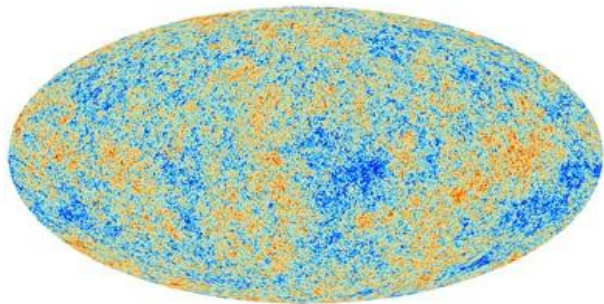


# ВВЕДЕНИЕ В КОСМОЛОГИЮ

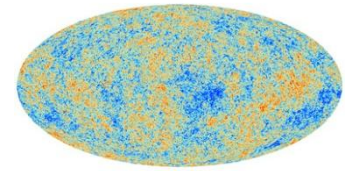


Алексей Гладышев  
(ЛТФ ОИЯИ, Дубна)

ЦЕРН, 9 ноября 2017 г.



# Что такое космология?



- КОСМОЛОГИЯ – от греческого *κοσμος* – мир, Вселенная  
*λογος* – слово, теория

изучает Вселенную как единое целое, ее происхождение и эволюцию



**Cosmology**

The study of the structure, origin and evolution of the universe as a whole. Observationally, luminosity is distributed in a clumpy fashion, concentrated into individual galaxies, galaxy clusters, and superclusters. On the largest scales, the universe appears to be homogeneous (the same everywhere) and isotropic (the same in every direction). This implies that there is no preferred center or edge. No individual galaxy is located at a privileged position. During the 19th century, the study of the universe was limited to the study of the stars and planets. The discovery of galaxies of this kind in the 1920s was a major step forward. The discovery that the universe is expanding was a major step forward. The discovery that the universe is expanding was a major step forward.

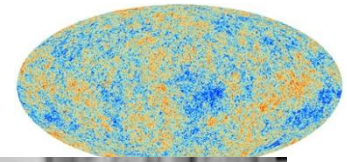
**Cosmology: A Brief History**

Cosmology is the branch of astronomy that deals with studies of the large-scale structure of the universe. Observationally it requires data on the most remote objects while theoretically it demands the largest possible extrapolations of the basic laws of physics. Despite these severe constraints, cosmology has of late emerged as a very important branch of science where predictions can be made and tested.

When did modern cosmology begin? Indeed, one

Meanwhile, observations had established that the Andromeda Galaxy was an extragalactic object. However, the distance to the Andromeda Galaxy was not known. It was not until the 1920s that the distance to the Andromeda Galaxy was determined to be about 2.5 million light-years away.

# Космология XX века



- **1910-1922**

Весто Слайфер открыл красное смещение в спектрах удаленных галактик



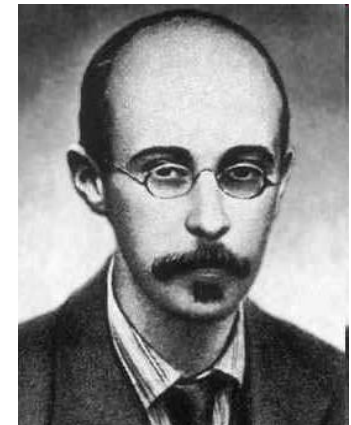
- **1916**

Альберт Эйнштейн открыл общую теорию относительности

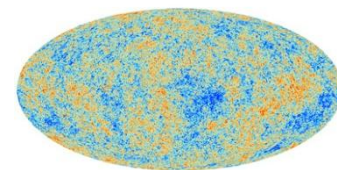


- **1922-1924**

Александр Фридман нашел решение уравнений Эйнштейна, описывающие расширяющуюся Вселенную



# Космология XX века



- **1929**

Эдвин Хаббл обнаружил, что некоторые туманности (удаленные галактики) казалось удаляются от нас со скоростью, пропорциональной расстоянию до них

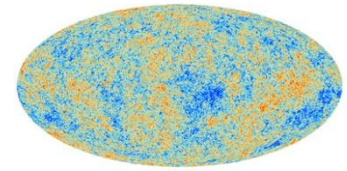


- **1933**

Фритц Цвики обнаружил «скрытую массу» с соплениях галактик. Теперь мы называем это «темной материей»



# Космология XX века



- 1965

Арно Пензиас и Роберт Вильсон открыли космическое микроволновое излучение.

Нобелевская премия 1978 – «за открытие микроволнового реликтового излучения»



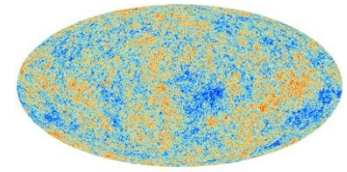
- 1979-1980

Алан Гус, Алексей Старобинский, Андрей Линде, Давид Киржниц предложили теорию инфляции





# Космология XX века



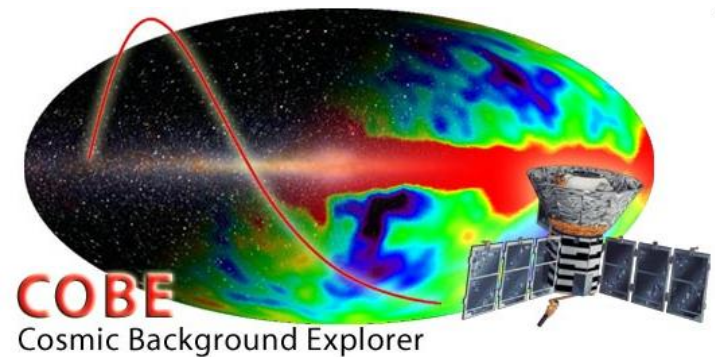
- 1986

Маргарет Геллер и Джон Хучра  
открыли крупномасштабную  
структуру Вселенной на расстояниях  
25-100 Мпс

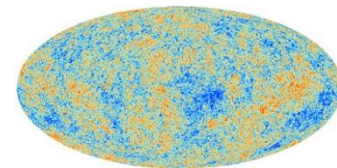


- 1992-1993

COBE (COsmic Background Explorer)  
зарегистрировал анизотропию  
микроволнового излучения: колебани  
температуры  $10^{-5}$  на масштабах  $10^\circ$



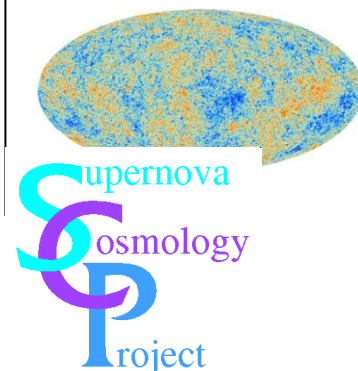
# Космология XX века



- 2006 – «за открытие чернотельной формы спектра и анизотропии космического микроволнового фонового излучения» Джону Мазеру и Джорджу Смуту присуждена Нобелевская премия по физике

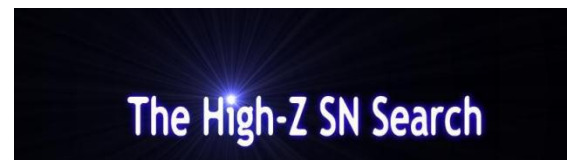


# Космология XXI века



- 1998

Коллаборации “Supernova Cosmology Project” и “The High-Z Supernova Search” открыли ускоренное расширение Вселенной на больших расстояниях



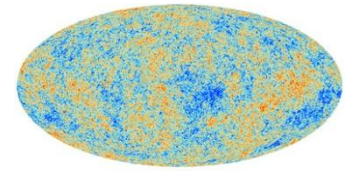
- 1998-2003

В экспериментах BOOMERANG (Balloon Observations Of Millimetric Extragalactic Radiation ANd Geophysics) и MAXIMA (Millimeter Anisotropy eXperiment IMaging Array) подтверждено, что геометрия Вселенной близка к плоской



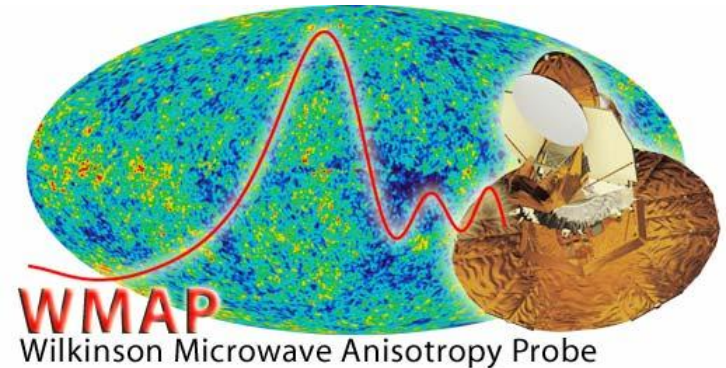


# Космология XXI века



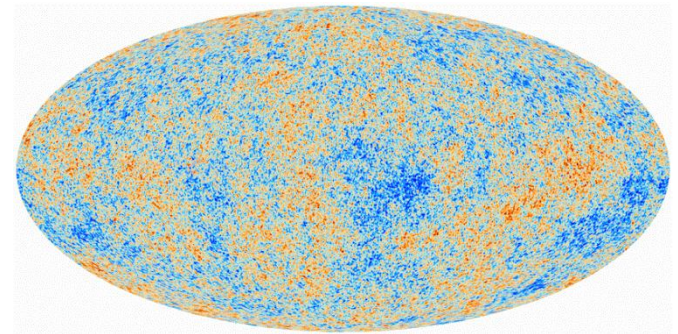
- 2001-2010

В эксперименте НАСА WMAP (Wilkinson Microwave Anisotropy Probe) измерены фундаментальные космологические параметры. На этой основе возникла Стандартная космологическая модель

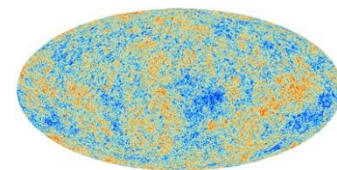


- 2009-2015

Planck – спутник Европейского космического агентства с большей точностью измерил анизотропию реликтового излучения.



# Система единиц в космологии



$$\hbar = c = k_B = 1$$

Plank  
constant

Speed  
of light

Boltzman  
constant

- В этой системе  $[ \text{ENERGY} ] = [ \text{MASS} ] = [ \text{TEMPERATURE} ] = [ \text{LENGTH} ]^{-1} = [ \text{TIME} ]^{-1}$

$$1 \text{ GeV} = 1.16 \times 10^{13} \text{ K}$$

$$1 \text{ K} = 0.8 \times 10^{-13} \text{ GeV}$$

$$1 \text{ GeV} = 1.8 \times 10^{-24} \text{ g}$$

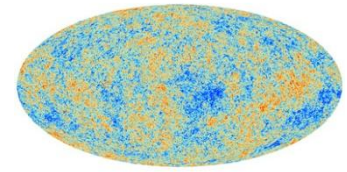
$$1 \text{ GeV}^{-1} = 2 \times 10^{-14} \text{ cm}$$

$$1 \text{ cm} = 5 \times 10^{13} \text{ GeV}^{-1}$$

$$1 \text{ GeV}^{-1} = 6.6 \times 10^{-25} \text{ s}$$

$$1 \text{ s} = 1.5 \times 10^{24} \text{ GeV}^{-1}$$

# Масштабы Вселенной



- Звезды

типичные массы  $M_* \sim 1 - 10 M_{\odot}$   $M_{\odot} = 2 \times 10^{30} \text{ kg}$

- Галактики – кирпичики Вселенной

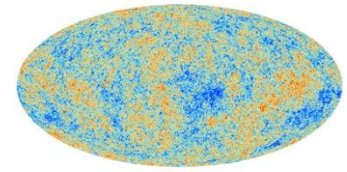
Массы  $M \sim 10^6 - 10^{12} M_{\odot}$

Размеры  $L \sim 0.1 \text{ Mpc}$

Расстояния  $D \sim 1 \text{ Mpc}$

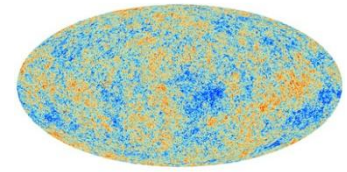


# Масштабы Вселенной



- Скопления галактик (2 – 1000 ). Скопления галактик – самые большие объекты во Вселенной, связанные гравитацией.  
Размеры  $L \sim 10 \text{ Mpc}$
- Сверхскопления галактик – области пространства с плотностью, превышающей среднюю плотность Вселенной
- На масштабах более  $100 \text{ Mpc}$  распределение материи равномерно
- Наблюдаемая Вселенная – расстояние , которое свет прошел с момента Большого взрыва,  $L \sim 10^4 \text{ Mpc}$  – наибольшее наблюдаемое расстояние

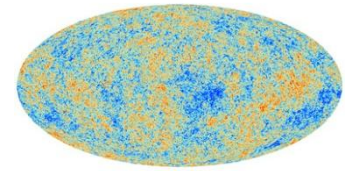
# Что мы знаем о Вселенной?



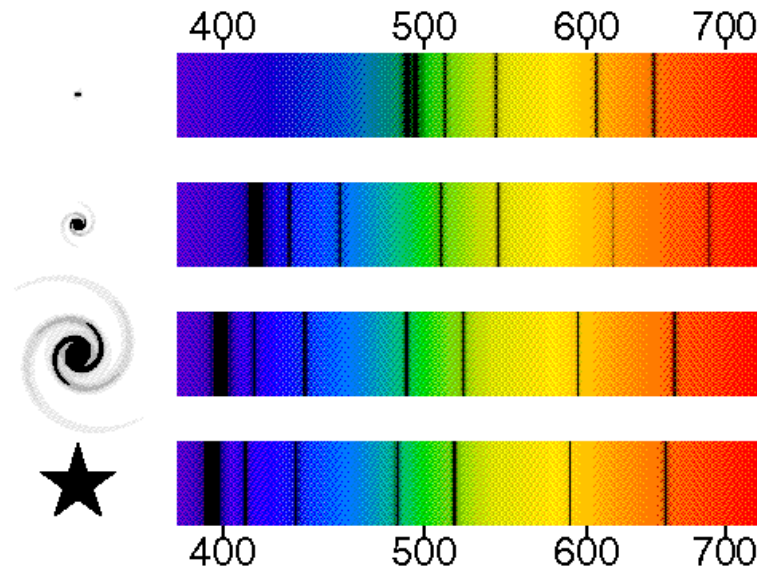
- Расширение Вселенной
- Реликтовое излучение
- Изотропность и однородность на больших расстояниях
- Распространенность легких элементов во Вселенной



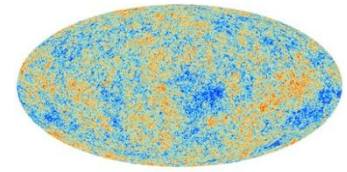
# Красное смещение



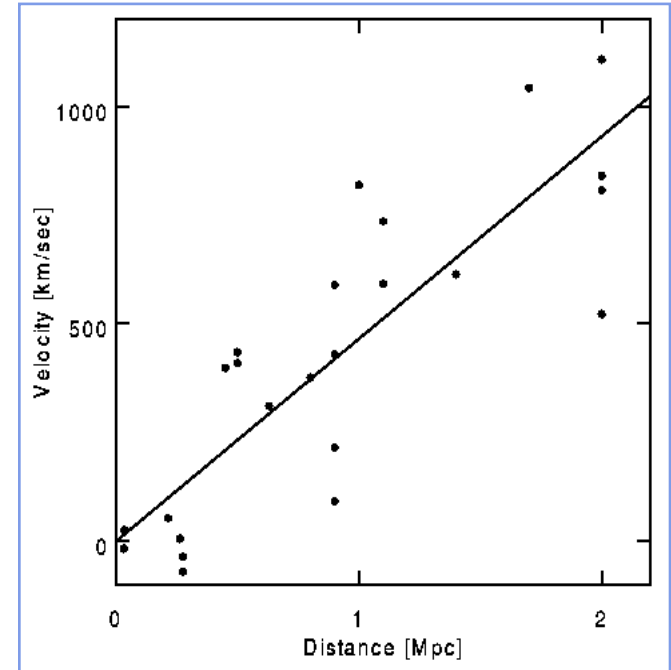
- Определение красного смещения 
$$z = \frac{\lambda_{observed} - \lambda_{emitted}}{\lambda_{emitted}} = \frac{\lambda_{observed}}{\lambda_{emitted}} - 1$$
- С помощью красного смещения можно измерять расстояния



# Расширение Вселенной

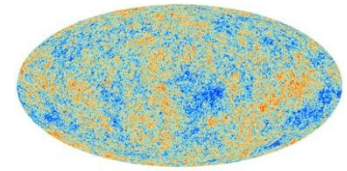


- В 1929 Эдвин Хаббл
  - Измерил красные смещения галактик
  - Использовал угловые размеры определения расстояний
  - Обнаружил линейную зависимость красным смещением и расстоянием до галактик



- Интерпретировал результаты как **расширение Вселенной**

# Расширение Вселенной



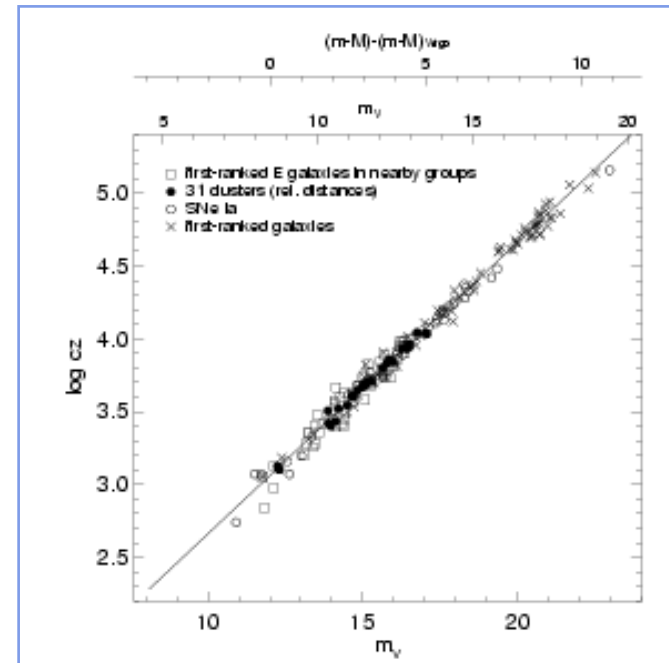
- Оценка Хаббла

$$v = HR \quad H \sim 500 \text{ km sec}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$$

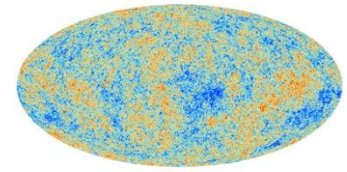
Сегодняшнее значение

$$H \sim 70 \text{ km sec}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$$

- Зависимость красного смещения от расстояния носит универсальный характер: не зависит ни от типа объектов, ни от частоты испускаемого света, ни от направления



# Реликтовое излучение

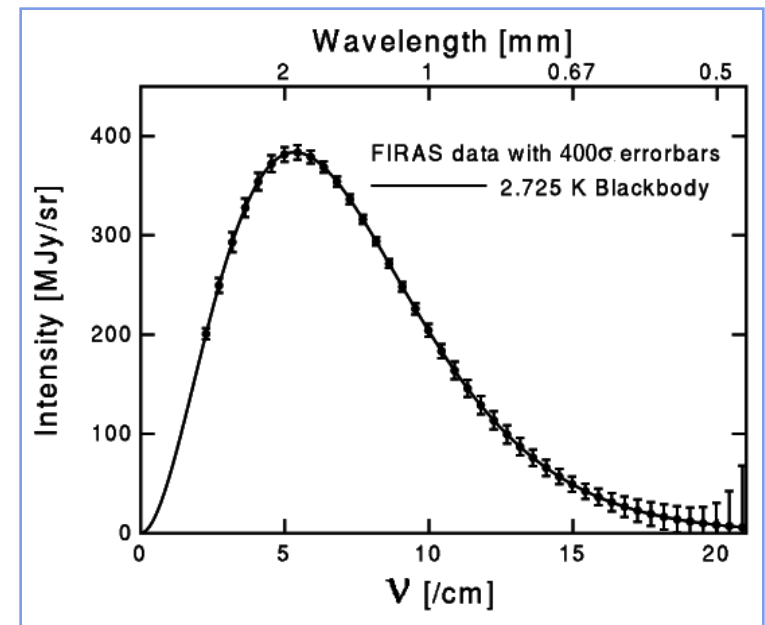


- В 1946 Пензиас и Вильсон обнаружили слабый изотропный фон на волне of 7.5 см, соответствующий излучению абсолютно черного тела с температурой  $T \sim 3.5 \pm 1 \text{ K}$

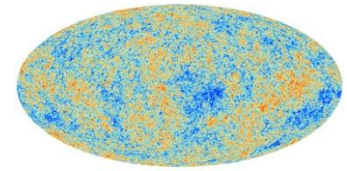
- Сегодняшнее значение

$$T \sim 2.725 \pm 0.002 \pm 7 \times 10^{-6} \text{ K}$$

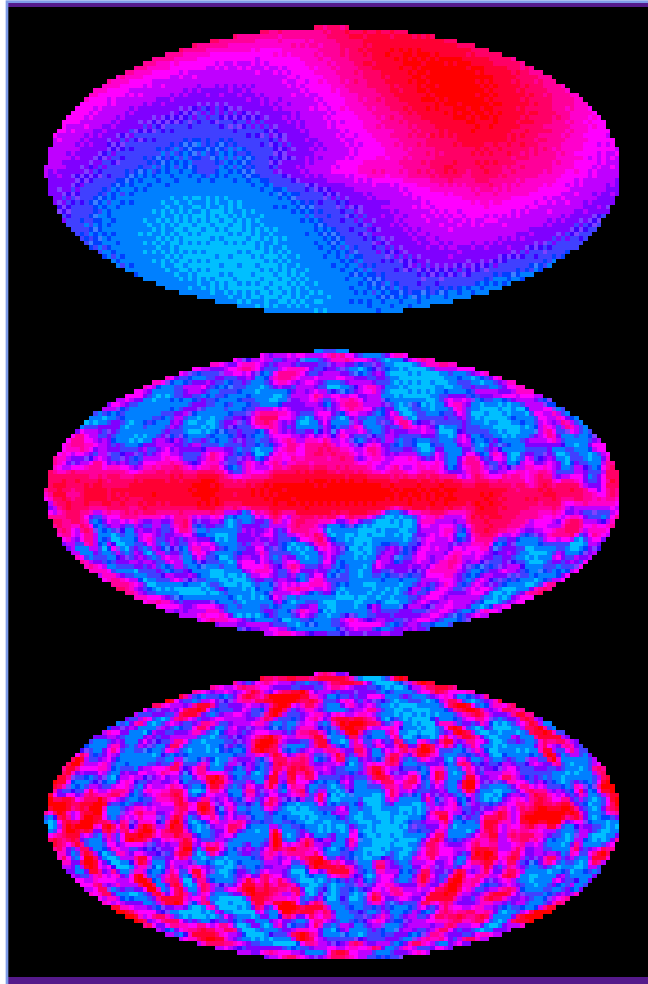
- Реликтовое излучение – равновесный спектр реликтовых фотонов с учетом красного смещения



# Реликтовое излучение



THE CMBR SEEN BY COBE  
(COsmic Background Explorer)



**Monopole radiation**

$$T_0 \sim 2.725 \pm 0.002 \text{ K}$$

**Dipole radiation**

$$\delta T_1 \sim 3.372 \pm 0.014 \text{ mK}$$

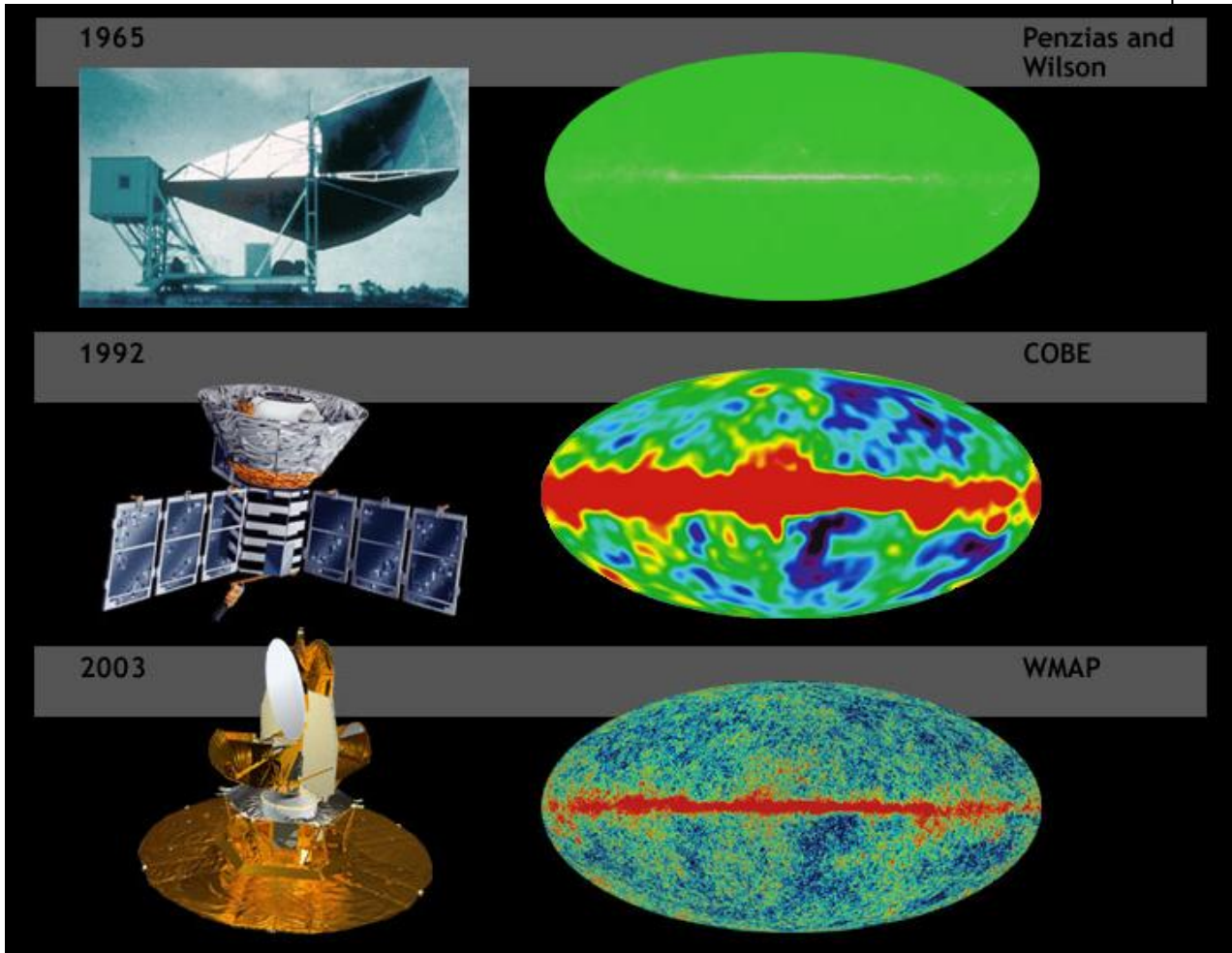
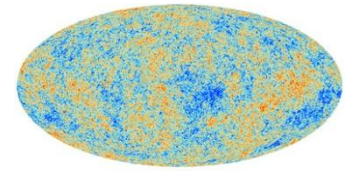
**Quadrupole radiation**

$$\delta T_2 \sim 18 \pm 2 \text{ } \mu\text{K}$$

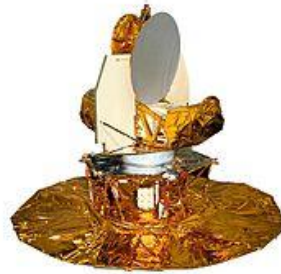
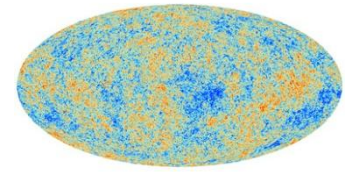
- Реликтовое излучение в большой степени изотропно  
 $\delta T/T \sim 10^{-5} \text{ K}$



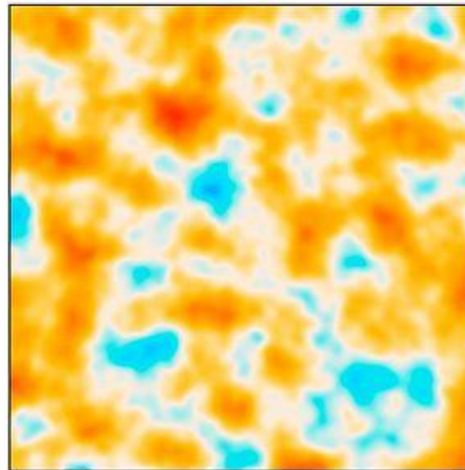
# Реликтовое излучение



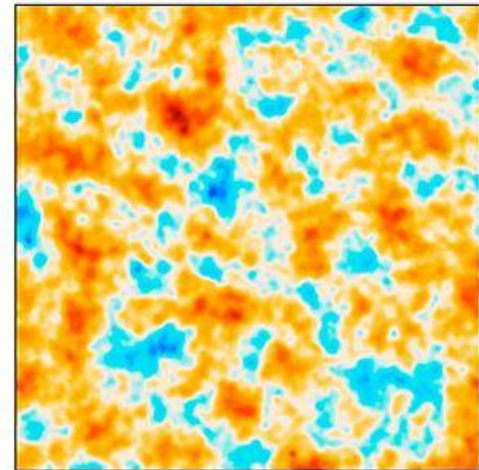
# Реликтовое излучение



COBE

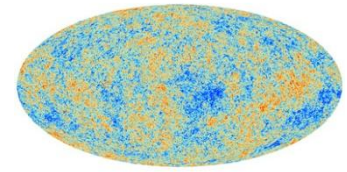


WMAP

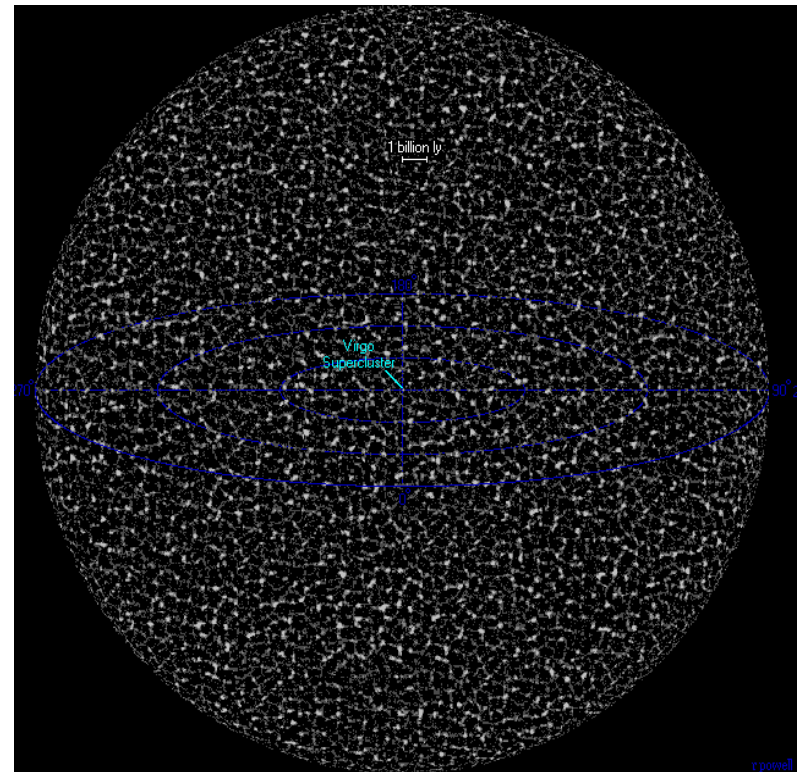


Planck

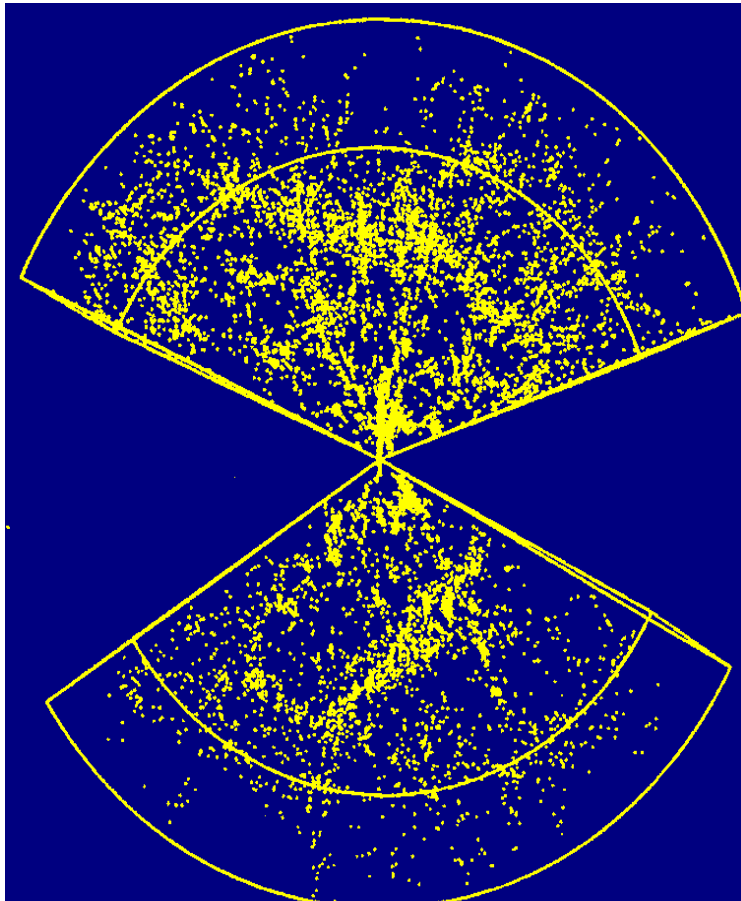
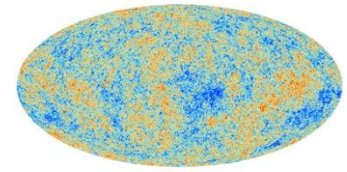
# Однородность и изотропность



- Изотропность реликтового излучения говорит о том, что в прошлом Вселенная была
- Сегодня мы наблюдаем галактики, скопления и сверхскопления
- Но на расстояниях  $L > 100 \text{ Mpc}$  Вселенная однородна и изотропна



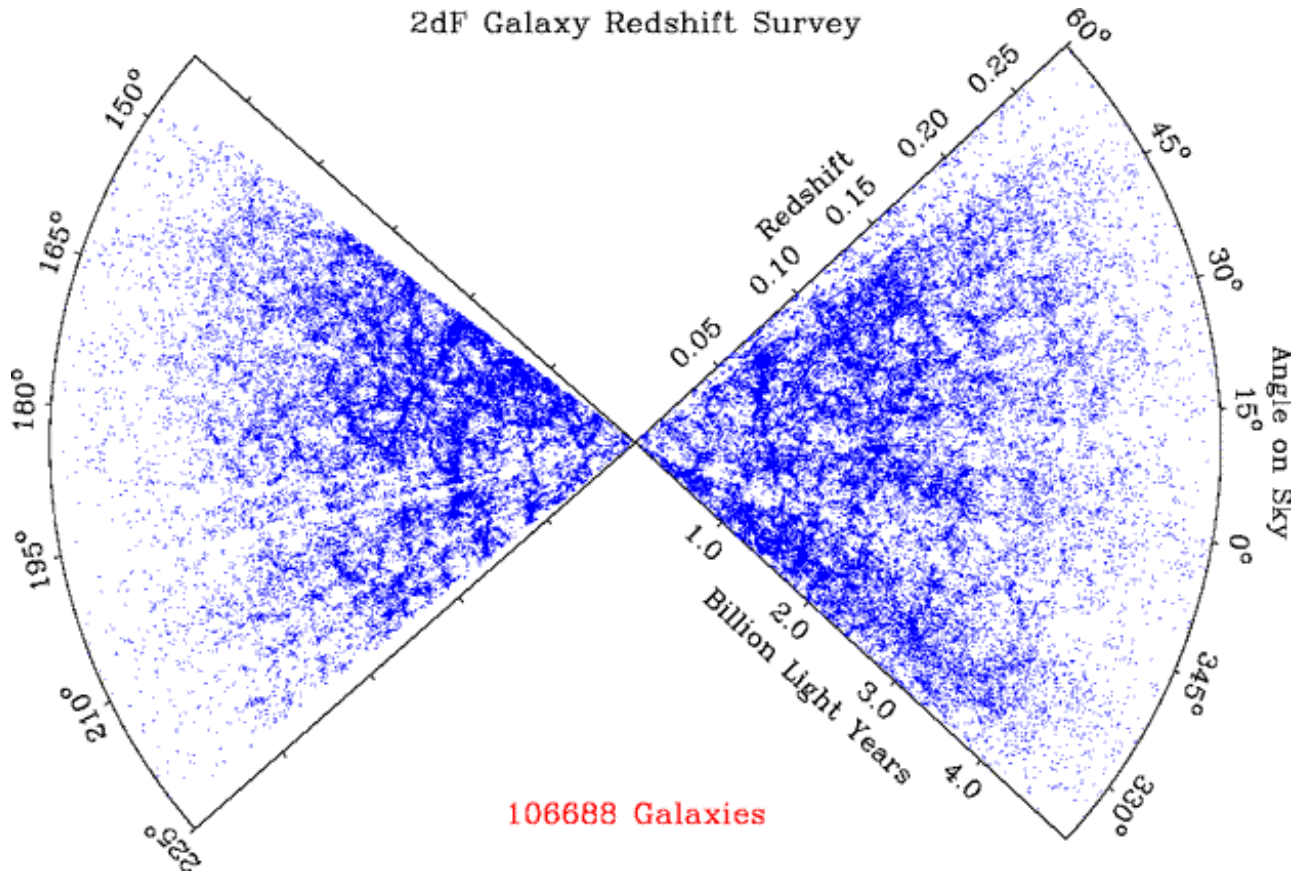
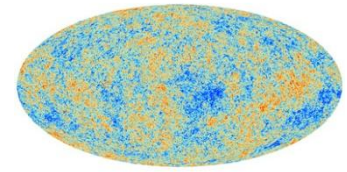
# Однородность и изотропность



- Срез Вселенной, содержащий 10,000 галактик (согласно the Center for astrophysics (CFA) redshift survey).

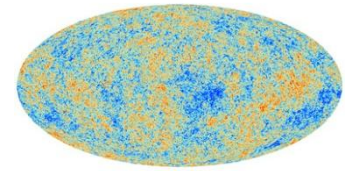


# Однородность и изотропность





# Стандартная космологическая модель



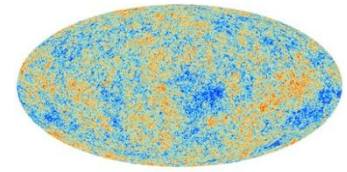
Стандартная космологическая модель основана на

- **Общей теории относительности**

Динамика расширяющейся Вселенной определяется уравнениями Эйнштейна

- **Описание материи как классической идеальной жидкости**  
(состоящей из галактик!)

# Уравнения Эйнштейна



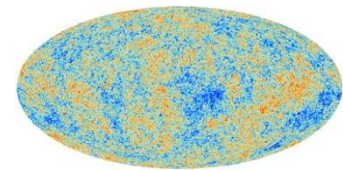
Ricci tenso      Metric tenso      Scalar curvatur      Newton constan      Energy-momentum tensor

r      r      e      t      t

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

Геометрия Вселенной **определяется** энергией

# Уравнение Фридмана



- Из уравнений Эйнштейна

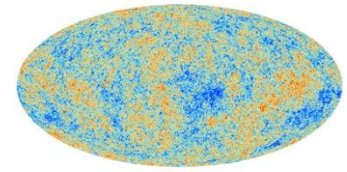
$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2} g_{\mu\nu} R = 8\pi G T_{\mu\nu}$$

При  $\mu=\nu=0$  следует уравнение Фридмана

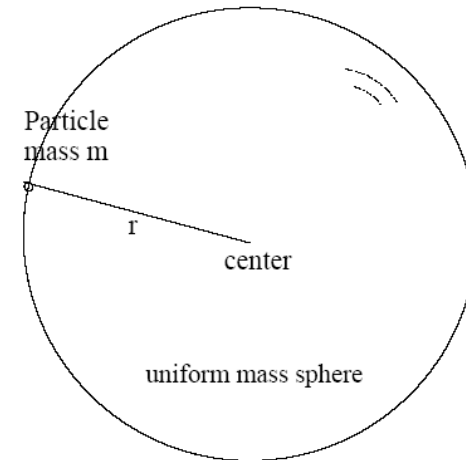
$$\left(\frac{\dot{a}}{a}\right)^2 + \frac{k}{a^2} = \frac{8\pi G \rho}{3}$$

- Показывает как масштабный фактор изменяется со временем в зависимости от плотности  $\rho$  и кривизны  $k$

# Уравнение Фридмана



- Рассмотрим частицу массы  $m$  на поверхности расширяющейся сферы радиуса  $R$



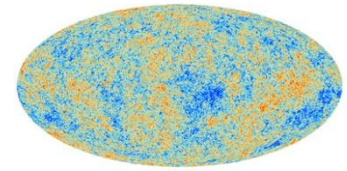
Kinetic energy

Potential energy

$$U = \frac{1}{2} m \dot{R}^2 - \frac{GMm}{R} = \frac{1}{2} m \dot{R}^2 - \frac{G \frac{4}{3} \pi R^3 \rho m}{R} = \frac{1}{2} m \dot{R}^2 - \frac{4}{3} G \rho \pi R^2 m$$

- Умножая на  $\frac{2}{mR^2}$  получим  $\left(\frac{\dot{R}}{R}\right)^2 = \frac{8\pi G \rho}{3} + \frac{2U}{mR^2}$

# Уравнение Фридмана)

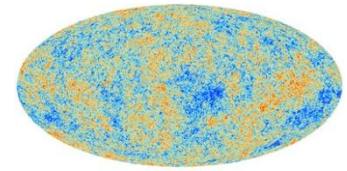


$$\left(\frac{\dot{R}}{R}\right)^2 = \frac{8\pi G\rho}{3} + \frac{2U}{mR^2}$$

- Заметим, что  $R = a(t) r$  и переобозначив  $\frac{2U}{mr^2} = k$  получим знакомое уравнение

$$\left(\frac{\dot{a}}{a}\right)^2 + \frac{k}{a^2} = \frac{8\pi G\rho}{3}$$

# Решение уравнения Фридмана



$$\left(\frac{\dot{a}}{a}\right)^2 + \frac{k}{a^2} = \frac{8\pi G \rho}{3}$$

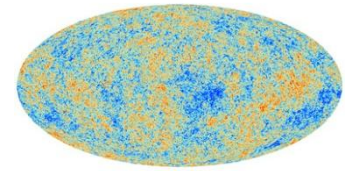
(для простоты рассмотрим плоскую Вселенную,  $k=0$ )

$$\left(\frac{\dot{a}}{a}\right)^2 = \frac{8\pi G \rho}{3} = \frac{8\pi G}{3} \rho_0 \left(\frac{a}{a_0}\right)^{-3(1+w)}$$

$$a(t) = a_0 \left(\frac{t}{t_0}\right)^{\frac{2}{3(1+w)}}$$



# Решение уравнения Фридмана



$$a(t) = a_0 \left( \frac{t}{t_0} \right)^{\frac{2}{3(1+w)}}$$

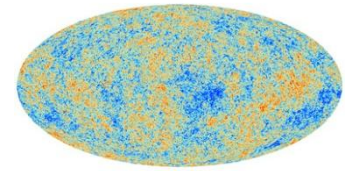
- Для Вселенной с материей ( $w=0$ ) one has

$$a_M(t) = a_0 \left( t / t_0 \right)^{2/3}$$

- Для Вселенной с излучением ( $w=1/3$ )

$$a_R(t) = a_0 \left( t / t_0 \right)^{1/2}$$

# Космологические параметры



- **Критическая плотность** – плотность, соответствующая плоской вселенной

$$\left(\frac{\dot{a}}{a}\right)^2 + \frac{k}{a^2} = \frac{8\pi G\rho}{3}$$

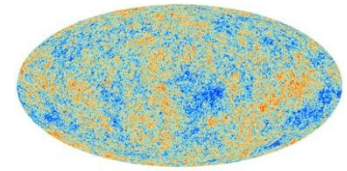
one has 
$$\rho_c \equiv \frac{3H_0^2}{8\pi G} = 1.88 h^2 \times 10^{-29} \text{ g/cm}^3 \cong 10^{-29} \text{ g/cm}^3$$

Соответствует нескольким фотонам на кубометр

- **Возраст Вселенной.** Оценка 
$$t_0 \sim \frac{2}{3H_0} \approx 3 \times 10^{17} \text{ s} \approx 10^{10} \text{ yr}$$

соответствует экспериментальным данным:  $t_0 = 13.81 \pm 0.03 \text{ billion years}$

# Космологические параметры



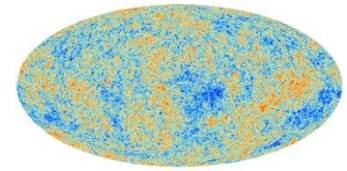
- **Параметры плотности** – отношения вкладов различных компонент (массы, излучения и т.п.) к критической плотности

$$\Omega_i \equiv \frac{\rho_i}{\rho_c} \qquad \rho_c \equiv \frac{3H_0^2}{8\pi G}$$

- Общий вид уравнения Фридмана с космологической постоянной

$$\left( \frac{\dot{a}}{a} \right)^2 + \frac{k}{a^2} + \frac{\Lambda}{3} = \frac{8\pi G \rho}{3}$$

# Космологические параметры



- Параметры плотности

$$\Omega_M \equiv \frac{8\pi G \rho_M}{3H_0^2}$$

$$\Omega_R \equiv \frac{8\pi G \rho_R}{3H_0^2}$$

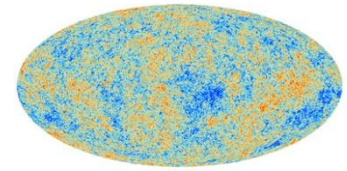
$$\Omega_\Lambda \equiv \frac{\Lambda}{3H_0^2}$$

$$\Omega_k \equiv \frac{k}{a_0^2 H_0^2}$$

- Уравнение Фридмана может быть переписано

$$H^2(a) = H_0^2 \left( \Omega_R \frac{a_0^4}{a^4} + \Omega_M \frac{a_0^3}{a^3} + \Omega_K \frac{a_0^2}{a^2} + \Omega_\Lambda \right)$$

# Космологические параметры

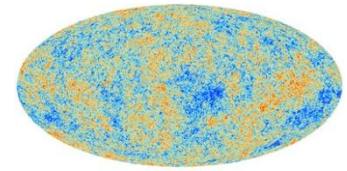


$$H^2(a) = H_0^2 \left( \Omega_R \frac{a_0^4}{a^4} + \Omega_M \frac{a_0^3}{a^3} + \Omega_K \frac{a_0^2}{a^2} + \Omega_\Lambda \right)$$

- Сегодня ( $a = a_0$ ,  $H = H_0$ ) можно записать «космическое правило сумм»

$$1 = \Omega_R + \Omega_M + \Omega_K + \Omega_\Lambda$$

# Космологические параметры



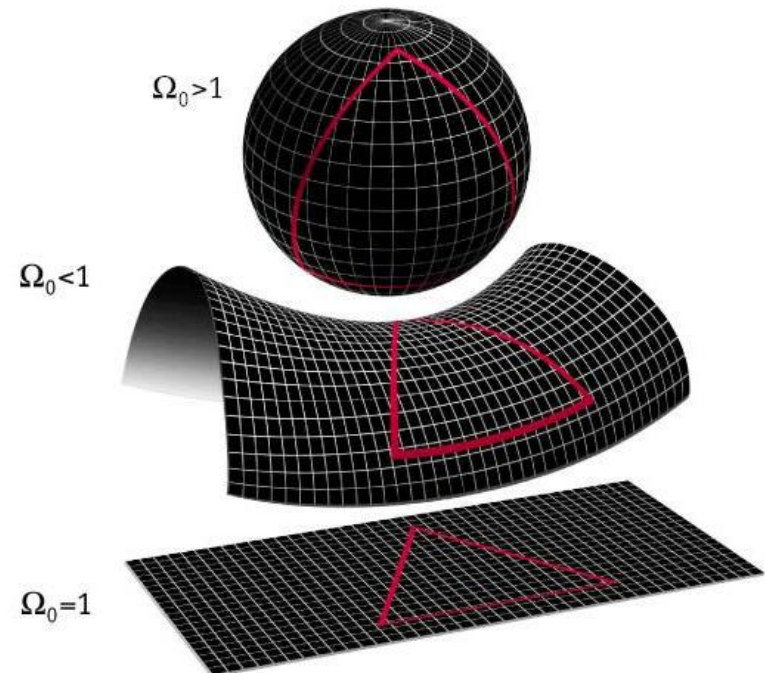
- В 2000 BOOMERANG и MAXIMA подтвердили с хорошей точностью, что геометрия Вселенной плоская

- Результат 2001 года

$$\Omega = 1.02 \pm 0.05$$

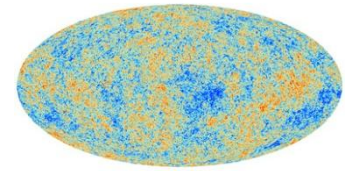
- Результат 2015 года

$$1 - \sum_i \Omega_i = 0.0008 \pm 0.004$$





# Ускоренное расширение Вселенной

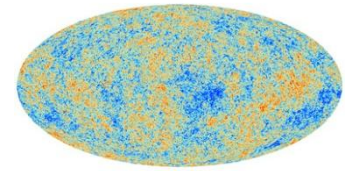


- **2011 год** – «за открытие ускоренного расширения Вселенной посредством наблюдения дальних сверхновых»

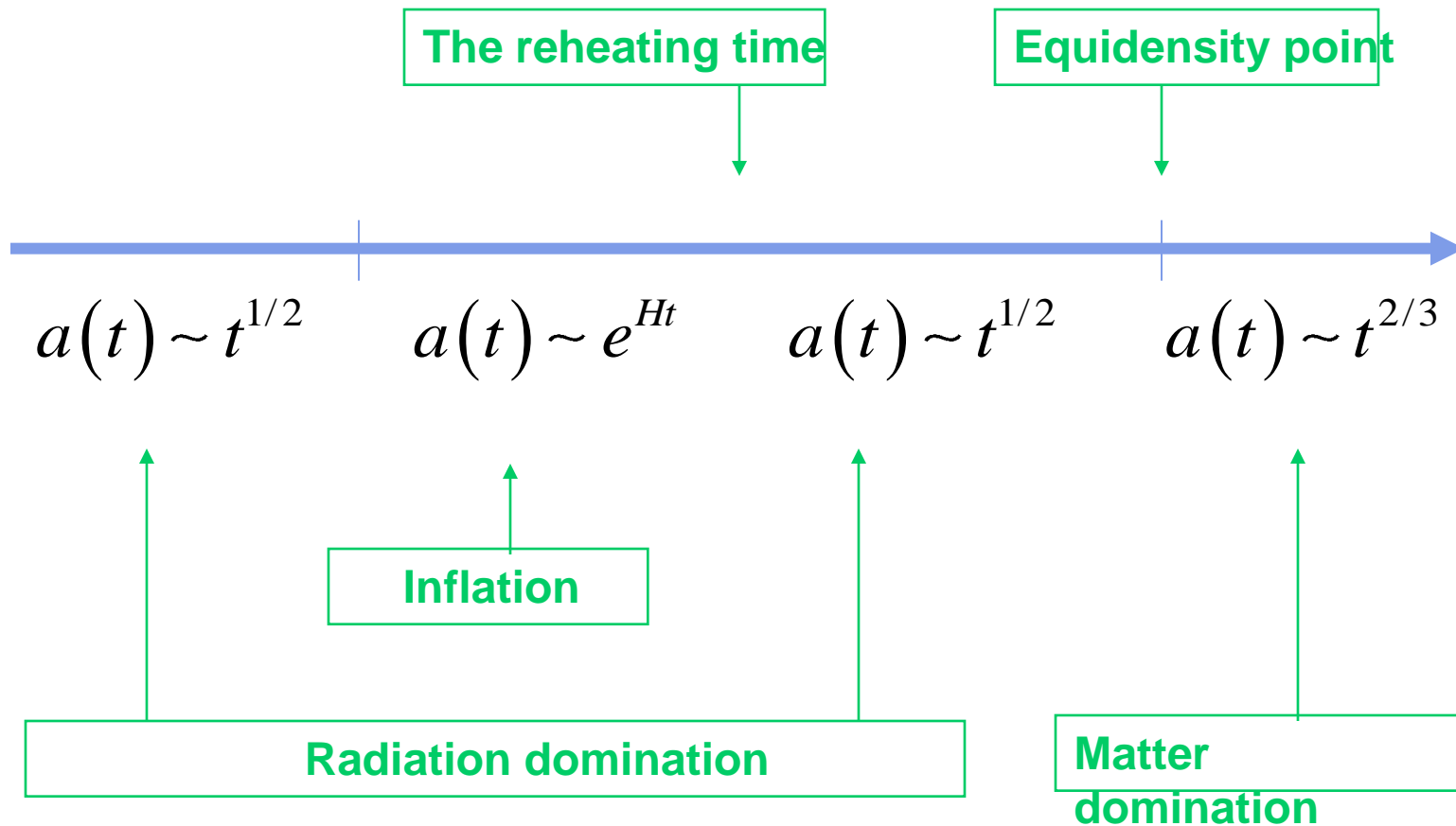
Сол Перлмуттер, Брайан Шмидт и Адам Рисс удостоены Нобелевской премии по физике



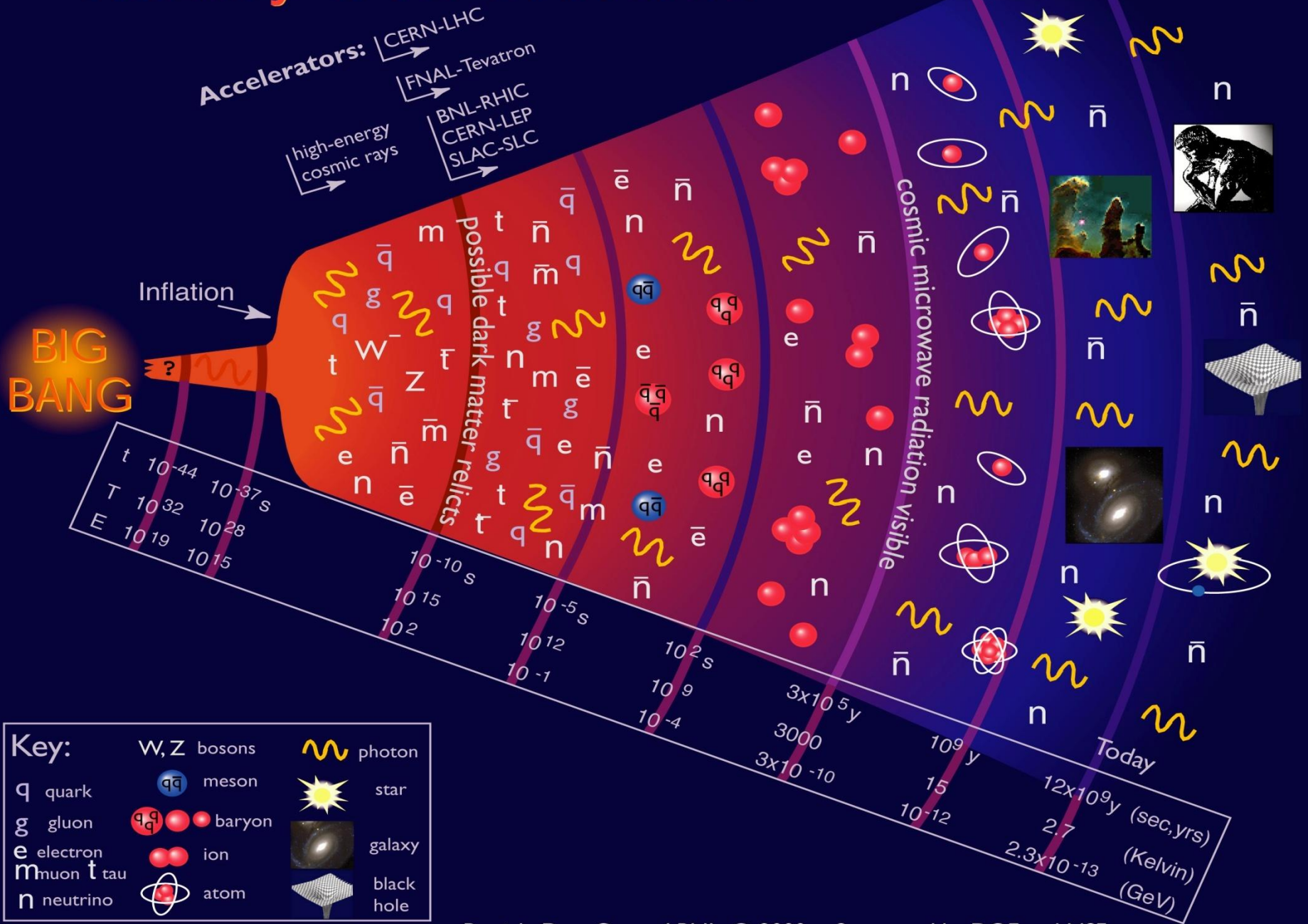
# Инфляция



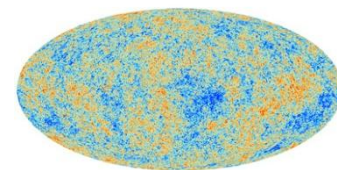
## ■ Стадии инфляционной вселенной



# History of the Universe



# Гравитационные волны



- Нобелевская премия 2017 присуждена Рейнеру Вайсу, Барри Бэришу и Кипу Торну «за решающий вклад в детектор LIGO и наблюдение гравитационных волн»

