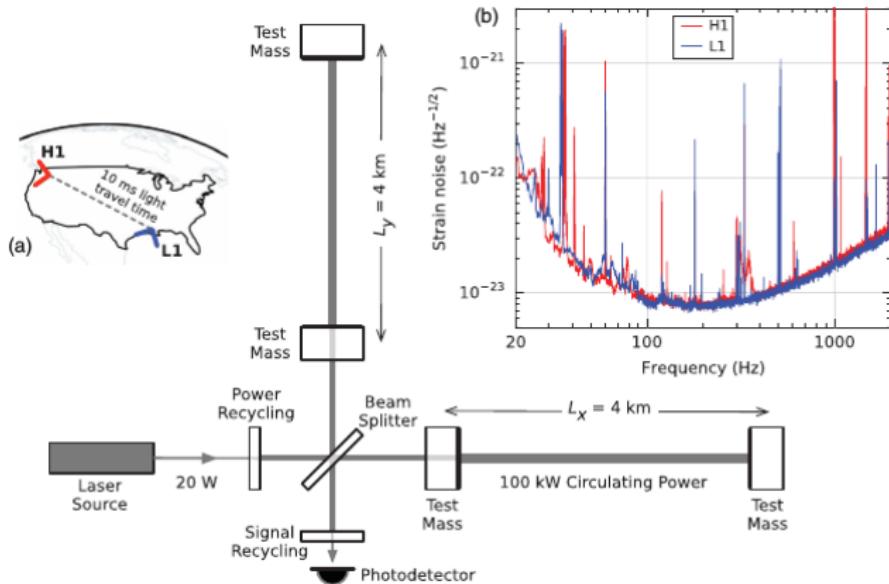


Figure: Схема лазерных интерферометров aLIGO. Узкие пики: калибровка (33–38, 330, and 1080 Гц), моды упругих колебаний нитей подвеса (500 Гц и гармоники), 60 Гц (и гармоники) электропитания.



1 Прямое детектирование гравитационных волн

2 Немного истории

3 Какие смещения?

4 Квантовые шумы

5 Вклад группы В.Б. Брагинского

С.П. Вятчанин (Физфак МГУ)

Грав. волны...



Исторический экскурс

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)

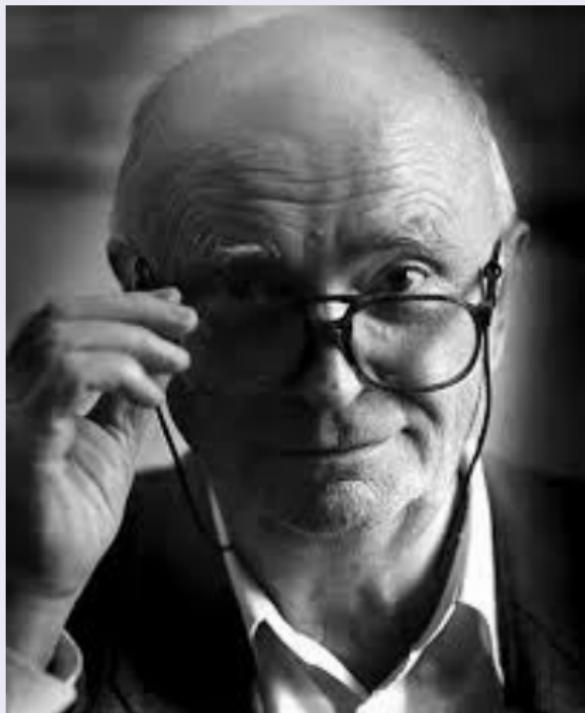
Открытие гравитационных волн по изменению частоты двойных пульсаров.
Это **косвенное** подтверждение существования грав. волн

Ты помнишь, как все начиналось...

Твердотельные антенны (1970 – 1990)



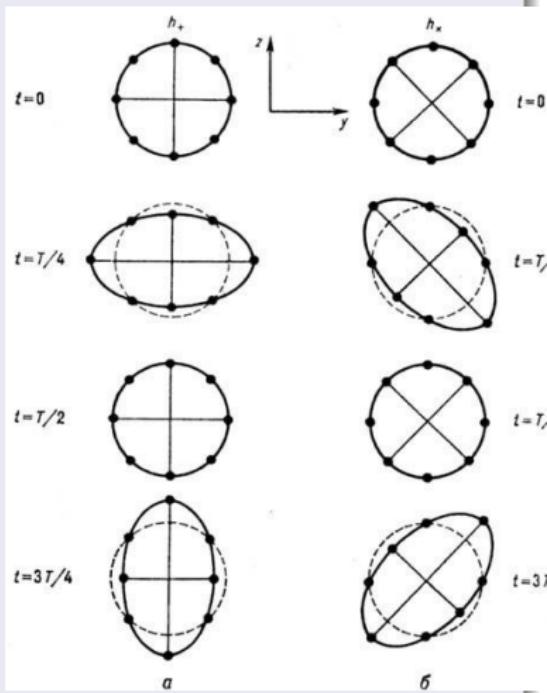
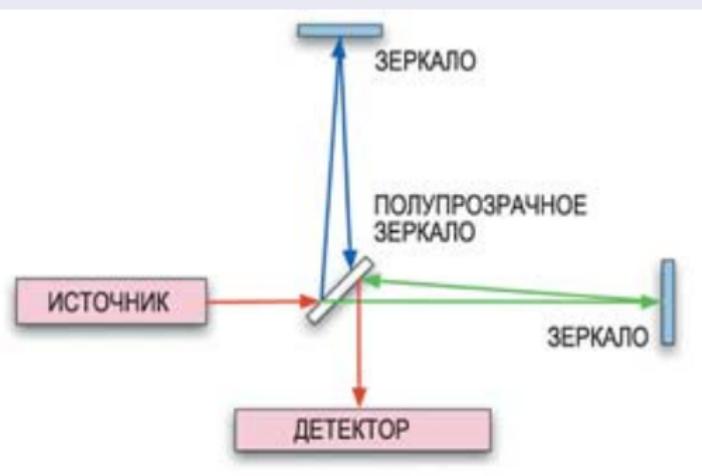
Дж. Вебер в лаборатории



Владимир Борисович Брагинский

Лазерная гравитационная антенна

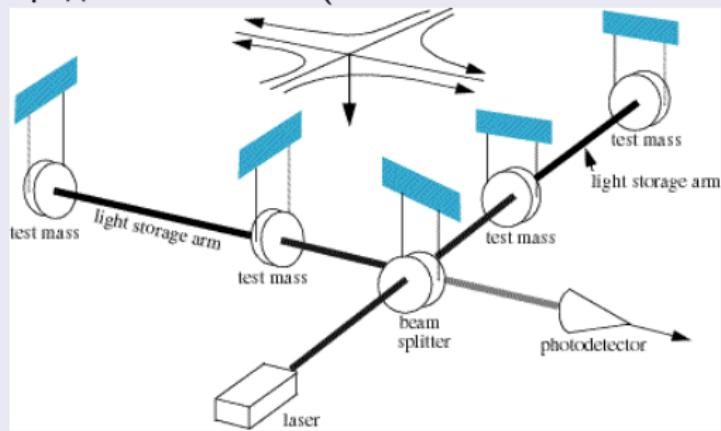
М.Е. Герценштейн, В.И. Пустовойт, ЖЭТФ 43, 605 (1962)



Современная лазерная гравитационная антенна

Схема и вид

1992 г. — Kip Thorne, Ronald Driver (CIT) and Rainer Weiss (MIT) предложили LIGO (Laser Interferometric Gravitational Observatory).



История

LIGO: две антенны (4 км)

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

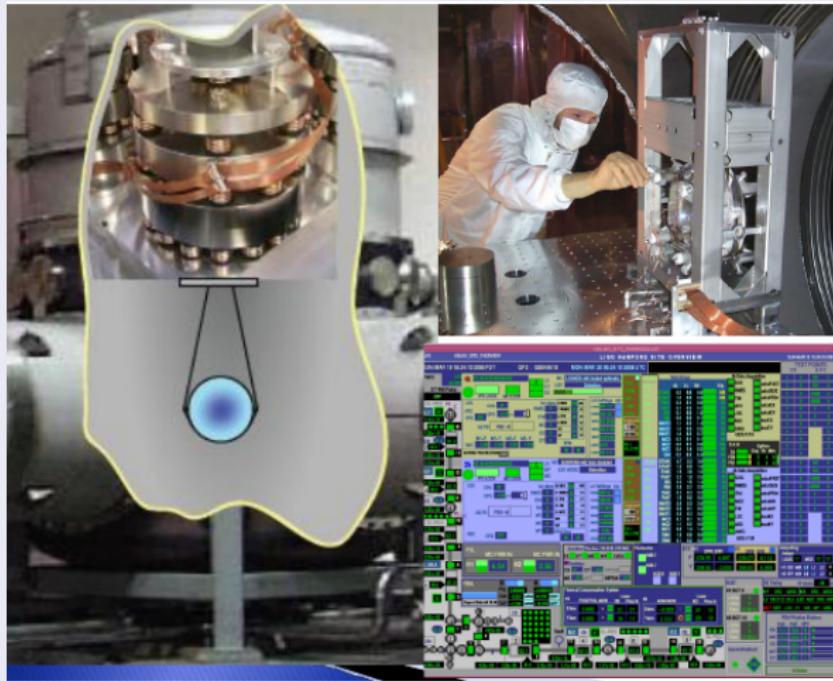
2002 г. — Initial LIGO: S1 (scientific run), начаты записи детектируемого сигнала.



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

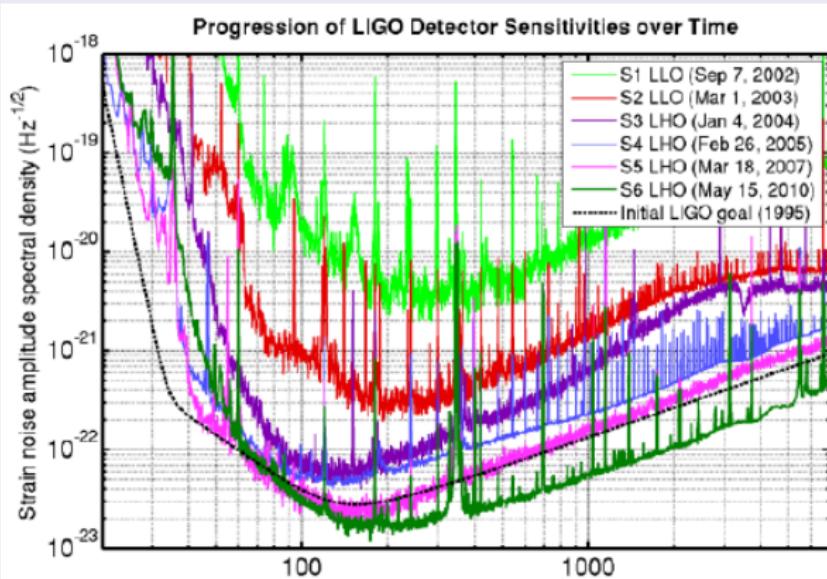
2015 г. — инженерный и научный запуск Advanced LIGO

Сложнейшая инженерная установка



- > 1000 систем автоподстройки
- > 500 контрольных каналов (0.5 Тб в сутки, около 300 специалистов + всп. персонал)
- \$ 30 млн в год на управление

Пройден тяжелый путь (2002 – 2010)



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

LIGO Scientific Collaboration

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 Прямое детектирование гравитационных волн

2 Немного истории

3 Какие смещения?

4 Квантовые шумы

5 Вклад группы В.Б. Брагинского

С.П. Вятчанин (Физфак МГУ)

Грав. волны...



Масштаб

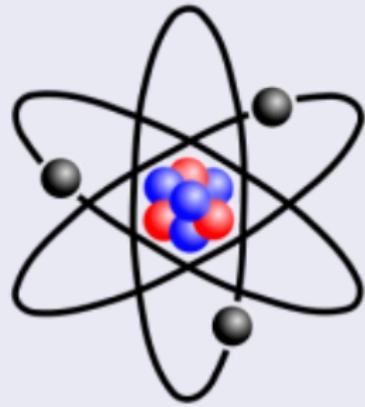
От Земли до атома



$\sim 13\,000$ 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

Это 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:

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

“Initial” LIGO, 2011

Лазерный луч измеряет усредненную координату зеркала

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

Advanced LIGO, 2015

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

1 Прямое детектирование гравитационных волн

2 Немного истории

3 Какие смещения?

4 Квантовые шумы

5 Вклад группы В.Б. Брагинского

С.П. Вятчанин (Физфак МГУ)

Грав. волны...



Квантовые шумы

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:

$$P = 800 \text{ кВт}, \text{ сейчас } \sim 100 \text{ кВт} \quad (1)$$



1 Прямое детектирование гравитационных волн

2 Немного истории

3 Какие смещения?

4 Квантовые шумы

5 Вклад группы В.Б. Брагинского

С.П. Вятчанин (Физфак МГУ)

Грав. волны...



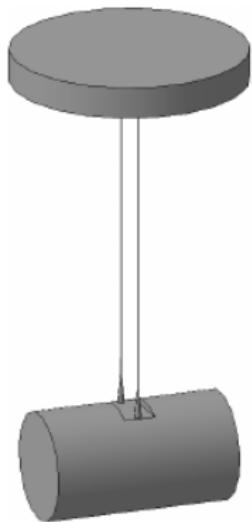
В LIGO группа В.Б. Брагинского работает с 1992 г.

Сотрудники группы (кафедра физики колебаний физфака МГУ):

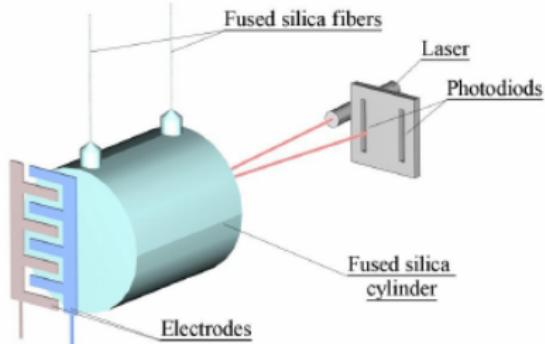
- проф . В.П. Митрофанов
(нынешний руководитель коллектива)
- проф. И.А. Биленко
- проф. С.П. Вятчанин
- проф. М.Л. Городецкий
- проф. Ф.Я. Халили
- доц. С.Е. Стрыгин
- асс. Л.Г. Прохоров
- Студенты, аспиранты и тех. персонал кафедры.



Кварцевые маятники



Время затухания колебаний
≈ 5 лет

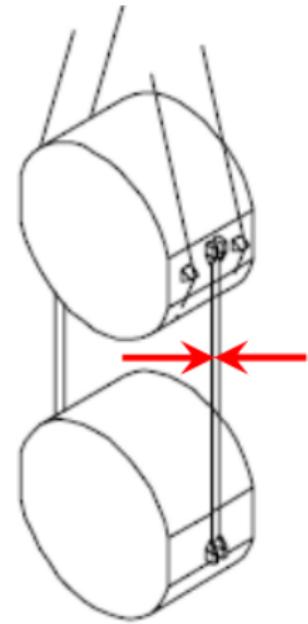
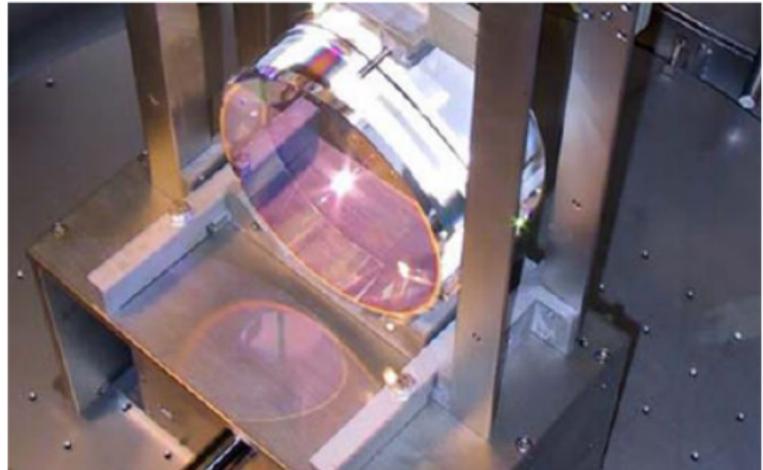


Квазимонолитный маятник

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.**

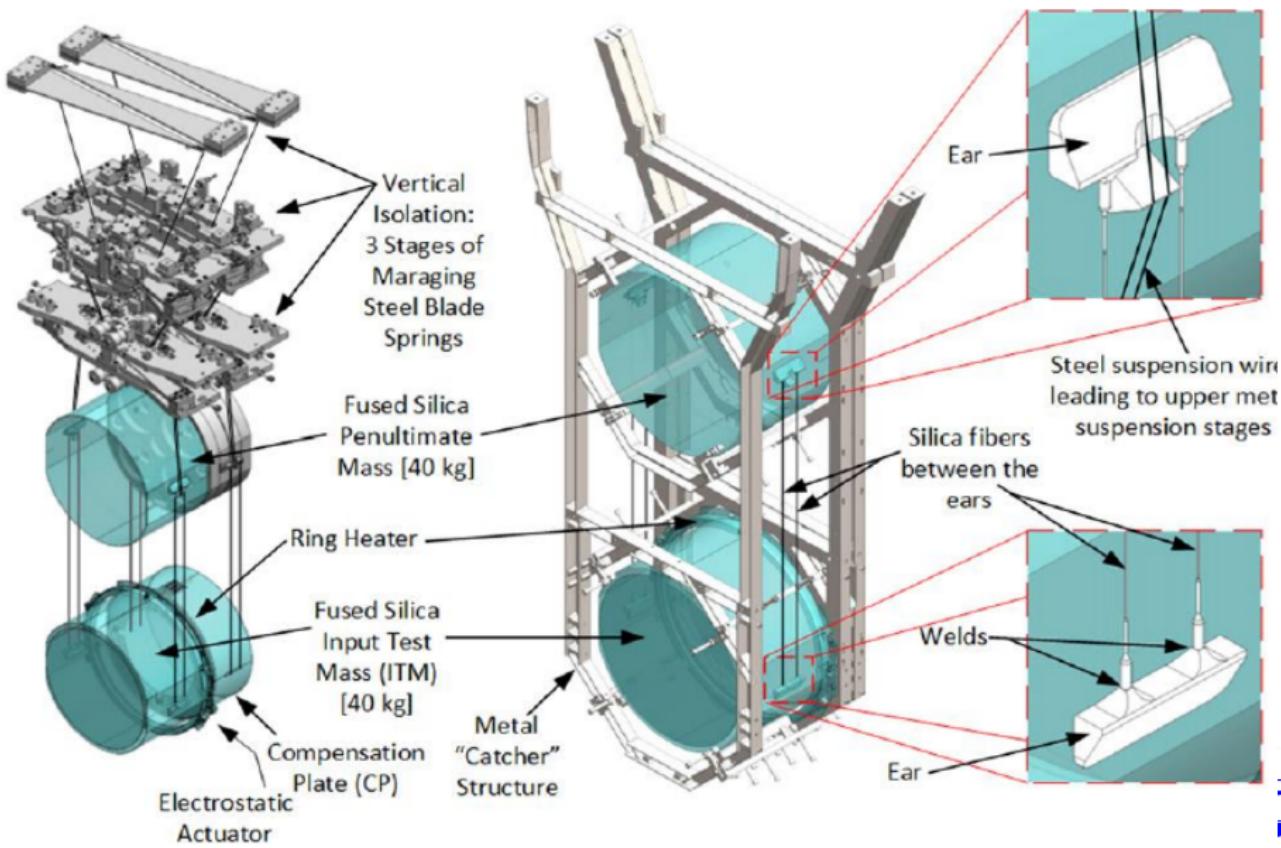
Шумы подвеса



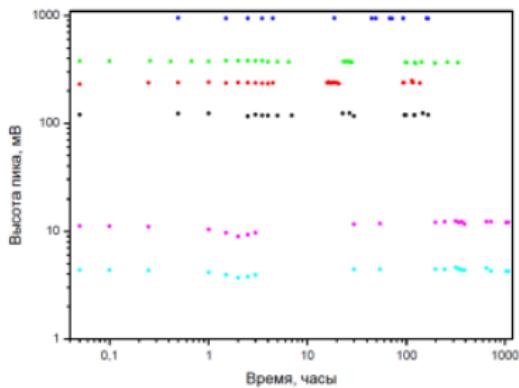
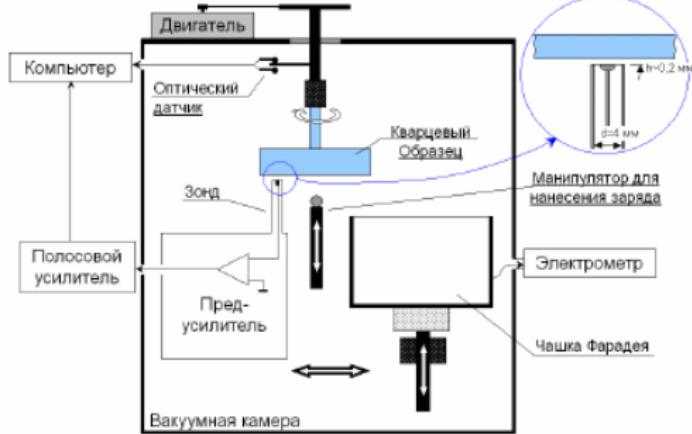
Стальные проволоки (подвес Initial LIGO) – экспериментально обнаружены «потрескивания» – избыточные шумы, связанные с большой запасенной упругой энергией.

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

Подвес “в полный рост” (aLIGO)



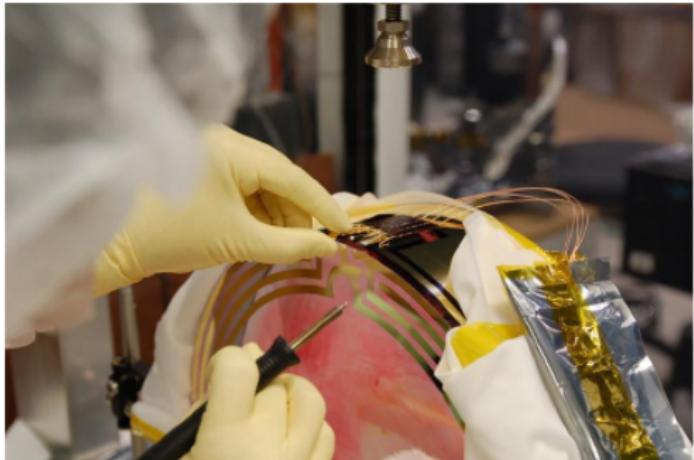
Электрические заряды на кварцевых побных массах



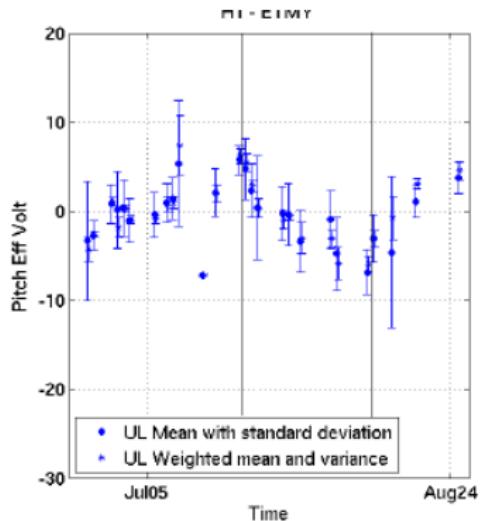
Увеличение времени растекания зарядов - ключевой фактор снижения шумов, связанных с электрическими зарядами.

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

Эволюция распределения зарядов на зеркалах aLIGO



Электростатический актуатор Advanced LIGO

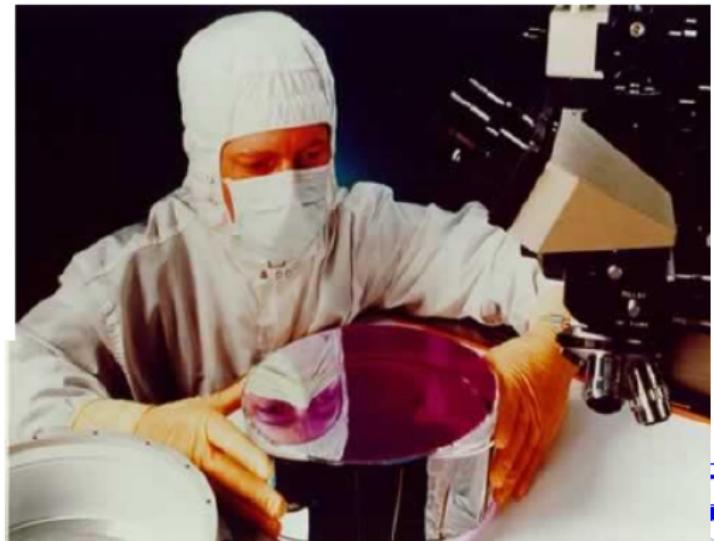
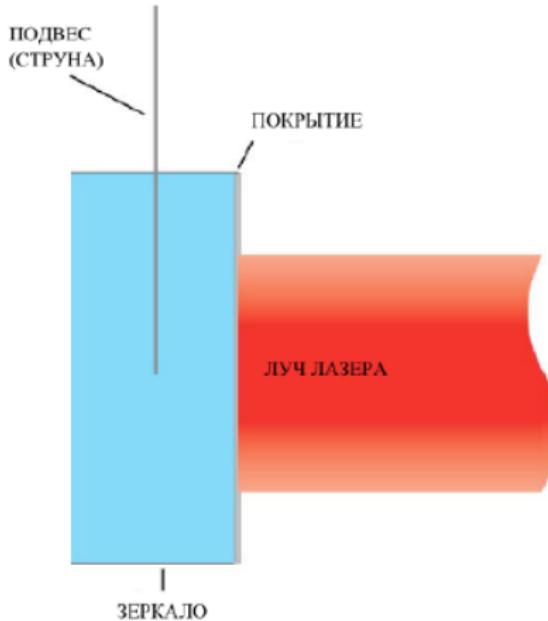


Миграция электрических зарядов

В 2015 г. на детекторе LIGO Л.Прохоров вместе с коллегами исследовали поведение зарядов. Установлен оптимальный режим работы электростатического актуатора.



Тепловые шумы поверхности зеркал аLIGO



Множество различных тепловых шумов поверхности зеркал aLIGO... таки разобрались!

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

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

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

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

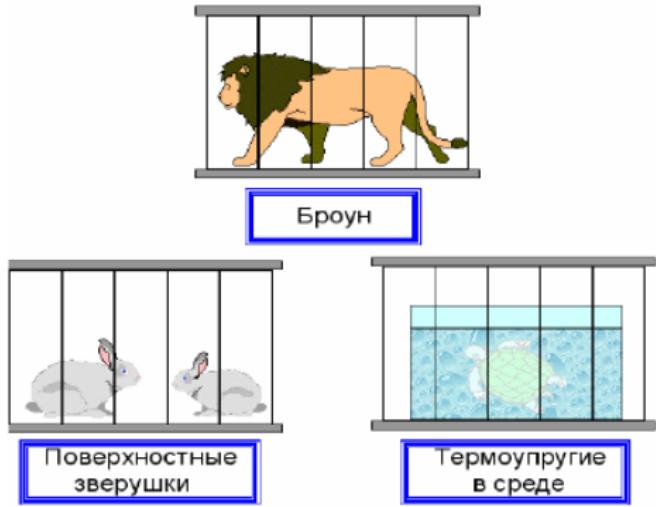
$$S_{PTE}^{coat} = \frac{4S_{abs}(1+\sigma_s)^2 \alpha_f^2 d_N^2}{\pi^3 \rho_s C_s \kappa_s w^4 f} G_{surf}^{coat}(\omega)$$

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

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

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

ШУИНЫЙ ЗООПАРК



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

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

Из чего делать зеркала аLIGO?

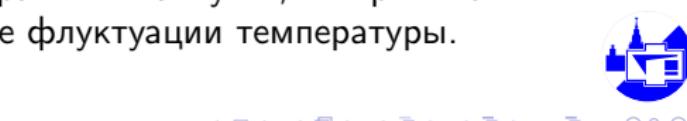


САПФИР

или

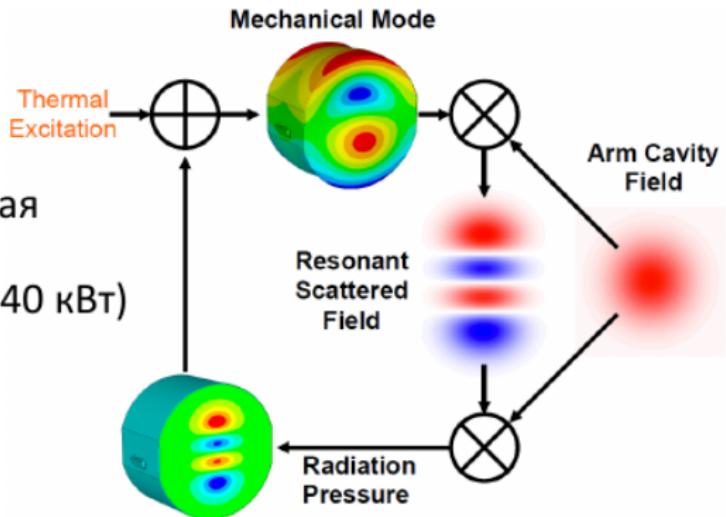
ПЛАВЛЕНЫЙ КВАРЦ

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



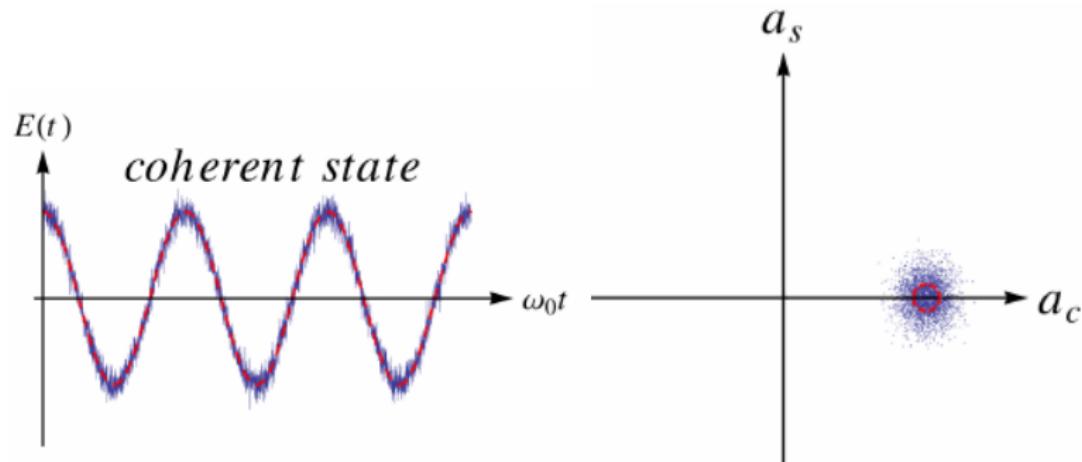
2001 г.: предсказано явление параметрической неустойчивости в интерферометрах

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



Параметрическая неустойчивость – нежелательное возбуждение оптических мод интерферометра и механических мод зеркал при большой мощности светового излучения. Планируемая циркулирующая мощность – до 800кВт. Разрабатываются методы подавления.

Стандартный квантовый предел (СКП)



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)

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

Как преодолеть СКП?

Группа физфака МГУ:

- Стробирующее измерение
- Вариационное измерение
- Измеритель скорости

Квантовый измеритель скорости (прототип в Глазго, 2016)



Да здравствует российская наука!

