

Прямое детектирование гравитационных волн

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

Кафедра физики колебаний, физический факультет МГУ

Москва, 20 сентября 2016



- 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



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)

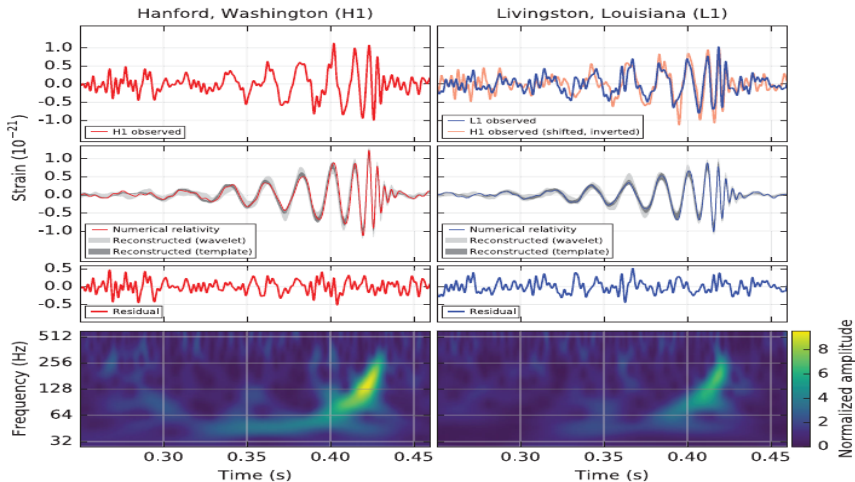
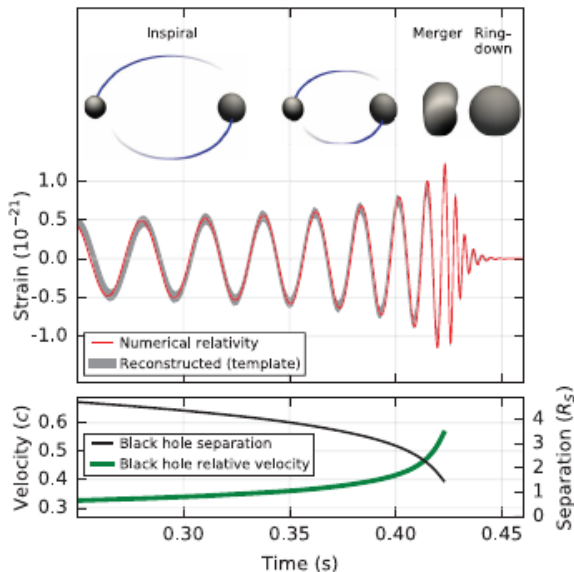


Figure: По строкам: 1) записи на детекторах в Хэнфорде и Ливингстоне, 2) записи пропущенные через фильтр 35 - 350 Гц, 3) что осталось после фильтра.



Источник события 1: слияние двух черных дыр



Массы чёрных дыр

$29 M_{\odot}$, $36 M_{\odot}$

За доли сек. $\simeq 3 M_{\odot}$

превратились в ГВ

1,3 миллиарда лет назад

Внизу: эфф. расстояние

в единицах радиуса

Шварцшильда $R_c =$

$2GM/c^2$ и эфф. скорость

$v/c = (GM\pi f/c^3)^{1/3}$

Надежность обнаружения события 1: 5.1σ

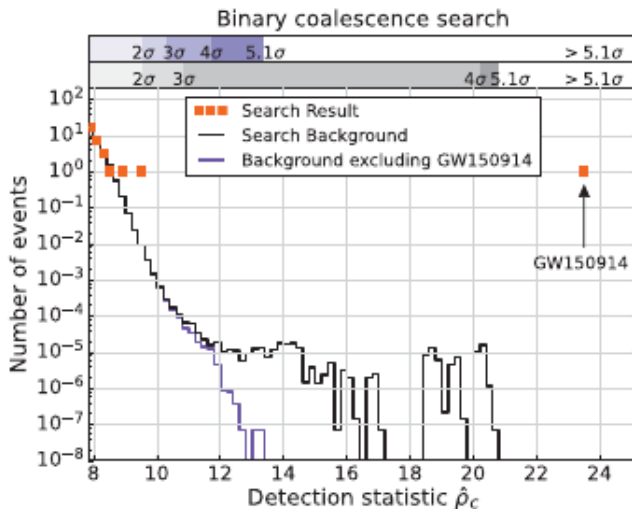


Figure: Поиск событий среди двойных слияний. Хвост (черный) – из-за случайных совпадений GW150914 на одном детекторе со случайным шумом на другом.

Второе прямое детектирование ГВ: GW151226

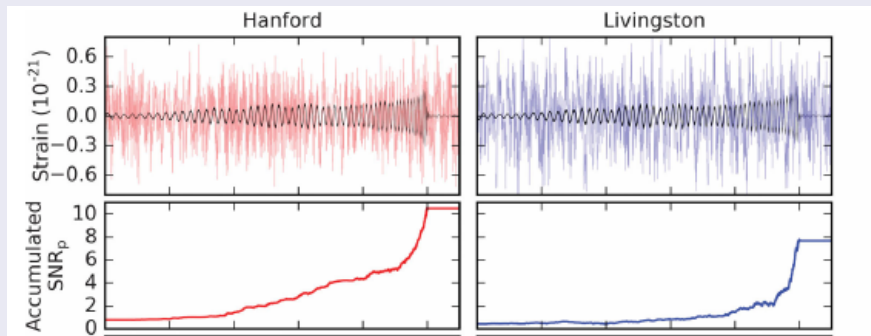


Figure: Записи на детекторах в Хэнфорде и Ливингстоне по строчкам: 1 – оригинальные записи и они же, пропущенные через фильтр 30 - 600 Гц, 2 – отношение сигнала к шуму, как функция времени интегрирования.

Источник события 2: слияние двух черных дыр

Моделирование

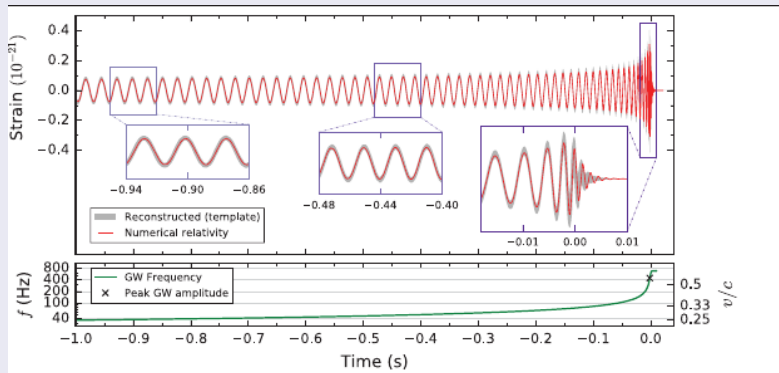


Figure: Результат моделирования гравитационного сигнала.

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

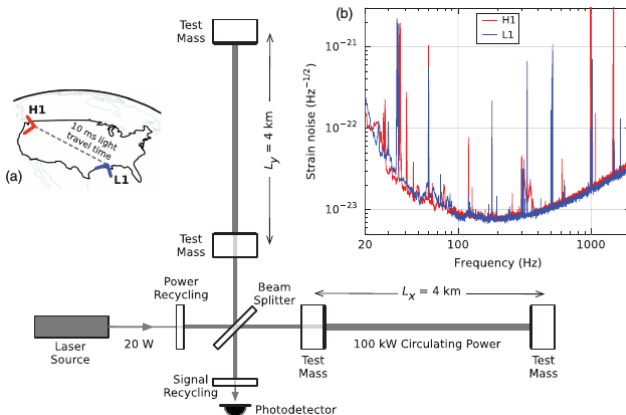


Figure: Схема лазерных интерферометров aLIGO. Узкие пики: калибровка (33–38, 330, and 1080 Гц), моды упругих колебаний нитей подвеса (500 Гц и гармоники), 60 Гц (и гарммоники) электропитания.



1 Прямое детектирование гравитационных волн

2 Немного истории

3 Какие смещения?

4 Квантовые шумы

5 Вклад группы В.Б. Брагинского



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)



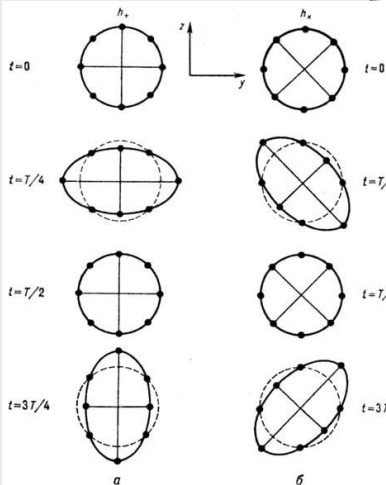
Дж. Вебер в лаборатории



Владимир Борисович Брагинский

Лазерная гравитационная антенна

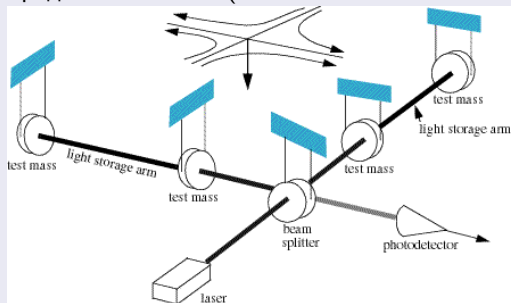
М.Е. Герценштейн, В.И. Пустовойт, ЖЭТФ 43, 605 (1962)



Современная лазерная гравитационная антенна

Схема и вид

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



LIGO: две антенны (4 км)

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

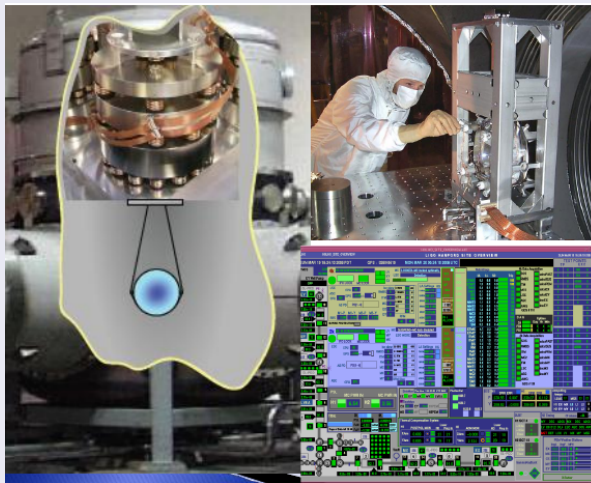
2002 г. — Initial LIGO: S1 (scientific run), начаты записи детектируемого сигнала.



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

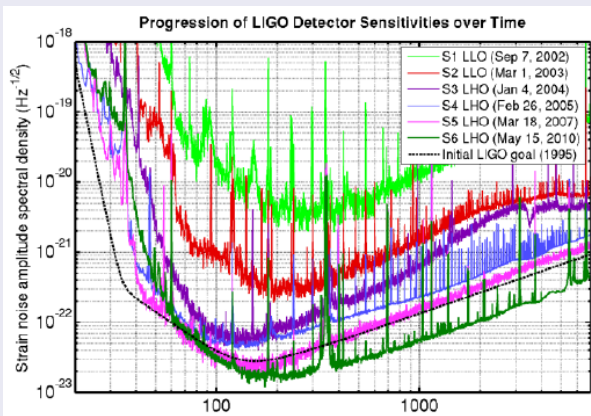
2015 г. — инженерный и научный запуск Advanced LIGO

Сложнейшая инженерная установка



- > 1000 систем автоподстройки
- > 500 контрольных каналов (0.5 Тб в сутки, около 300 специалистов + восп. 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 ...**



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



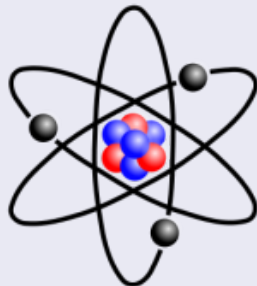
От Земли до атома



$\sim 13\,000$ 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 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 Прямое детектирование гравитационных волн

2 Немного истории

3 Какие смещения?

4 Квантовые шумы

5 Вклад группы В.Б. Брагинского



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:

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



1 Прямое детектирование гравитационных волн

2 Немного истории

3 Какие смещения?

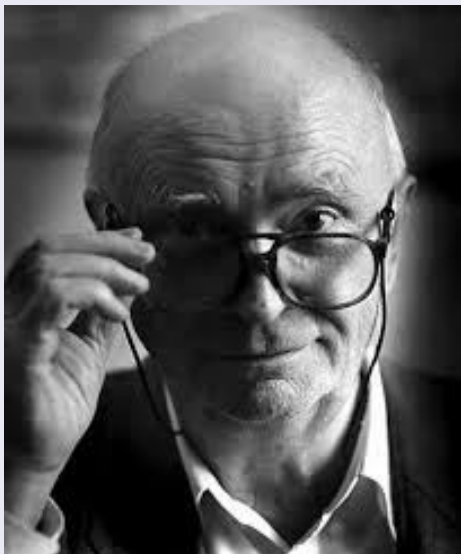
4 Квантовые шумы

5 Вклад группы В.Б. Брагинского

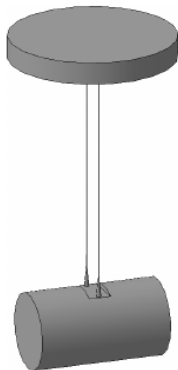


Сотрудники группы (кафедра физики колебаний физфака МГУ):

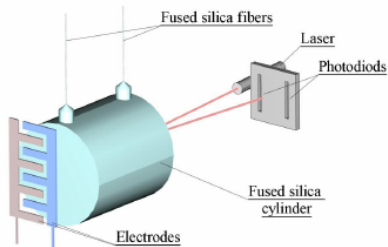
- проф. В.П. Митрофанов
(нынешний руководитель коллектива)
- проф. И.А. Биленко
- проф. С.П. Вятчанин
- проф. М.Л. Городецкий
- проф. Ф.Я. Халили
- доц. С.Е. Стрыгин
- асс. Л.Г. Прохоров
- Студенты, аспиранты и тех. персонал кафедры.



Кварцевые маятники



Время затухания колебаний
≈ 5 лет



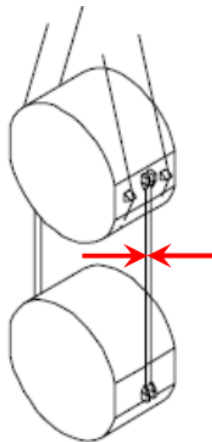
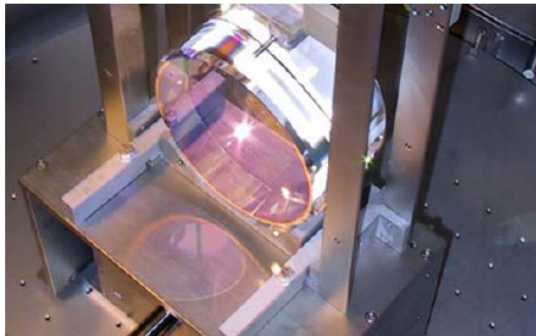
Квазимонолитный маятник

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.**



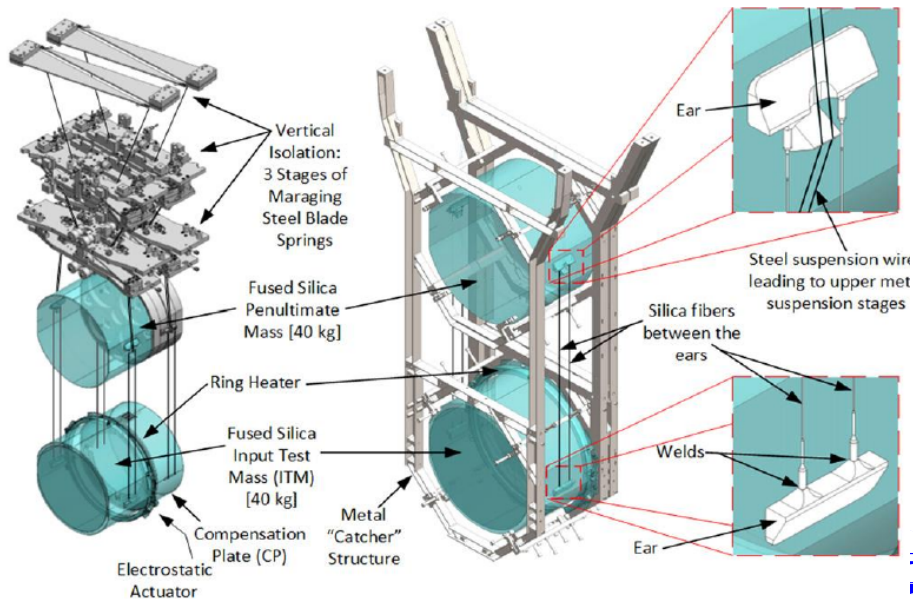
Шумы подвеса



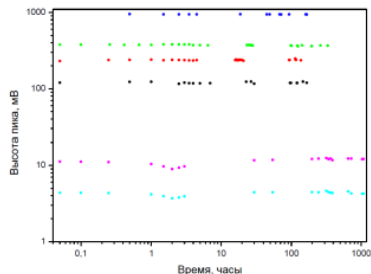
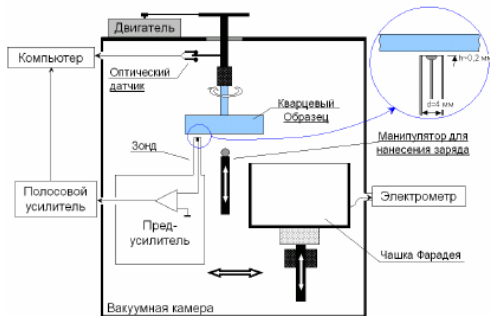
Стальные проволоки (подвес Initial LIGO) – экспериментально обнаружены «потрескивания» – избыточные шумы, связанные с большой запасенной упругой энергией.

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

Подвес “в полный рост” (aLIGO)



Электрические заряды на кварцевых побных массах

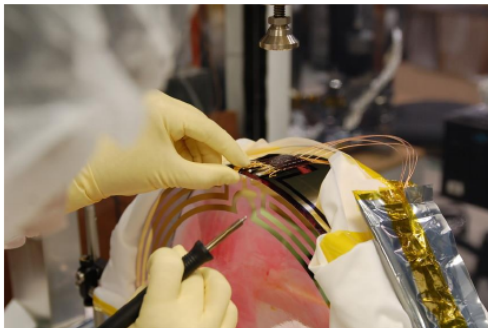


Увеличение времени растекания зарядов - ключевой фактор снижения шумов, связанных с электрическими зарядами.

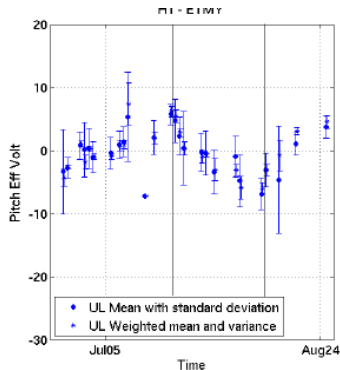
Измеренное время релаксации электрического заряда составило **более 3 лет**



Эволюция распределения зарядов на зеркалах aLIGO



Электростатический актюатор Advanced LIGO

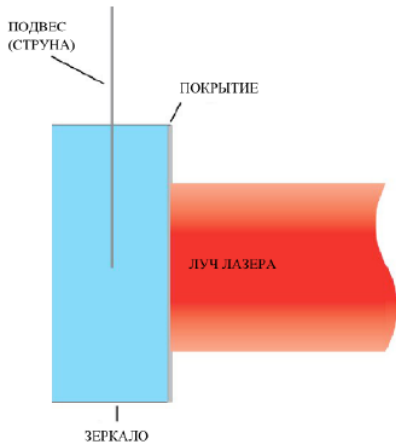


Миграция электрических зарядов

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



Тепловые шумы поверхности зеркал aLIGO



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

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

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

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

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

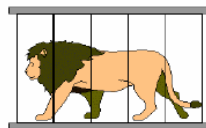
$$S_{PTE}^{coat} = \frac{4S_{obs}(1 + \sigma_s)^2 \alpha_c^2 d_N^2}{\pi^3 \rho_s C_s \kappa_s w^4 f} G_{surf}^{coat}(\omega)$$

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

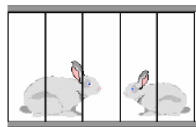
$$S_{TE}^{coat} = \frac{2\sqrt{2} k_B T^2 d_{\Sigma}^2 (1 + \nu^2) \alpha^2}{\sqrt{f} \pi^{3/2} r_0^2 \sqrt{\kappa C \rho}} \frac{(C_f \rho_f)^2}{(C \rho)^2} \Delta^2$$

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

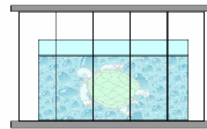
ШУМНЫЙ ЗООПАРК



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 aLIGO?



САПФИР



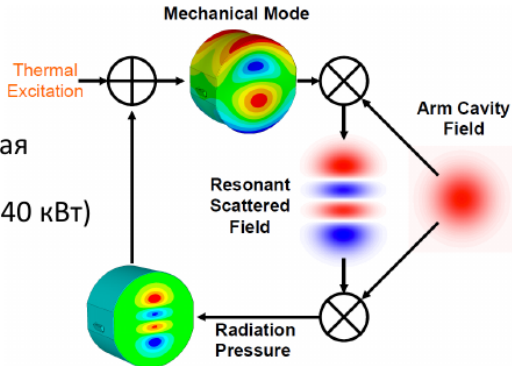
или ПЛАВЛЕННЫЙ КВАРЦ

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



2001 г.: предсказано явление параметрической неустойчивости в интерферометрах

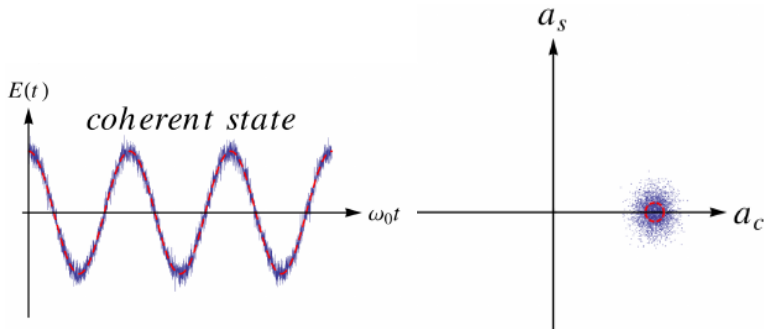
В 2015 г. в детекторе LIGO обнаружена параметрическая неустойчивость (ПН) (циркулирующая мощность 40 кВт)



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!

