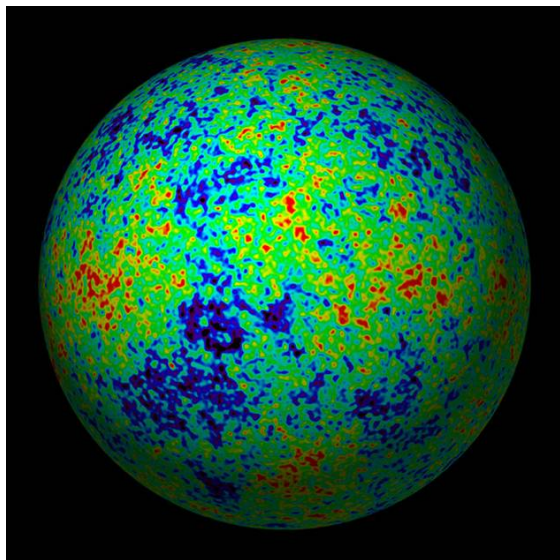
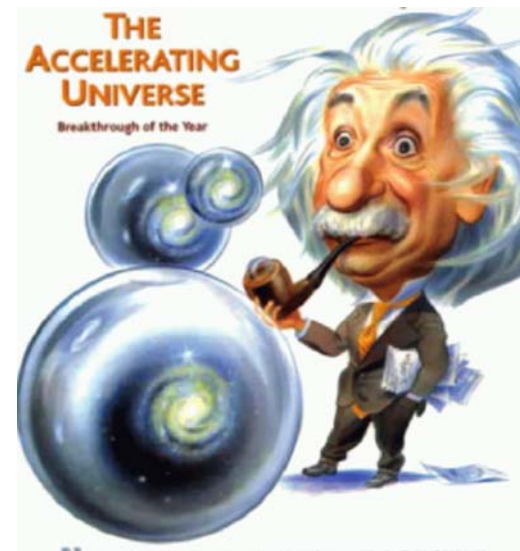




16 мая (среда),
16:00
конф. зал ИЦИГ



Темные материя и энергия во Вселенной



проф. В.И.Тельнов
ИЯФ

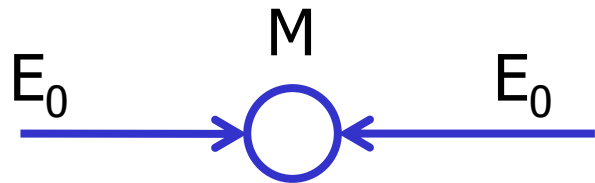


План

- ✓ Что нам известно о материи?
- ✓ Современное представление о Вселенной.
- ✓ Открытие ускорения расширения, темная энергия
- ✓ Измерение параметров и состава Вселенной
- ✓ Темная материя
- ✓ Дальнейшие перспективы

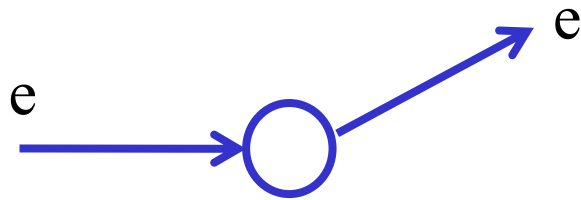
Как изучается материя

Рождение новых частиц



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

Изучение структуры частиц (ускоритель – это микроскоп)



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

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

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

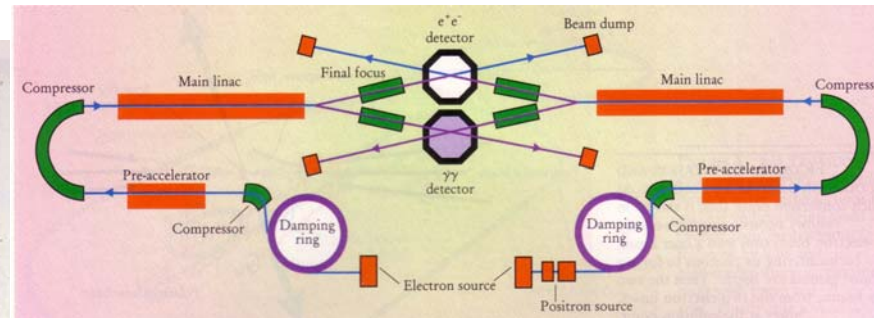
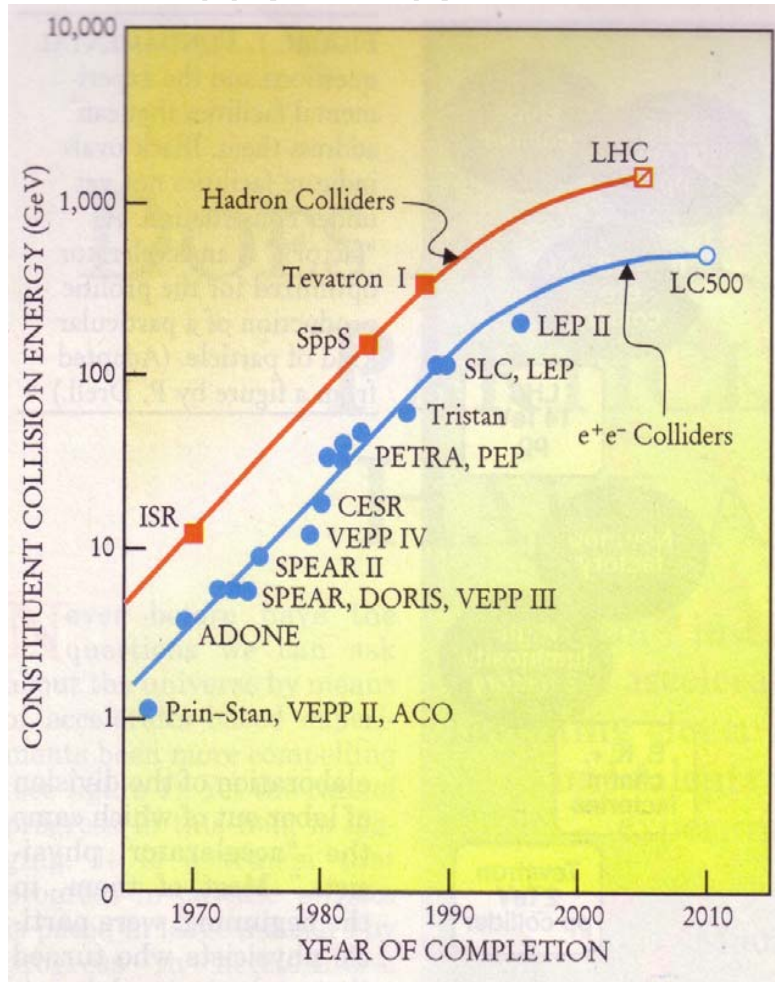
На сегодня максимальная достигнутая энергия на ускорителях ~ 1000 ГэВ
Зарегистрированы космические частицы с $E \sim 10^{11}$ ГэВ (< 0.1 шт/км²/год)

Ускорители: и

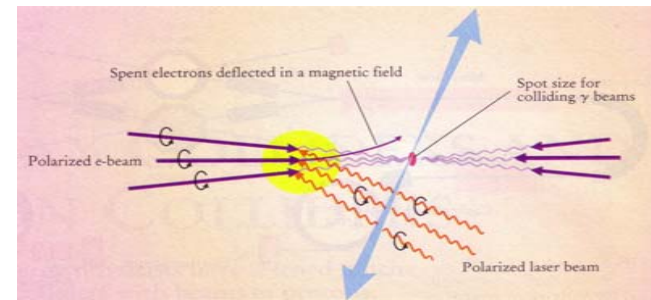
современные

будущие

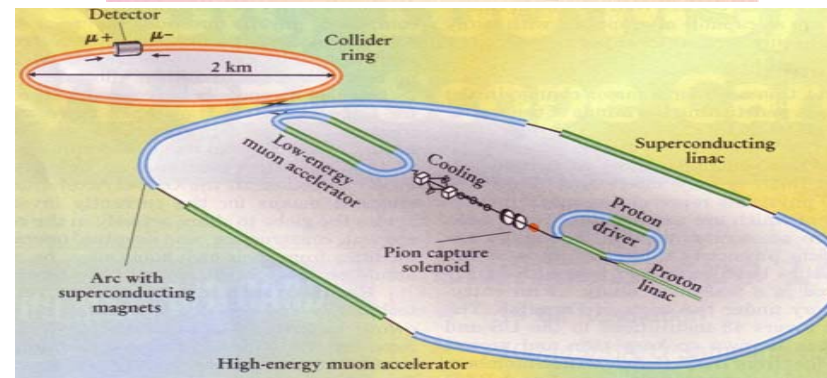
pp(анти-p) и e^+e^-



линейные
 e^+e^-

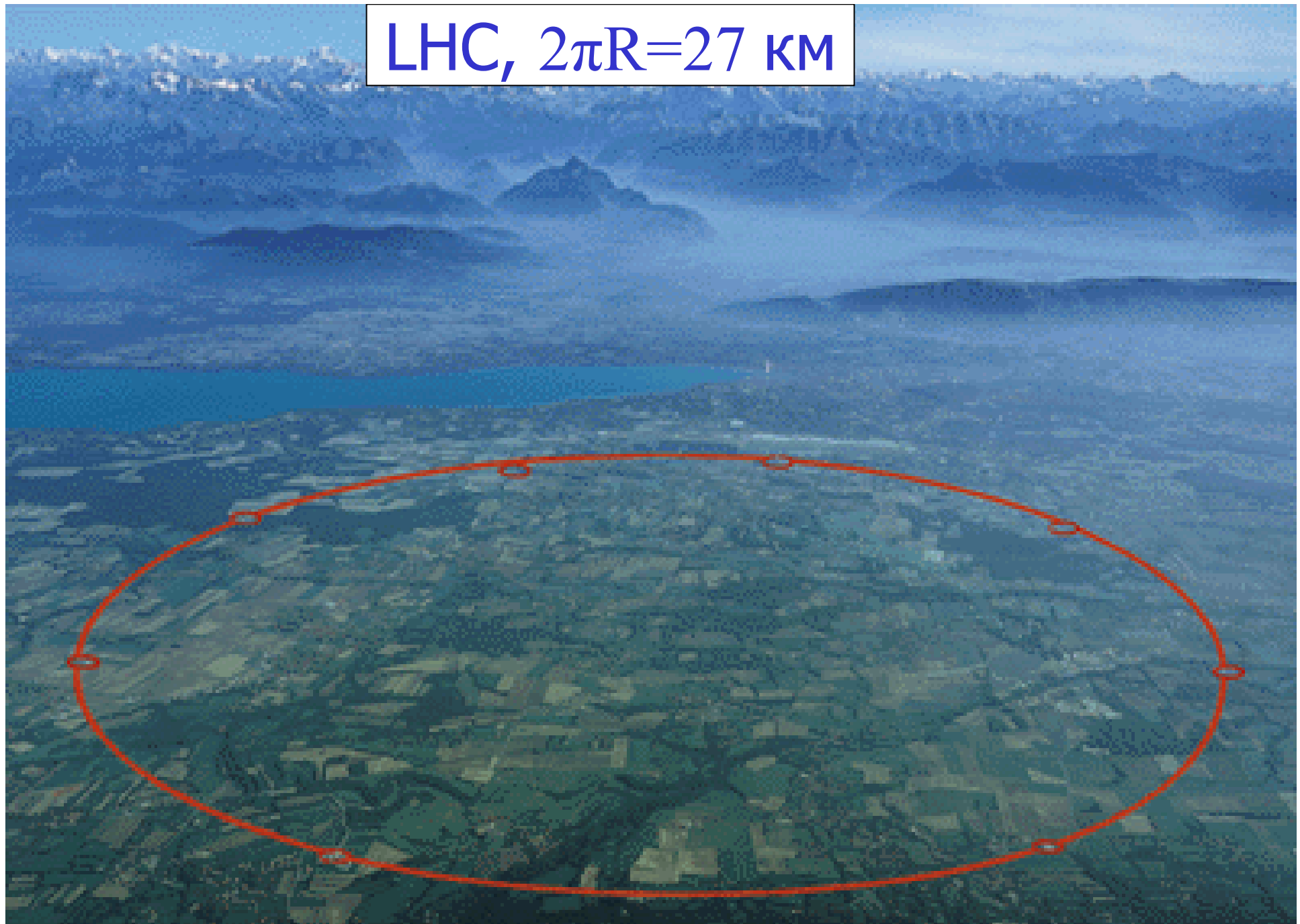


фотон-
фотонные



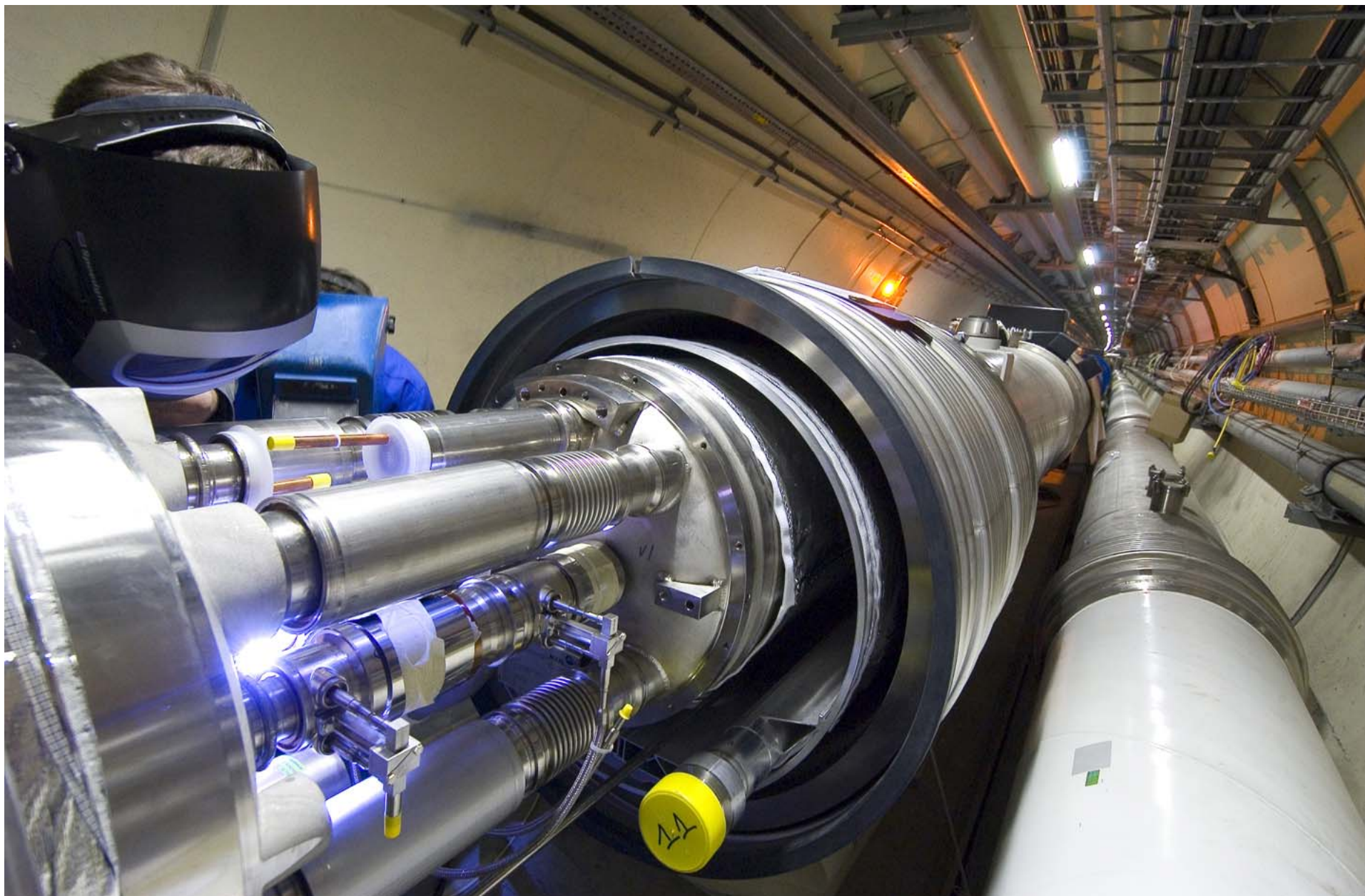
мюонные
коллайдеры

LHC, $2\pi R=27$ km



CERN from the AIR

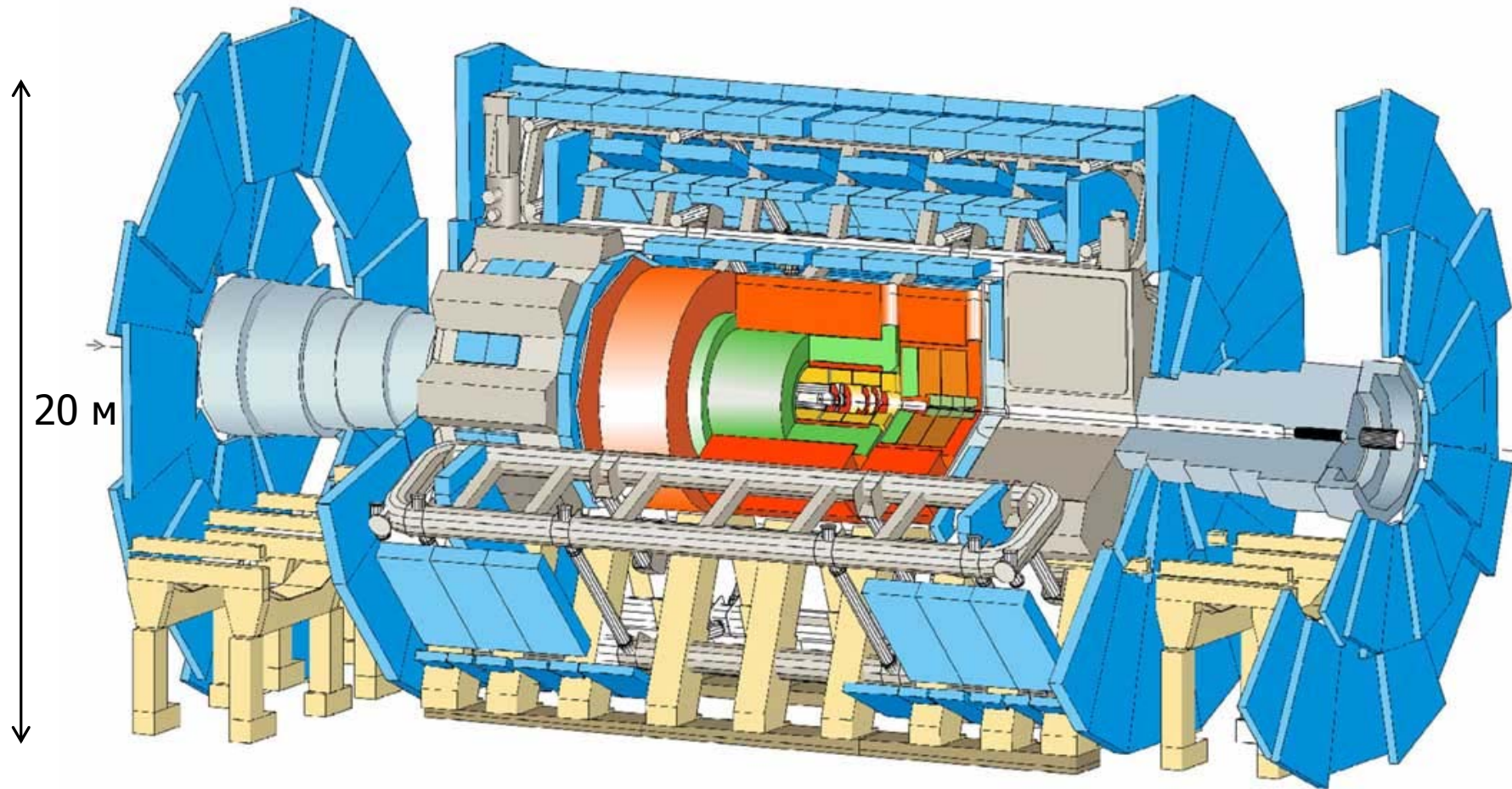
(LEP → LHC !)



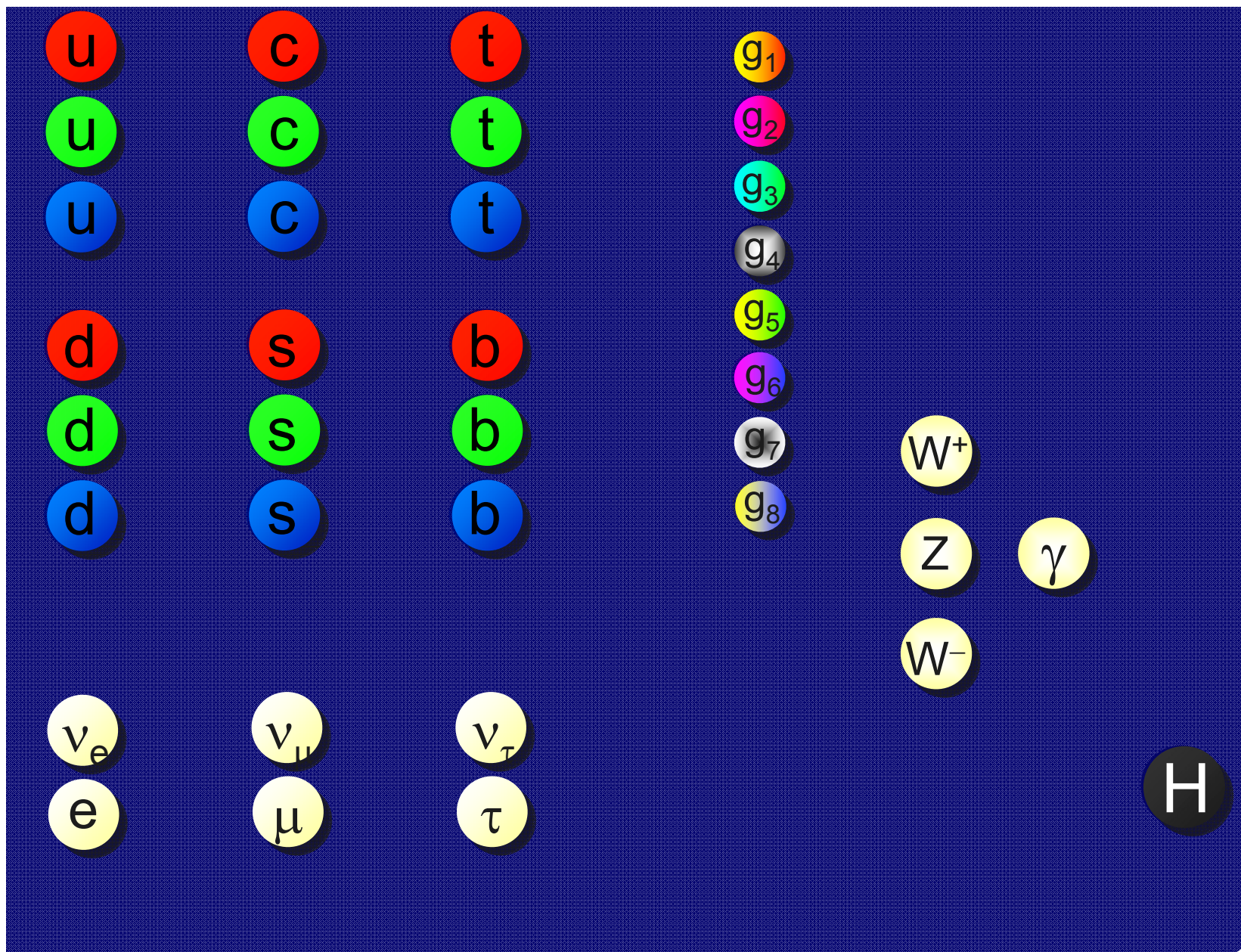
Assembly welding of LHC magnets in the tunnel

Начало работы 2009 г.

Детектор ATLAS на LHC



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

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

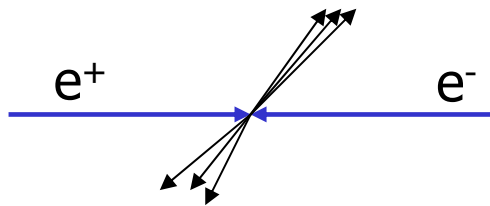
У каждого кварка есть 3 цвета (аналог электрического заряда).
Взаимодействуют путем обмена глюонами (аналог фотона).

ЛЕПТОНЫ

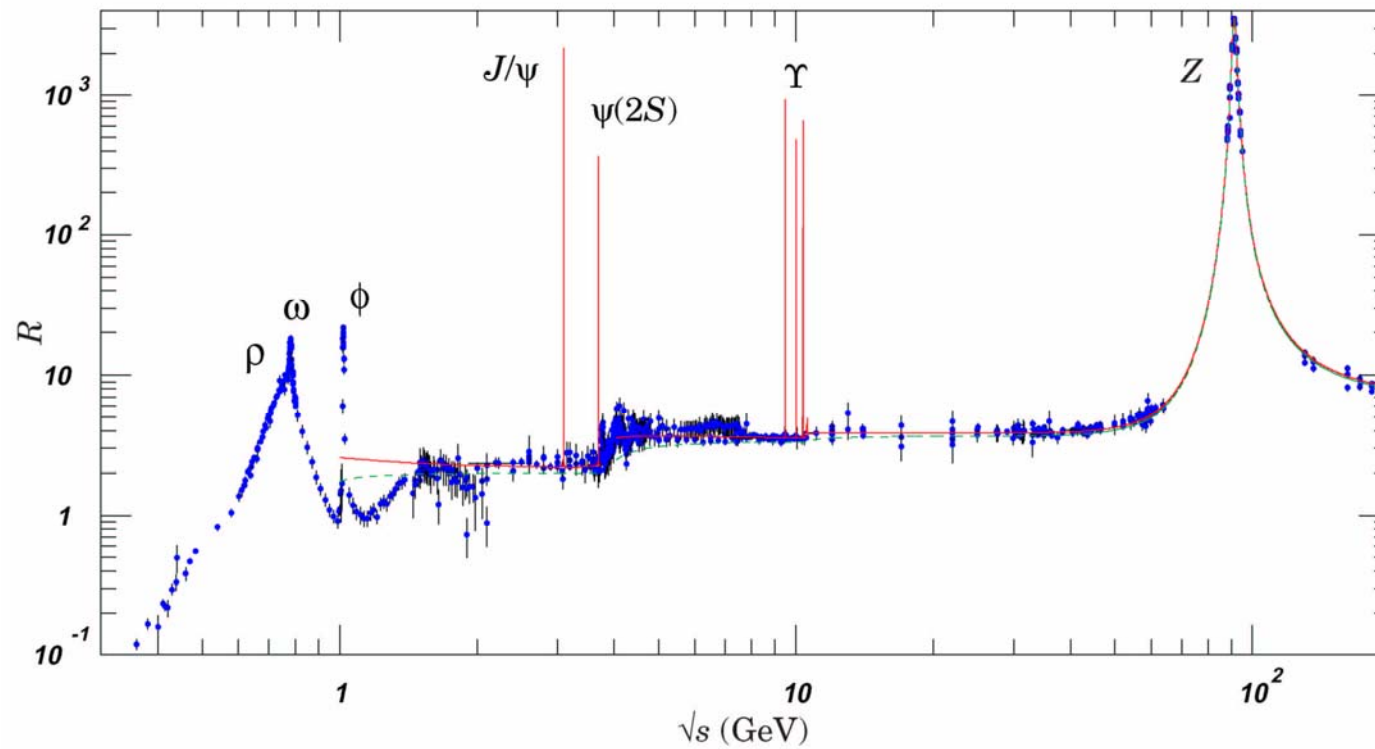
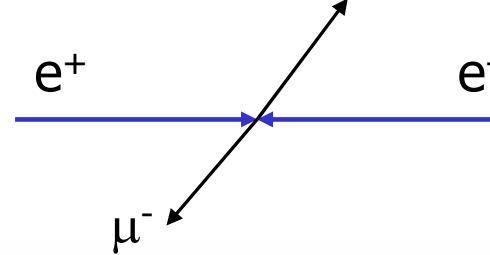
Тип	Масса, МэВ	Электр. заряд	Лепт. число
e	0.51	1	$L_e=1$
μ	106.6	1	$L_\mu=1$
τ	1777	1	$L_\tau=1$
ν_e	$<10^{-6}$	0	$L_e=1$
ν_μ	<0.19	0	$L_\mu=1$
ν_τ	<18	0	$L_\tau=1$

Отношение сечений рождения адронов и мюонов

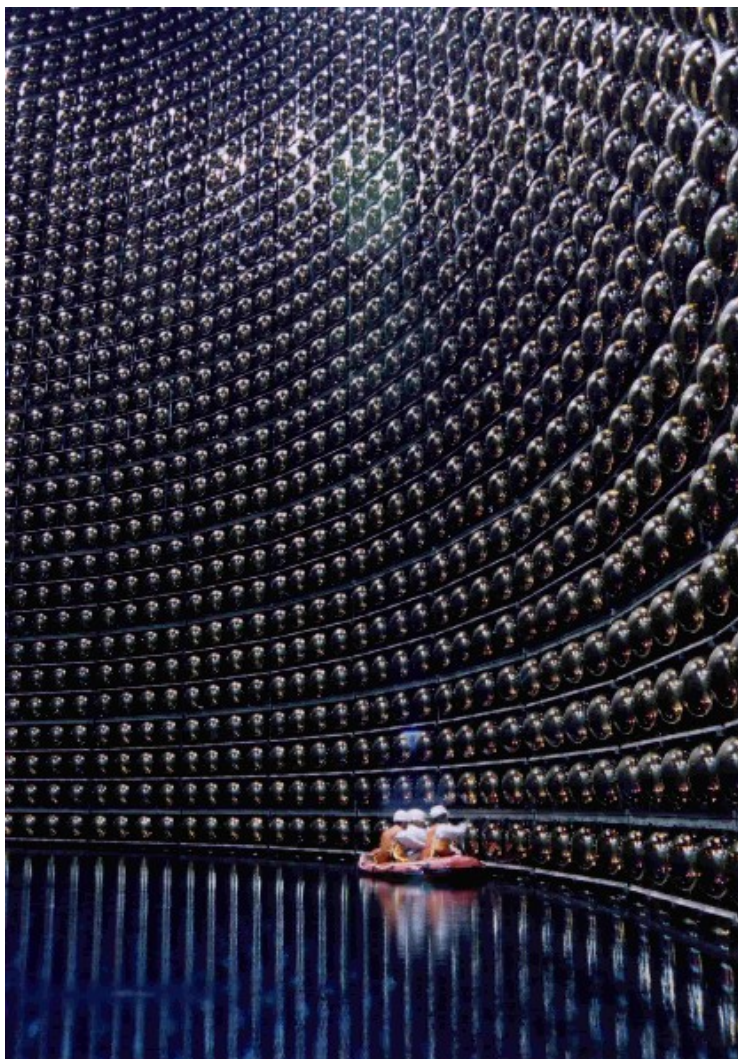
$$e^+e^- \rightarrow q \bar{q} \rightarrow \text{hadrons}$$



$$e^+e^- \rightarrow \mu^+\mu^-$$



Детектор нейтрино Super Kamiokande (Япония)

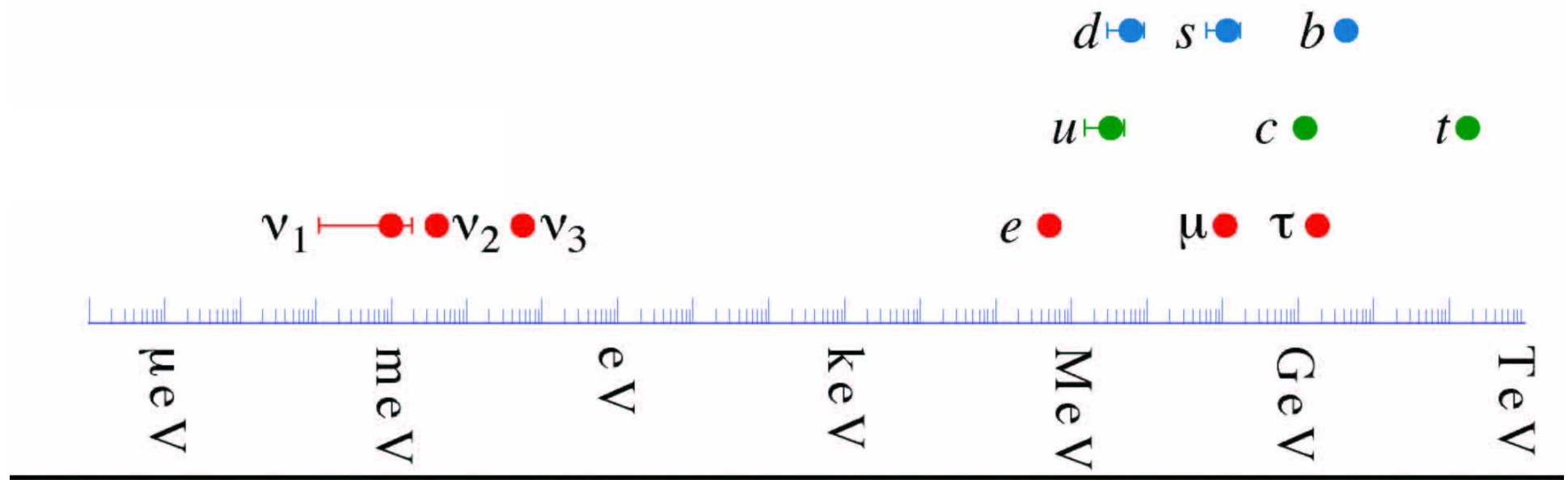


50000 т воды, 13000 ФЭУ

Недавно были открыли
взаимопревращения нейтрино
одного типа в другой (нейтринные
осцилляции). Нейтрино имеют
ненулевую массу < 0.1 эВ.

Разрешена загадка недостающих
Солнечных нейтрино.

Массы фермионов



Калибровочные бозоны

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.

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/Мпс.

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” (далее 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 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;

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

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

$p=0$ пылевидная материя

$p=(1/3)\rho c^2$ радиация

$p_v = -\rho_v c^2$ вакуум

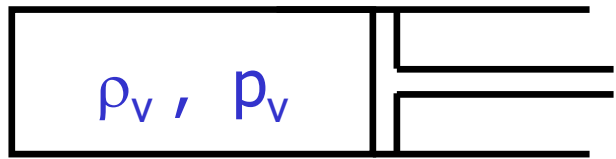
$\rho \propto a^{-3}$ (из 2-го ур. Фридмана)

$\rho \propto a^{-4}$

$\rho \propto \text{const}$

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

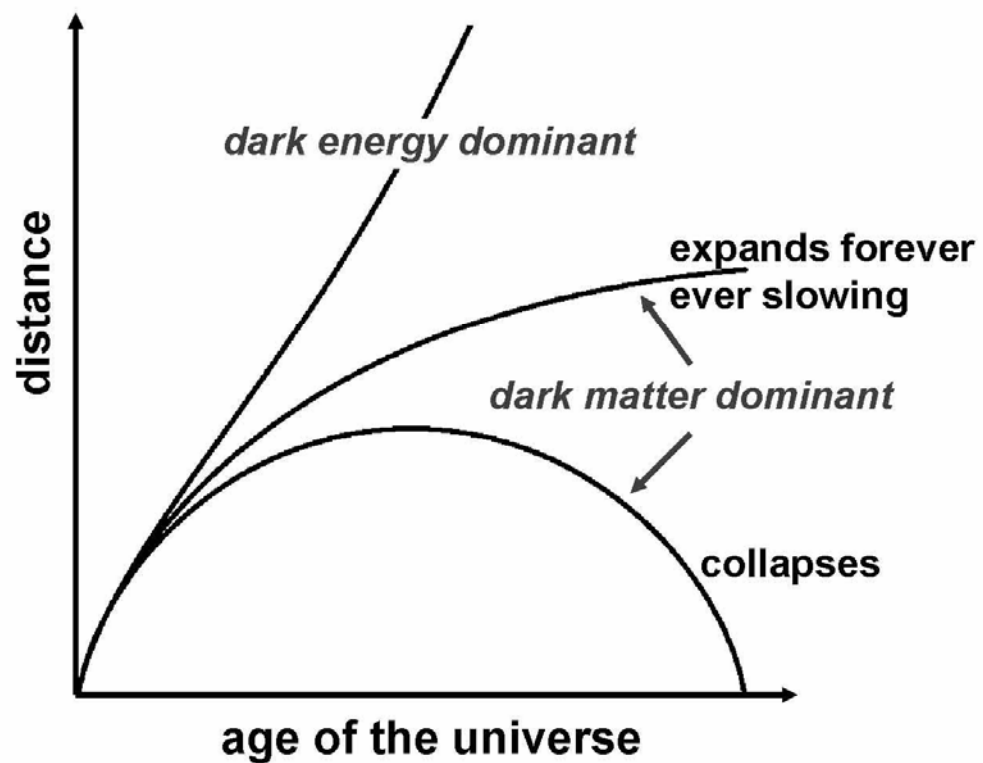
- $k=0, \rho, p=(1/3)\rho$ - плоская радиационно-доминантная

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

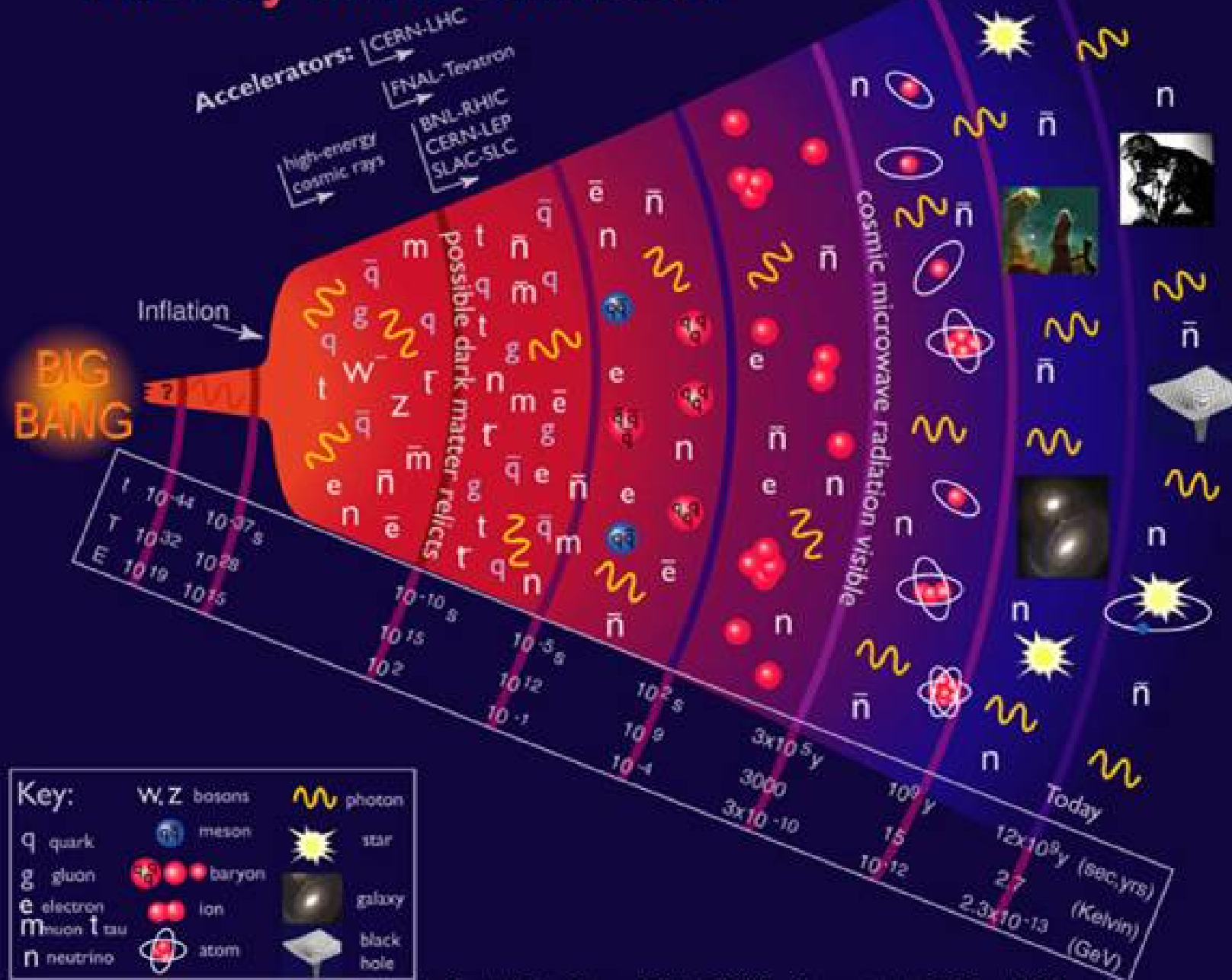
- $k=0, p=-\rho_v=\text{const}, \rho_m \sim 0$ - вакуумно-доминантная всел.

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

Некоторые сценарии развития вселенной



History of the Universe



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

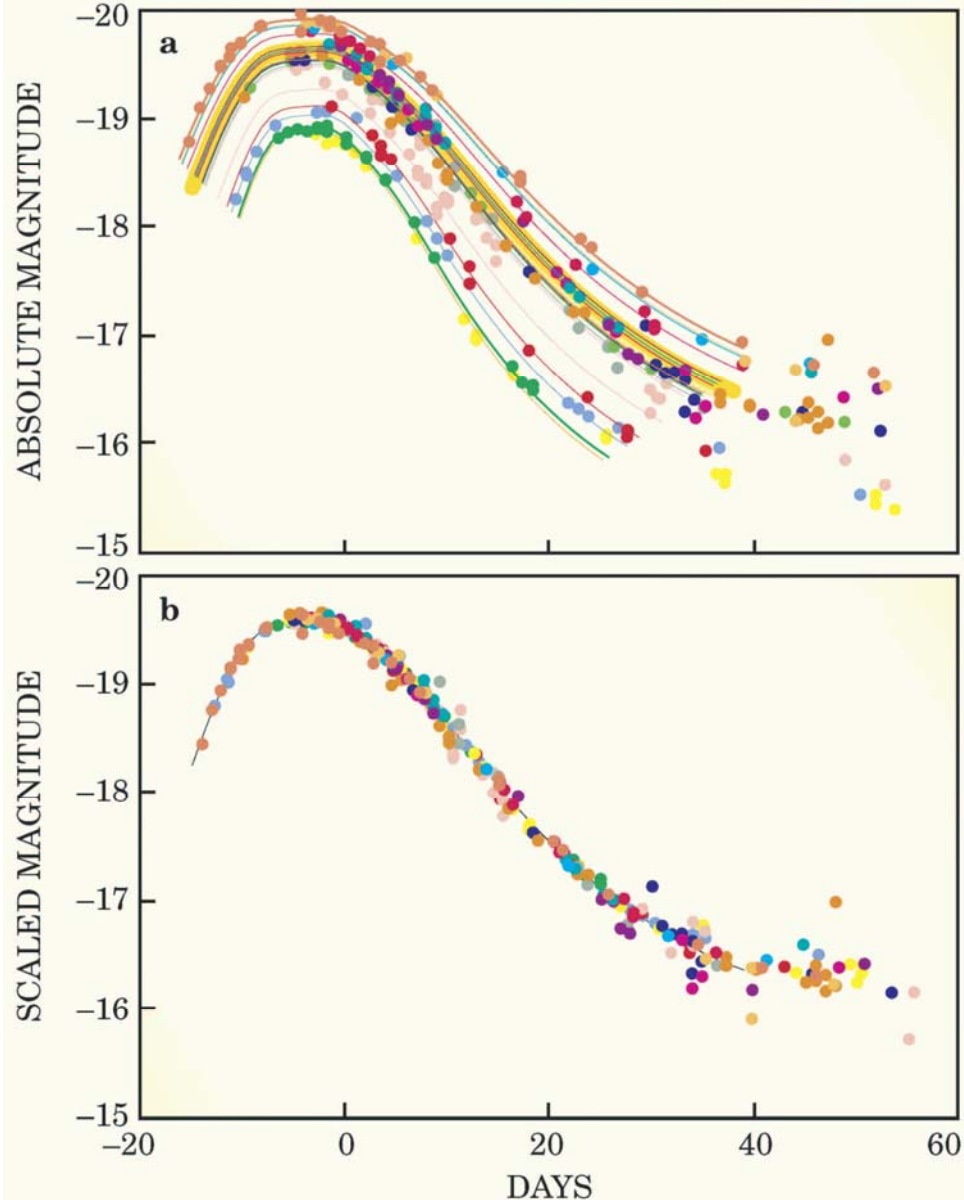
Световой год	$\sim 10^{18}$ см	
Парсек	~ 3.2 св.года $\sim 3 \cdot 10^{18}$ см	
$ct_{\text{всел}}$	~ 4 Гп $\sim 10^{28}$ см	$M \sim 10^{20-21} M_{\text{C}}$
Суперскопления	~ 100 Мп	$M \sim 10^{15-16} M_{\text{C}}$
Скопления галактик	~ 10 Мп	
Галактика	~ 30 кп	$M \sim 10^{11-12} M_{\text{C}}$

Измерение расстояний, стандартные свечи

- Параллакс
- Цефеиды
- Сверхновые
- Другие

Сверхновые 1a

(стандартная свеча, до которой известно расстояние)

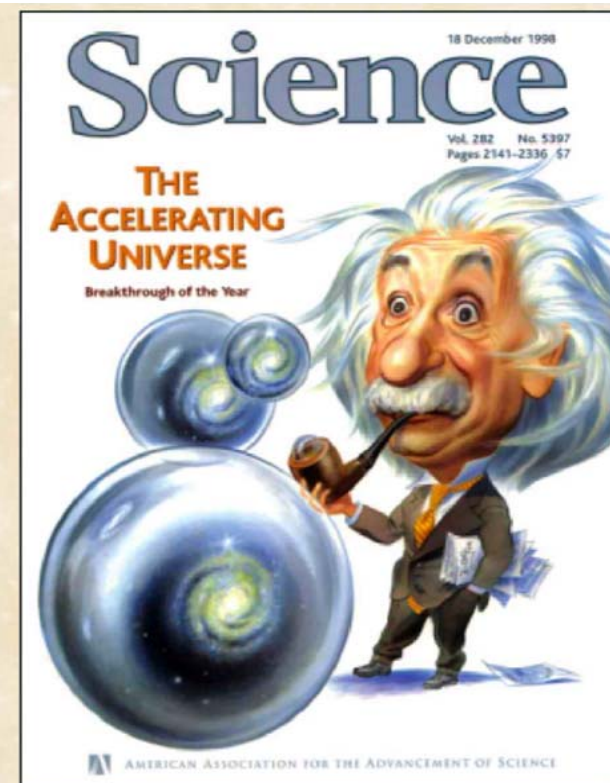
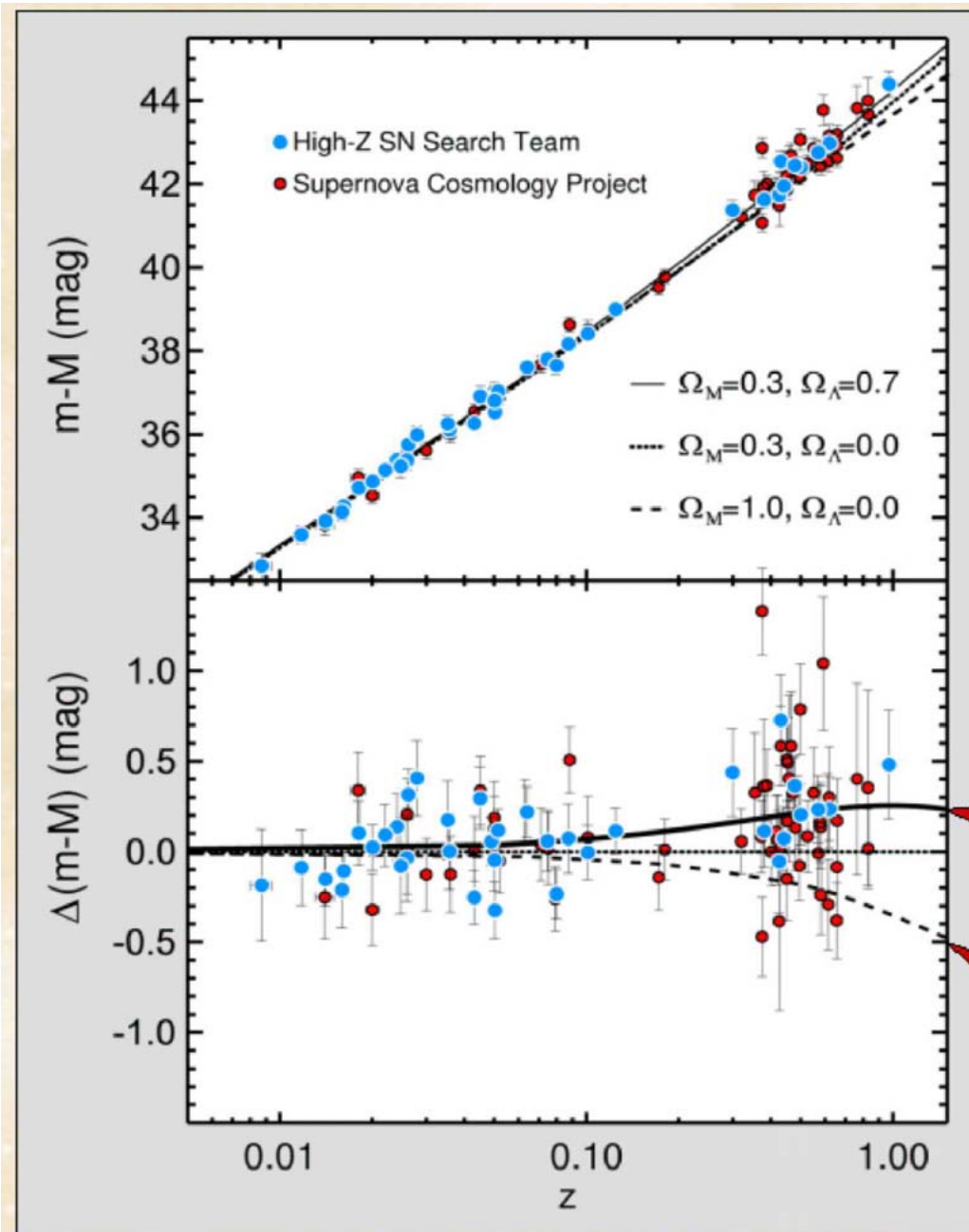


Потухшая звезда, белый карлик с $M \sim M_c$ в системе двойных звезд, затягивает в-во от соседней звезды и при $M \sim 1.4M_c$ снова вспыхивает.

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.)



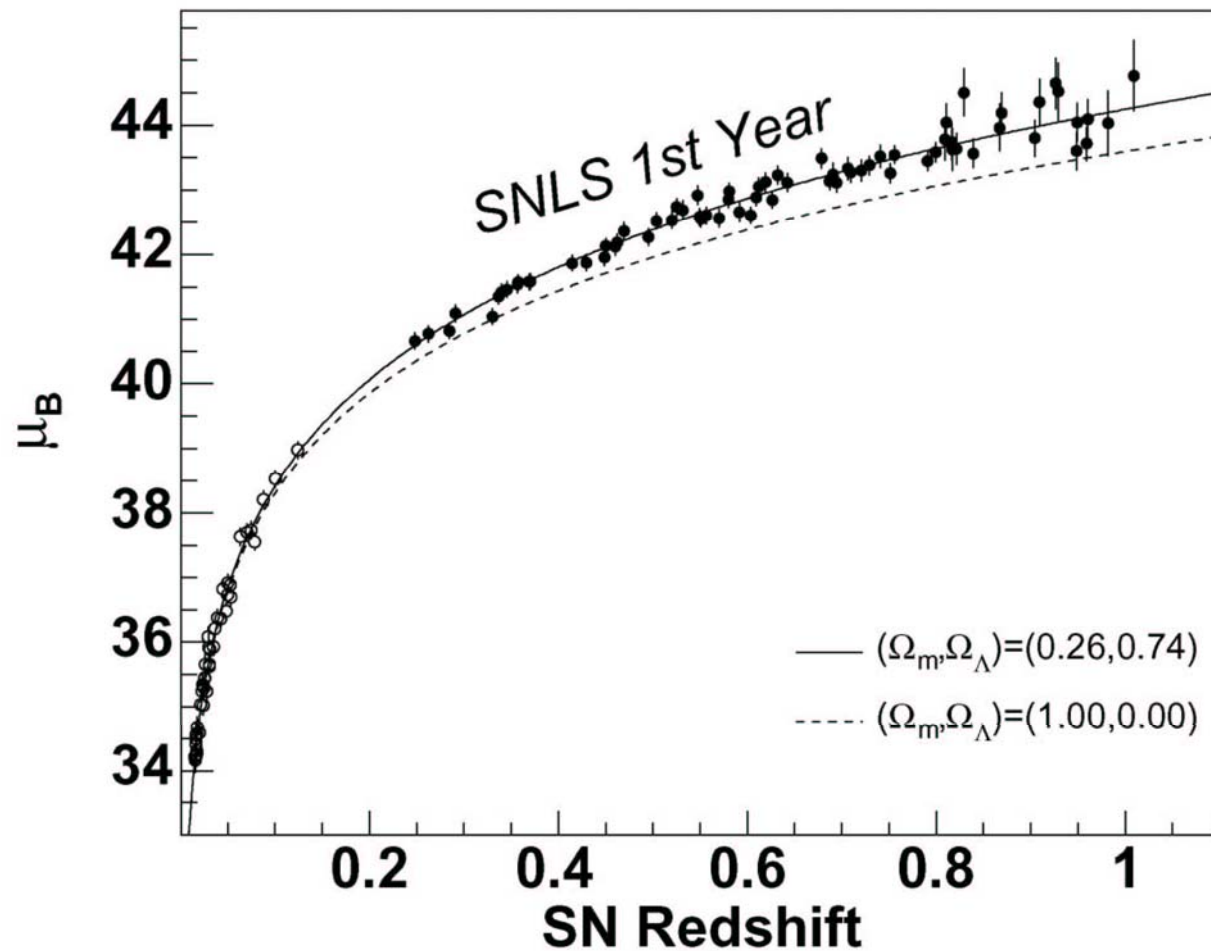
Accelerated expansion
($\Omega_M = 0.3, \Omega_\Lambda = 0.7$)

Decelerated expansion
($\Omega_M = 1$)

Индексы "м" —материя
"Λ" — Вакуум

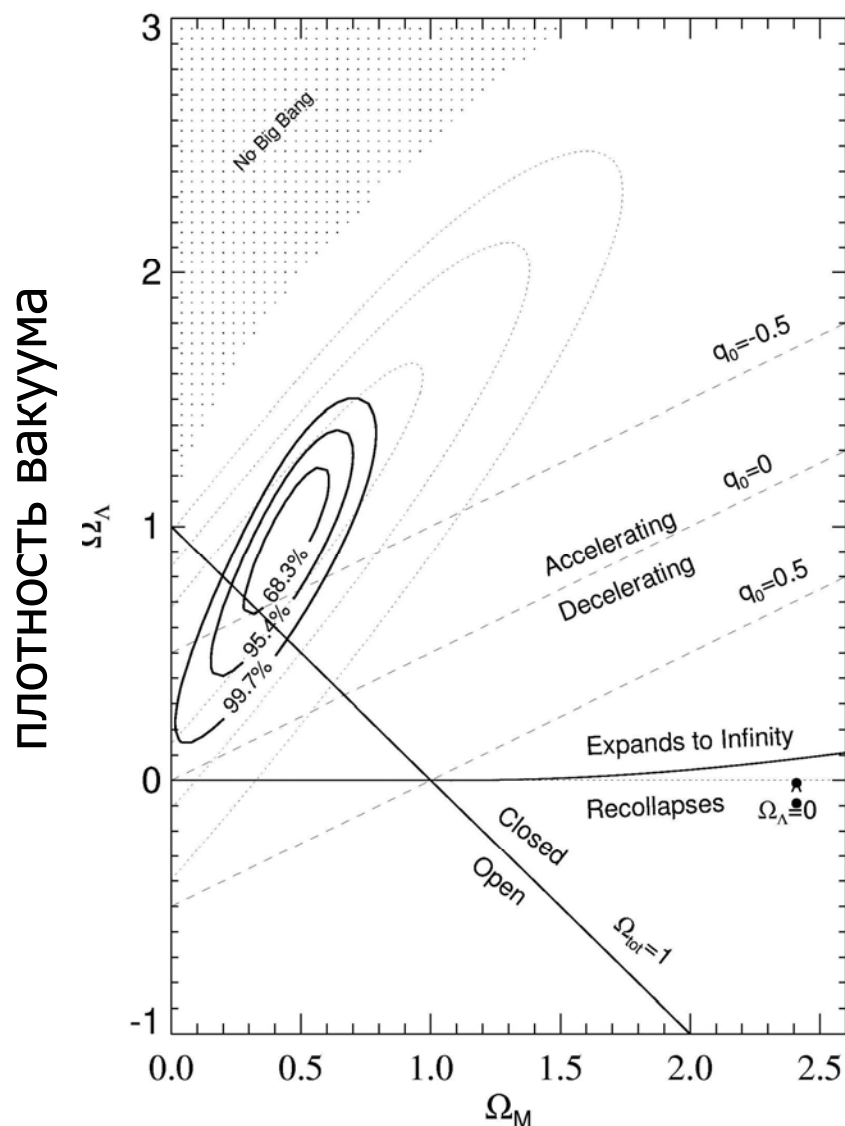
Данные группы SNLS 2005 года

astro-ph/0510447



Данные с телескопа Хаббл

F.Riess et al.
astro-ph/0402512



Измерения прямо показывают, что была эпоха замедления, ускорение началось при $z=0.46\pm0.13$.

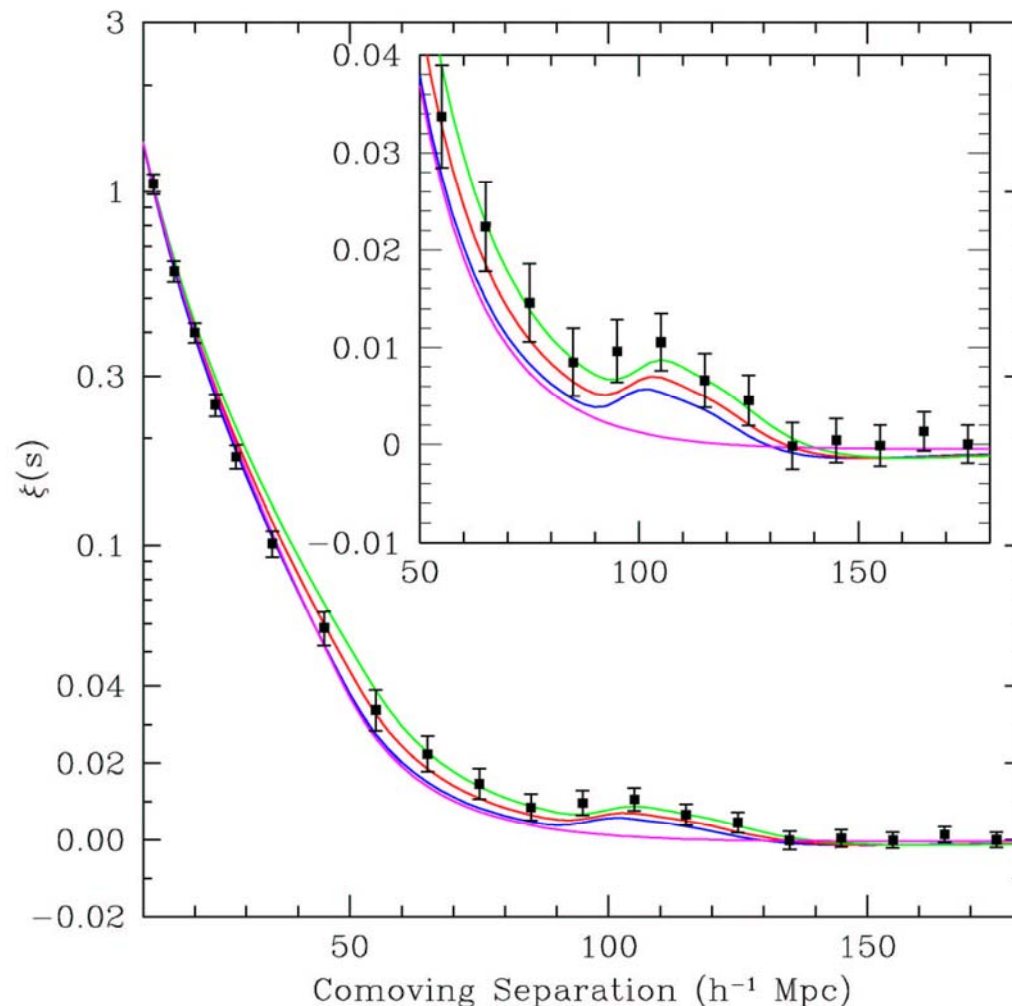
Для плоской Вселенной (след.из рел.изл.)
 $\Omega_m=0.29\pm0.04$, $\Omega_v=0.71$.

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)

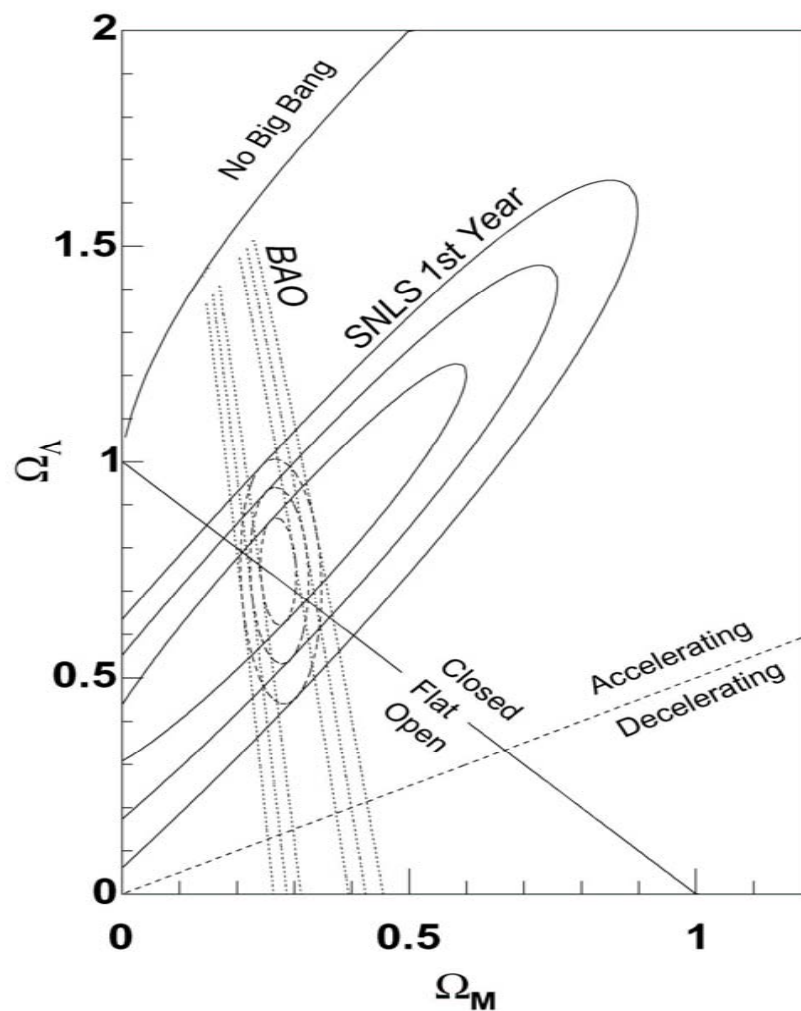
Барионный акустический пик в распределении по расстояниям между галактиками

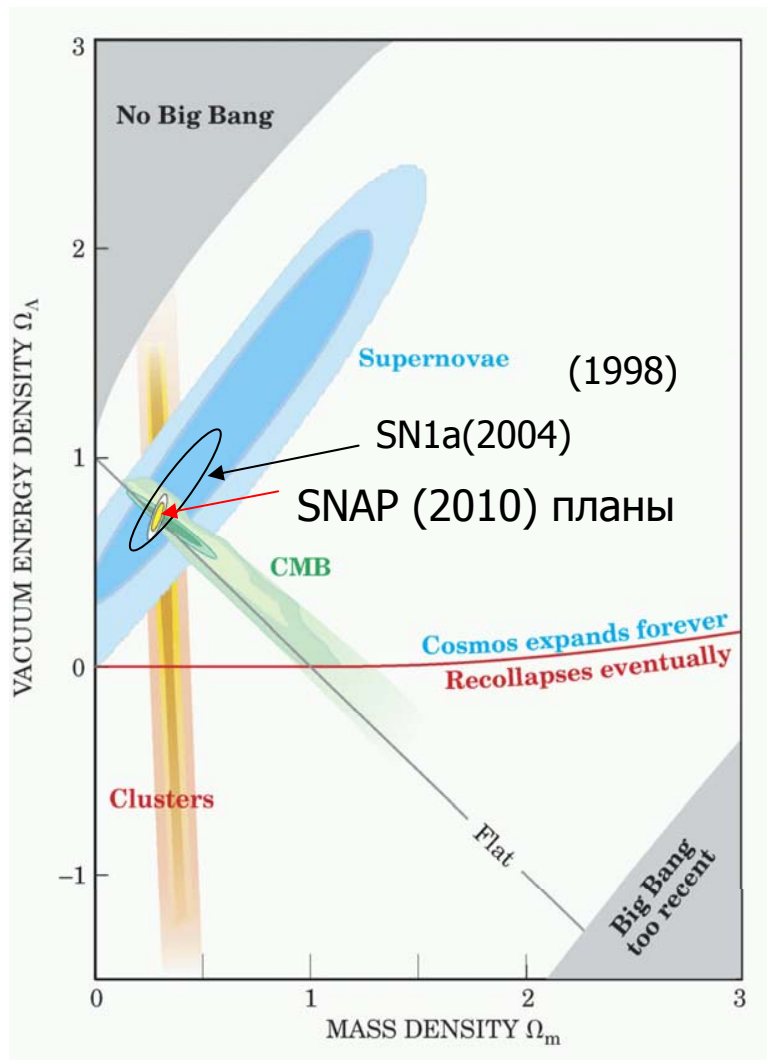


Флуктуации плотности в ранней Вселенной дают разбегающиеся акустические (плазменные) волны обычной (барионной) материи, в то время как флуктуации темной материи остается на месте. Пик соответствует расстоянию на которое убежала звуковая волна. Эти неоднородности стали зародышами галактик.

Пик соответствует расстоянию между галактиками 500 млн св. лет

Состав Вселенной с учетом барионного акустического пика (BAO)





Кроме прямого измерения расширения вселенной очень важные данные по геометрии и составу Вселенной дают

- Микроволновое реликтовое излучение
- Кластеры галактик

(см.далее)

Микроволновое реликтовое излучение

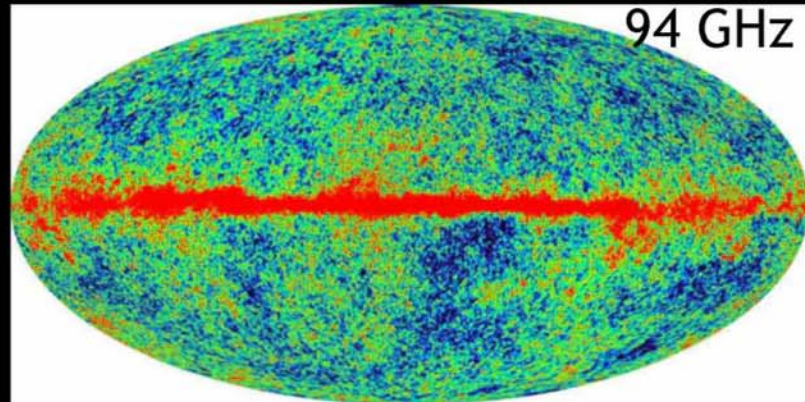
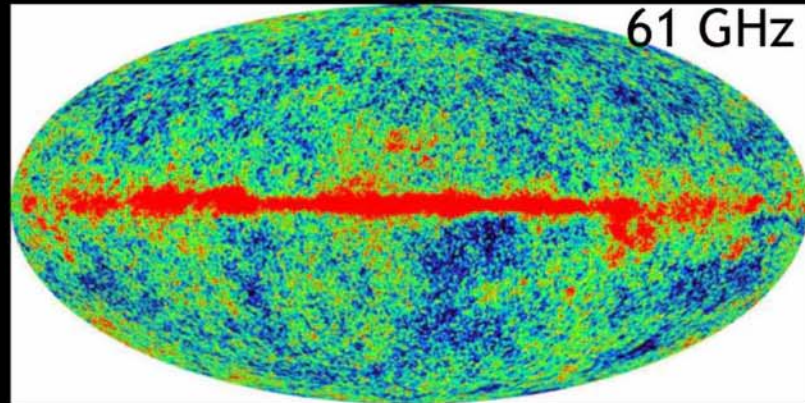
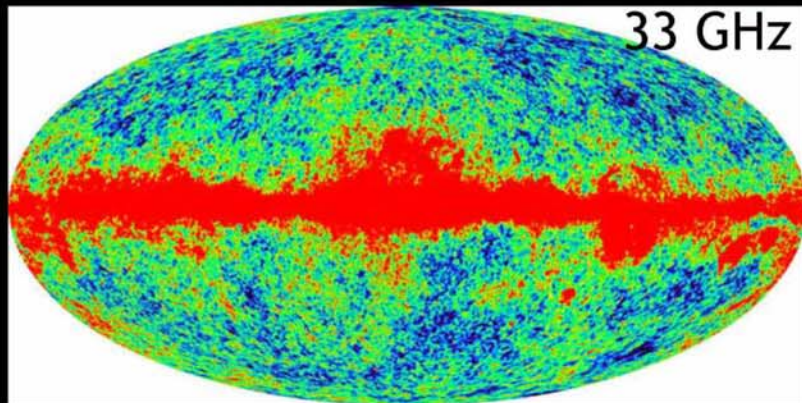
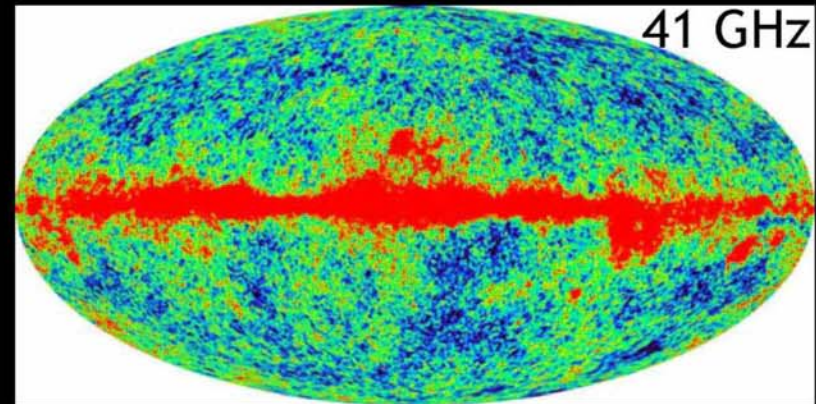
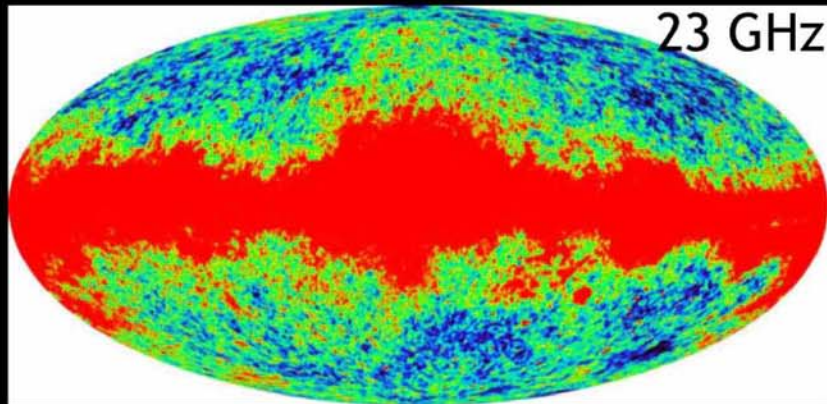
(CMB –cosmic microwave background)

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.

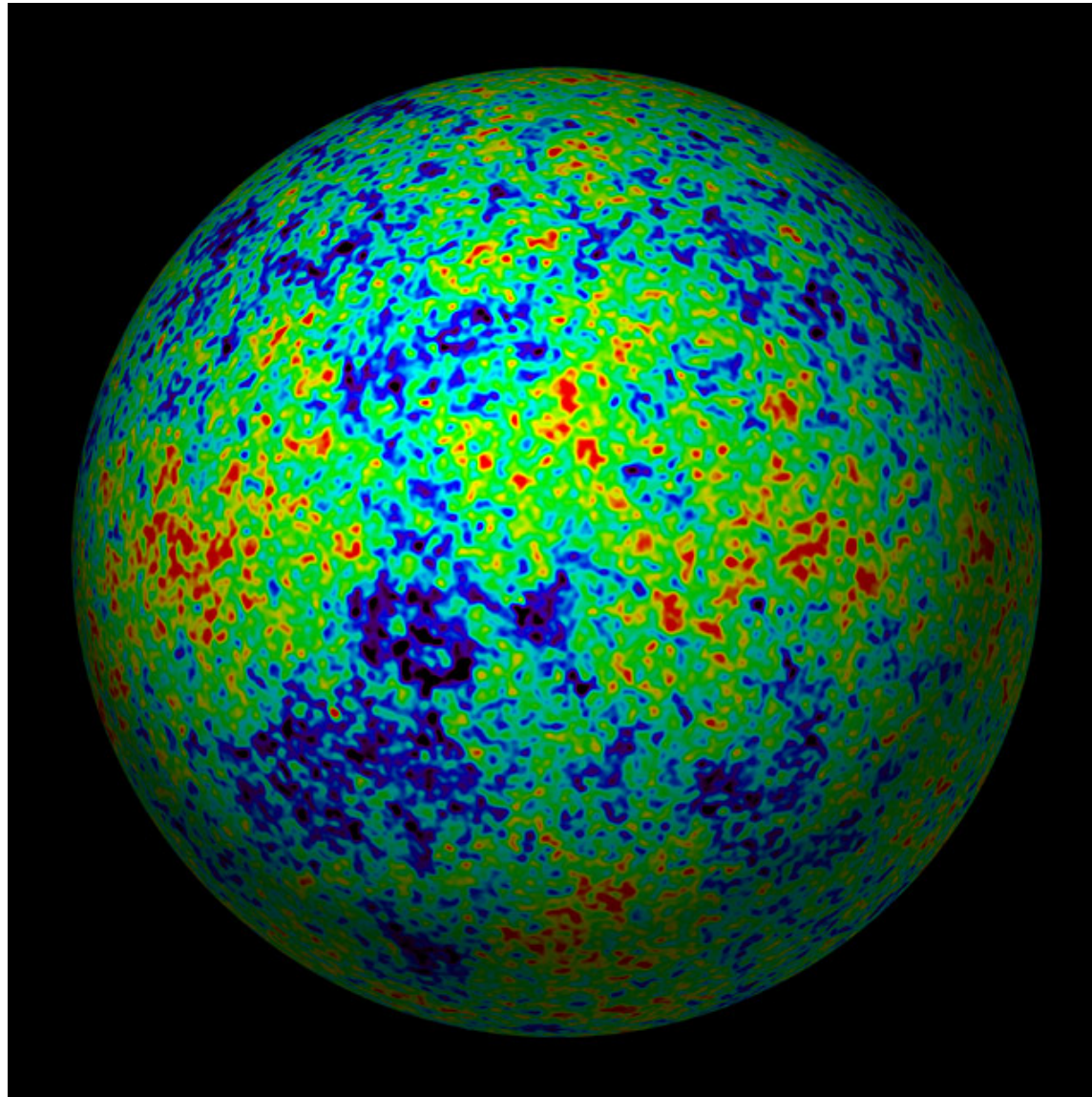
WMAP Sky Maps: 23 to 94 GHz



- 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

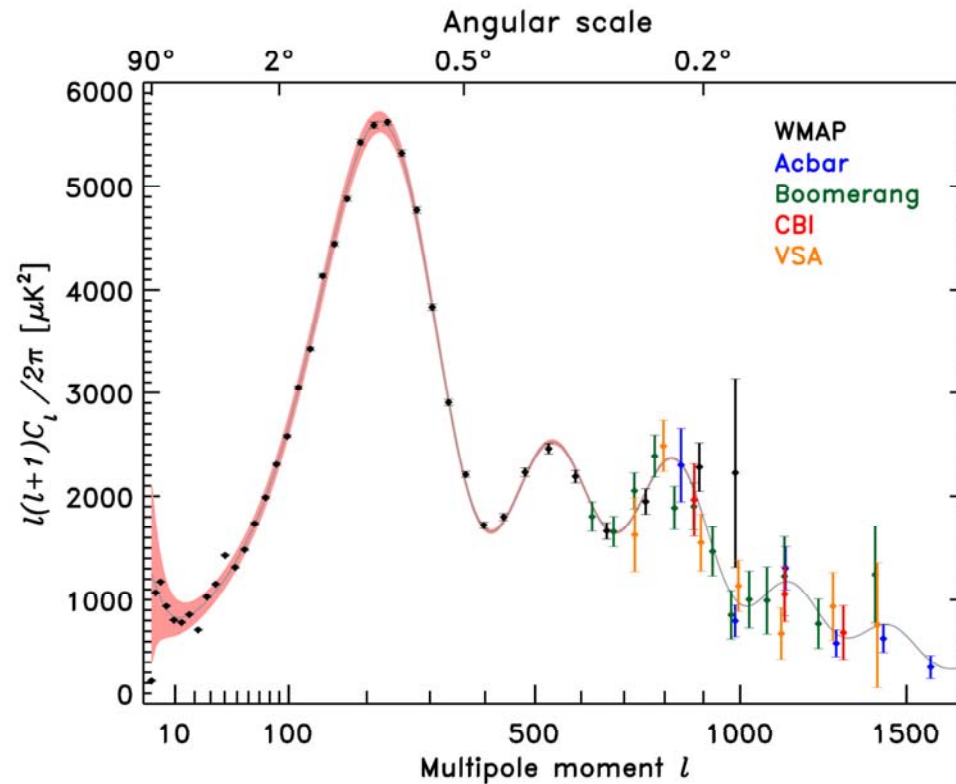
Микроволновая карта неба

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



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

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}	<u>1.02 ± 0.02</u>
matter density	Ω_{m}	<u>0.27 ± 0.04</u>
baryon density	Ω_{b}	<u>0.044 ± 0.004</u>
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}
reionisation optical depth	τ	0.17 ± 0.04

~ 10

~ 0.1

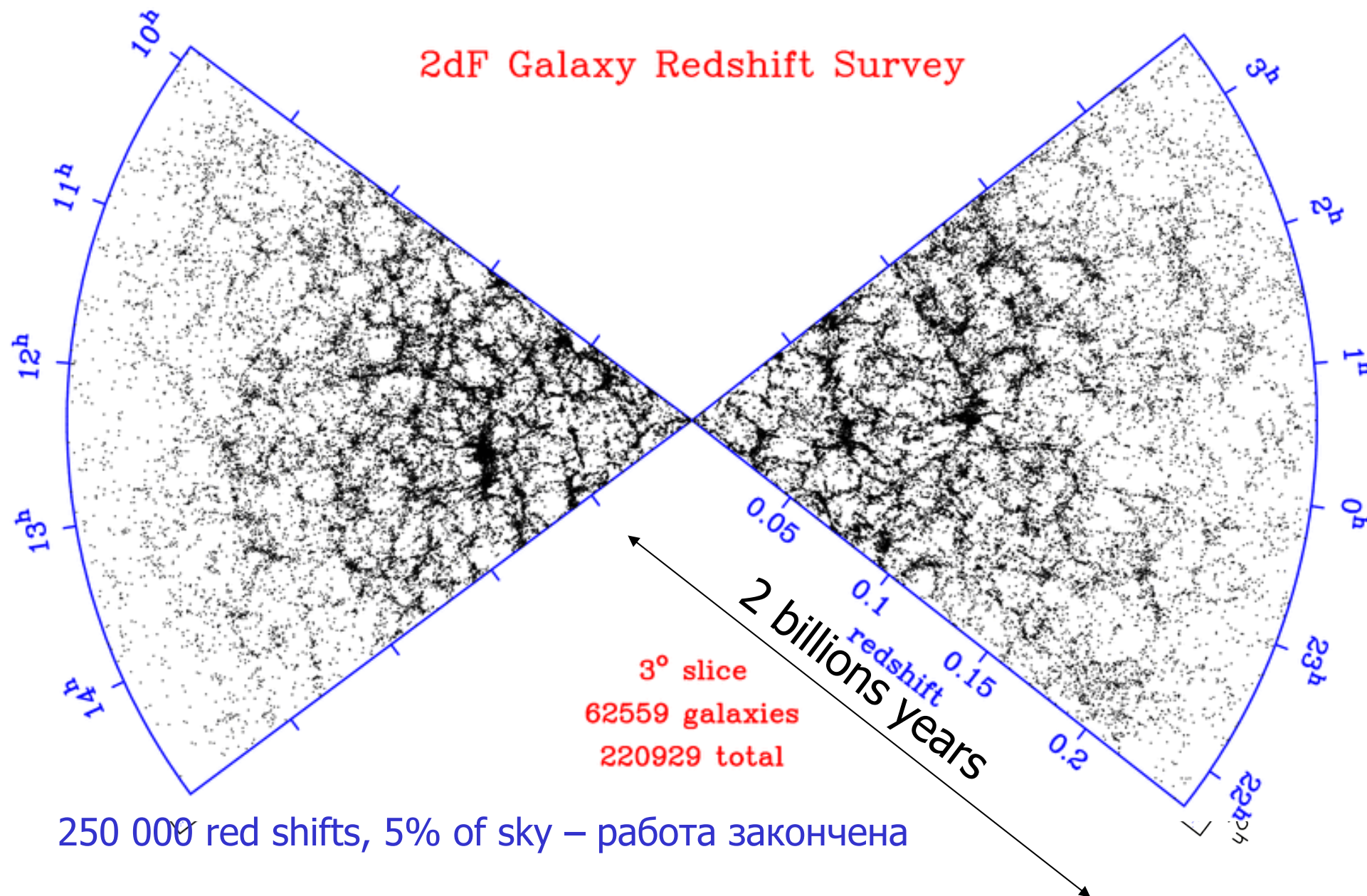
Крупно-масштабные структуры во Вселенной

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

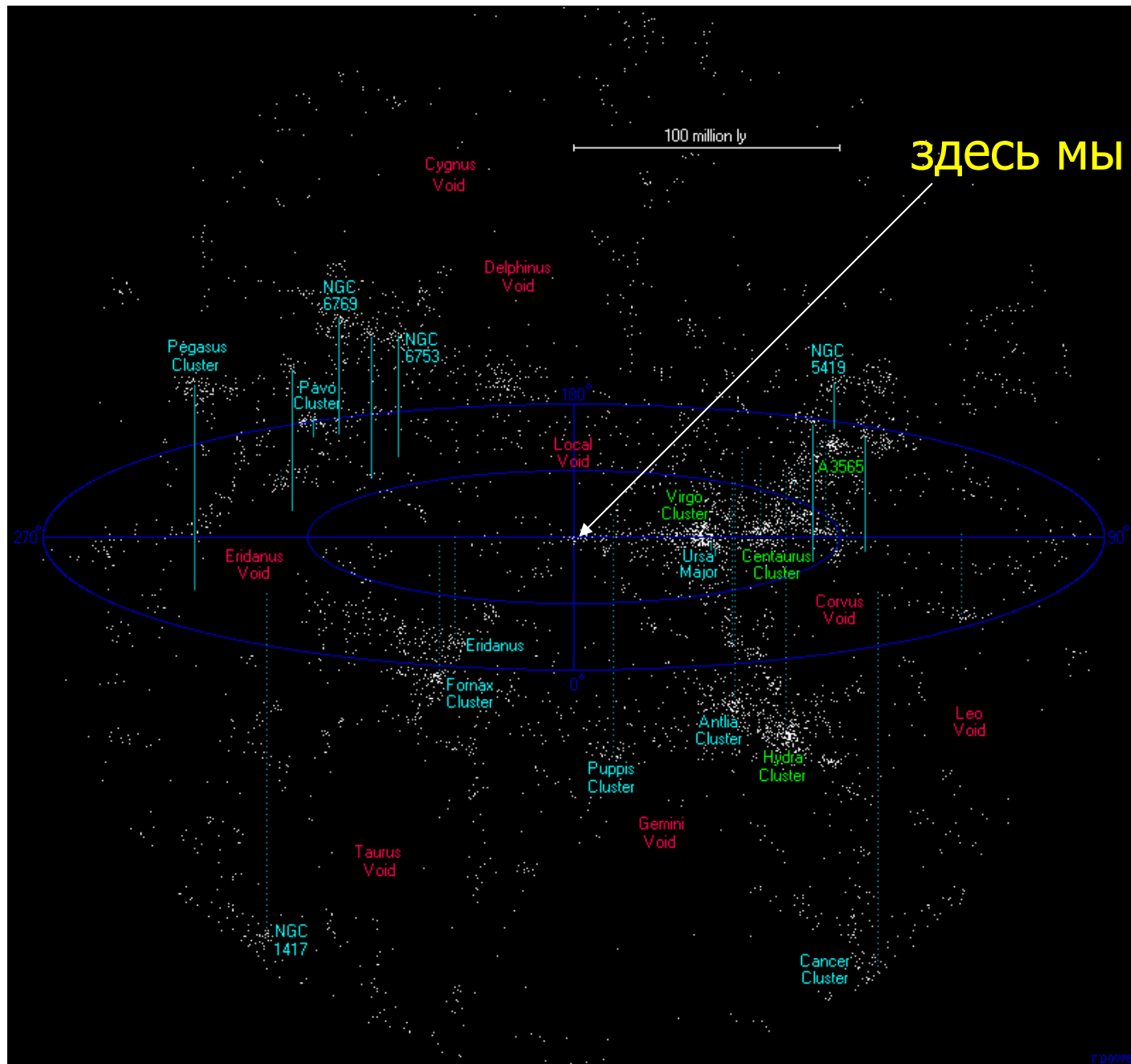
Структуры образовались за счет неустойчивости Джинса. Изучение структур при разных z показывает, что **сначала образовывались малые структуры, затем большие**. Для пылевидной Вселенной неоднородности $\delta \propto a(t) \propto (1+z)^{-1}$, если 10^{-5} при $z=1000$, 10^{-2} сейчас - **не проходит!**

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

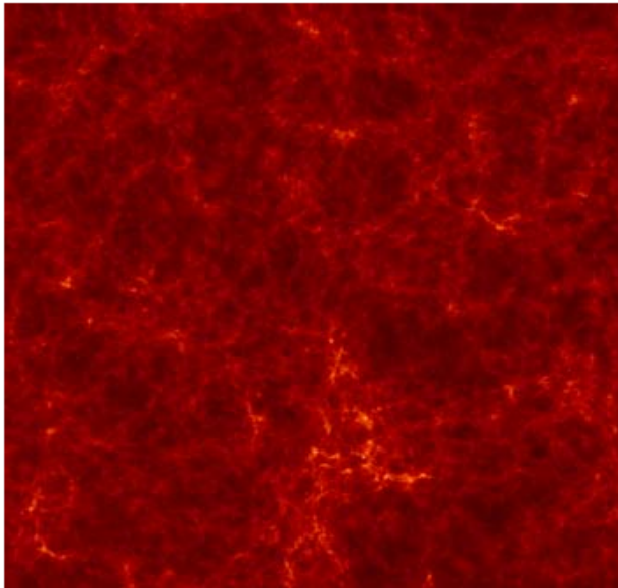


Локальный суперкластер Virgo

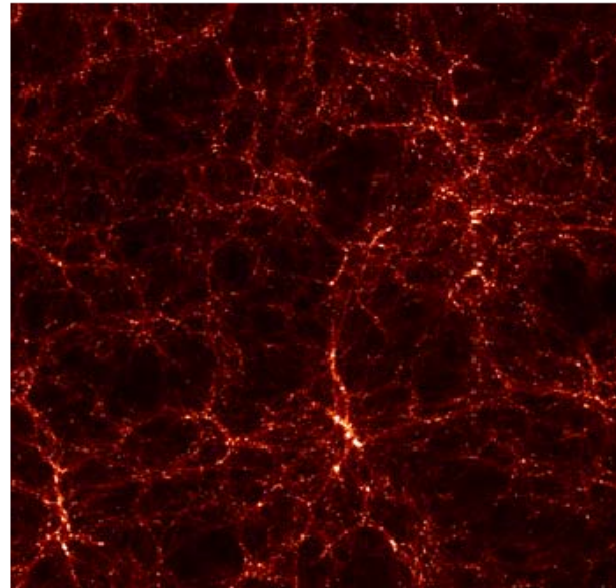


Моделирование формирования структур

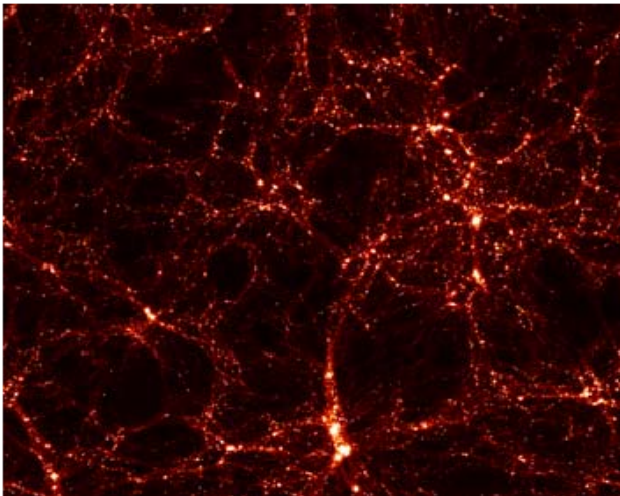
$Z=11$



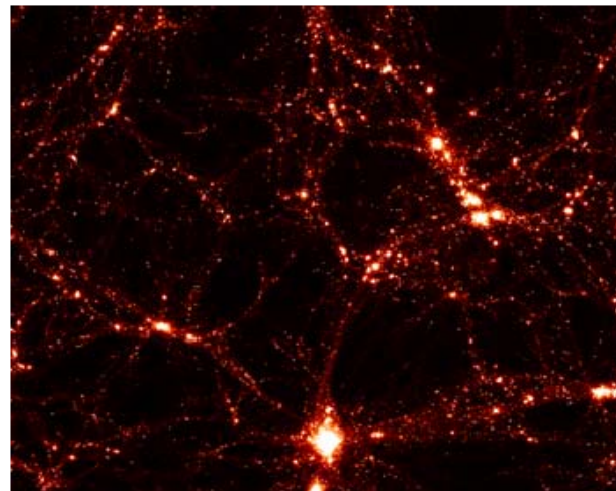
$z=2$



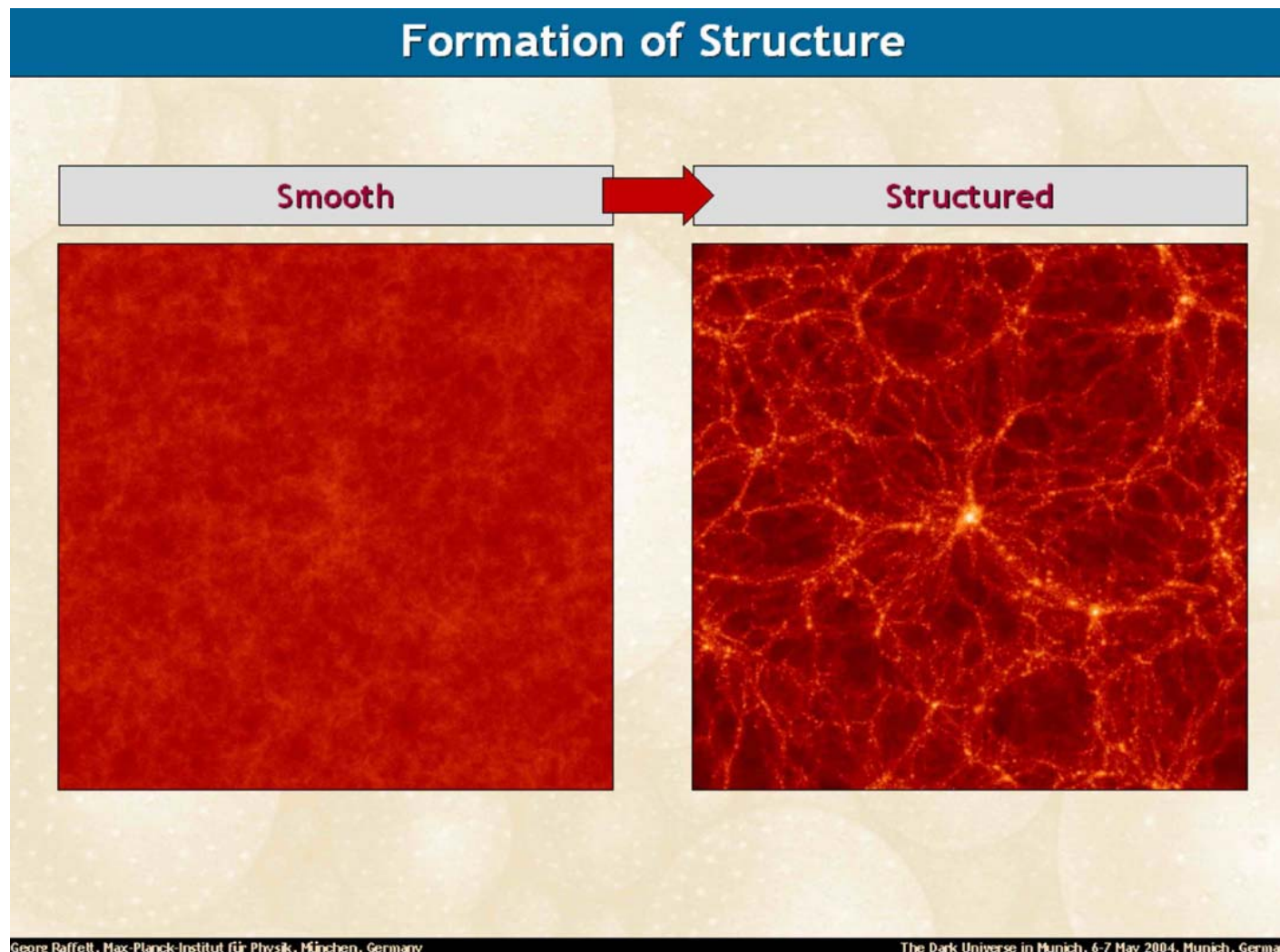
$Z=1$



$Z=0$
сейчас



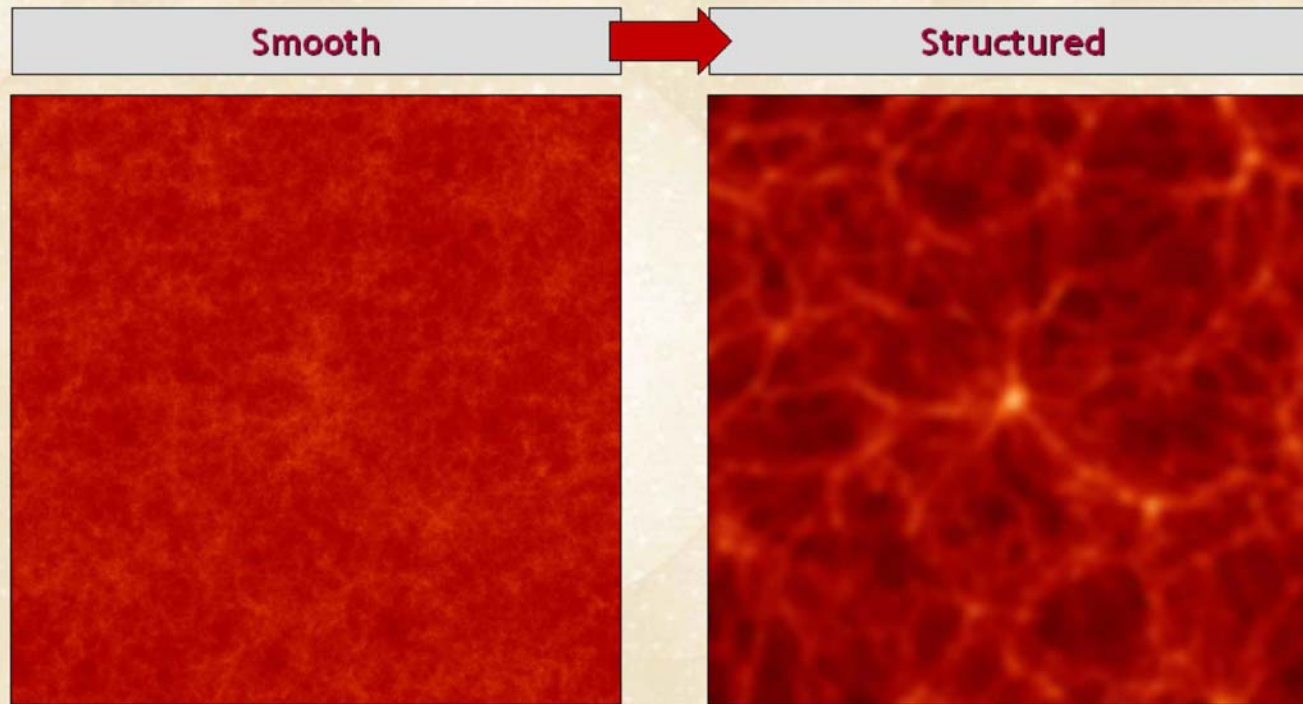
Формирование структур при наличии обычной и темной холодной материи



Тоже, но с добавкой горячей темной материи,
структуры размазываются

Из сравнения моделирования с данными SDSS вклад всех
нейтрино в темную массу темной материи $< 12\%$, или $\Omega_\nu < 0.035$ и $\Sigma m_\nu < 0.7$ eV. (Все астрофиз. данные $\Sigma m_\nu < 0.17$ eV)

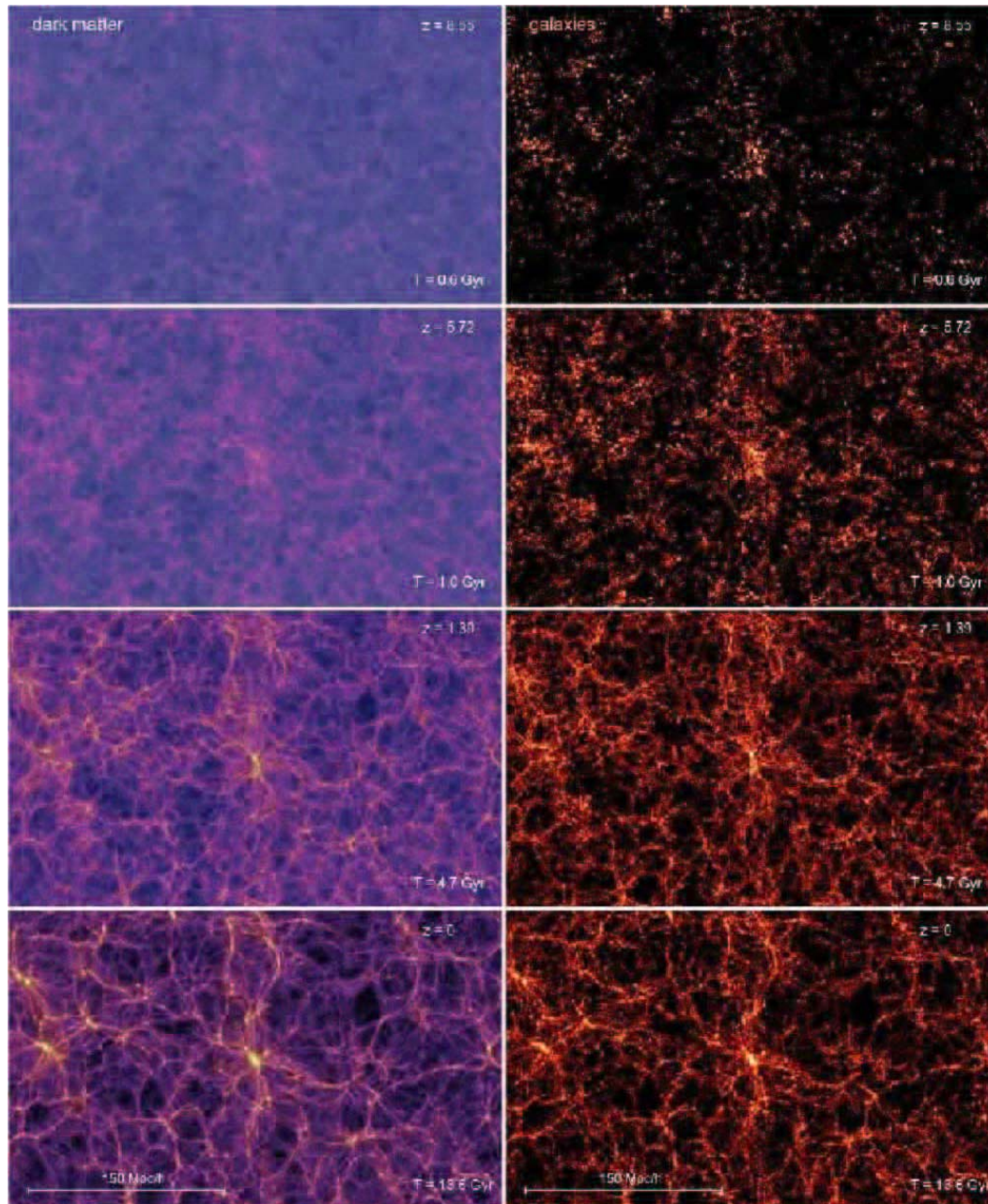
Formation of Structure



A fraction of hot dark matter
suppresses small-scale structure

темная материя

барионная материя



Моделирование
вселенной
(1 мес. на самом быстром
в мире компьютере)

Figure 4: Time evolution of the cosmic large-scale structure in dark matter and galaxies, obtained from cosmological simulations of the Λ CDM model. The panels on the left show the projected dark matter distribution in slices of thickness $15 h^{-1} \text{Mpc}$, extracted at redshifts $z = 8.55$, $z = 5.72$, $z = 1.39$ and $z = 0$ from the Millennium N-body simulation of structure formation⁵. These epochs correspond to times of 600 million, 1 billion, 4.7 billion and 13.6 billion years after the Big Bang, respectively. The colour hue from blue to red encodes the local velocity dispersion in the dark matter, and the brightness of each pixel is a logarithmic measure of the projected density. The panels on the right show the predicted distribution of galaxies in the same region at the corresponding times obtained by applying semi-analytic techniques to simulate galaxy formation in the Millennium simulation⁵. Each galaxy is weighted by its stellar mass, and the colour scale of the images is proportional to the logarithm of the projected total stellar mass. The dark matter evolves from a smooth, nearly uniform distribution into a highly clustered state, quite unlike the galaxies, which are strongly clustered from the start.

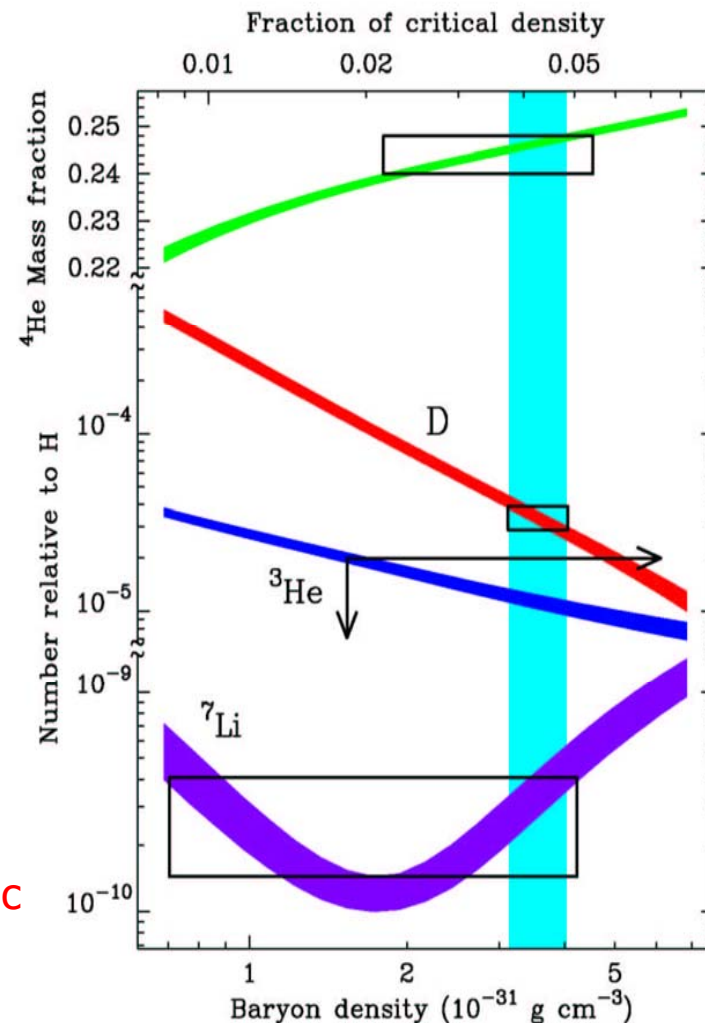
Определение плотности барионной материи по космологическому нуклеосинтезу

При высокой температуре вселенной плотности нейтронов и протонов были одного порядка. При $T < 1$ ГэВ нейтроны перестали образовываться и их количество стало быстро уменьшаться. Выжили только те, которые вошли в состав легких ядер ($D, He, Li \dots$). 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.

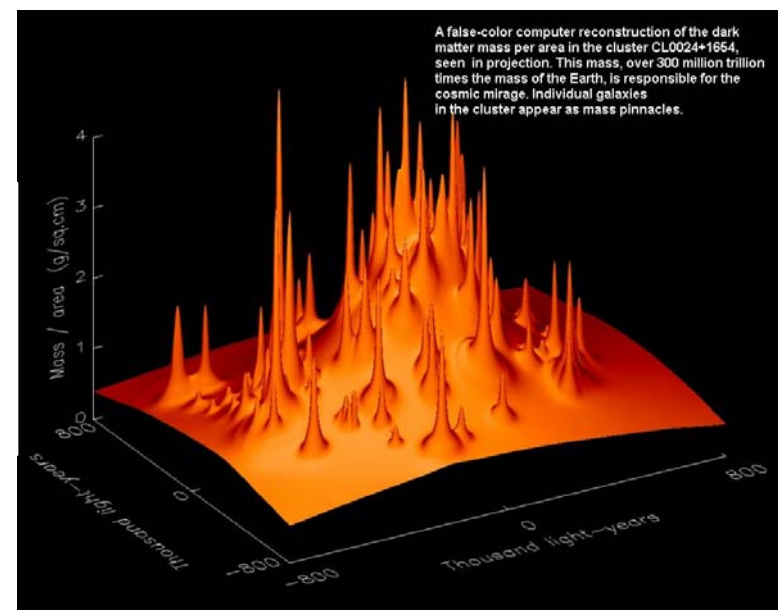
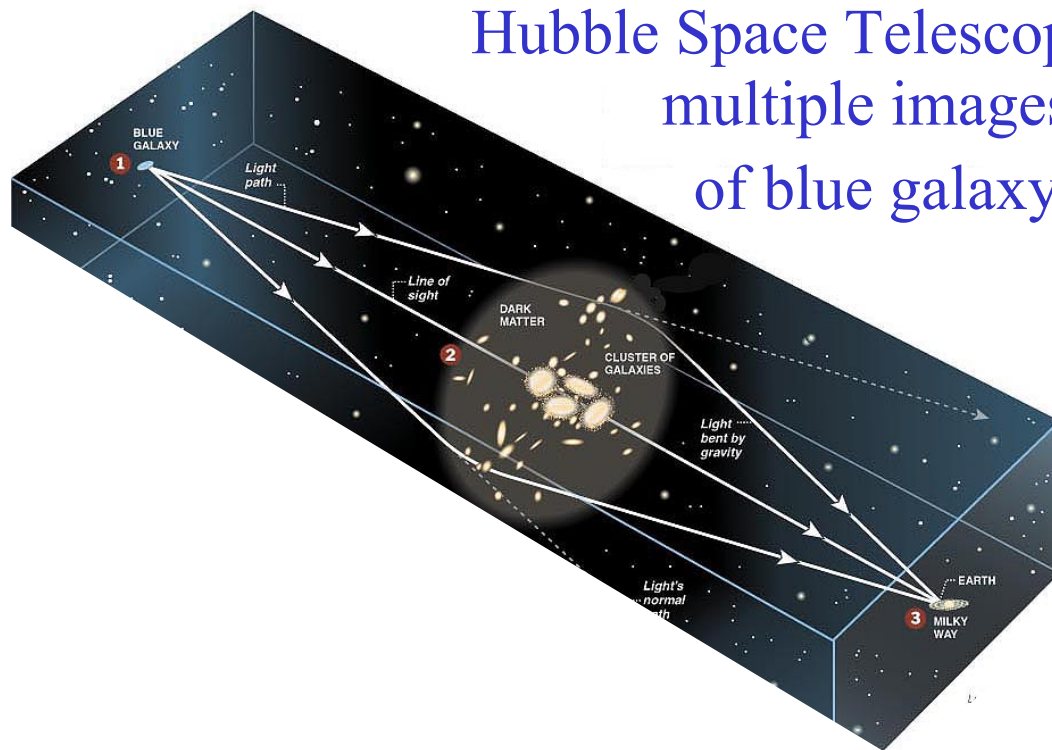
Барионная масса следует из наблюдаемого рентгеновского излучения горячего газа.

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

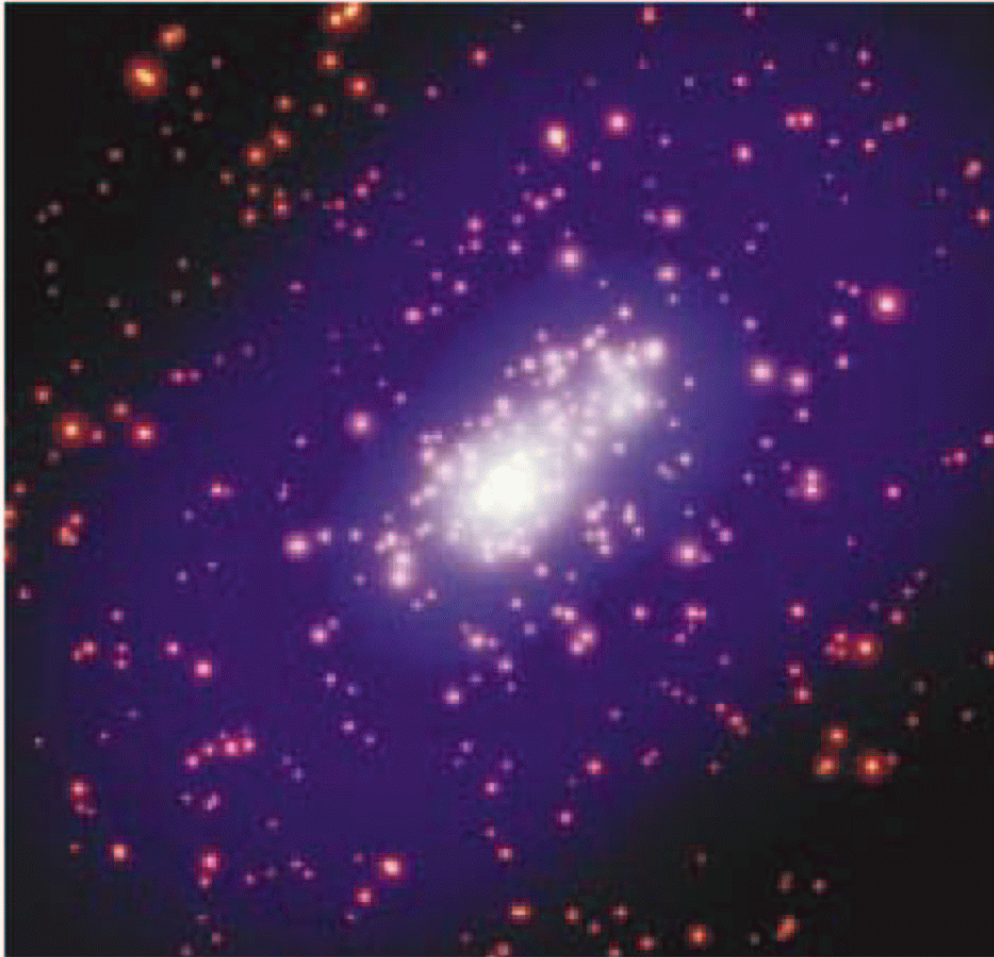
Hubble Space Telescope
multiple images
of blue galaxy



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 $\Omega=1\pm0.01$, 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.

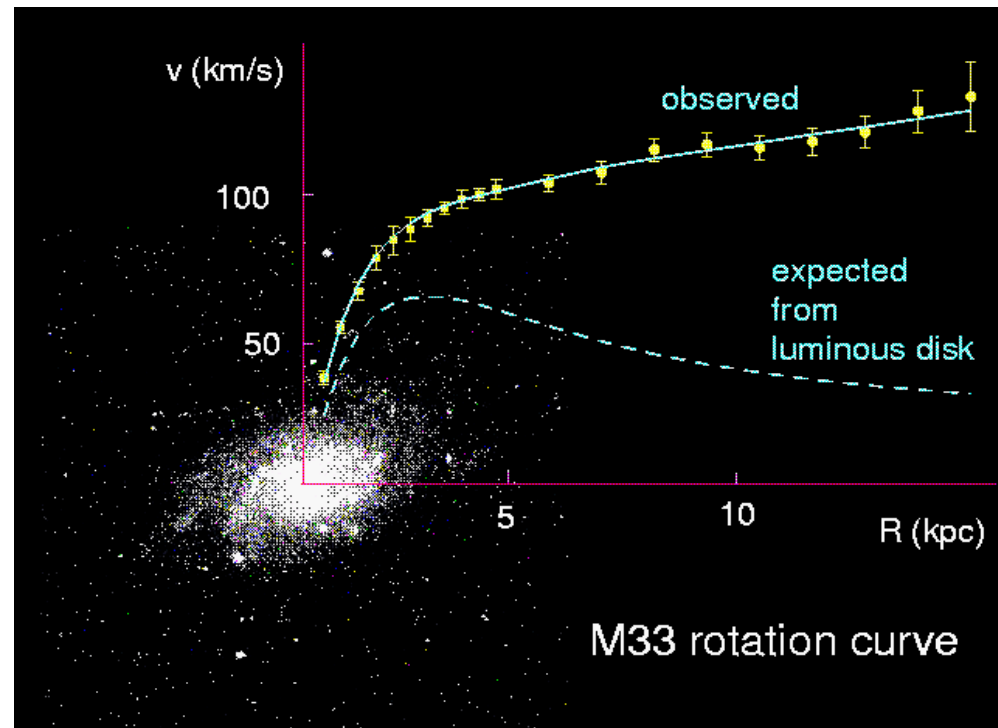
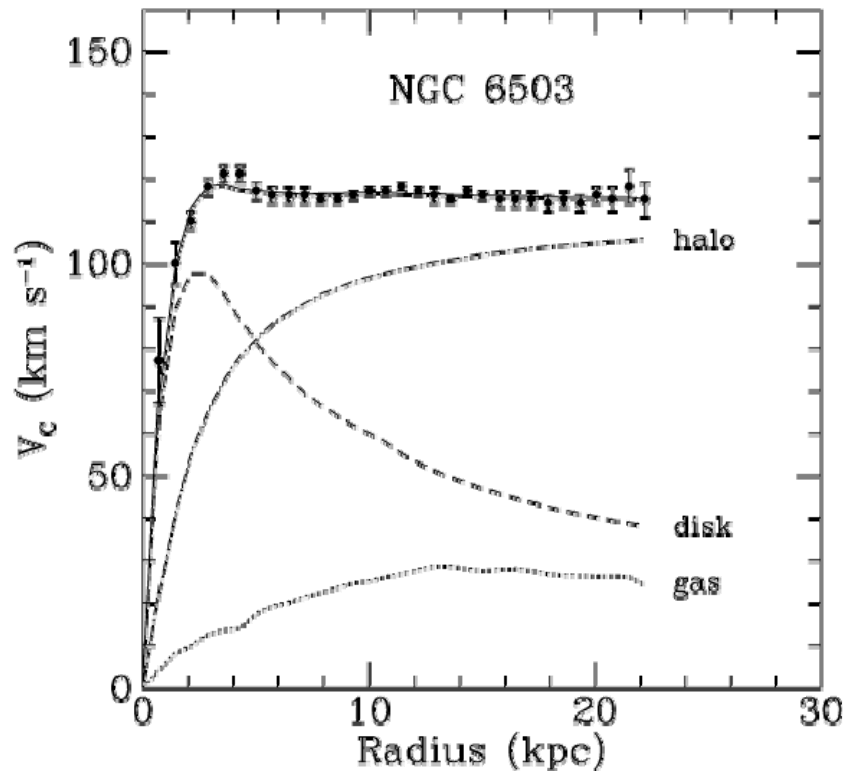
Темная материя — это, скорее всего, неизвестный сорт элементарных частиц, которые пытаются зарегистрировать, их (и их нестабильных партнеров) можно рождасть на ускорителях, тогда можно будет понять их природу.

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!**

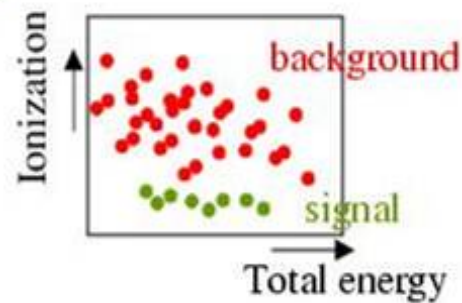
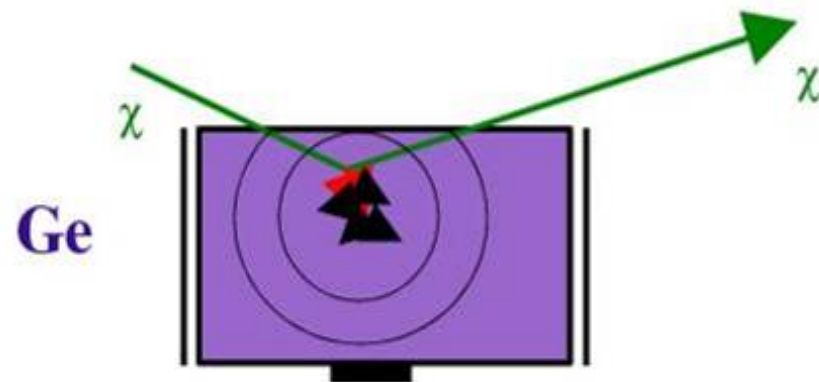
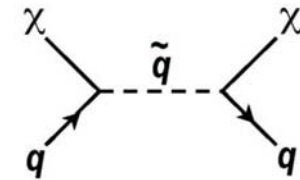
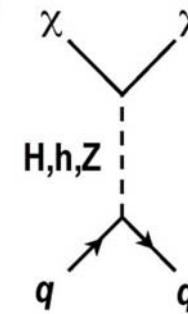
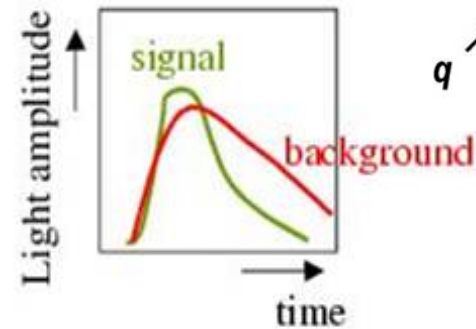
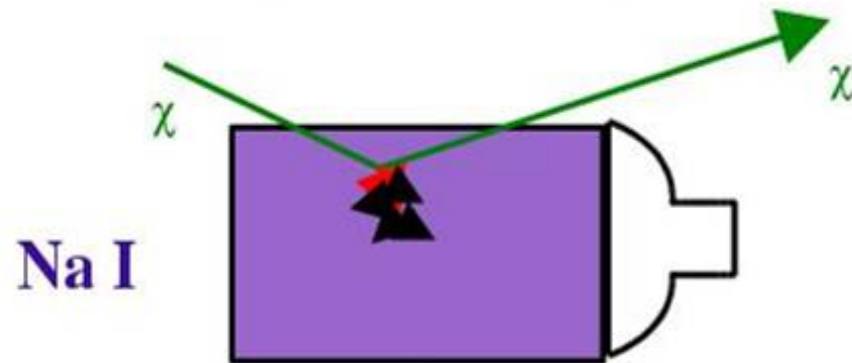


Кандидаты на темную материю

- **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.

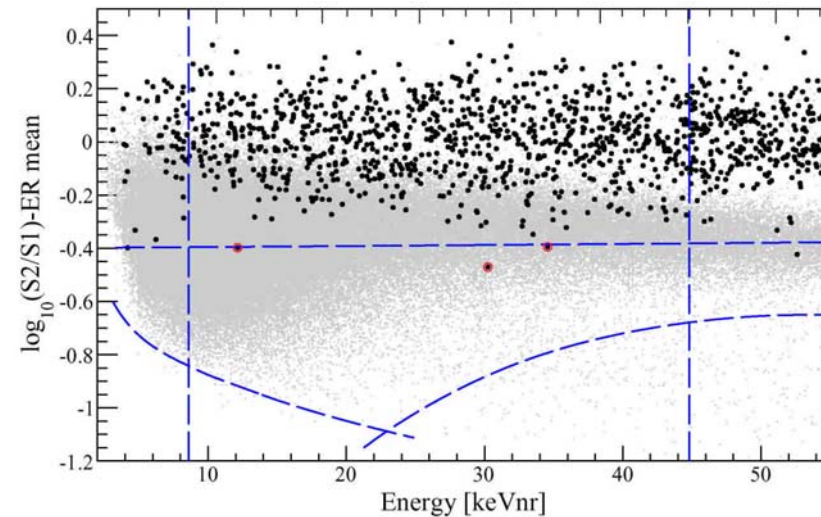
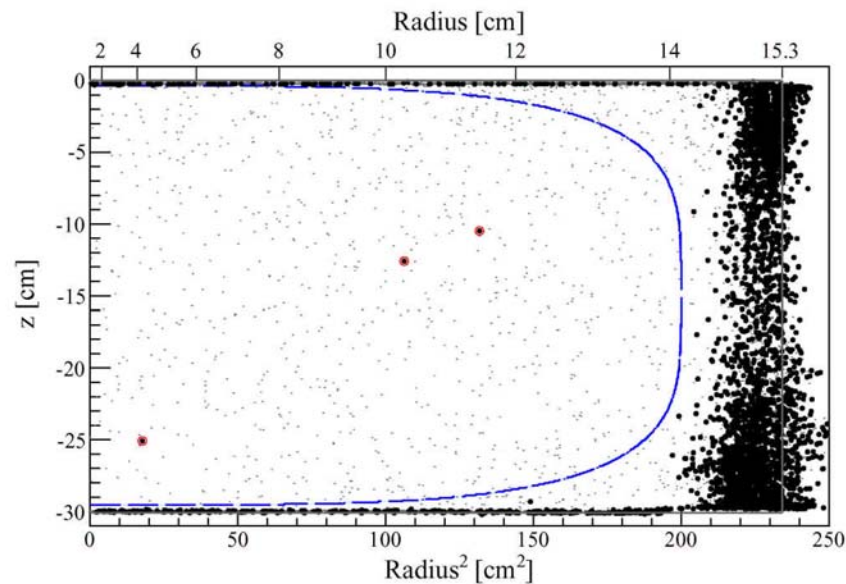
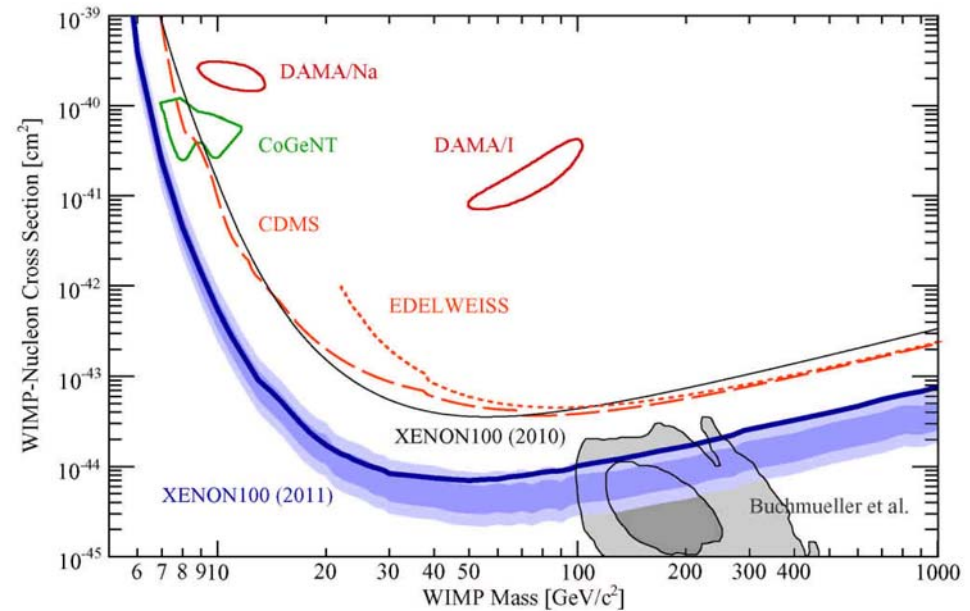
Examples of Direct WIMP Detectors

Rejection of background is the critical issue



Результаты по поиску темной материи с детектором из жидкого ксенона (лучший на 5.2011, arXiv 1104.2549)

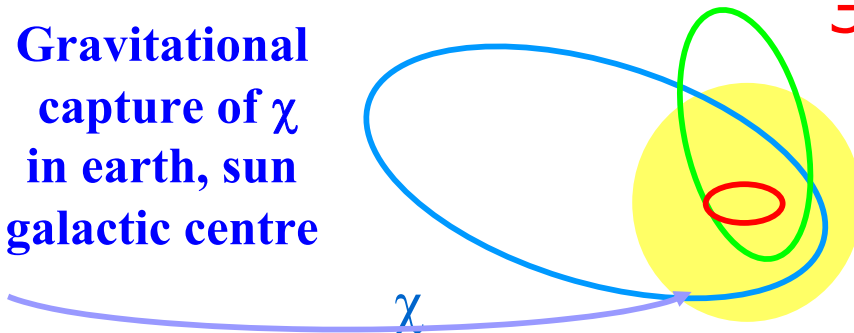
Xenon-двухфазный детектор
измеряет ионизационный
сигнал и сцинтилляции



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, ...

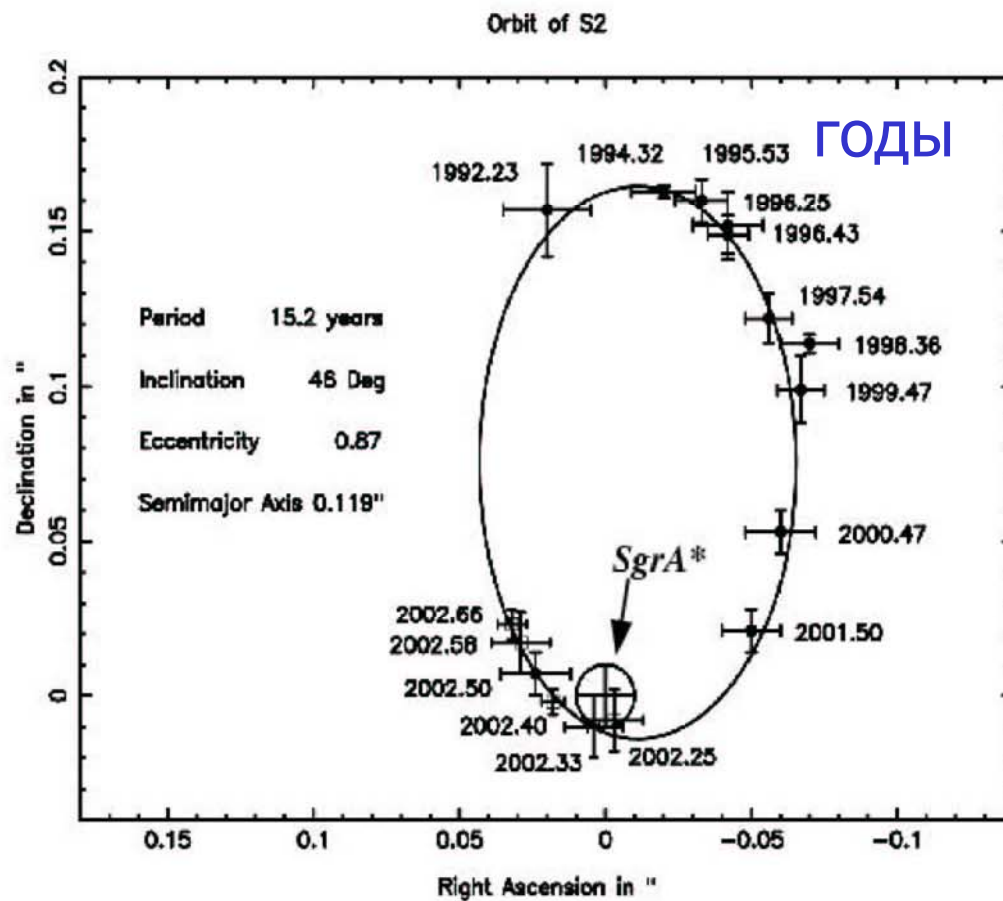
Gravitational capture of χ in earth, sun galactic centre



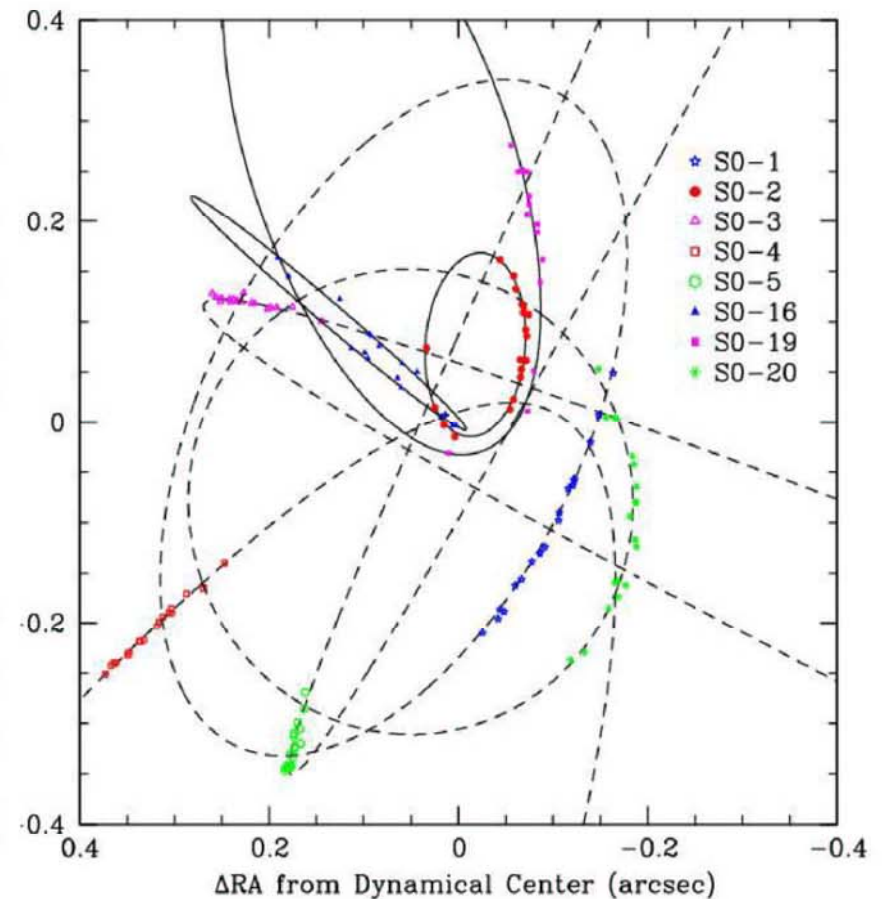
Эксперименты уже идут

WIMP loses energy by elastic interaction
 $\Rightarrow$ if $v < v_{\text{escape}}$, capture
capture + annihilation balance $\Rightarrow$ constant density in core

Темную материю ищут по аннигиляции вблизи центра Галактики (в центре черная дыра с массой $4.3 \cdot 10^6$ масс Солнца)



Schodel et al. (2002)



Ghez et al. (2003)

Темную материю ищут по аннигиляции вблизи центра Галактики

Жесткие (>1 ТэВ) гамма кванты из центра Галактики
Результат может быть связан аннигиляцией частиц темной материи
с массой >12 Тэв (больше ожидаемой)

Эксперимент HESS

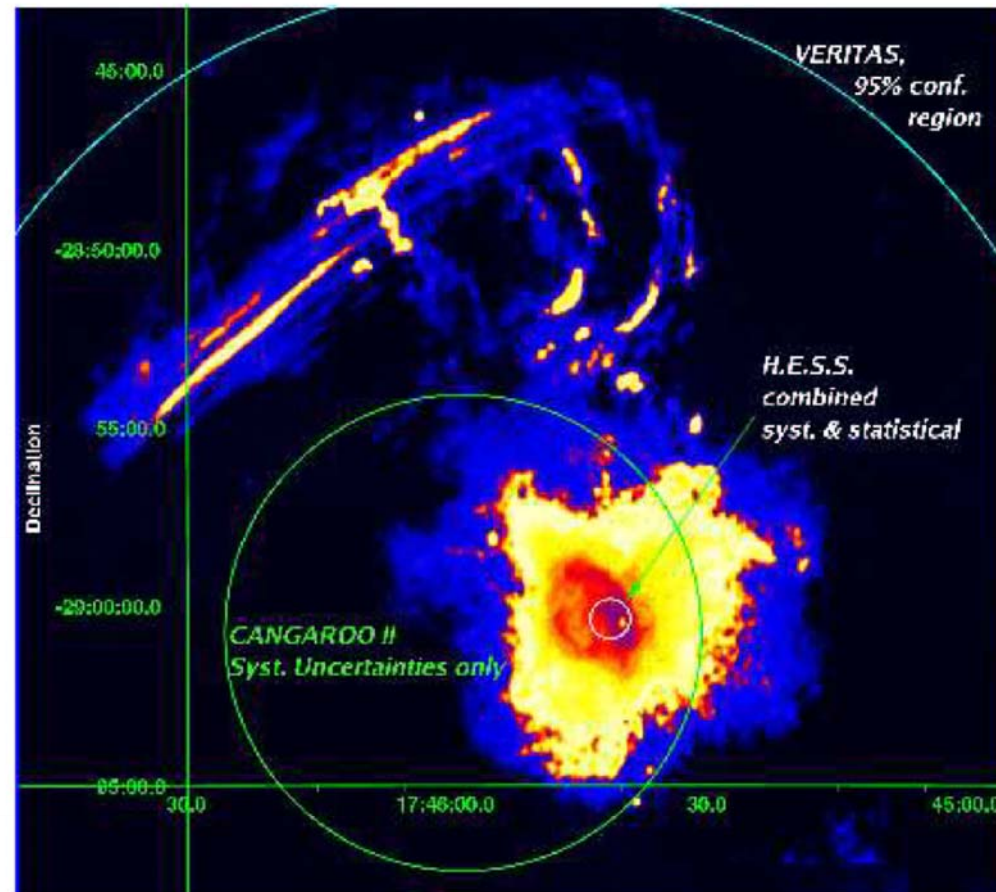
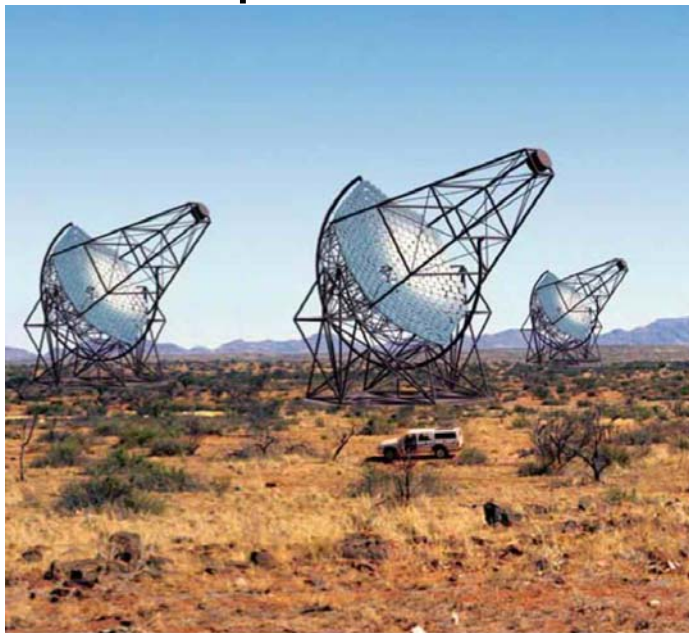
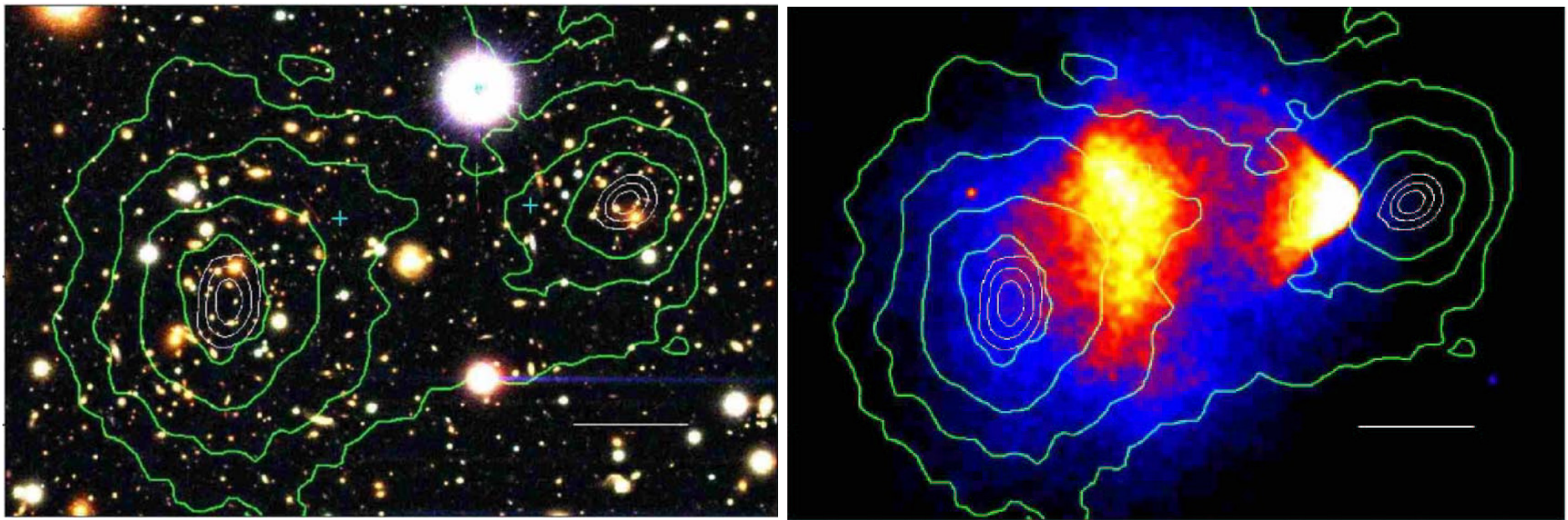


Fig. 1. Position of the TeV emitting region overlaid on a 21 cm radio map [16] tracing mostly non-thermal (synchrotron) emission features. The bright spot inside the H.E.S.S. confidence region (marked as a white circle) is Sgr A* whereas the extended ring like feature to the east of it is Sgr A*East. Note the difference in the accuracy of the different instruments.

Прямое свидетельство существования темной материи [astro-ph/0608407](#)

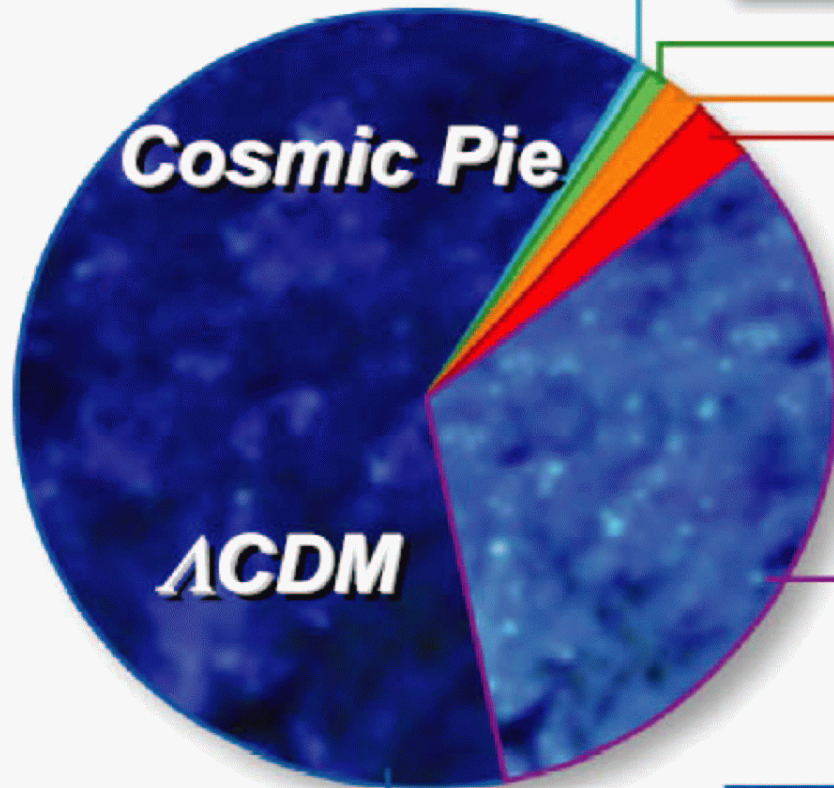


Последствия столкновения двух галактических кластеров. Светится обычная материя. Зеленые контуры – распределение гравитирующей материи, найденное по гравитационному линзированию.

Состав вселенной

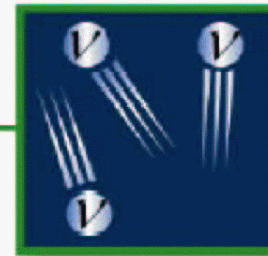
$$\Omega_i \equiv \rho_i / \rho_{\text{CRITICAL}}$$

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



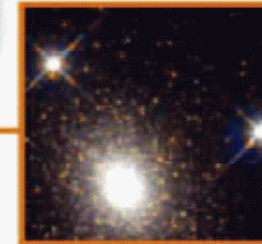
Тяжелые элементы

$$\Omega=0.0003$$



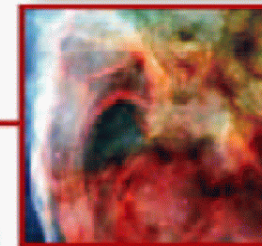
Нейтрино (ν):

$$\Omega=0.0047-0.03$$



Звезды

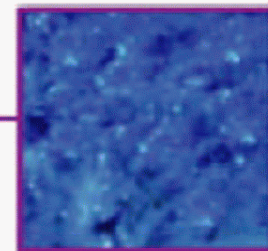
$$\Omega=0.005$$



Свобод. H

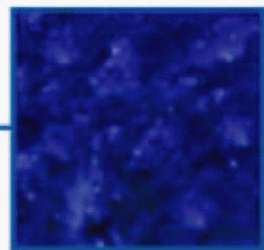
& He:

$$\Omega=0.04$$



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

