



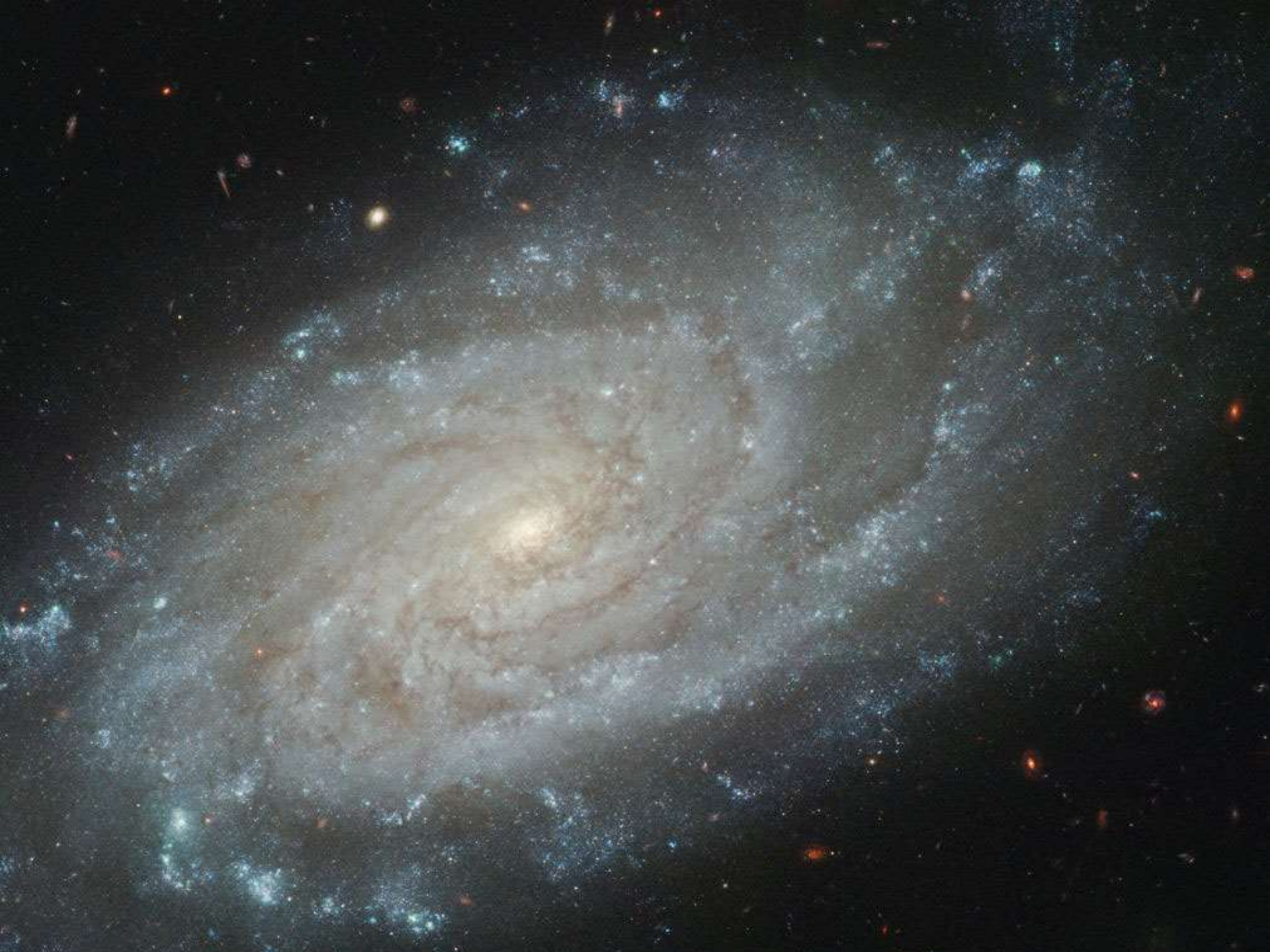
G

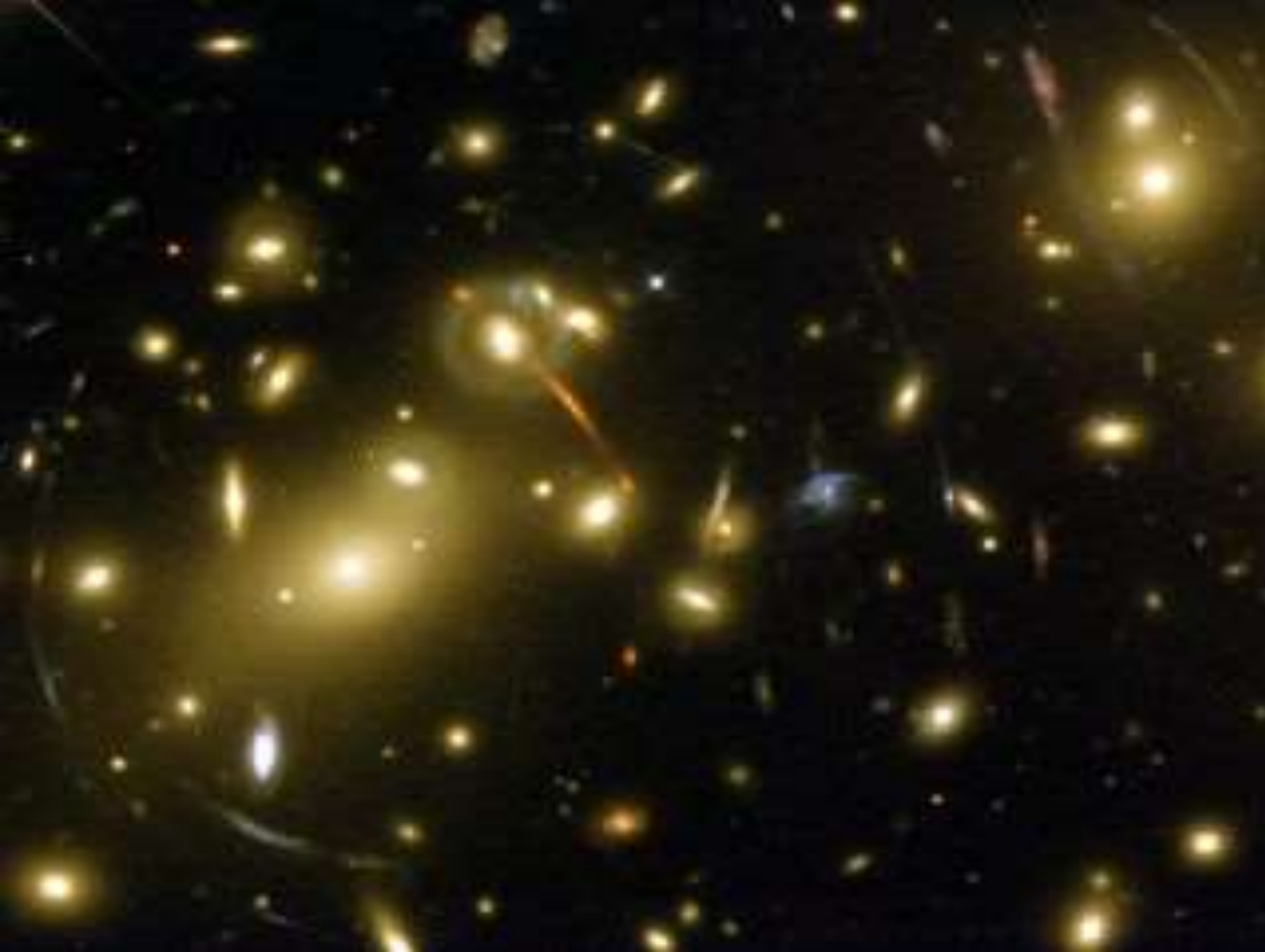
ħ

C

?











Гравитационные волны: открытие, первые результаты, перспективы

В.И. Тельнов
ИЯФ-НГУ

ИАиЭ, Физика холодных атомов
20 декабря 2017

Содержание

- Что такое гравитационные волны, их свойства, оценки величины сигнала, попытки регистрации, косвенное подтверждение ГВ.
- Эксперимент LIGO
- Обнаружение гравитационных волн от слияния черных дыр и нейтронных звезд
- Значение открытия, дальнейшие перспективы

Гравитационное взаимодействие, сходство и отличие от электромагнитного взаимодействия, притяжение-отталкивание, спин переносчика, попытки создания (векторной) теории гравитации, наподобие электродинамики.

Равенство инертной и гравитационной массы, принцип эквивалентности

Искривление пространства (пример вращающегося диска).

«Простые» эффекты в гравитационном поле: падение фотона, изменение хода часов

Идея Эйнштейна о том, что гравитация – есть проявление кривизны пространства, которую создает находящаяся в нем материя

Общей теории относительности Эйнштейна (2015-2016 г)

Основное уравнение Общей теории относительности

В СТО интервал

$$ds^2 = c^2 dt^2 - dx^2 - dy^2 - dz^2 = \eta_{\mu\nu} dx_\mu dx_\nu, \quad \text{где } \eta_{\mu\nu} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 \end{pmatrix}$$

В общем случае (неевклидова пространства)

$$ds^2 = g_{\mu\nu} dx_\mu dx_\nu \quad \text{где } g_{\mu\nu} \text{ характеризует метрику и содержит 10 независимых величин}$$

В 1915 г. Эйнштейн нашел уравнение для $g_{\mu\nu}$ в присутствии материи:

$$R_{\mu\nu} - \frac{R}{2} g_{\mu\nu} + \Lambda g_{\mu\nu} = \frac{8\pi G}{c^4} T_{\mu\nu}$$

В левой части некоторая комбинация характеризующая кривизну пространства, справа тензор энергии-импульса. Это система нелинейных уравнений, которая имеет аналитические решения только в простых случаях (но можно решить на суперкомпьютерах).

Материя определяет метрику пространства, которая определяет движение материи (по геодезическим линиям, т.е. по инерции).

Гравитационное поле в ОТО отсутствует, это проявление кривизны пространства. В слабых полях переходит в закон тяготения Ньютона.

Решения ОТО значительно упрощаются при слабых возмущениях метрики плоского пространства Миньковского. В этом случае пост-Ньютоновском приближении

$$ds^2 = (\eta_{\mu\nu} + h_{\mu\nu}) dx_\mu dx_\nu, \quad \text{где } h_{\mu\nu} \ll 1$$

В этом случае в отсутствие материи уравнение Эйнштейна сводится к волновому уравнению

$$\square h_{\mu\nu} = \left(\frac{\partial^2}{dx^2} + \frac{\partial^2}{dy^2} + \frac{\partial^2}{dz^2} - \frac{\partial^2}{c^2 dt^2} \right) h_{\mu\nu} = 0 \quad (\text{в электродинамике } \square A_\mu = 0 \quad)$$

Решение: $h_{\mu\nu} = E_{\mu\nu} \cos(\omega t - \mathbf{kr})$ (в ЭД $A_\mu = e_\mu \cos(\omega t - \mathbf{kr})$)

Для плоской волны идущей в направлении z базовые поляризационные тензоры (матрицы) имеют вид

$$E_{\mu\nu}^+ = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \quad E_{\mu\nu}^\times = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

Произвольная волна в данной точке есть суперпозиция двух базовых квадрупольных мод

$$E_{\mu\nu}(t) = h_+ E_{\mu\nu}^+ + h_\times E_{\mu\nu}^\times$$

Отсюда метрика пространства

$$h_{ab} = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & h_+ & h_\times & 0 \\ 0 & h_\times & -h_+ & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} = h_+ e_{ab}^+ + h_\times e_{ab}^\times,$$

Пусть распространяется волна типа h_+ и падает на две массы расположенные на окружности в диаметрально противоположных точках на окружности единичного радиуса: $(\cos \theta, \sin \theta)$ и $(-\cos \theta, -\sin \theta)$. Расстояние между ними

$$\begin{aligned} d_+ &= \sqrt{-\sum_{i,k=1,2} g_{ik} \Delta x^i \Delta x^k} = \sqrt{-\sum_{i,k=1,2} (\eta_{ik} + h_+ E_{ik}) \Delta x^i \Delta x^k} \simeq \\ &\simeq 2 - h_+ (\cos^2 \theta - \sin^2 \theta) \simeq 2 - h_+ \cos 2\theta \end{aligned}$$

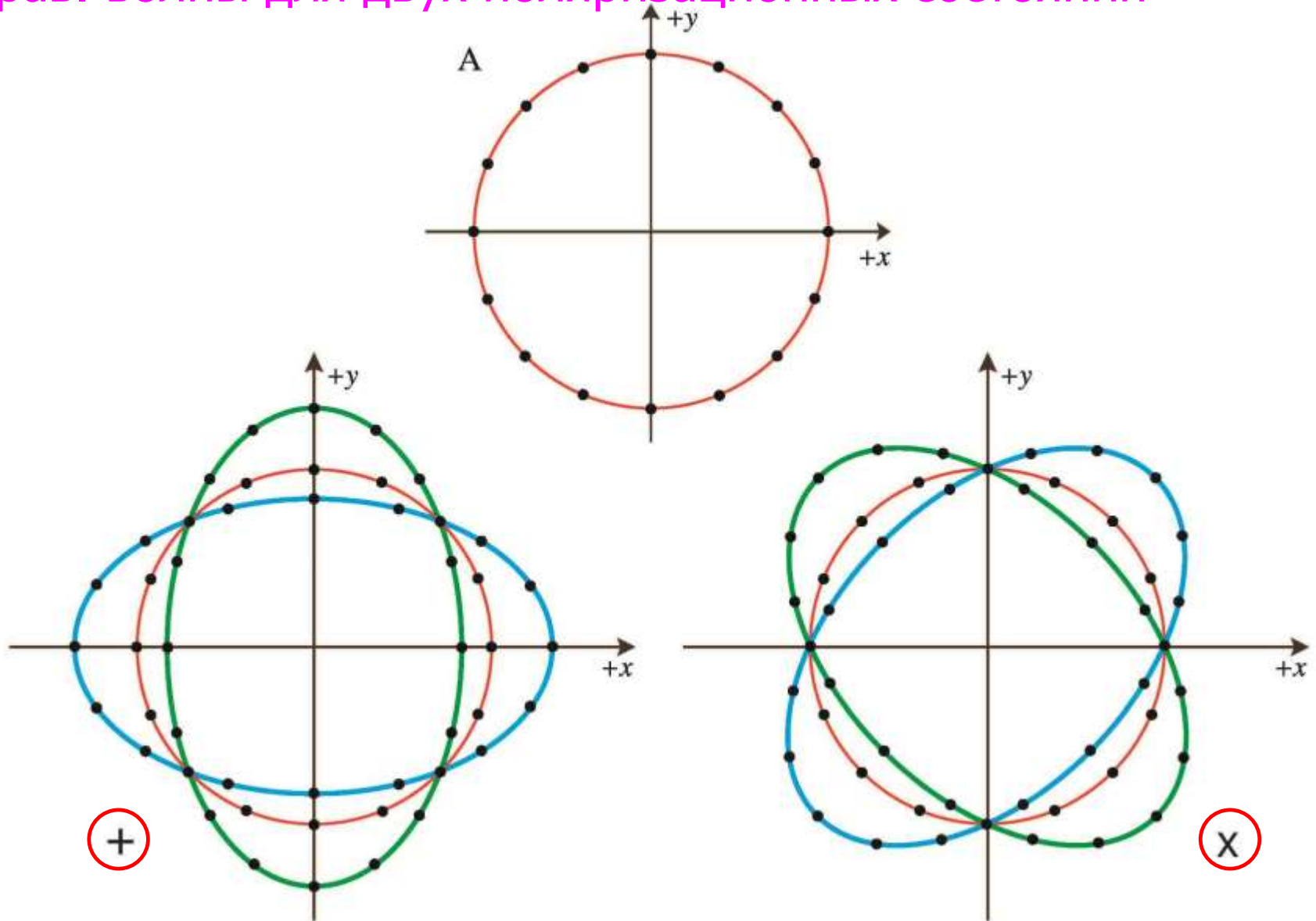
Для двух точек на оси X расстояние меньше на относительную величину $h_+/2$, а для двух точек на оси Y расстояние больше на относ. величину $h_+/2$.

При прохождении волны пространство в данном направлении сжимается и растягивается на величину

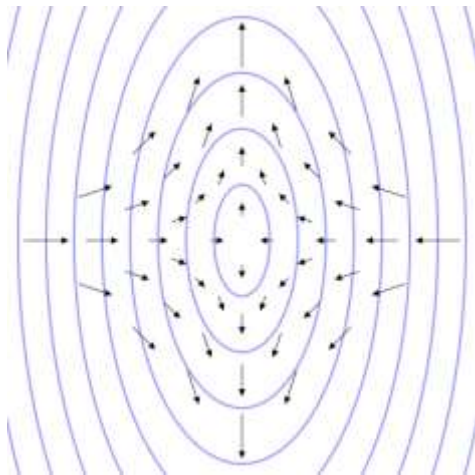
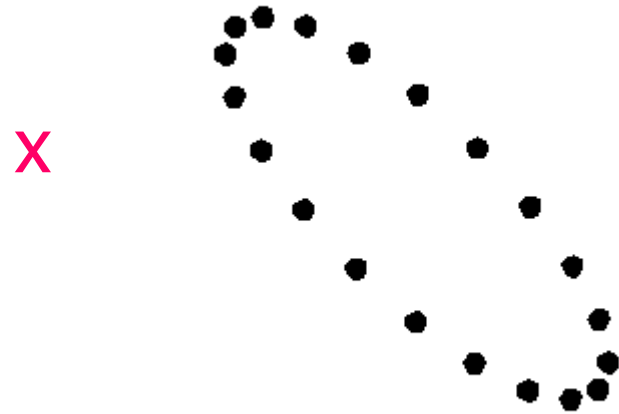
$$\frac{\Delta L}{L} \approx \frac{1}{2} h$$

h - strain (деформация)

Смещение масс на окружности при прохождении грав. волны для двух поляризационных состояний



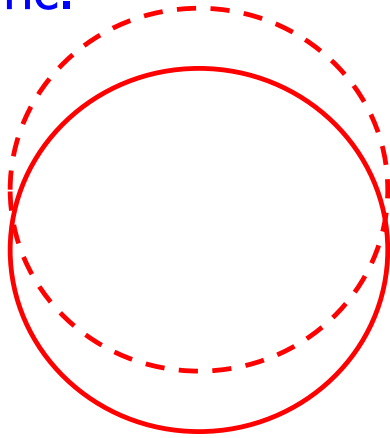
Движение масс, расположенных на окружности, при прохождении грав. волны перпендикулярно плоск. окружности



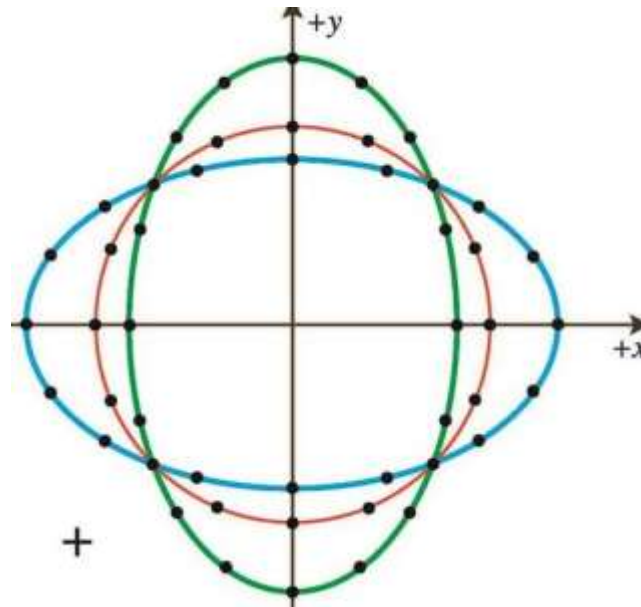
Сложение двух поляризационных состояний (как в ЭМ) может дать циркулярную поляризацию: эллипс поворачивается по- или против часовой стрелки.

показаны направления
смещения частиц на плоскости

Заметим, в электромагнитной волне заряды, расположенные на окружности, смещаются плоско-поляризованной волной синхронно относительно нейтральных частиц, а в грав. волне нет нейтральных частиц, здесь измеримы только относительные смещения (приливные смещения): круг превращается в эллипс.



ЭМ волна



грав. волна

Излучение гравитационных волн

Ввиду пропорциональности гравитационного «заряда» (грав. массы) и инертной массы дипольное и магнито-дипольные излучения грав. волн отсутствуют. Основное излучение квадрупольное.

Стат. поле электрического квадрупольного $\varphi \sim \frac{eR^2}{r^3}$, где R – размер системы.

При переходе к волновой зоне

$$\varphi \sim \frac{eR^2}{r^3} \Rightarrow \frac{eR^2}{\lambda^2 r} \sim \frac{e\omega^2 R^2}{c^2 r} \sim \frac{\ddot{Q}}{c^2 r}, \quad Q \sim \sum e x_i x_j \text{ - эл. квадрупольный момент}$$

Для гравитационного поля роль потенциала выполняют безразмерные поля, элементы метрики пространства,

$$h \sim \left[\frac{\varphi}{c^2} \right] \sim \frac{\ddot{Q}}{c^4 r}, \quad \text{где } Q_{\alpha\beta} = \int \rho (3x_\alpha x_\beta - \delta_{\alpha\beta} r^2) dV$$

-квадрупольный момент масс

Для двух тел с массами m , скрепленных стержнем длины a и вращаются с угловой скоростью ω относительно растяжение пространства на расстоянии r

$$h \approx \frac{2G}{c^4} \frac{ma^2 \omega^2}{r} \cos 2\omega t \approx \frac{8G}{c^4} \frac{E_{\text{кин}}}{r} \sim \left(\frac{r_s}{r} \right) \left(\frac{v^2}{c^2} \right), \quad (1)$$

где $r_s = \frac{2Gm}{c^2}$ – радиус Шварцшильда массы m .

Для двух близко расположенных черных дыр $v \approx c$ и $h \sim \frac{r_s}{r}$

Для двойной системы звезд (черных дыр) вращающихся на расстоянии a

$$h_+ = -\frac{1}{r} \frac{G^2}{c^4} \frac{2m_1 m_2}{a} (1 + \cos^2 \theta) \cos 2\omega t \quad (2)$$

$$h_- = -\frac{1}{r} \frac{G^2}{c^4} \frac{4m_1 m_2}{a} (\cos \theta) \sin 2\omega t$$

сводится к (1) с $E_{\text{кин}} \sim Gm_1 m_2 / a$

$$\omega = \sqrt{G(m_1 + m_2) / a^3}$$

θ - угол относительно плоскости вращения

Мощность излучения

(А. Эйнштейн, 1916-1918)
$$P = \frac{G}{45c^2} \ddot{Q}^2 \quad \left(Flux = \frac{c^3}{16\pi G} \langle (\dot{h}_+)^2 + (\dot{h}_\times)^2 \rangle \propto \ddot{Q}^2 \right)$$

Для двух тел скрепленных стержнем

$$P = \frac{16Gm^2\omega^6 a^4}{5c^5} \sim L_0 \left(\frac{r_s}{a} \right)^2 \left(\frac{v}{c} \right)^4, \quad L_0 = \frac{c^5}{G} \approx 10^{59} \text{ эрг/с}$$

Для двойной звездной (черных дыр) системы мощность г.в.

$$P = \frac{dE}{dt} = -\frac{32 G^4 (m_1 m_2)^2 (m_1 + m_2)}{5 c^5 a^5}$$

Полная излученная энергия при слиянии ч.д. $E_{\text{tot}} \sim mc^2$

Максимальная гравитационная светимость при слиянии черных дыр

$$P \sim \frac{G^4 m^5}{c^5 r_s^5} \sim \frac{c^5}{G} \sim 10^{59} \text{ эрг/с} \sim 10^{25} P_{\text{Солнца}}$$

(не зависит от массы, чем слабее взаимодействие (G), тем больше пиковая мощность)

Пример 1: Две массы по 1 т скреплены стержнем длиной 2 м и вращаются с частотой 1 кГц. Амплитуда гравитационной волны будет $h = -2.6 \cdot 10^{-33} / r$ [м]. Наблюдать волны нужно на расстояниях больше длины волны, т.е. $r > \lambda \approx 300$ км, тогда $h \approx 10^{-38}$, $P \sim 3 \cdot 10^{-24}$ Вт.

Пример 2: Земля движется вокруг Солнца.

При наблюдении при $\theta = \pi/2$ (в плоскости): $h = -1.7 \cdot 10^{-10}$ [м] /r. Наблюдать волны нужно на расстояниях больше длины волны, т.е. $r > \lambda \approx cT$ (световой год) = 10^{16} м, тогда $h \approx 10^{-26}$. Мощность излучения 200 Вт.

Пример 3. Двойные черные дыры

$$h \approx \frac{G^2}{c^4} \frac{m_1 m_2}{a} \frac{1}{r} = \frac{r_{s,1} r_{s,2}}{4a} \frac{1}{r}, \quad r_s = \frac{2GM}{c^2} \text{ — радиус Шварцшильда}$$

При слиянии черных дыр $a \sim 2r_s$ и $h \sim \frac{r_s}{8r}$

Для ч.д. с $m = 30 M_{\text{солн}}$ $r_s \sim 90$ км, тогда при $r = 1.3 \cdot 10^9$ св. лет $h \sim 10^{-21}$
(оценка близка к сигналу, измеренному на LIGO)

Нахождение массы двойной ЧД и расстояния

chirp mass

$$\mathcal{M}_c = \frac{(m_1 m_2)^{3/5}}{(m_1 + m_2)^{1/5}}$$

scaling amplitude

$$h_o = 4 \frac{G}{c^2} \frac{\mathcal{M}_c}{D} \left(\frac{G}{c^3} \pi f \mathcal{M}_c \right)^{2/3}$$

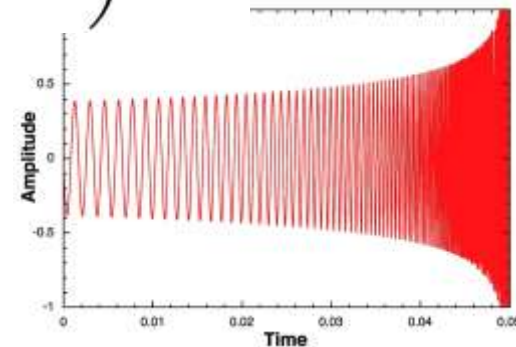
f – частота
D – расстояние

chirp

$$\dot{f} = \frac{96}{5} \frac{c^3}{G \mathcal{M}_c} \left(\frac{G}{c^3} \pi f \mathcal{M}_c \right)^{8/3}$$

$$h(t) = h_o \cos \phi(t) = h_o \cos \left(2\pi f t + \pi \dot{f} t^2 + \phi_o \right)$$

Из трех измеряемых величин: h_o , f , f' находятся массы черных дыр и расстояние до них



$$\mathcal{M}_c = \frac{c^3}{G} \left[\frac{5}{96} \pi^{-8/3} f^{-11/3} \dot{f} \right]^{3/5}$$

$$D = \frac{5}{96\pi^2} \frac{c}{h_o} \frac{\dot{f}}{f^3}$$

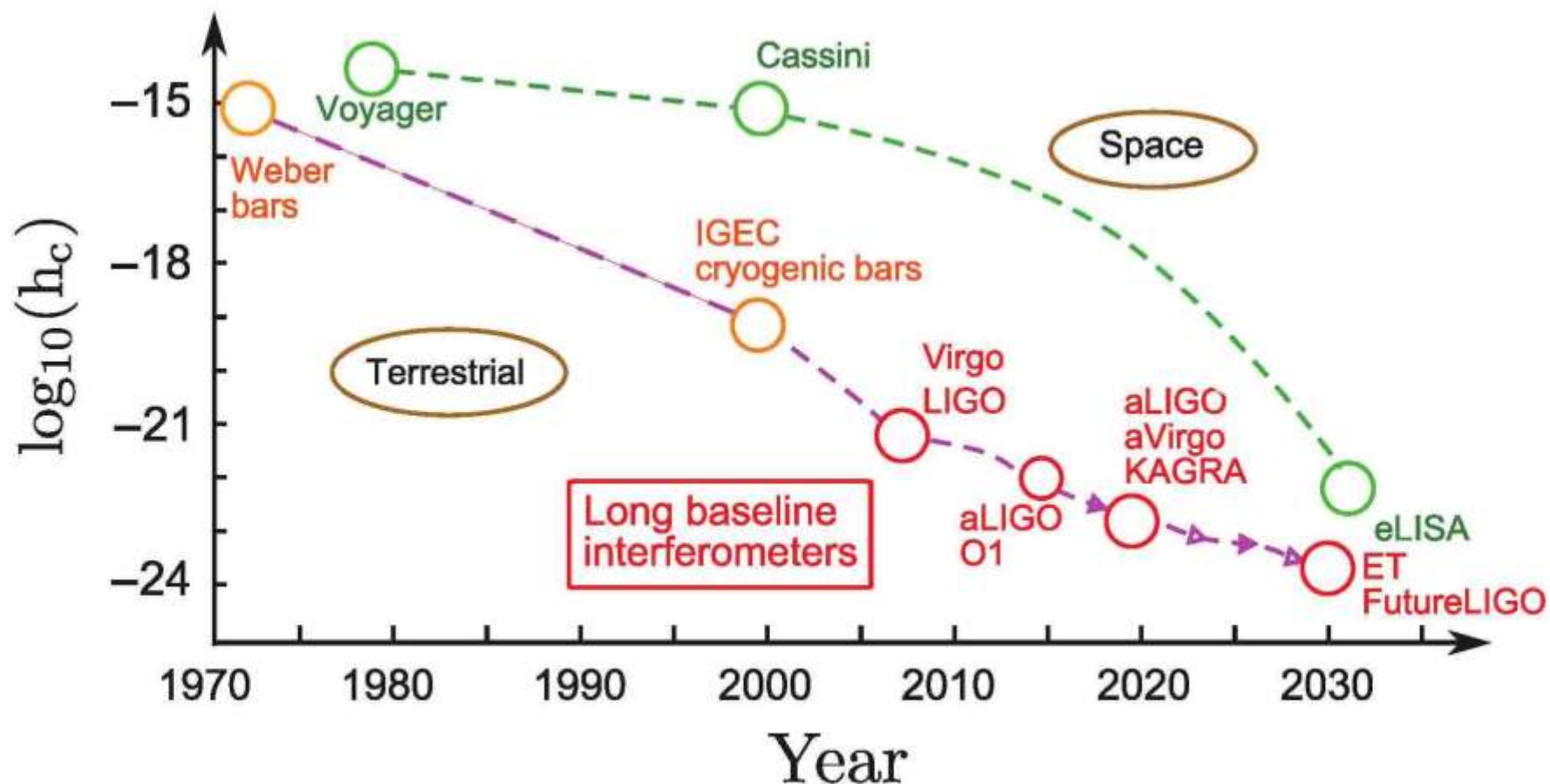
Первая попытка регистрации гравитационные волны

Джозеф Вебер из Мэрилендского университета сконструировал первый резонансный детектор: цельный двухметровый алюминиевый цилиндр с чувствительными пьезодатчиками по бокам и хорошей виброизоляцией. При прохождении гравитационной волны цилиндр должен резонировать в такт искажениям пространства-времени, что и должны зарегистрировать датчики. Вебер построил несколько таких детекторов, и в 1969 году, сообщил, что зарегистрировал «звучание гравитационных волн» сразу в нескольких детекторах, разнесенных друг от друга на два километра. Заявленная им амплитуда колебаний оказалась неправдоподобно большой, порядка $h \sim 10^{-16}$, то есть в миллион раз больше типичного ожидаемого значения. Другие экспериментальные группы, с похожими детекторами, не смогли в дальнейшем поймать ни одного подобного сигнала.

Однако Вебер дал толчок всей этой области исследований.



Прогресс в развитии гравитационных детекторов



За 45 лет чувствительность наземных ГВ детекторов улучшилась на **7 порядков**. В космических экспериментах (Voyager and Cassini) использовался эффект Доплера. С оптическим интерферометром будет намного лучше.

Непрямая регистрация гравитационных волн

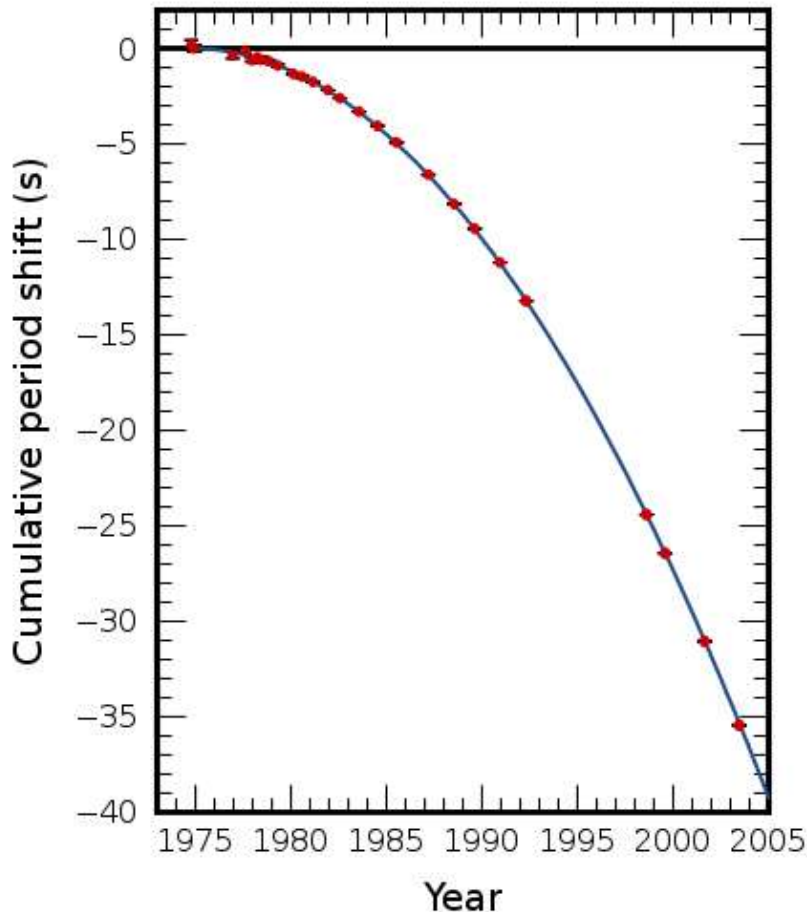
1974 г открыт двойной пульсар, с периодом 7.75 часа. Период уменьшался на 76.6 микросекунд в год в согласии с гравитационным излучением: согласие 0.997 ± 0.002 .

Mass of companion: $1.387 M_{\odot}$

Total mass of the system: $2.828378(7) M_{\odot}$

Semi-major axis: $\sim 2 \cdot 10^6$ km

$P_{\text{gr}} = 7.35 \times 10^{24}$ Вт



Nobel Prize on Physics 1993



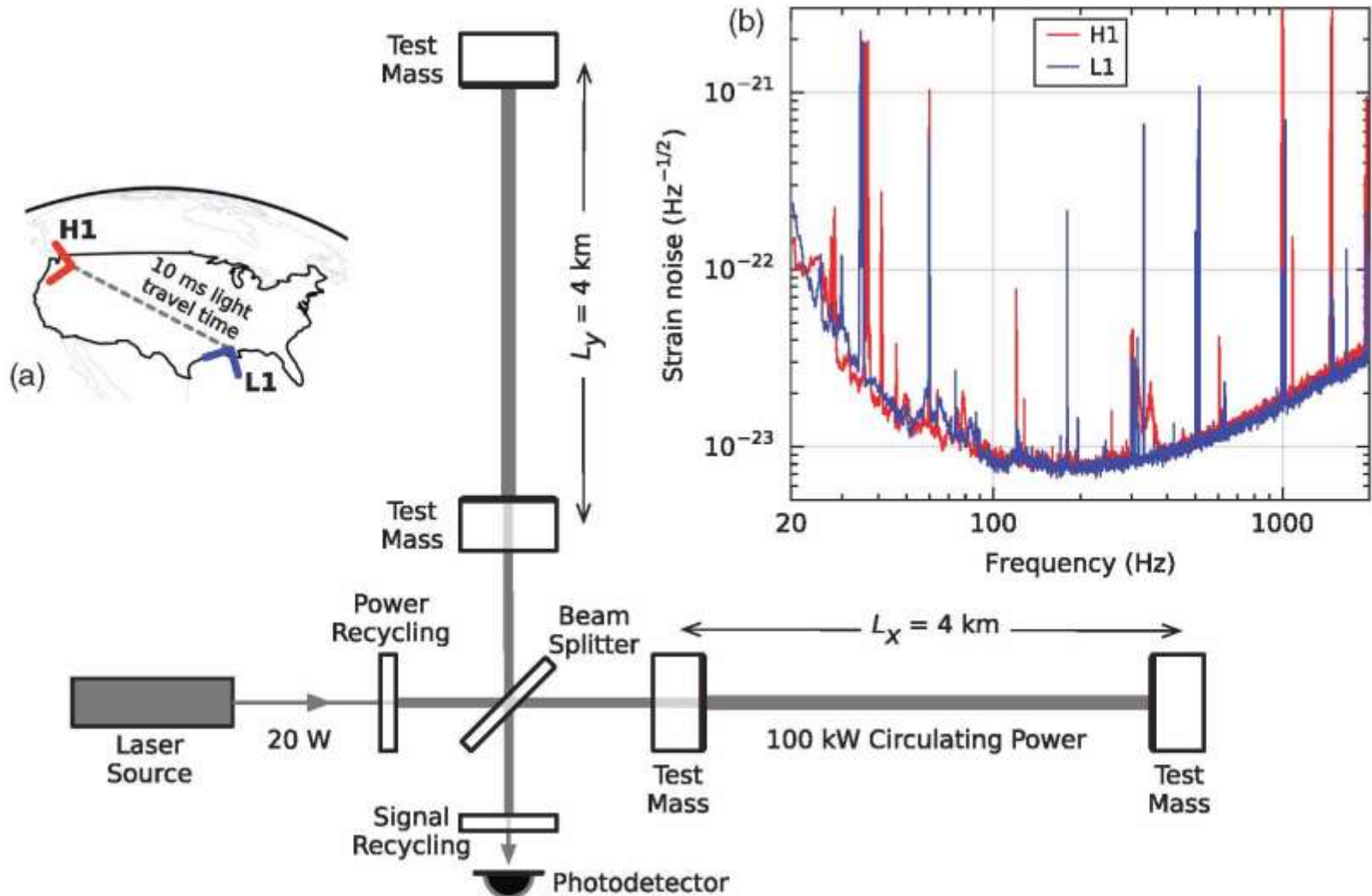
Russell Hulse



Joseph H. Taylor Jr.

Оптические интерферометры

(Advanced)LIGO- два 4 км интерферометра на расстоянии 3000 км



Идея М.Герценштейн, В.Пустовойт (1962).
R.Drever добавил резонатор Фабри-Перо (1980)



LIGO Livingston
Observatory



LIGO Hanford
Observatory

Чувствительность LIGO

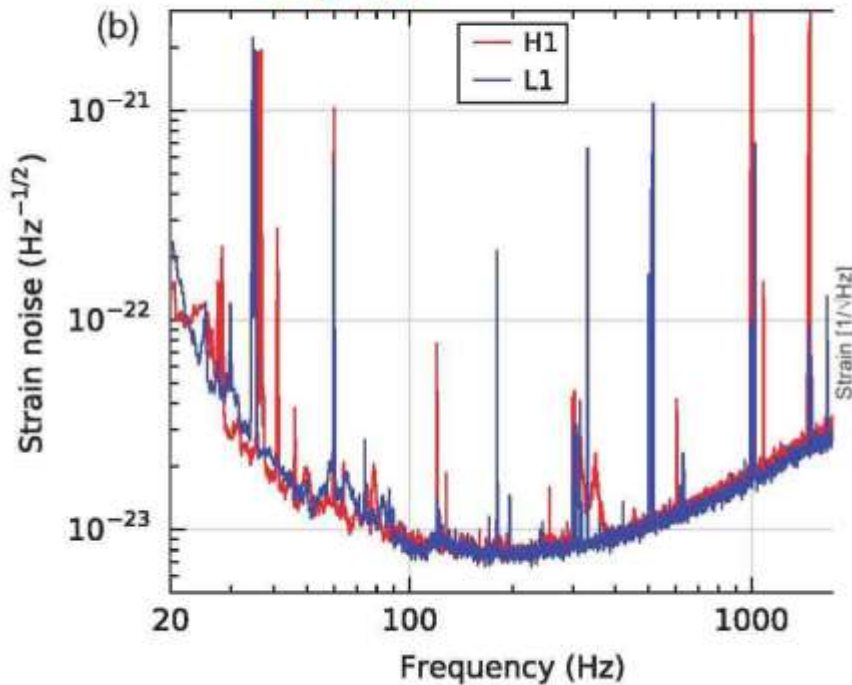
На графиках приводится чувствительность h_f ($\text{Hz}^{-1/2}$).
Чувствительность величине strain (деформация пр-ва)

$$\sigma(h) = \sigma(h_f) \sqrt{\Delta f (\text{Hz})} = \frac{\sigma(h_f)}{\sqrt{\tau (\text{c})}} \quad \tau - \text{время измерения}$$

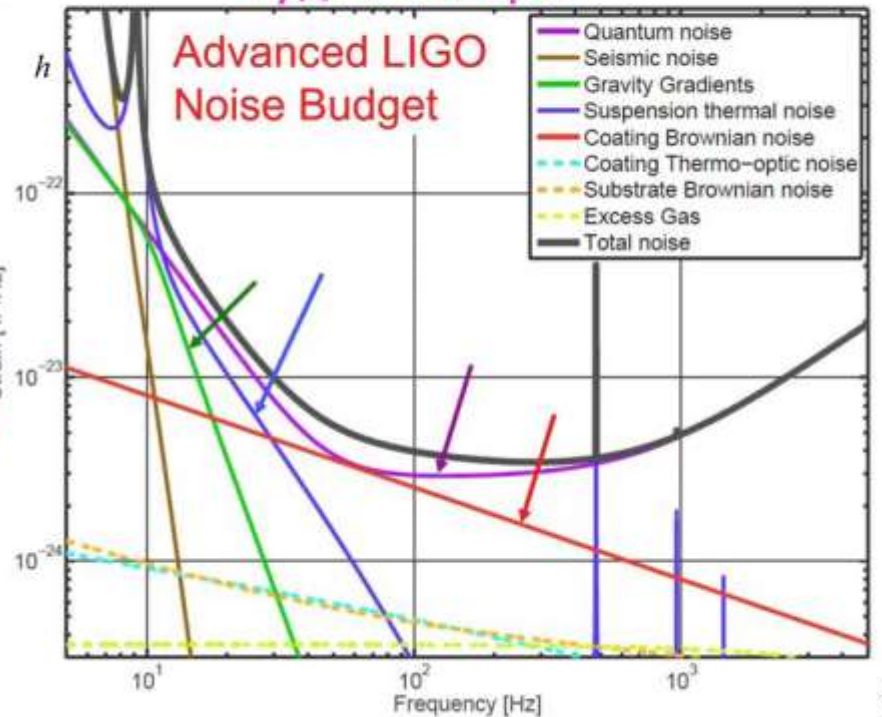
Так при $\tau = 10^{-2}$ с

$$\sigma(h) \approx \text{при } f \sim 100 \text{ Hz} \Rightarrow \Delta L \approx \frac{h}{2} L \approx \frac{8 \cdot 10^{-24}}{2} * 10 * 4 \cdot 10^5 \sim \underline{1.6 \cdot 10^{-17} \text{ см}}$$

сейчас



будет вскоре



Точность измерения фазы

$$\delta h \approx \frac{\lambda}{L \cdot N} \Delta\phi \approx 3 \cdot 10^{-24} \text{ Hz}^{-1/2}$$

$$\lambda = 1064 \text{ nm}$$

$$L = 4000 \text{ m}$$

$N \approx 200 - 300$ - число проходов в резонаторе

+

$$\Delta\phi \sim 2 \cdot 10^{-12} \text{ Hz}^{-1/2} \text{ rad}$$

Источники шумов

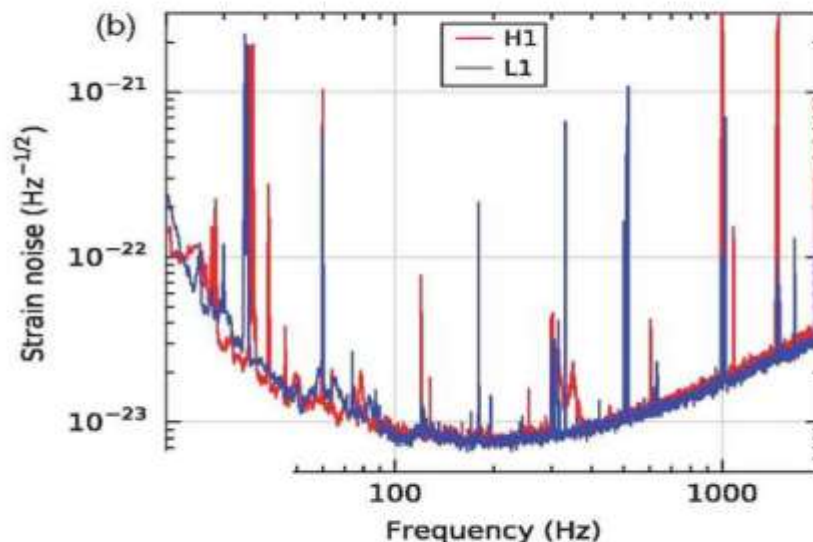
- Сейсмика
- флюктуации амплитуды и частоты
- shot-noise
- радиационное давление
- остаточный газ
- квантовые эффекты
- и др.

Дробовой шум

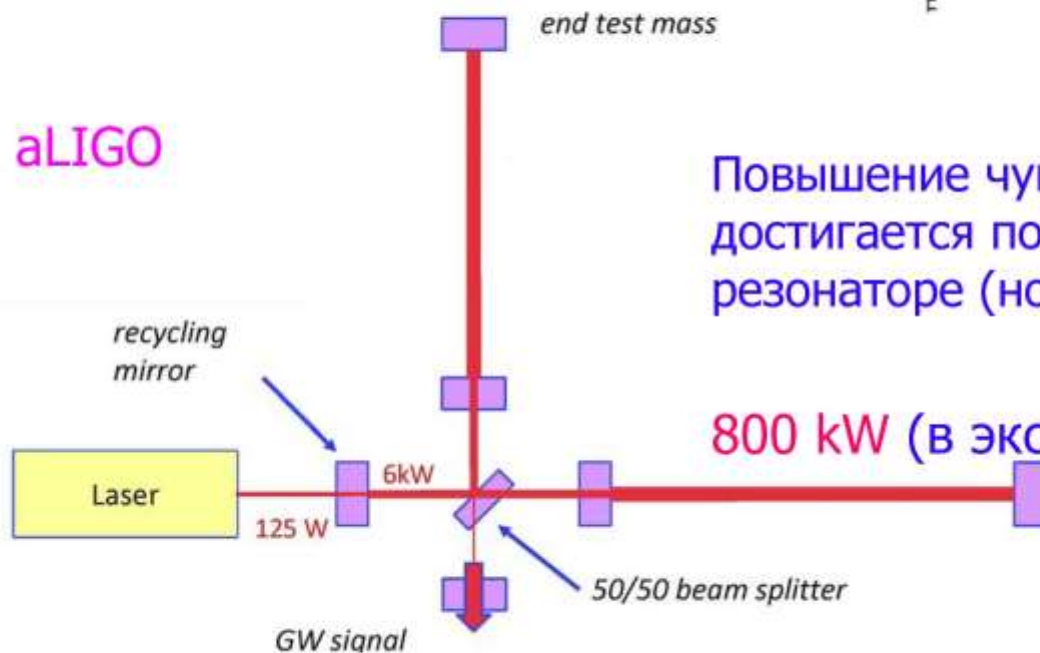
Дискретный (квантовый) характер волны в резонаторе ограничивает точность определения фазы

$$\delta\phi \approx \frac{1}{\sqrt{\dot{n}\tau}}$$

Для частот выше 300 Гц это эффект определяет чувствительность LIGO



aLIGO



Повышение чувствительности достигается повышением мощности в резонаторе (но тогда давление, перегрев)

800 kW (в эксперименте было 100 kW)

(Стандартный) квантовый предел

Пусть имеется масса M , с какой точностью можно измерить ее координату за время τ ?

Если в момент $t=0$ мы измерили координату с точностью Δx , то при этом (из соотношения неопределенности Гейзенберга $\Delta p \Delta x \geq \hbar / 2$) телу была (неумышленно) сообщена скорость

$$v \approx \frac{\hbar}{2m\Delta x}$$

Через время τ тело сместится на полное расстояние

$$\Delta x_{\text{tot}}^2 \approx (\Delta x)^2 + (v\tau)^2 = (\Delta x)^2 + \left(\frac{\hbar\tau}{2m\Delta x} \right)^2$$

Минимум этого выражения $\Delta x_{\text{tot}}^2 \approx \frac{\hbar\tau}{m}$

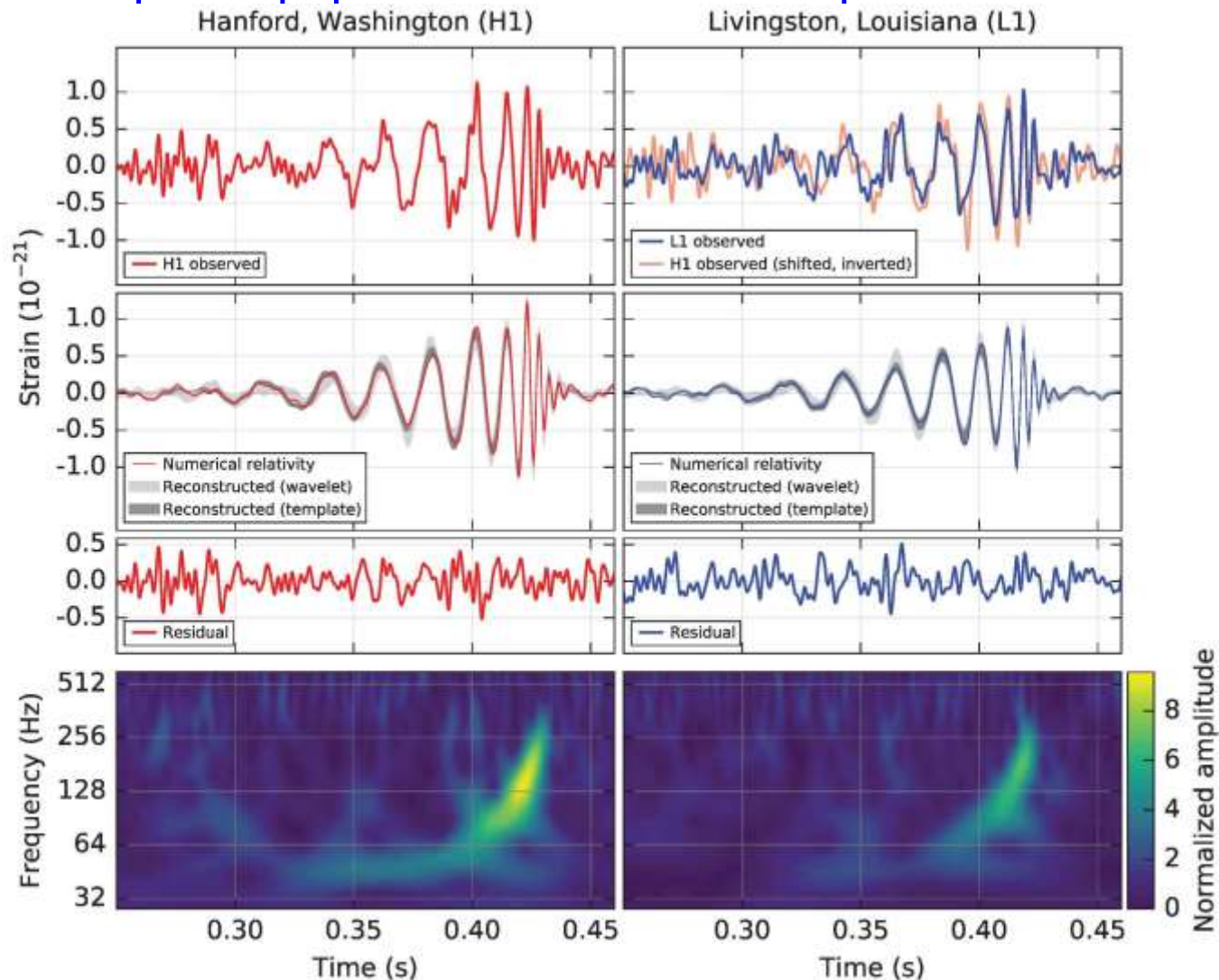
В LIGO $m=40$ кг, при характерном времени измерения 10^{-2} с получаем

$$\underline{\Delta x \sim 1.5 \cdot 10^{-17} \text{ см}}$$

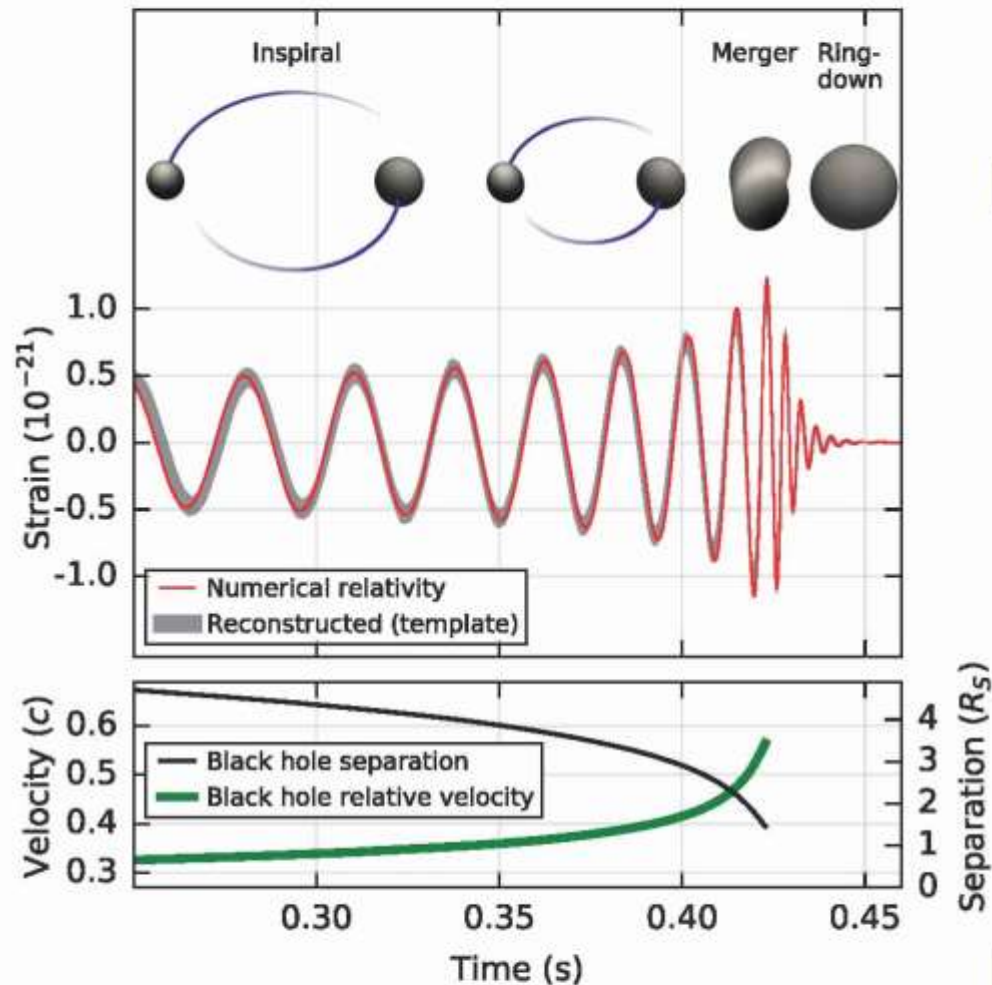
что и практически достигнуто в aLIGO и есть идеи как обойти этот предел

Первое наблюдение гравитационных волн

14 сентября на Землю пришел сигнал от самого мощного события во Вселенной за все время наблюдений. Оба детектора LIGO в Hanford и Livingston зарегистрировали сигналы с интервалом 7 миллисекунд.



Форма сигнала хорошо согласуется со слиянием двух черных дыр



$$m_1 = (36 \pm 4)M_{\odot}, \quad m_2 = (29 \pm 4)M_{\odot},$$

$$m_{\text{final}} = (62 \pm 4)M_{\odot}$$

В г.в. излучение ушло

$$\Delta E = (3 \pm 0.5)M_{\odot}c^2$$

Пиковая мощность составила

$$(3.6 \pm 0.5) \times 10^{56} \text{ эрг/с}$$

что эквивалентно $200M_{\odot}c^2 / \text{с}$

в 50 раз больше, чем мощность излучения всех звезд в видимой части Вселенной.

Событие произошло на расстоянии **1.3 млрд. световых лет**

Вероятность, что это ложное событие $1/200000$ лет (5.1σ)

Образованная ч.д. имеет спин 0.7 от максимально возможного для данной массы

На сегодня зарегистрировано 5 событий слияния черных дыр

Дата	S/N	расстояние 10^9 св. лет	Начальные массы/ M_{\odot}	Конечная массы/ M_{\odot}	Энергия ГВ в ед. $M_{\odot} c^2$
14.09.2015	24	~ 1.3	36/29	62	3
26.12.2015	13	~ 1.4	14/7	21	1
04.01.2017	13	~ 2.9	31/19	49	2
08.06.2017	13	~ 1.1	14/7	20	0.8
14.08.2017	18	~ 1.6	32/25	53	2.7

Черные дыры

- Еще в 18 веке (Michel, Laplace) подняли вопрос у возможности объектов, из которых ничего не может вылететь ввиду гравитации.
- В 1915 г Эйнштейн разработал теорию тяготения, где гравитация действует на свет.
- В 1916 Швардшильд (используя ОТО) нашел решение, показав, что “Черные дыры” существуют (термин ЧД ввел J. Whiller в 1967 году).
- В 1939 г. Оппенгеймер (+Толман, Волков) показали, что звезды при $M > 3 M_{\odot}$ коллапсирует в Ч.Д.
- Первые кандидаты на ЧД появились в 1990х годах, в системе двойных звезд наблюдались темные объекты с массой $M > 3 M_{\odot}$. Затем было обнаружено, что в центрах большинства галактик сидят гигантские ЧД с $M \sim 10^6 - 10^{10} M_{\odot}$! В центре нашей Галактики Млечный путь также находится ЧД с массой $M = 4.3 \cdot 10^6 M_{\odot}$.

Звезды → ЧД

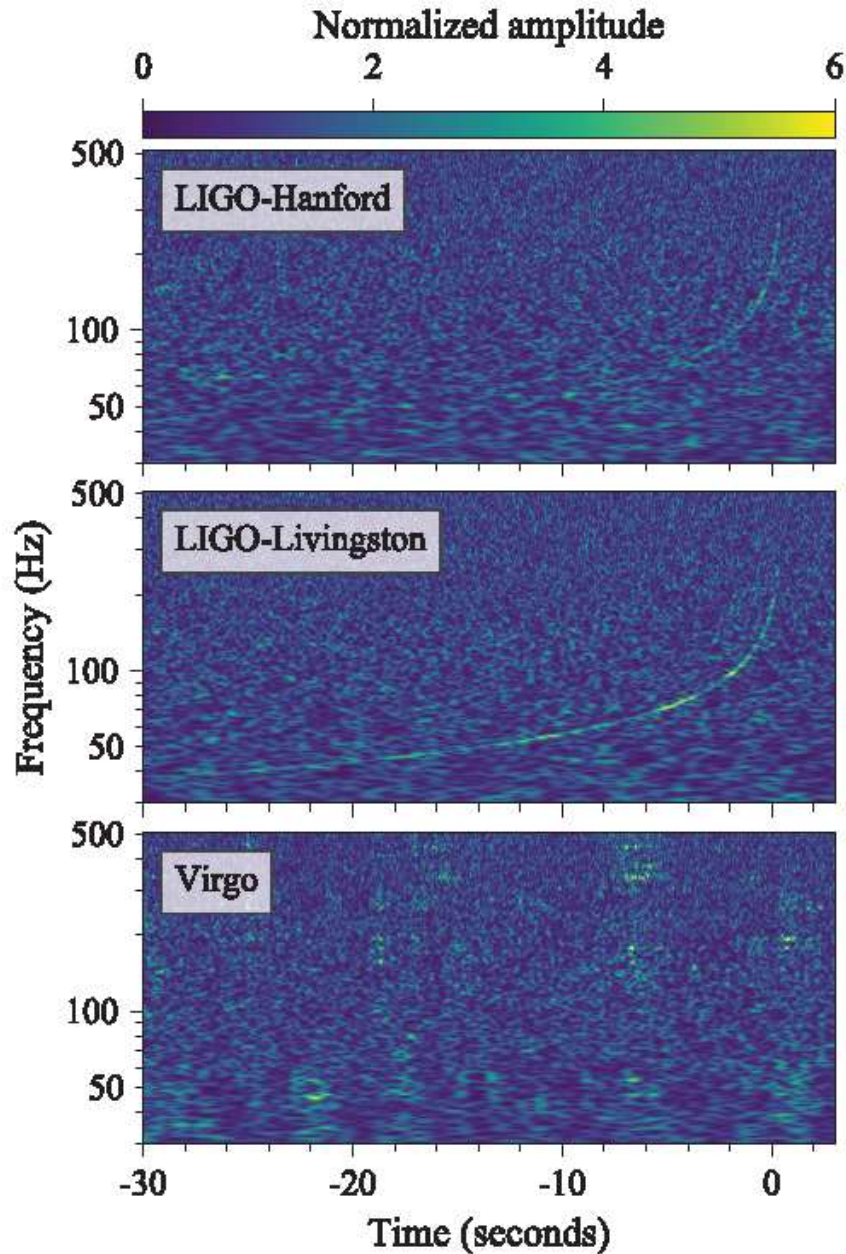
Существует много звезд с массами больше $3 M_{\odot}$ (макс. $265 M_{\odot}$).

Казалось бы в конце эволюции они должны коллапсировать. Однако, реально в конце горения звезды (из-за низкой теплопроводности) сбрасывают внешнюю оболочку, и в современной вселенной макс. масса образующихся ЧД (в двойных системах) не превышает $10-15 M_{\odot}$ ($20-25 M_{\odot}$ считается верхним пределом). Наблюдение (одновременно с ГВ) сразу двух ЧД с массами $30 M_{\odot}$ является важным открытием.

17.08.2017

Первая регистрация слияния нейтронных звезд

Регистрация тремя интерферометрами
(2 в США, 1 в Европе)



Параметры нейтронных звезд

GW170817 FACTSHEET

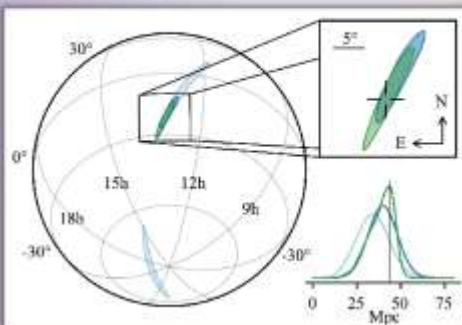


observed by	H, L, V	inferred duration from 30 Hz to 2048 Hz**	~ 60 s
source type	binary neutron star (NS)	inferred # of GW cycles from 30 Hz to 2048 Hz**	~ 3000
date	17 August 2017	initial astronomer alert latency*	27 min
time of merger	12:41:04 UTC	HLV sky map alert latency*	5 hrs 14 min
signal-to-noise ratio	32.4	HLV sky area [†]	28 deg ²
false alarm rate	< 1 in 80 000 years	# of EM observatories that followed the trigger	~ 70
distance	85 to 160 million light-years	also observed in	gamma-ray, X-ray, ultraviolet, optical, infrared, radio
total mass	2.73 to 3.29 M _⊙	host galaxy	NGC 4993
primary NS mass	1.36 to 2.26 M _⊙	source RA, Dec	13 ^h 09 ^m 48 ^s , -23°22'53"
secondary NS mass	0.86 to 1.36 M _⊙	sky location	in Hydra constellation
mass ratio	0.4 to 1.0	viewing angle (without and with host galaxy identification)	≤ 56° and ≤ 26°
radiated GW energy	> 0.025 M _⊙ c ²	Hubble constant inferred from host galaxy identification	62 to 107 km s ⁻¹ Mpc ⁻¹
radius of a 1.4 M _⊙ NS	likely ≤ 14 km		
effective spin parameter	-0.01 to 0.17		
effective precession spin parameter	unconstrained		
GW speed deviation from speed of light	< few parts in 10 ¹⁵		

$$M_1 \sim 1.8 M_{\odot}, \quad M_2 \sim 1.1 M_{\odot}$$

Расстояние 85-160 млн. св. лет

$$\text{Энергия ГВ} > 0.025 M_{\odot} c^2$$



Images: time frequency traces (top), GW sky map (left, HL = light blue, HLV = dark blue, improved HLV = green, optical source location = cross-hair)

GW=gravitational wave, EM = electromagnetic, M_⊙=1 solar mass=2x10³⁰ kg, H/L= LIGO Hanford/Livingston, V=Virgo

Parameter ranges are 90% credible intervals.
*referenced to the time of merger
**maximum likelihood estimate
†90% credible region

GW170817

Слияние двух нейтронных звезд
 Наблюдалось детекторами гравитационных волн LIGO / Virgo и более 70 электромагнитными обсерваториями.



Растояние
130 млн. световых лет

Произошло
17 Августа 2017

Тип
Слияние нейтронных звезд

12:41:04 UTC
 Детектирована гравитационная волна от слияния нейтронных звезд

Гравитационная волна
 Две нейтронные звезды, каждая размером с город, но с массой не меньше массы Солнца

Гамма излучение
 Короткая вспышка гамма-излучения это яркий луч гамма излучения, генерируемый сразу после слияния звезд

+ 2 секунды
 Детектирована вспышка гамма излучения.

GW170817 позволяет нам впервые измерить скорость расширения вселенной напрямую, используя гравитационные волны.

Регистрация гравитационного излучения от слияния нейтронных звезд позволяет нам узнать больше о строении этих необычных объектов

Регистрация этого события различными детекторами подтверждает, что слияние нейтронных звезд может порождать вспышки гамма излучения

Полученные данные о килоновой позволили показать, что столкновения нейтронных звезд могут быть источником большинства тяжелых ядер, например золота, во вселенной.

Наблюдение гравитационных и электромагнитных волн от одного события позволяет уверенно утверждать что гравитационные волны распространяются со скоростью света

Килоновая
 Эволюция богато нейтронного вещества вызывает свечение килоновой, происходит синтез тяжелых элементов, таких как золото и платина

+10 часов 52 минуты
 Новый яркий источник оптического излучения обнаружен в галактике NGC 4993, в созвездии Гидры.

+11 часов 36 минут
 Наблюдается инфракрасное излучение

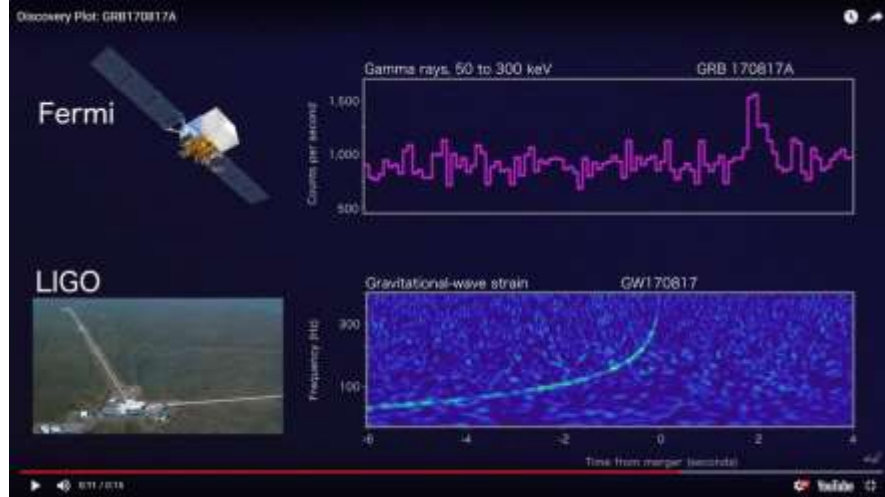
+15 часов
 Детектировано яркое ультрафиолетовое излучение.

+9 дней
 Обнаружено рентгеновское излучение

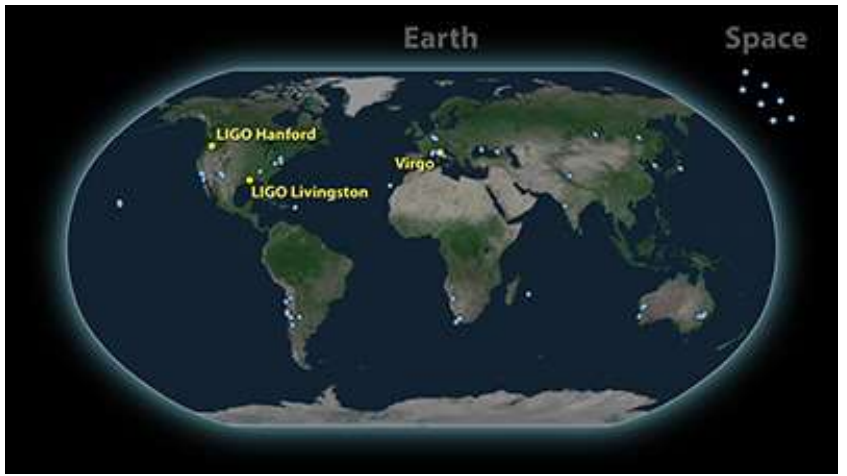
Остаточное радио-излучение
 Выброс материала из звезды приводит к ударной волне в межзвездной среде. Это создает радио-излучение, которое может продолжаться годами.

+16 дней
 Обнаружено излучение радио-диапазона

Через 1.7 с спутник Ферми зарегистрировал гамма-вспышку в этом участке неба.

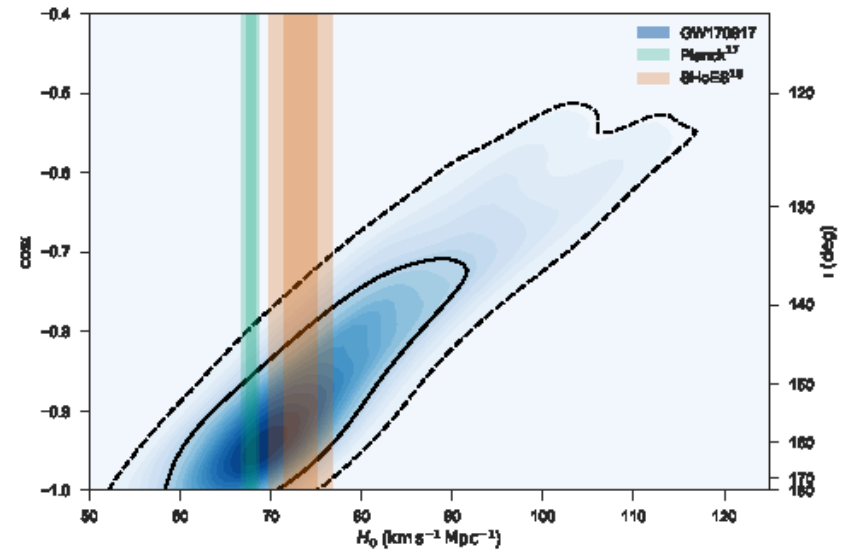
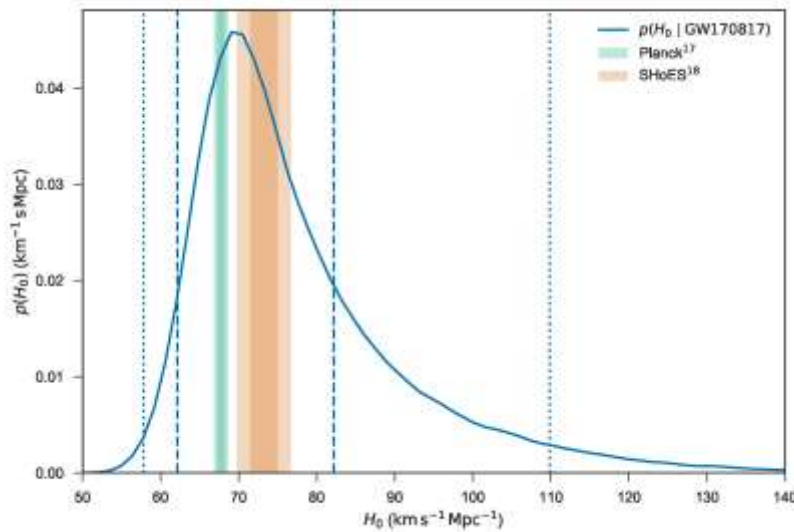


Скорость грав. волн отличается от скорости света $< 10^{-15}$. Измерена впервые.



Далее вспышку зарегистрировали в рентгеновском и оптическом спектрах. Измерено доплеровское смещение.

Независимое измерение постоянной Хаббла



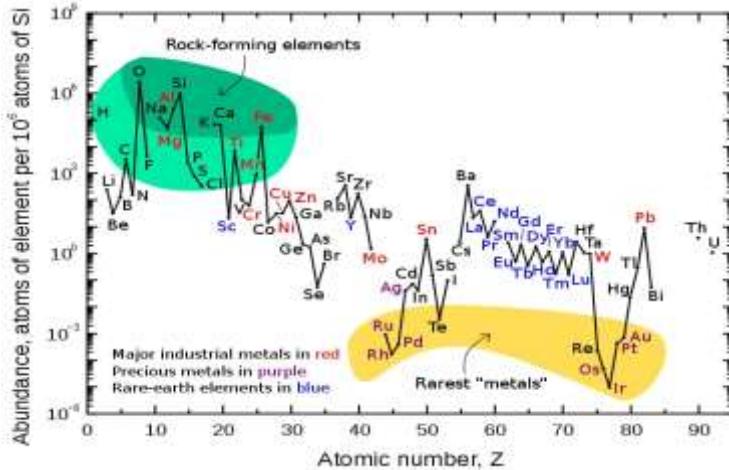
$$70.0_{-8.0}^{+12.0} \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$$

В будущем точность может быть на порядок повышена.
Это новый метод изучения динамики Вселенной!

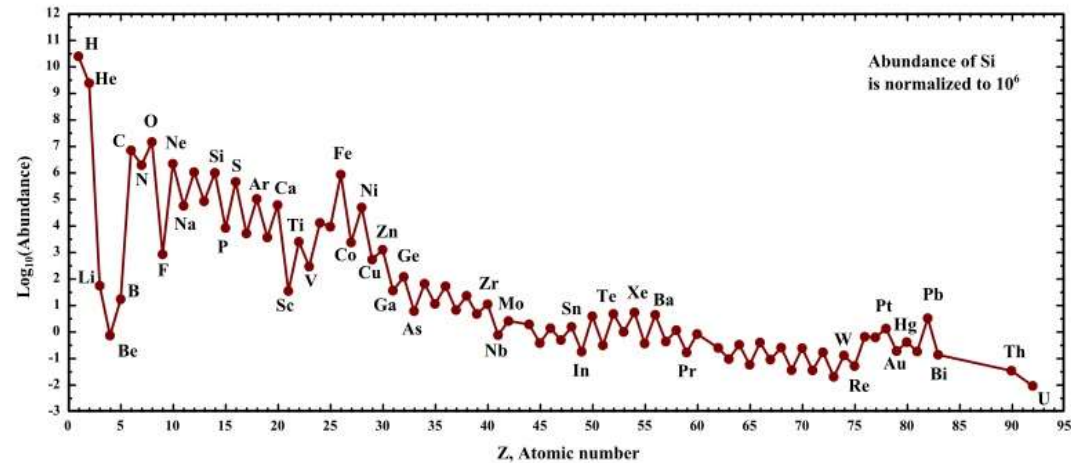
Слияние нейтронных звезд является основным механизмом образования элементов тяжелее железа, r-process

Распространенность элементов

В Земной коре



в солнечной системе



Ripples of Gravity, Flashes of Light

Element Origins

1 H	2 He	3 Li	4 Be	5 B	6 C	7 N	8 O	9 F	10 Ne
11 Na	12 Mg	13 Al	14 Si	15 P	16 S	17 Cl	18 Ar	19 K	20 Ca
21 Sc	22 Ti	23 V	24 Cr	25 Mn	26 Fe	27 Co	28 Ni	29 Cu	30 Zn
31 Ga	32 Ge	33 As	34 Se	35 Br	36 Kr	37 Rb	38 Sr	39 Y	40 Zr
41 Nb	42 Mo	43 Tc	44 Ru	45 Rh	46 Pd	47 Ag	48 Cd	49 In	50 Sn
51 Sb	52 Te	53 I	54 Xe	55 Cs	56 Ba	57 La	58 Ce	59 Pr	60 Nd
61 Pm	62 Sm	63 Eu	64 Gd	65 Tb	66 Dy	67 Ho	68 Er	69 Tm	70 Yb
71 Lu	72 Hf	73 Ta	74 W	75 Re	76 Os	77 Ir	78 Pt	79 Au	80 Hg
81 Tl	82 Pb	83 Bi	84 Po	85 At	86 Rn	87 Fr	88 Ra	89 Ac	90 Th
91 Pa	92 U								

Merging Neutron Stars Exploding Massive Stars Big Bang

Желтым отмечены элементы образующиеся при слиянии нейтронных звезд.

В зарегистрированном событии было выкинуто в пространство золото с массой порядка 20 масс Земли!

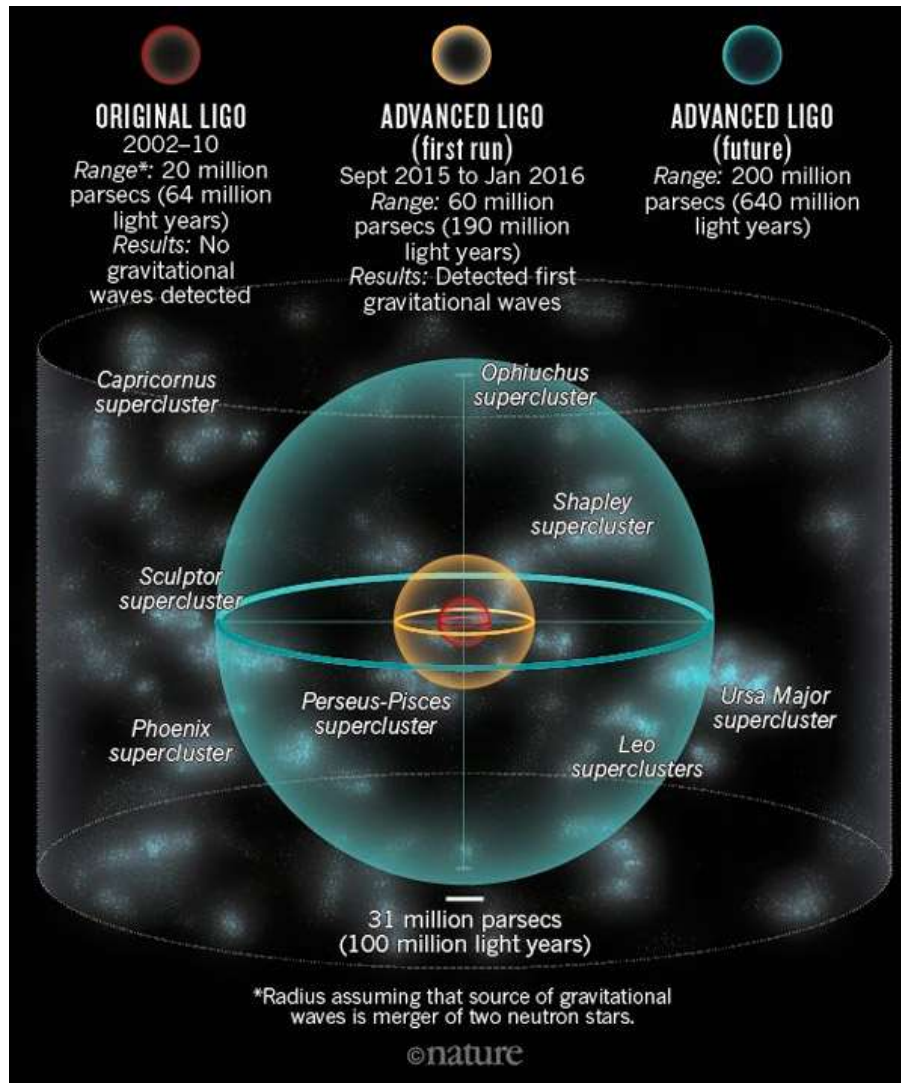
Было зарегистрировано характерное свечение «килоновой».

Нобелевская премия 2017 г



Ron Drever скончался недавно (после открытия ГВ).

Дальнейшие перспективы

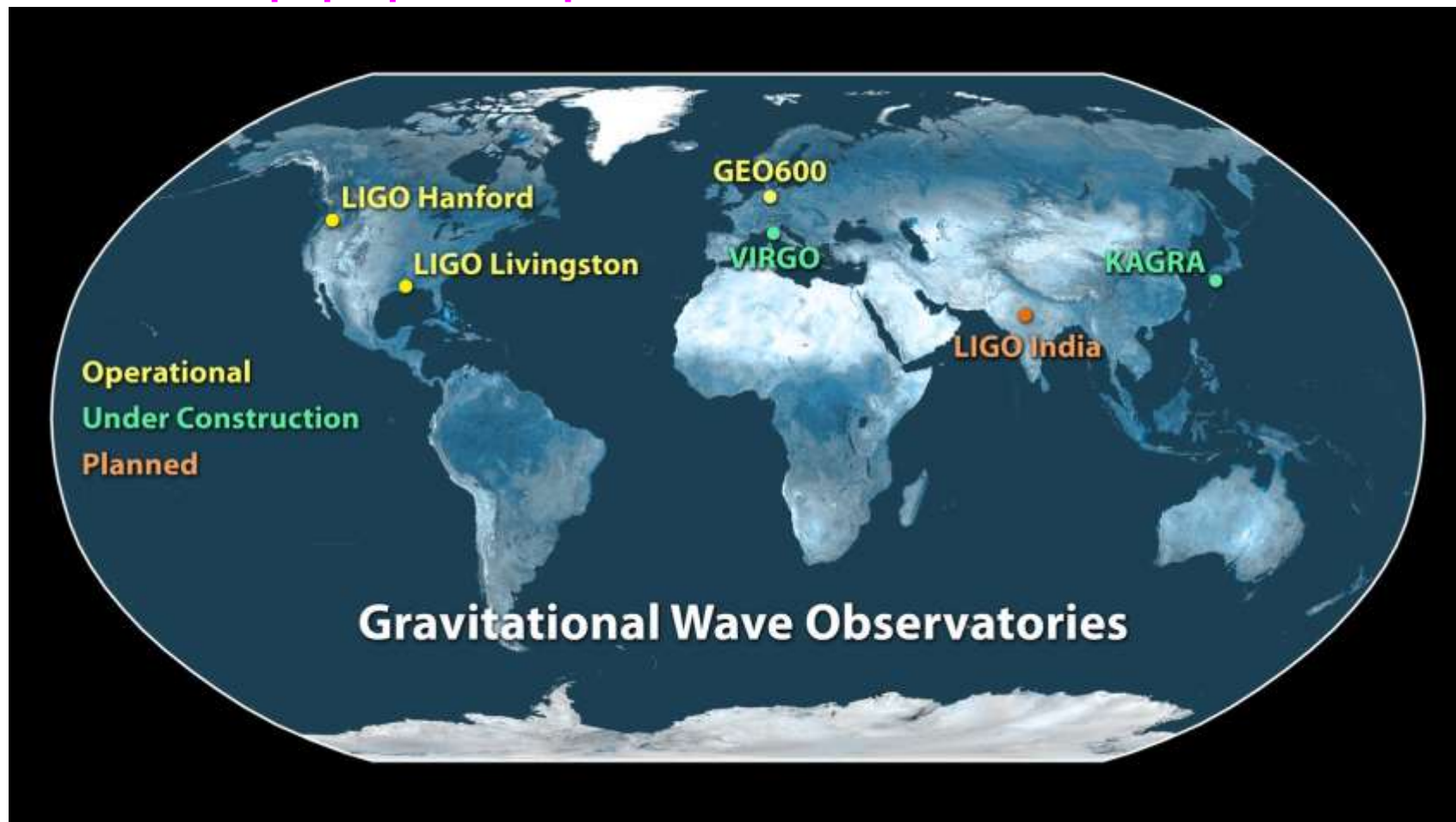


Объем

LIGO 1	1
LIGO (сейчас)	30
LIGO (будущее)	1000

Можно надеяться, что интересных событий будет 10-100 в год.

Сеть интерферометров (для точной локализации источника)



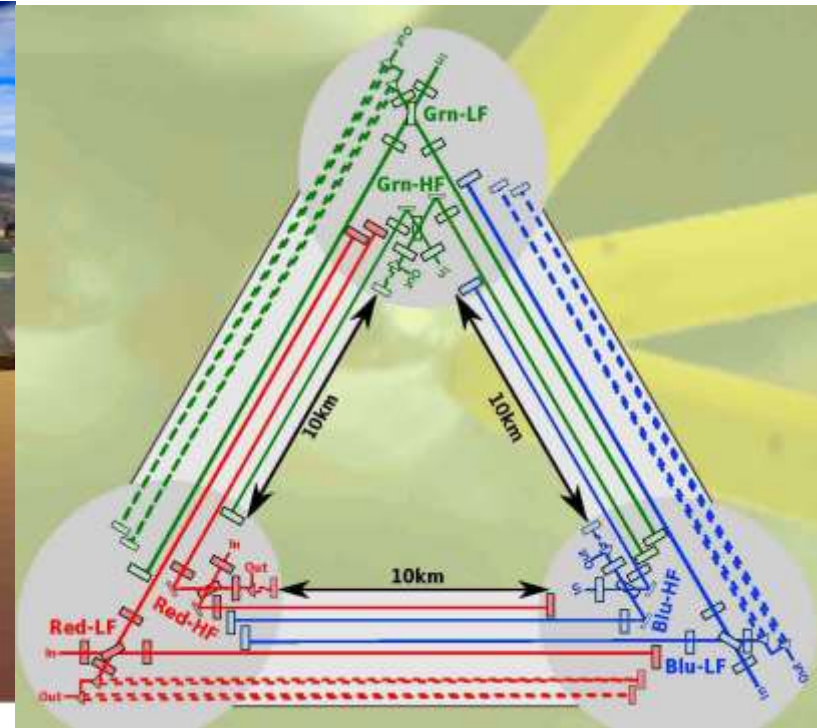
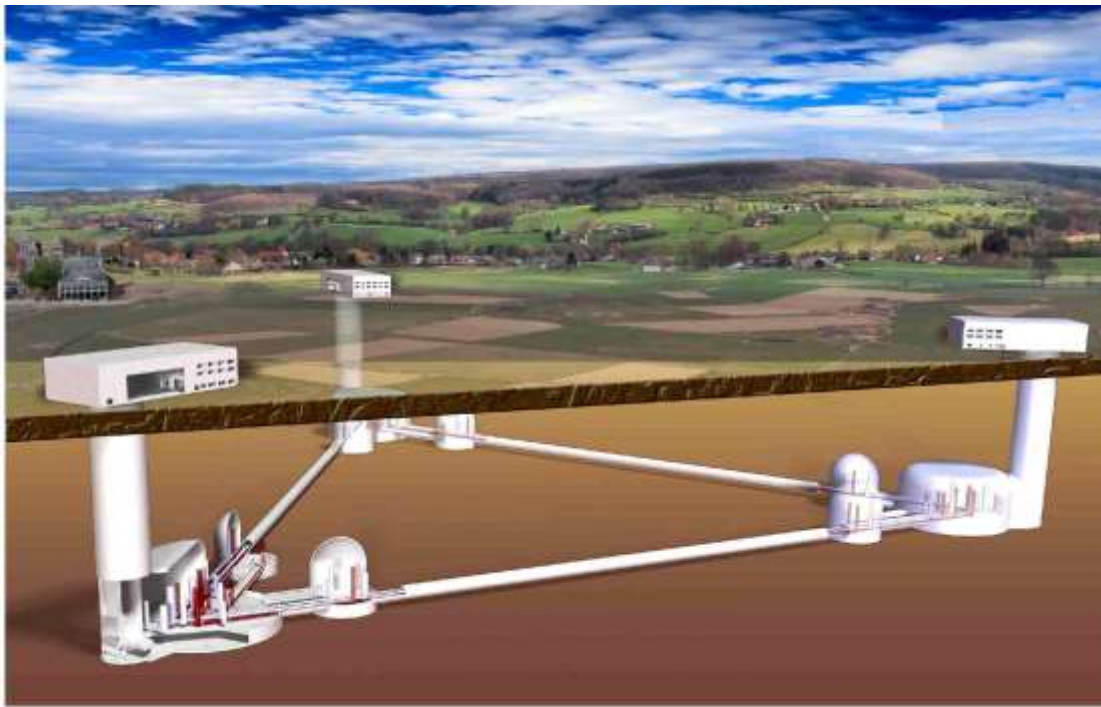
Virgo — франко-итальянский детектор гравитационных волн, с 3 км базой, является членом LIGO, в момент открытия модернизировался (будет как LIGO).

LIGO- India - 2019 - 2020 Science Runs and regular Operation of LIGO-India.

KAGRA (Kamioka-GRavitation) 2018 г, Япония, подземный, криогенный, повышенная чувс. на низких частотах

Einstein –gravitational wave Telescope (ET) (~2027)

(европейский проект)



плечо 10 км, несколько лазеров в каждом тоннеле с оптимизацией на низкие и высокие частоты

Чувствительность ЕТ

на порядок лучше, всех предшественников

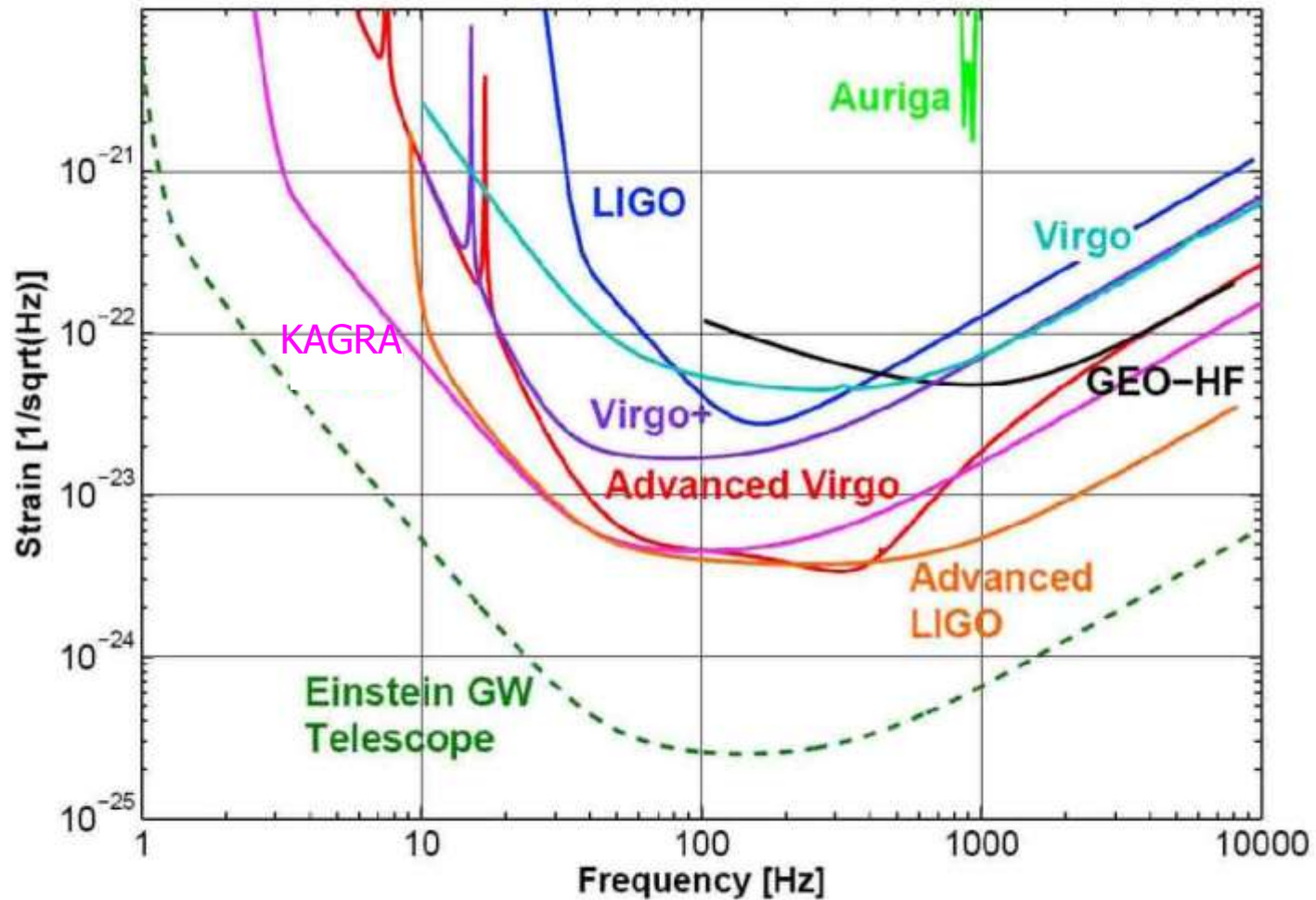


Figure 5: Sensitivities of gravitational wave detectors from the first to the third generation.

eLISA space gravitational interferometer

плечо интерферометра 1 млн. км

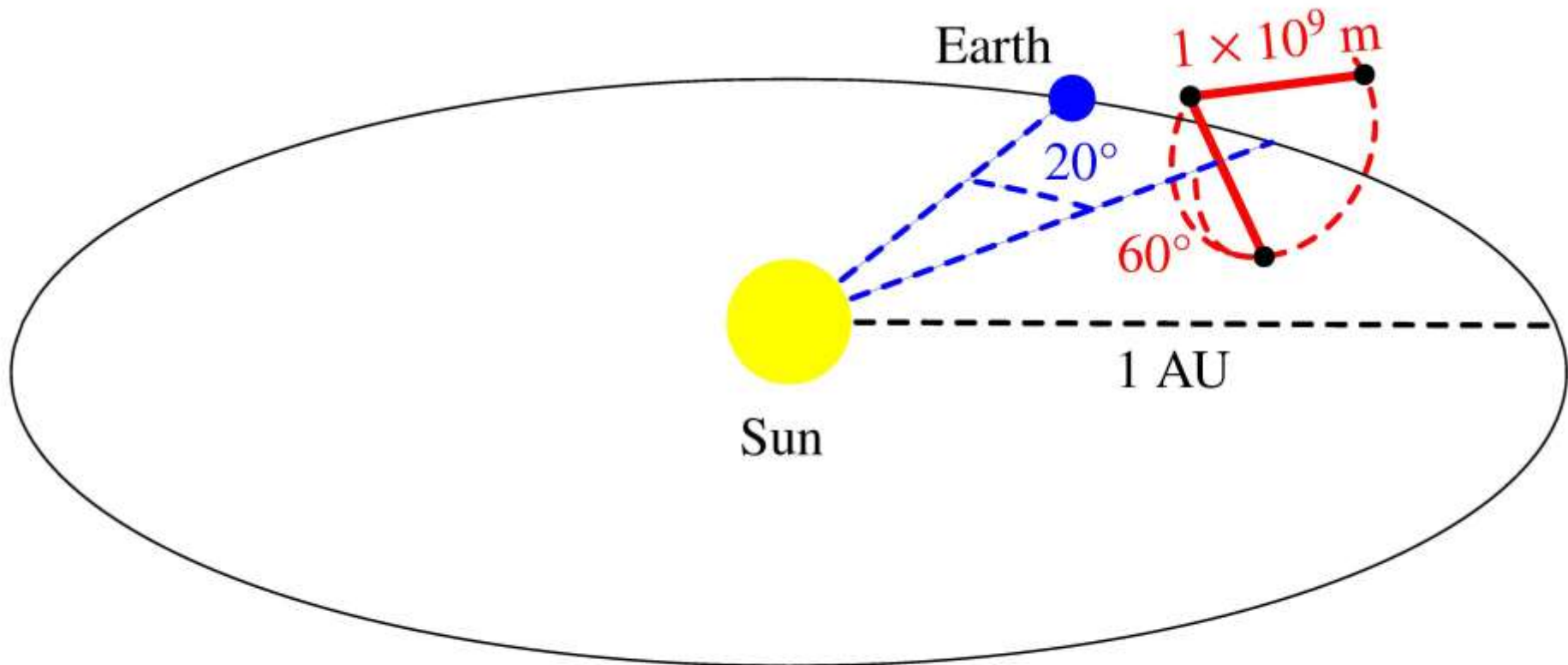
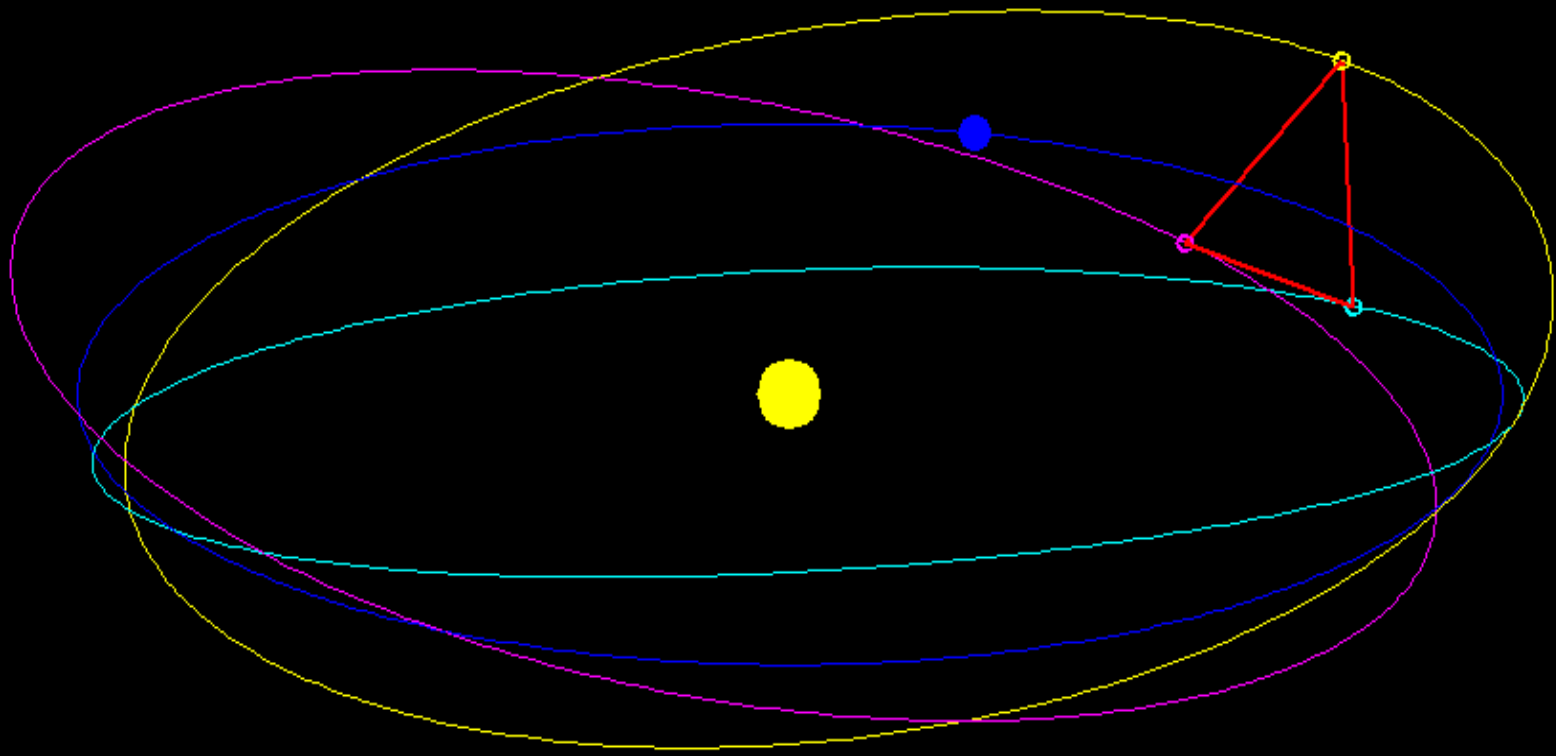
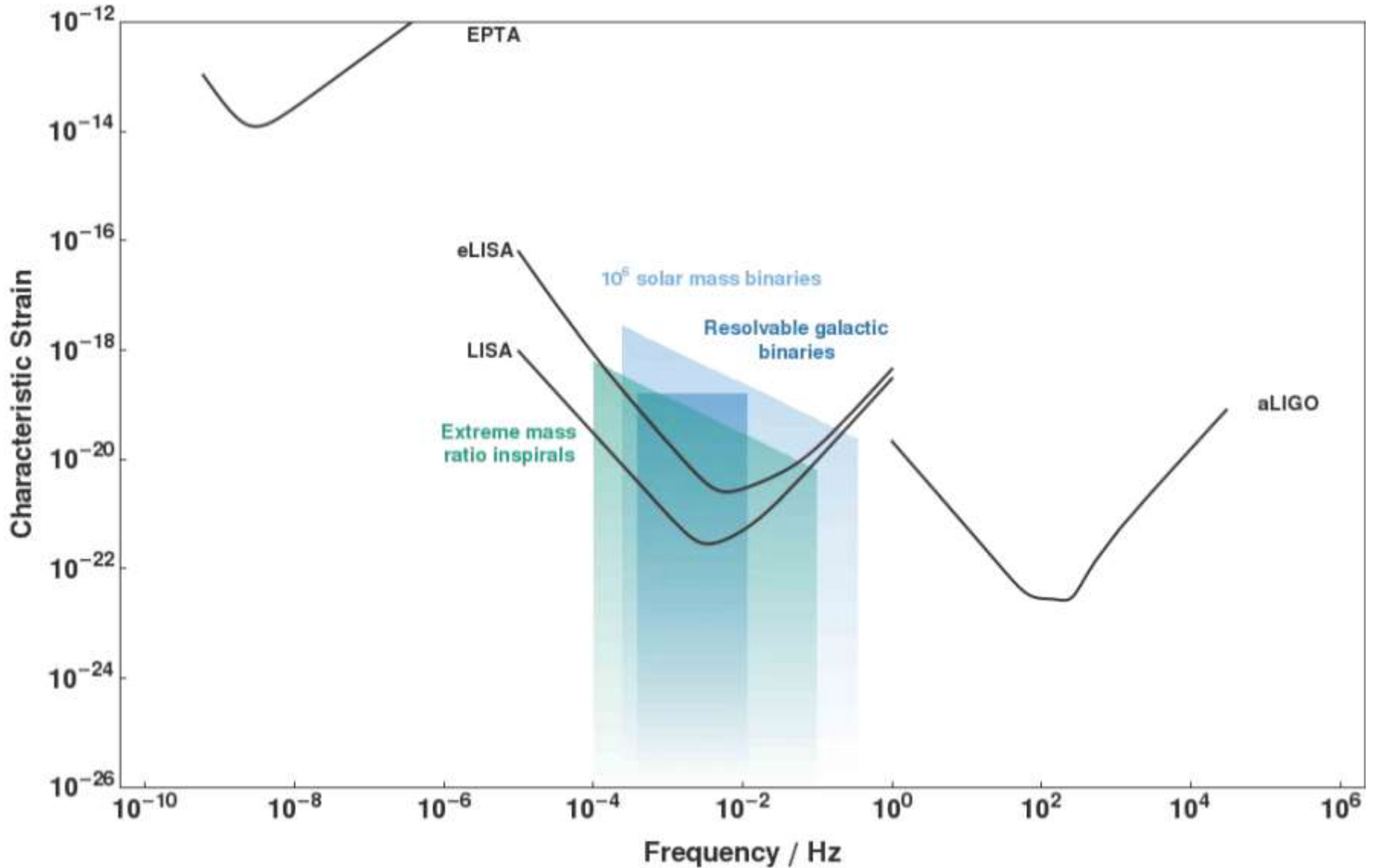


Figure 1: The eLISA orbits: The constellation is shown trailing the Earth by about 20 degrees (or 5×10^{10} km) and is inclined by 60 degrees with respect to the ecliptic. The trailing angle will vary over the course of the mission duration from 10 degrees to 25 degrees. The separation between the spacecraft is $L = 1 \times 10^9$ m.

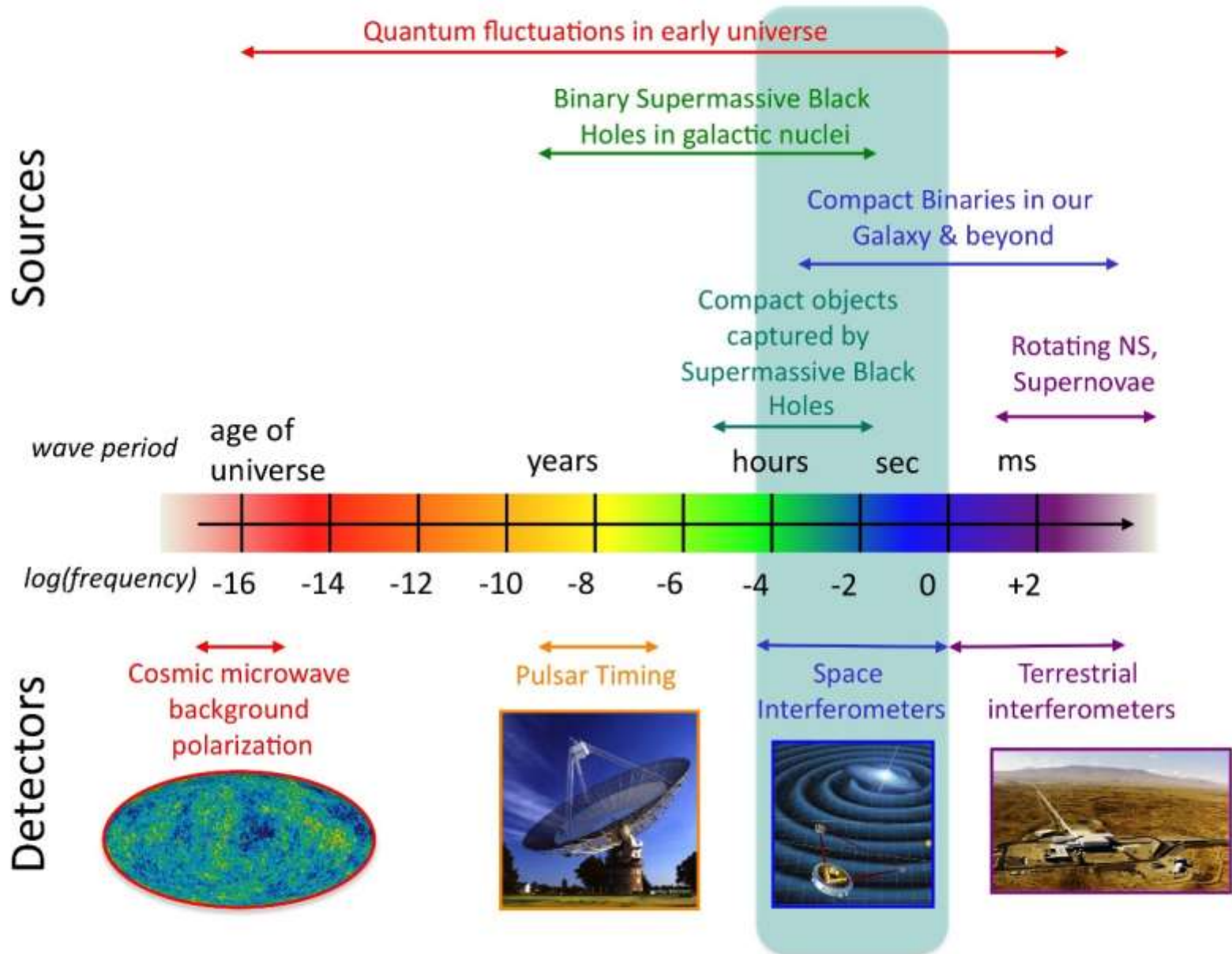


Чувствительность eLISA

здесь обозначение "LISA" –это вариант с плечом 5 млн. км)



The Gravitational Wave Spectrum



Что мы узнаем с помощью грав. волн?

- Много о **нейтронных и черных дырах** всех размеров в том числе в невидимых частях галактик
- Грав. излучение при слиянии ЧД – это новая **стандартная свеча**. Совместно с измерением красных смещений позволит измерить эволюцию вселенной в зависимости от ее размера и прояснить **природу темной энергии**.
- Регистрация **первичных (реликтовых) ГВ** позволит узнать, что происходило в **первые мгновения после рождения Вселенной** (два близких детектора позволяют видеть корреляцию сигналов, на фоне разных шумов)
- Возможно, многое другое, о чем не подозреваем

- Грав. силы на 40 порядков слабее электрических, однако доминируют на планетарных и космических масштабах.
- Оказывается и мощность излучения ГВ, больше чем ЭМ, поскольку ЭМ излучается некогерентно отдельными частицами, а ГВ когерентно огромными массами!
- Появился новый инструмент (как ускорители, телескопы), который позволит по-новому взглянуть на Вселенную и лучше понять как она устроена!



END

