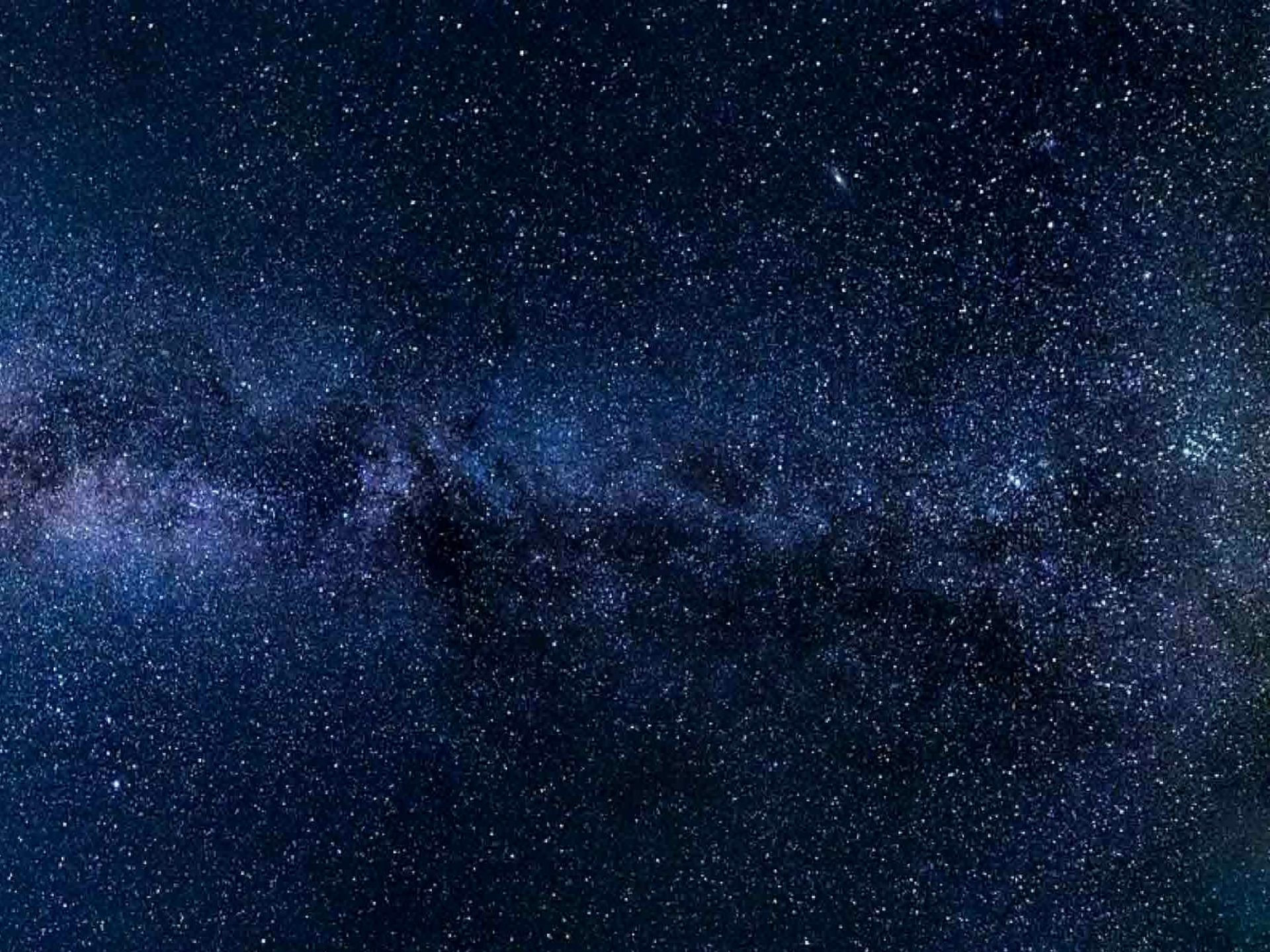


Загадки Вселенной

В.И.Тельнов





Что можно сказать глядя на звездное небо?

Фотометрический парадокс Ольберса (немецкий астроном XIX века)

(на это обратил внимание И.Кеплер еще в 16 веке)

“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:

- 1) конечный возраст вселенной (с большого расстояния свет еще не дошел)
- 2) расширение Вселенной (свет далеких галактик смещен с невидимую для глаза инфракрасную область).

Представление о Вселенной (безграничная и расширяющаяся).

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

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

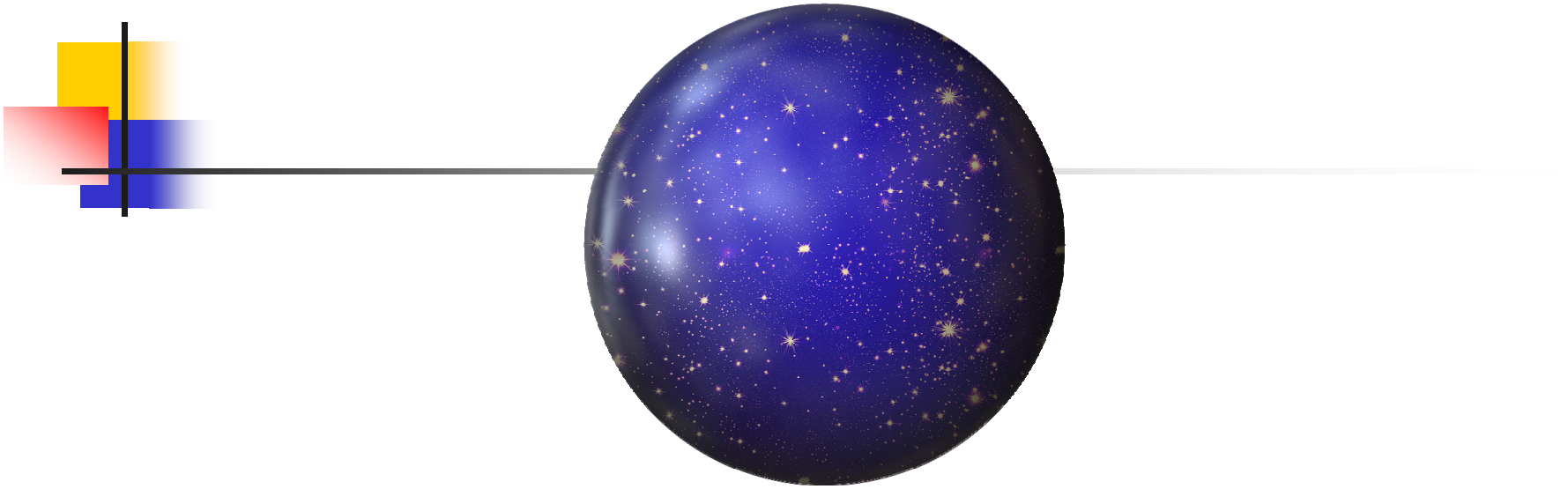
- $V = Hr$ - закон Хаббла ($v \ll c$) (1930 г).
В настоящее время $H_0 \sim 67$ км/сек/Мпарсек.

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"

3D \Rightarrow 2D



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 ними.

Свет распространяется вдоль поверхности со скоростью света (c).

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.

Геометрия однородного пространства

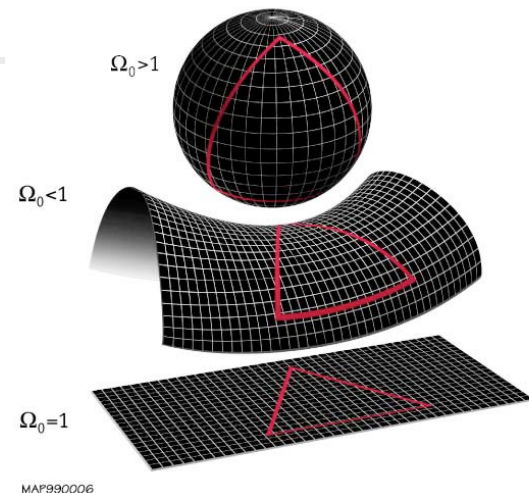
Существуют три случая геометрии изотропного пространства:

1. плоское пространство; $k=0$
2. пространство с положительной кривизной; $k=1$
3. пространство 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.

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

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



Космологическое красное смещение

Если источник испустил световой импульс в момент t_e , а наблюдатель принимает сигнал в момент t_0 , то длины волн относятся как

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

длина волны увеличивается пропорционально «размеру» вселенной.

Замечание: распространенное утверждение, что космологическое красное смещение

объясняется эффектом Доплера (скоростью удаления) неверно. В расширяющейся вселенной нельзя ввести единую инерциальную систему отсчета. Из-за расширения свет испущенный в нашем направлении может никогда не дойти до нас (космологический горизонт).

Динамика вселенной. Уравнения Фридмана.

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

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

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

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

Из этих уравнений получается уравнение для ускорения

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

Динамика расширения зависит от плотности энергии, и **давления** !
Это уравнение (но без P) легко получить в Ньютоновской механике.
Вклад P - чисто релятивистско-гравитационный эффект (содержит c). 8

В уравнениях Эйнштейна есть еще Λ -член, который сейчас приписывают энергии вакуума.

Учитывая, что $da/dt = Ha$, 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;

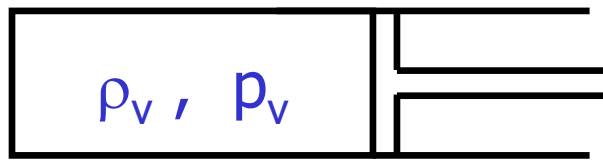
Для решения уравнений необходимо знать $\rho=\rho(a)$, получается:

$\rho=0$	пылевидная материя	$\rho \propto a^{-3}$ (число частиц сохраняется)
$\rho=(1/3) \rho c^2$	радиация	$\rho \propto a^{-4}$ (энергия фотона $\sim 1/a$)
$\rho_v = -\rho_v c^2$	вакуум	$\rho \propto \text{const}$
$\rho_w = w\rho_w c^2$	$-1 < w < 1/3$, "квинтесценция"	$\rho \propto a^{-3(1+w)}$

Плотность и давление вакуума

Вакуум, в принципе, может обладать плотностью энергии, однако она не должна зависеть от системы отсчета и меняться при расширении Вселенной.

Рассмотрим расширение объема заполненного вакуумом без подвода тепла


$$\begin{aligned} dE &= -p dV \\ \rho_v c^2 dV &= -p_v dV \\ \Rightarrow p_v &= -\rho_v c^2 \end{aligned}$$

Из уравнения (3) $\ddot{a} \propto -(\rho + 3p)$ везде далее $c=1$

Если ρ и p положительны (обычный случай), то расширение замедляется. Для совр. 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 положительным ускорением – космологическая антигравитация!



Некоторые решения

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

$$a \propto t^{2/3}$$

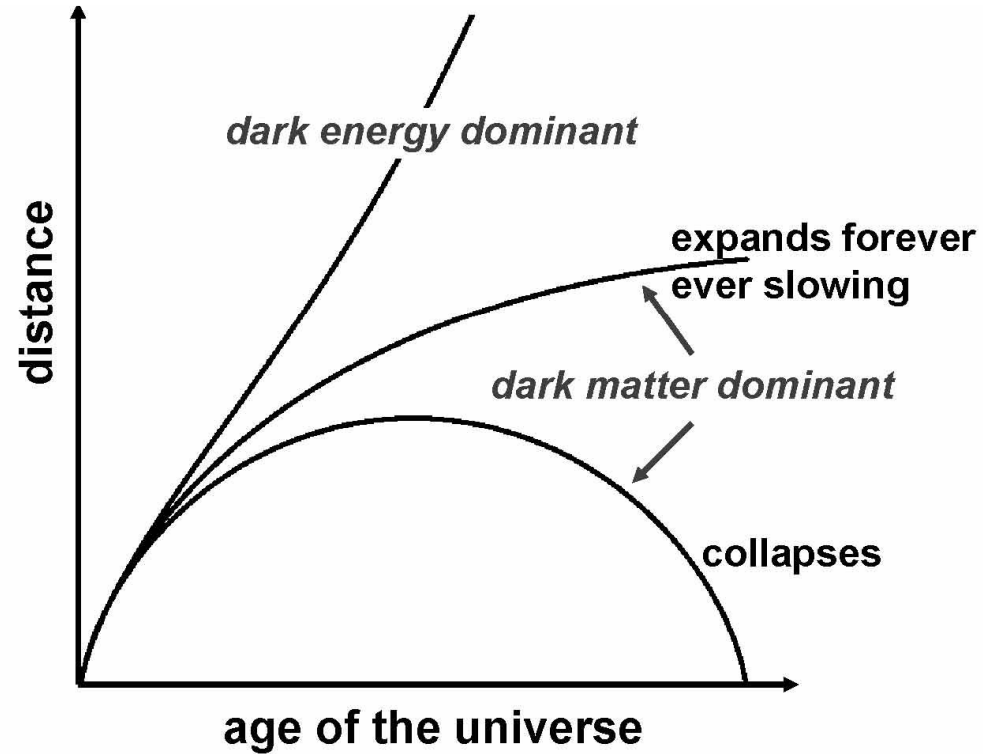
- $k=0, \rho, p=(1/3)\rho$ - плоская радиационно-доминантная

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

- $k=0, p=-\rho_v=\text{const}, \rho_m \sim 0$ - 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





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 (и не только):

- ❖ динамики расширения Вселенной в различные эпохи (измерение постоянной Хаббла),

Измерение параметров вселенной по скорости расширения

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

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

Измеряя $H(z)$ получаем информацию о составе вселенной т.е нужно измерить как красное смещение зависит от расстояния до объекта (звезды, галактики)

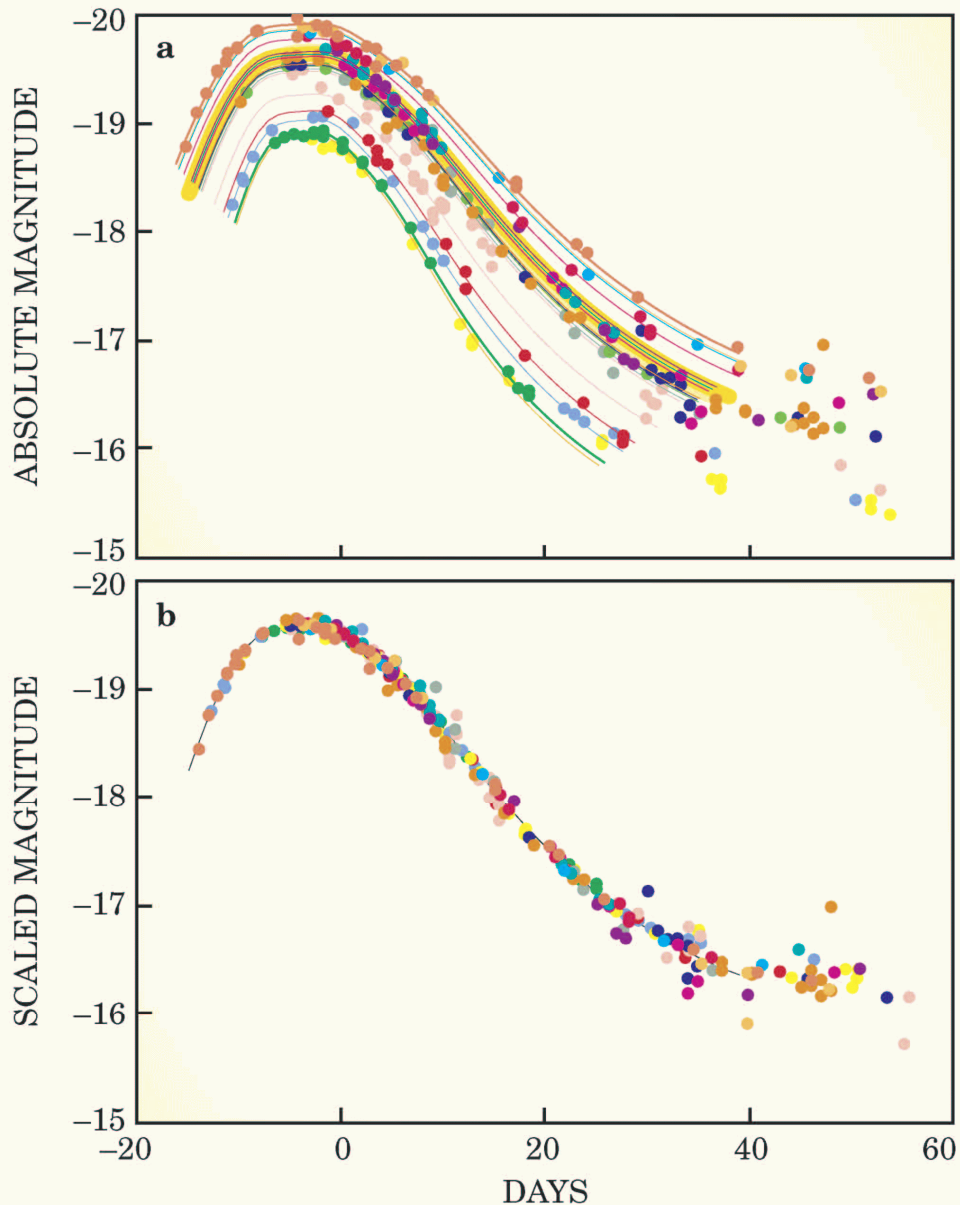
Расстояния во вселенной

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 (1a)
- Другие

Сверхновые 1a

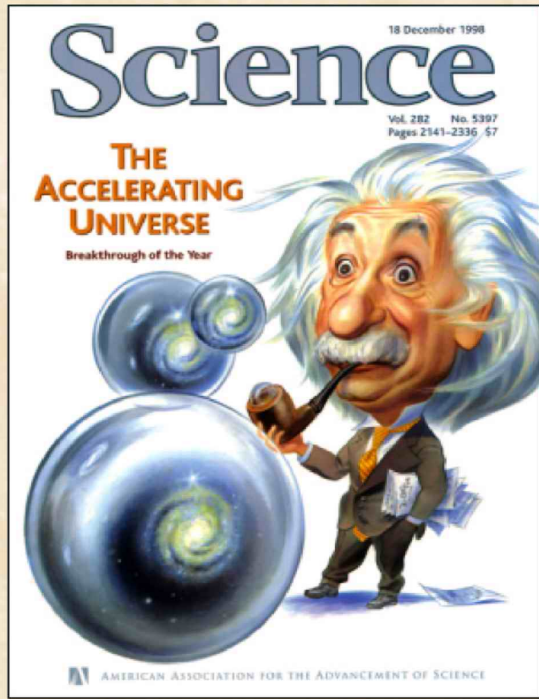
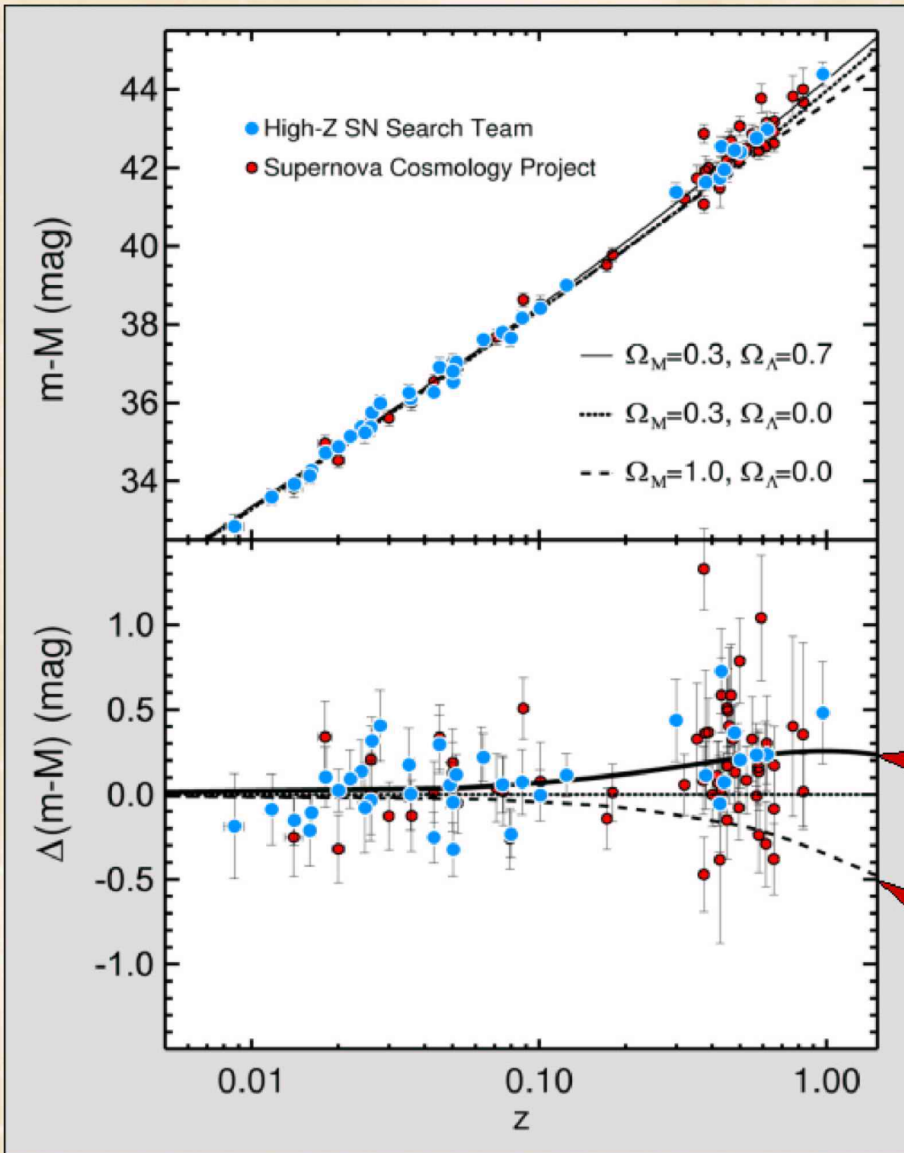


Потухшая звезда - белый карлик с $M \sim M_c$ в системе двойных звезд затягивает в-во от соседней звезды и при $M \sim 1.4M_c$ снова вспыхивает.

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) (С.Перлмутер, Б.Шмидт, А. Рисс, Нобел. премия 2011)

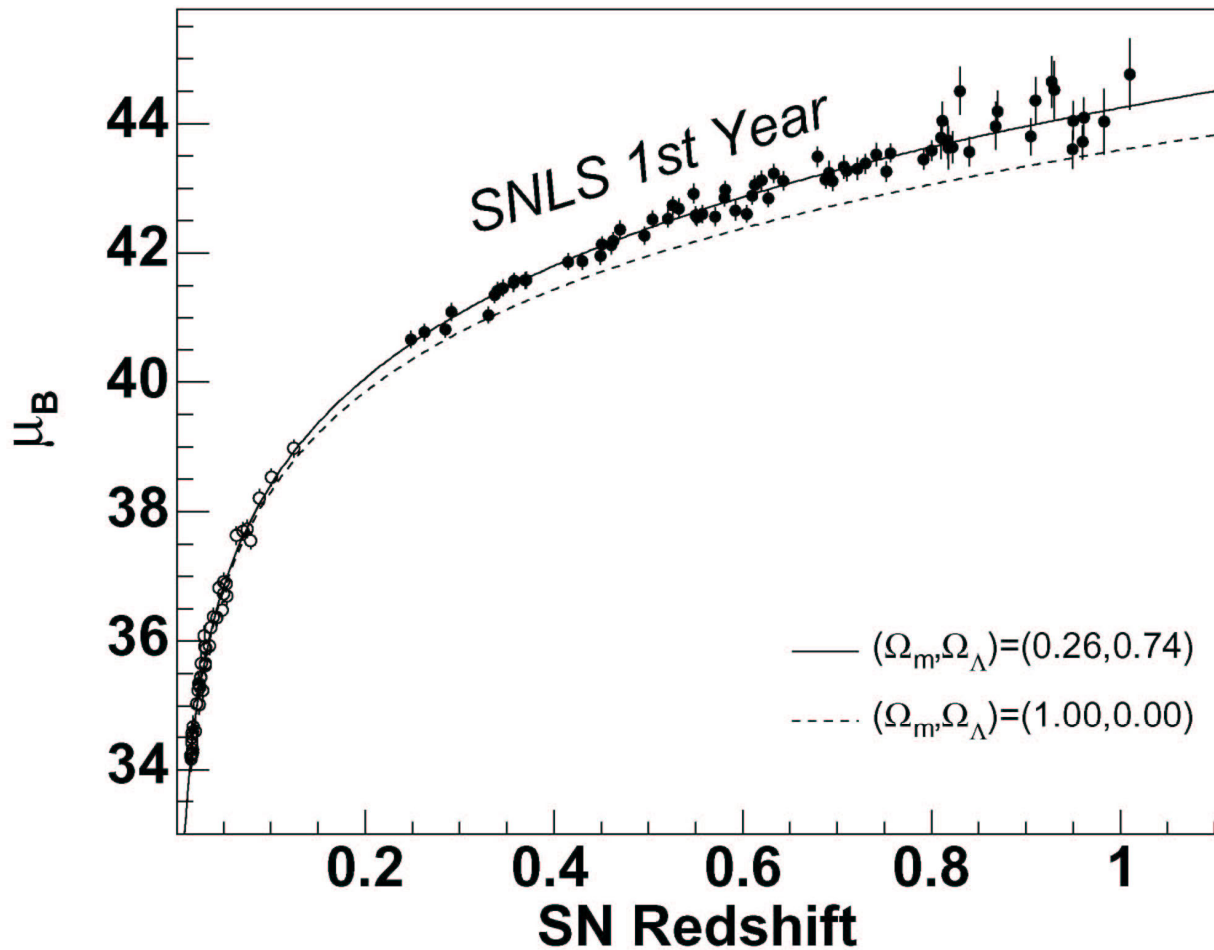


Accelerated expansion
($\Omega_M = 0.3, \Omega_\Lambda = 0.7$)

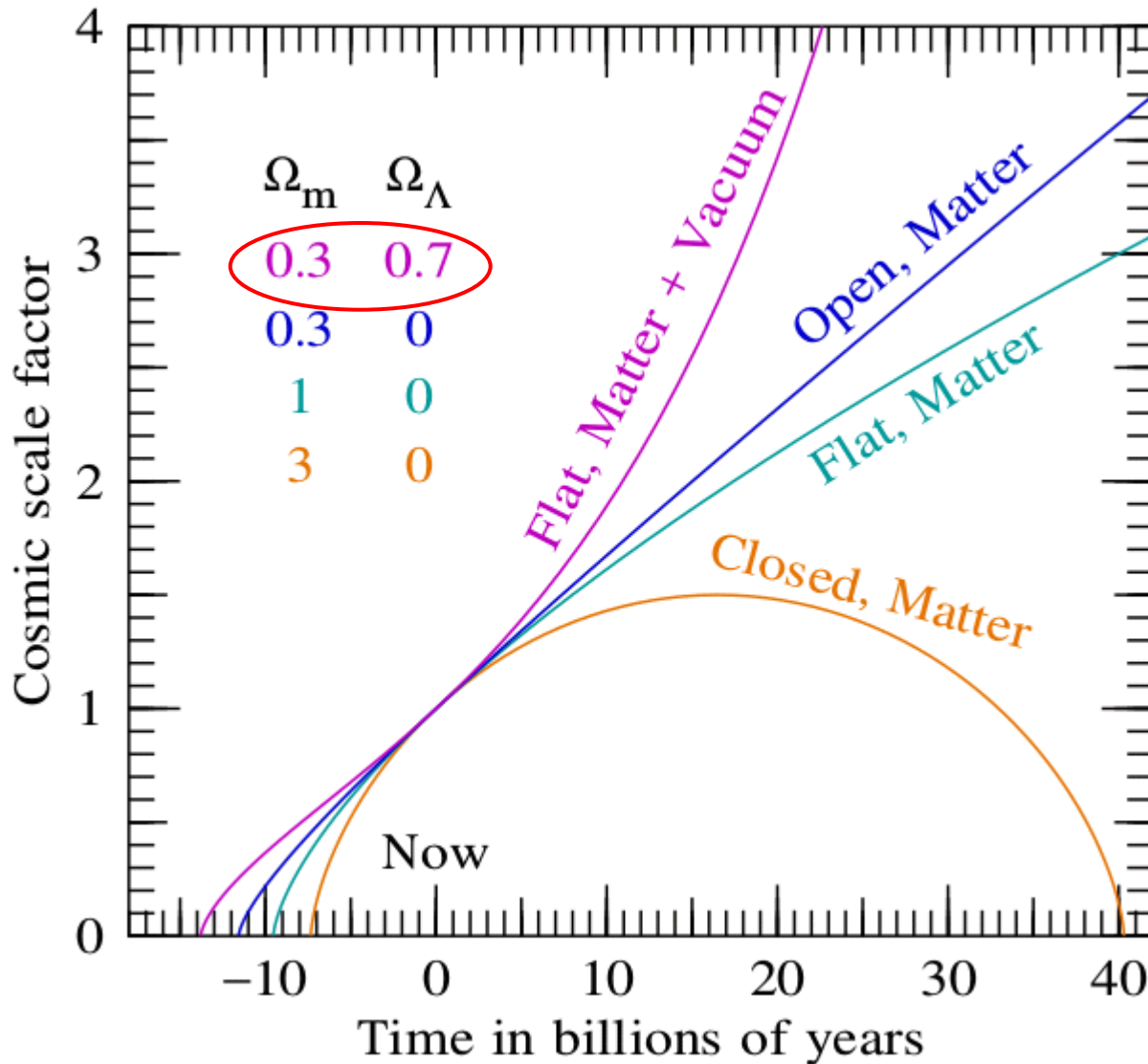
Decelerated expansion
($\Omega_M = 1$)

70% плотности Вселенной
составляет антигравитирующая
«темная энергия» (как плотность

Данные группы SNLS 2005 года



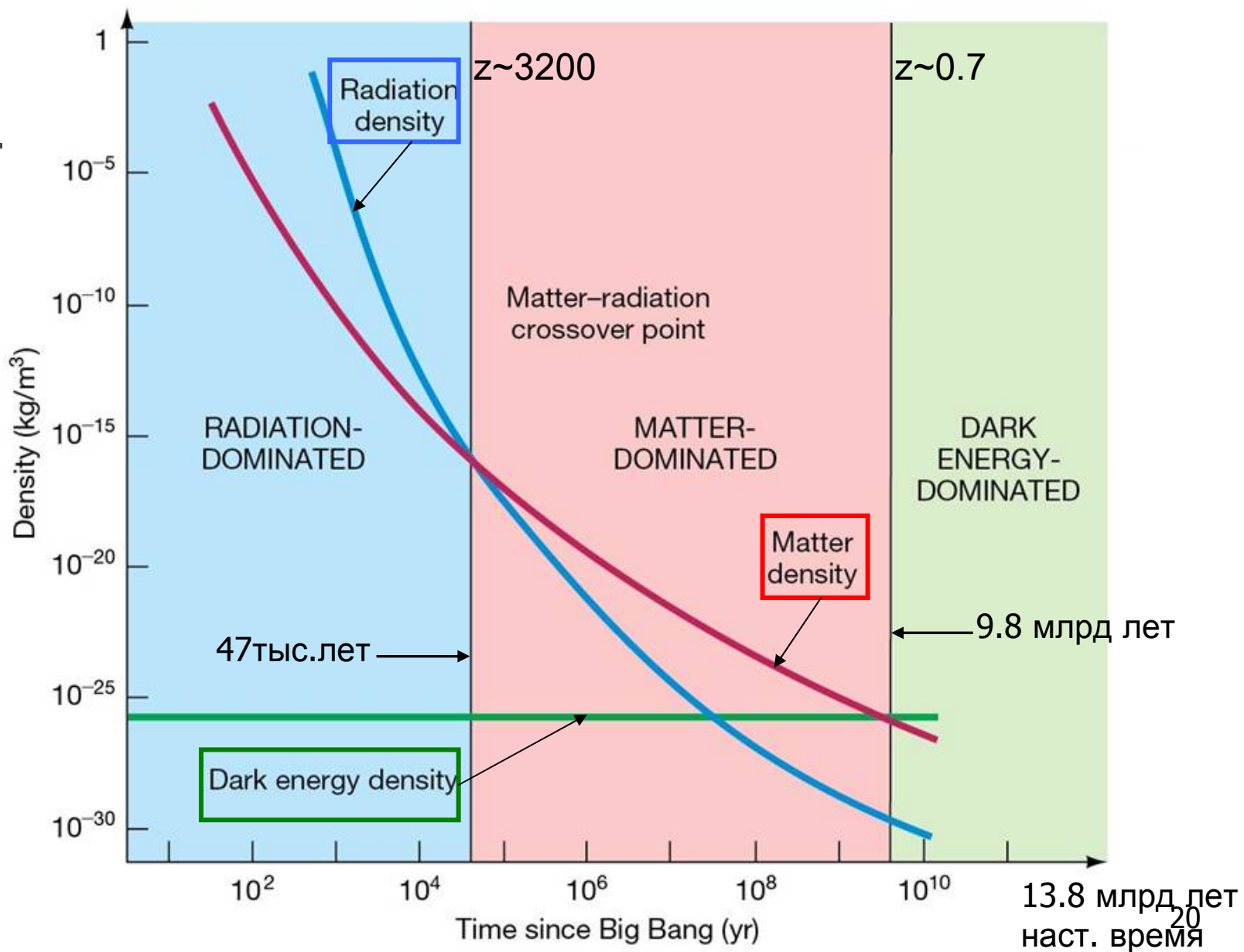
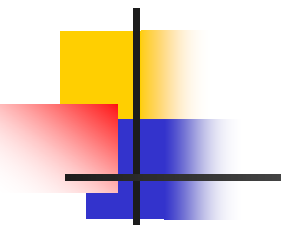
Сценарии развития вселенной



Вселенная сначала замедлялась, а при $z < 0.7$ (примерно 5 млрд. лет назад) начала ускоряться.

Возраст Вселенной ~ 13.8 млрд. лет.

Эволюция состава Вселенной



Определение плотности барионной материи по космологическому нуклеосинтезу (при $t \sim 1-3$ мин)

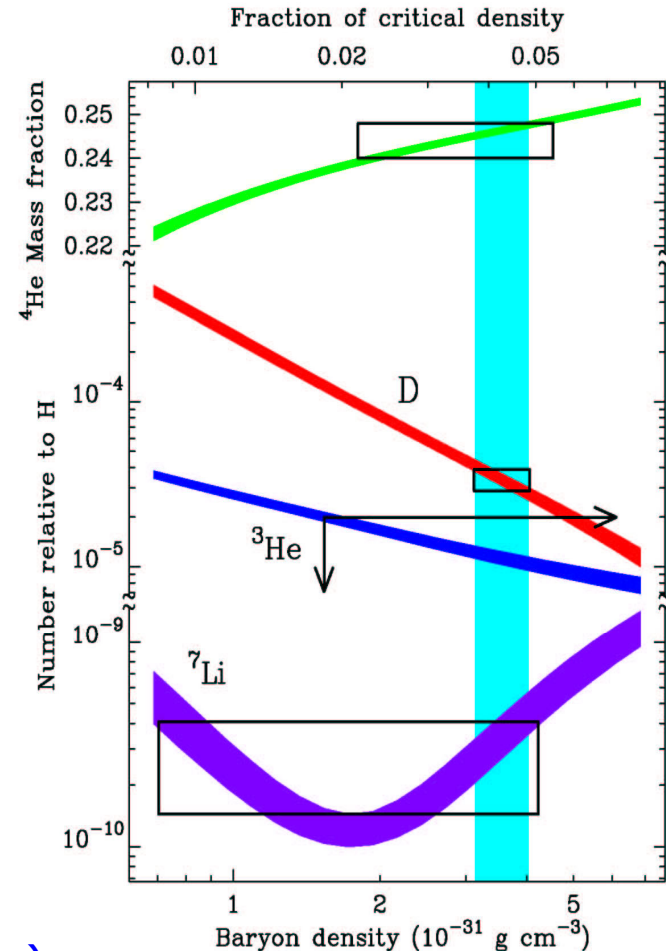
При высокой температуре вселенной плотности нейтронов и протонов были одного порядка. При $T < 1$ ГэВ нейтроны перестали образовываться и их к-во стало быстро уменьшаться. Выжили только те, которые вошли в состав легких ядер (D, He, Li...). По их плотности находится плотность барионной материи.

Из концентрации D следует

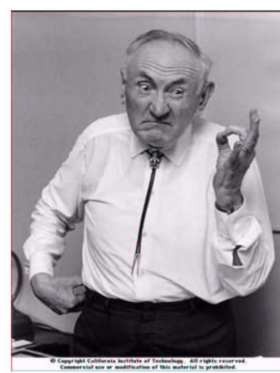
$$\rho_b = 3.8 \pm 0.2 \cdot 10^{-31} \text{ г/см}^3 \sim 0.04 \rho_c$$

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

Это меньше, чем плотность материи ($0.3 \rho_c$), полученная из изм. расширения Вселенной, следовательно, есть невидимая «темная материя»

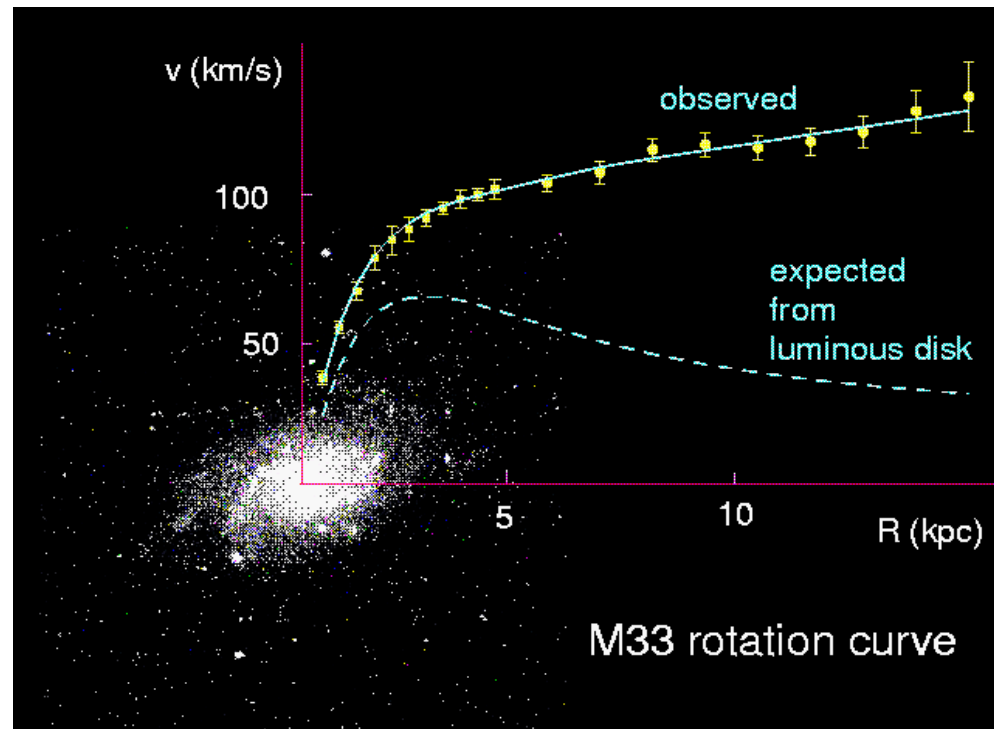
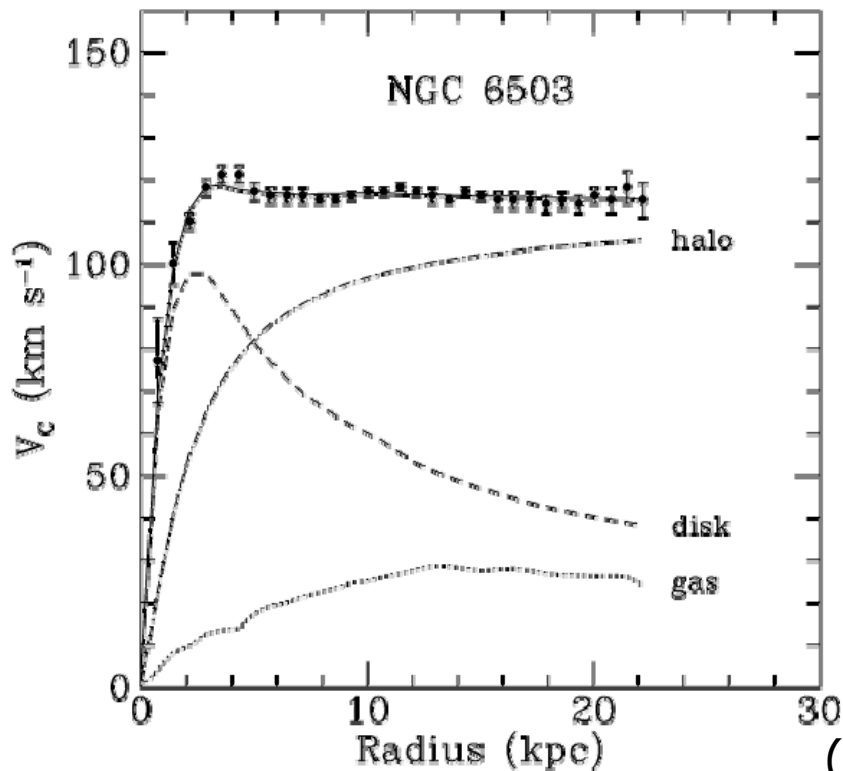


Галактическая темная материя



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!**



(к этому вернемся еще далее)

Микроволновое реликтовое излучение

(CMB –cosmic microwave background)

Предсказано в 1946 (Г.Гамов), открыто в 1965 (Пензиас, Вильсон)
Около 380 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 $T = 2.725 \pm 0.002^\circ$, $n_\gamma = 410.4 \pm 0.9 \text{ см}^{-3}$. Скорость Земли относительно CMB $V_3 = 370 \text{ км/сек.}$

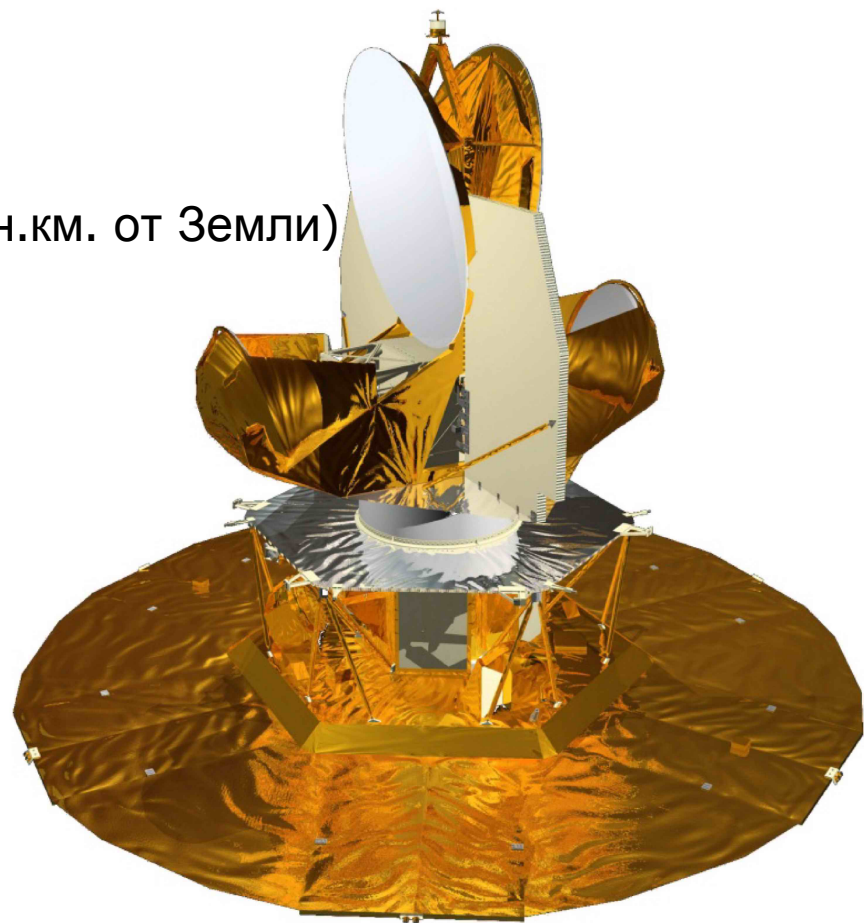
Кроме того, что реликтовое излучение является одним из важнейших подтверждений «большого взрыва», оно дает уникальные данные о ранней истории вселенной (инфляция в первые доли секунды), геометрии и составе вселенной.

Основной источник информации: анизотропия реликтового излучения на относительном уровне $\Delta T/T \sim 10^{-5}$ открытом в 1992 г. (COBE). По мнению космологов - это было крупнейшее открытие в астрофизике за последние 30 лет. Нобелевская премия 2006.

После COBE измерения анизотропии CMB проводились с Земли и со спутников. Наиболее точные данные получены на **WMAP** (Wilkinson Microwave Anisotropy Probe) , затем на **Planck**

Satellites: The WMAP Mission

- NASA satellite measuring full-sky CMB temperature maps; operating at outer Lagrangian point (L2) (1.5 млн.км. от Земли)
- angular resolution $\gtrsim 15'$
- frequency coverage 23 – 94 GHz
- operating very well; first results released in Feb. 2003
- third sky coverage completed in Apr. 2003

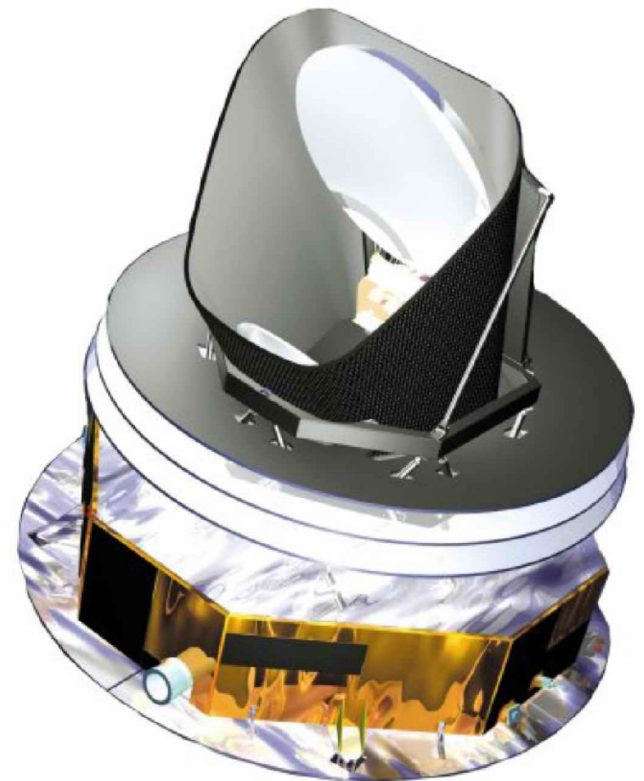


Измерение СМВ с помощью Planck

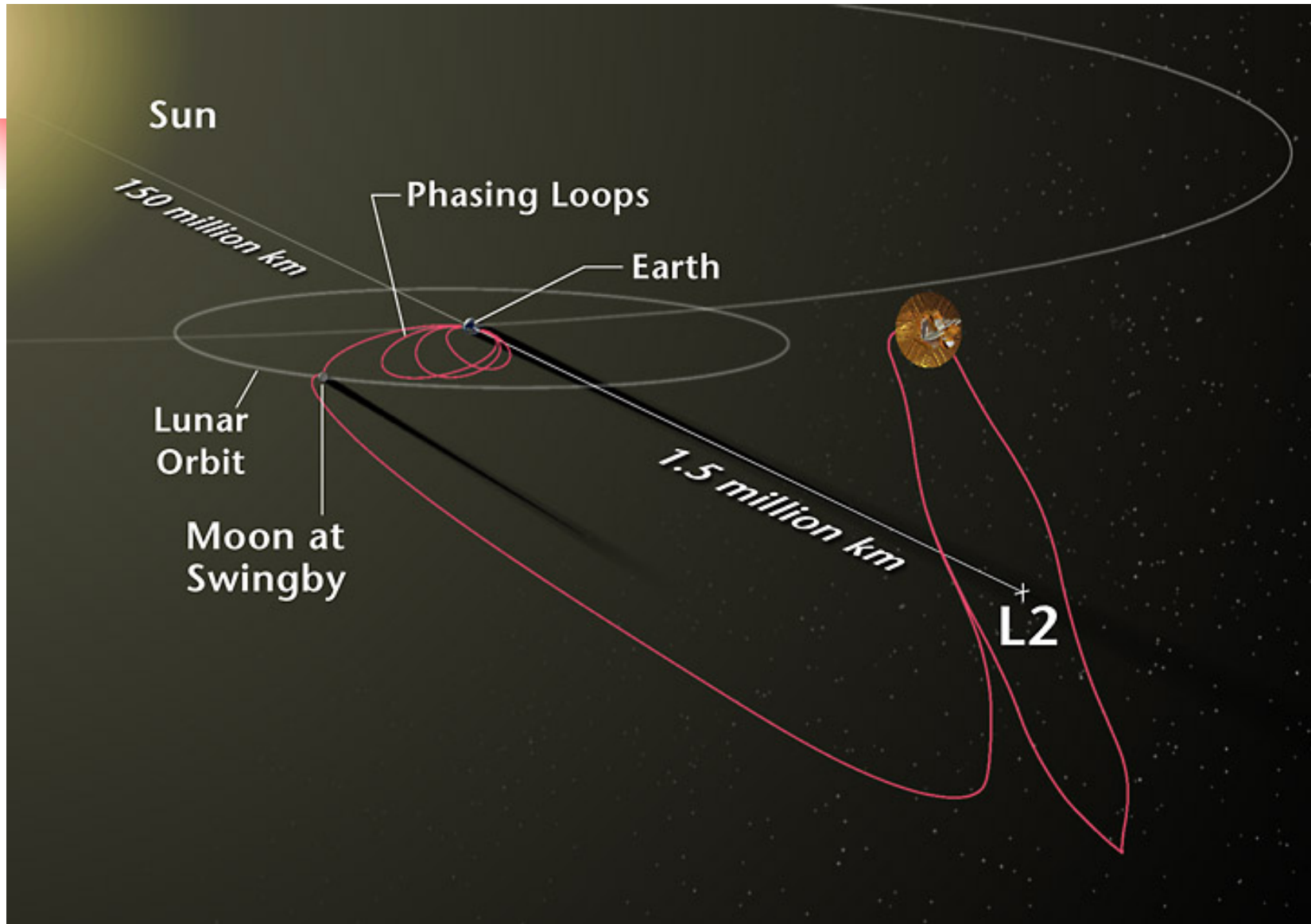
Satellites: Planck

(летает с 2010 г, последние результаты опубликованы в 2018)

- ESA satellite, launch scheduled for early 2007; to measure full-sky temperature and polarisation maps; also operating at L2
- angular resolution $\gtrsim 5'$
- frequency coverage 30 – 857 GHz
- wide frequency coverage very important for accurate foreground subtraction

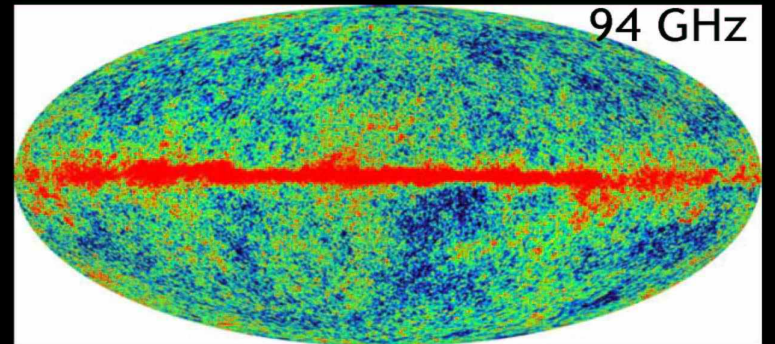
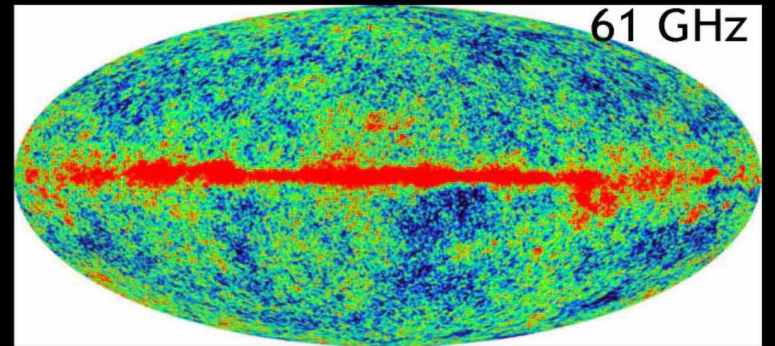
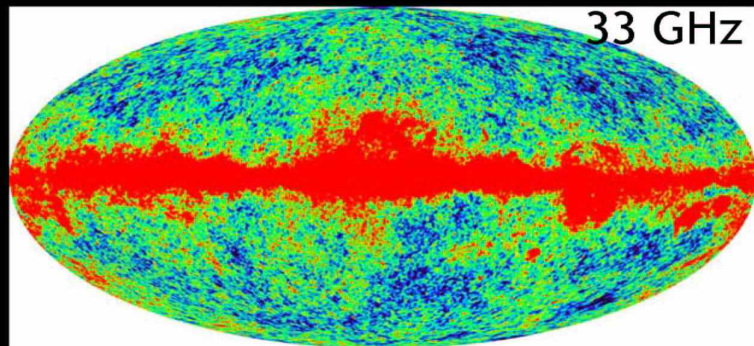
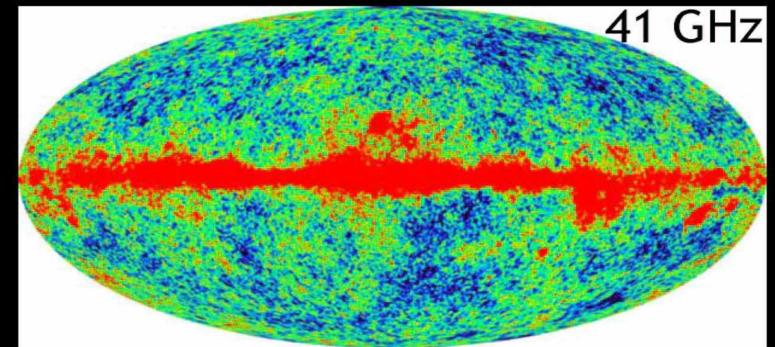
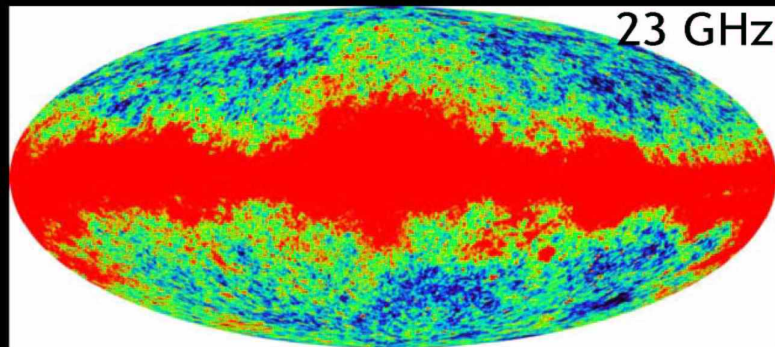


Получены точности основных косм. параметров лучше 1 %



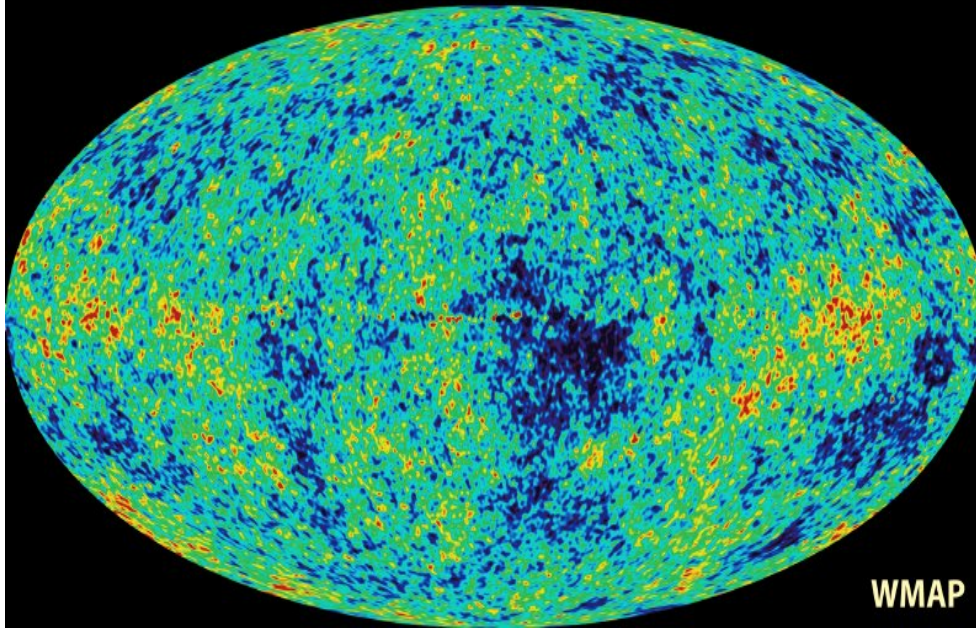
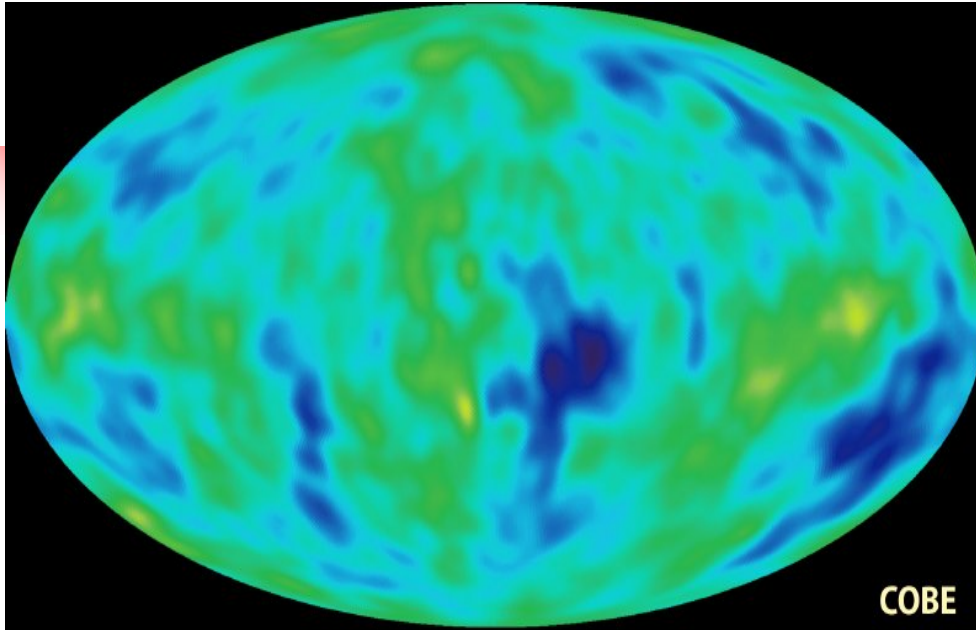
Фон от нашей Галактики удаётся убрать путем измерения реликтового излучения на нескольких частотах.

WMAP Sky Maps: 23 to 94 GHz

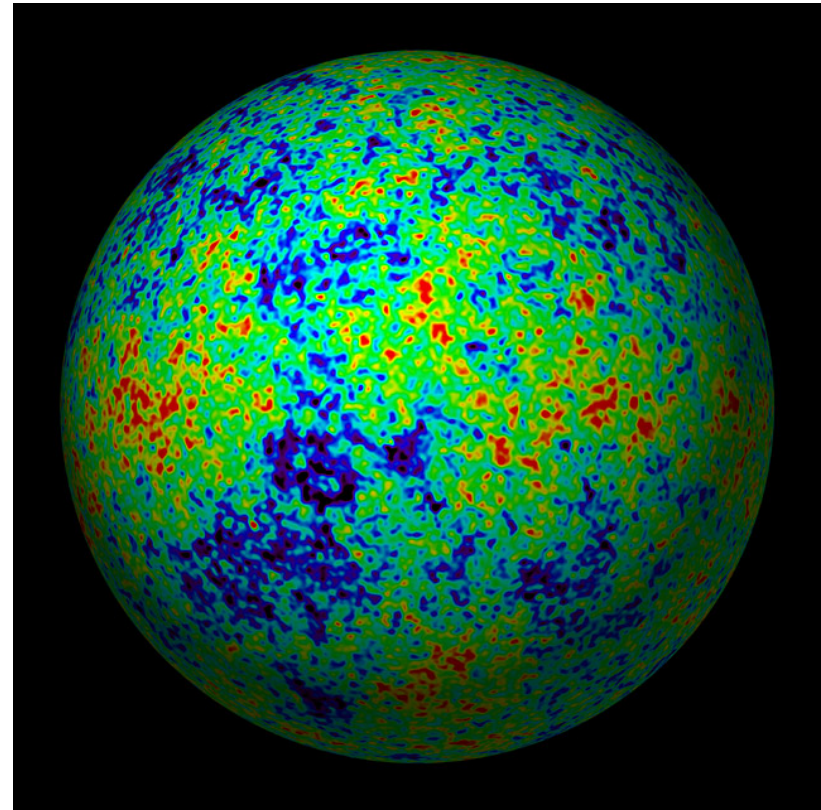


- Absolute Calibration: 0.5%
- Bandwidth: ~20%
- Beam FWHM: 0.85° (23 GHz) to 0.21° (94 GHz)
- Systematic around $15\mu\text{K}^2$ for C_2^{TT} vs the $\sim 1000\mu\text{K}^2$ nominal TT and ~ 100 (EE), and less for higher l

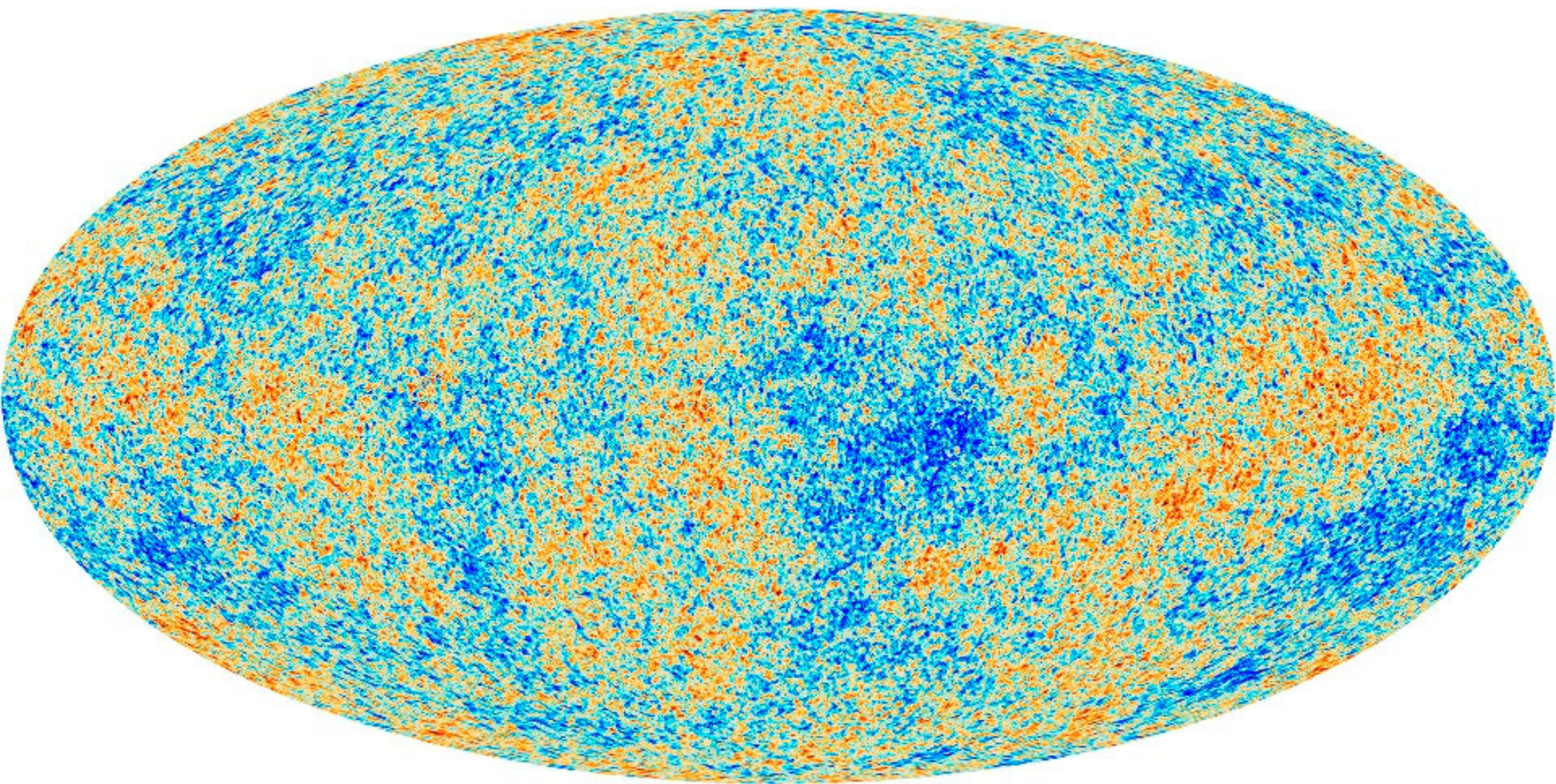
Микроволновая карта неба



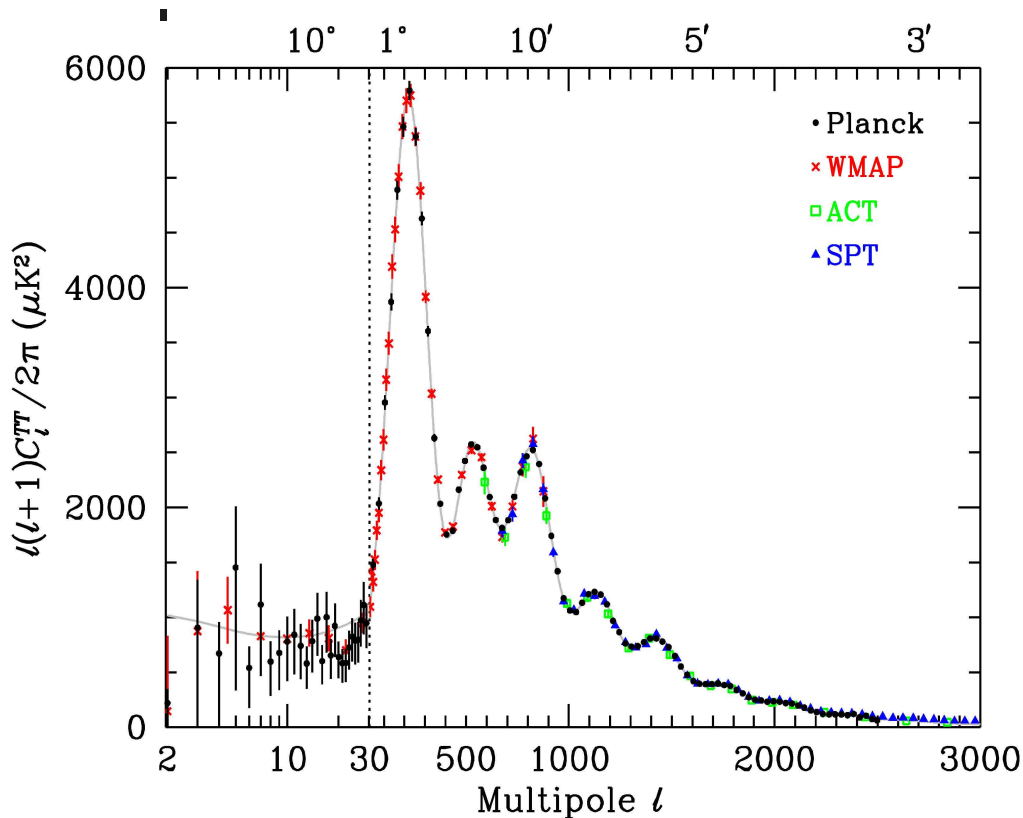
Характерный масштаб
температурных пятен
 $\sim 1^\circ$



Температурная карта, полученная Planck



Спектр мультипольных гармоник СМВ



$$\delta T(\theta, \varphi) = \sum_{l=2}^{l=\infty} a_{lm} Y_{lm}(\theta, \varphi)$$

$$C_l = \frac{1}{2l+1} \sum_{l=-m}^{l=+m} |a_{lm}|^2$$

Так положение первого пика $\sim 1^\circ$, говорит о том, что Вселенная плоская: $\Omega = 1 \pm 0.002$.

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 почти все параметры Вселенной с высокой точностью.

Данные описываются кривой всего с 6 подгоночными параметрами. 30



Оценка положения первого пика

Реликтовые фотоны образовались при $z \sim 1100$.

Размер причинно-связанной области $l_h(t = t_{rec}) \sim ct_{rec}$

За счет расширения сейчас $l_h(t = t_{now}) \sim ct_{rec}(1+z)$

Сейчас эта область находится вблизи современного горизонта $L \sim ct_{now}$ (для пылевидной плоской Всел.)

Угловой размер $\theta \sim \frac{l_h(t = t_{now})}{L} \sim \frac{t_{rec}}{t_{now}}(1+z)$

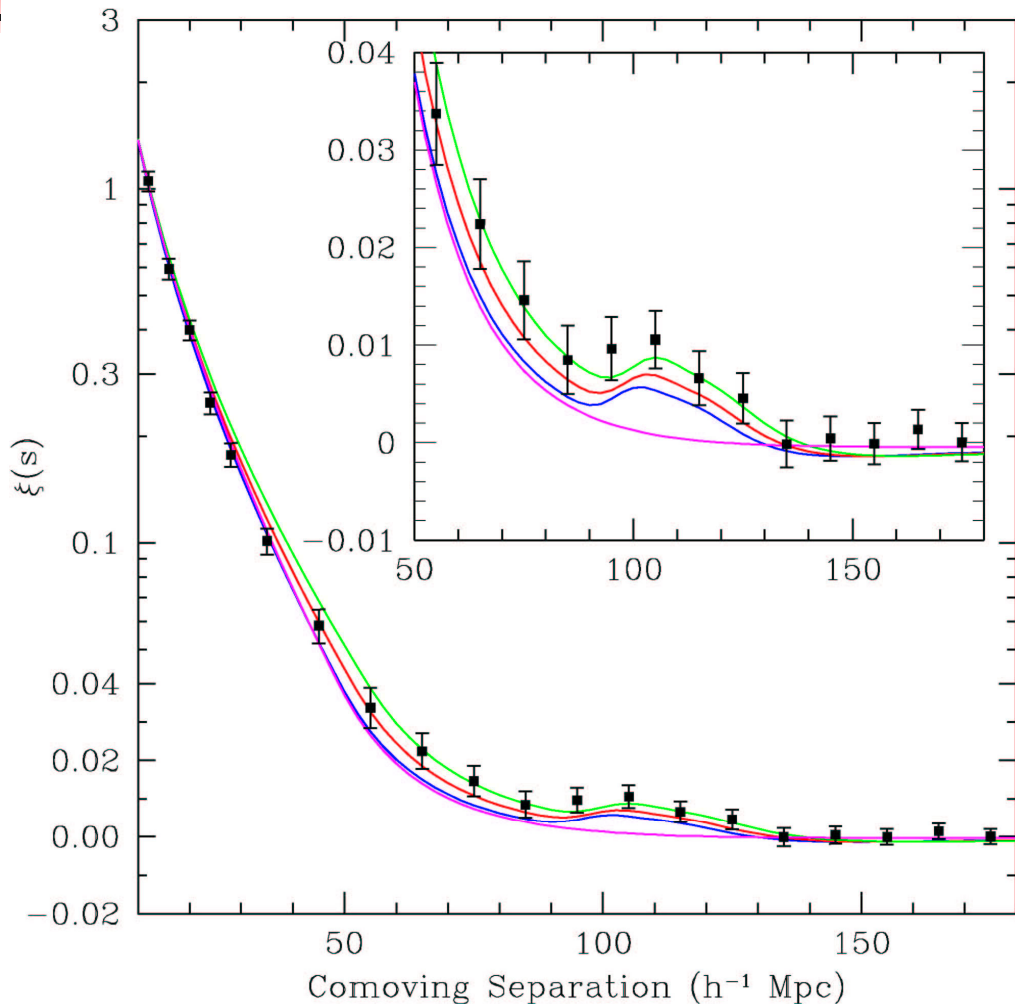
Получаем оценку $\theta \sim 1/50 \sim 1^\circ$

В общем случае угл. положение первого пика **увеличивается** с ростом Ω_t – эффект кривизны пространства

Основные космологические параметры полученные из СМВ (+др.)

CMB density	T_{CMB}	2.72548 ± 0.00057 K
total density	Ω	1.0007 ± 0.0019
matter density	Ω_{m}	0.315 ± 0.007
dark energy	Ω_{Λ}	0.685 ± 0.007
matter density $\times h^2$	$\Omega_{\text{m}} h^2$	0.1424 ± 0.00087 (0.6%)
baryon density	$\Omega_{\text{b}} h^2$	0.02242 ± 0.00014 (0.6%)
Hubble constant	h	0.67 ± 0.42
baryon-to-photon ratio	η	$(6.1 \pm 0.3) 10^{-10}$
scalar spectral index	n_{s}	0.965 ± 0.004
decoupling redshift	z_{dec}	1089.8 ± 0.21
age of the Universe	t_0	$(13.787 \pm 0.020) 10^9$ years
age of decoupling	t_{dec}	379000 years
1/2 reionization redshift	z_{r}	$z = 7.68 \pm 0.79$
reionization optical depth	τ	0.056 ± 0.007
redshift of mat-rad equality	z_{eq}	3387 ± 21
redshift acceleration=0	z_{q}	0.636 ± 0.018
Σm_{ν}	eV	< 0.12
w (P= $w\rho c^2$)		-1.028 ± 0.031

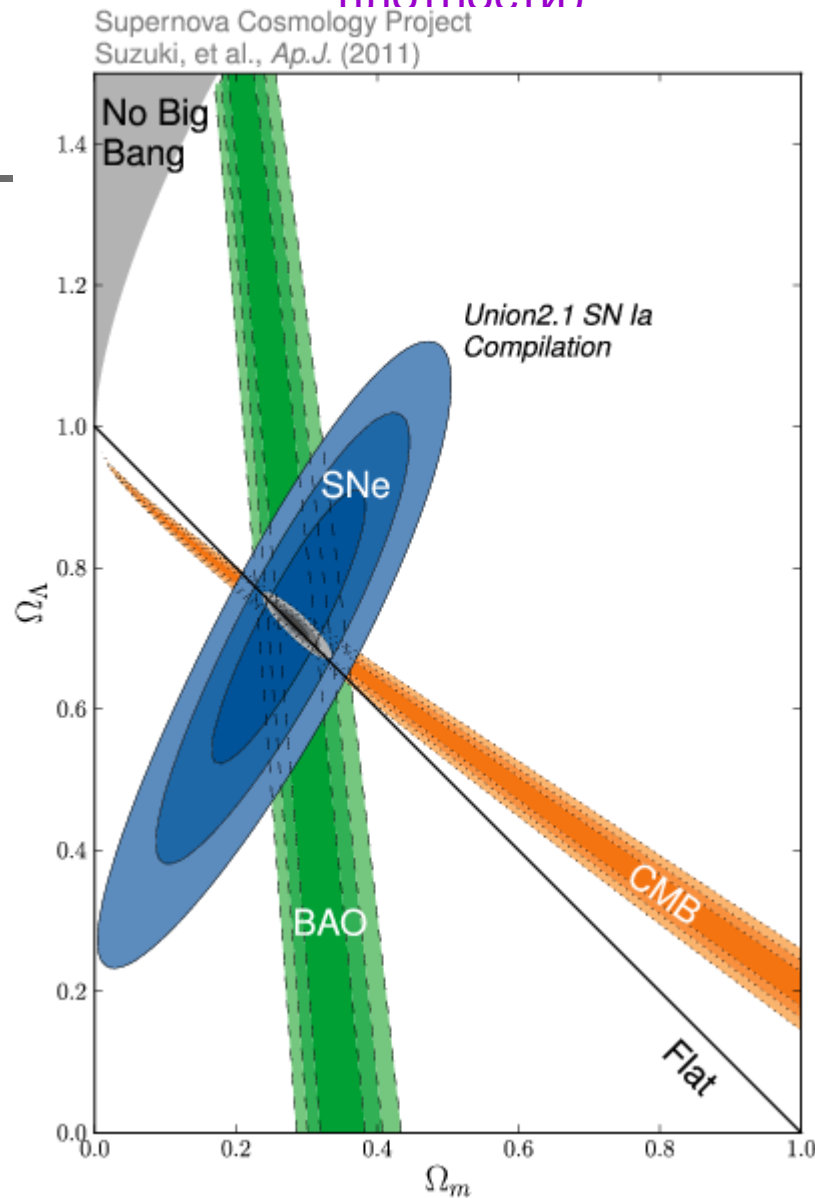
Барионный акустический пик в распределении по расстояниям между галактиками



Флуктуации плотности в ранней Вселенной дают разбегающиеся акустические 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.

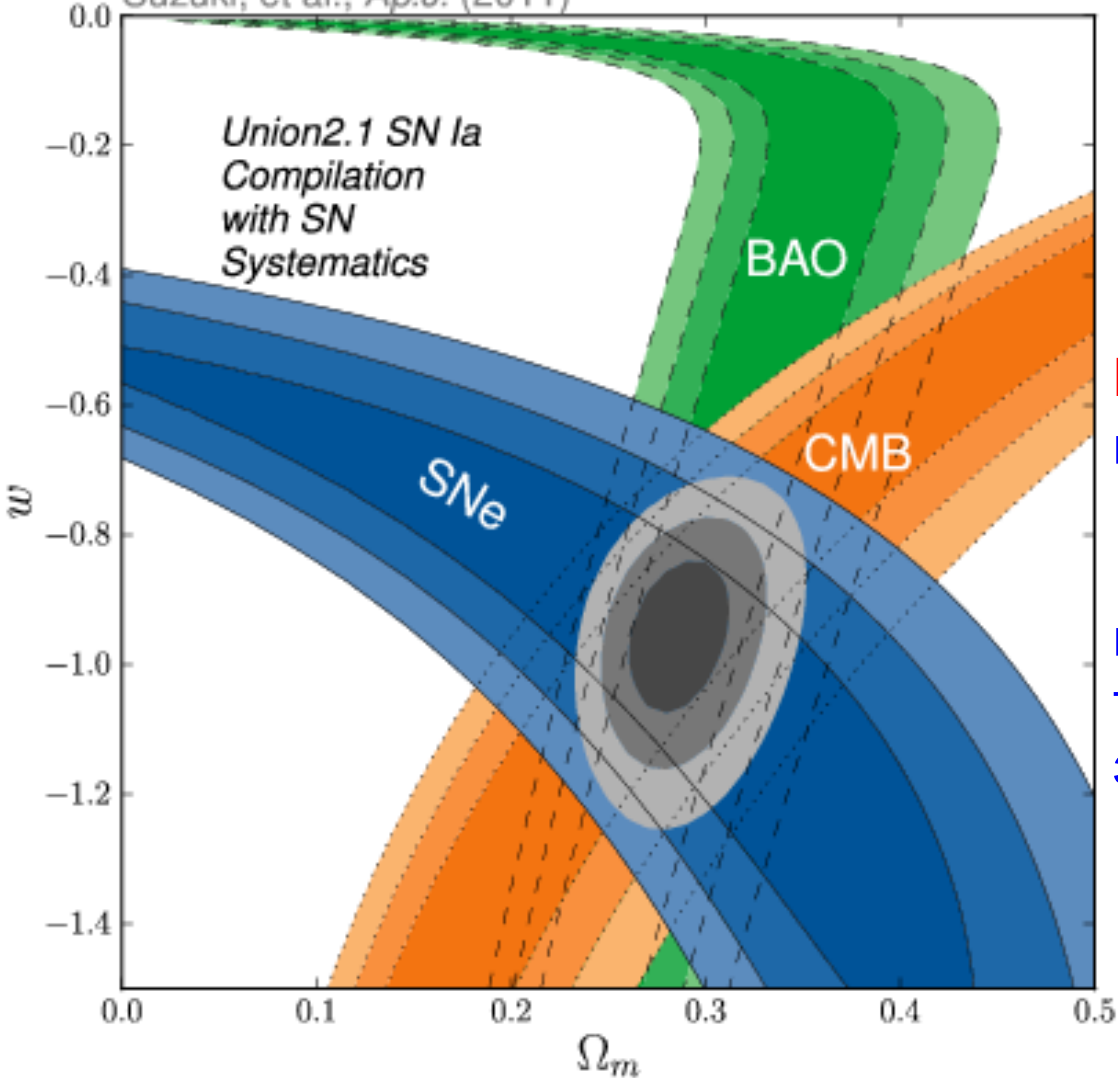
Пик соответствует расстоянию между галактиками 500 млн св. лет³³

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



$$P = w\rho c^2$$

Supernova Cosmology Project
Suzuki, et al., *Ap.J.* (2011)



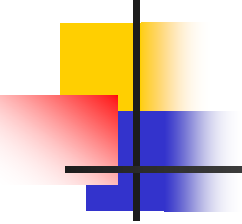
— На данный момент ($z \sim 0$)

$w \approx -1$, как для вакуума

Вопрос: как меняется w от времени (или z)?

Для этого нужно взглянуть глубже в прошлое, измерить точнее $H(z)$, этим сейчас занимаются.

Проблемы модели горячей Вселенной



Простая модель горячей Вселенной не может дать ответ на вопросы

- 1) почему температура реликтового излучения одинаковая во всех направлениях с точностью $<10^{-5}$. Области неба, разделенные более, чем на 2 градуса никогда не были в тепловом контакте.
- 2) Откуда взялись анизотропия реликтового излучения?
- 3) Откуда взялась материя во Вселенной?
- 4) и др.



Инфляционная модель Вселенной

Первый вариант теории был предложен в 1981 году А. Гутом, ключевой вклад в её создание внесли советские астрофизики А. Старобинский, А. Линде, В. Муханов и другие.

Предполагается, что был момент, когда ранняя Вселенная имела вакуумно-подобное состояние $P = -\rho c^2$ (инфлантон), что привело к отталкиванию и экспоненциальному расширению $a \sim \exp(Ht)$ в более, чем 10^{26} раз. В результате вся видимая Вселенная произошла из маленькой области, которая была в тепловом контакте, поэтому температура везде одинакова с большой точностью.

Это состояние «ложного вакуума» во время имеет одинаковую плотность, а объем растет. В конце инфляции этот вакуум возвращается в нормальное состояние и вся его энергия превращается в материю, то, что заполняет сейчас Вселенную.

Происхождение массы Вселенной

Из близости плотности Вселенной к критической ($\Omega=1\pm 0.001$), следует что ее размер по крайней мере в 100 раз больше расстояния до горизонта видимости ($\sim ct$), т.е. более 10^{30} см.

Отсюда масса $M > \rho R^3 \sim 10^{-29} \cdot 10^{90} \sim 10^{61}$ г.

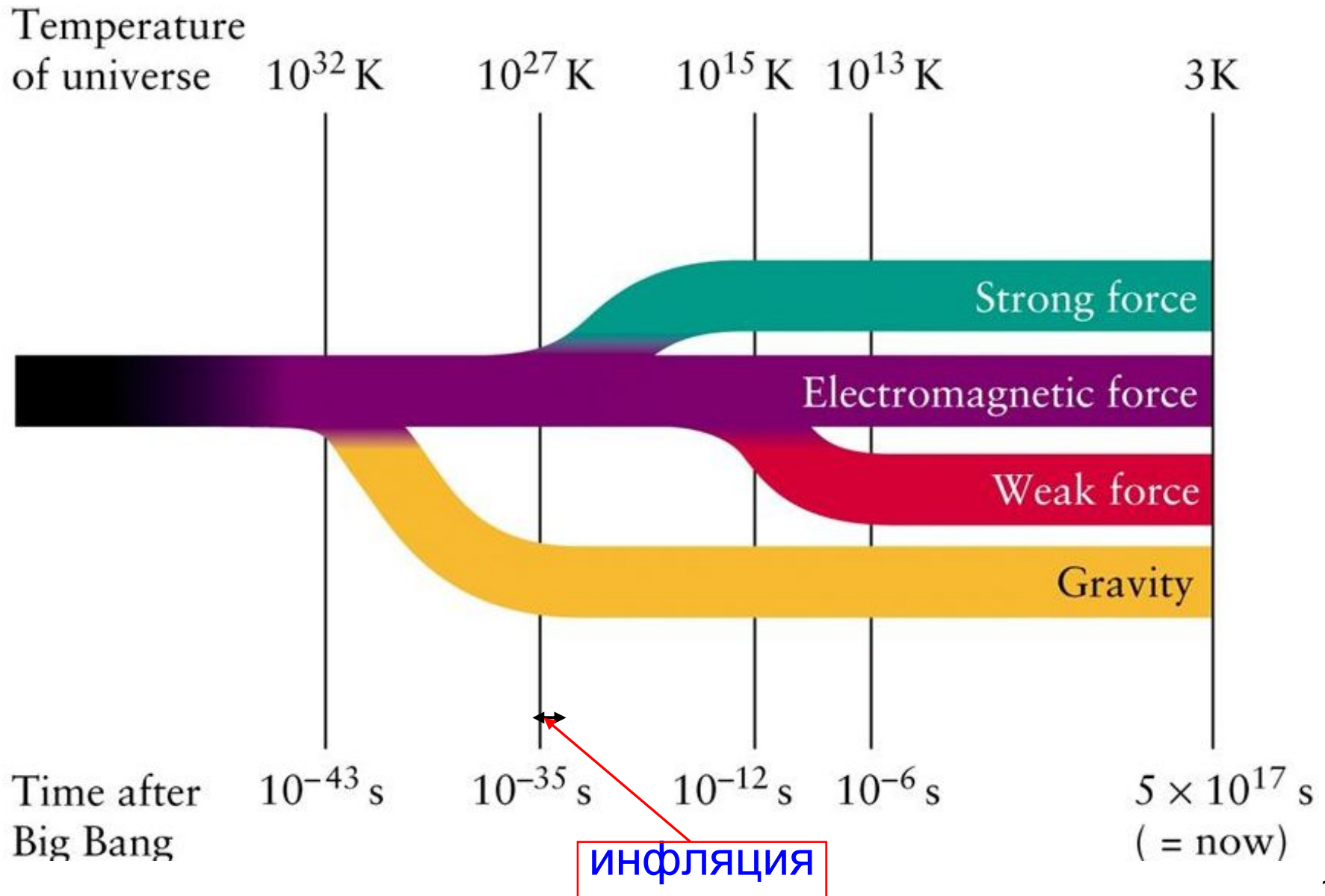
Единственная величина с размерностью массы, которую можно составить из фундам. констант это масса Планка $m_p = (\hbar c / G)^{1/2} = 2 \cdot 10^{-5}$ г

Возможный ответ: на начальной стадии Вселенная состояла из маленького пузырька **вакуумно-подобного вещества** с $P = w c^2$ ($w \sim -1$) и $m \sim 0$. Объем возрастал, а плотность почти не менялась $\rho \propto a^{-3(1+w)}$, т.е. масса росла $m \sim \rho a^3 \sim a^{-3w} \sim a^3$. Затем произошел фазовый переход и это субстанция превратилось в обычную материю. **Для роста массы необходимо отрицательное давление!**

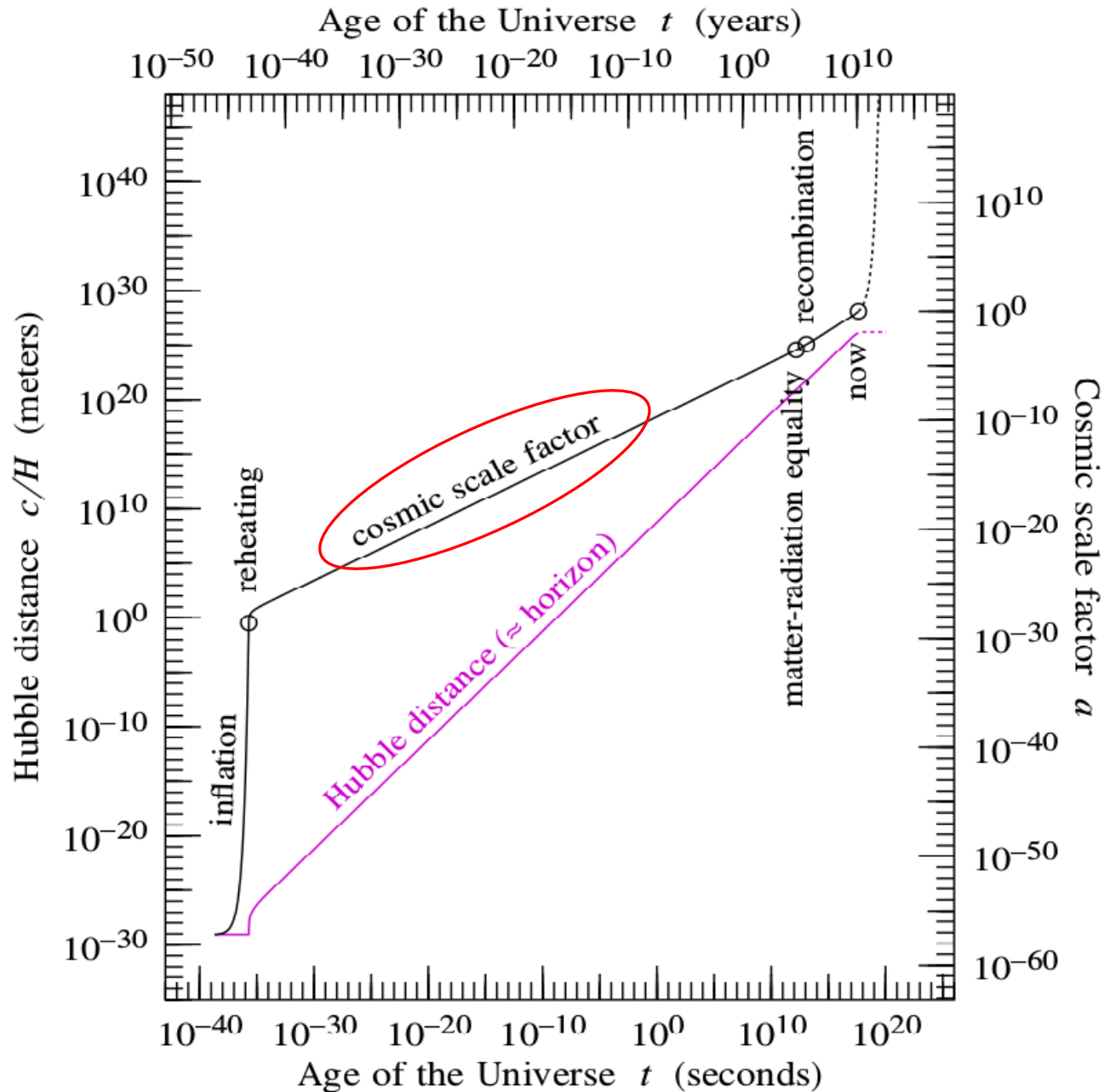
При этом нет нарушения закона сохранения энергии, потому что кроме положительной mc^2 частиц есть еще отрицательная гравитационная энергия, а в сумме они равны нулю! Вселенная произошла из квантовой флуктуации.

Спектр начальных флуктуация неоднородности рассчитывается и очень хорошо воспроизводит карту анизотропии реликтового излучения.

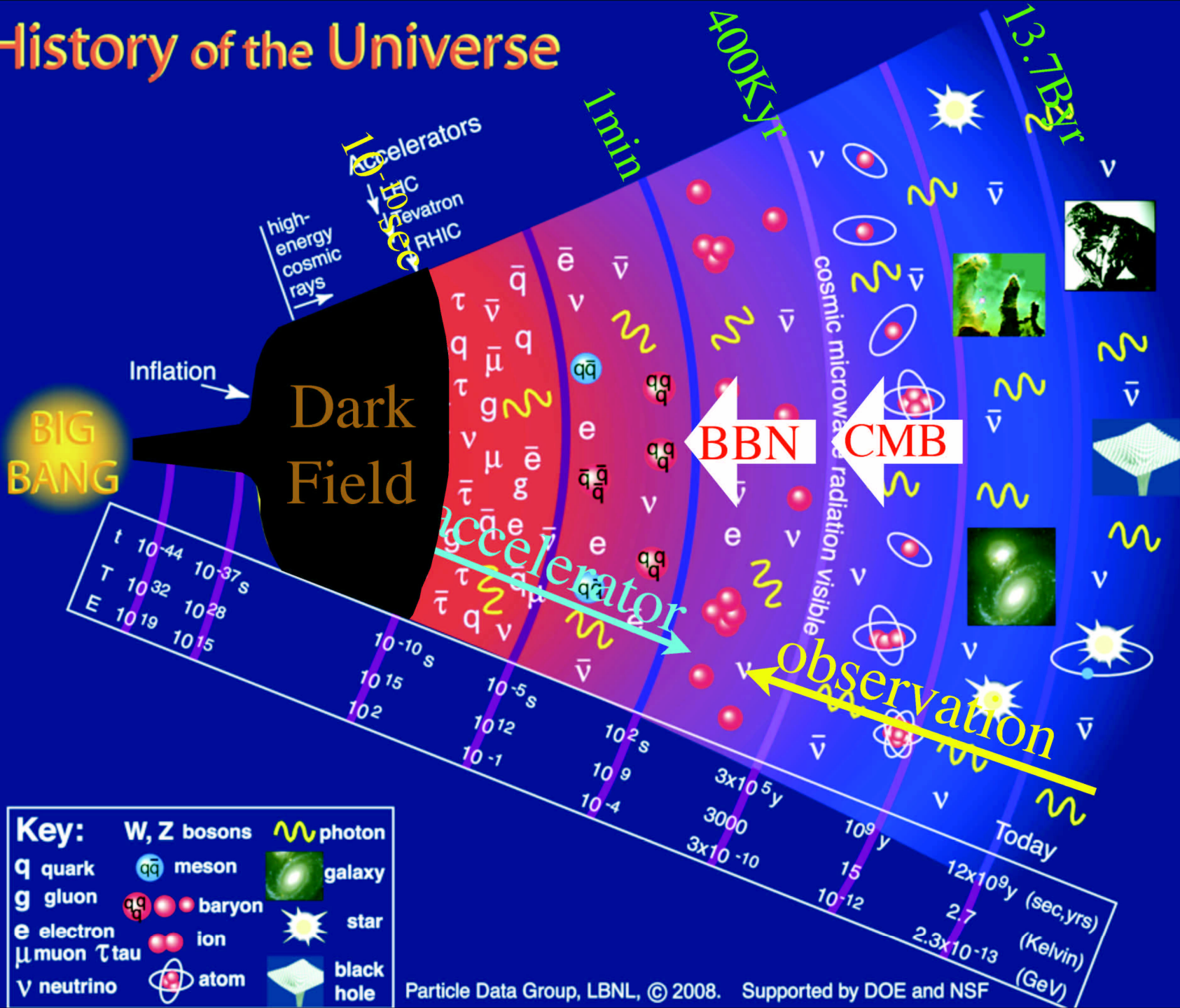
Великое объединение и рождение взаимодействий



Как менялся размер Вселенной (с учетом инфляции)



History of the Universe



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.

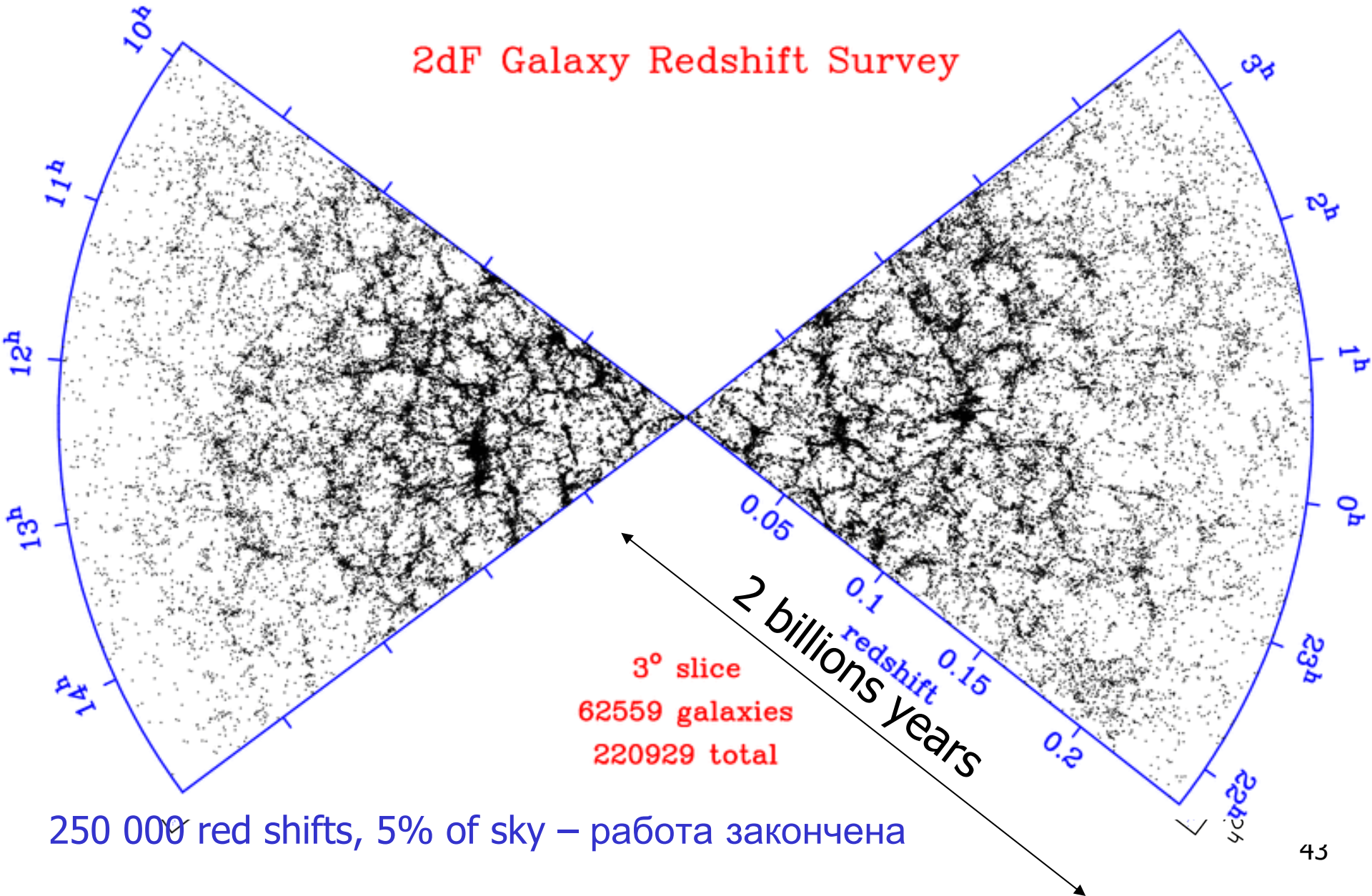
Структуры образовались за счет неустойчивости Джинса. Изучение структур при разных z показывает, что **сначала образовывались малые структуры, затем большие**. Для пылевидной вселенной неоднородности

$\delta \propto a(t) \propto (1+z)^{-1}$, если 10^{-5} при $z=1000$, 10^{-2} сейчас - **не проходит!**

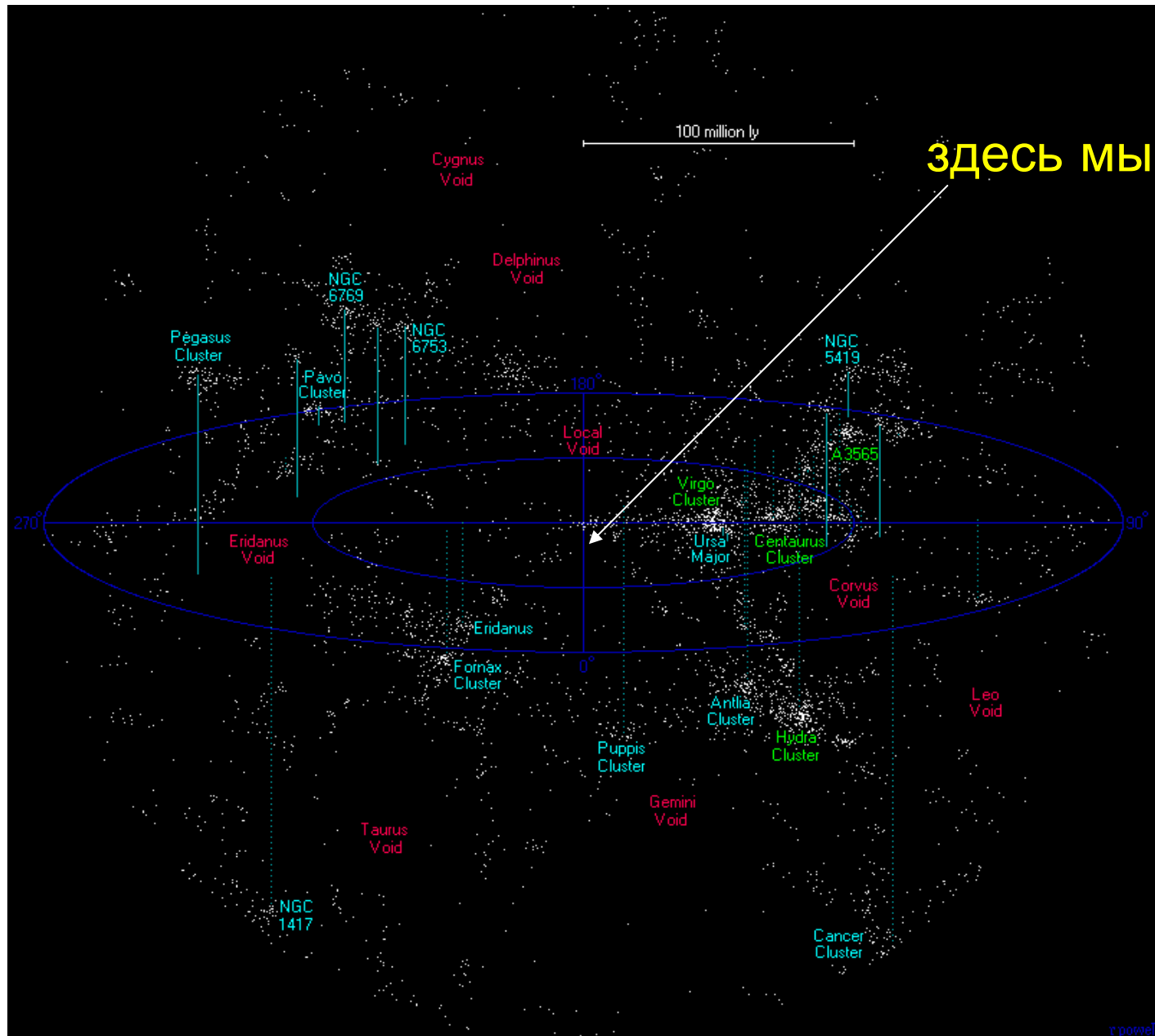
Моделирование ($> 10^{10}$ частиц) показывает, что такое возможно только если предположить существование «**холодной темной материи**» слабо взаимодействующей с обычной материей, которая начала группироваться еще до рекомбинации.

Томограмма вселенной

2dF Galaxy Redshift Survey

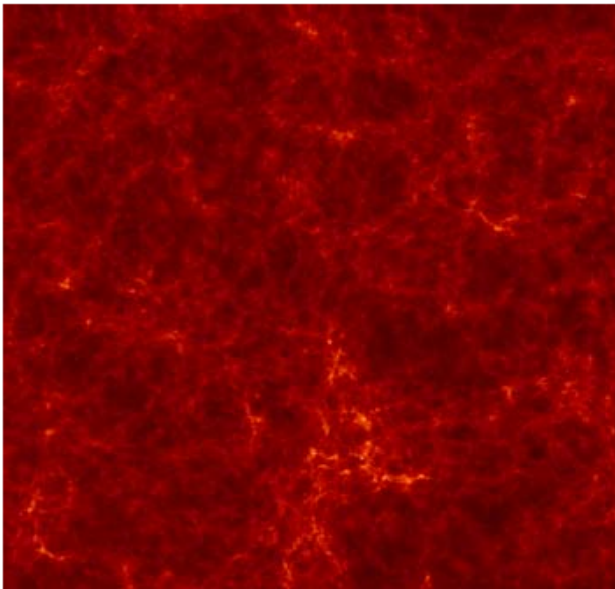


Локальный суперкластер Virgo

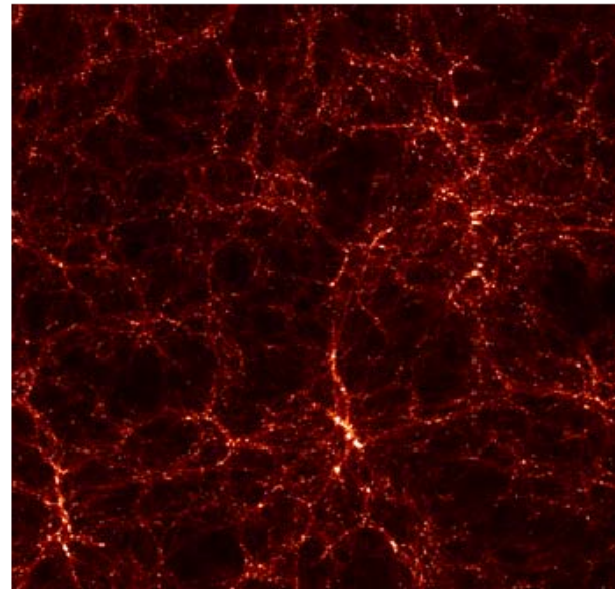


Моделирование формирования структур

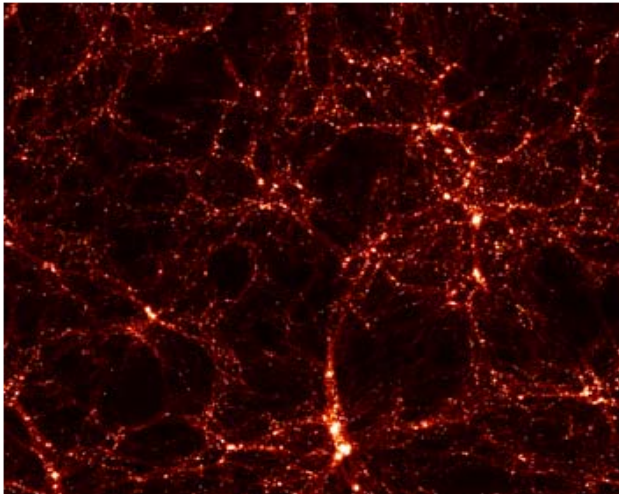
Z=11



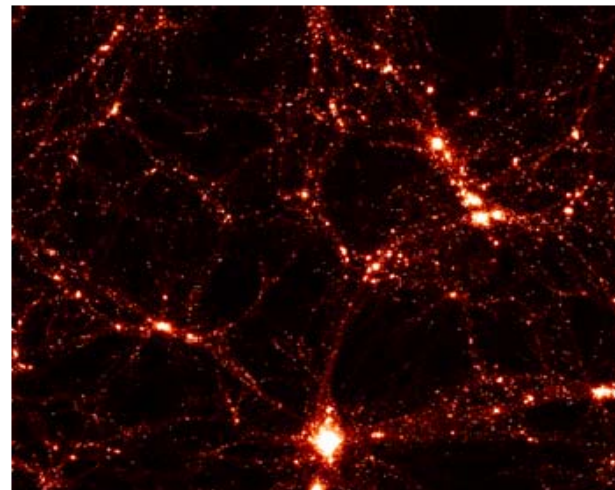
z=2



Z=1

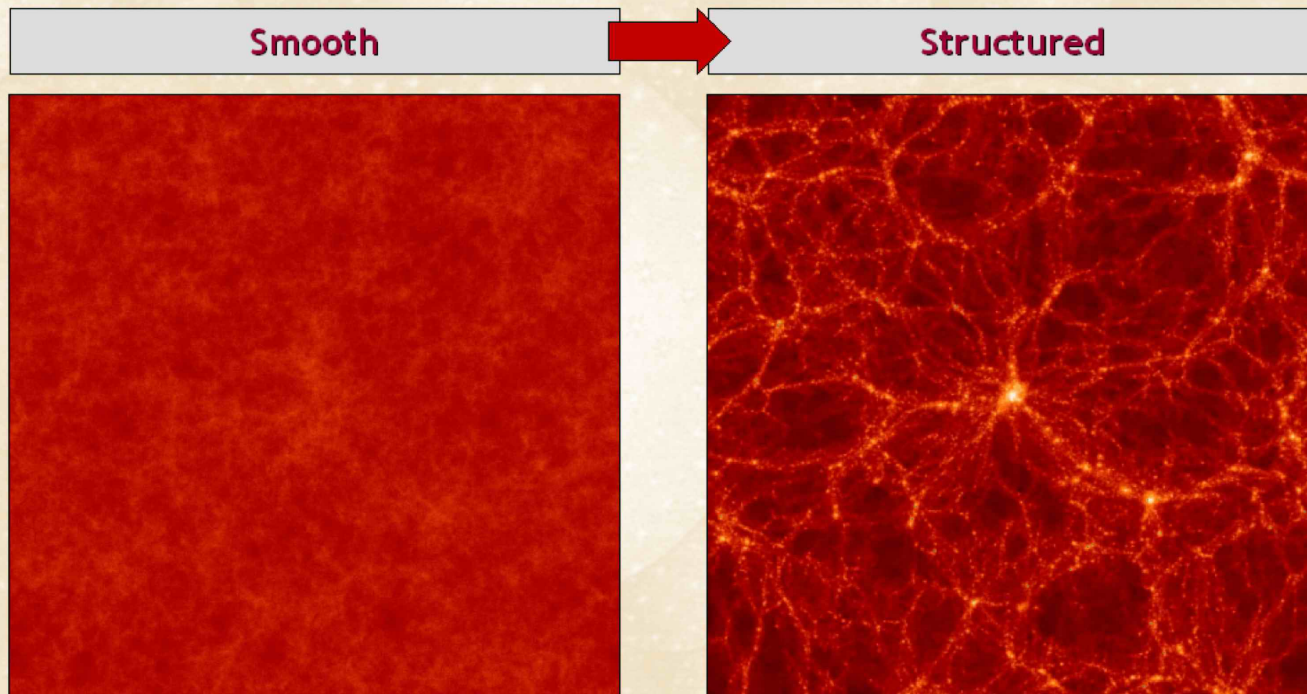


Z=0
сейчас

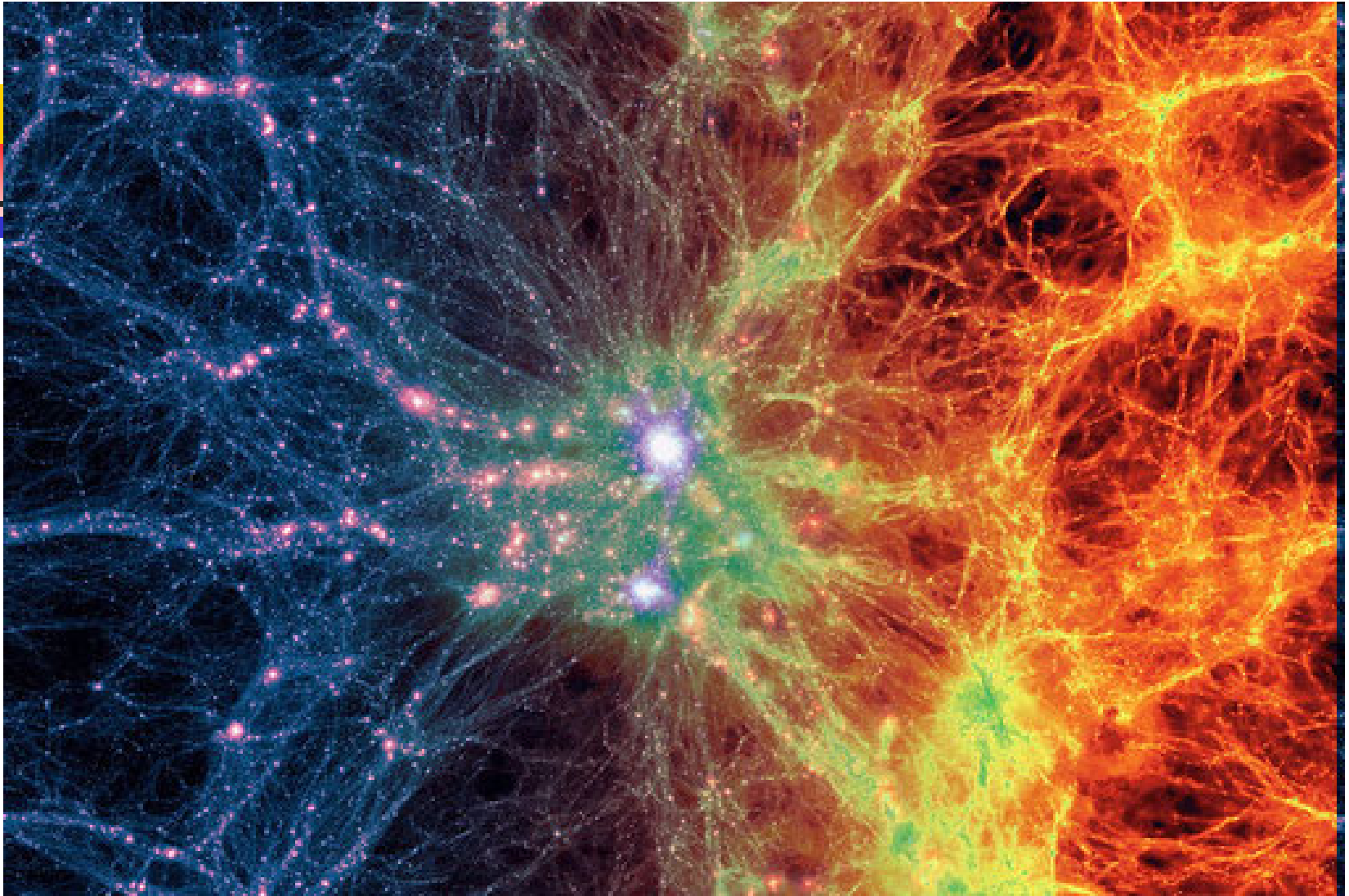


Формирование структур при наличии обычной и темной холодной материи

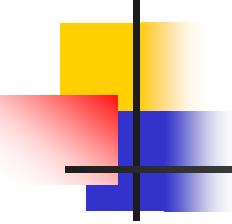
Formation of Structure



Моделирование 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 темной материи по кластерам галактик

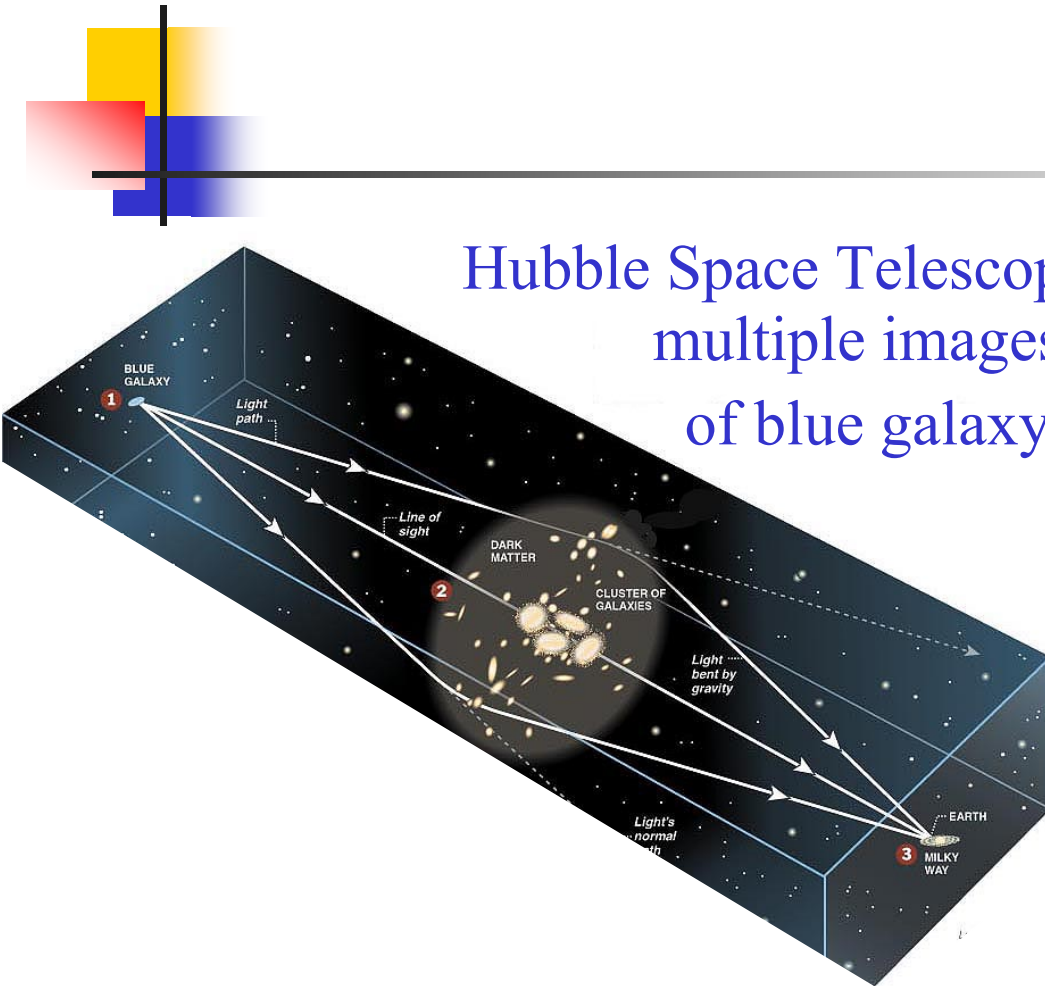
Изучая характеристики кластеров галактик удастся определить их полную массу и массу барионной материи.

Барионная масса следует из наблюдаемого рентгеновского излучения горячего газа.

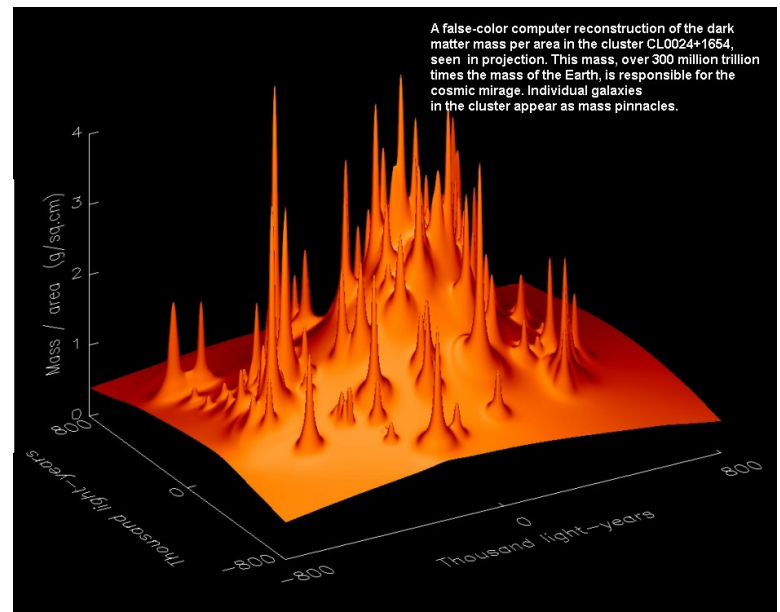
Полная масса наиболее точно определяется по гравитационному линзированию.

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



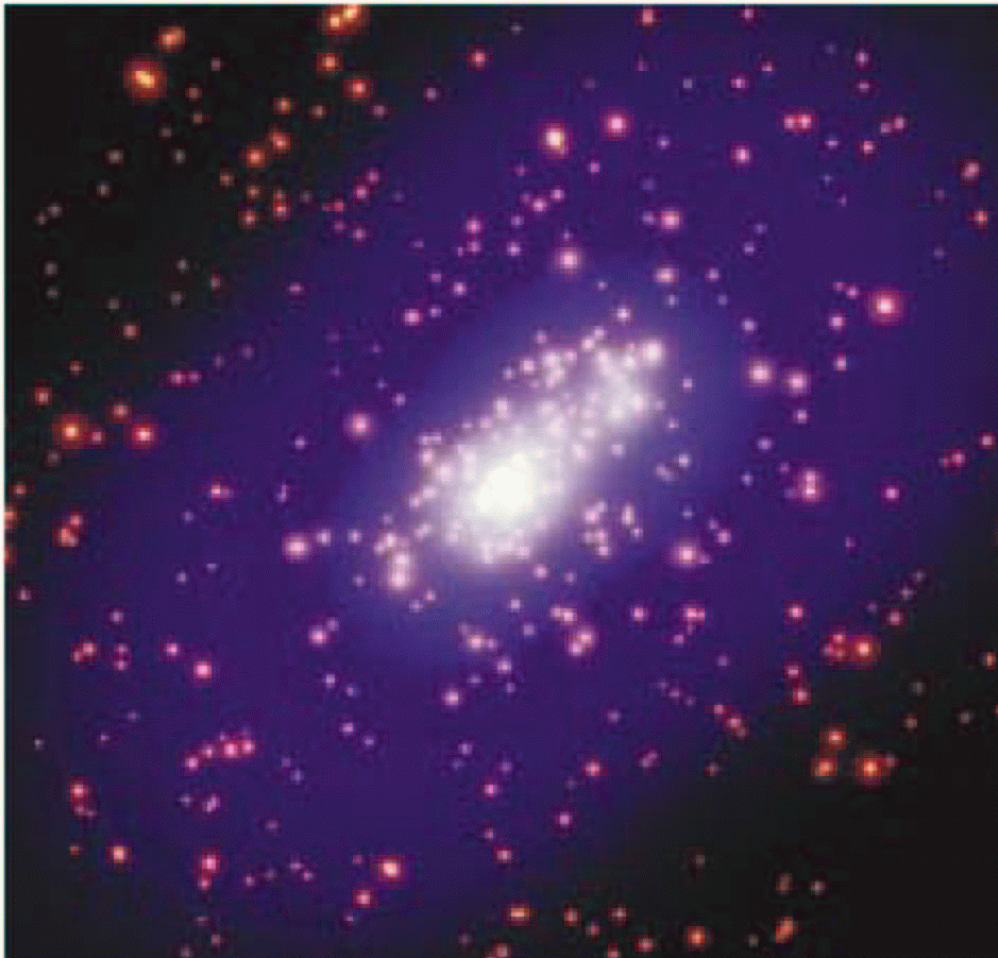
Hubble Space Telescope
multiple images
of blue galaxy



Гигантский кластер галактик

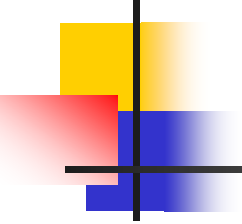
4.5 млрд. св. лет
от Земли

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*

Этапы эволюции Вселенной после рекомбинации H



рекомбинация	380 тыс лет	$z=1100$
темная эра	380 тыс – 100 млн	
первые звезды	~ 200 млн.лет	
реионизация H	$\sim 250-1000$ млн.лет	$z \sim 15-6$
первые галактики	~ 400 млн.лет	$z \sim 11$
квazarы	~ 700 млн лет	
Время жизни звезд (выгорание H)	$\sim 10 (M_{\text{солн}}/M)^2$ млрд лет	
белые карлики	$M < 1.4 M_c$	
нейтронные звезды	$M = (1.4-3)M_c$	
черные дыры	$M > 3M_c$	



Состав вселенной

Фотоны	0.005%
Нейтрино	<3%
Барионы/звезды	4.5/0.5%
Темная (небарионная) материя	25%
Темная энергия	70%

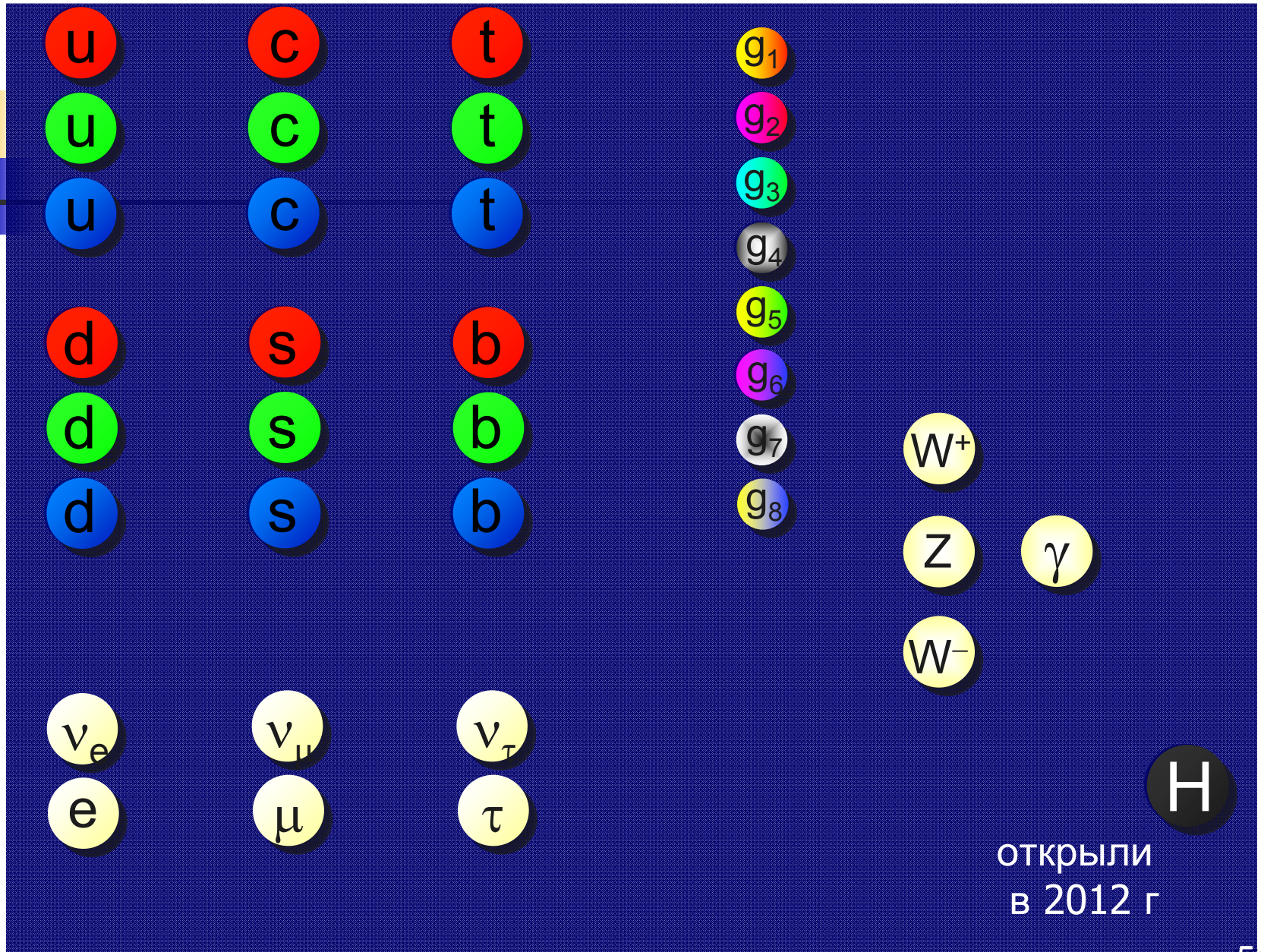
Общая плотность близка к ρ_c (плоская вселенная)

Данные в согласии с инфляционной моделью

(критическая

Однако, темная материя и темная энергия — полная загадка.

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

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

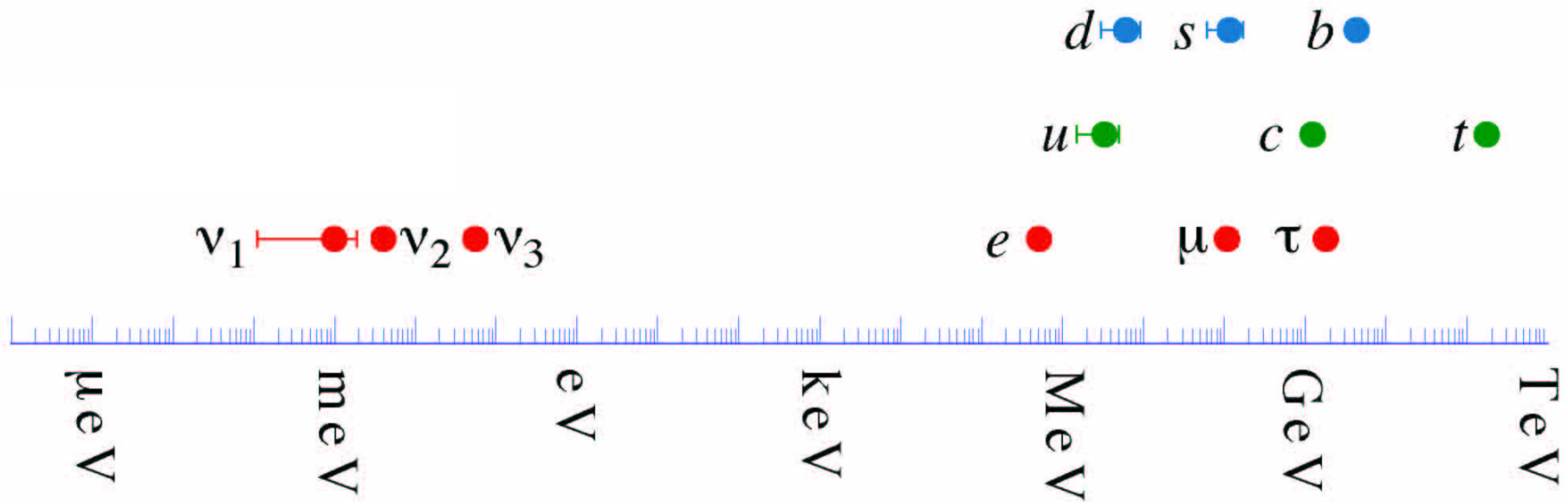
У каждого кварка есть 3 цвета (аналог электрического заряда).
Взаимодействуют путем обмена глюонами (аналог фотона).



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.

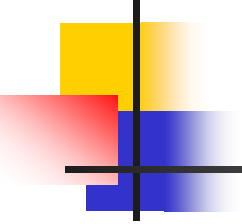


Бозон Хиггса

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!**



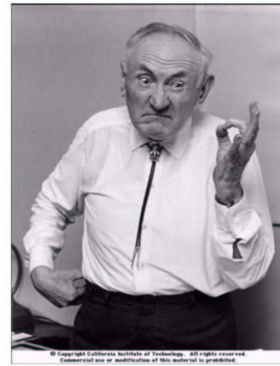
Темная материя

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

Темной материи в Галактике на порядок больше, чем обычной материи, эти частицы нужно зарегистрировать!

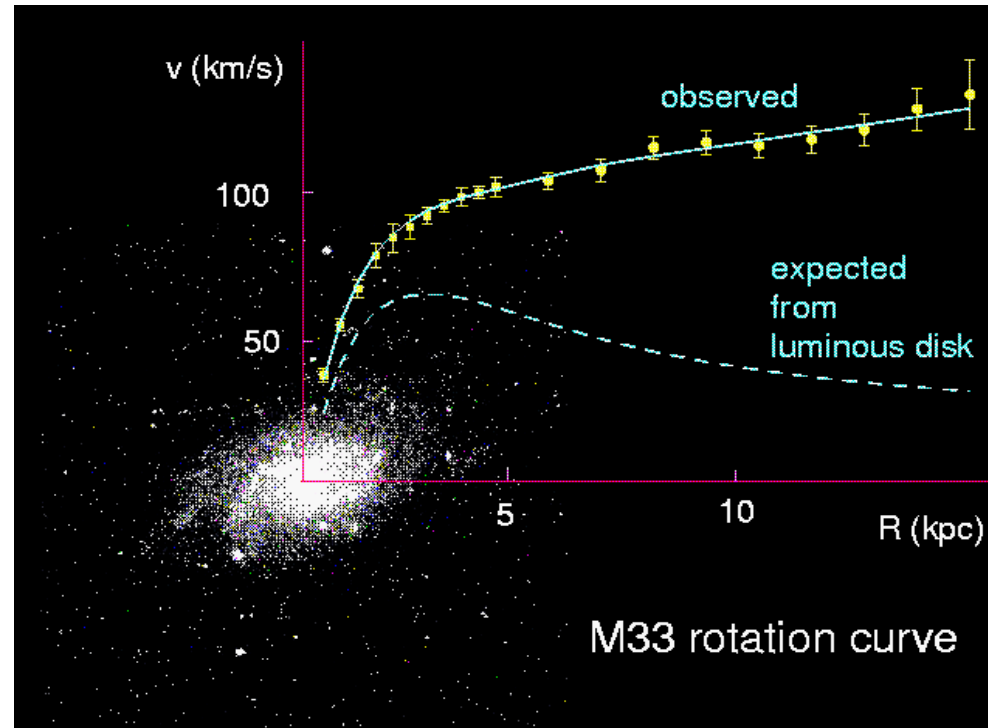
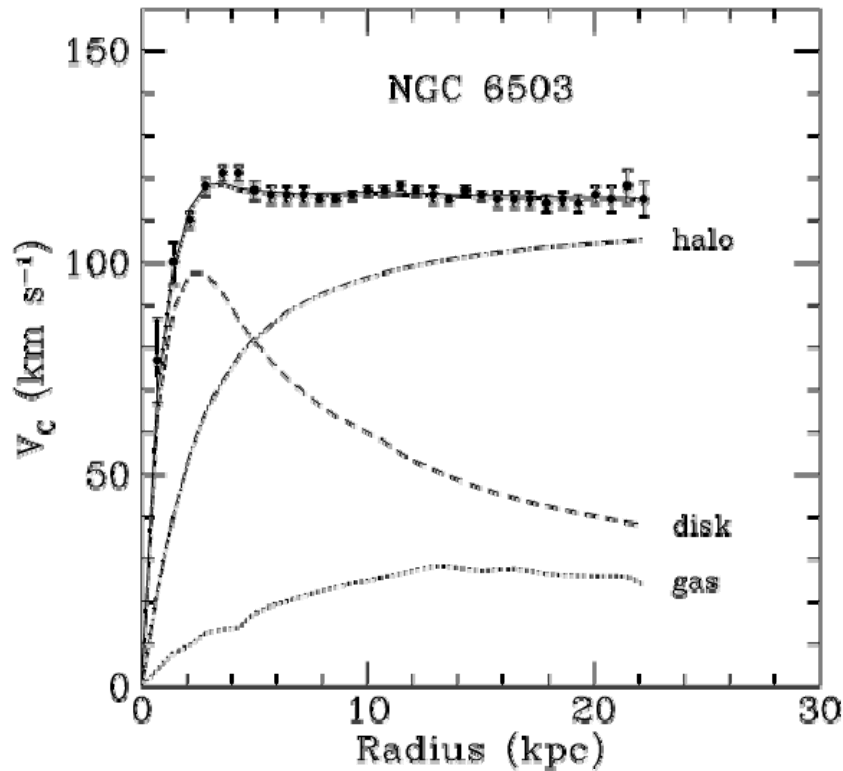
Темная материя – это неизвестный сорт элементарных частиц, их (и их нестабильных партнеров) можно рождать на ускорителях, тогда можно будет понять их природу.

Галактическая темная материя

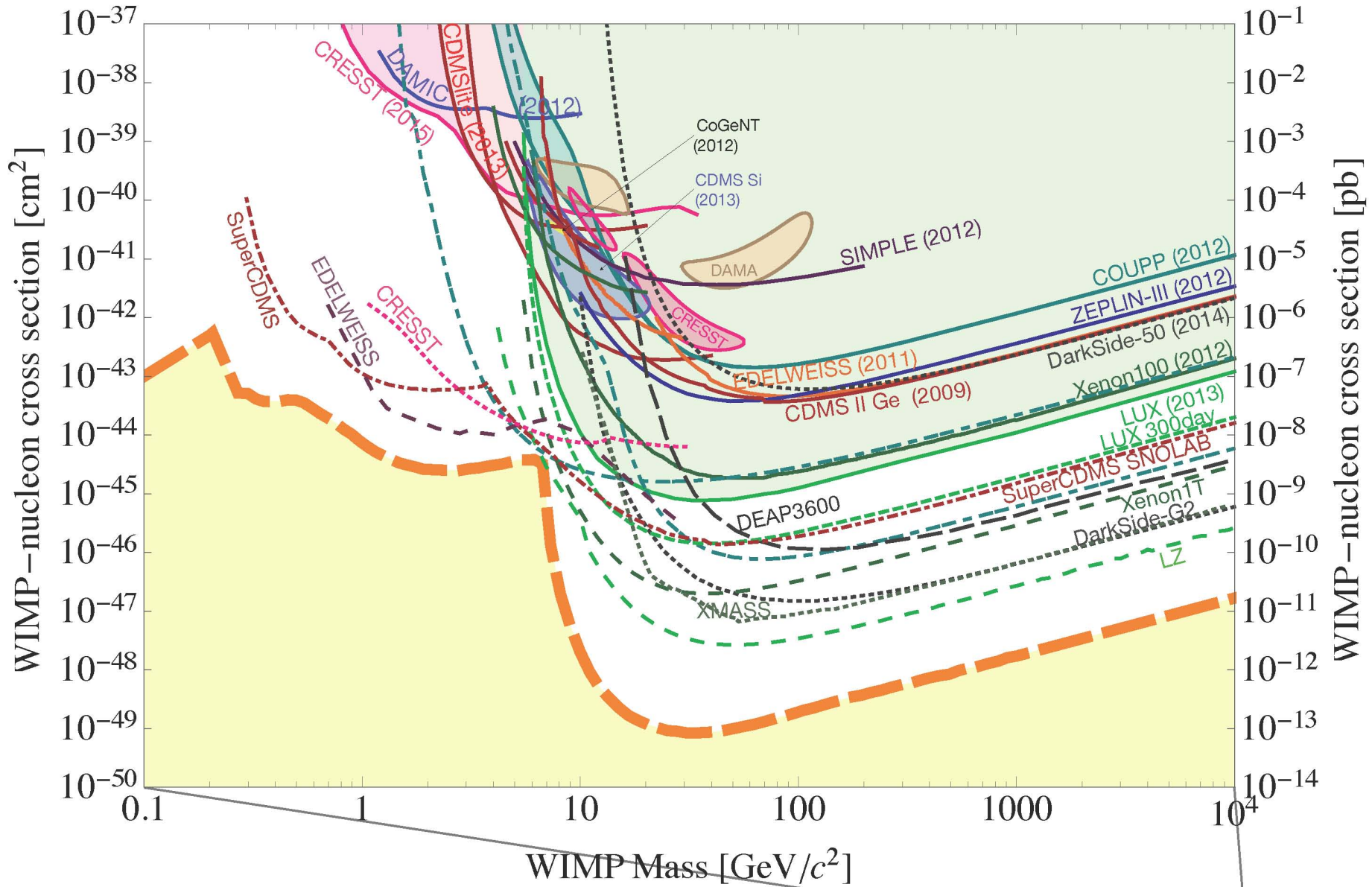


F. Zwicky, 1937

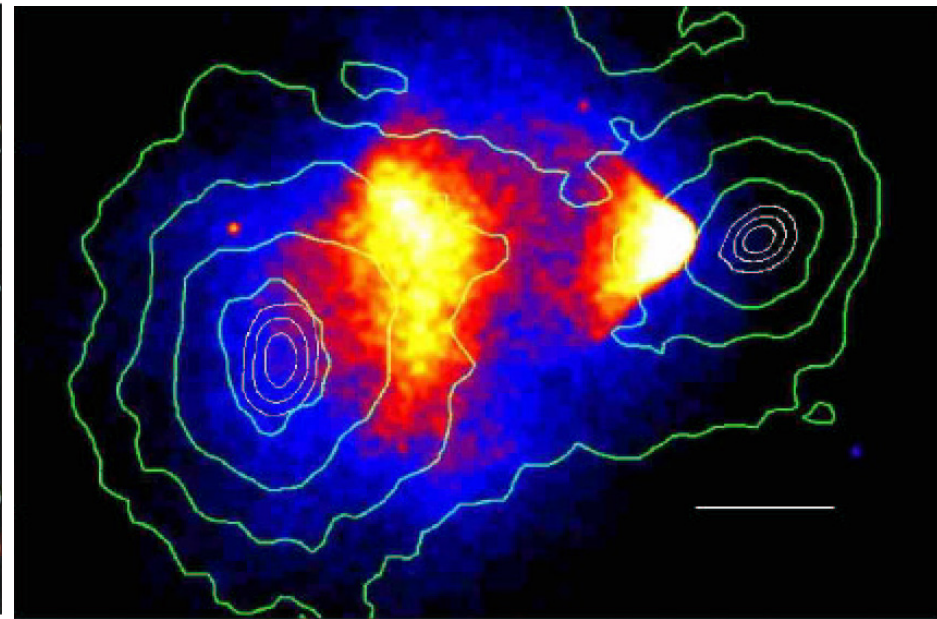
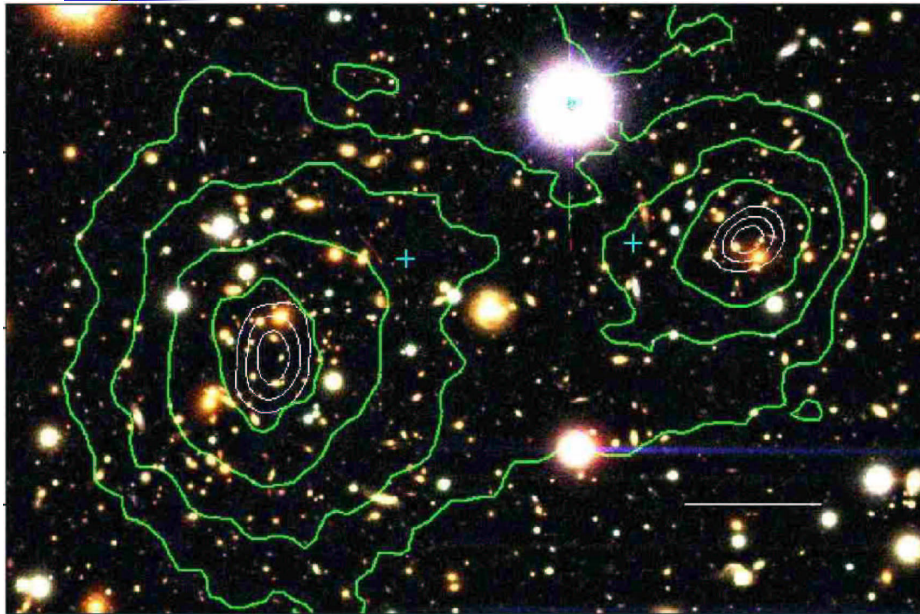
Давно известно, что зависимость линейной скорости звезд в галактиках не согласуется с ожидаемой из распределения видимой материи. Еще нужно добавить сферическое гало с размерами больше видимого размера. **Барионное объяснение всей массы гало исключено!**



Статус поиска частиц темной материи



Прямое свидетельство существования темной материи astro-ph/0608407



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

A 3D visualization of gravitational waves. In the center, two bright blue spheres represent a binary system. Concentric, wavy rings of light blue and purple emanate from the spheres, representing the propagation of gravitational waves through spacetime. The background is a dark, starry space.

Гравитационные волны

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.

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

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

Максимальная гравитационная светимость при слиянии черных дыр

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

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

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

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

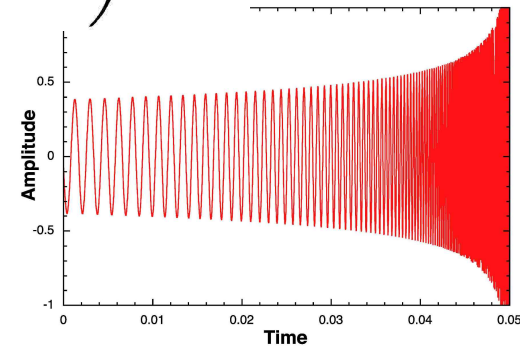
f – частота
D – расстояние

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

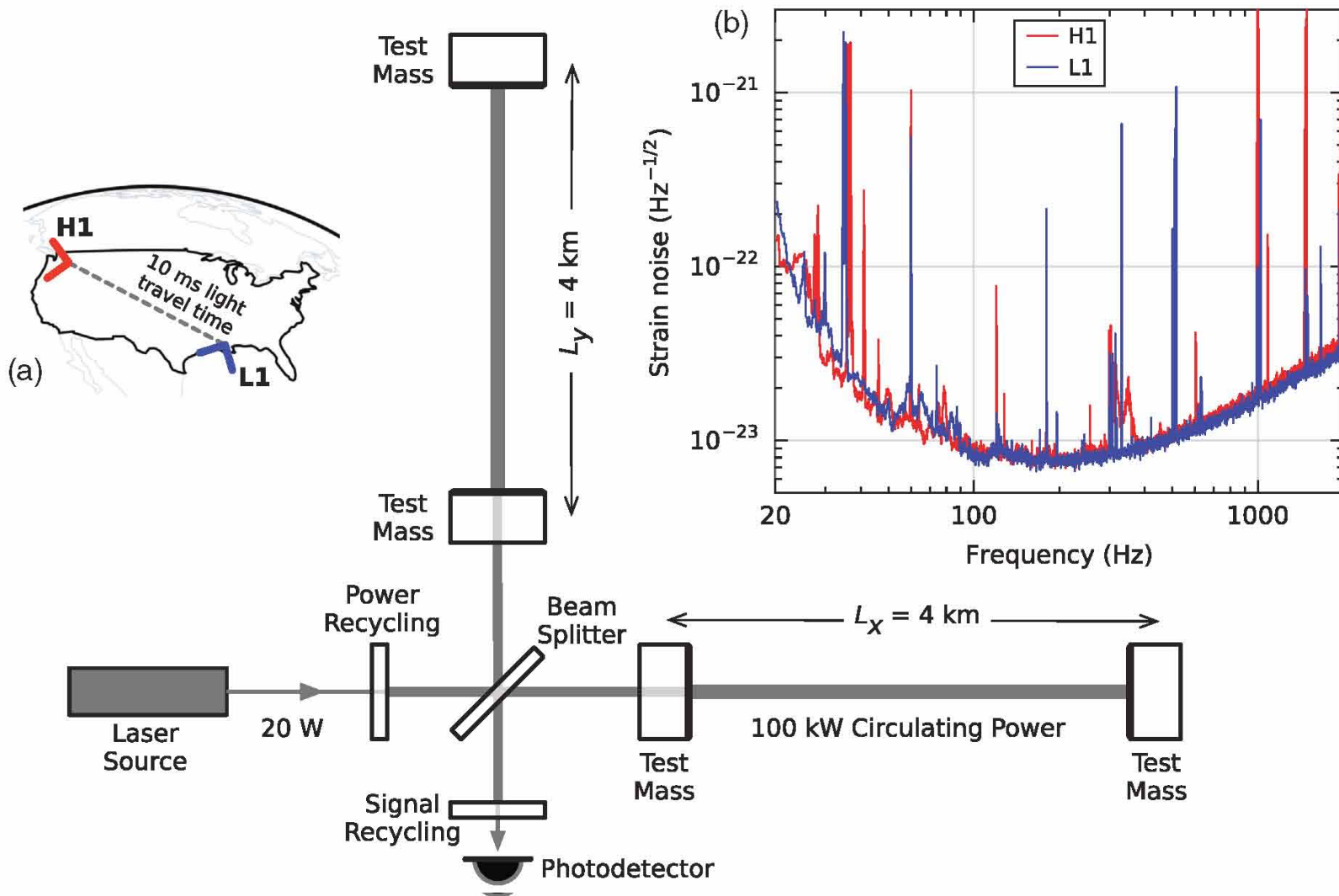


$$\mathcal{M}_c = \frac{c^3}{G} \left[\frac{5}{96} \pi^{-8/3} f^{-11/3} \dot{f} \right]^{3/5}$$

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

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)



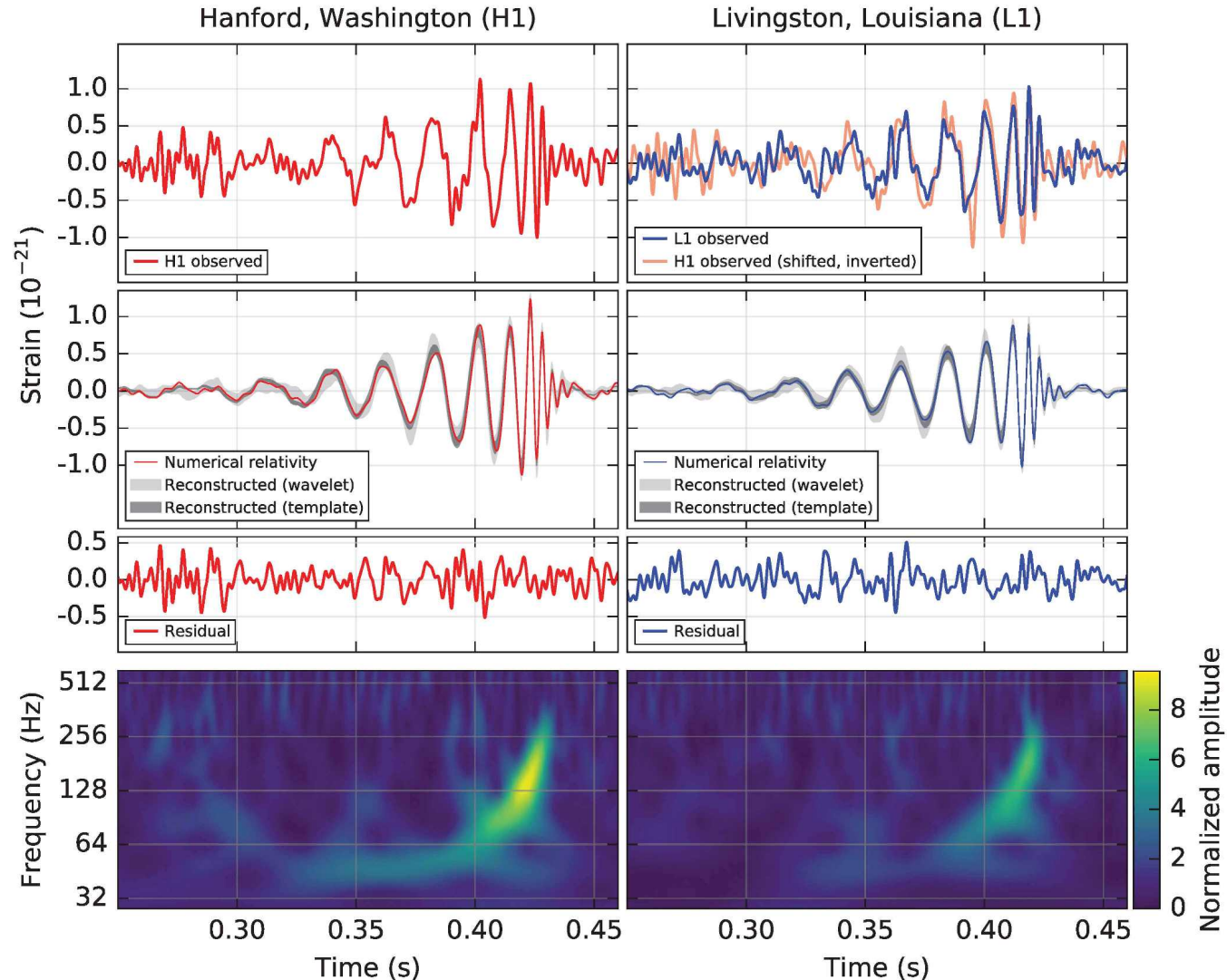
LIGO Livingston
Observatory



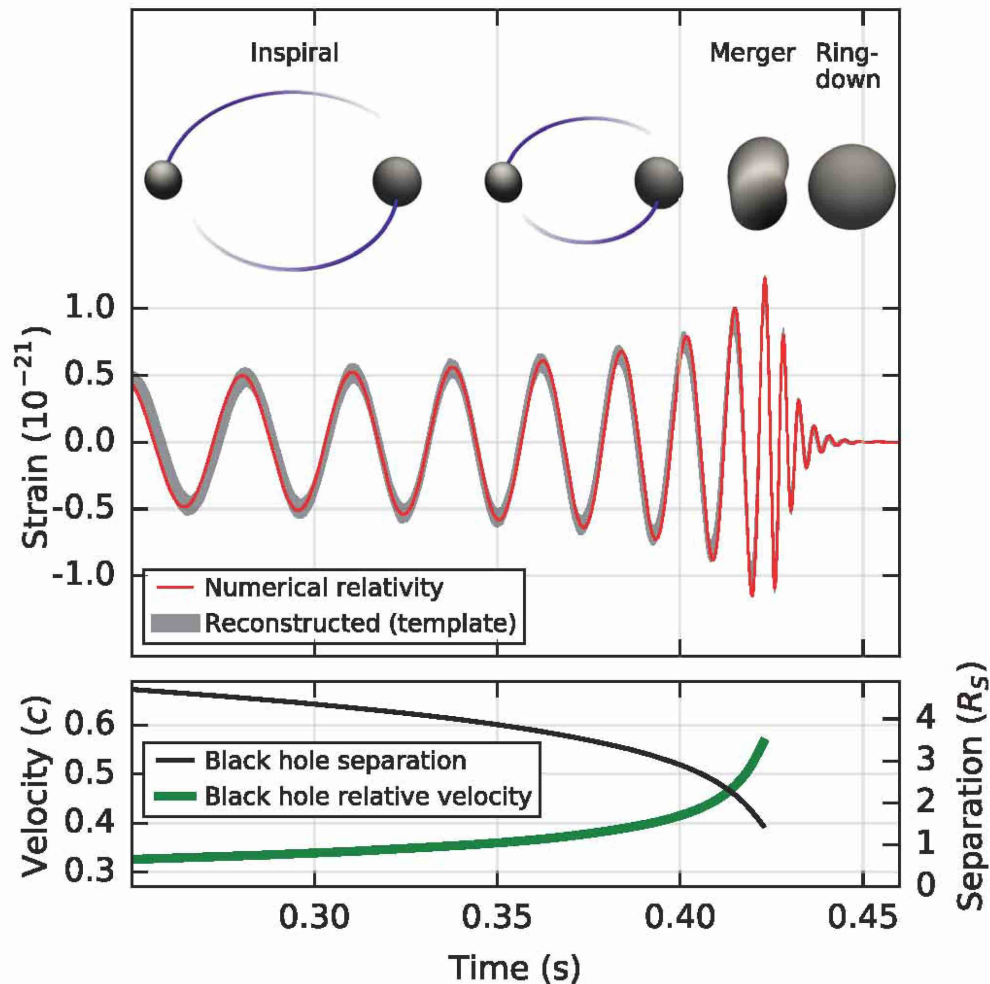
LIGO Hanford
Observatory

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.

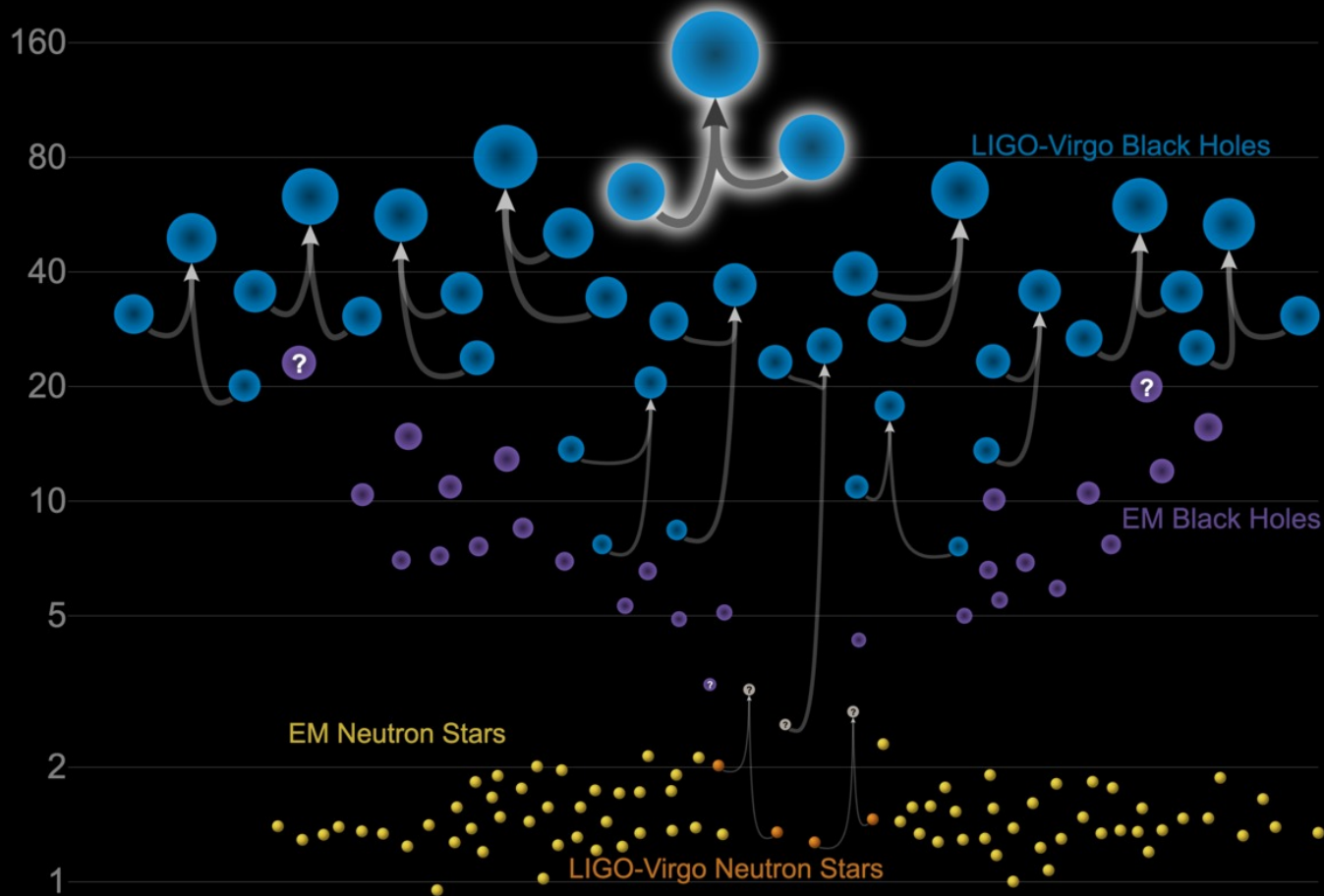
Событие произошло на расстоянии 1.3 млрд. световых лет

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

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

Данные на 9.2020 года

Masses in the Stellar Graveyard *in Solar Masses*



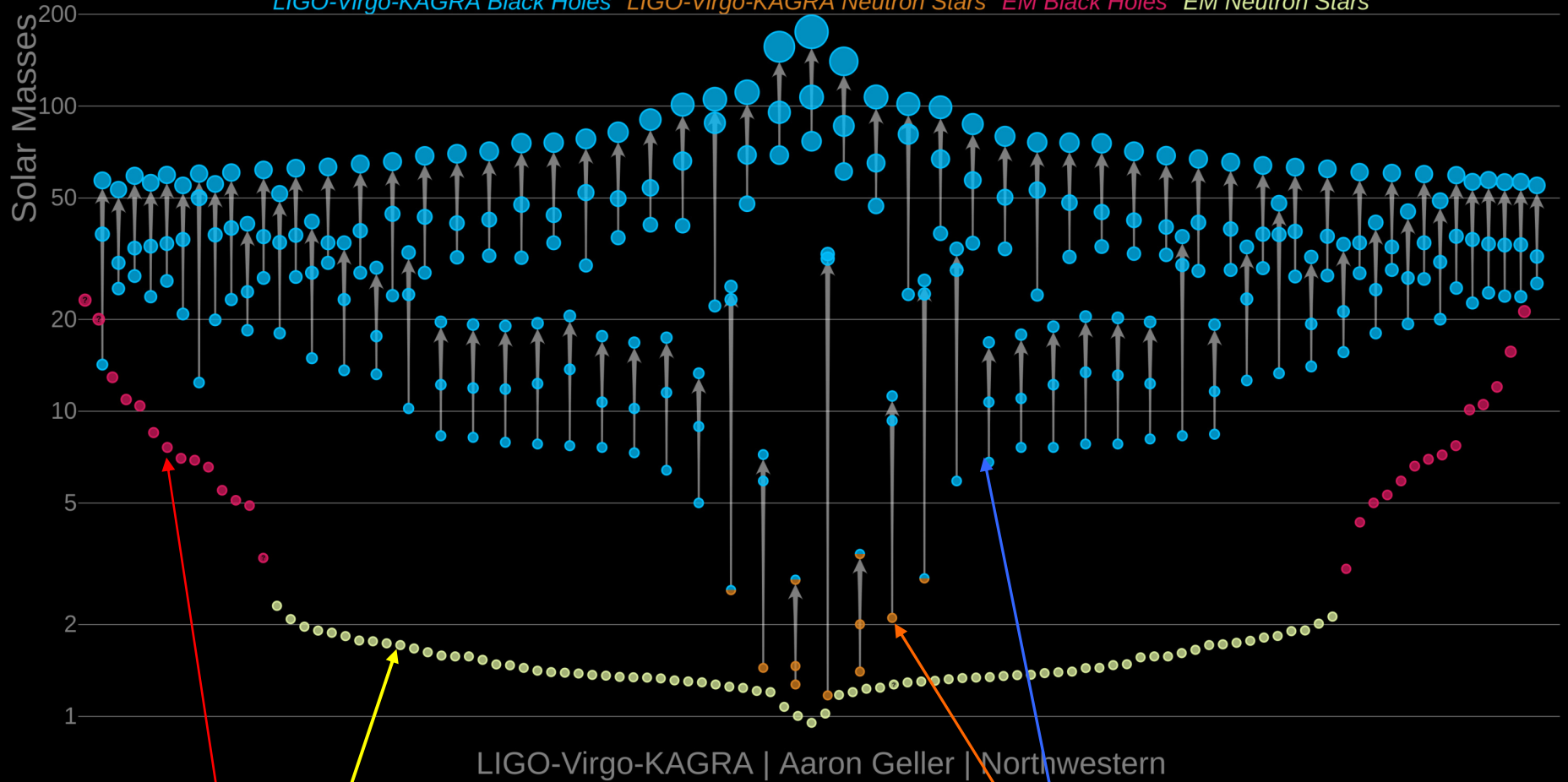
Updated 2020-09-02

LIGO-Virgo | Frank Elavsky, Aaron Geller | Northwestern

Данные на 11.2021 года

Masses in the Stellar Graveyard

LIGO-Virgo-KAGRA Black Holes LIGO-Virgo-KAGRA Neutron Stars EM Black Holes EM Neutron Stars



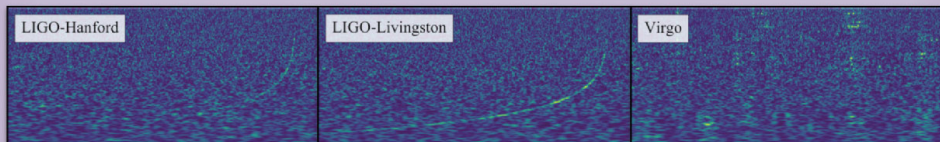
LIGO-Virgo-KAGRA | Aaron Geller | Northwestern

EM neutron stars
EM black holes

GW black holes
GW neutron stars

Слияние нейтронных звезд

GW170817 FACTSHEET

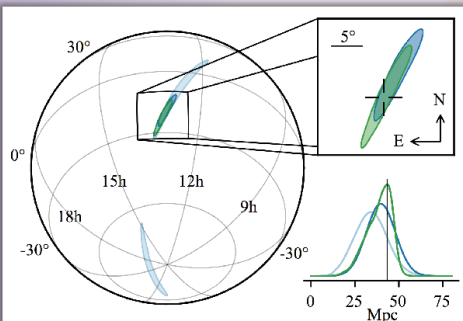


observed by	H, L, V	inferred duration from 30 Hz to 2048 Hz**	~ 60 s
source type	binary neutron star (NS)	inferred # of GW cycles from 30 Hz to 2048 Hz**	~ 3000
date	17 August 2017	initial astronomer alert latency*	27 min
time of merger	12:41:04 UTC	HLV sky map alert latency*	5 hrs 14 min
signal-to-noise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

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



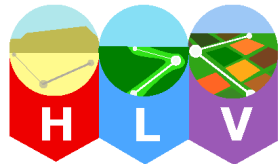
Images: time frequency traces (top), GW sky map (left, HL = light blue, HLV = dark blue, improved HLV = green, optical source location = cross-hair)

GW=gravitational wave, EM = electromagnetic, M_⊙=1 solar mass=2x10³⁰ kg, H/L=VIRGO 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.



- Расстояние: 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

Au
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 богатого нейтронами 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

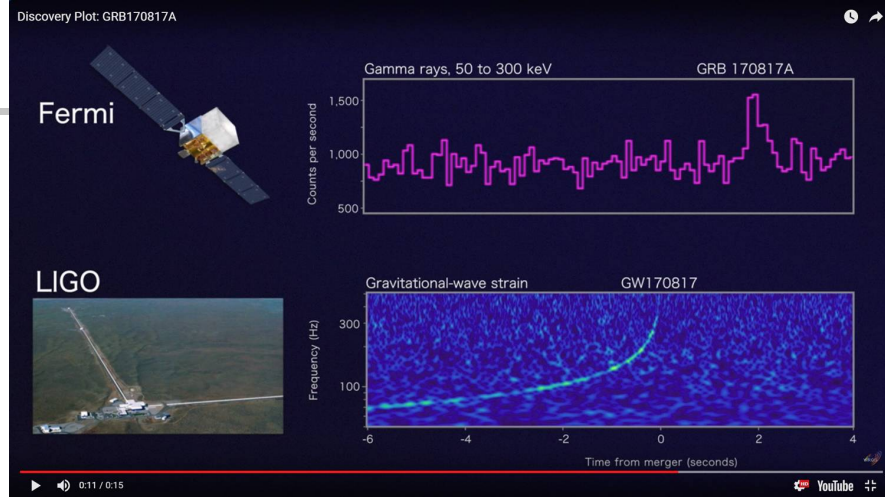
+15 часов
Детектировано яркое ультрафиолетовое излучение.

+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.

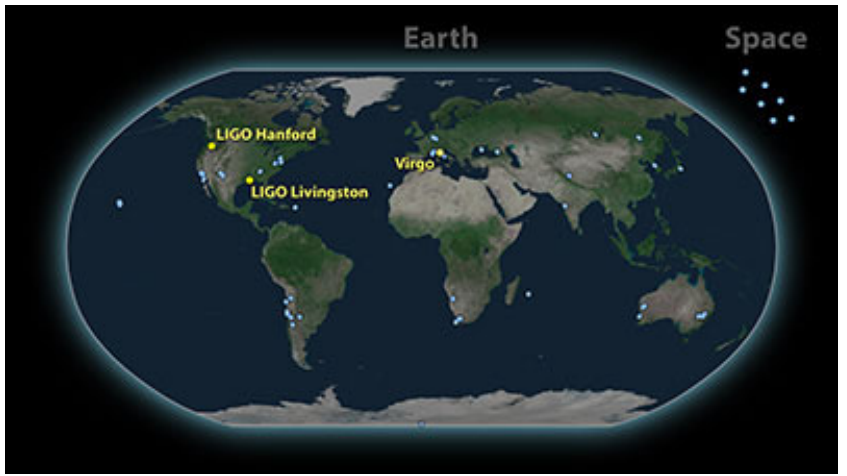
+16 дней
Обнаружено излучение радио-диапазона

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



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

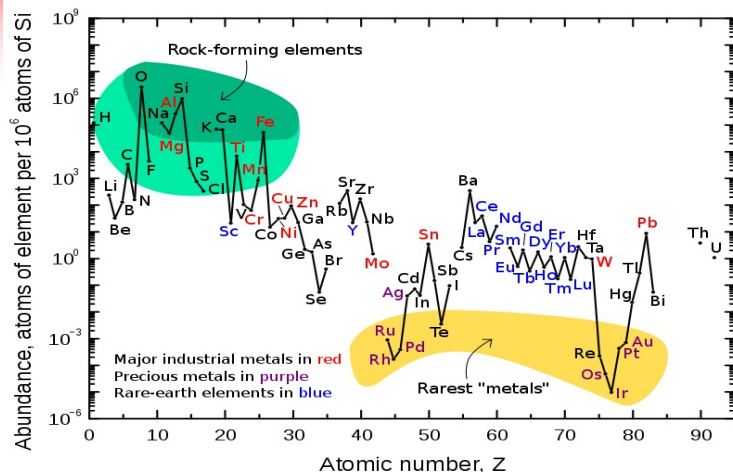
Далее вспышку зарегистрировали в рентгеновском и оптическом спектрах. Измерено доплеровское смещение.



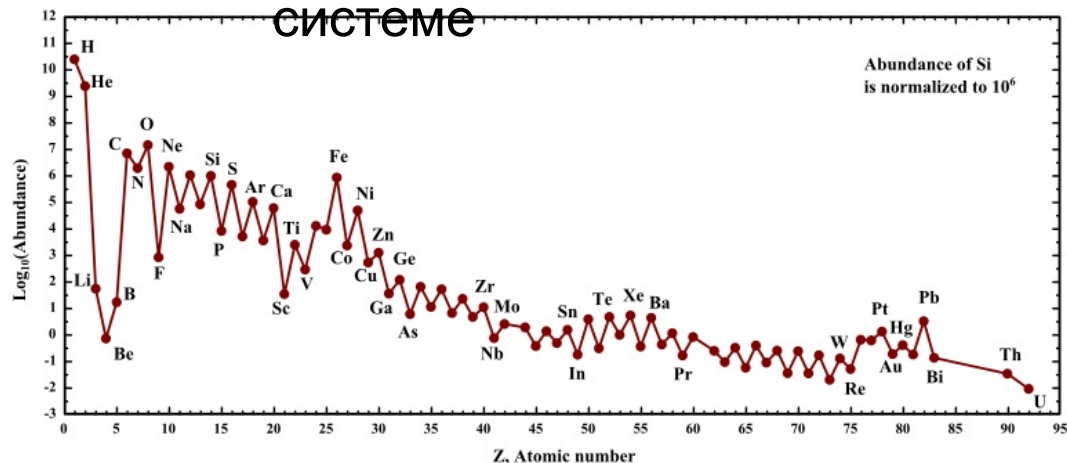
Слияние нейтронных звезд является основным механизмом образования элементов тяжелее железа, r-process

Распространенность элементов

В Земной коре

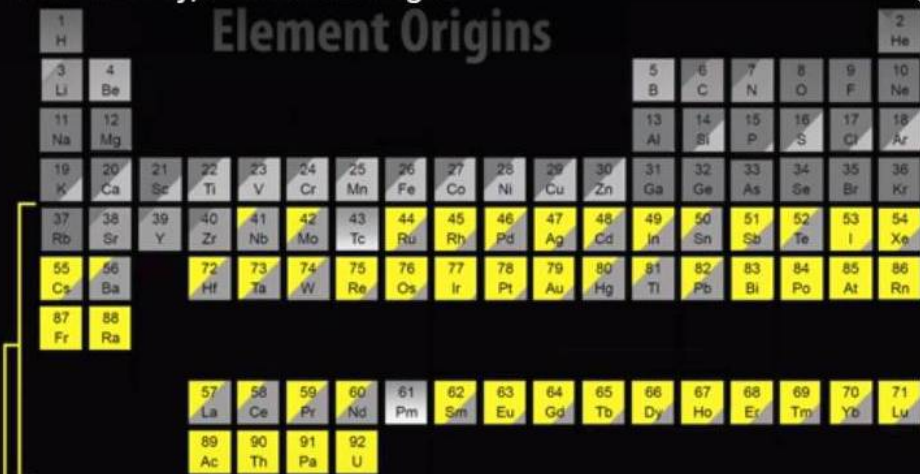


В солнечной системе



Ripples of Gravity, Flashes of Light

Element Origins



Merging Neutron Stars

Exploding Massive Stars

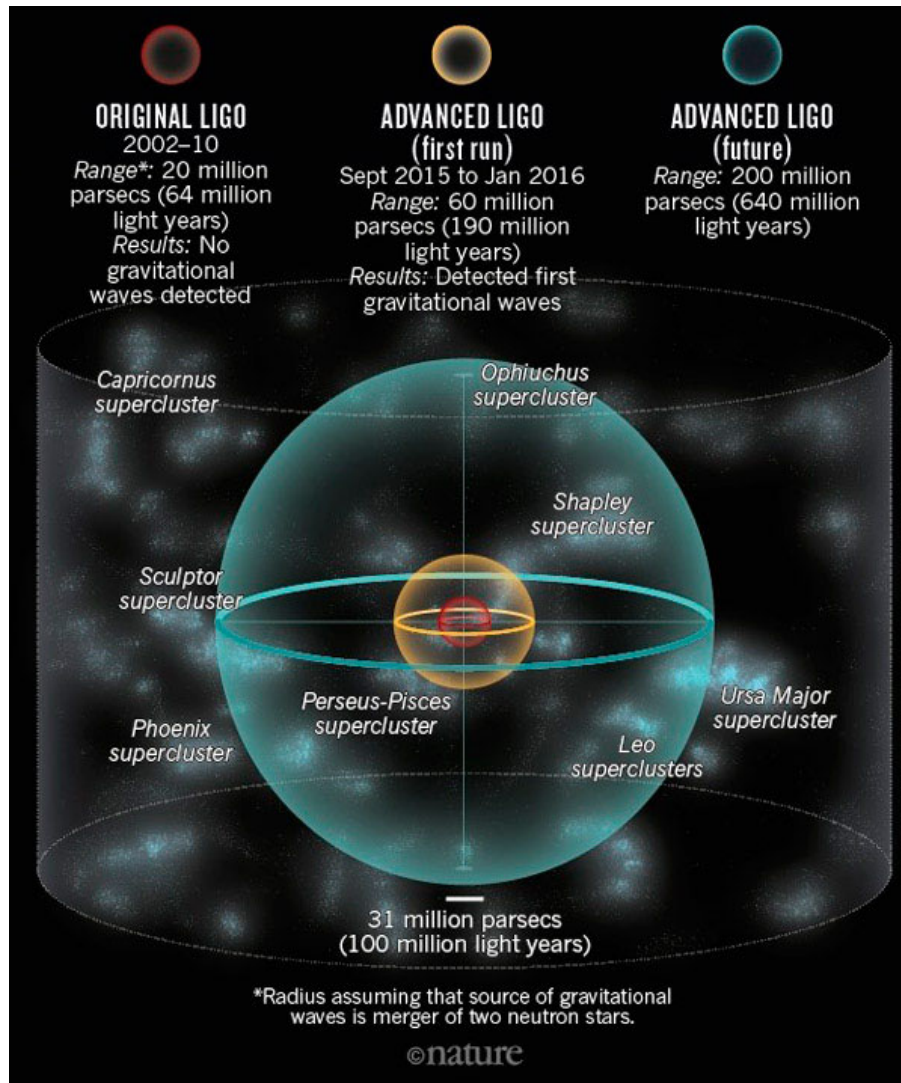
Big Bang

Желтым отмечены элементы образующиеся при слиянии нейтронных звезд.

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

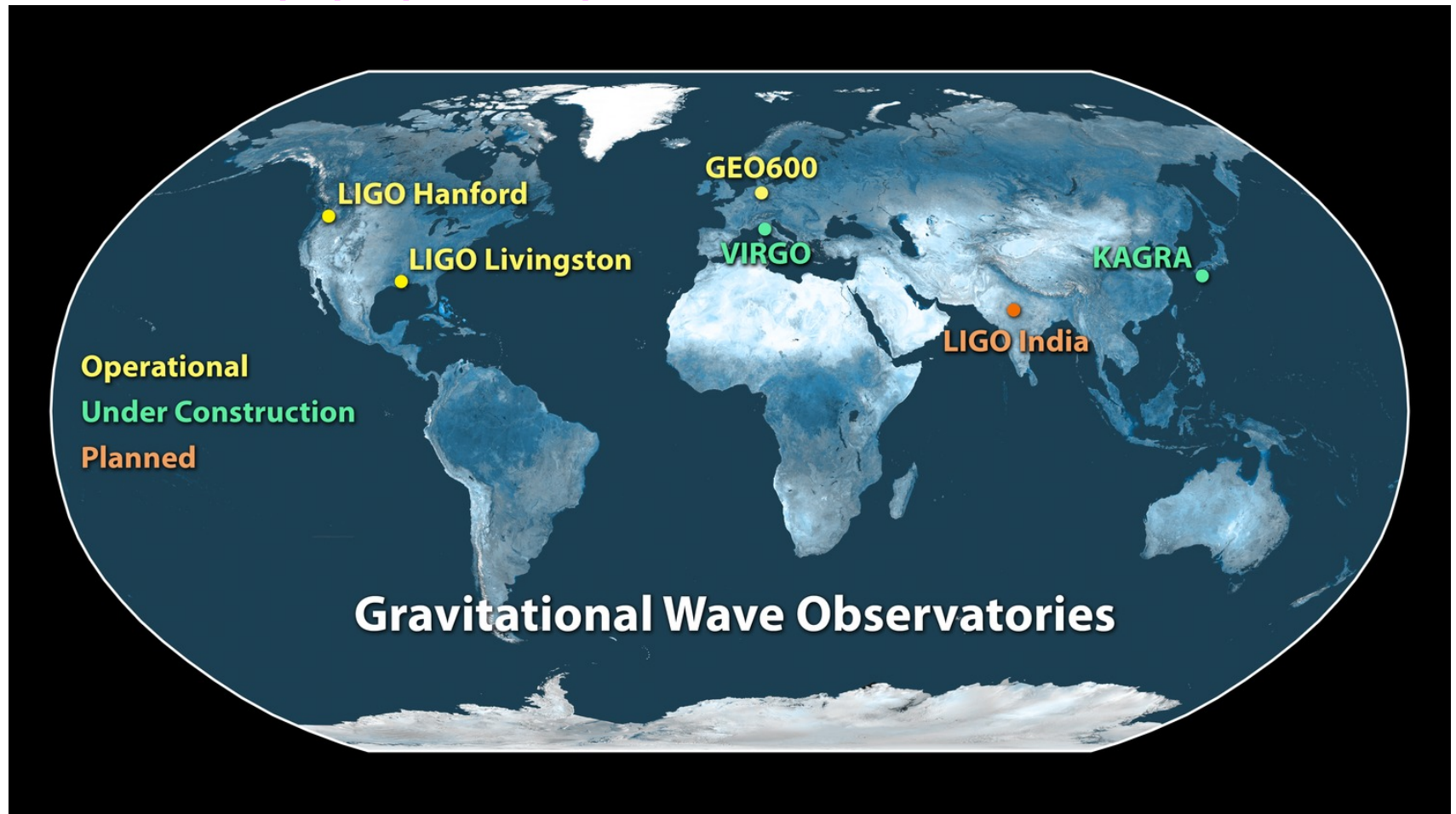
Было зарегистрировано характерное свечение «килоновой»

Дальнейшие перспективы



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

Сеть интерферометров (для точной локализации источника)



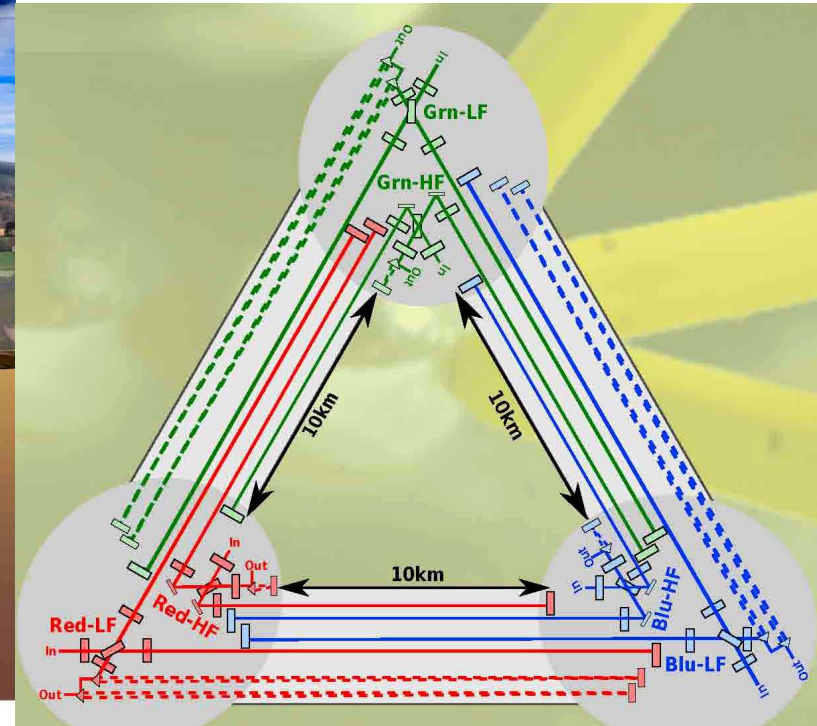
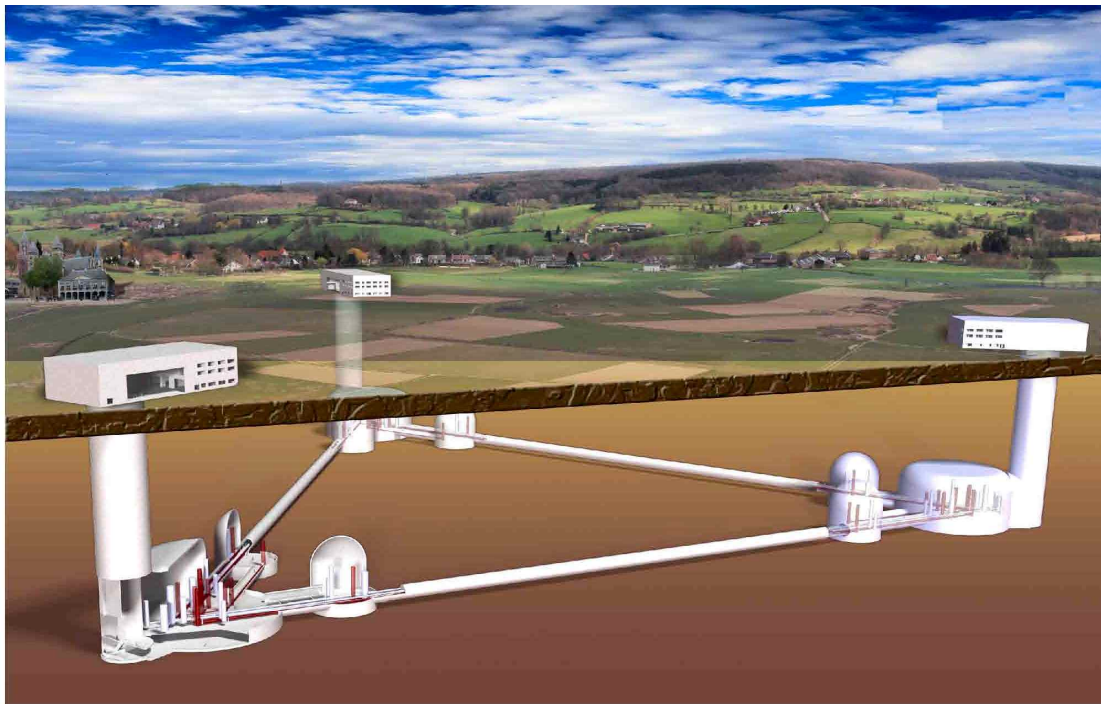
Virgo — франко-итальянский детектор гравитационных волн, с 3 км базой, является членом LIGO, в момент открытия модернизировался (будет как LIGO).

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 ET

на порядок лучше, всех предшественников

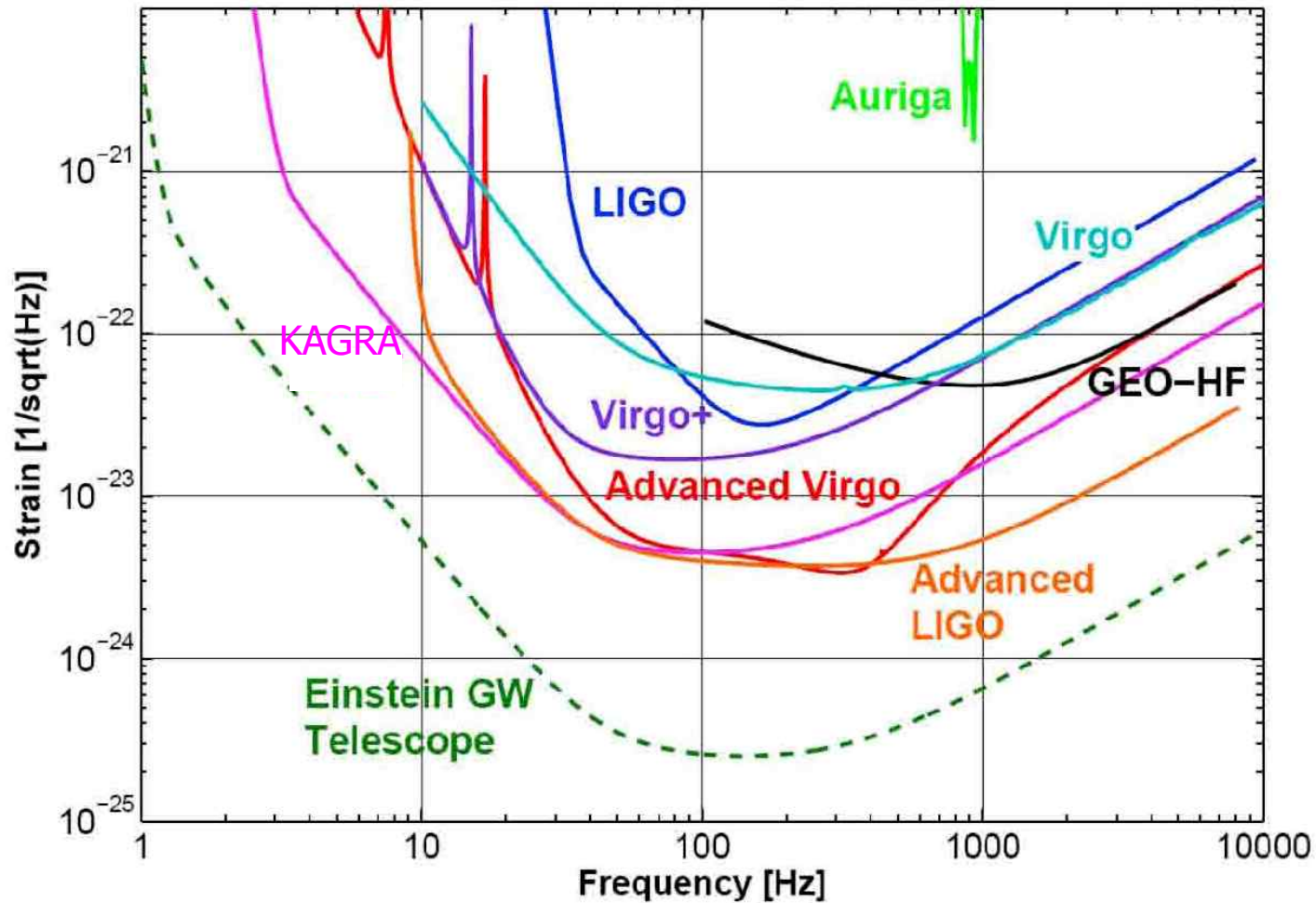


Figure 5: Sensitivities of gravitational wave detectors from the first to the third generation.

eLISA space gravitational interferometer

плечо интерферометра 1 млн. км

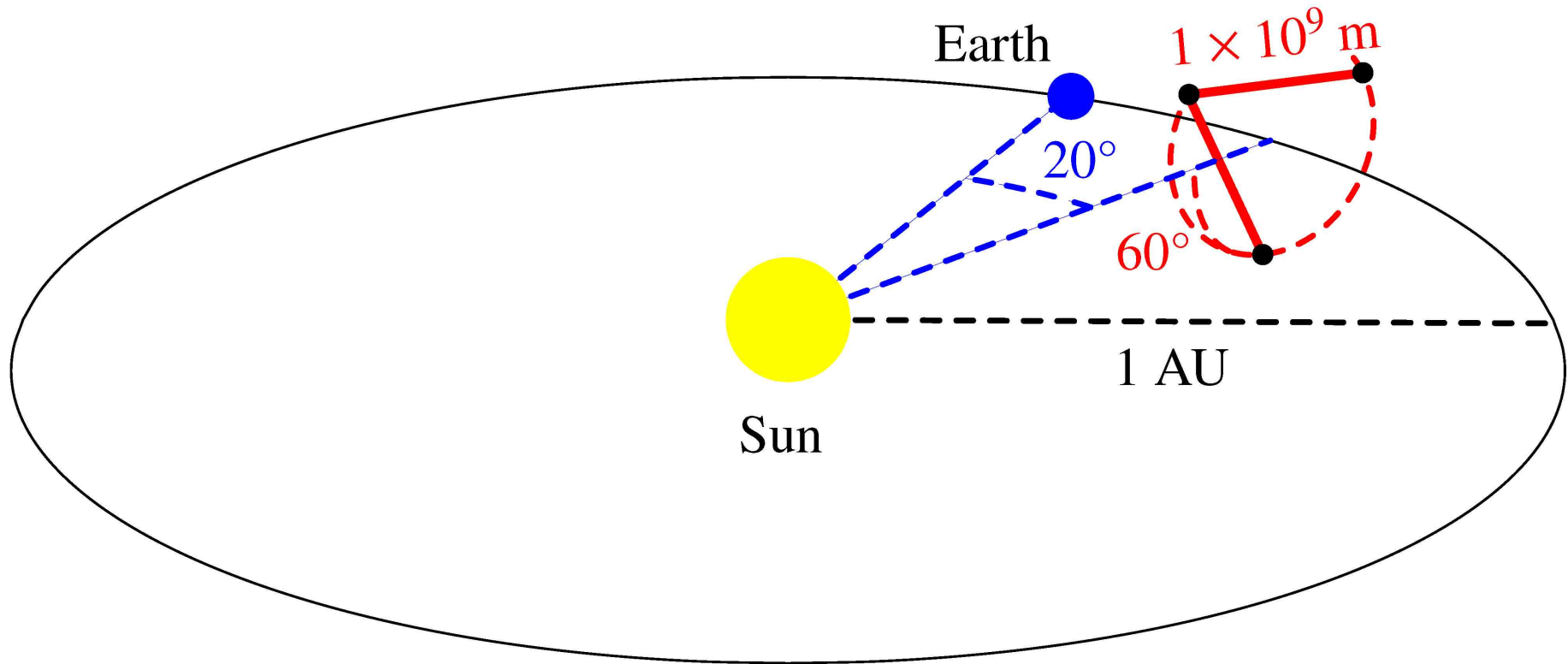
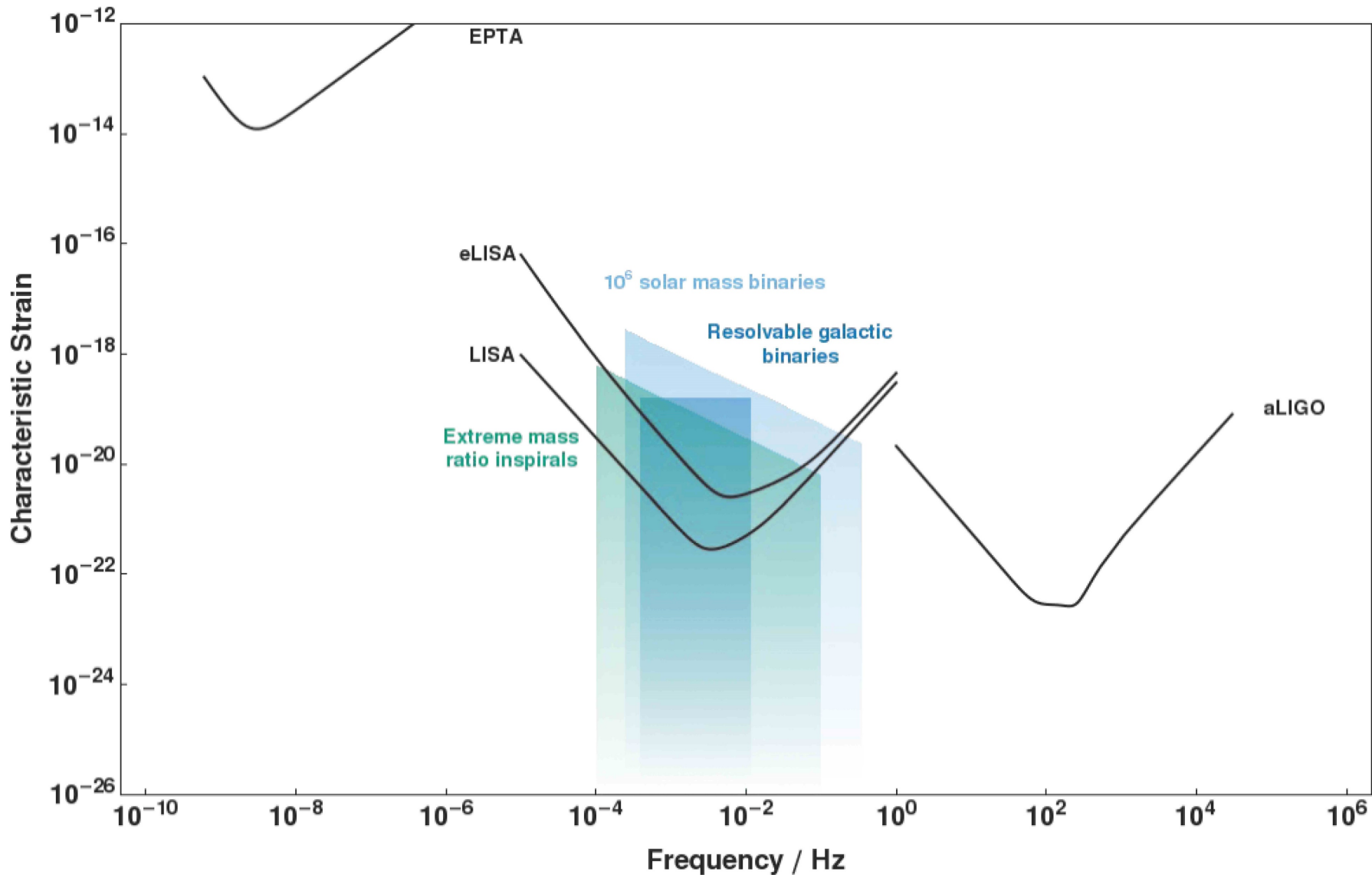


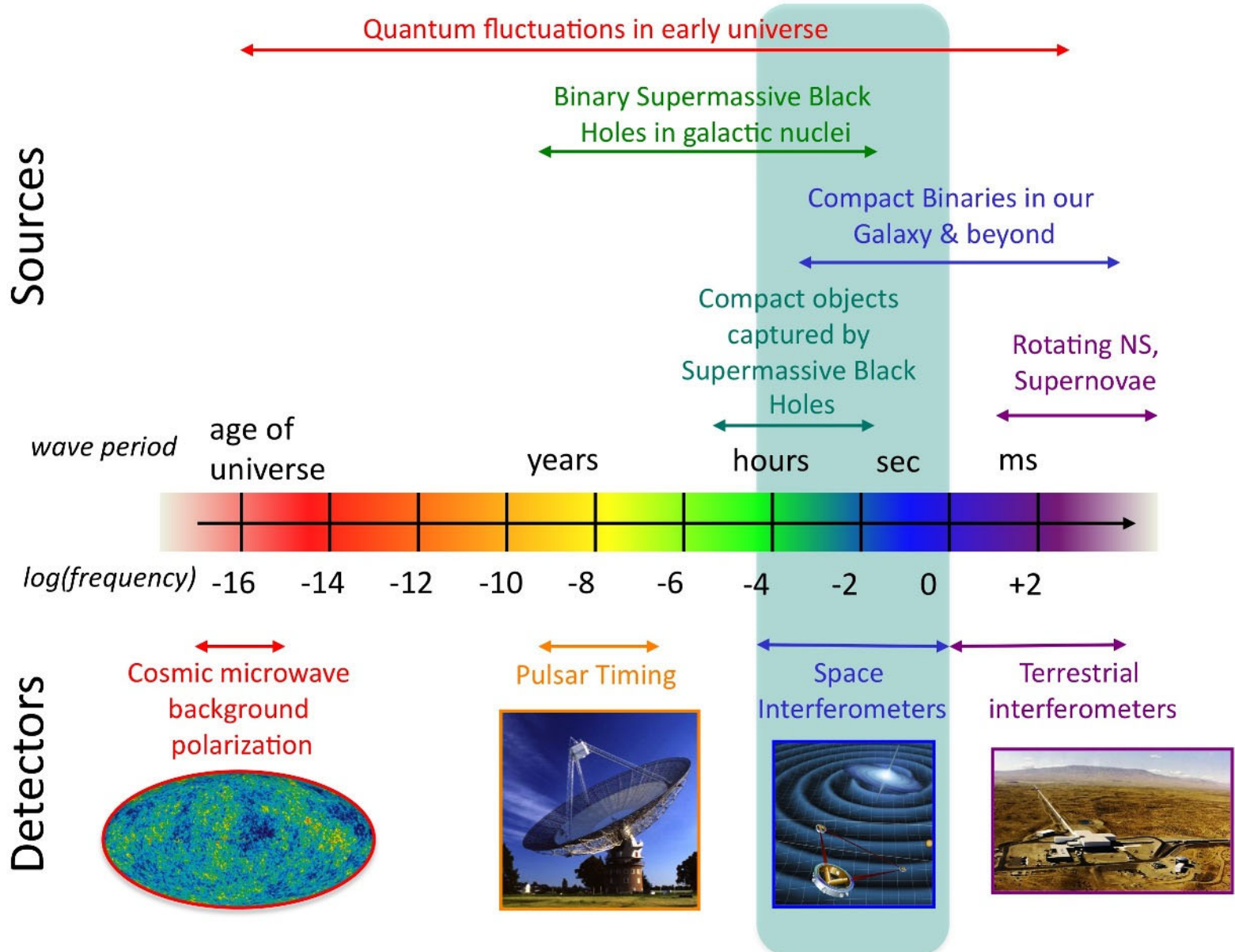
Figure 1: The eLISA orbits: The constellation is shown trailing the Earth by about 20 degrees (or 5×10^{10} km) and is inclined by 60 degrees with respect to the ecliptic. The trailing angle will vary over the course of the mission duration from 10 degrees to 25 degrees. The separation between the spacecraft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

Чувствительность eLISA

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



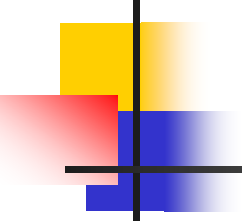
The Gravitational Wave Spectrum





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!

Гравитационное взаимодействие черные дыры

сильное - слабое - электромагнитное - гравитационное

$$F_e = \frac{q_1 q_2}{r^2} \frac{\vec{r}}{r} \quad F_g = -G \frac{m_1 m_2}{r^2} \frac{\vec{r}}{r} \quad (m_g = m_i)$$

Для протона – электрона $F_e/F_g \approx 10^{39}$

На масштабах Вселенной грав. взаимодействие доминирует

Формулы для сил похожи, но имеются существенные различия:

- ✓ одноименные грав. «заряды» притягиваются (электр. отталкиваются)
- ✓ грав. силы действуют на все тела, даже на свет (меняют частоту и отклоняют)
- ✓ изменение частоты света = изменение хода часов;
- ✓ источником гравитации являются массы, энергия связи, поля, включая само грав. поле (поэтому $1/r^2$ только на большом расстоянии);
- ✓ в свободно падающей системе отсчета грав. поля исчезают, все тела движутся по инерции в «искривленном» пространстве

Гипотеза существования тел, для которых вторая космическая скорость больше скорости света, т.е. тела недоступны для наблюдения

Для Солнца $r_g \sim 3$ км
для Земли 0.9 см

Митчел 1783 г,
Лаплас 1796 г.

$$\frac{mv^2}{2} = \frac{GMm}{r} \Rightarrow v = \sqrt{\frac{2GM}{r}} = c \Rightarrow r_g = \frac{2GM}{c^2}$$

Этот расчет, был сделан с использованием Ньютоновской механики, которая работает только при $v \ll c$, **оказался случайно правильным!**

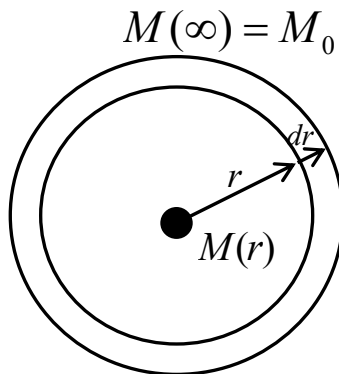
Следует заметить, что в случае электрических сил всегда можно сообщить электрону достаточно энергии, чтобы он покинул поверхность заряженной сферы.

$$E = \frac{mc^2}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} - mc^2 > \frac{Qe}{R} \quad \text{-это точный расчет с использованием спец. теории относительности (1905)}$$

Отличие гравитационного поля от электрического в том, что гравитационное поле имеет отрицательную плотность энергии и тоже является источником гравитации ($U=mc^2$).

Масса M_0 – это суммарная масса тела и поля, которую чувствует пробная частица, расположенная на бесконечно большом расстоянии. При приближении к телу отрицательная масса остается снаружи (и не действует), а масса, которая притягивает к центру возрастает, при некотором r сила притяжения достигает бесконечной величины.

Это можно показать даже в рамках Ньютоновской механики с элементами специальной теории относительности, эта оценка не совсем корректная, но отражает суть.



Напряженность грав. поля $E = \frac{GM}{r^2}$, плотность энергии $u = -\frac{E^2}{G8\pi} = -\frac{GM^2}{8\pi r^4}$,

$$dM = (u/c^2)4\pi r^2 dr = -\frac{GM^2 dr}{2r^2 c^2} \Rightarrow \frac{1}{M} - \frac{1}{M_0} = \frac{GM^2}{2rc^2} \Rightarrow M(r) = \frac{M_0}{1 - \frac{GM_0}{2rc^2}}$$

$M = \infty$ при $r = \frac{GM_0}{2c^2} \sim \frac{GM_0}{c^2}$.

Пояснение. Источник гравитации маленький шарик в центре, Его масса вместе с массой поля равна M_0 (для наблюдателя на бесконечности). $M=M(r)$ – масса в сфере радиуса r . Интегрирование ведется по полю (вне шарика).

Точный ответ дает Общая теория относительности Эйнштейна (1916 г), которая описывает гравитацию как искривление геометрии пространства (без использования понятия гравитационного поля).

Решение Шварцшильда для сферически симметричного тела (1916) (на основе ОТО Эйнштейна)

$$ds^2 = \left(1 - \frac{r_s}{r}\right) c^2 dt^2 - \frac{dr^2}{\left(1 - \frac{r_s}{r}\right)}, \quad \text{для движения по радиусу.}$$

В отсутствии гравитации интервал между двумя близкими событиями

$$ds^2 = c^2 dt^2 - d\mathbf{r}^2 = inv$$

$$r_s = \frac{2GM}{c^2} \quad \text{— радиус Шварцшильда или гравитационный радиус,}$$

В этой формуле r — это длина окружности вокруг тела, деленная на 2π , время t измеряется по часам расположенным на бесконечности.

$$d\tau = \sqrt{1 - \frac{r_s}{r}} dt \quad \text{При приближении к радиусу Шварцшильда часы начинают идти бесконечно медленно.}$$

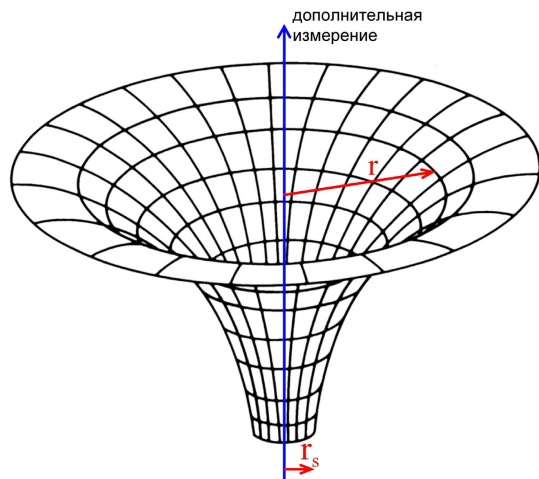
Для фотона всегда $ds^2 = 0$. Если фотон движется по радиусу $cdt = dr / (1 - r_s/r)$ отсюда время движения от $r = r_s$ до далекого внешнего наблюдателя становится бесконечным, т.е. объект размером меньше r_s становится невидимым. По часам падающего время падения в Ч.Д. конечно, а для далекого наблюдателя бесконечно

Если два события произошли в разных точках и в одно время ($dt = 0$), то ds имеет смысл расстояния между точками $dl = \frac{dr}{\sqrt{1 - r_s/r}}$. Это есть проявление кривизны пространства.

В рассматриваемом случае также можно ввести дополнительную координату u , так что

$$dl^2 = du^2 + dr^2 = \frac{dr^2}{1 - r_s/r}$$

откуда находим уравнение поверхности $u = 2\sqrt{r_s(r - r_s)}$, изображенную ниже.

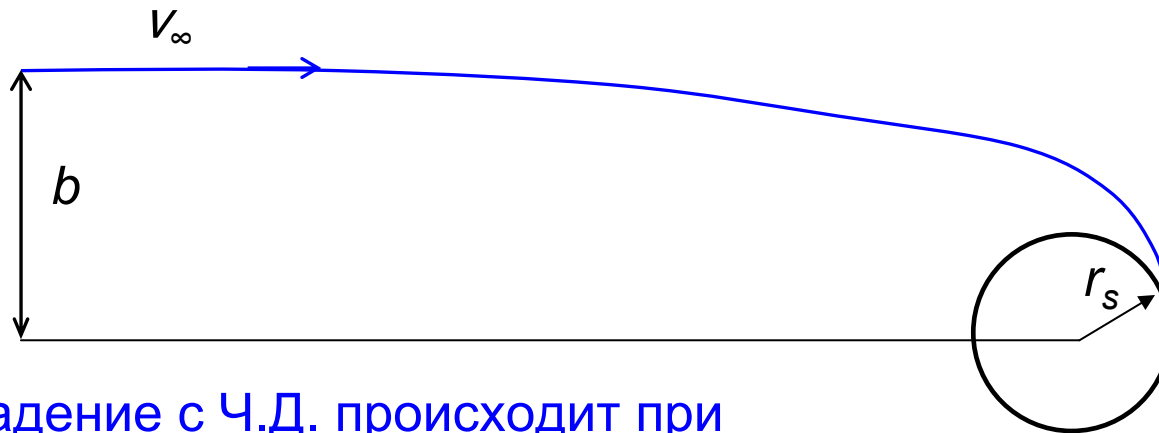


При $r < r_s$ тела не могут находиться в покое, они движутся к $r = 0$.

Объект размером меньше радиуса Шварцшильда является “черной дырой” (Д.Уилер, 1967). Ранее были «коллапсары». Упасть туда можно запросто, а выбраться обратно невозможно, даже свету. Сфера с радиусом Шварцшильда является горизонтом событий, поскольку никакая информация не выходит наружу.

Для вращающейся ч.д.(решение Керра) $r_K = r_s/2 + \sqrt{r_s^2/4 - \frac{J^2}{M^2 c^2}}$, J-момент импульса

Движение вблизи черной дыры



Падение с Ч.Д. происходит при

$$b < \frac{2c}{v} r_s \quad \text{при} \quad v \ll c$$

$$b < \frac{3\sqrt{3}}{2} r_s \approx 2.6 r_s \quad \text{при} \quad v \approx c$$

Самая ближняя к центру устойчивая орбита находится на расстоянии $3r_s$, при этом скорость на орбите равна $v=0.5c$.

Свет может двигаться по круговой орбите на расстоянии $1.5r_s$, но такая орбита неустойчива.

Черные дыры во Вселенной

1. Чёрные дыры звёздных масс, образуются на конечном этапе жизни звезды, масса остатка

$$M < 1.4M_{\odot} \quad - \text{белый карлик (Чандрасекар, 1930)}$$

$$M \approx (1.4 - 3)M_{\odot} \quad - \text{нейтронная звезда (Оппенгеймер, Волков, 1939)}$$

$$M > 3M_{\odot} \quad (\sim 3-10 M_{\odot}) \quad - \text{черная дыра (Оппенгеймер, Снайдер, 1939)}$$

2. Сверхмассивные черные дыры (ядра галактик), примеры:

Ч.Д. Sgr-A в центре нашей Галактики
на расстоянии 8.3 кпс = 24 св.года

$$M = (4.3 \pm 0.36) \cdot 10^6 M_{\odot}$$

Ч.Д. в галактике M87 на расстоянии
16.8 Мпс (в 1500 раз дальше, чем Sgr-A)

$$M \approx (6.5 \pm 0.7) \cdot 10^9 M_{\odot}$$

В 2019 был увиден и измерен ее горизонт!

Ч.Д с максимальной измеренной массой

$$M \approx 10^{11} M_{\odot}$$

3. Первичные ч.д., могли возникнуть на ранней стадии Вселенной, пока не обнаружены.

Квант массы Ч.Д (масса Планка)

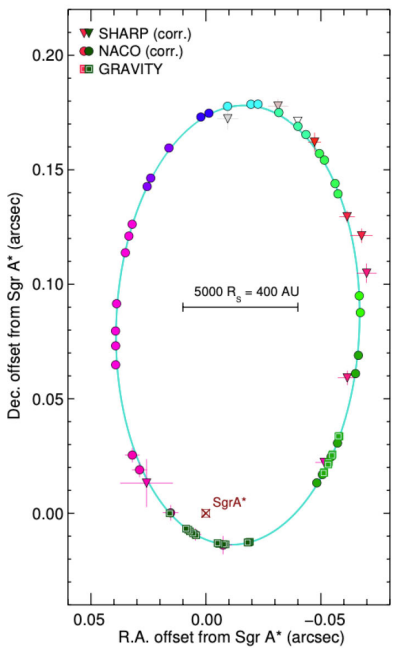
$$M_p = \sqrt{\frac{\hbar c}{G}} \approx 10^{-5} \text{ г.}$$

Движение звезд вокруг Галактического центра

Звезда S2

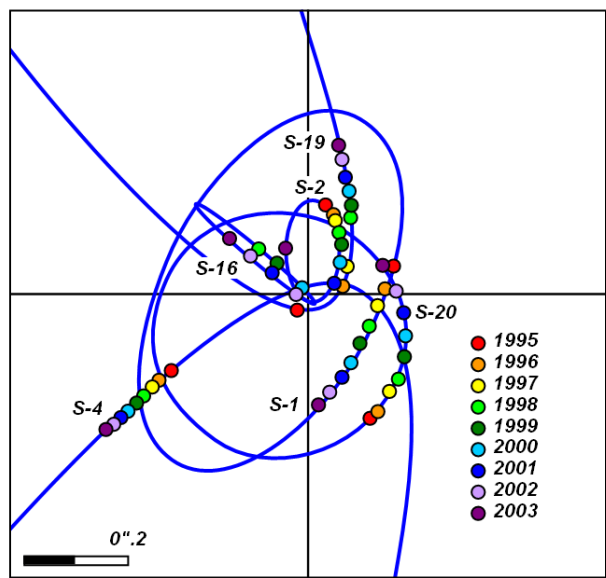
Ч.д. Sgr-A в центре нашей Галактики
 на расстоянии 8.3 кпс = 24 св.года
 $M = (4.3 \pm 0.36) \cdot 10^6 M_{\odot}$

орбита



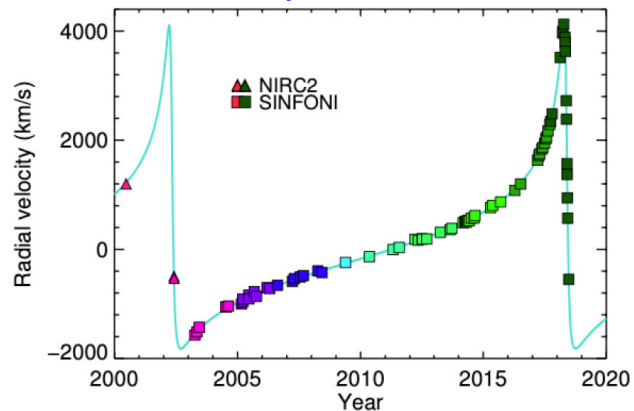
T=15.5 лет
 перигелий 120 а.е
 $V_{\max} \sim 1/50$ с

Другие звезды близкие к ч.д.



Самая близкая, но тусклая,
 S62, $r_{\min} = 15$ а.е., T=9.9 лет,
 $V_{\max} = 0.1$ с

скорость



Нобелевская премия, 2020 г, за открытие ч.д. в нашей Галактике, R. Genzel, A. Chez
 +за теорию ч.д. R.Penrose

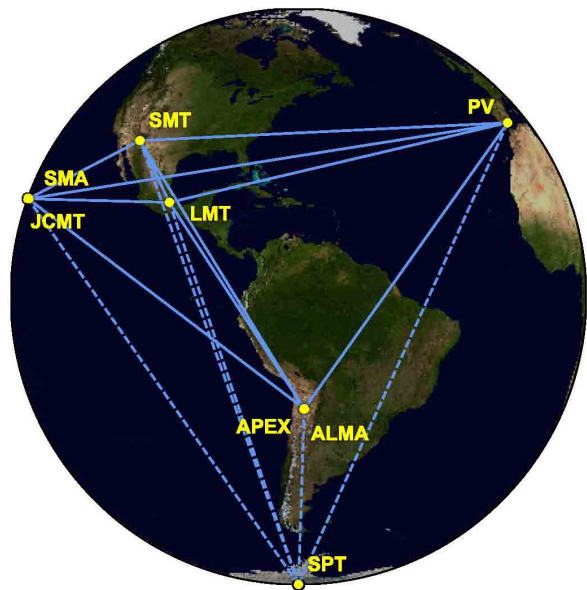
Первое наблюдение горизонта черной дыры (2019)

Угловое разрешение $\Delta\theta \approx \frac{\lambda}{d}$

$\lambda \approx 1 \text{ мм}, D \approx 10000 \text{ км}$

$\Rightarrow \Delta\theta \approx 10^{-10} \text{ рад}$

Event Horizon Telescope (EHT)



Эти «фото» впервые доказали, что Ч.Д. действительно имеют горизонт, согласующийся с теорией.

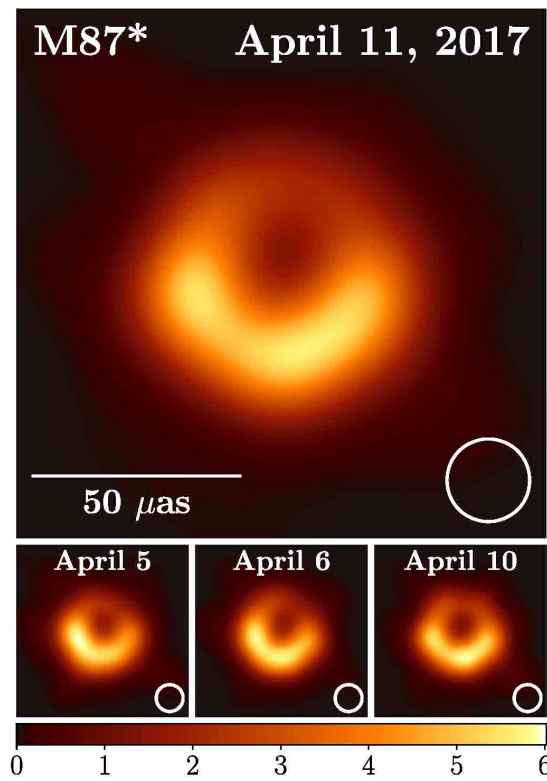
Масса $M \approx (6.5 \pm 0.7) \cdot 10^9 M_{\odot}$

Расстояние $D \approx (16.8 \pm 0.8) \text{ Мпс}$

Угловой размер $\Delta\theta \approx (42 \pm 0.3) \mu\text{ас}$
 $\approx 1.6 \cdot 10^{-10} \text{ рад}$

Полный угловой размер кольца $\Delta\theta \approx 5.2 r_s / D$

Свет дает газ, вращающийся вокруг ч.д. на расстоянии $> 1.5 r_s$ (нам видно кольцо с $r \sim 2.6 r_s$).



Плотность черных дыр

(в начале коллапса)

Черные дыры с массой Солнца имеют плотность (точнее масса, деленная на объем шварцшильдовской сферы) на порядок больше, чем плотность нейтронные звезды (10^{14} г/см³).

Однако плотность падает с увеличением массы Ч.Д.

$$\rho = \frac{M}{\frac{4\pi}{3} r_s^3} = \frac{3c^6}{32\pi M^2 G^3} = 20 \left(\frac{10^9 M_\odot}{M} \right)^2 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$$

Для обнаруженной ч.д. с рекордной массой $M=10^{11}$ масс Солнца плотность составляет $\rho=2$ г/м³, что в 600 раз меньше плотности земной атмосферы. Учитывая, что сверхмассивные ч.д. образуются путем втягивания в себя окружающего вещества, можно не заметить как окажешься внутри ч.д., правда коллапс наступит быстро, по порядку за время r_s/c , что для приведенного примера составляет около 10 дней.

Испарение черных дыр

В 1975 г С.Хокинг предсказал, что черная дыра может испаряться.

Упрощённо говоря, гравитационное поле поляризует вакуум (за счет градиента поля виртуальные частицы, рожденные на расстоянии порядка комптоновской длины, набирают энергию и становятся реальными), в результате чего возможно образование не только виртуальных, но и реальных пар частица-античастица. Одна из частиц, оказавшаяся чуть ниже горизонта событий, падает внутрь чёрной дыры, а другая, оказавшаяся чуть выше горизонта, улетает, унося энергию (то есть часть массы) чёрной дыры. Мощность излучения чёрной дыры и температура (черного тела) равны

$$\frac{d(Mc^2)}{dt} = \frac{\hbar c^4}{15360\pi G^2 M^2} \quad T = \frac{\hbar c^3}{8\pi kGM} = 10^{-7} \left(\frac{M_{\text{Солн}}}{M} \right) K$$

Отсюда время жизни $\tau \approx 10^{10} \left(\frac{M}{10^{15} \text{ з}} \right)^3 \text{ лет}$

Так что ЧД со звездными массами практически не испаряются, а масса 1000 т испарится за 0.3 сек – большой взрыв (1 млн шт. мегатонных водородных бомб). Ищут, но пока таких не наблюдали.

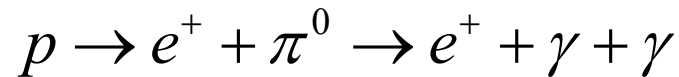
К тому же $M > 10^{-7} M_{\odot}$ имеют $T < 2.7 \text{ К}$ (темп. реликтового излучения) и поэтому их масса растет.

Далекое будущее Вселенной

Через 10^{35} лет остатки Солнечной системы упадут в черную дыру (с массой $\sim 10^{11} M_{\odot}$) в центре нашей Галактики за счет гравитационного излучения, а вскоре там окажется вся Галактика.

Через 10^{100} все черные дыры испарятся (в фотоны) за счет излучения Хокинга.

Не попавшие в черные дыры объекты распадутся за счет нестабильности протона (пока ограничение $\tau_p > 10^{34}$ лет):



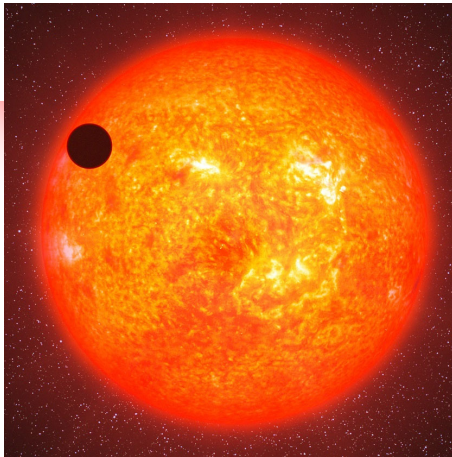
Электроны и позитроны когда-нибудь аннигилируют. Останутся фотоны и (возможно) нейтрино.

Другой вариант. За счет наблюдаемого ускоренного расширения Вселенной (мы пока не знаем механизм), начнется разрыв атомов, ядер, протонов на части, т.к. разные их части (кварки) не будут успевать взаимодействовать.

Экзопланеты

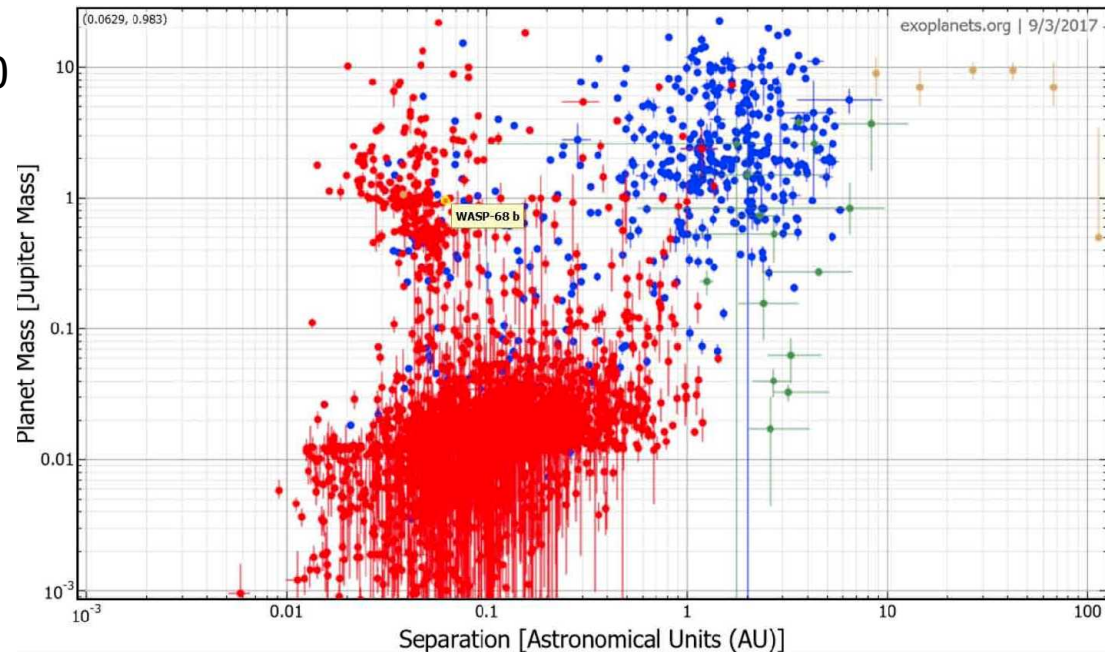
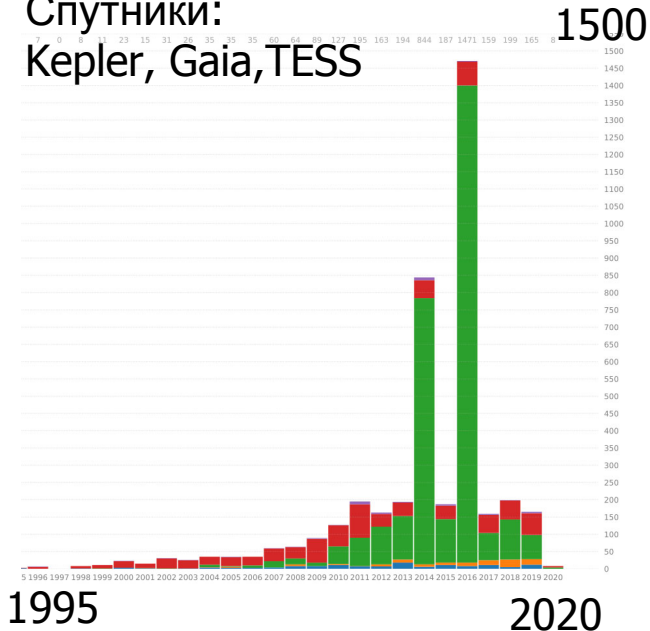
Нобелевская премия 2020

Мишель Майор и Дидье Кело



Подтверждено существование более 4 тыс. экзопланет, кандидатов значительно больше. Общее количество экзопланет в нашей галактике оценивается > 100 млрд, из которых \sim от 5-20 миллиардов, возможно, являются «землеподобными».

Спутники:
Kepler, Gaia, TESS



Заключение

- Колоссальное продвижение в изучении Вселенной
- Удалось заглянуть во Вселенную при $t \sim 10^{-35} \text{ с}$
- На ускорителях изучаем состояние Всел. при $t < 10^{-12} \text{ с}$
- Умеем моделировать Вселенную

Но не знаем:

- Что есть «темная энергия» (70%)?
- Что за частицы составляют темную материю (25%)?
- Что за поле вызвало инфляцию (и была ли она)?
- Не понятна природа асимметрии материи-антиматерии
- В Стандартной модели элем. частиц ~ 30 параметров
- и.т.д.

Тем интереснее жить и раскрывать тайны мироздания!



END

