

Гравитационные волны – новое окно во Вселенную

Ю. В. Штанов

*Институт теоретической физики им. Н. Н. Боголюбова
НАН Украины*



План доклада

- 1 Историческая перспектива
 - Электродинамика и теория относительности
 - Относительность и гравитация
- 2 Гравитационные волны
 - Природа гравитационных волн
 - Излучатели гравитационных волн
 - Регистрация гравитационных волн
- 3 Новое окно во Вселенную
 - Эра гравитационно-волновой астрономии

1 Историческая перспектива

- Электродинамика и теория относительности
- Относительность и гравитация

2 Гравитационные волны

- Природа гравитационных волн
- Излучатели гравитационных волн
- Регистрация гравитационных волн

3 Новое окно во Вселенную

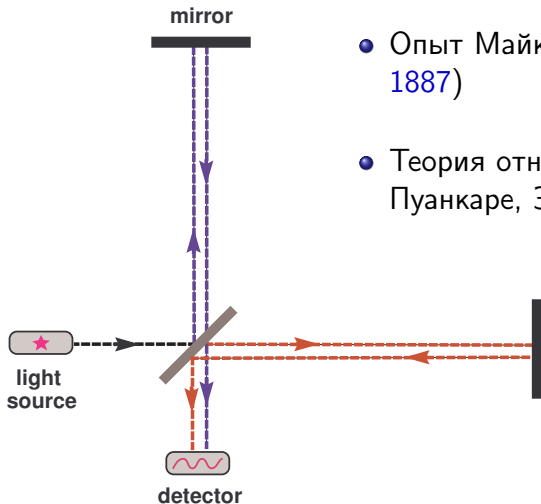
- Эра гравитационно-волновой астрономии

Электродинамика Максвелла–Лоренца

- Исследование электричества (E) и магнетизма (H) в 18–19 столетиях привело к построению теории Максвелла (1861) — первой теории “объединения” физических взаимодействий
- Теория предсказала явление *электромагнитных волн*, распространяющихся со скоростью, неотличимой от скорости света \Rightarrow *электромагнитная волновая природа света*
- Существование этих волн было экспериментально установлено в опытах Герца (1886–1889)
- Лоренц завершил (1892) построение теории “электрической материи и эфира”

Теория относительности

- Безуспешные попытки обнаружить движение земли относительно “эфира”



- Опыт Майкельсона–Морли (1881, 1887)
- Теория относительности (Лоренц, Пуанкаре, Эйнштейн, 1905)

Скорость света c —
предельная
скорость передачи
сигналов

Относительность и гравитация

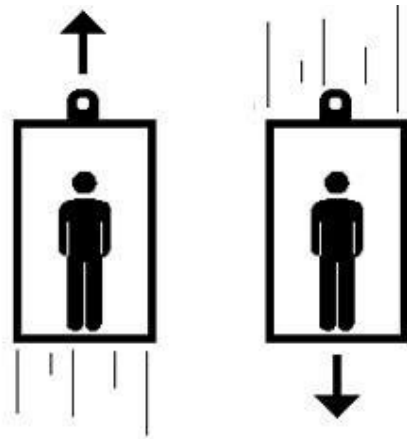
- Теория гравитации Ньютона противоречила новому принципу относительности

$$F = G \frac{M_1 M_2}{R^2} \quad \text{— мгновенное действие на расстоянии}$$



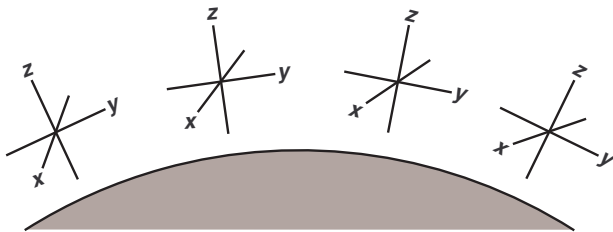
- Попытки построения теории гравитационного поля, совместимой с теорией относительности (Пуанкаре, Нордстрём, ...)
- Идея Эйнштейна: эквивалентность сил гравитации и “сил инерции” \Rightarrow следует видоизменить теорию относительности

Лифт Эйнштейна



- Внутри ускоренного лифта в пустом пространстве физические процессы протекают так же, как и в гравитационном поле
- Внутри свободно падающего лифта физические процессы протекают так же, как и в отсутствие гравитационного поля

Теория гравитации Эйнштейна



Гравитационное поле



“неспрямляемость”
локальных
инерциальных
систем отсчета

Геометрия пространства-времени

Основной объект — метрический тензор $g_{\mu\nu}(x)$

$$ds^2 = g_{\mu\nu}(x) dx^\mu dx^\nu$$

Свободные тела описывают в
пространстве-времени кривые *наибольшей*
временной длительности — *геодезические*

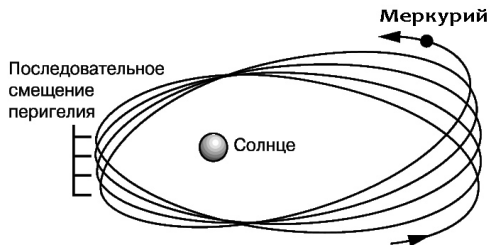


Уравнения Эйнштейна и их следствия

$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2}R g_{\mu\nu} = 8\pi G T_{\mu\nu}$$

Кривизна $\approx G \times$ (плотность энергии)

Материя (энергия) искривляет пространство-время, а искривление пространства-времени определяет движение материи



Ньютоновский предел с поправками: аномальное смещение перигелия Меркурия $\simeq 43''$ в столетие

Гравитационное отклонение света

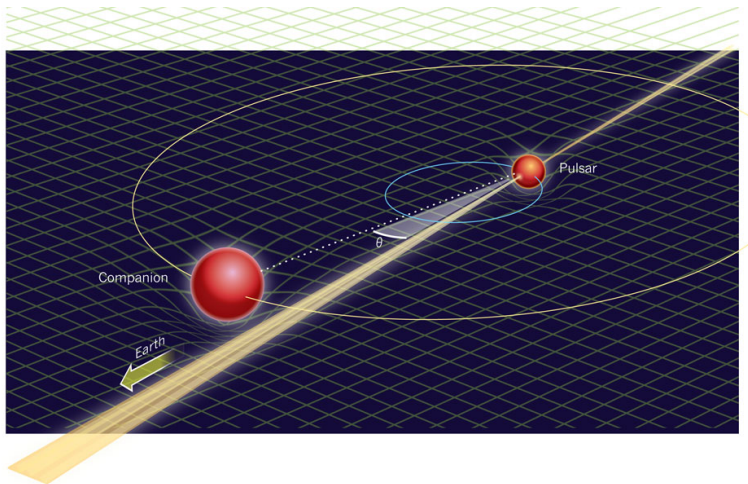


Гравитационное отклонение света (1919),
принцип Ферма и гравитационные линзы

$$n(\mathbf{x}) = 1 - \frac{2\Phi(\mathbf{x})}{c^2}$$



Гравитационная задержка времени



По задержке времени сигнала от пульсара
определяются массы звезд и параметры орбиты

1 Историческая перспектива

- Электродинамика и теория относительности
- Относительность и гравитация

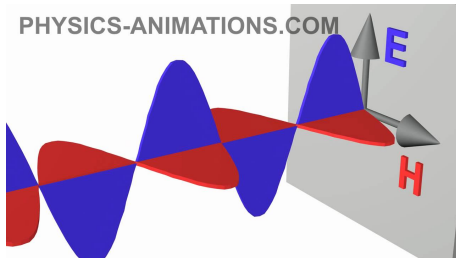
2 Гравитационные волны

- Природа гравитационных волн
- Излучатели гравитационных волн
- Регистрация гравитационных волн

3 Новое окно во Вселенную

- Эра гравитационно-волновой астрономии

Электромагнитная волна



Следствие уравнений Максвелла

- Волна электрического (E) и магнитного (H) полей

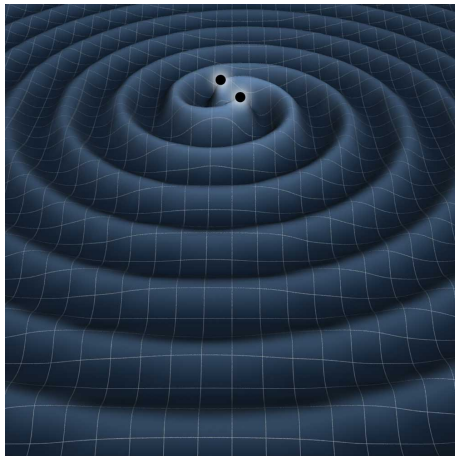
- Действует только на *электрически заряженную* материю
- Излучается движущейся *электрически заряженной* материей
- Является “поперечной” (колеблющаяся величина ортогональна направлению распространения волны)
- Раскладывается на две поляризации
- Распространяется со скоростью света

Гравитационная волна

$$g_{\mu\nu} = \eta_{\mu\nu} + h_{\mu\nu}(t, \mathbf{x})$$

Следствие уравнений Эйнштейна

- Волна *геометрии пространства-времени*
- Действует на *любую материю*
- Излучается *любой движущейся материей*
- Является “поперечной”
- Раскладывается на две поляризации
- Распространяется со скоростью света



Параметры гравитационной волны

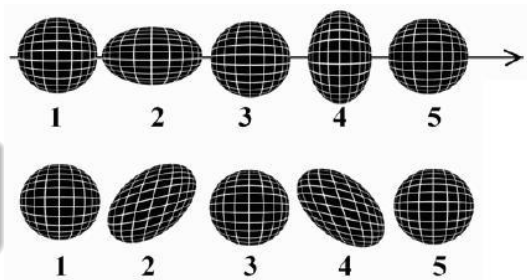
- Амплитуда $h = \frac{\Delta L}{L} \sim \frac{G^{1/2}}{\pi c^{3/2} r} \sqrt{\frac{E}{\nu}} \sim 10^{-21}$ (современный порог)

Расстояние до ближайшей звезды (4 световых года) изменяется на толщину человеческого волоса!

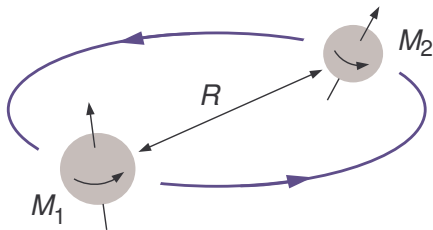
- Частота $\nu \simeq \frac{10M_{\odot}}{M}$ килогерц

- Поляризация

Параметры сигнала позволяют определить тип и параметры излучателя



Мощность излучения



Формула Эйнштейна:

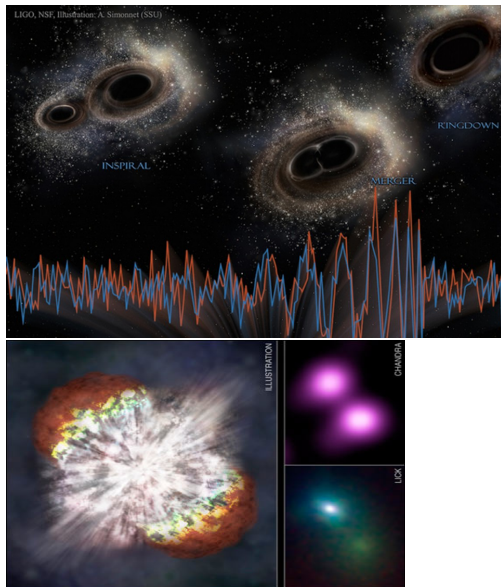
$$\mathcal{P}_{\text{излучение}} = \frac{G}{5c^5} \sum_{ij} \left(\ddot{Q}_{ij} \right)^2$$
$$\simeq \frac{6G^4}{c^5 R^5} M_1^2 M_2^2 (M_1 + M_2)$$

$$Q_{ij} = \int \rho \left(x_i x_j - \frac{1}{3} r^2 \delta_{ij} \right) d^3x \quad - \text{квадрупольный момент масс}$$

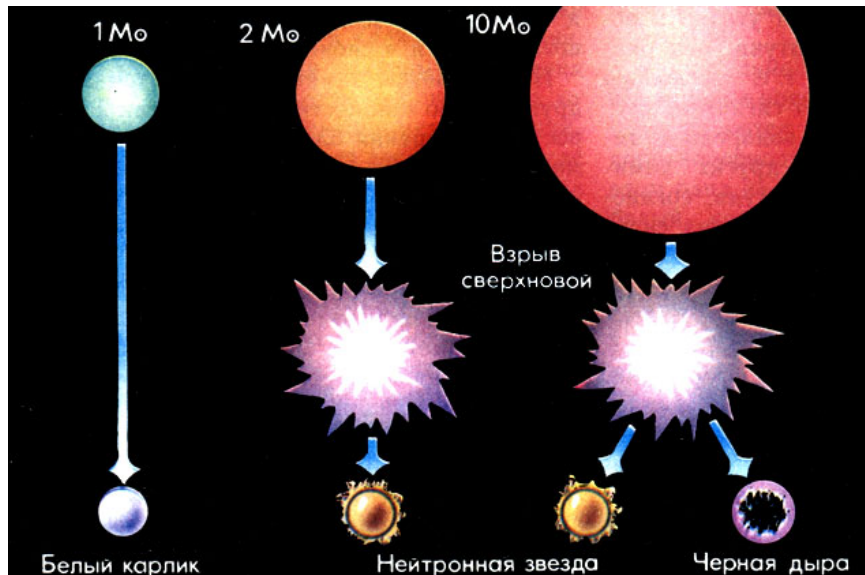
Мощные излучатели гравитационных волн

- Слияние черных дыр или нейтронных звезд
- Взрыв сверхновой
- Большой Взрыв (начало Вселенной, инфляционная стадия расширения)

Волновой шторм в геометрии пространства-времени



Образование нейтронных звезд и черных дыр

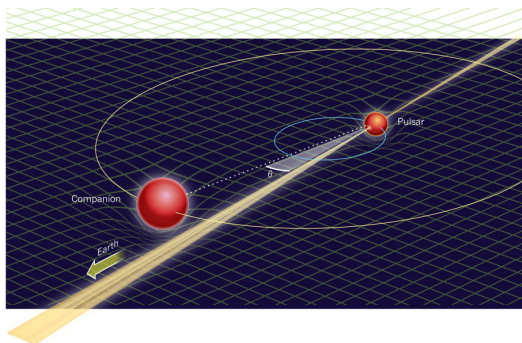


Косвенное подтверждение гравитационного излучения двойная система PSR B1913+16

- Открыта в 1974 году
(Hulse & Taylor)
- Параметры орбиты
меняются со временем
– *двойная система
теряет энергию*

$$M_1 \approx M_2 \approx 1.4 M_{\odot}$$

$$R = 4.8 R_{\odot} \quad T = 7.75 \text{ ч}$$



- Потери энергии в точности отвечают гравитационному излучению
Нобелевская премия по физике за 1993 год

$$\mathcal{P}_{\text{излучение}} = \frac{G}{5c^5} \sum_{ij} \left(\ddot{Q}_{ij} \right)^2 \simeq \frac{6G^4}{c^5 R^5} M_1^2 M_2^2 (M_1 + M_2)$$

Детекторы гравитационных волн: *резонаторы*



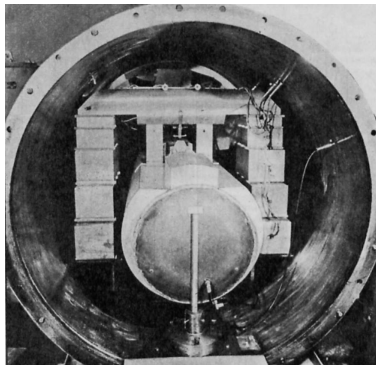
Детектор Вебера

$$h \lesssim 10^{-20} \quad \nu \sim \text{кГц}$$



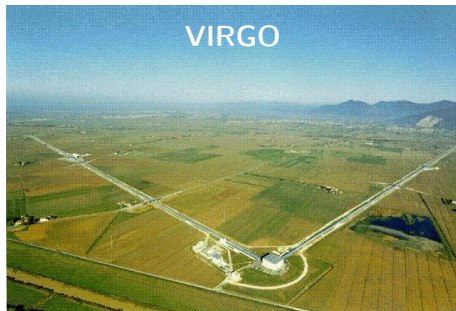
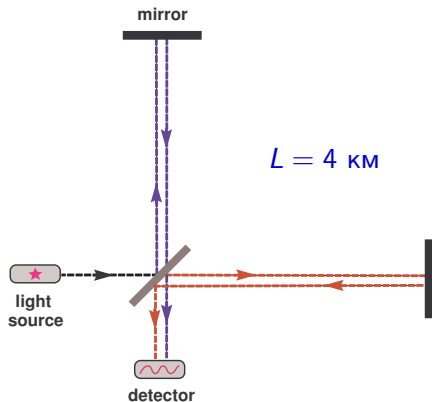
Современный детектор NAUTILUS

Институт теоретической физики, Киев, 1970-е годы



В подвале гостиницы “Феопания” © И. Т. Жук

Детекторы гравитационных волн: *интерферометры*



Идея: М. Е. Герценштейн,
В. И. Пустановит (1962)

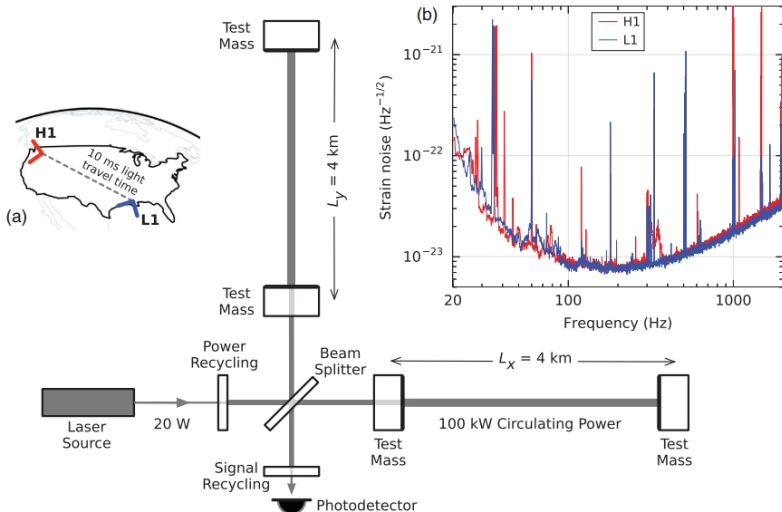
$$\Delta I(t) \propto (L_1 + L_2)h(t)$$

Схема детектора Advanced LIGO

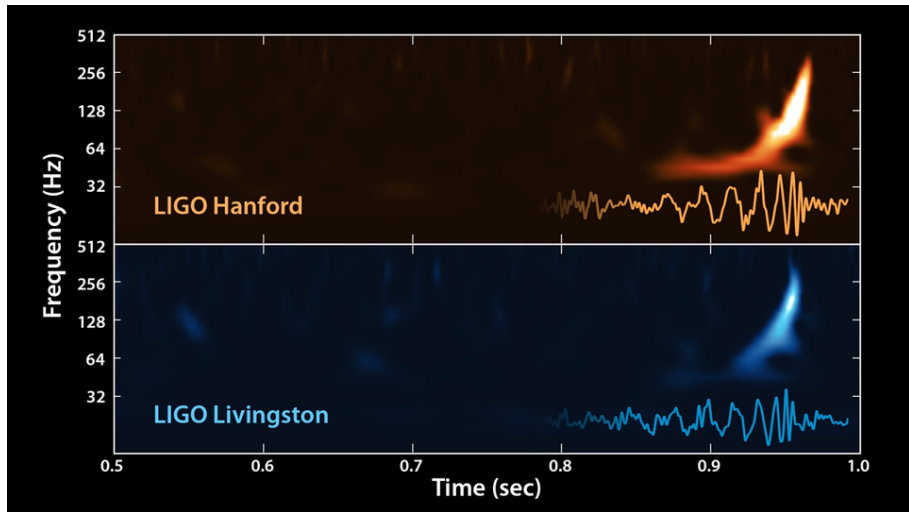
PRL 116, 061102 (2016)

PHYSICAL REVIEW LETTERS

week ending
12 FEBRUARY 2016

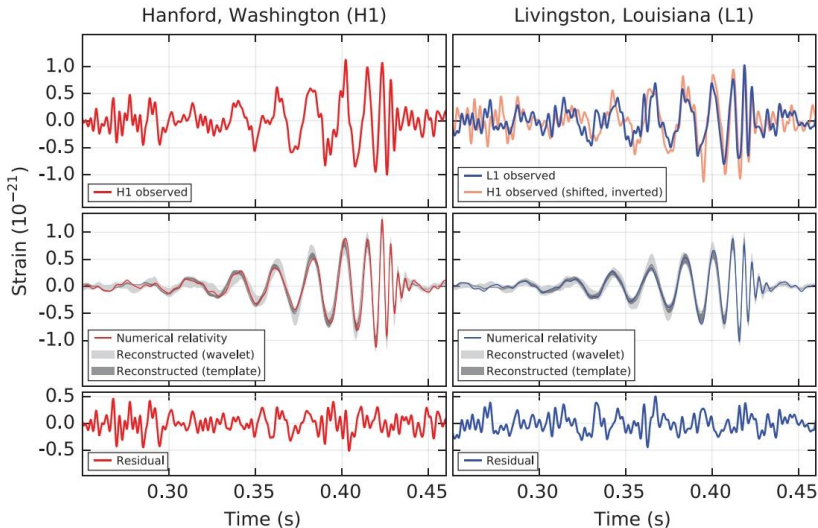


Регистрация сигнала 14 сентября 2015 года

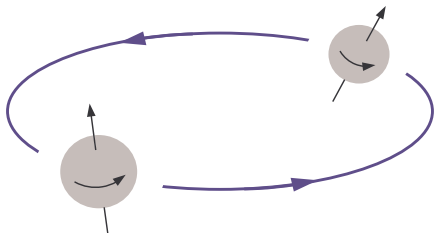


Расшифровка сигнала от 14 сентября 2015 года

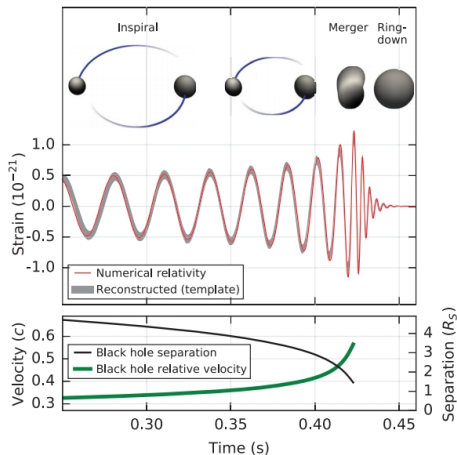
Симбиоз детектирования и компьютерного моделирования



По сигналу определяются параметры объекта



- Массы тел
- Параметры орбиты
- Моменты собственного вращения тел
- Расстояние до системы и ее ориентация



Что это было?

- Слияние двух черных дыр с массами

$$M_1 \approx 29 M_{\odot} \quad M_2 \approx 36 M_{\odot}$$

$$M_{\text{final}} \approx 62 M_{\odot}$$

- На расстоянии ≈ 1.3 млрд световых лет
- Орбитальная частота достигла ≈ 125 обращений в секунду
- В виде гравитационных волн излучилась энергия $\Delta M c^2 \approx 3 M_{\odot} c^2$
- На последней стадии слияния **мощность гравитационного излучения** в 5 раз превысила **мощность электромагнитного излучения** наблюдаемой части Вселенной!

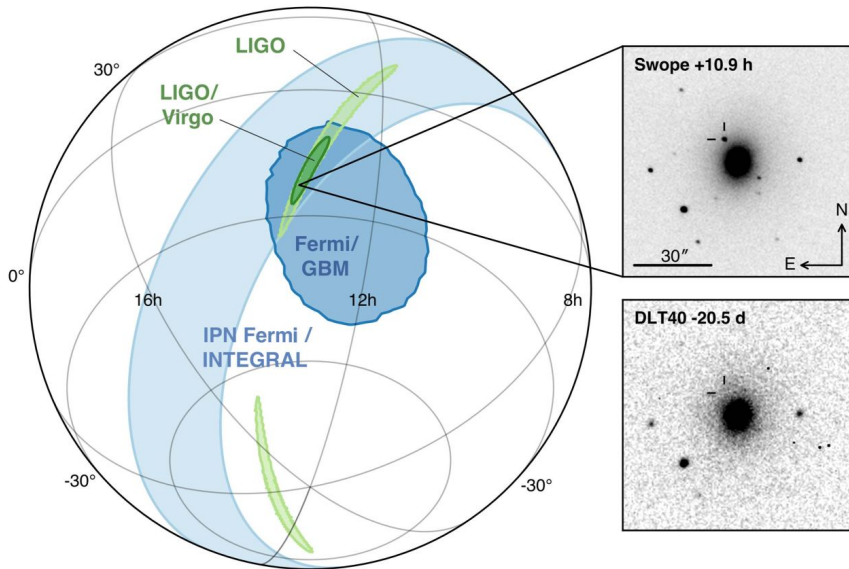
Первое наблюдение такого события



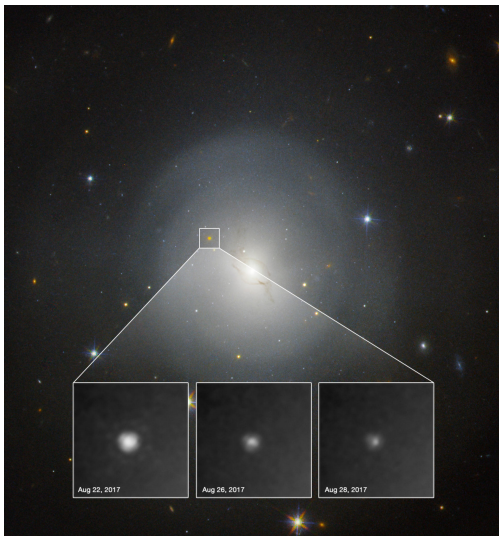
История регистраций

- ❶ 14.09.2014 — LIGO, слияние черных дыр, $36M_{\odot}$ и $29M_{\odot}$,
 $d \approx 1.3$ млрд световых лет
- ❷ 26.12.2015 — LIGO, слияние черных дыр, $14M_{\odot}$ и $8M_{\odot}$,
 $d \approx 1.4$ млрд световых лет
- ❸ 04.01.2017 — LIGO, слияние черных дыр, $32M_{\odot}$ и $19M_{\odot}$,
 $d \approx 3$ млрд световых лет
- ❹ 14.08.2017 — LIGO & Virgo, слияние черных дыр, $31M_{\odot}$ и $25M_{\odot}$,
 $d \approx 1.8$ млрд световых лет
- ❺ 17.08.2017 — LIGO & Virgo, слияние нейтронных звезд с общей
массой $2.82M_{\odot}$, $d \approx 130$ млн световых лет. Зарегистрировано
гамма-излучение от области слияния — Fermi & INTEGRAL.
Около 70 наземных и космических обсерваторий наблюдали
событие в соответствующих волновых диапазонах.

Последняя регистрация



Килоновая (kilonova)



- GW170817, гравитационный сигнал ≈ 100 сек
- GRB 170817A, короткий гамма всплеск ≈ 2 сек, ≈ 1.7 сек после гравитационного сигнала
- AT 2017gfo, оптическое послесвечение, обнаруженное 11 часов спустя в галактике NGC 4993

Нобелевская премия, октябрь 2017



Rainer Weiss



Kip Thorne



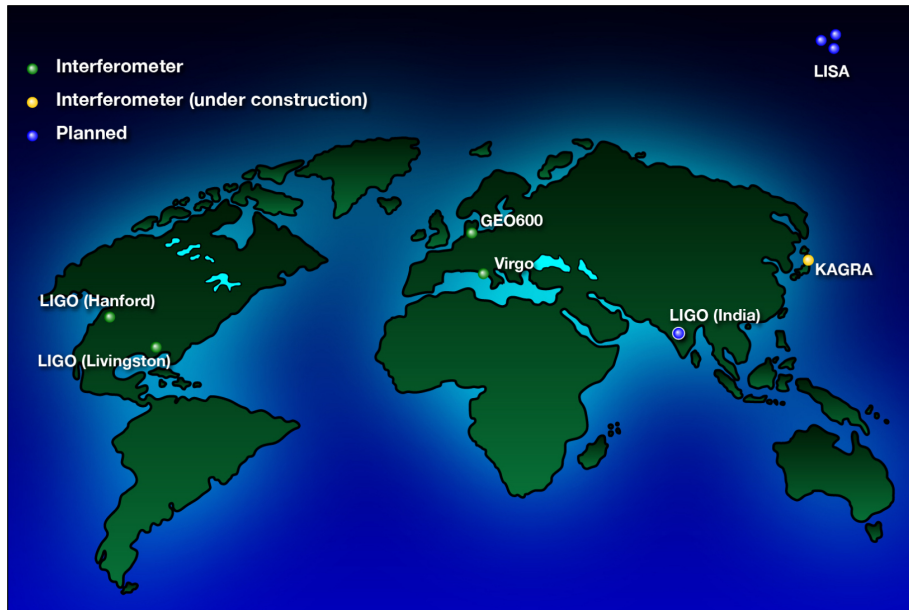
Barry Barish

- 1 Историческая перспектива
 - Электродинамика и теория относительности
 - Относительность и гравитация
- 2 Гравитационные волны
 - Природа гравитационных волн
 - Излучатели гравитационных волн
 - Регистрация гравитационных волн
- 3 Новое окно во Вселенную
 - Эра гравитационно-волновой астрономии


“Окна” наблюдений и открытия

- Большие оптические телескопы
- Радио антенны и сети
- Космические обсерватории в оптическом, инфракрасном, рентгеновском и гамма-диапазоне
- *Гравитационно-волновые обсерватории*
- Квазары (1962)
- Микроволновое фоновое (реликтовое) излучение (1965)
- Пульсары (нейтронные звезды) (1968)
- Рентгеновские двойные системы (нейтронные звезды, черные дыры) (1972)
- Космологически далекие гамма-всплески (1973)
- Ускоренное расширение Вселенной (темная энергия) (1998)
- *Слияние черных дыр* (2015)

Обсерватории гравитационных волн




Коллаборации LIGO и Virgo

1 Австралия 

2 Бразилия 


3 Индия 

4 Канада 


5 Китай 

6 США 


7 Тайвань 

8 Южная Корея 

9 Бельгия 


10 Великобритания 

11 Венгрия 

12 Германия 


13 Испания 


14 Италия 

15 Россия 

1 Италия 

2 Франция 

3 Венгрия 

4 Голландия 

5 Польша 

Область наблюдений LIGO

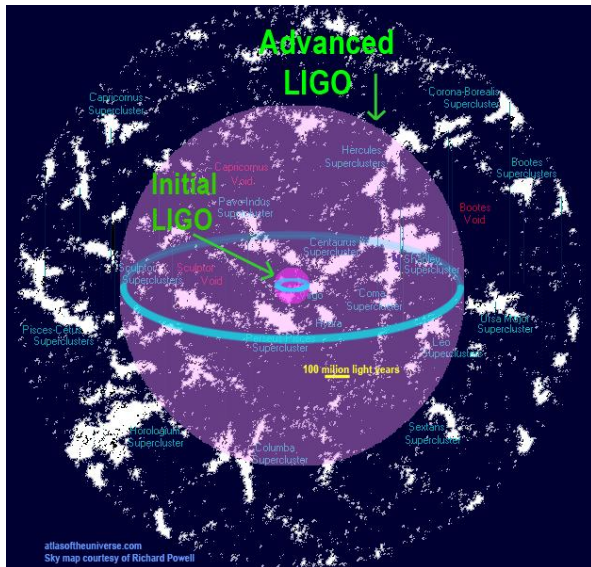
Радиус

$R \simeq 500$ млн

световых лет

для регистрации
гравитационного
излучения от слияния
нейтронных звезд

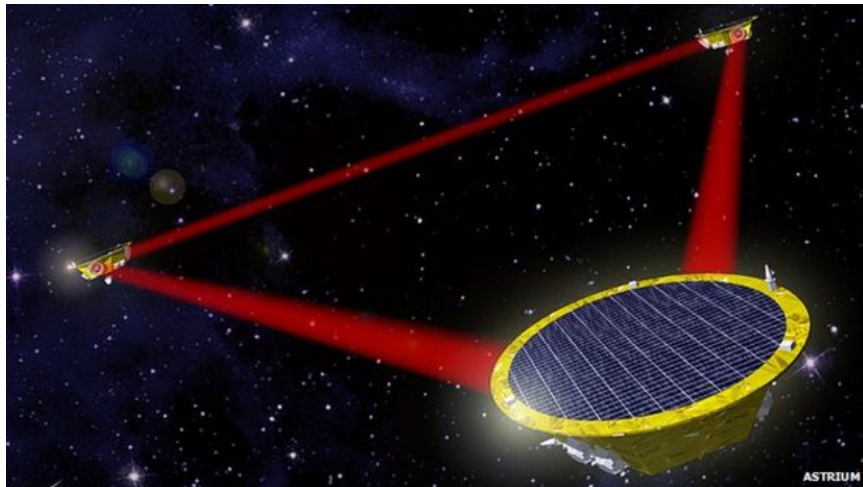
*В ближайшее время
будет увеличен
примерно в три раза*



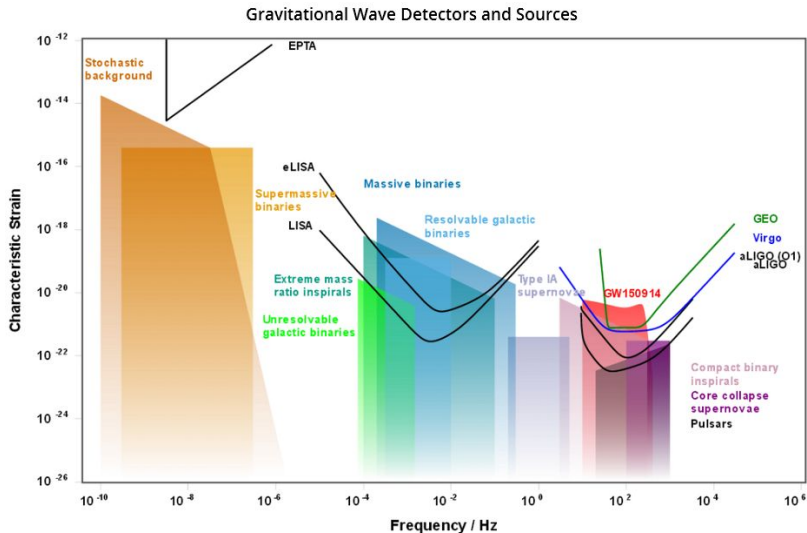
Космический проект eLISA: $L = 1$ млн км

Ориентировочная дата запуска — 2034 год

evolved **L**aser **I**nterferometer **S**pace **A**ntenna



Источники и детекторы гравитационных волн



© Moore, Cole & Berry

<http://rhcole.com/apps/GWplotter>

Пространство-время Вселенной

