

G

h

C

?







Загадки Вселенной

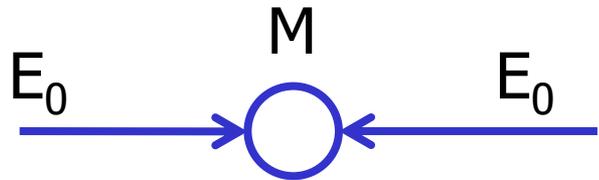
В.И.Тельнов
14 декабря 2018, НГУ

План

- ✓ Что нам известно о материи?
- ✓ Современное представление о Вселенной.
- ✓ Ускоренное расширение, темная энергия
- ✓ Темная материя
- ✓ Гравитационные волны

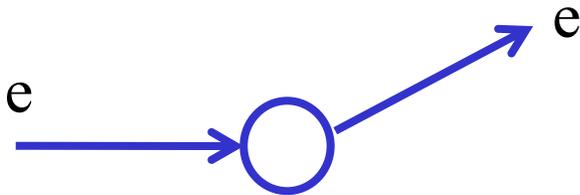
Как изучается материя

Рождение новых частиц



$$Mc^2 = 2E_0 \text{ -встречные пучки}$$

Изучение структуры частиц
(ускоритель – это микроскоп)



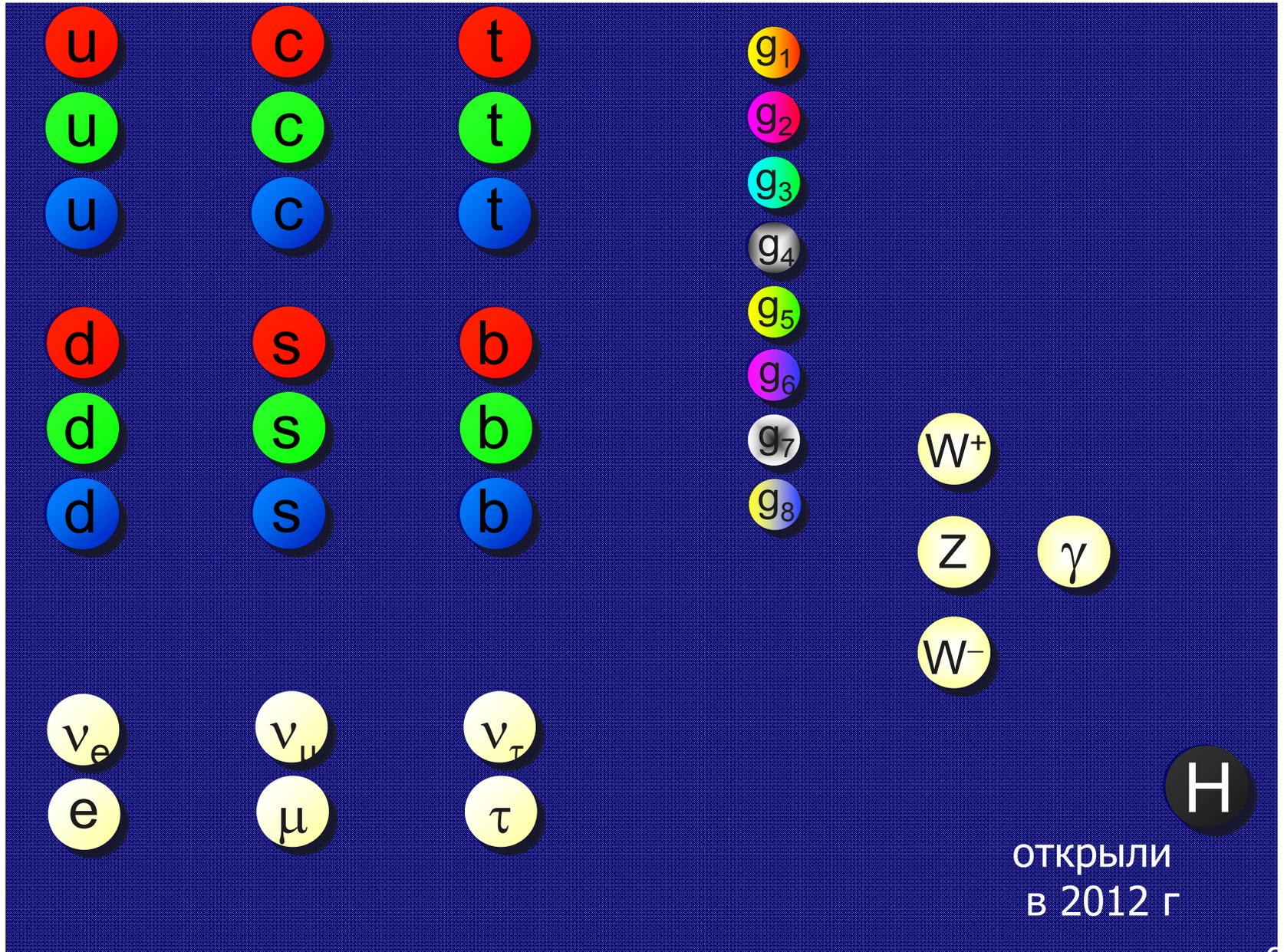
$$\Delta x \sim \frac{\hbar}{p} \sim \frac{\hbar c}{E}$$

$$\Delta x \sim \frac{2 \cdot 10^{-14}}{E[\text{ГэВ}]}, \text{ см}$$

(для протона энергия покоя $mc^2 = 0.93$ ГэВ)

На сегодня максимальная достигнутая энергия на ускорителях ~ 1000 ГэВ

Фундаментальные частицы



Кварки

Тип	Масса, МэВ	Эл. заряд	Бар. заряд	Аромат
u	2–3	+2/3,	1/3	–
d	4–6	–1/3	1/3	–
s	100	–1/3	1/3	strange
c	1 300	+2/3	1/3	charm
b	4 200	–1/3	1/3	beauty
t	175 000	+2/3	1/3	truth

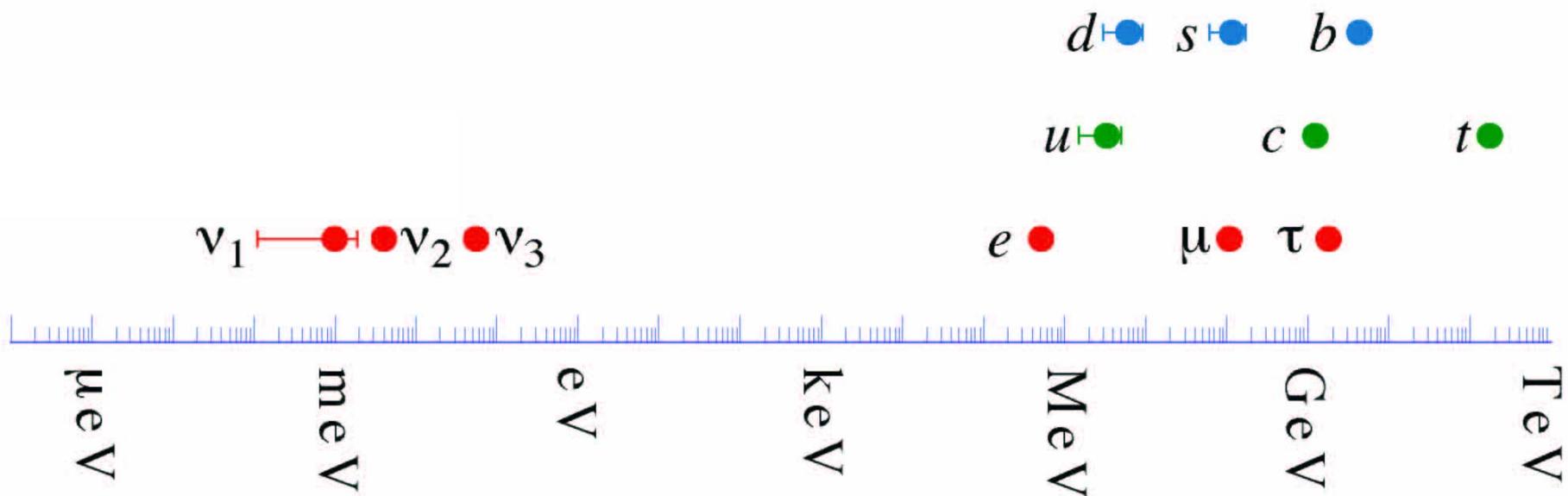
$p(\text{протон})=uud$ $n(\text{нейтрон})=udd$ $\pi^+=u\bar{d}$

У каждого кварка есть 3 цвета (аналог электрического заряда).
Взаимодействуют путем обмена глюонами (аналог фотона).

Лептоны

Тип	Масса, МэВ	Электр. заряд	Лепт. число
e	0.51	1	$L_e=1$
μ	106.6	1	$L_\mu=1$
τ	1777	1	$L_\tau=1$
ν_e	$<10^{-6}$	0	$L_e=1$
ν_μ	<0.19	0	$L_\mu=1$
ν_τ	<18	0	$L_\tau=1$

Массы фермионов



Бозоны- переносчики взаимодействий

Тип	Масса, ГэВ	Элект. Заряд	Спин	Перен. взаимод.
γ	0	0	1	Электромаг
ГЛЮОНЫ	0	0	1	Сильное
W^{\pm}	80	± 1	1	Слабое
Z	91	0	1	Слабое
ГРАВИТОН	0	0	2	Гравитац.

Бозон Хиггса

В июле 2012 на Большом адронном коллайдере, LHC, открыли частицу с $M \sim 125.9 \text{ GeV}$ со свойствами предсказанного Хиггсовского бозона.

Хиггсовское поле заполняет все пространство. Хиггсовские бозоны – кванты этого поля. **Элементарные частицы** (электроны, мюоны, кварки, W, Z бозоны) приобретают массу за счет взаимодействия с этим полем. Это доказывается тем, что вероятность распада H на другие частицы пропорциональна их массе в квадрате.

Масса протона и нейтрона имеет другое происхождение, вклад хиггсовского механизма порядка 2%.

Сейчас имеется “Стандартная модель” мира, состоящего из кварков, лептонов, бозонов ..., можем рассчитать любые процессы с их участием, однако, оказывается, эти виды материи составляют всего около 5% от того, что имеется во Вселенной!

Проблема № 1 физики и астрофизики

Обычная материя	5%
Темная материя (неизвестной природы)	25%
Темная энергия (вызывающая антигравитацию в космологических масштабах)	70%

Представления о Вселенной.

- В среднем Вселенная изотропна и однородна, одинакова во всех точках – космологический принцип.

Вселенная расширяется: любые две реперные точки (например галактики) удаляются со скоростью

- $V = Hr$ - закон Хаббла ($v \ll c$).

В настоящее время $H_0 \sim 70$ км/сек/Мпарсек.

В общем случае $\dot{a}(t) = H(t)a(t)$,

$a(t)$ - масштабный фактор пропорциональный размеру вселенной (вселенная как бы растягивается)

Из расширения следует, что Вселенная возникла примерно 10-15 млрд. лет назад ($t \sim 1/H$) в результате "Большого взрыва"

Фотометрический парадокс Ольберса

(немецкий астроном XVIII века)

“Представим себе бесконечную статическую Вселенную, в которой звезды и галактики находятся в постоянном (статическом) положении друг к другу. Луч зрения земного наблюдателя в любом направлении в конце концов наткнется на поверхность звезды, поэтому вся небесная сфера должна перекрываться звездными дисками”.

На самом деле небо черное. Объяснение: конечный возраст вселенной и ее расширение.

Геометрия однородного пространства

Гравитация искривляет ход лучей света. Можно считать, что гравитация искривляет пространство (сумма углов в треугольнике может быть не равна π).

Существуют три случая геометрии изотропного пространства: плоское пространство ($k=0$), пр-во с положительной кривизной ($k=1$), пр-во с отрицательной кривизной; $k=-1$

При $k=1$ объем и размер замкнутой “сферической” вселенной **конечен** (но границ нет). Обычная сфера – это двумерное пр-во с $k=1$. В этом случае $a(t)$ – это радиус кривизны. Наше пр-во трехмерное, трудно вообразить искривленным.

В случае $k=0$ и -1 объем и размер **бесконечен**.

В каком мире мы живем? Ответ не очевиден, это можно определить экспериментально.

Расширяющуюся Вселенную удобно вообразить как расширяющийся резиновый шар, на поверхности которого нанесены метки-галактики. Галактики являются гравитационно-связанными объектами, их размеры не меняются, но растет расстояние между галактиками. Свет распространяется вдоль поверхности со скоростью света.

Жители такой двумерной вселенной плоские и ползают по поверхности, их рука не может указать, где находится центр сферы, однако они могут измерить кривизну их вселенной по сумме углов в треугольнике.

Размер такой вселенной конечный, но границ нет.

Космологическое красное смещение

Если некая галактика испускает световой импульс в момент t_e , а наблюдатель принимает сигнал в момент t_0 , то отношение длин волн

$$1 + z \equiv \frac{\lambda_0}{\lambda_e} = \frac{a(t_0)}{a(t_e)}$$

т.е. длина волны света увеличивается пропорционально «размеру» Вселенной.

Замечание. Утверждение, что космологическое красное смещение объясняется эффектом Доплера (скоростью удаления), неверно. В расширяющейся вселенной нельзя ввести единую систему отсчета. Свет, испущенный в нашем направлении, может никогда не дойти до нас: «горизонт событий» (дальше не видим). «Доплер» только при $z \ll 1$.

Динамика Вселенной. Уравнения Фридмана.

В 1922 г А.Фридман, решив уравнений ОТО Эйнштейна для однородной вселенной, получил 2 независимых уравнения для $a(t)$

$$\left(\frac{da}{dt}\right)^2 = \frac{8}{3}\pi G\rho a^2 - kc^2 \quad (1)$$

$$\frac{d(\rho c^2 a^3)}{dt} + p \frac{d(a^3)}{dt} = 0 \quad (2) \text{ - сохранение энергии для выделенного объема}$$

здесь ρc^2 - плотность всех всех видов энергии, p -давление.

Из (1),(2) получается уравнение для ускорения

$$\frac{d^2 a}{dt^2} = -\frac{4}{3}\pi G a(\rho + 3p / c^2) \quad (3)$$

Динамика расширения зависит от плотности энергии и **давления** !
Уравнение (3) (но без P) легко получить в Ньютонской механике.
Вклад P - чисто релятивистско-гравитационный эффект (содержит c).

Учитывая, что $da/dt = Ha$,
из (1) следует

$$\frac{kc^2}{a^2} = \frac{8}{3}\pi G\rho - H^2$$

Вселенная **плоская** ($k=0$) при **критической плотности** $\rho_c = \frac{3H^2}{8\pi G}$

Удобно ввести параметр плотности $\Omega = \rho / \rho_c$

Если $\Omega=1$, то $k=0$, вселенная плоская;

$\Omega>1$, то $k=1$, вселенная замкнутая;

$\Omega<1$, то $k=-1$, вселенная открытая;

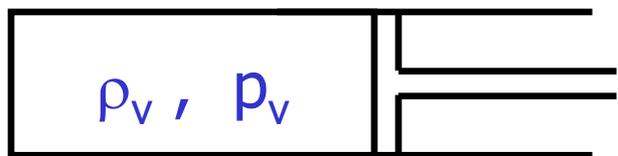
$$\rho_c \sim 10^{-29} \text{ г / см}^3$$

Для решения уравнений необходимо знать $\rho = \rho(a)$, например:

$\rho=0$	пылевидная материя	$\rho \propto a^{-3}$ (из 2-го ур.Фридмана)
$\rho=(1/3)\rho c^2$	радиация	$\rho \propto a^{-4}$
$\rho_v = -\rho_v c^2$	вакуум	$\rho \propto \text{const}$

Плотность и давление вакуума

Вакуум может обладать плотностью энергии, однако она не должна зависеть от системы отсчета и меняться при расширении Вселенной. Рассмотрим расширение объема заполненного вакуумом без повода тепла (адиабатически): $\Delta E = -\Delta A$



$$\begin{aligned} dE &= -p dV \\ \rho_v c^2 dV &= -p_v dV, \quad (\rho_v = \text{const}) \\ \Rightarrow p_v &= -\rho_v c^2 \end{aligned}$$

Из уравнения (3) $\ddot{a} \propto -(\rho + 3p/c^2)$

Если ρ и p положительны (обычно так), то расширение замедляется. Для пылевидной вселенной ($p_m = 0$) с учетом вакуума ($p_v = -\rho_v c^2$)

$\ddot{a} \propto -\rho_m + 2\rho_v$. Если $\rho_v > \rho_m/2$, то вселенная будет

расширяться с ускорением - космологическая антигравитация!

Некоторые решения

- $k=0, \rho, p=0, \rho_v=0$ - плоская пылевидная вселенная

$$a \propto t^{2/3} \quad t_0 = \frac{2}{3H_0} \quad \text{-возраст вселенной}$$

Для $H_0 \sim 70$ км/сек/Мпк $t_0 \sim 10^{10}$ лет

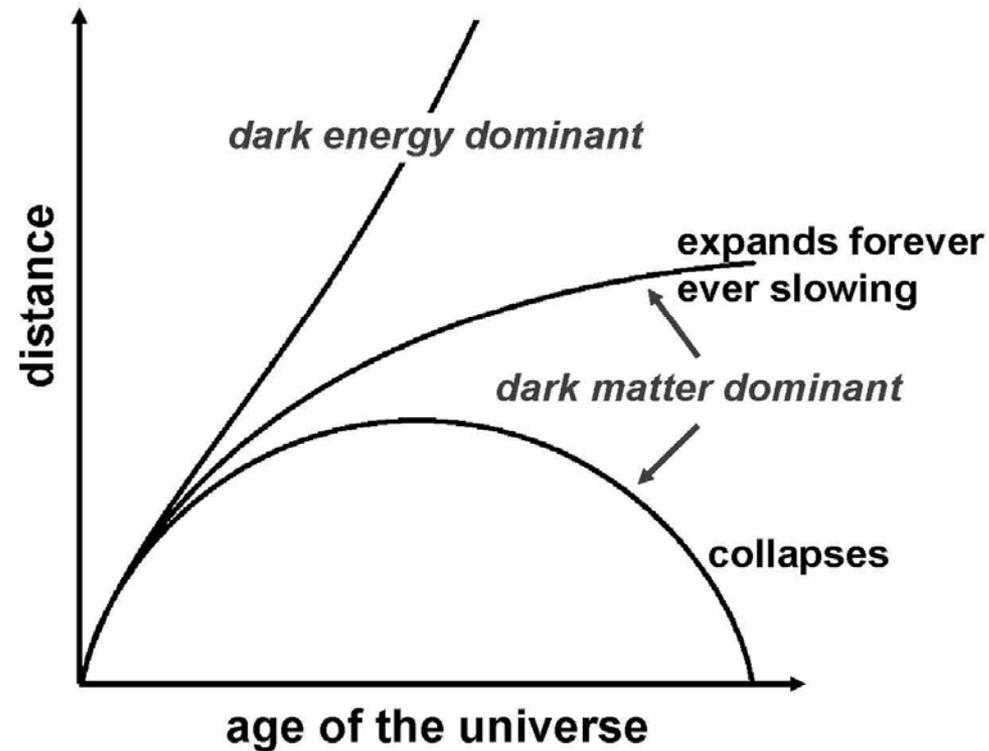
- $k=0, \rho, p=(1/3)\rho$ - плоская радиационно-доминантная

$$a \propto t^{1/2}$$

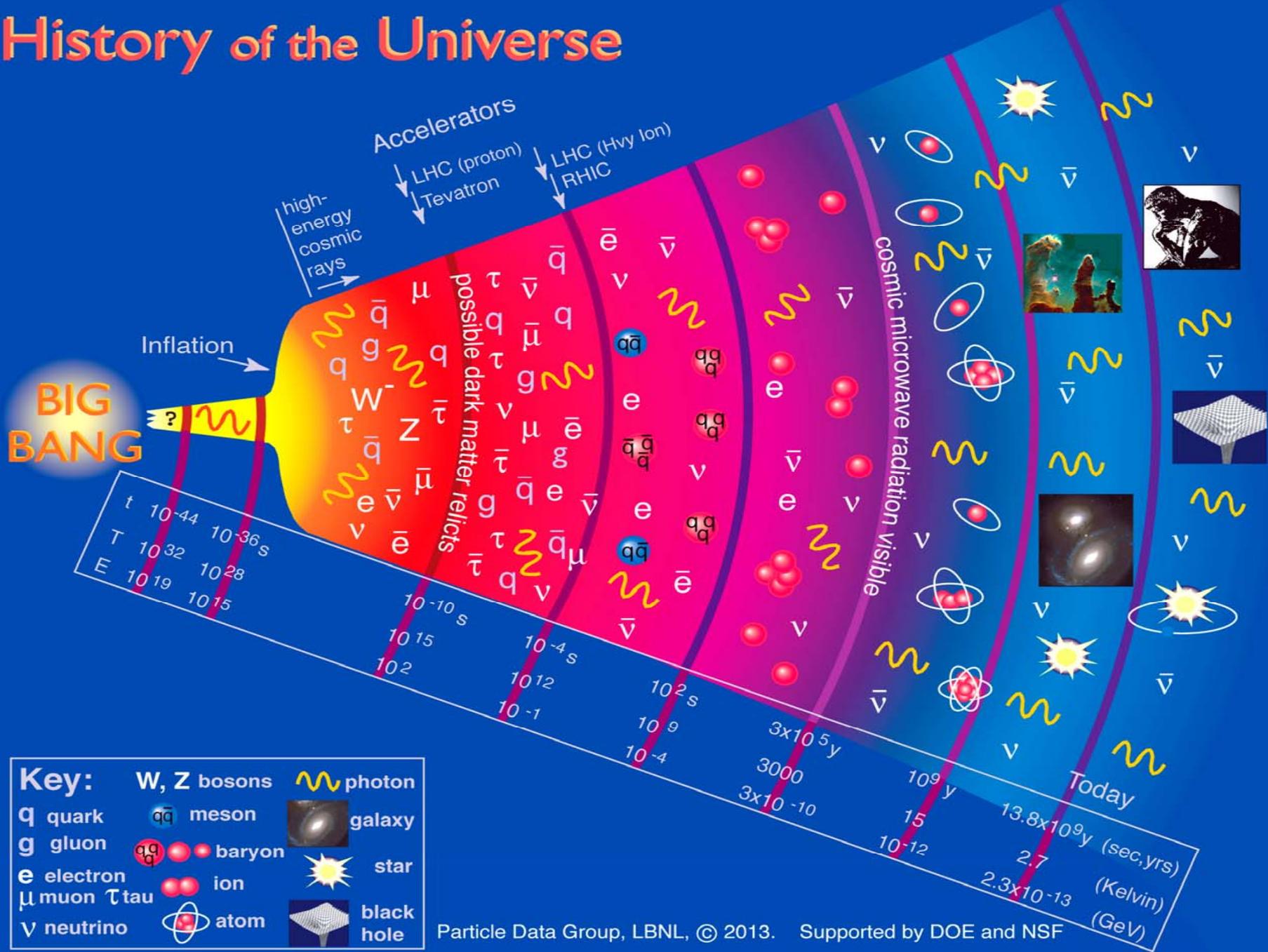
- $k=0, p=-\rho_v=\text{const}, \rho_m \sim 0$ - вакуумно-доминантная всел.

$$a = a_0 e^{\sqrt{(8/3)\pi G \rho_v} t} = a_0 e^{H_0 t} \quad \text{-инфляционная Вселенная}$$

Некоторые сценарии развития Вселенной



History of the Universe



Key:

- W, Z bosons
- quark (q)
- gluon (g)
- electron (e)
- muon (μ)
- tau (τ)
- neutrino (ν)
- meson ($q\bar{q}$)
- baryon (qqq)
- ion (e^- and $+$)
- atom
- photon
- galaxy
- star
- black hole

Задача эксперимента

В общем случае вселенная состоит из разных видов материи-энергии: пыль, радиация ...вакуум, вклад которых меняется по мере расширения.

Задача - определить геометрию вселенной и ее состав.

Решается путем изучения:

- ❖ динамики расширения Вселенной в различные эпохи (измерение постоянной Хаббла);
- ❖ свойств микроволнового реликтового излучения;
- ❖ галактик и галактических кластеров по их размерам и распределению в пространстве и др.

Измерение параметров вселенной по скорости расширения

$$H^2(z) = H_0^2 \left[(1 - \Omega_{0,tot})(1+z^2) + \Omega_{0,m}(1+z)^3 + \Omega_{0,r}(1+z)^4 + \dots \right]$$

$$\Omega_{0,i} = \rho_{0,i} / (3H_0^2 / 8\pi G)$$

Измерение $H(z)$ дает информацию о составе Вселенной, т.е. сколько пылевидной материи, излучения, вакуумно-подобной материи и.т.д., для этого нужно знать расстояние до источника света и его красное смещение.

Связь красное смещение-расстояние

Измерение **красного смещения** объекта дает z

$$z \equiv \lambda_0 / \lambda_e - 1$$

Для нахождения $H(z)$ необходимо еще знать расстояние до объекта, которое находится по наблюдаемой яркости источников с известной светимостью (**“стандартные свечи”**)

Расстояния во Вселенной

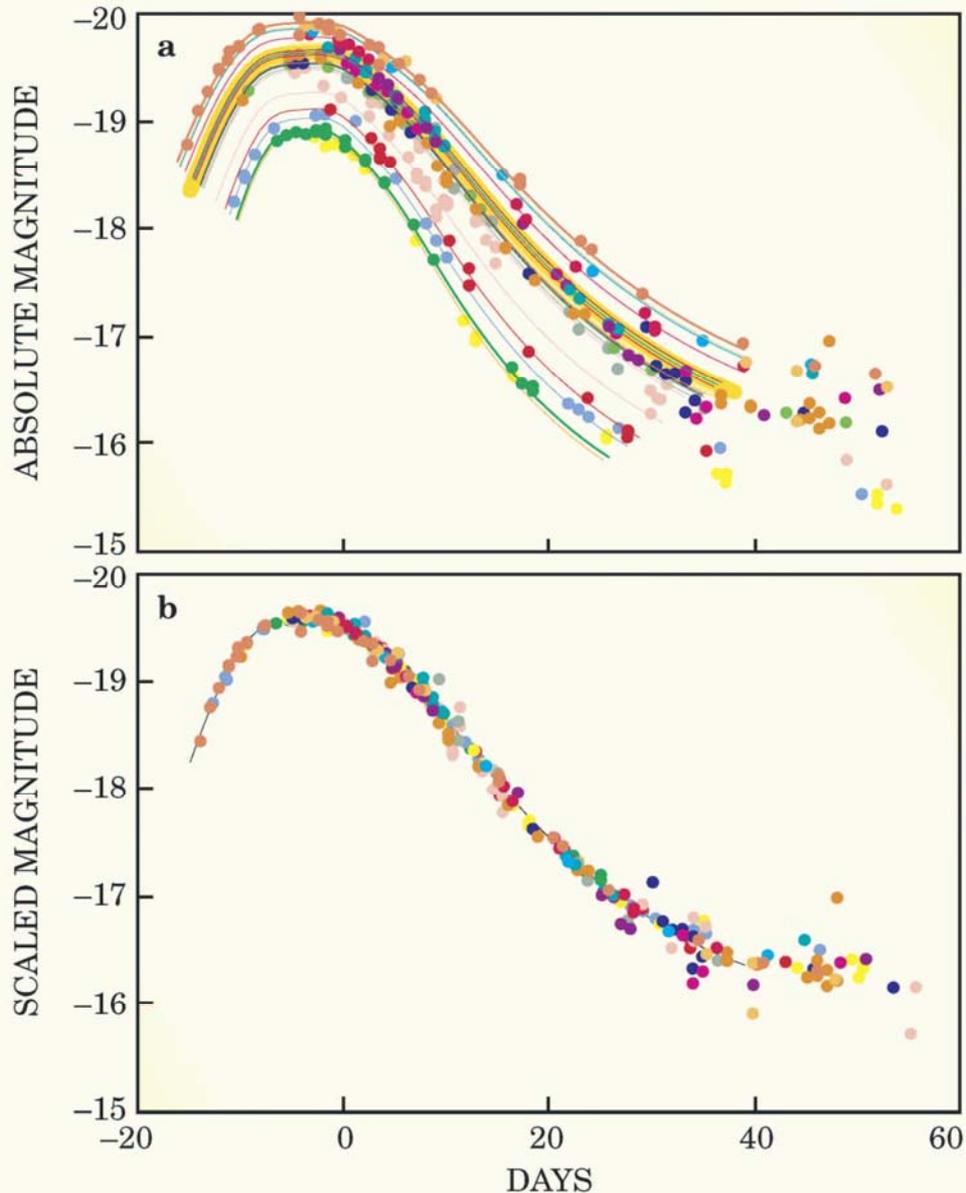
Световой год		$\sim 10^{18}$ см	
Парсек	~ 3.2 св.года	$\sim 3 \cdot 10^{18}$ см	
$ct_{\text{всел}}$	~ 4 Гп	$\sim 10^{28}$ см	$M \sim 10^{20-21} M_{\text{C}}$
Суперскопления	~ 100 Мп		$M \sim 10^{15-16} M_{\text{C}}$
Скопления галактик	~ 10 Мп		
Галактика	~ 30 кп		$M \sim 10^{11-12} M_{\text{C}}$

Измерение расстояний, стандартные свечи

- Параллакс
- Цефеиды
- Сверхновые
- Другие

Сверхновые 1a

(стандартная свеча, до которой известно расстояние)

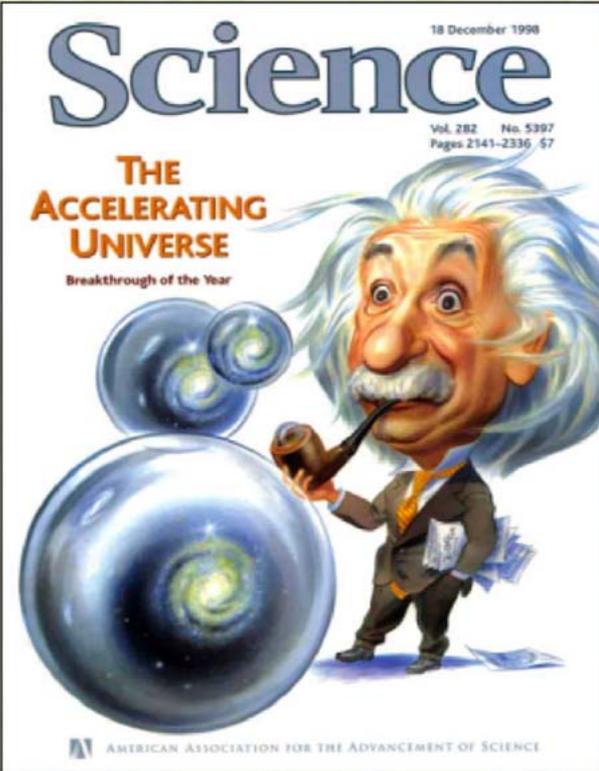
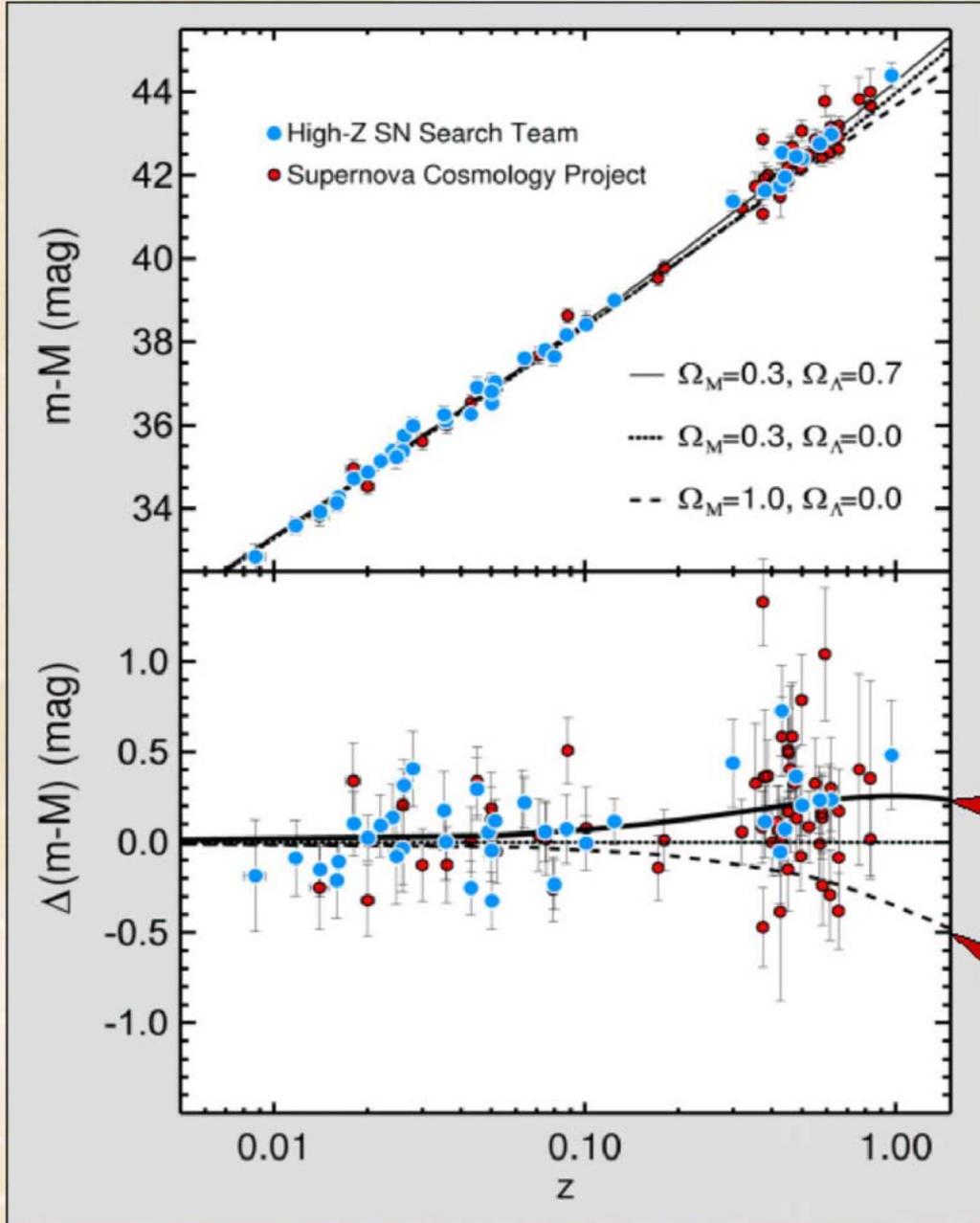


Потухшая звезда, белый карлик с $M \sim M_c$ в системе двойных звезд, затягивает в-во от соседней звезды и при $M \sim 1.4M_c$ снова вспыхивает.

Частота вспышек в Галактике $\sim 1/300$ лет, во всей видимой Вселенной ~ 1 в сек.

После поправки на длительность вспышки является хорошей стандартной свечой

Первое указание на ускорение расширения вселенной (1998 г.)



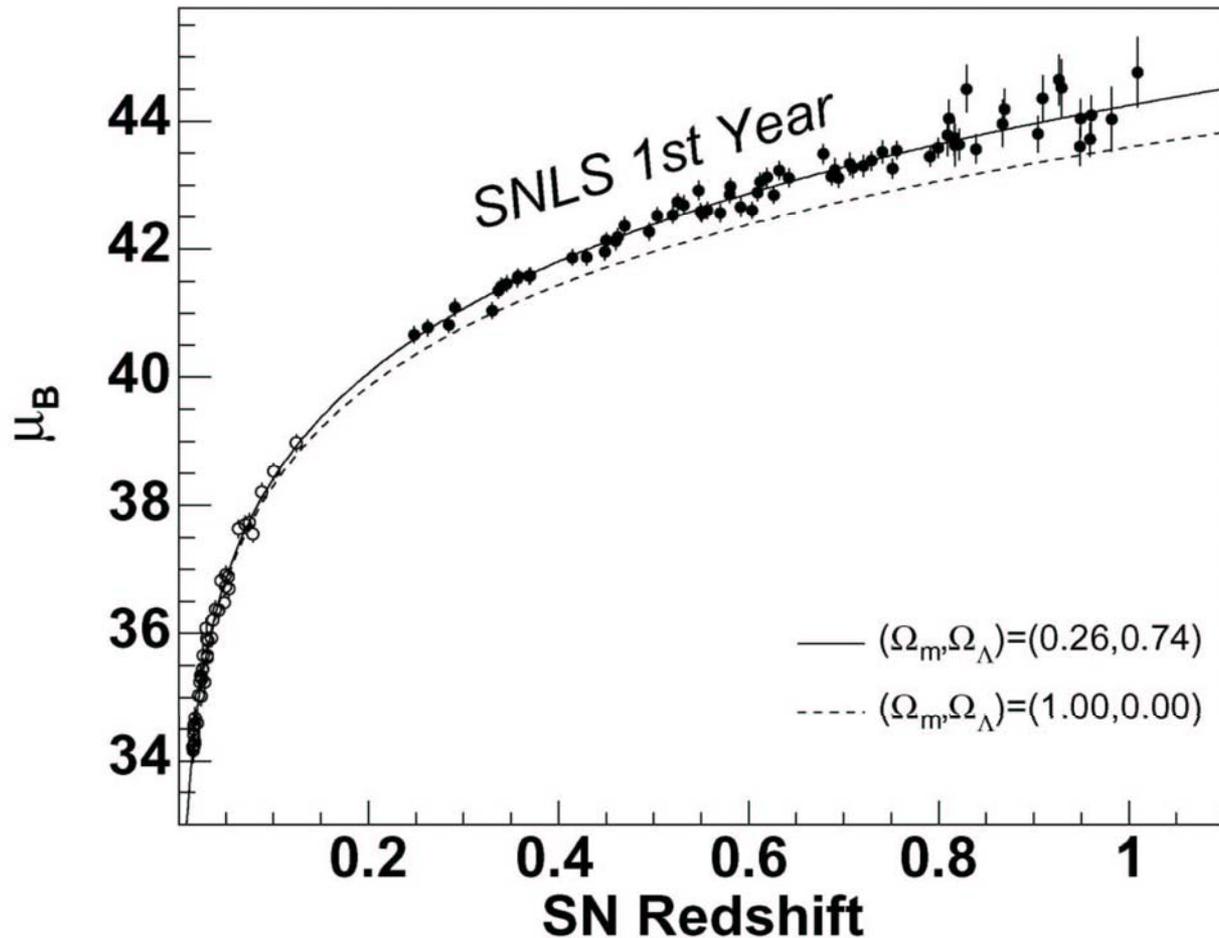
Accelerated expansion
($\Omega_M = 0.3, \Omega_\Lambda = 0.7$)

Decelerated expansion
($\Omega_M = 1$)

Индексы "M" –материя
"Λ" – Вакуум

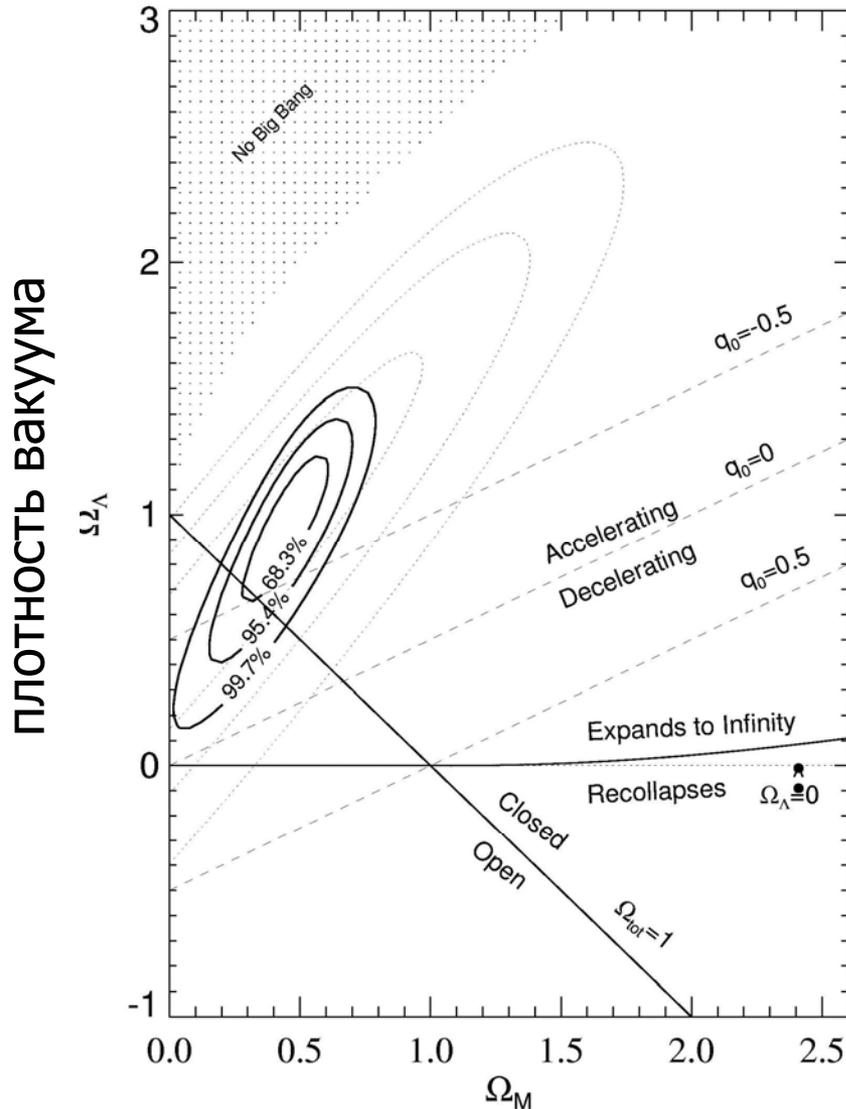
Данные группы SNLS 2005 года

astro-ph/0510447



Данные с телескопа Хаббл

F.Riess et al.
astro-ph/0402512



Измерения прямо показывают, что была эпоха замедления, ускорение началось при $z=0.46\pm 0.13$.

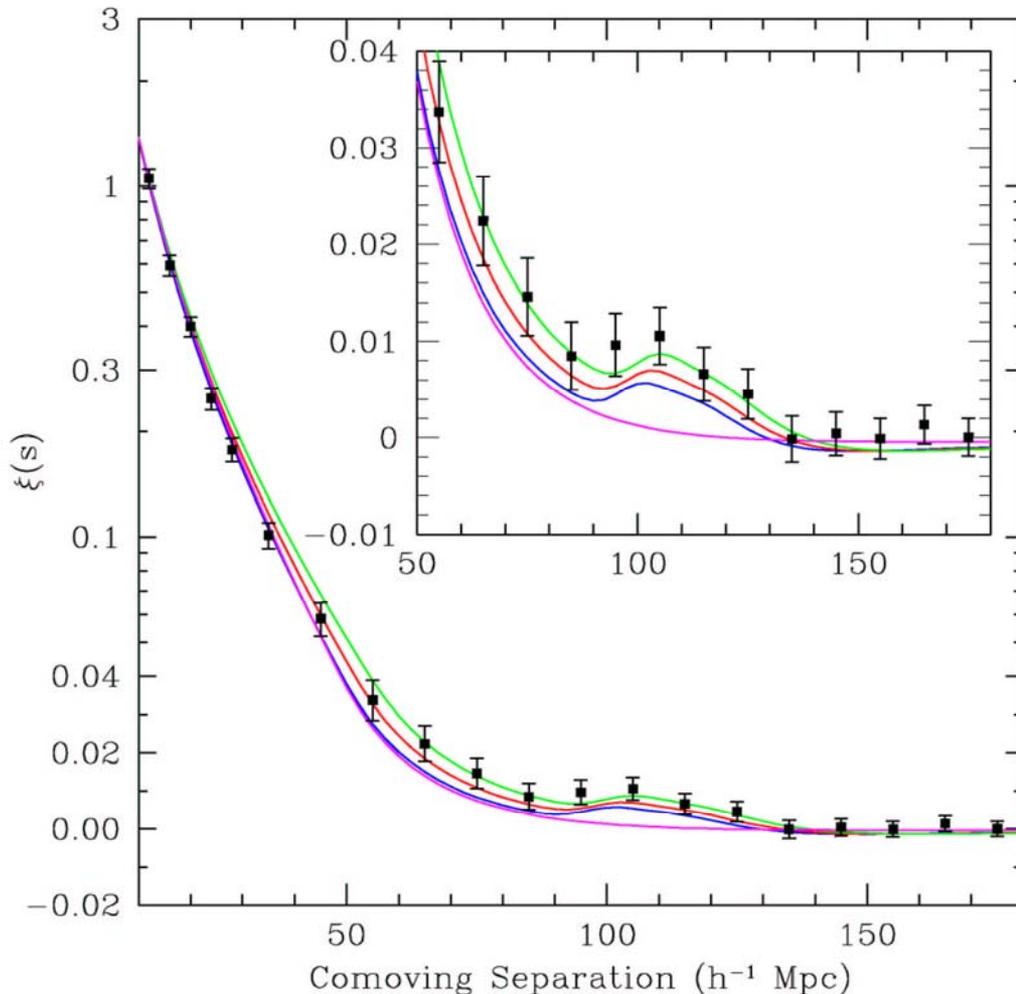
Для плоской Вселенной (след.из рел.изл.)
 $\Omega_m=0.29\pm 0.04$, $\Omega_v=0.71$.

Для вакуумной составляющей
($p=w\rho c^2$) $-1 < w < -0.76$
(-1 соответствует чистому вакууму).

Гипотеза поглощения света серой пылью, образовавшейся при $z>2$, не проходит .

плотность материи (в единицах критической плотности)

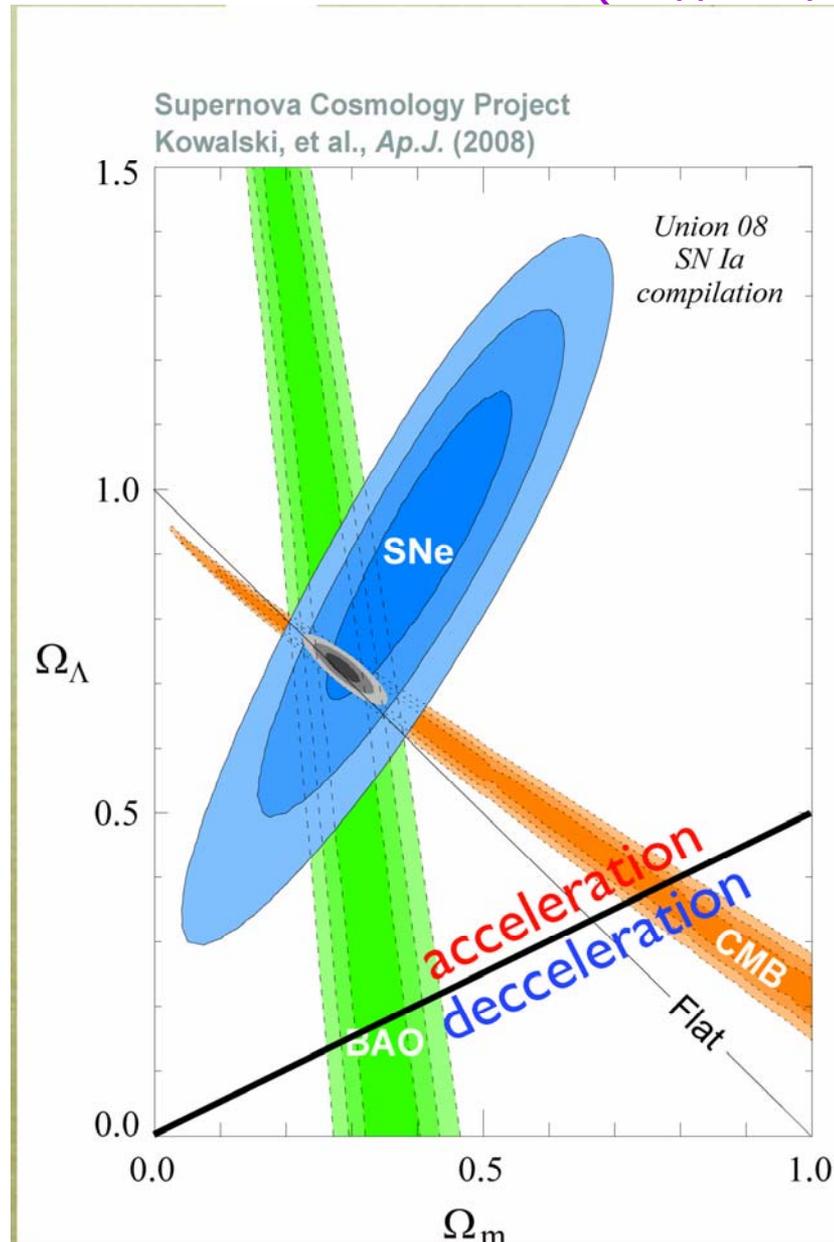
Барионный акустический пик в распределении по расстояниям между галактиками



Флуктуации плотности в ранней Вселенной дают разбегающиеся акустические (плазменные) волны обычной (барионной) материи, в то время как флуктуации темной материи остается на месте. Пик соответствует расстоянию на которое убежала звуковая волна. Эти неоднородности стали зародышами галактик.

Пик соответствует расстоянию между галактиками 500 млн св. лет

Количество материи (видимой и невидимой) и «темной энергии» во Вселенной (в единицах крит. плотности)



Микроволновое реликтовое излучение

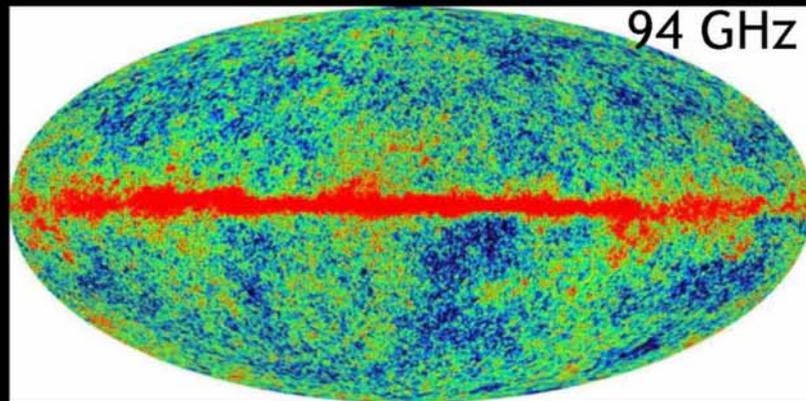
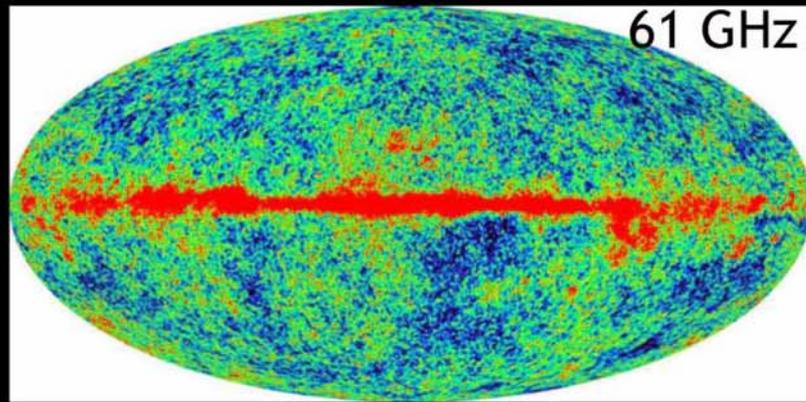
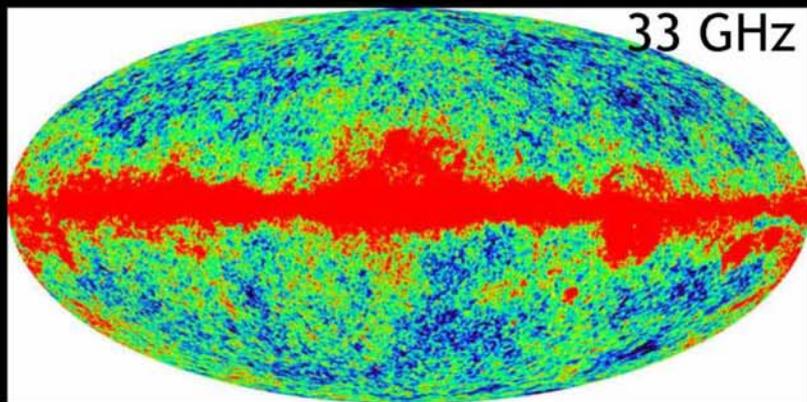
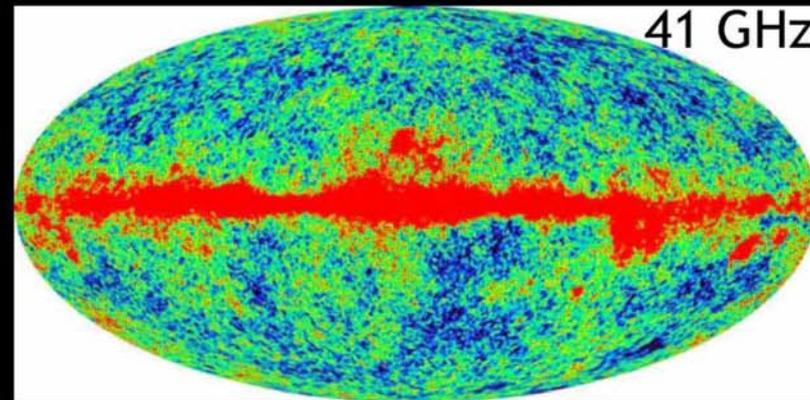
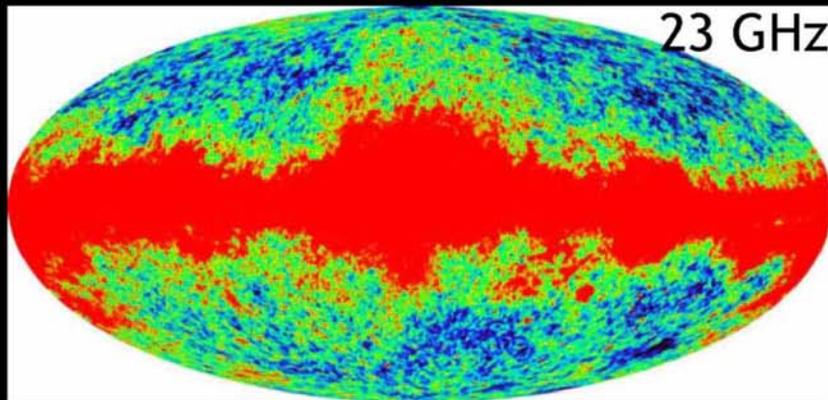
(CMB –cosmic microwave background)

Предсказано в 1946 (Г.Гамов), открыто в 1965 (Пензиас, Вильсон). Около 400 тыс. лет ($z \sim 1100$) после «большого взрыва» температура упала до нескольких тыс. градусов, электроны и протоны рекомбинировали и Вселенная стала прозрачной для фотонов. При расширении температура фотонов упала до $T = 2.725 \pm 0.002^\circ$, плотность $n_\gamma = 410.4 \pm 0.9$. Скорость Земли относительно CMB $V_3 = 370$ км/сек.

Кроме того, что реликтовое излучение является одним из важнейших подтверждений «большого взрыва», оно дает уникальные данные о ранней истории вселенной (инфляция в первые доли секунды), ее геометрии и составе.

Основной источник информации: анизотропия реликтового излучения на относительном уровне $\Delta T/T \sim 10^{-5}$, открытом в 1992 г. (COBE). Нобелевская премия 2006 г.

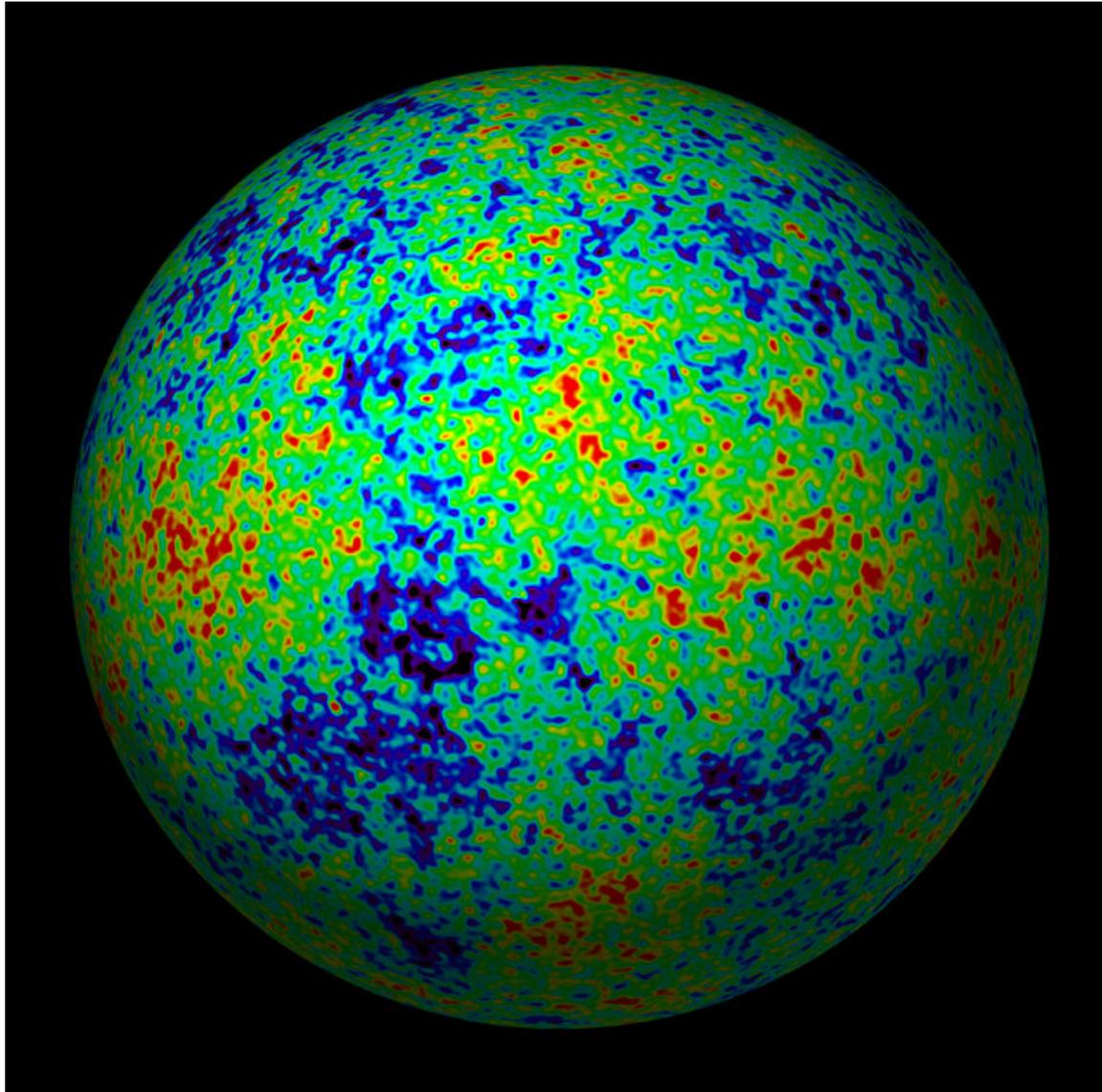
WMAP Sky Maps: 23 to 94 GHz



- Absolute Calibration: 0.5%
- Bandwidth: ~20%
- Beam FWHM: 0.85° (23 GHz) to 0.21° (94 GHz)
- Systematic around $15\mu\text{K}^2$ for C_2^{TT} vs the $\sim 1000\mu\text{K}^2$ nominal TT and ~ 100 (EE), and less for higher l

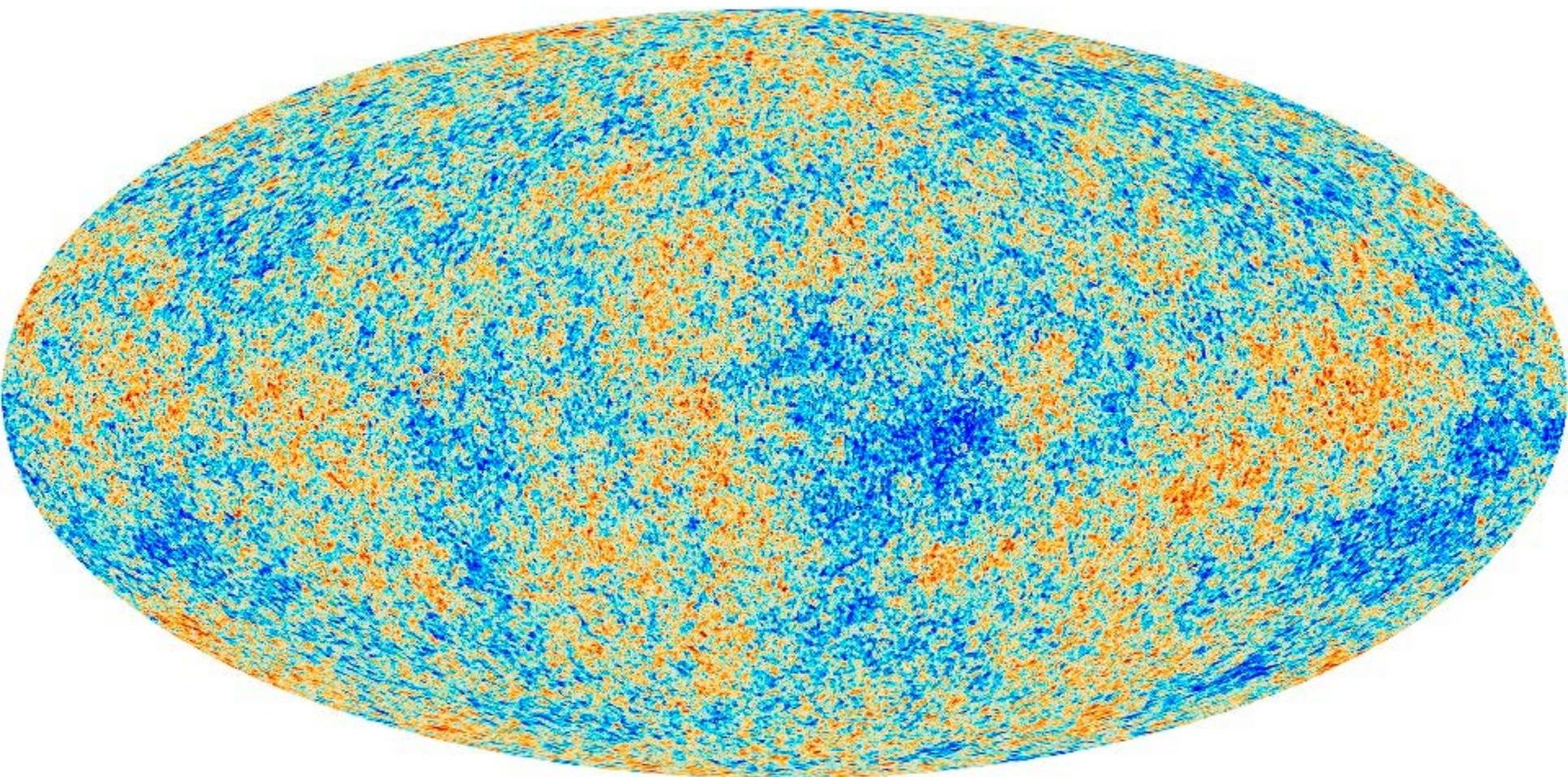
Микроволновая карта неба (WMAP)

Характерный масштаб температурных пятен $\sim 1^\circ$

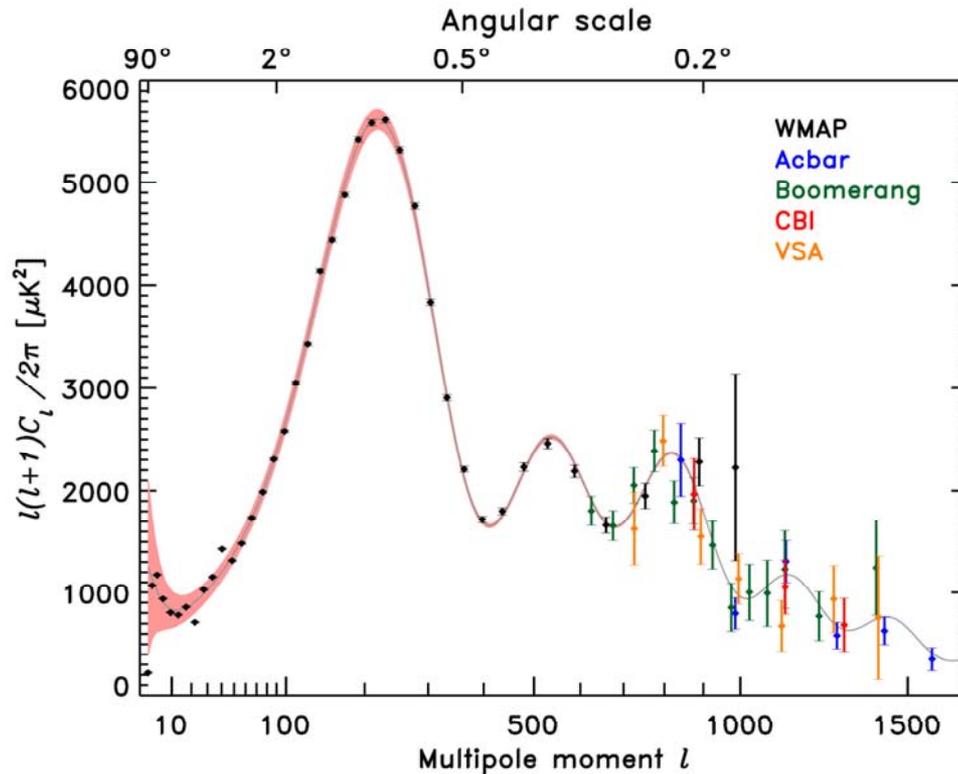


$$\Delta T/T \sim 10^{-5}$$

Еще более точная температурная карта,
полученная косм. телескопом Planck



Спектр мультипольных гармоник СМВ



Происхождение пиков – звуковые волны зародившиеся из квантовых флуктуаций в первые моменты жизни Вселенной, инфляционная теория хорошо описывает данные и по положению и высоте пиков позволяет найти многие параметры Вселенной с высокой точностью.

Так положение первого пика $\sim 1^\circ$, говорит о том, что Вселенная плоская: $\Omega=1\pm 0.015$.

Основные результаты полученные из СМВ

CMB temperature	T_{CMB}	$2.275 \pm 0.002 \text{ K}$	
total density	Ω_{tot}	1.02 ± 0.02	
matter density	Ω_{m}	0.27 ± 0.04	
baryon density	Ω_{b}	0.044 ± 0.004	
Hubble constant	h	$0.71^{+0.04}_{-0.03}$	
baryon-to-photon ratio	η	$6.1^{+0.3}_{-0.2} \times 10^{-10}$	
decoupling redshift	z_{dec}	1089 ± 1	
age of the Universe	t_0	$13.7 \pm 0.2 \text{ Gyr}$	
age at decoupling	t_{dec}	$379^{+8}_{-7} \text{ kyr}$	
reionisation redshift (95% c.l.)	z_{r}	20^{+10}_{-9}	~ 10
reionisation optical depth	τ	0.17 ± 0.04	~ 0.1

Крупно-масштабные структуры во вселенной

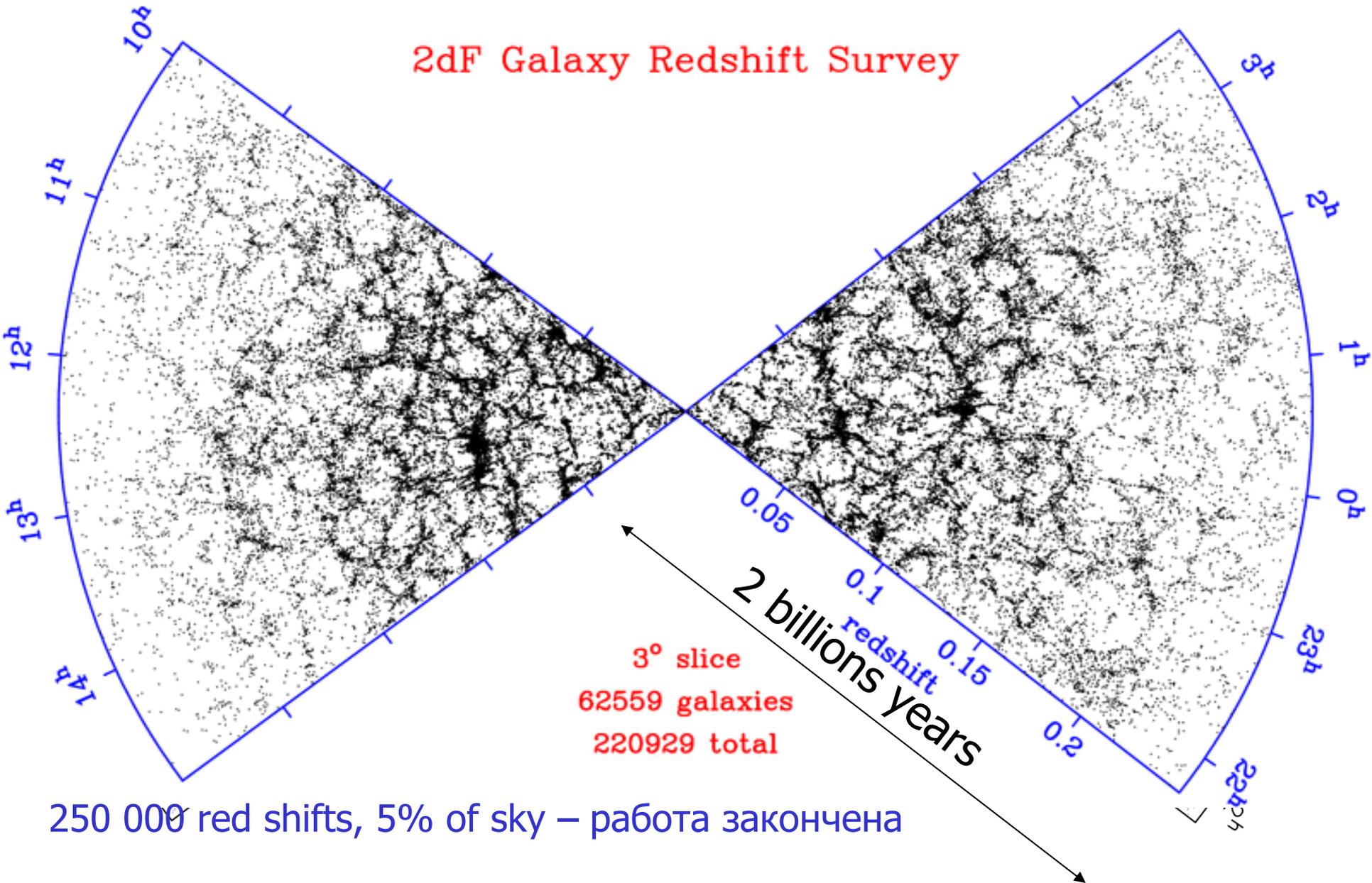
В момент рекомбинации неоднородность барионной материи составляла 10^{-5} при $z \sim 1000$, сейчас ~ 1 , есть звезды, галактики, скопления галактик, суперскопления.

Структуры образовались за счет неустойчивости Джинса. Изучение структур при разных z показывает, что **сначала образовывались малые структуры, затем большие**. Для пылевидной Вселенной неоднородности $\delta \propto a(t) \propto (1+z)^{-1}$, если 10^{-5} при $z=1000$, 10^{-2} сейчас - **не проходит!**

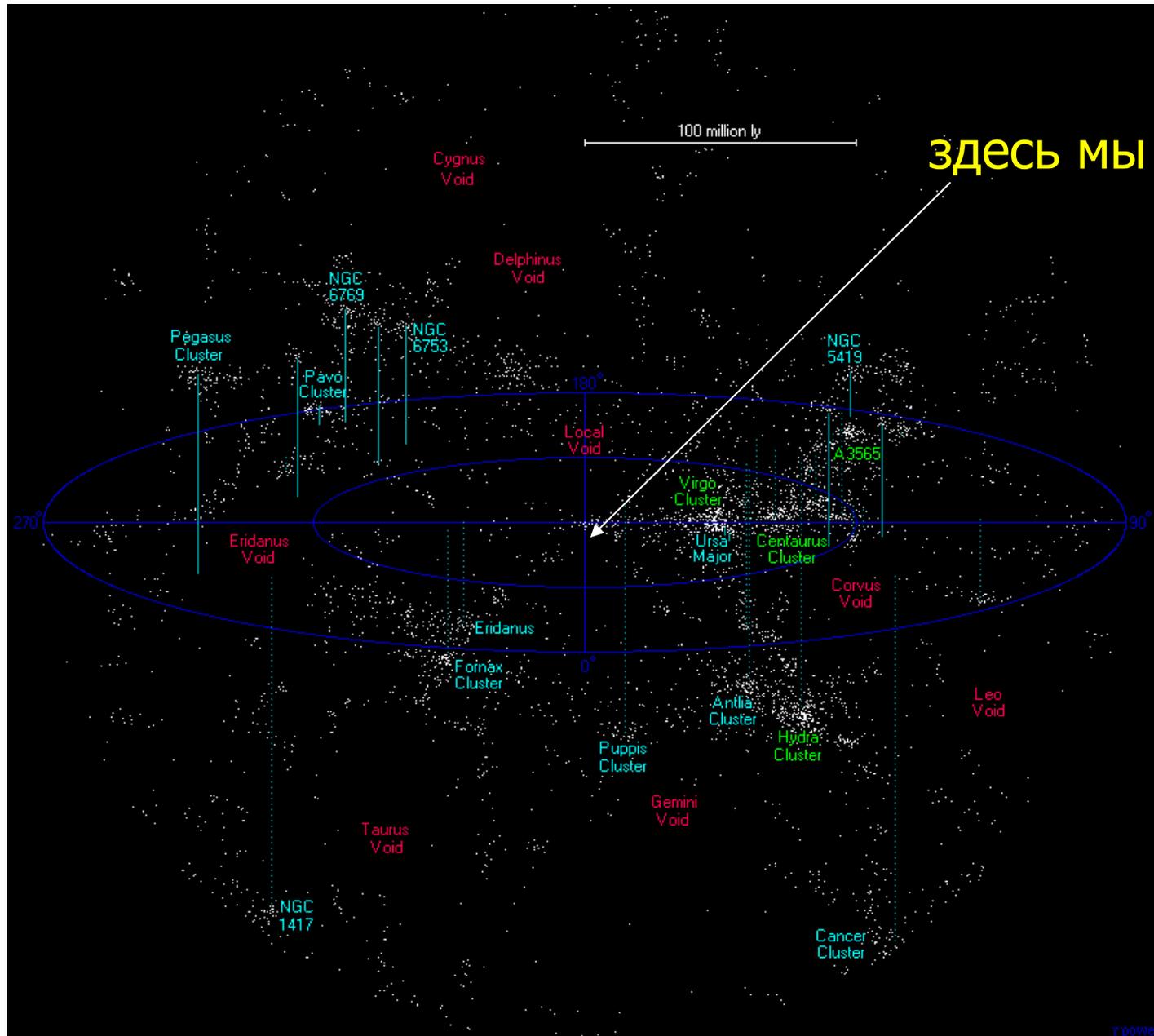
Моделирование ($\sim 10^9$ частиц) показывает, что такое возможно только если предположить существование «**холодной темной материи**» слабо взаимодействующей с обычной материей, которая **начала группироваться еще до рекомбинации**.

Томограмма вселенной

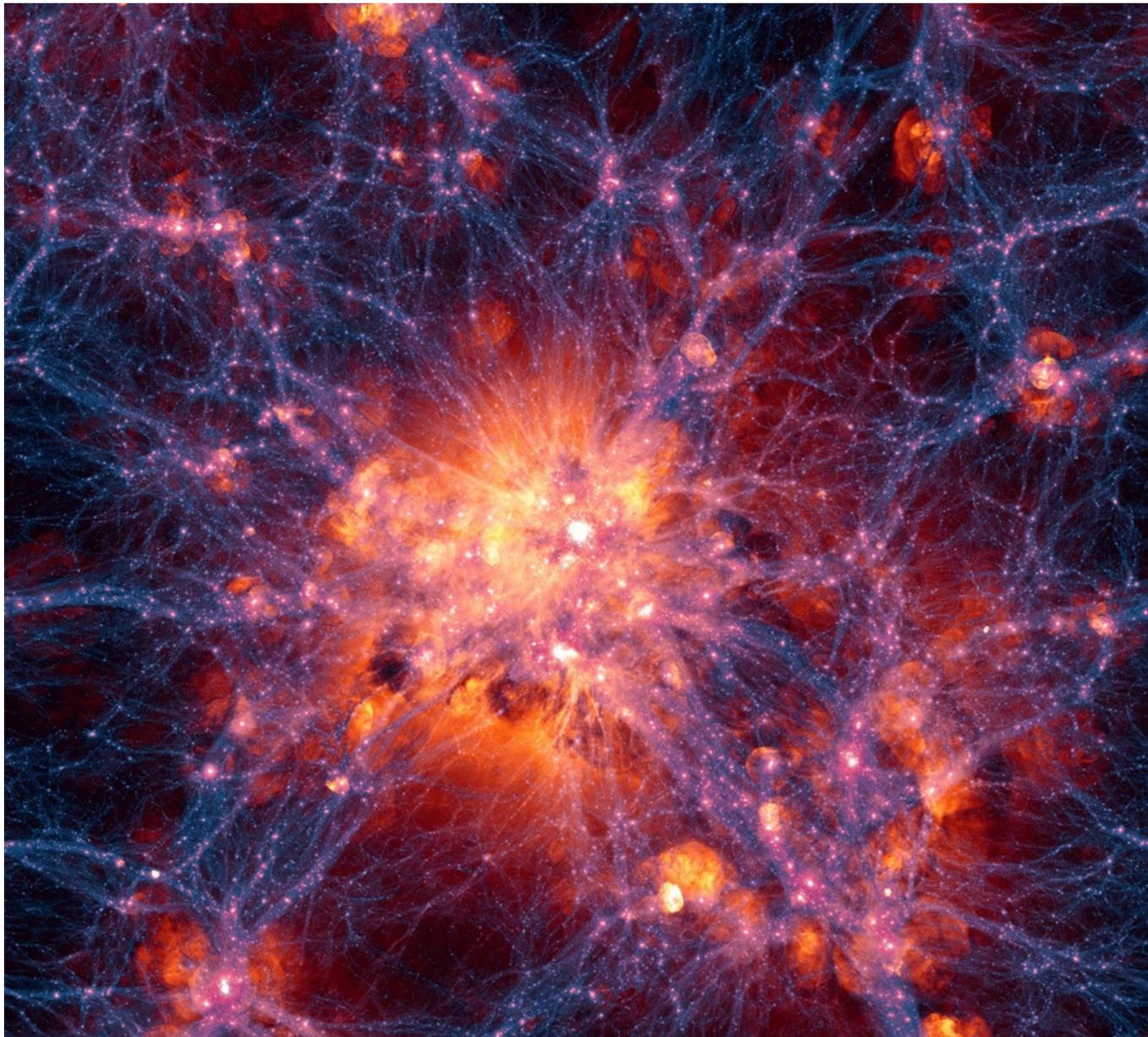
2dF Galaxy Redshift Survey



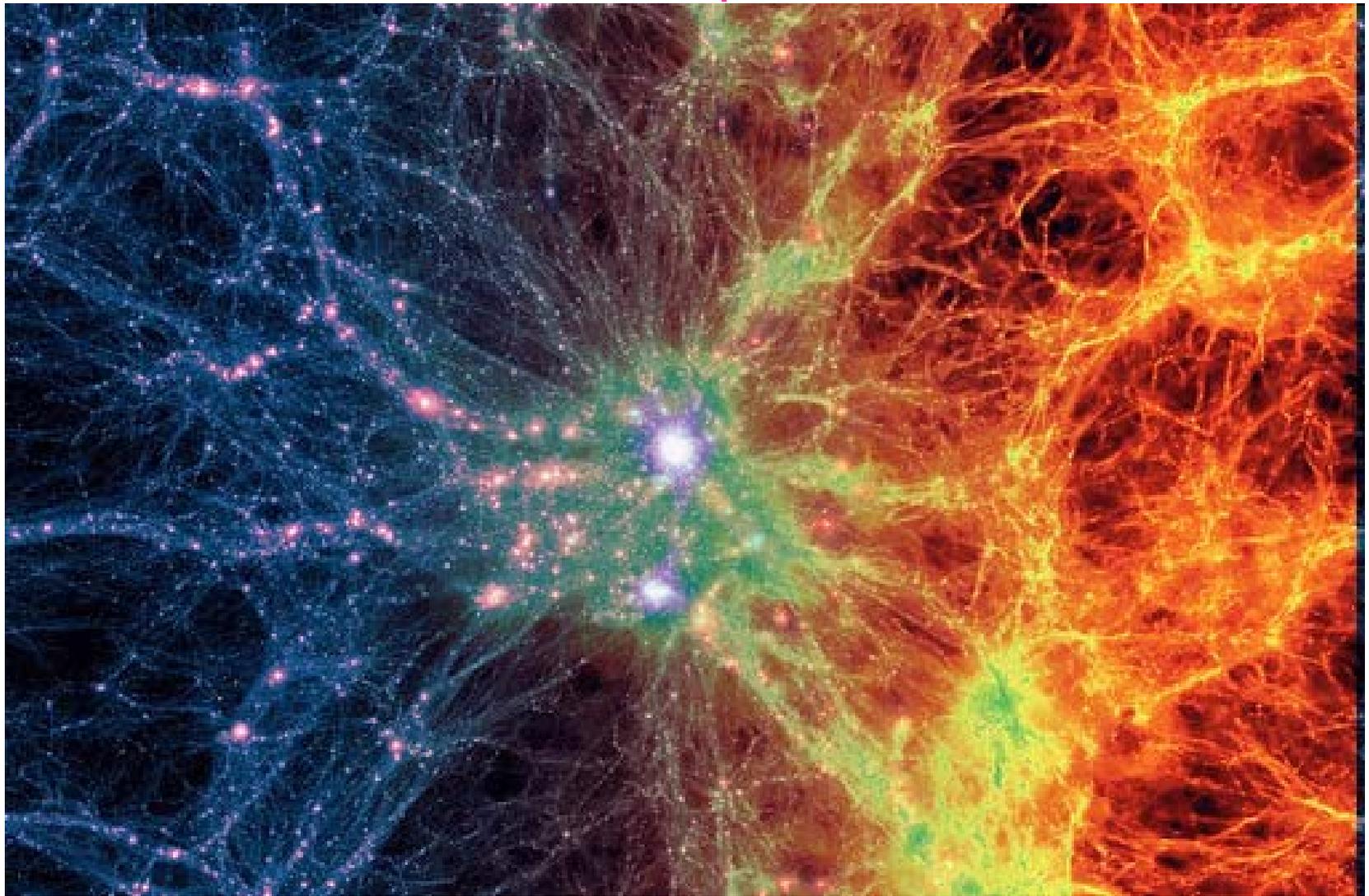
Локальный суперкластер Virgo



Моделирование Вселенной 2014 год



Очень похоже на реальность



Моделирование вселенной от 12 млн лет до наших дней (14 млрд. лет).
10 млрд. клеток, размер области 300 млн. св. лет, образовалось 40 тыс.
галактик, 16 млн часов компьютерного времени

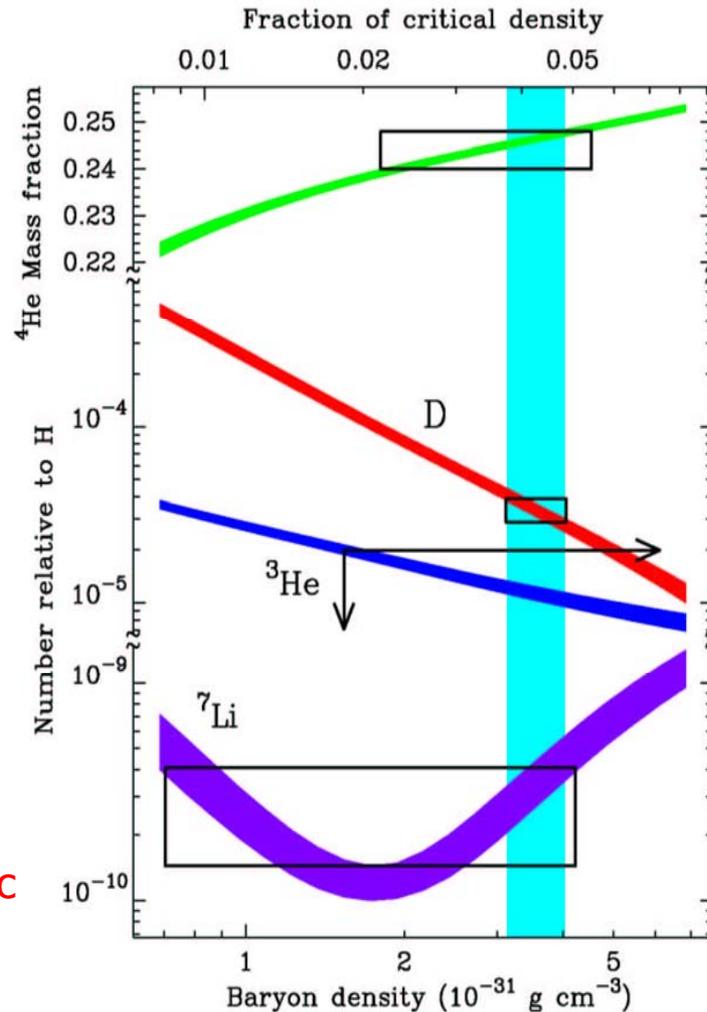
Определение плотности барионной материи по космологическому нуклеосинтезу

При высокой температуре вселенной плотности нейтронов и протонов были одного порядка. При $T < 1$ ГэВ нейтроны перестали образовываться и их к-во стало быстро уменьшаться. Выжили только те, которые вошли в состав легких ядер (D, He, Li...). По их плотности находится плотность барионной материи.

Из концентрации D следует

$$\rho_b = 3.8 \pm 0.2 \cdot 10^{-31} \text{ г/см}^3 \sim 0.04 \rho_c$$

(по погл. света от квазаров в газовых облаках с большим z)



Определение плотности темной материи по кластерам галактик

Изучая характеристики кластеров галактик удастся определить их полную массу и массу барионной материи.

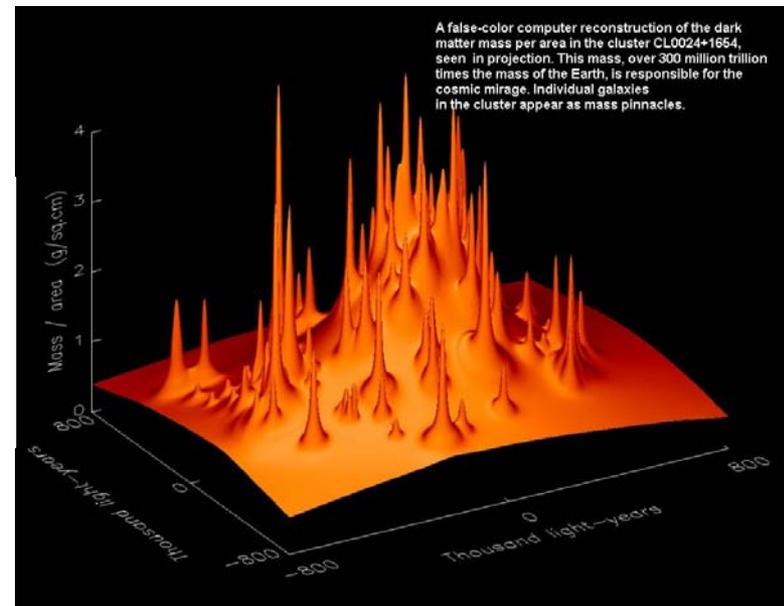
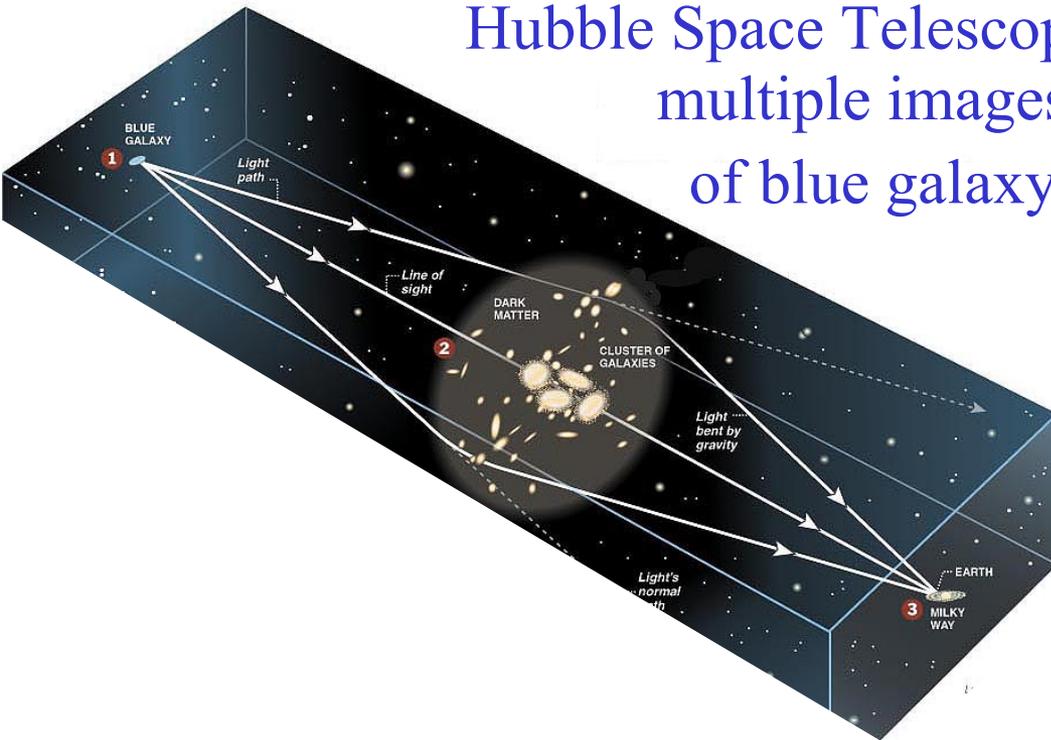
Барионная масса следует из наблюдаемого рентгеновского излучения горячего газа.

Полная масса наиболее точно определяется по гравитационному линзированию.

Для 50 кластеров отношение полной и барионной масс $M_m/M_B \sim 8$. Считая, что это отношение в кластерах и вселенной равны и используя ρ_B из нуклео-синтеза, получаем $\rho_m \sim 0.04 \cdot 8 \sim 0.3 \rho_c$, в согласии со сверхновыми и СМВ.

Гравитационное линзирование кластеров

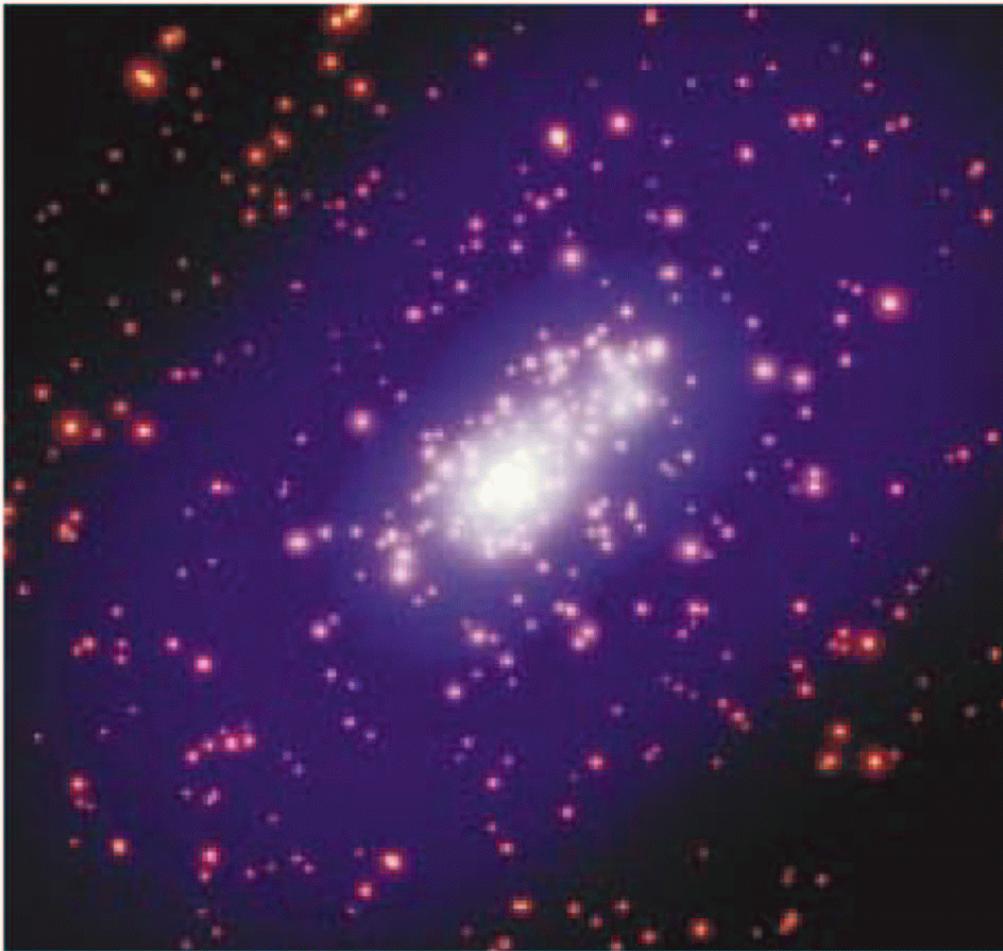
Hubble Space Telescope
multiple images
of blue galaxy



Гигантский кластер галактик

4.5 млрд. св. лет
от Земли

Невидимая темная
материя, рассчитанная
по гравитационному
линзированию,
показана голубым
цветом



DARK MATTER MAP The total mass within giant galaxy cluster CL0025+1654 is the sum of the galaxies themselves, seen in yellow as ordinary luminous matter, plus the cluster's invisible dark matter shown in blue. The cluster's dark matter is not evenly distributed, but follows the clumps of luminous matter closely. *Credit: J.-P. Kneib Observatoire Midi-Pyrenees, Caltech. ESA, NASA*

Состав вселенной

Фотоны	0.005%
Нейтрино	<1.5%
Барионы/звезды	4.5/0.5%
Темная (небарионная) материя	25%
Темная энергия	70%

Общая плотность близка к ρ_c (плоская вселенная)

Данные в согласии с инфляционной моделью (критическая плотность, изотропия и анизотропия рел. излучения)

Однако, темная материя и темная энергии – полная загадка.

Замечания о энергии вакуума

Вселенная вероятно уже проходила фазу вакуумно-подобного состояния в-ва при $t \sim 10^{-43} - 10^{-30}$ (?) сек – инфляционная модель: $a(t) \propto \exp(Ht)$, где $Ht > 50$, которая объясняет однородность, спектр флуктуаций...

Что сейчас определяет плотность вакуума? Энергия “нулевых” (квантовых) колебаний электромагнитного поля превышают наблюдаемую плотность в 10^{120} раз! Привлечение SUSY уменьшает расхождение до 10^{55} раз (бозоны и фермионы дают в энергию вакуума противоположные вклады). Пока ответа нет.

Большой вопрос – почему плотность вакуума в настоящее время ненулевая и примерно равна плотности материи? На фоне таких больших порядков такие “совпадения” кажутся подозрительными.

Происхождение массы Вселенной

Из близости к критической плотности Вселенной следует $\Omega=1\pm 0.01$, следует что ее размер по крайней мере в 100 раз больше расстояния во горизонта видимости (ct), т.е. более 10^{30} см. Отсюда масса $M > \rho R^3 \sim 10^{-29} \cdot 10^{90} \sim 10^{61}$ г.

Единственная величина с размерностью массы, которую можно составить из фундаментальных констант это масса Планка $m_p = (\hbar c / G)^{1/2} = 2 \cdot 10^{-5}$ г

Возможный ответ: на начальной стадии инфляции Вселенная состояла из **вакуумно-подобного вещества** с $P = -\rho c^2$. Объем возрастал, а плотность не менялась, т.е. масса росла. Затем произошел фазовый переход и это субстанция превратилось в обычную материю. Сумма отрицательной энергии гравитационного взаимодействия и положительной энергии материи равна (или близка) к нулю!

Темная материя

Темной энергии больше всего, но проявляется она только на космических масштабах, относ. плотность в Галактике $\sim 10^{-5}$.

Темной материи в Галактике на в среднем в 5-6 раз больше, чем обычной материи.

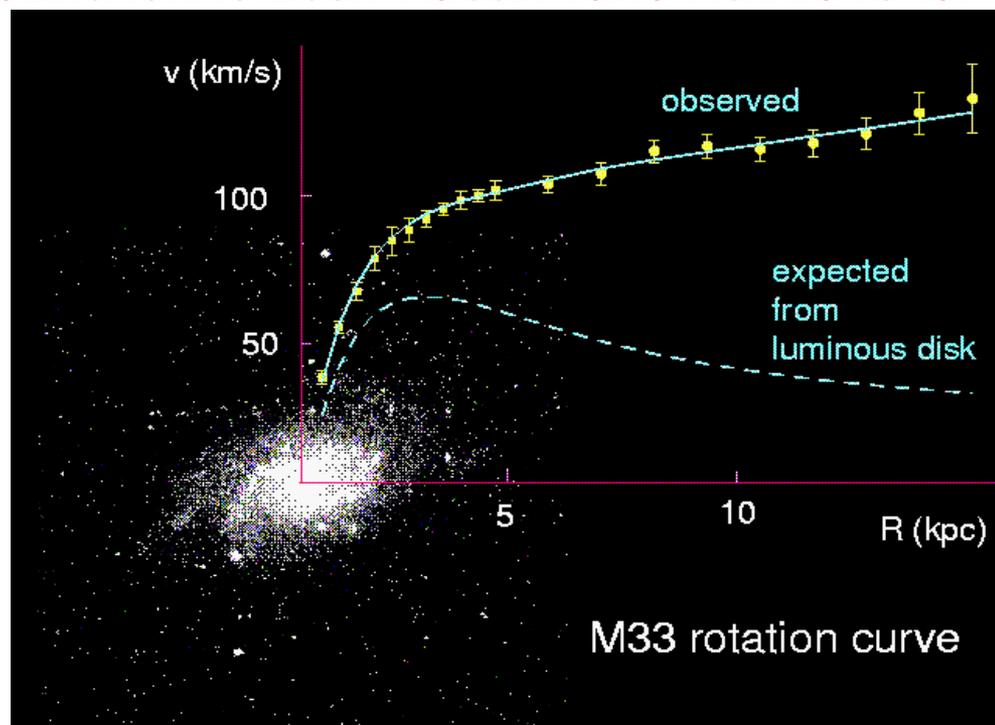
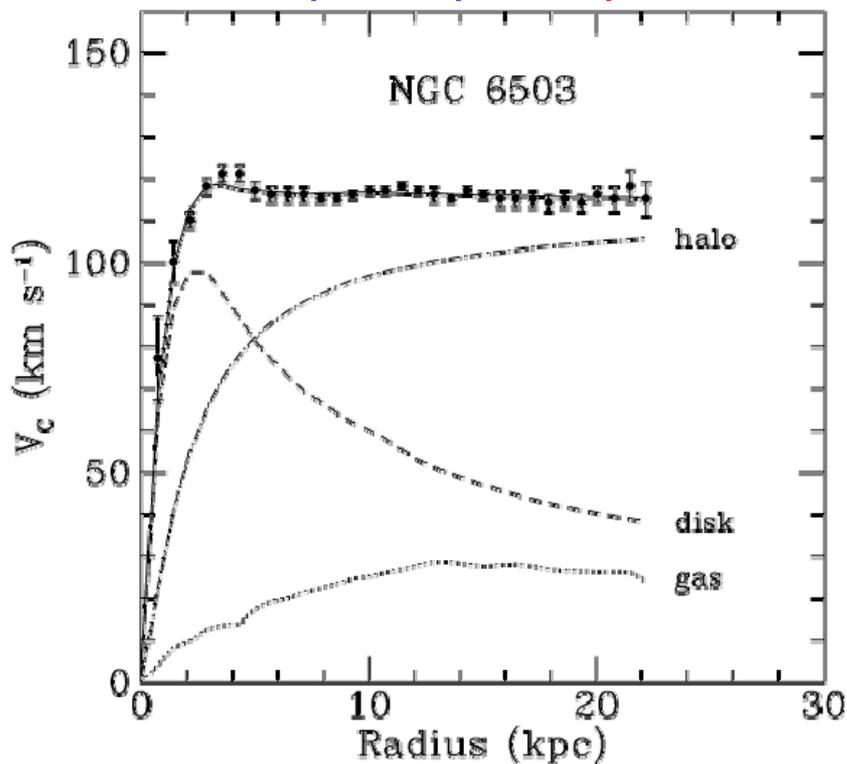
Темная материя – это, скорее всего, неизвестный сорт элементарных частиц, которые пытаются зарегистрировать, их (и их нестабильных партнеров) можно рождасть на ускорителях, тогда можно будет понять их природу.

Галактическая темная материя



F. Zwicky, 1937

Давно известно, что зависимость линейной скорости звезд в галактиках не согласуется с ожидаемой из распределения видимой материи. Еще нужно добавить сферическое гало с размерами больше видимого размера. **Барионное объяснение всей массы гало исключено!**



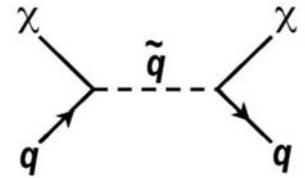
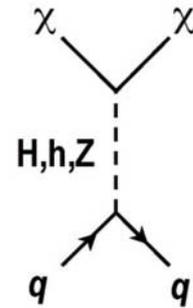
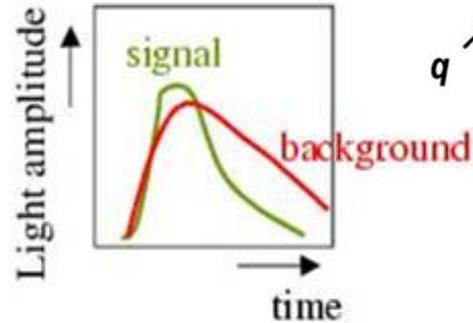
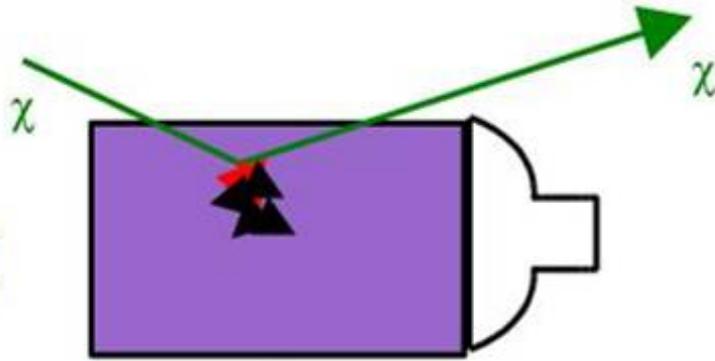
Кандидаты на темную материю

- **Нейтрино** – не проходят, мало
- **Аксионы** - гипотетические частицы, нужные для некоторых теорий
- **WIMPS** (Weakly Interacting Massive Particles). Из всех экспериментальных фактов о вселенной это наиболее вероятные кандидаты на темную материю. Возможно это нейтралино - наиболее легкие стабильные суперсимметричные (SUSY) частицы, родились когда Вселенная была горячей.

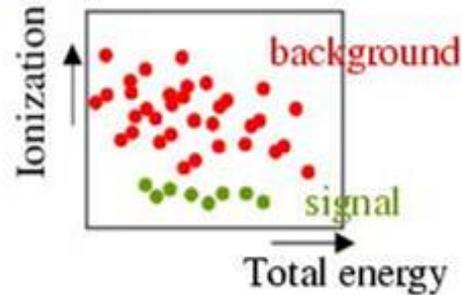
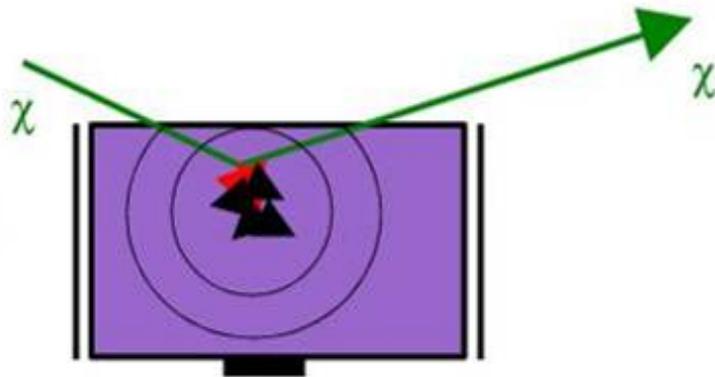
Examples of Direct WIMP Detectors

Rejection of background is the critical issue

Na I

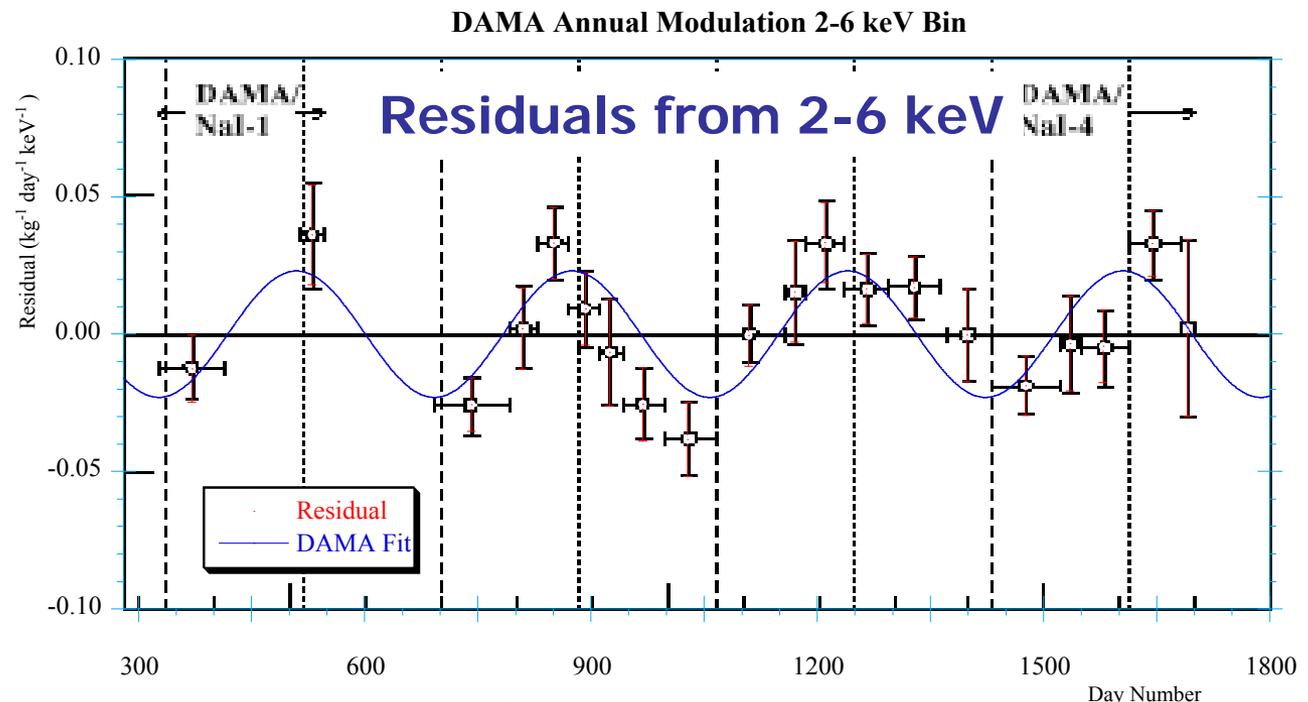
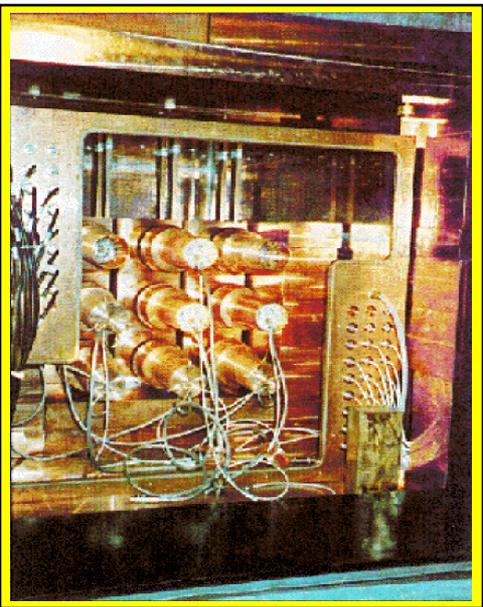


Ge



DAMA - NaI Annual Modulation

- Total 4 years annual modulation - 57986 kg.days
- Annual modulation few % of signal



Этот результат противоречит новым, более чувствит. экспериментам (см. далее). Кроме того, недавно обнаружили, что нейтронный фон в Grand Sasso имеет такие же сезонные вариации!

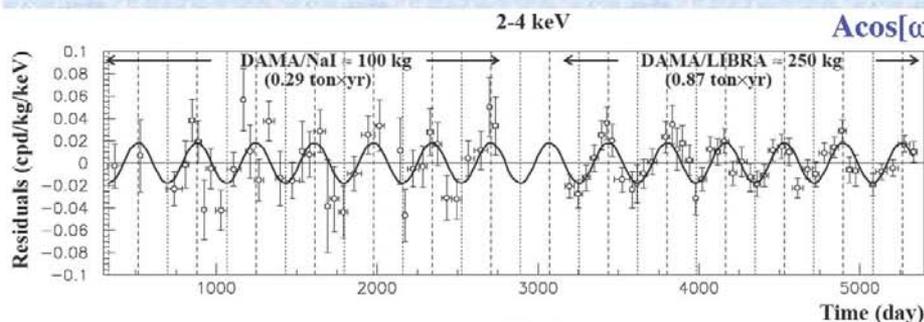
DAMA/LIBRA – более полные данные

Model Independent Annual Modulation Result

DAMA/NaI (7 years) + DAMA/LIBRA (6 years) Total exposure: 425428 kg×day = 1.17 ton×yr

experimental single-hit residuals rate vs time and energy

EPJC67(2010)39; see also refs therein



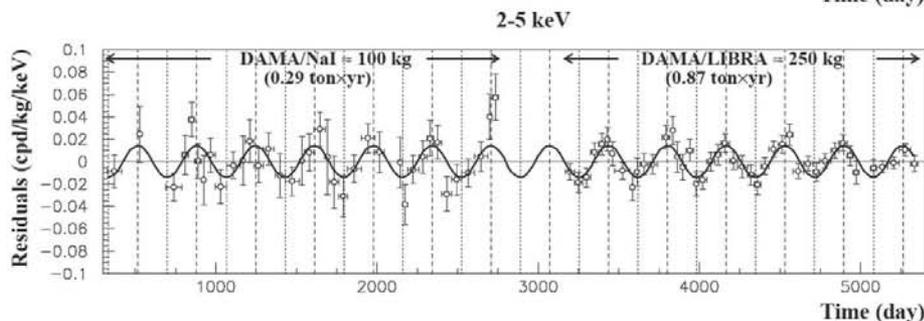
2-4 keV

$A = (0.0183 \pm 0.0022)$ cpd/kg/keV

$\chi^2/\text{dof} = 75.7/79$ **8.3 σ C.L.**

Absence of modulation? No

$\chi^2/\text{dof} = 147/80 \Rightarrow P(A=0) = 7 \times 10^{-6}$



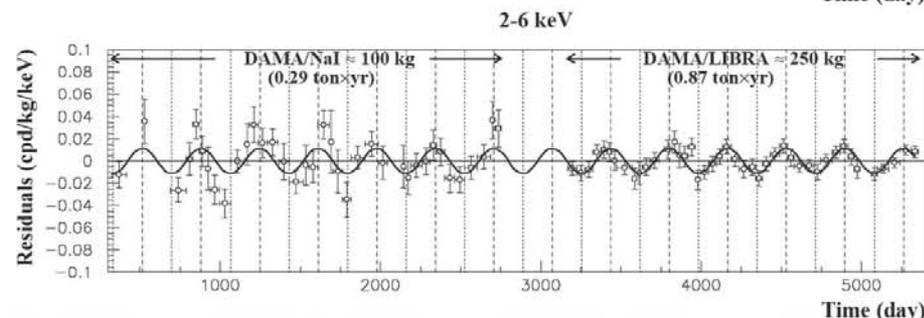
2-5 keV

$A = (0.0144 \pm 0.0016)$ cpd/kg/keV

$\chi^2/\text{dof} = 56.6/79$ **9.0 σ C.L.**

Absence of modulation? No

$\chi^2/\text{dof} = 135/80 \Rightarrow P(A=0) = 1.1 \times 10^{-4}$



2-6 keV

$A = (0.0114 \pm 0.0013)$ cpd/kg/keV

$\chi^2/\text{dof} = 64.7/79$ **8.8 σ C.L.**

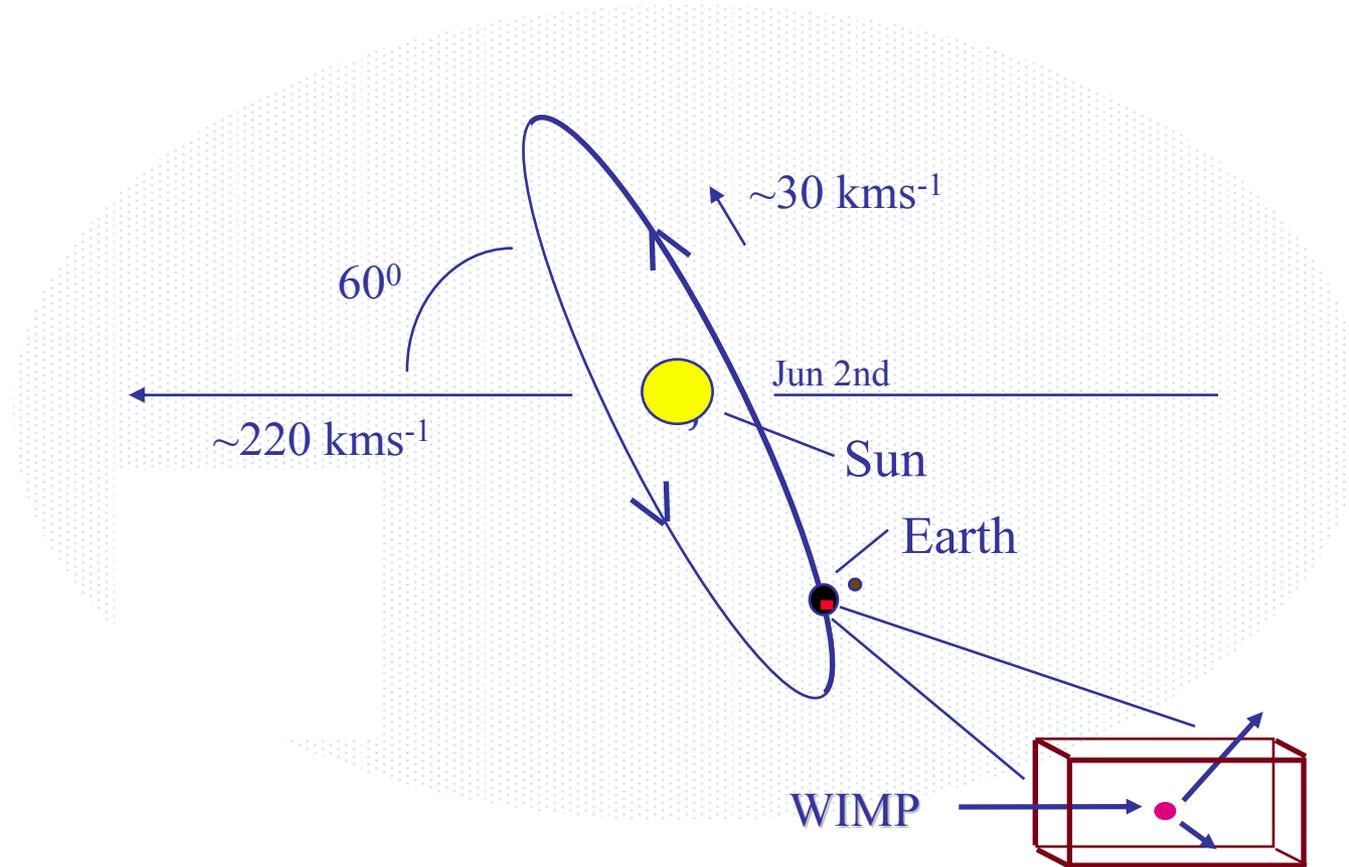
Absence of modulation? No

$\chi^2/\text{dof} = 140/80 \Rightarrow P(A=0) = 4.3 \times 10^{-5}$

The data favor the presence of a modulated behavior with proper features at **8.8 σ C.L.**

Годовые модуляции WIMP

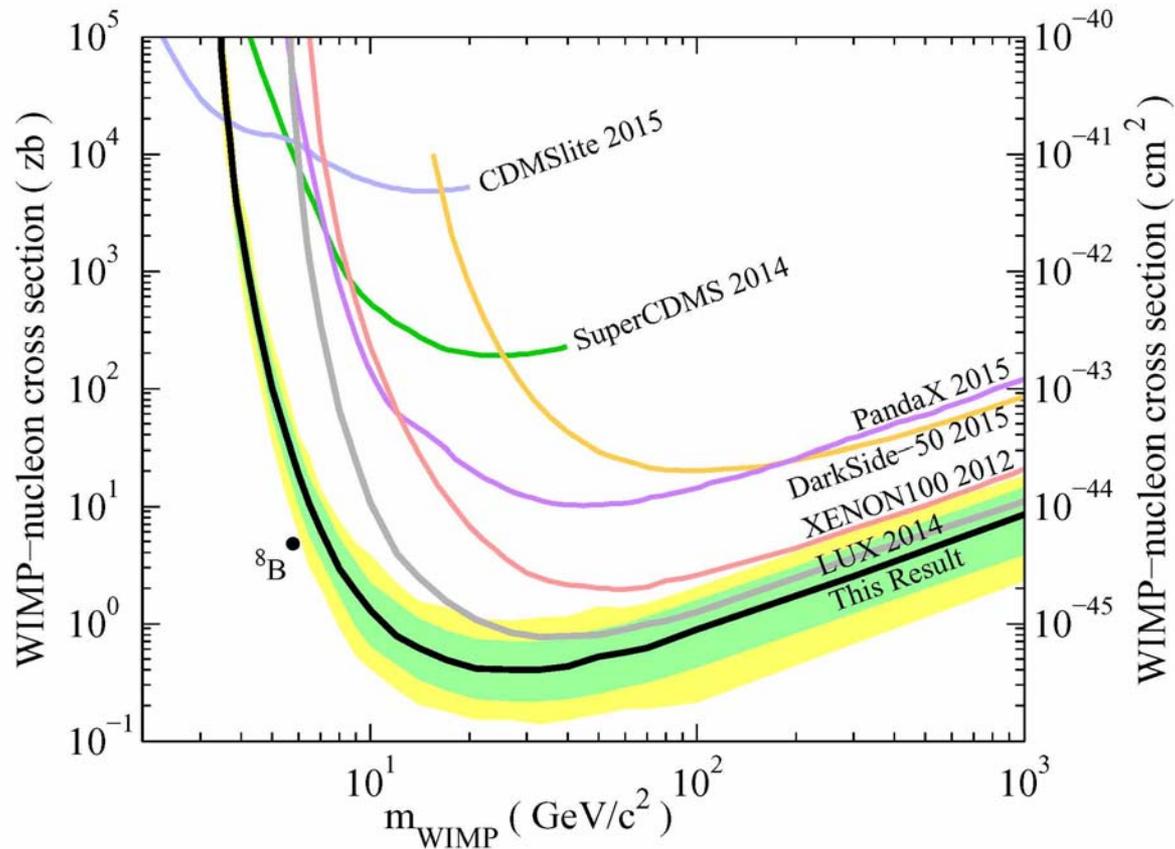
(exp. DAMA)



В июне ожидаемый сигнал на 7% больше, чем в декабре

Результаты по поиску темной материи с детектором из жидкого ксенона (лучший на 12.2015)

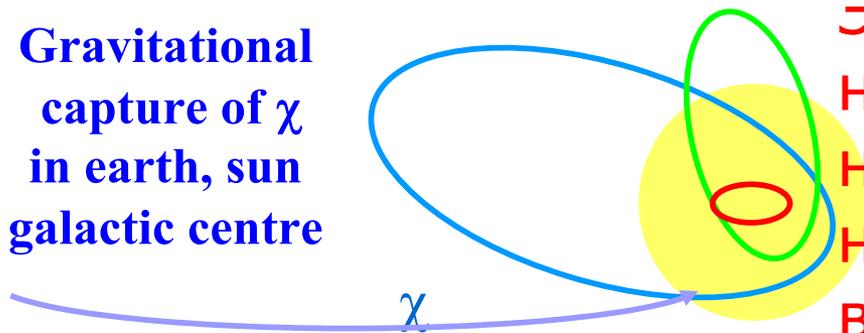
Хенон-двухфазный детектор измеряет ионизационный сигнал и сцинтилляции



Непрямой поиск WIMPS по их аннигиляции в центре Земли, Солнца, Галактики

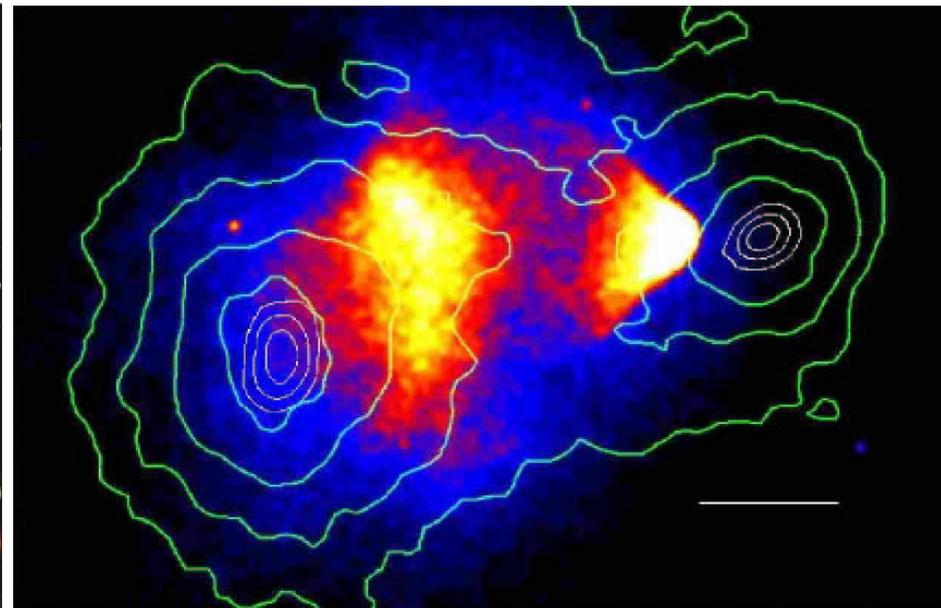
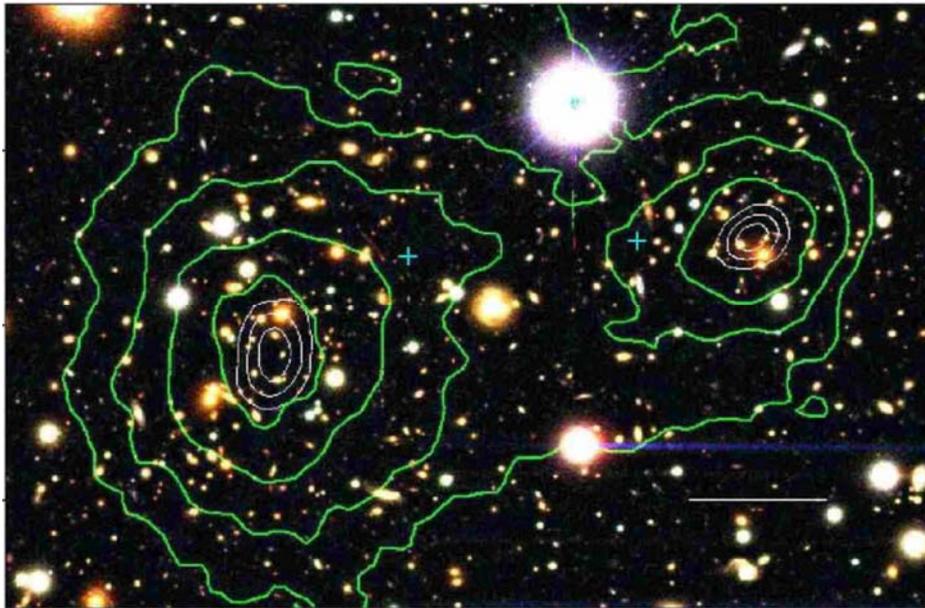
Signature	Experiment
Halo ----- Positron, Antiproton Gamma rays $\chi \chi \rightarrow Z \gamma, \gamma \gamma$	BESS, CAPRICE, AMS, CELESTE, GLAST, VERITAS, MILAGRO,....
Earth, Sun, GC ----- Neutrino $\chi \chi \rightarrow WW, ff$ $W, f \rightarrow \nu X$	SuperK, Baksan,IMB, MACRO AMANDA, ANTARES, Baikal, ...

Gravitational capture of χ in earth, sun galactic centre



Эксперименты уже идут, но пока частицы темной материи не зарегистрировали, о их массе ничего не известно, даже порядок величины.

Прямое свидетельство существования темной материи [astro-ph/0608407](https://arxiv.org/abs/astro-ph/0608407)



Последствия столкновения двух галактических кластеров. Светится обычная материя. Зеленые контуры – распределение гравитирующей материи, найденное по гравитационному линзированию.



Гравитационные волны:
открытие,
первые результаты,
перспективы

В.И. Тельнов
ИЯФ-НГУ



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)

$ds^2 = g_{\mu\nu} dx_\mu dx_\nu$ где $g_{\mu\nu}$ 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

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

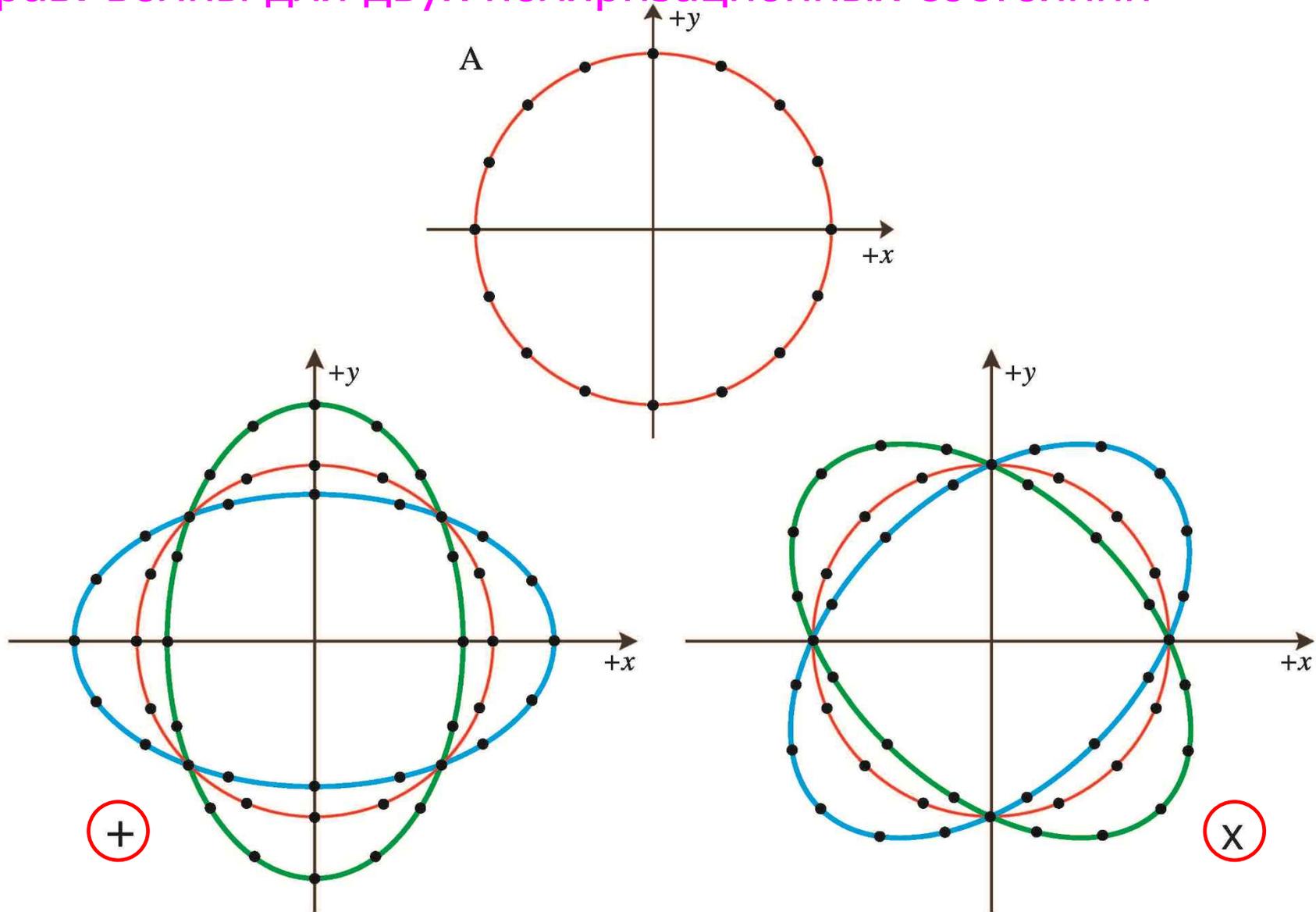
Для двух точек на оси X расстояние меньше на относительную величину $h_+/2$, а для двух точек на оси Y расстояние больше на относ. величину $h_+/2$.

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

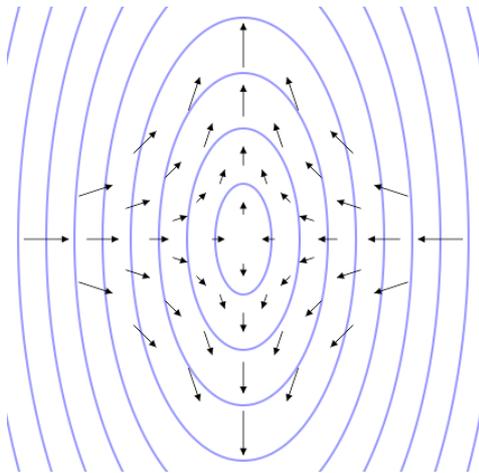
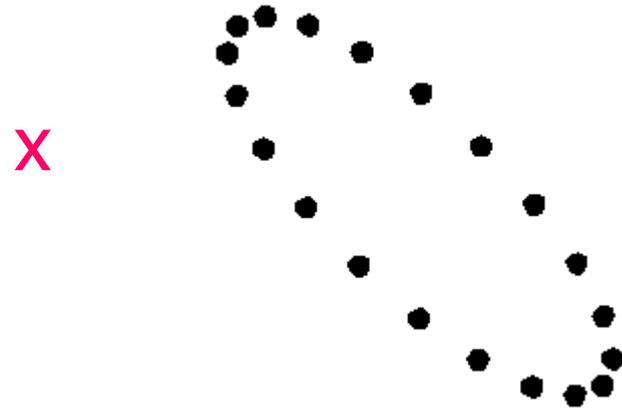
$$\frac{\Delta L}{L} \approx \frac{1}{2} h$$

h - strain (деформация)

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



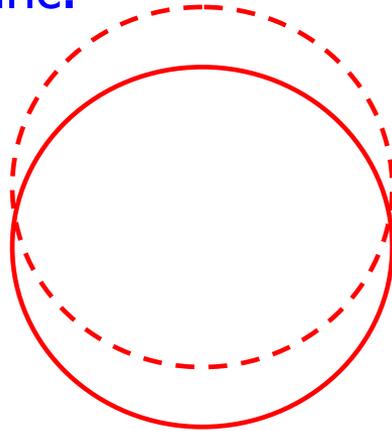
Движение масс, расположенных на окружности, при прохождении грав. волны перпендикулярно плоск. окружности



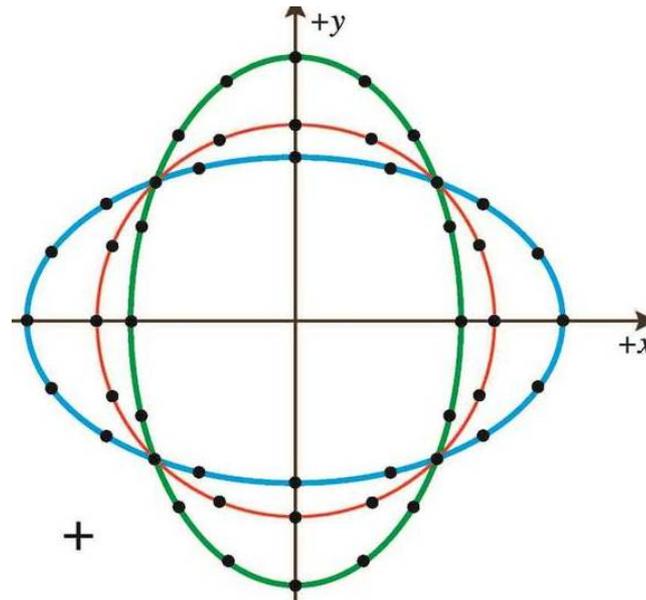
Сложение двух поляризационных состояний (как в ЭМ) может дать циркулярную поляризацию: эллипс поворачивается по- или против часовой стрелки.

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 относительное растяжение пространства на расстоянии r

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

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

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

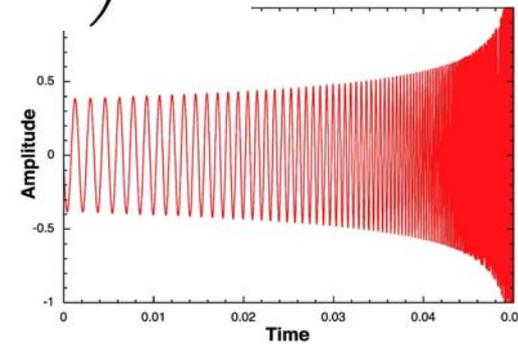
f – частота
D – расстояние

chirp

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

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

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



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

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

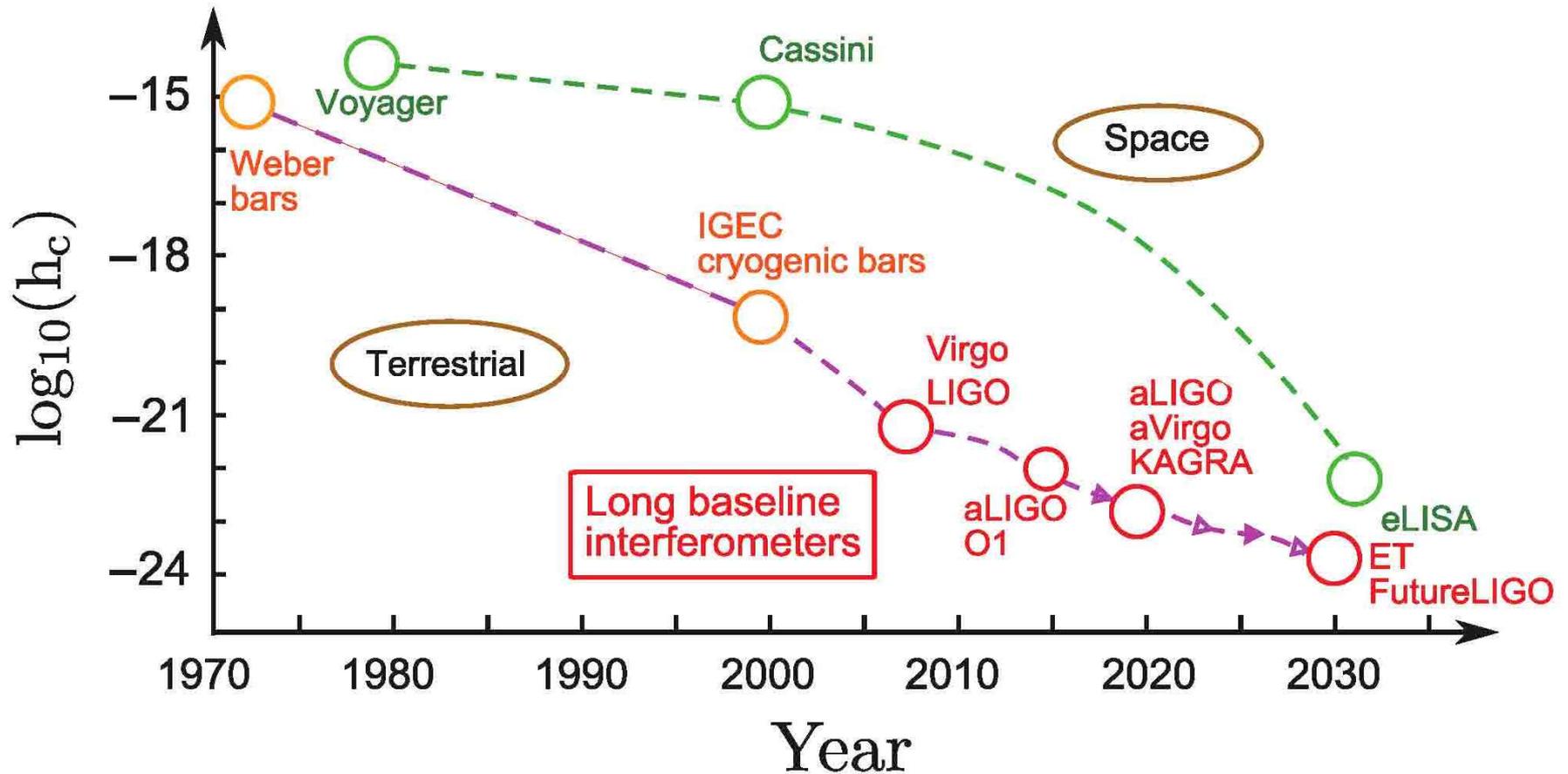
Первая попытка регистрации гравитационные волны

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

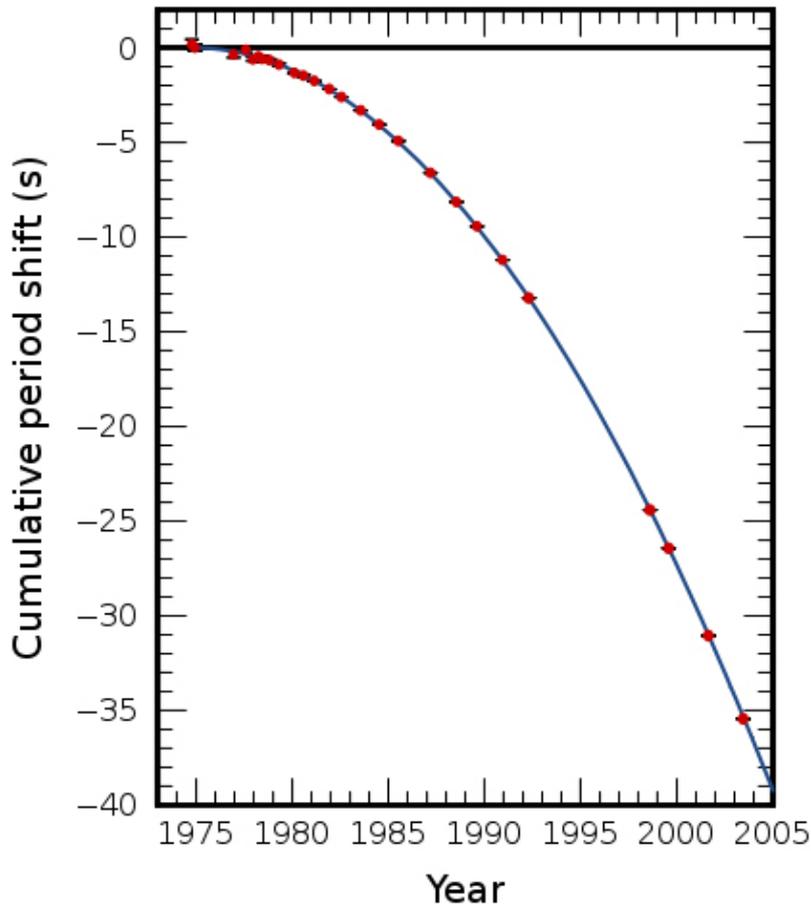
1974 г открыт двойной пульсар, с периодом 7.75 часа. Период уменьшался на 76.6 микросекунд в год в согласии с гравитационным излучением: согласие 0.997 ± 0.002 .

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

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



Nobel Prize on Physics 1993



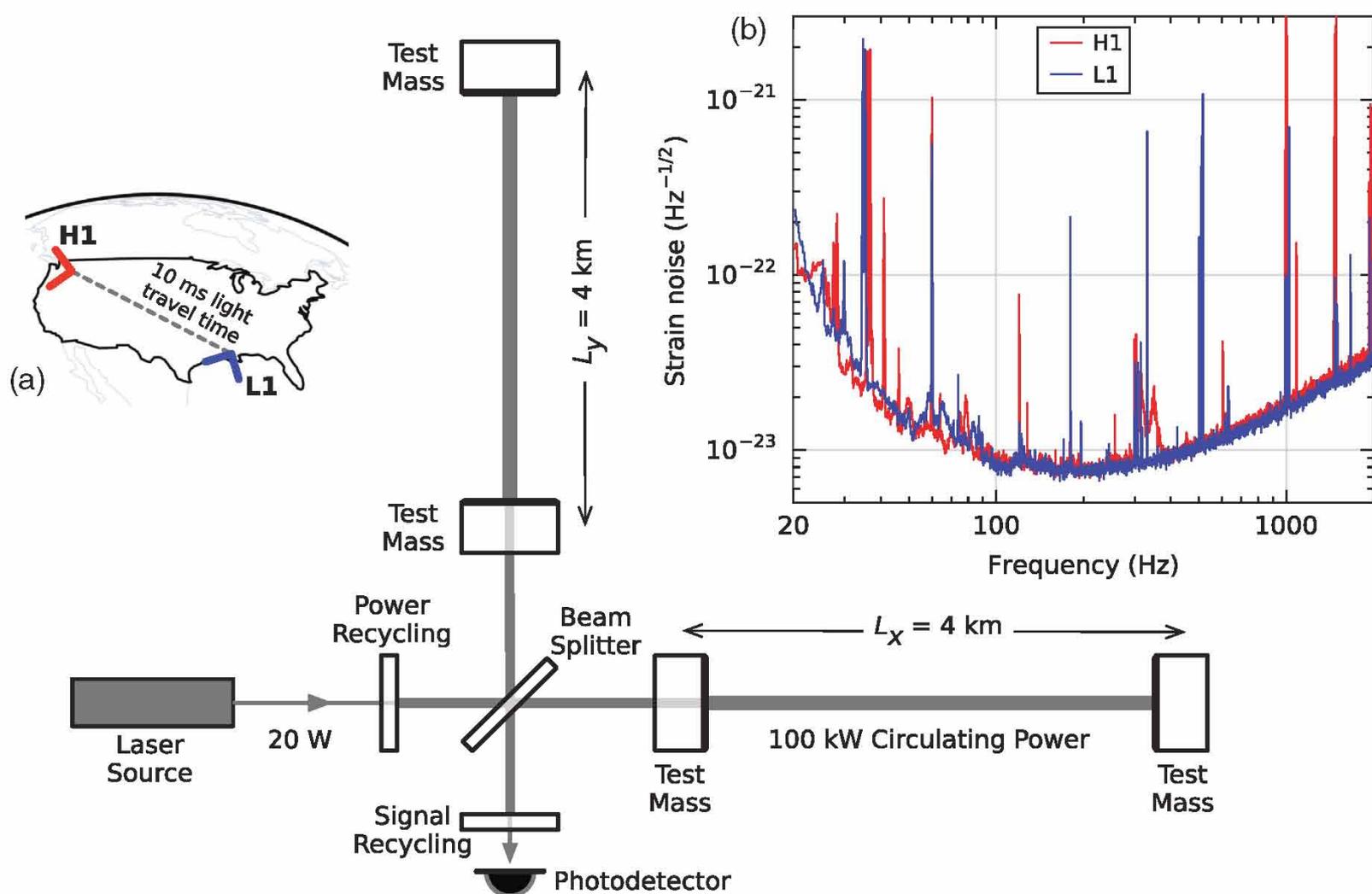
Russell Hulse



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

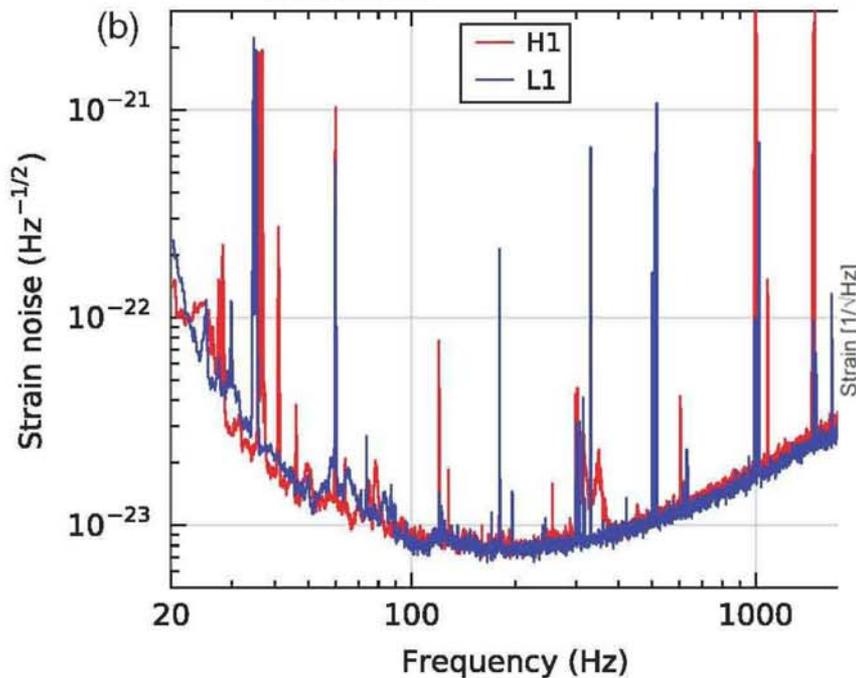
На графиках приводится чувствительность h_f ($\text{Hz}^{-1/2}$).
Чувствительность величине strain (деформация пр-ва)

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

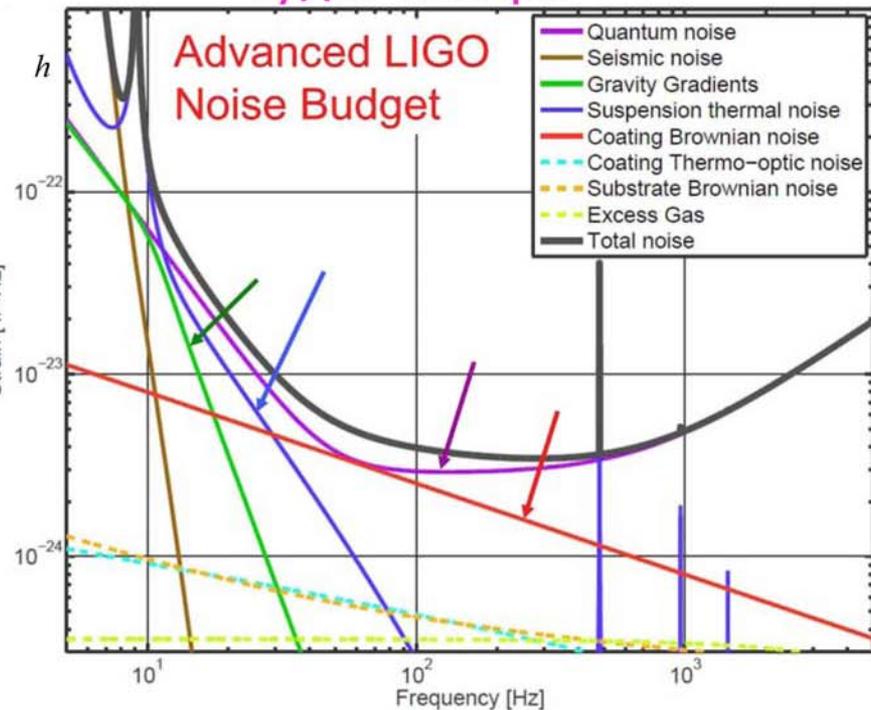
Так при $\tau = 10^{-2}$ с

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

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.

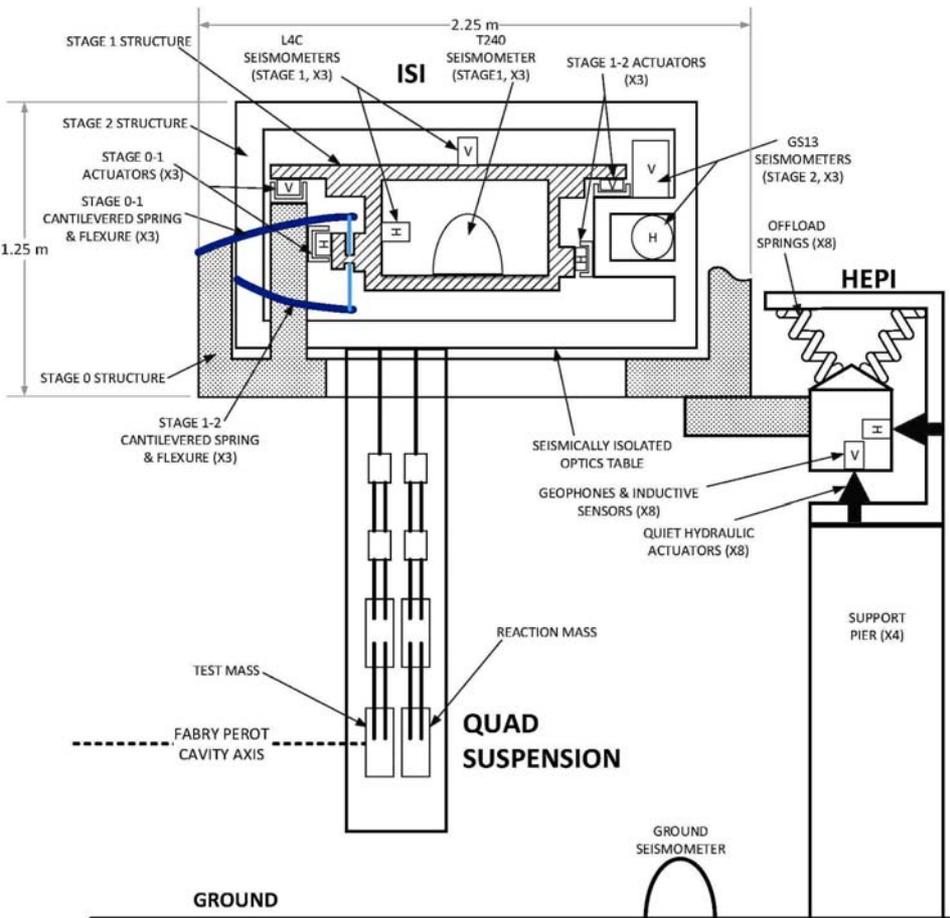
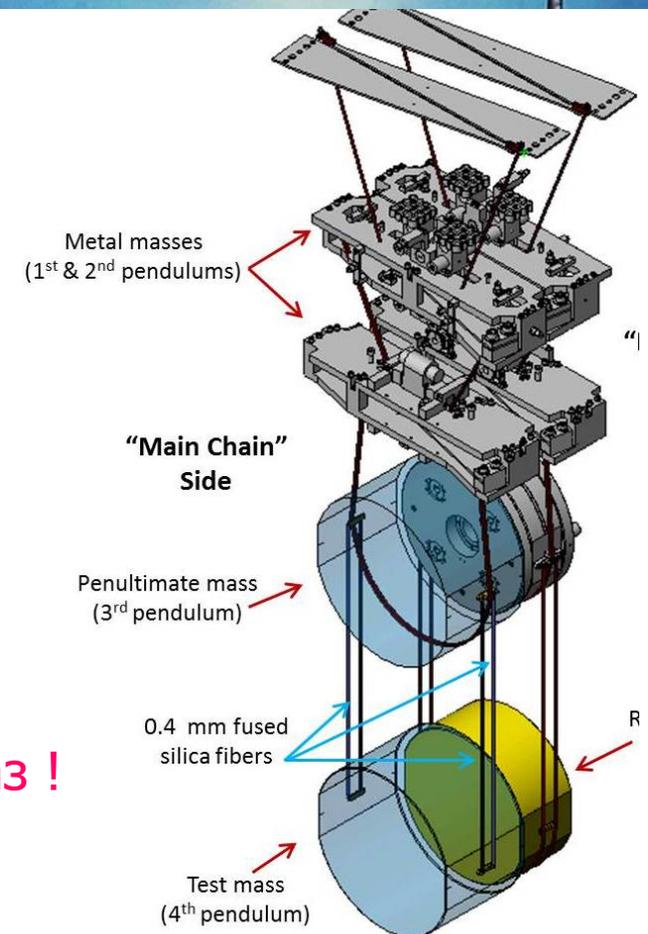


Figure 11 Seismic isolation for the test mass optic.



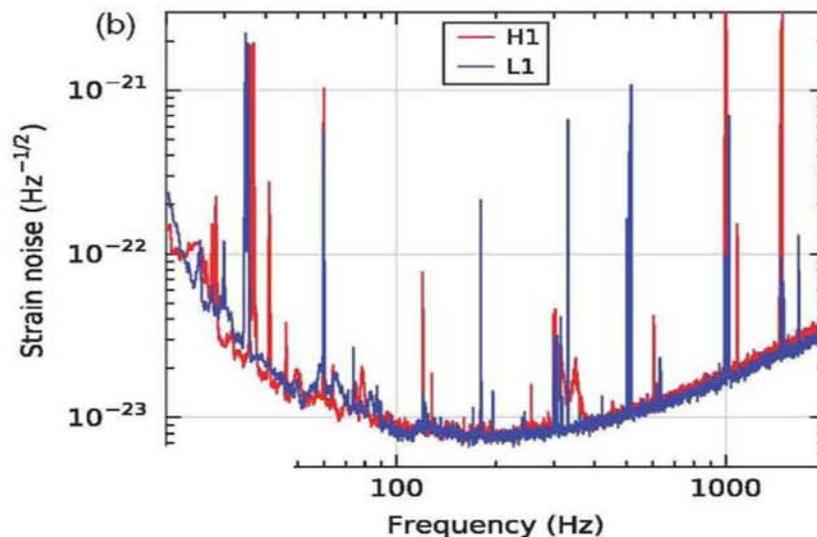
Активное и пассивное подавление в 10^{10} раз !

Дробовой шум

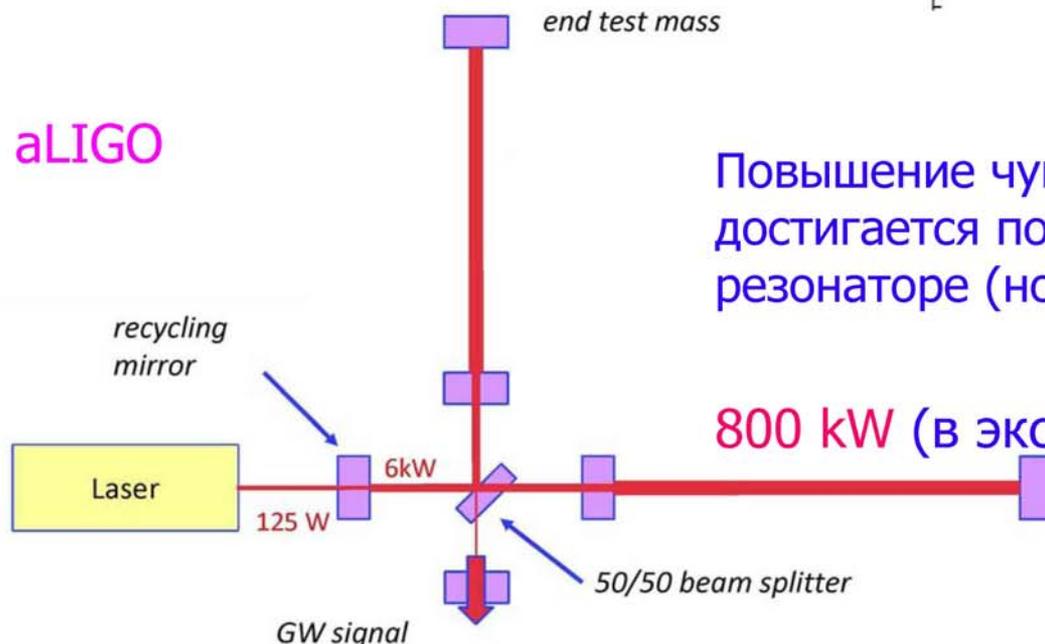
Дискретный (квантовый) характер волны в резонаторе ограничивает точность определения фазы

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

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

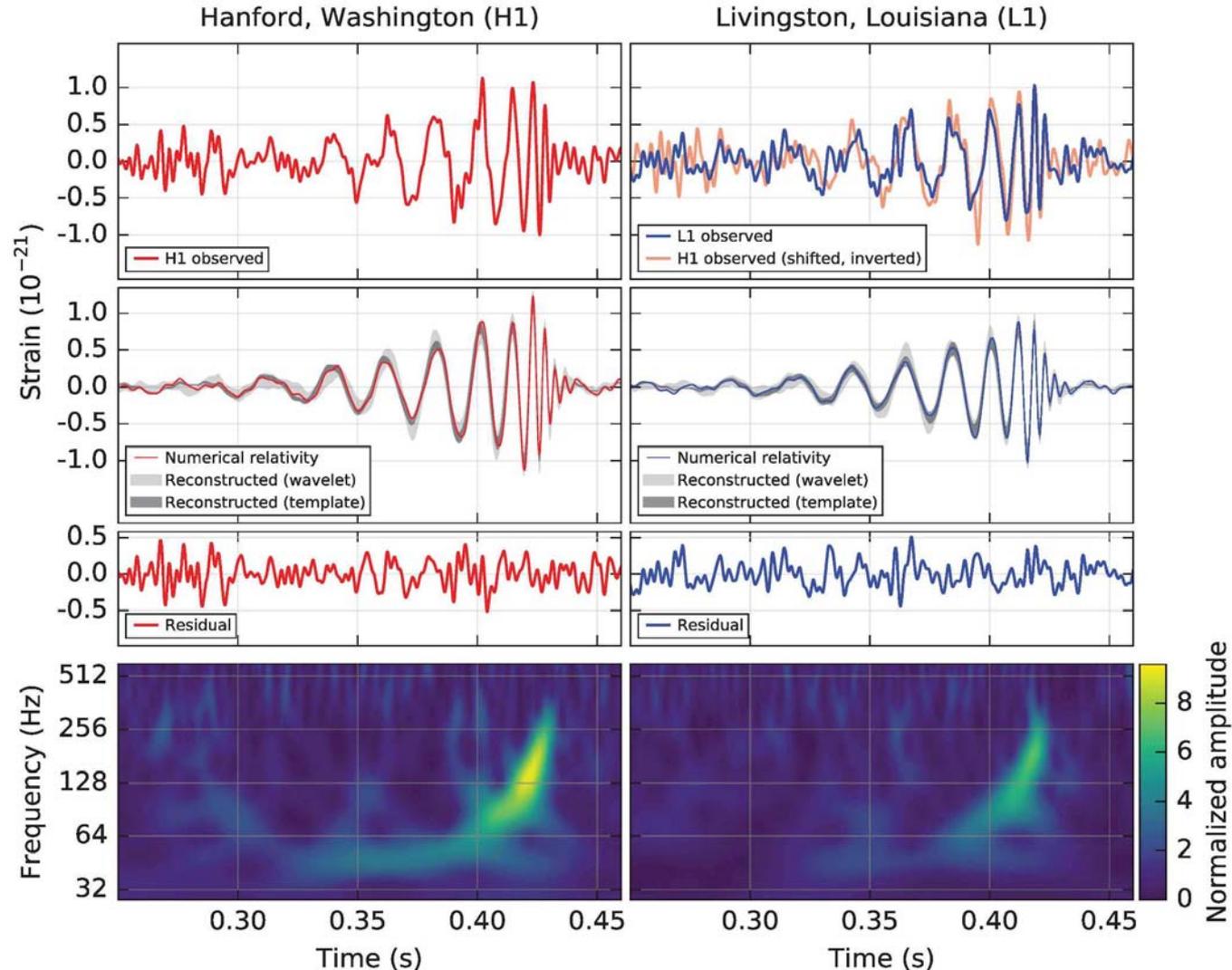
В LIGO $m=40$ кг, при характерном времени измерения 10^{-2} с получаем

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

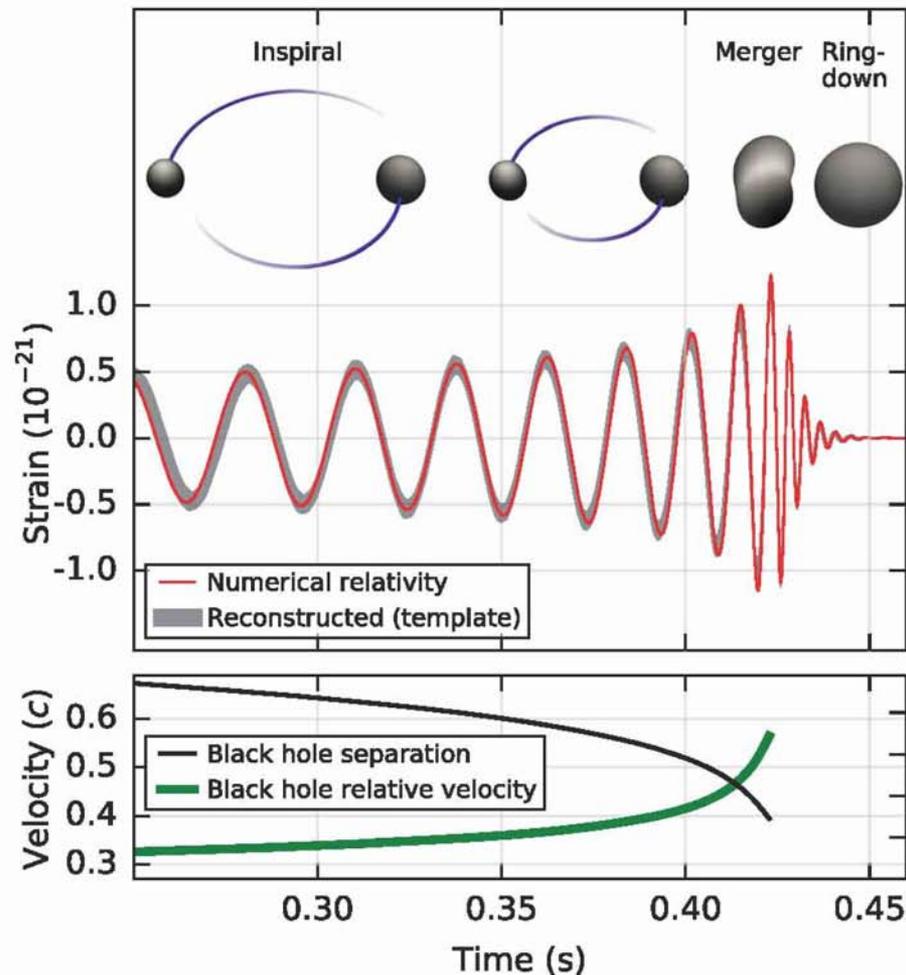
что и практически достигнуто в aLIGO и есть идеи как обойти этот предел

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**

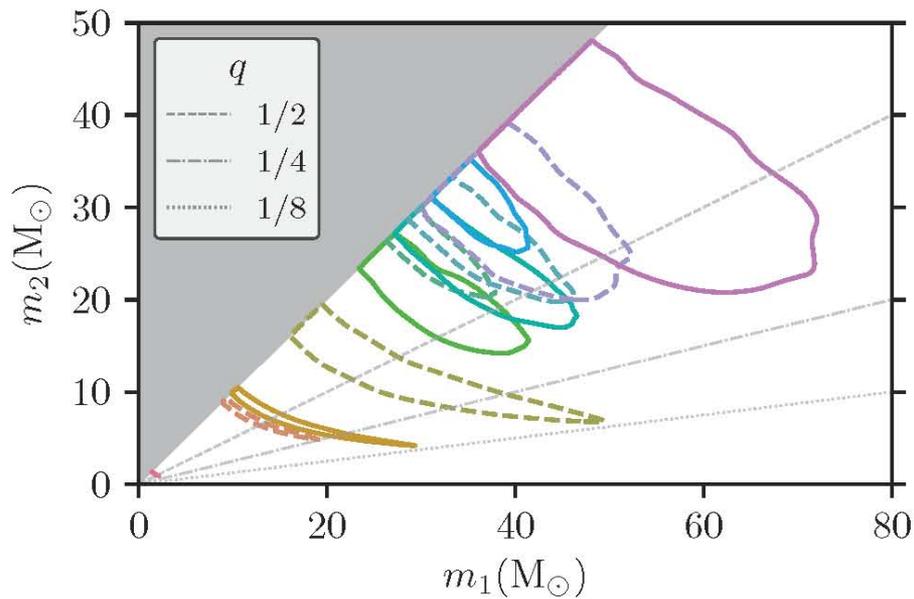
Вероятность, что это ложное событие 1/200000 лет (5.1σ)

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

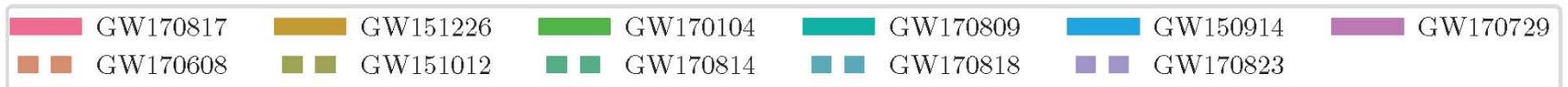
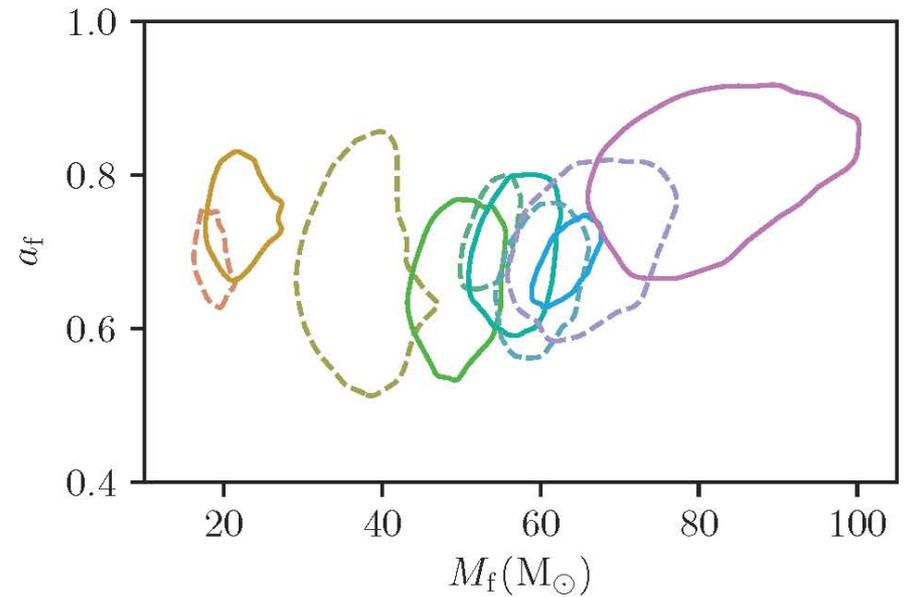
На сегодня зарегистрировано 5 событий слияния черных дыр

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

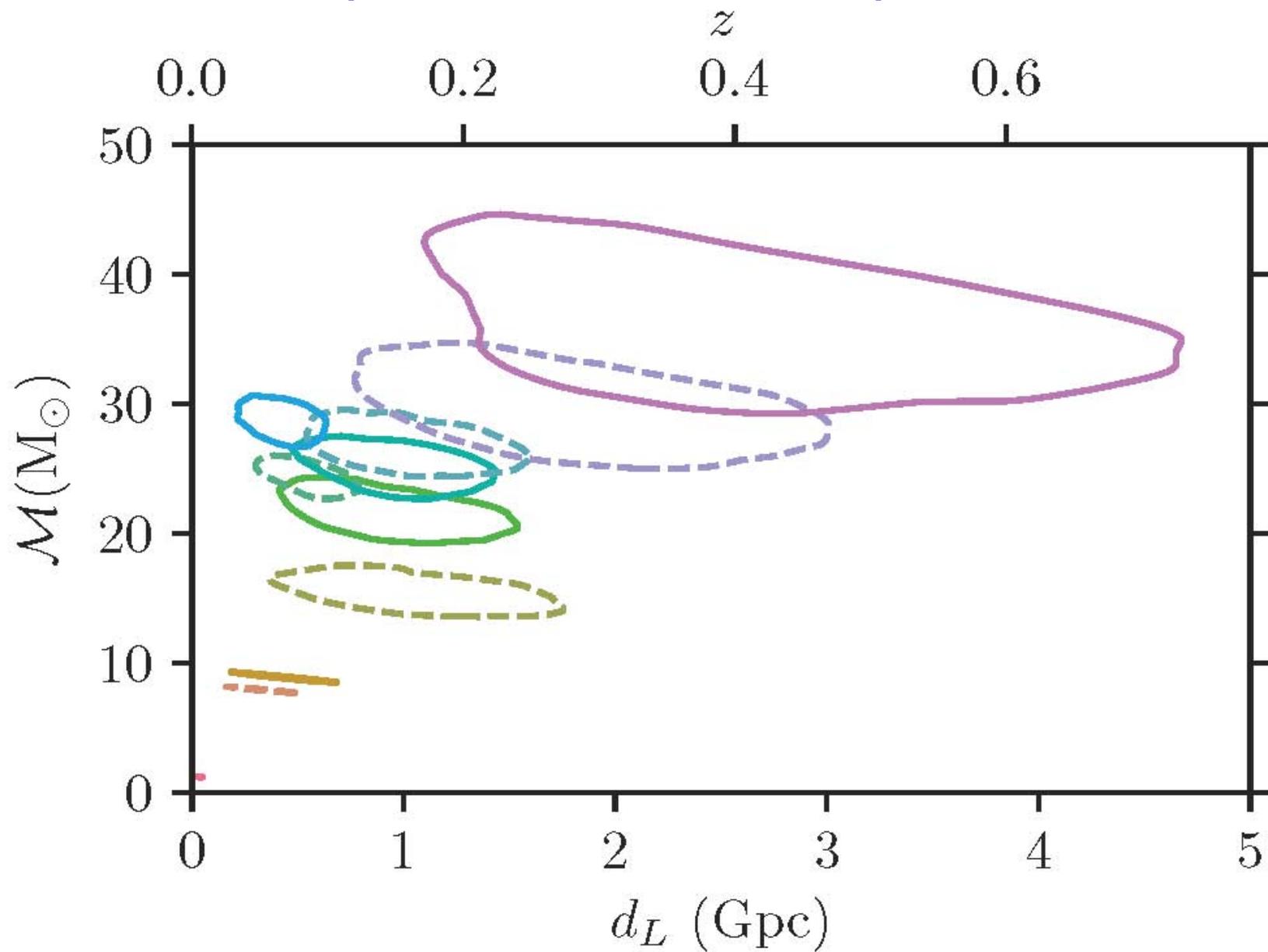
3 декабря 2018 г LIGO-VIRGO сообщили еще о 4 событиях регистрации грав. волн, всего стало 10



по вертикали - момент импульса

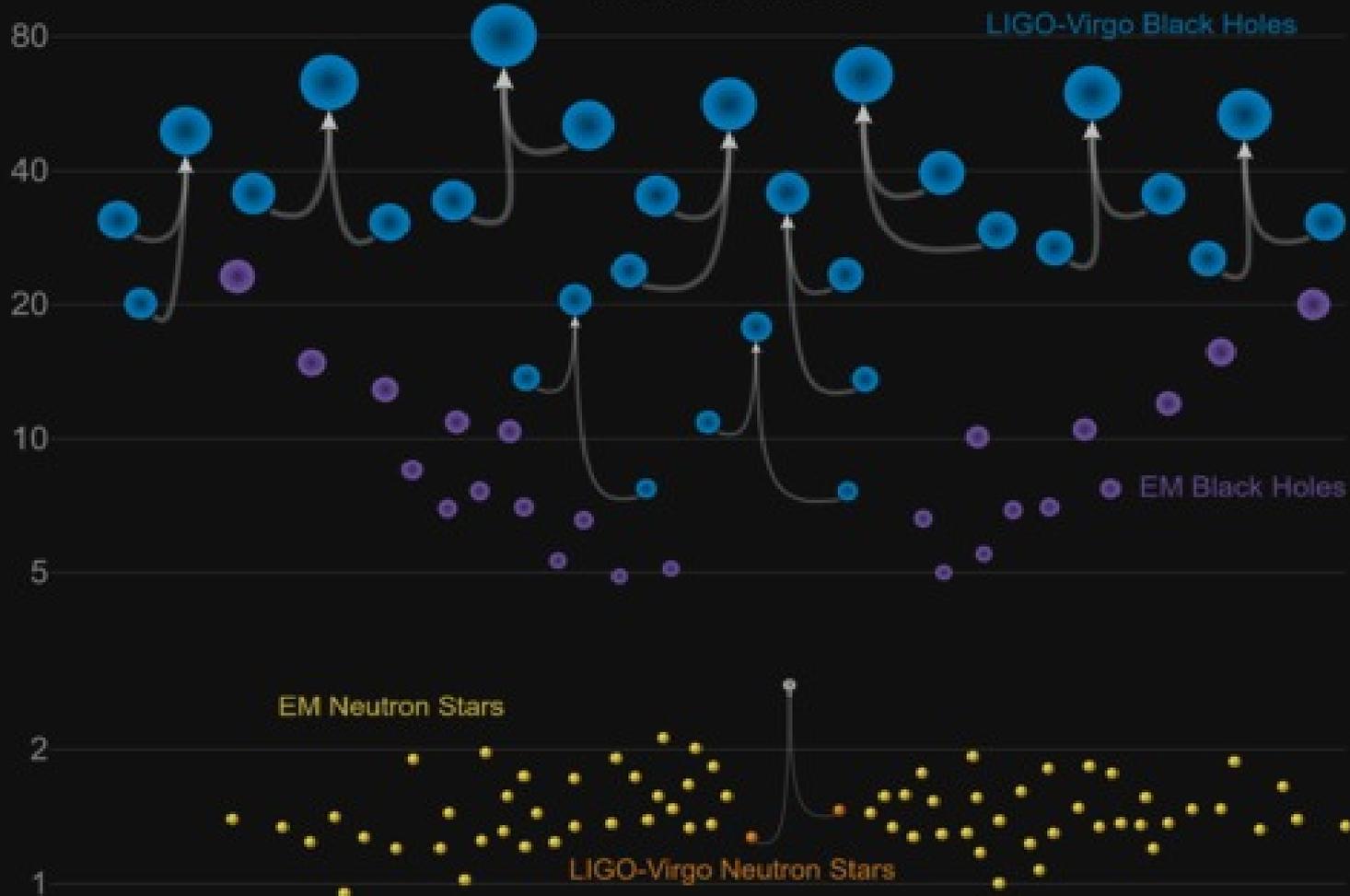


Приведенная масса - расстояние



Данные на декабрь 2018 года

Masses in the Stellar Graveyard *in Solar Masses*



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

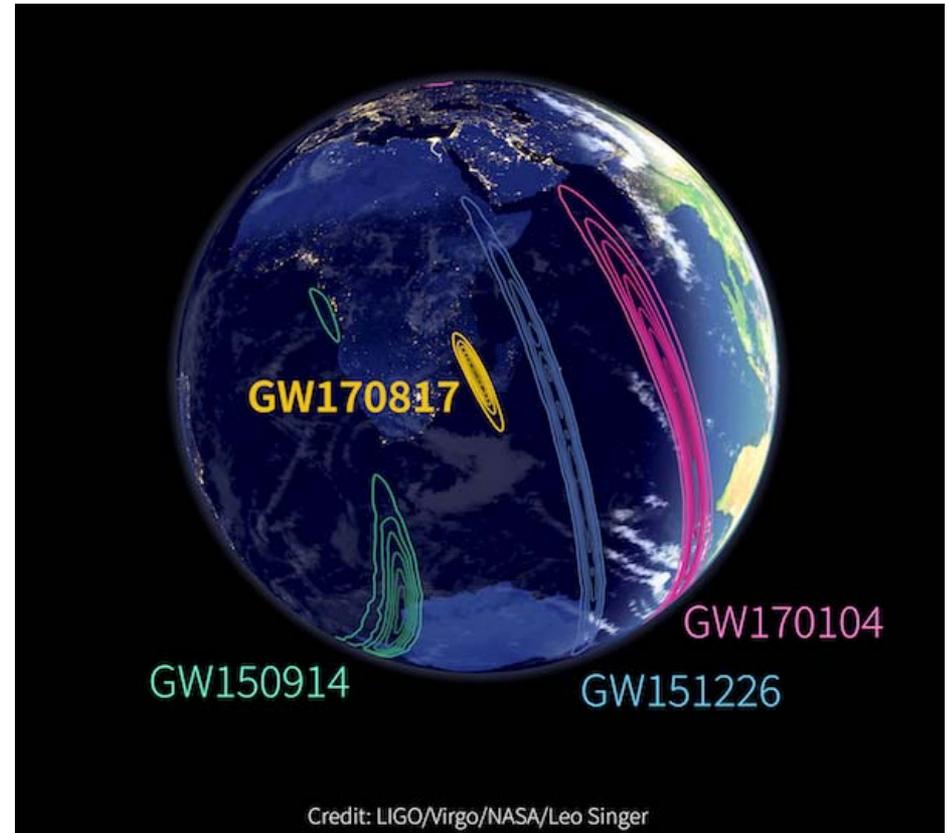
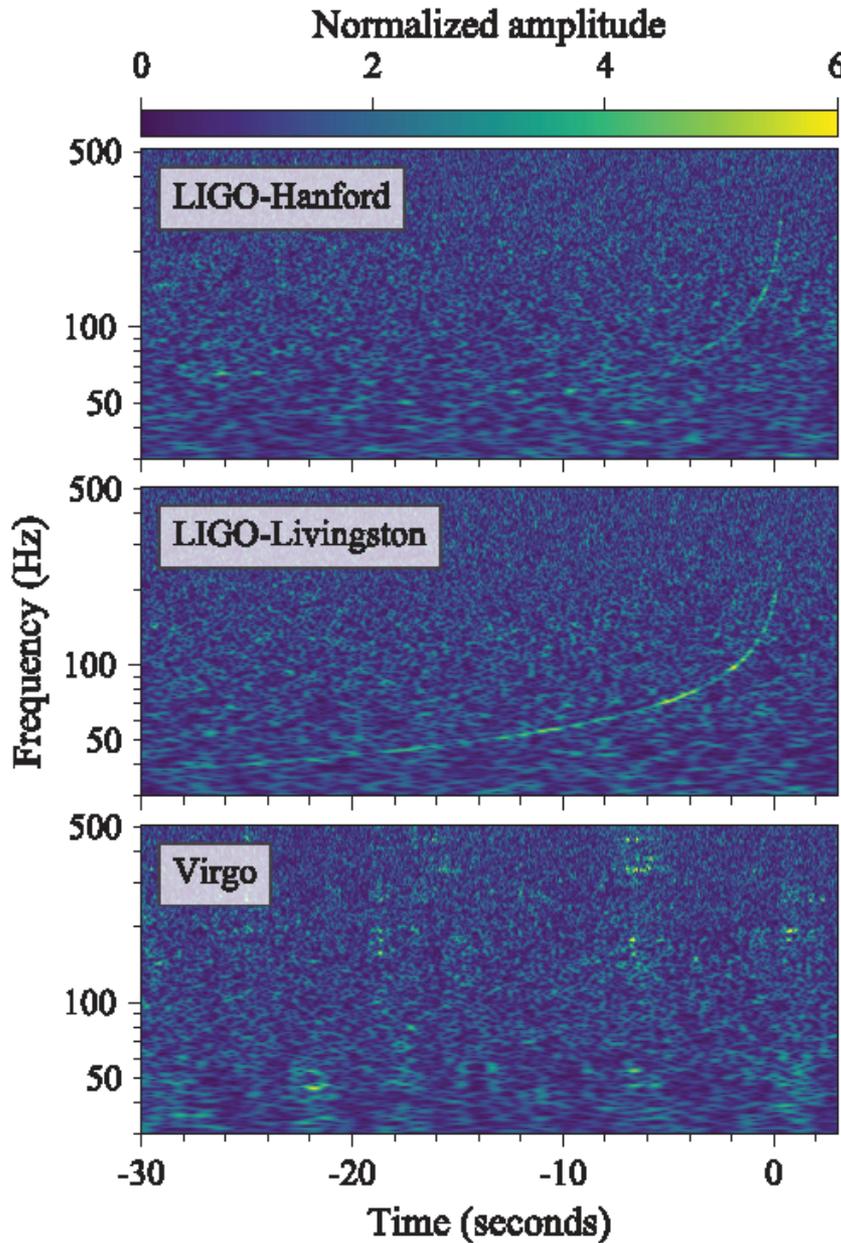
Существует много звезд с массами больше $3 M_{\odot}$ (макс. $265 M_{\odot}$).

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

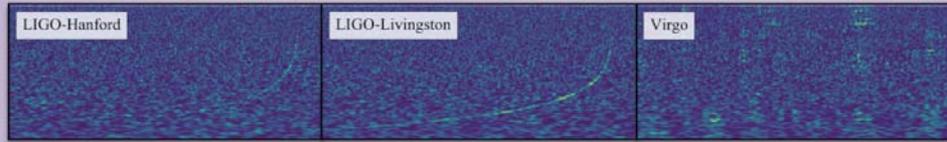
Первая регистрация слияния нейтронных звезд

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



Параметры нейтронных звезд

GW170817 FACTSHEET

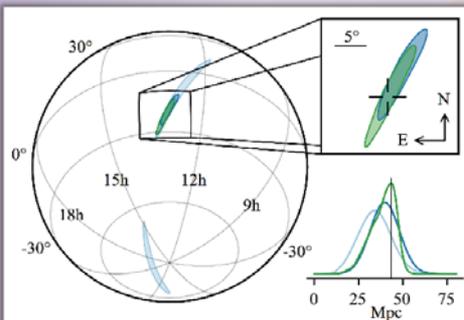


observed by	H, L, V	inferred duration from 30 Hz to 2048 Hz**	~ 60 s
source type	binary neutron star (NS)	inferred # of GW cycles from 30 Hz to 2048 Hz**	~ 3000
date	17 August 2017	initial astronomer alert latency*	27 min
time of merger	12:41:04 UTC	HLV sky map alert latency*	5 hrs 14 min
signal-to-noise 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 ≤ 28°
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		

$$M_1 \sim 1.8 M_c, \quad M_2 \sim 1.1 M_c$$

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.



Росстояние
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.

+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

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

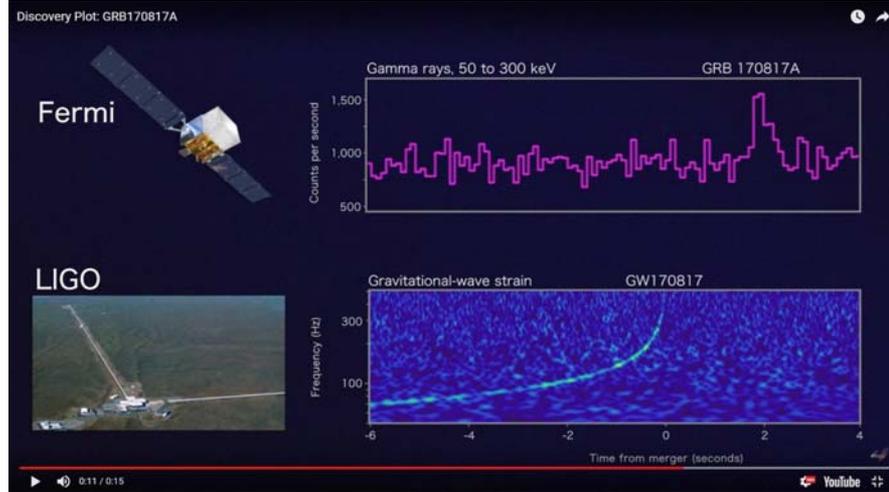
Регистрация этого события различными детекторами подтверждает, что слияние нейтронных звезд может порождать вспышки гамма излучения

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

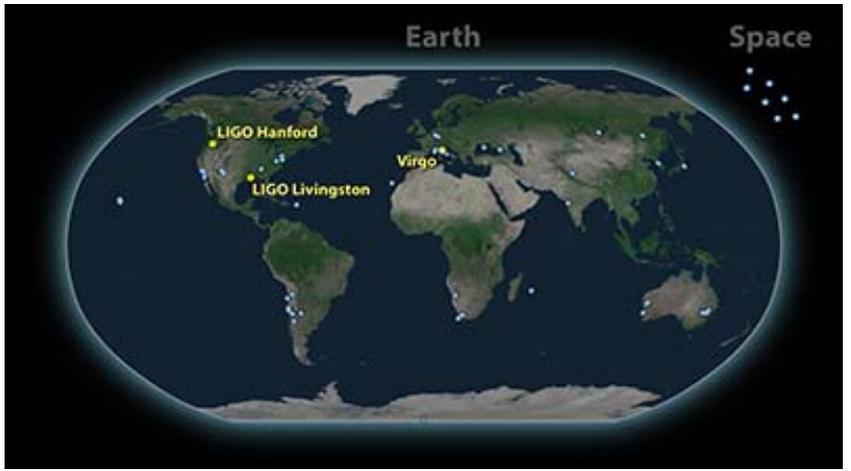
Наблюдение гравитационных и электромагнитных волн от одного события позволяет уверенно утверждать что гравитационные волны распространяются со скоростью света

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

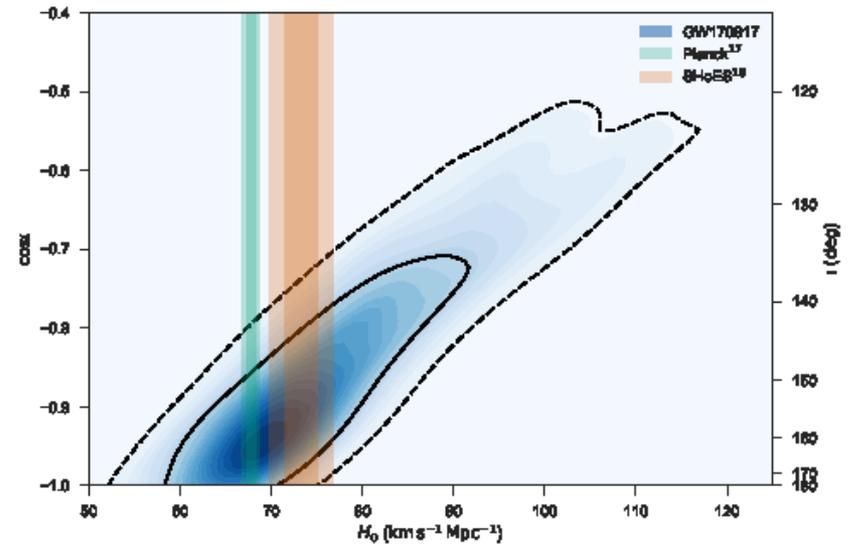
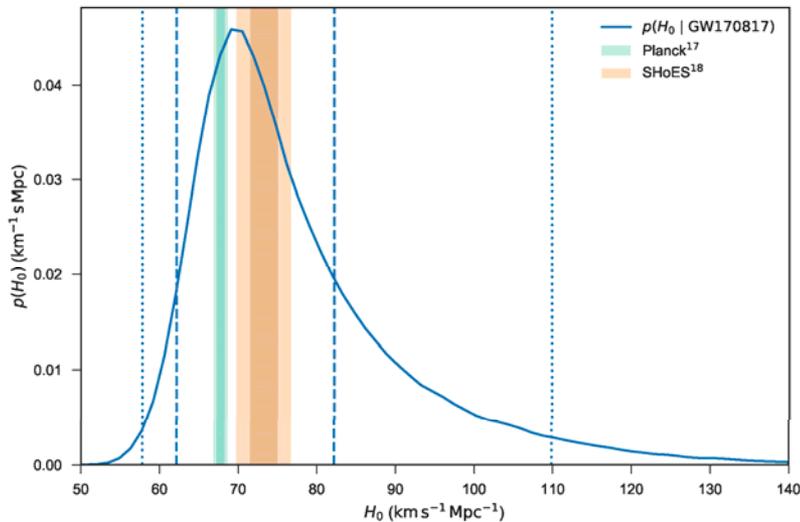
Через 1.7 с спутник Ферми зарегистрировал гамма-вспышку в этом участке неба.



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



Независимое измерение постоянной Хаббла

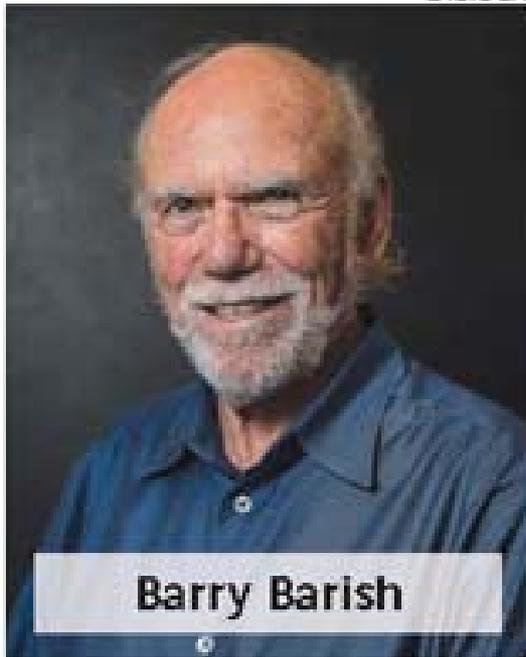


$$70.0_{-8.0}^{+12.0} \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$$

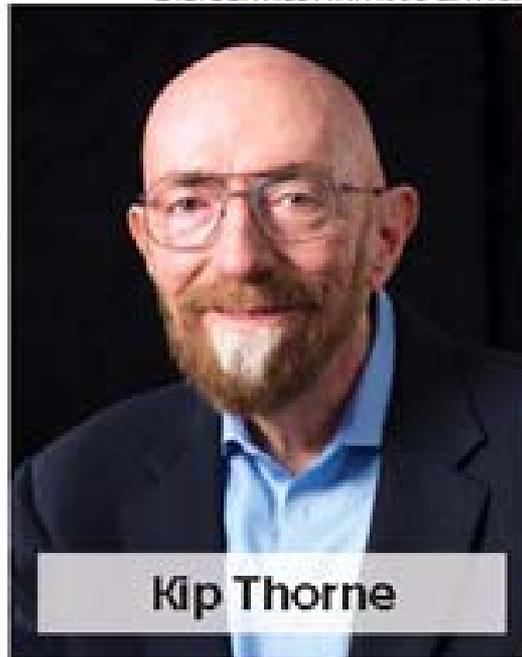
В будущем точность может быть на порядок повышена.
Это новый метод изучения динамики Вселенной!

Нобелевская премия 2017 г

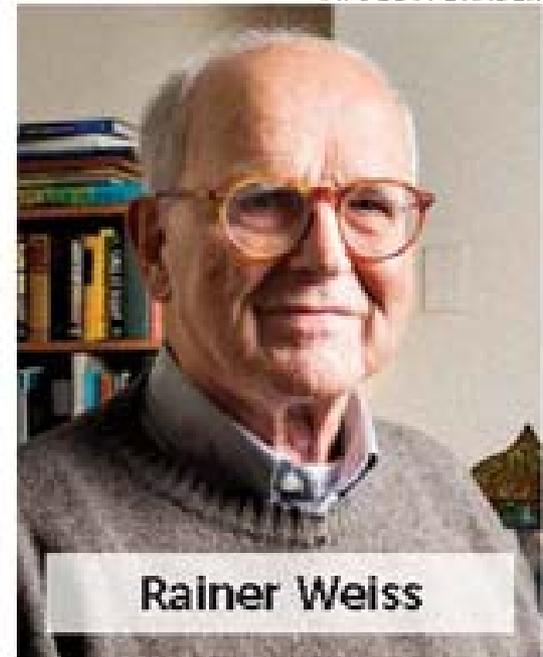
CALTECH



CALTECH ALUMNI ASSOCIATION

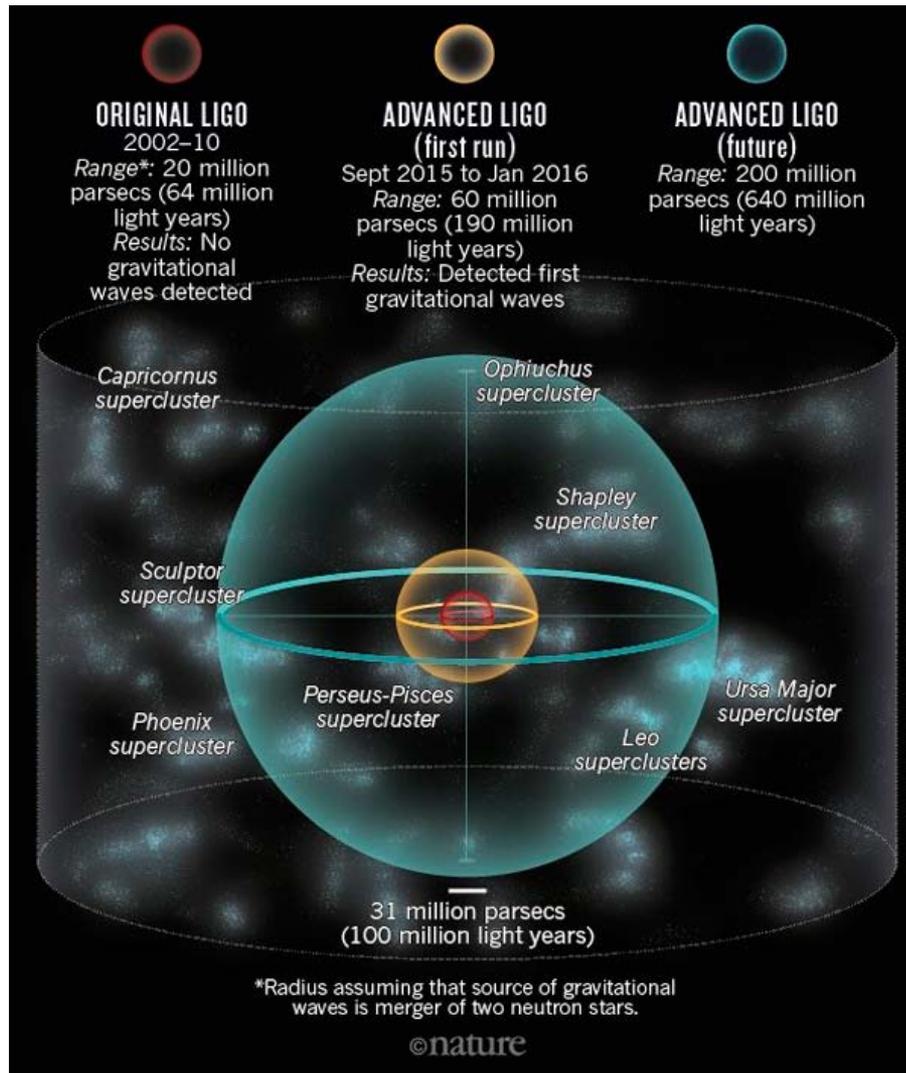


M. SCOTT BRAUER



Ron Drever скончался недавно (после открытия ГВ).

Дальнейшие перспективы



Объем

LIGO 1

1

LIGO (сейчас)

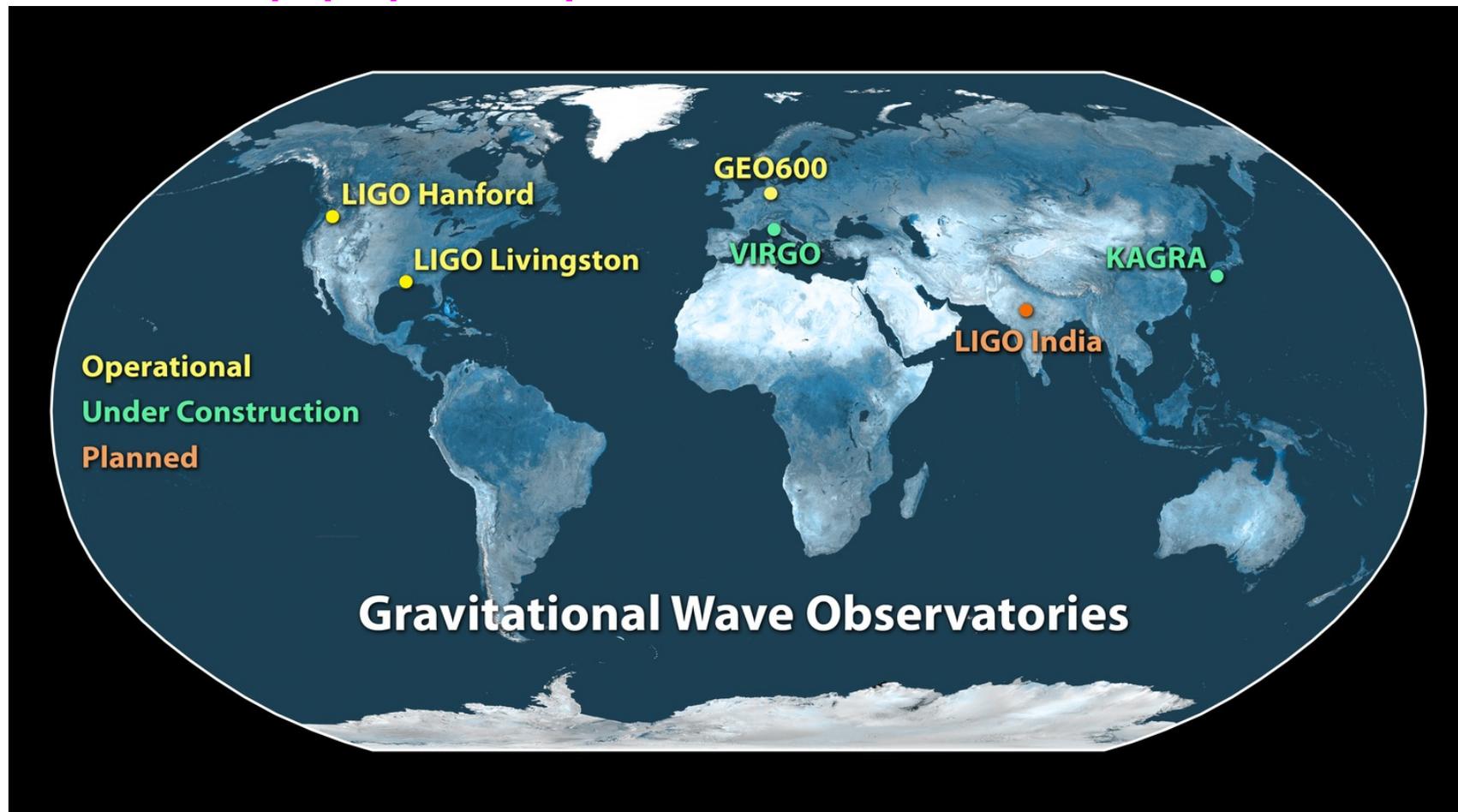
30

LIGO (будущее)

1000

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

Сеть интерферометров (для точной локализации источника)



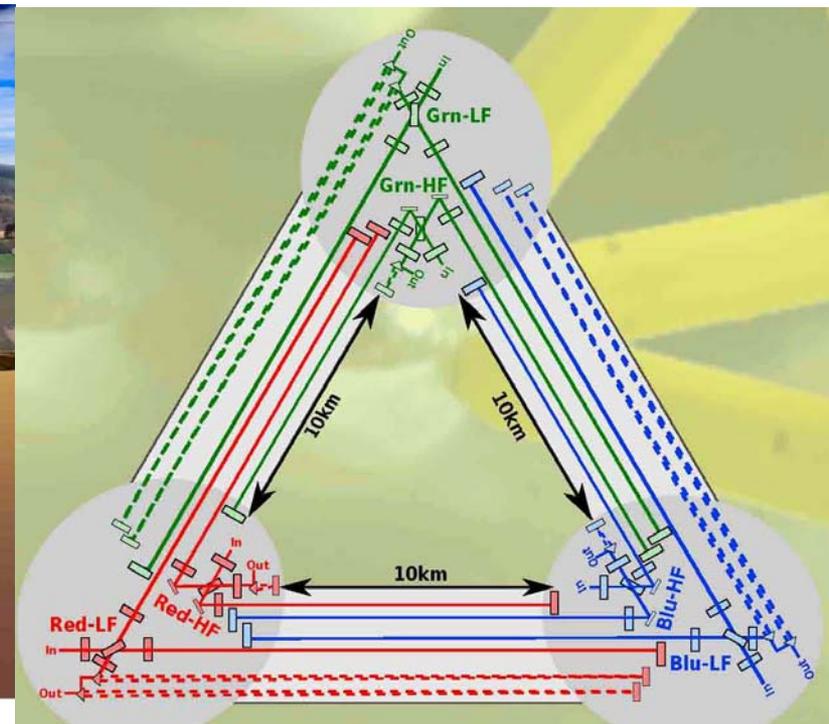
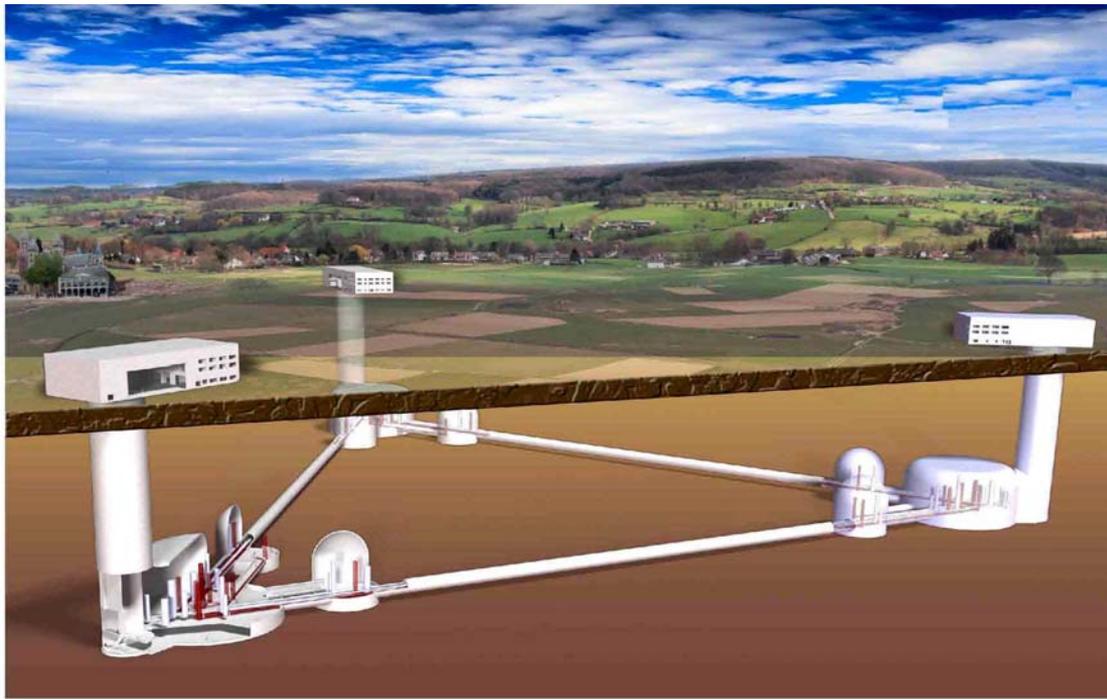
Virgo — франко-итальянский детектор гравитационных волн, с 3 км базой, является членом LIGO, в момент открытия модернизировался (будет как LIGO).

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

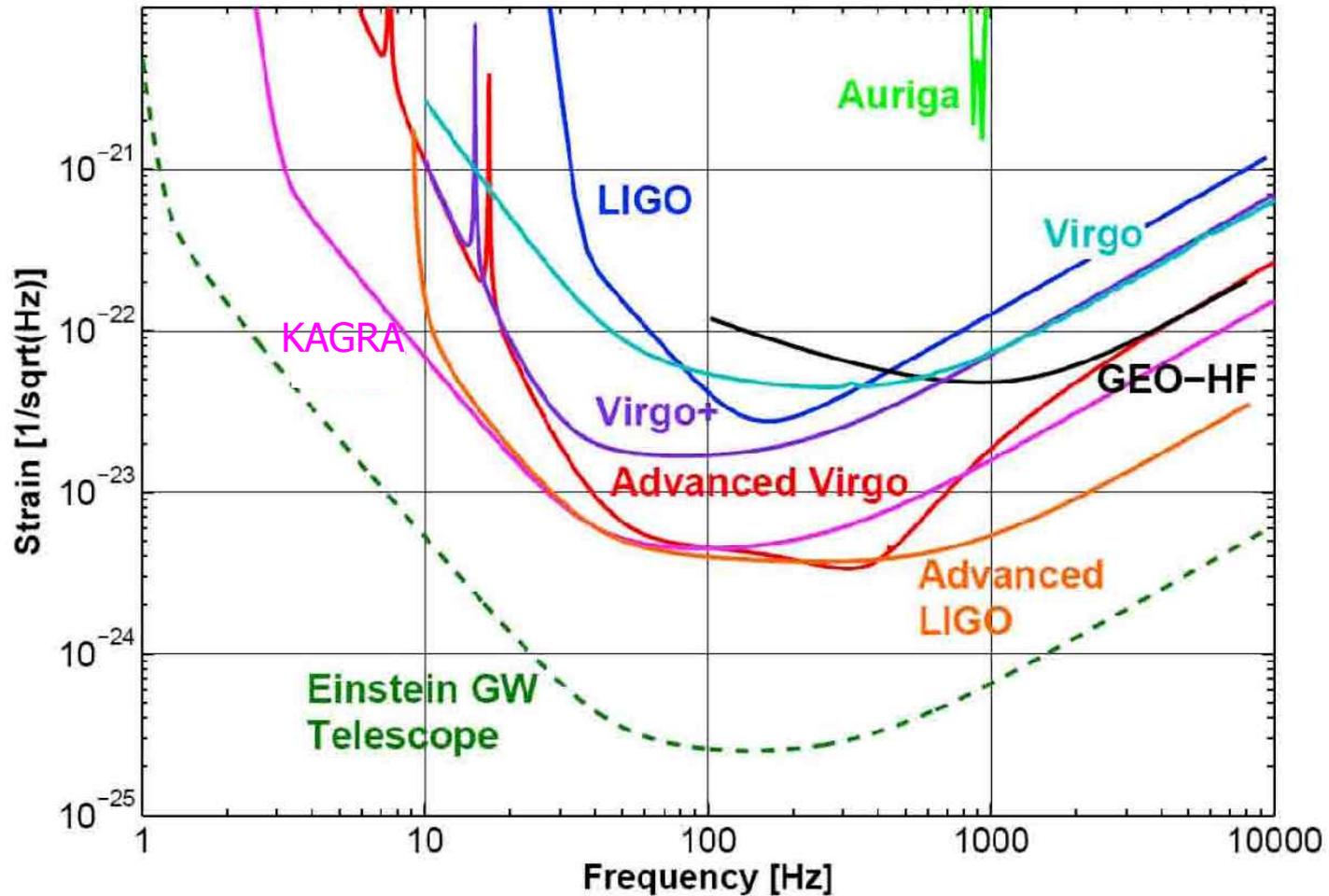


Figure 5: Sensitivities of gravitational wave detectors from the first to the third generation.

eLISA space gravitational interferometer

плечо интерферометра 1 млн. км

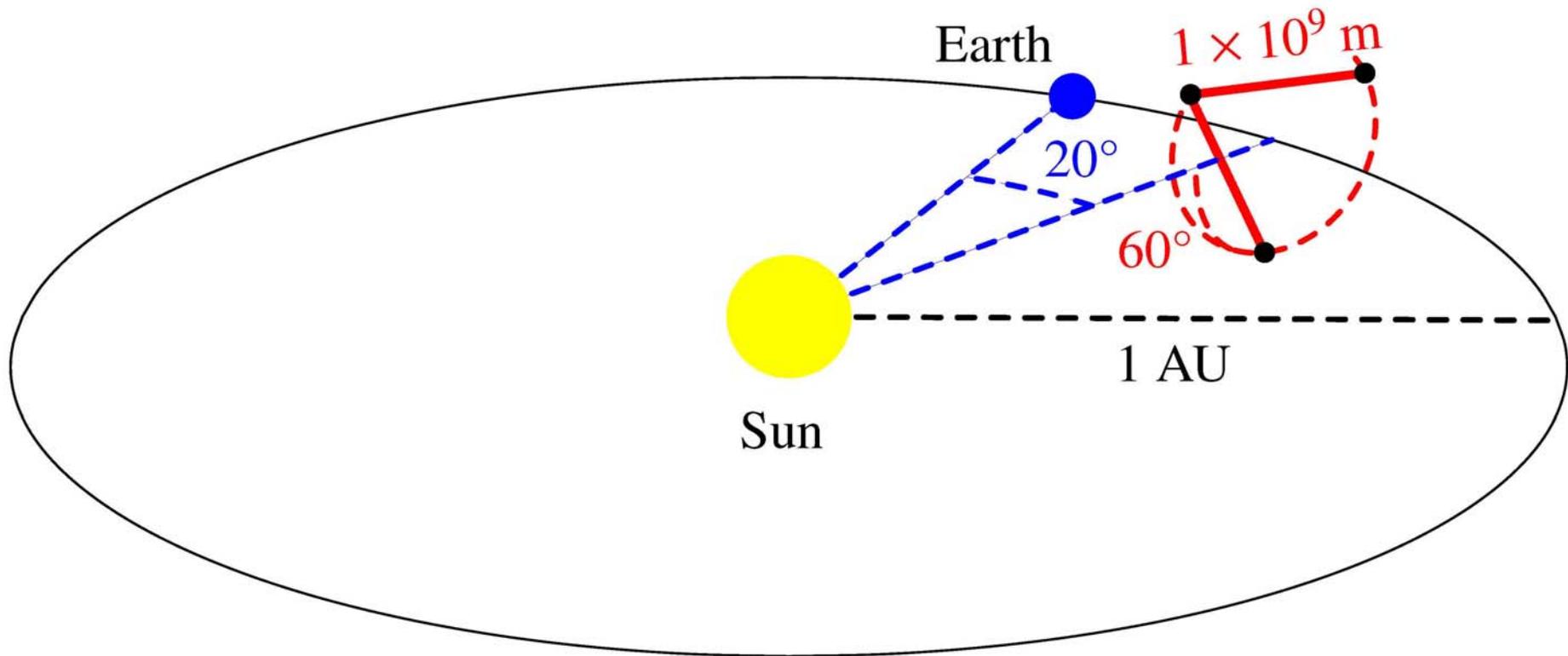
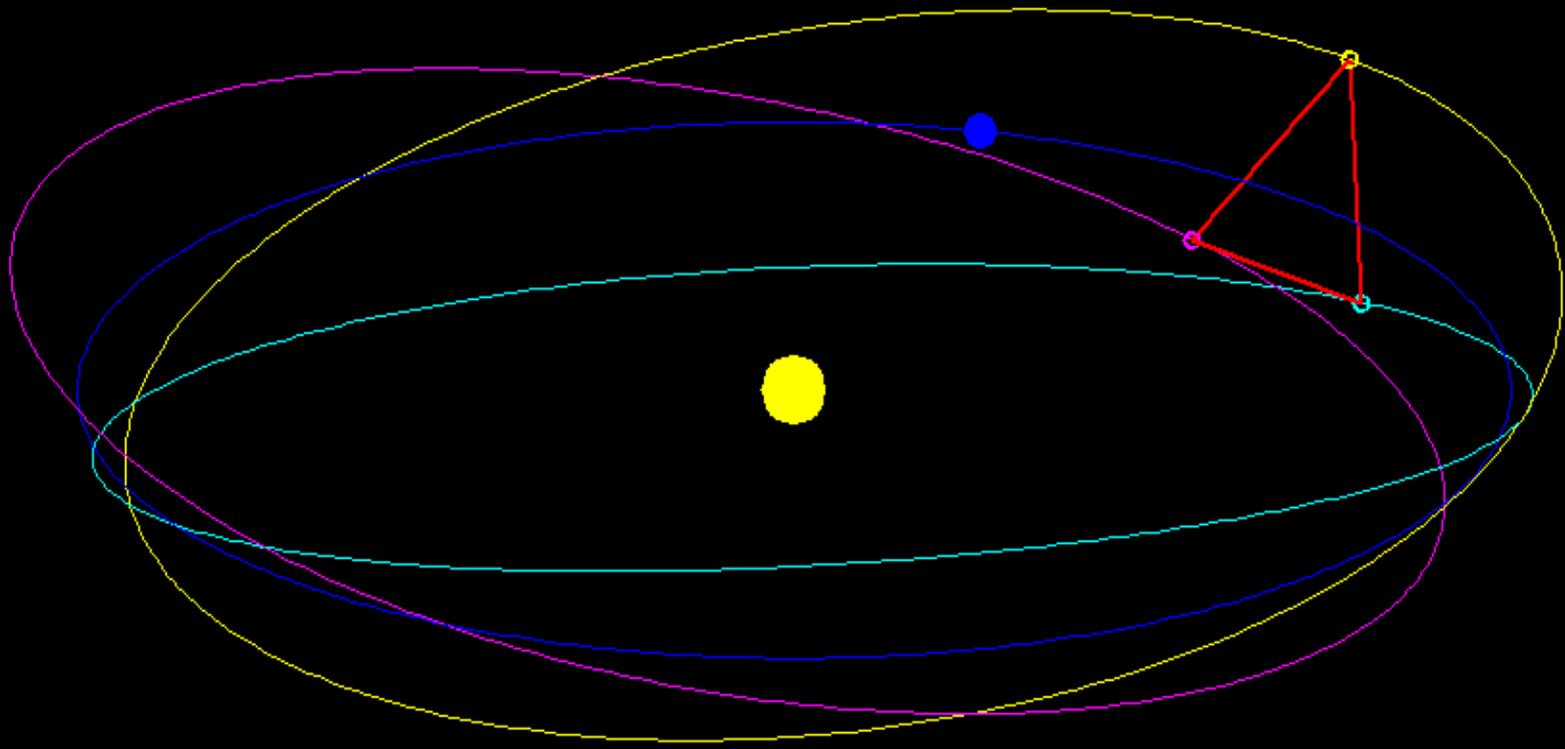
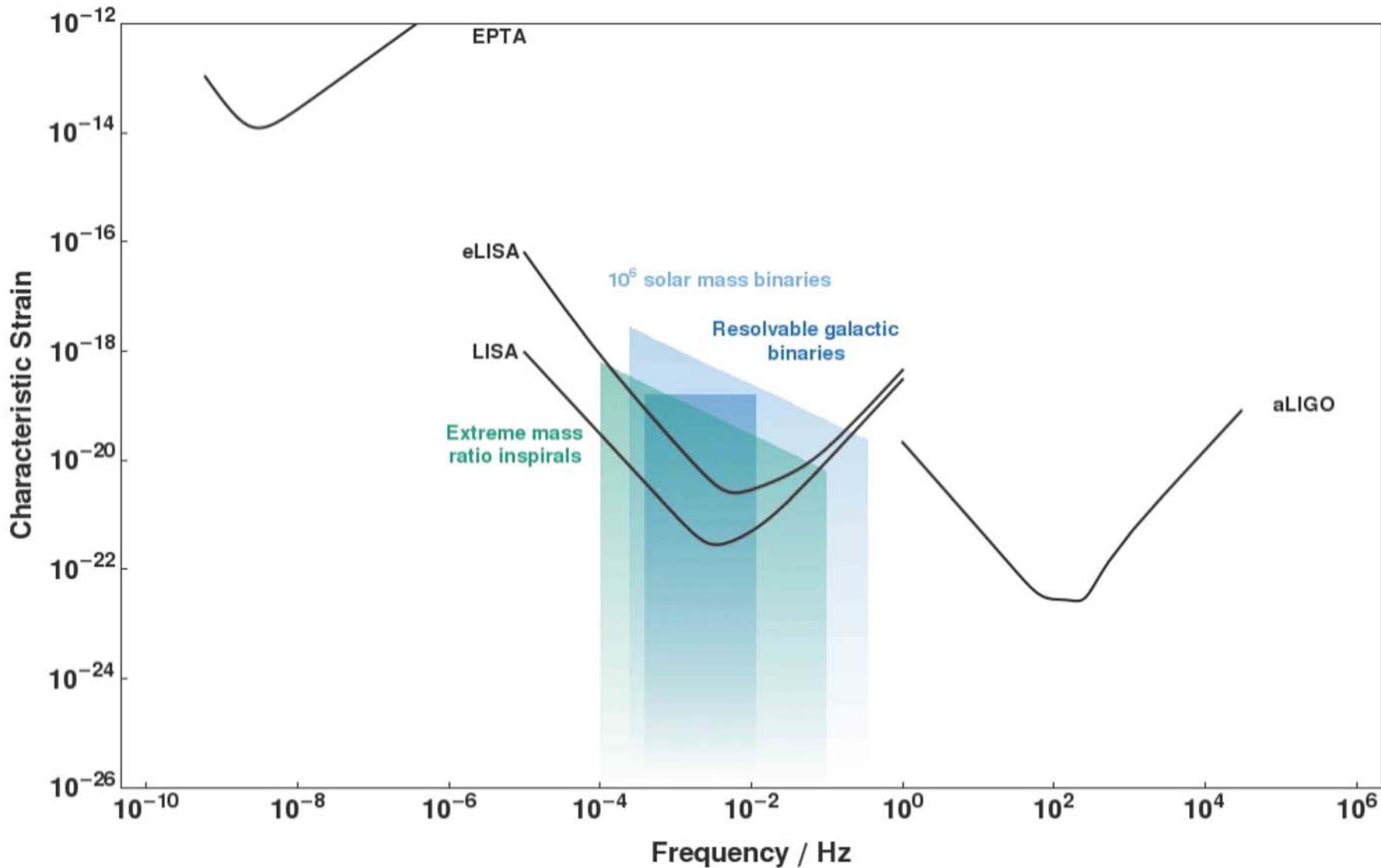


Figure 1: The eLISA orbits: The constellation is shown trailing the Earth by about 20 degrees (or 5×10^{10} km) and is inclined by 60 degrees with respect to the ecliptic. The trailing angle will vary over the course of the mission duration from 10 degrees to 25 degrees. The separation between the spacecraft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

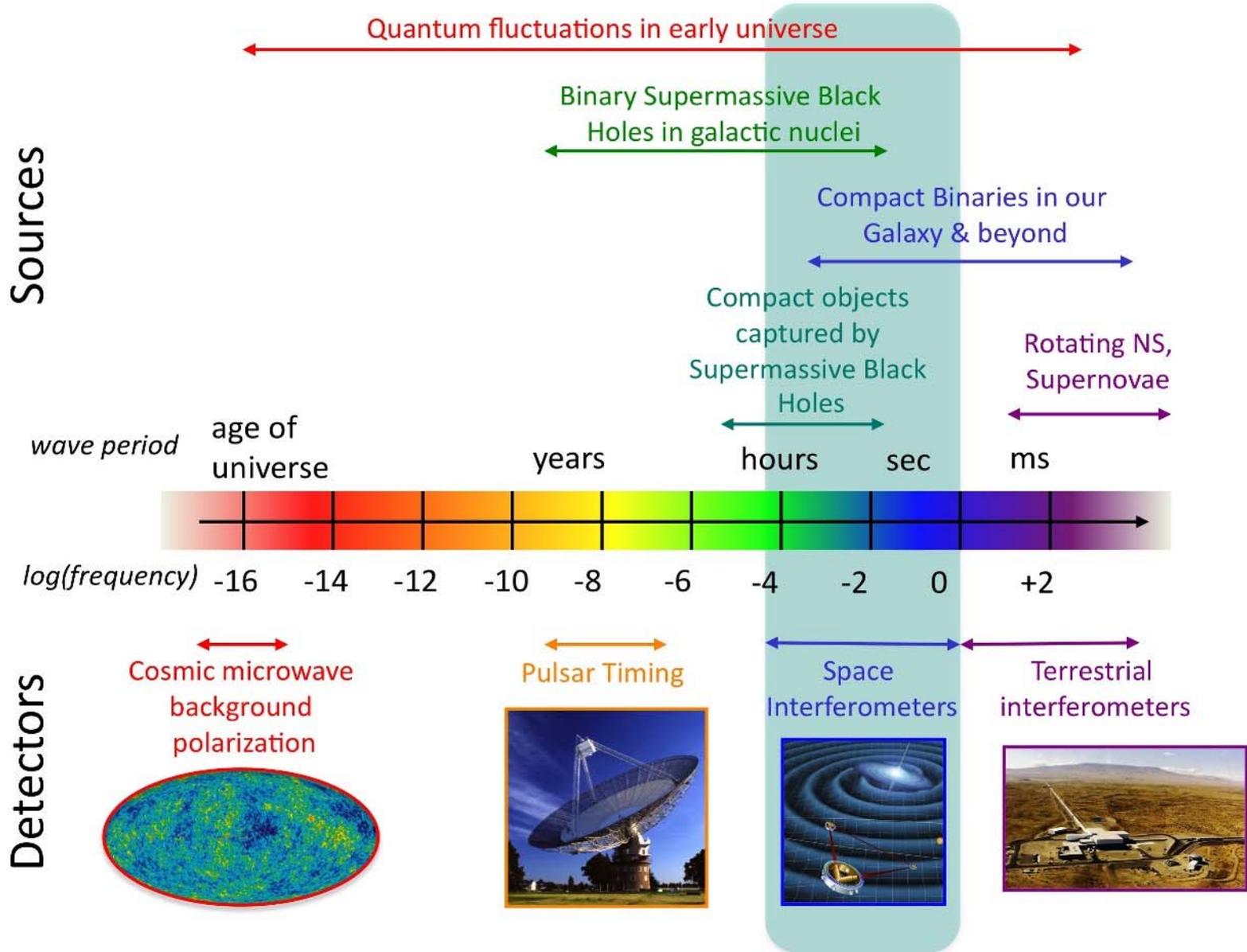


Чувствительность eLISA

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.

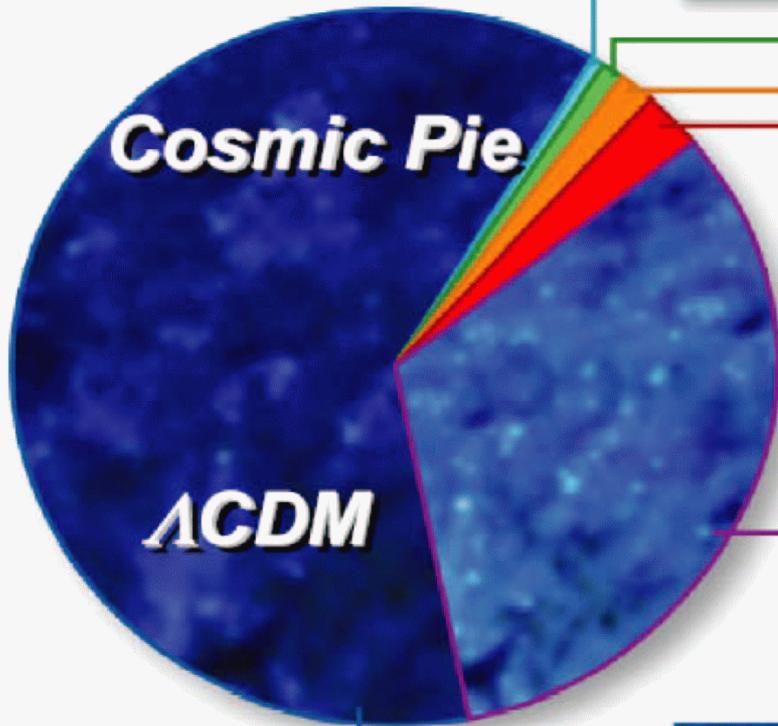
- Оказывается и мощность излучения ГВ, больше чем ЭМ, поскольку ЭМ излучается некогерентно отдельными частицами, а ГВ когерентно огромными массами!

- Появился новый инструмент (как ускорители, телескопы), который позволит по-новому взглянуть на Вселенную и лучше понять как она устроена!

Состав вселенной

$$\Omega_i \equiv \rho_i / \rho_{\text{CRITICAL}}$$

$$\Omega_{\text{TOTAL}} = 1$$



Тяжелые элементы

$$\Omega=0.0003$$



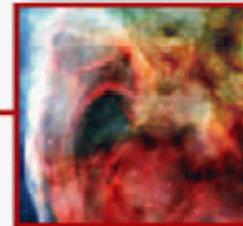
Нейтрино (ν):

$$\Omega=0.0047-0.03$$



Звезды

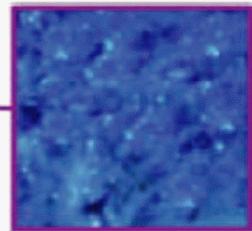
$$\Omega=0.005$$



Свобод. H

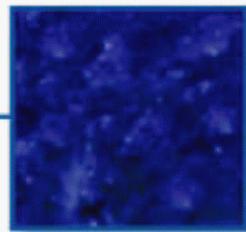
& He:

$$\Omega=0.04$$



Холодная темная
материя

$$\Omega=0.25$$

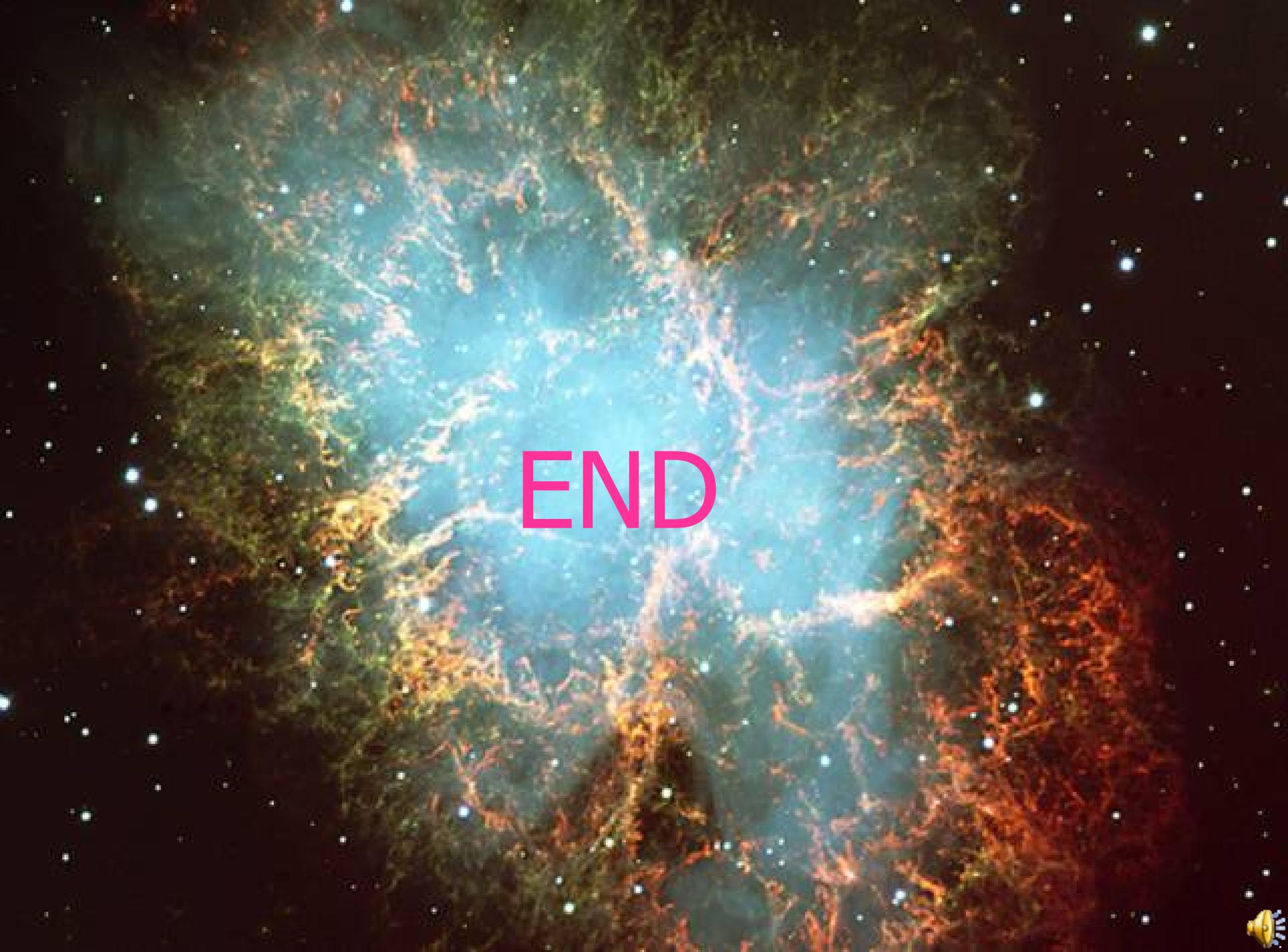


Темная энергия

$$\Omega=0.70$$

Природа бросила вызов физикам!

Обычная материя	5%
Темная материя (неизвестной природы)	25%
Темная энергия (вызывающая антигравитацию в космологических масштабах)	70%



END

