

# Контрольная работа

Требуется дать ответ и объяснить его

1. Протон состоит из трех кварков ( $uud$ ), а нейтрон — из трех кварков ( $ddu$ ). Какие электрические заряды имеют кварки  $u$  и  $d$ ? Каков электрический заряд мезона с кварковым составом ( $d\bar{u}$ ) (черта обозначает античастицу)?

Подсказка: ядро гелия состоит из двух протонов и двух нейтронов.

2. Может ли мюон распадаться на фотон и нейтрино,  $\mu \rightarrow \gamma\nu$ ?

3. Мюон распадается в основном по каналу  $\mu \rightarrow e\nu_\mu\bar{\nu}_e$ . Его время жизни  $\tau_\mu = 2 \cdot 10^{-6}$  секунд.

$\pi^0$ -мезон имеет кварковый состав<sup>a</sup> ( $u\bar{u}$ ) и распадается в основном на два фотона,  $\pi^0 \rightarrow \gamma\gamma$ . Его время жизни  $\tau_{\pi^0} = 8 \cdot 10^{-17}$  секунд.

Почему времена жизни так сильно различаются,  $\tau_\mu \gg \tau_{\pi^0}$ ?

---

<sup>a</sup>опуская детали

Представления фундаментальной  
физики:  
от взаимодействий  
элементарных частиц  
до структуры и эволюции  
Вселенной

Лекция 7

# Космология стала точной наукой за последние 20 – 25 лет

Количественные результаты:

- Вселенная **расширяется**  
Пространство растягивается во все стороны.

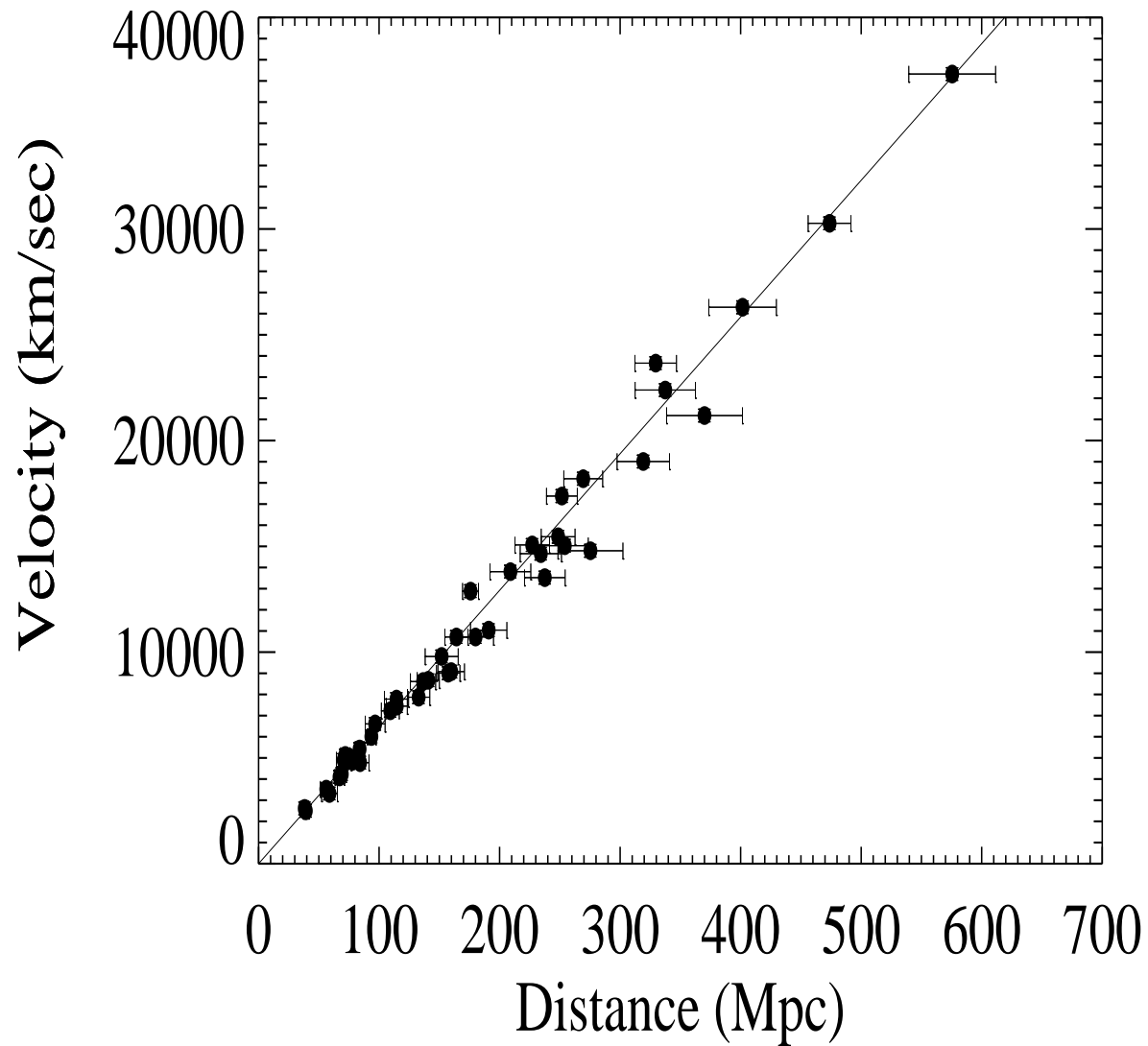
Галактики удаляются от нас; чем дальше галактика, тем быстрее она убегает.

Эффект Допплера: свет от далеких галактик приходит к нам покрасневшим. Красное смещение  $z$ :

$$z = v/c.$$

- **Астрономические наблюдения:**  
Скорость удаления от нас далеких галактик в зависимости от расстояния  $\Rightarrow$   
темп расширения Вселенной сегодня и в прошлом

# Небольшие $z$ : закон Хаббла



## Небольшие расстояния: закон Хаббла

$$z = H_0 \cdot r$$

$r$  = расстояние до источника

$z$  = красное смещение (скорость удаления источника)

$H_0$  = современный темп расширения Вселенной,  
параметр Хаббла

$$\frac{\dot{r}}{r} = H_0$$

$$H_0 = 67.8 \pm 0.8 \frac{\text{км/с}}{\text{Мпк}}$$

**NB: 1 Мпк = 3 млн. световых лет**

Космологические масштабы времени и расстояний

$$H_0^{-1} = 14 \text{ млрд. лет}; \quad c \cdot H_0^{-1} = 5 \text{ Мпк}$$

Сегодня расширение медленное: все расстояния увеличатся вдвое за 12 млрд. лет.

**В прошлом Вселенная расширялась гораздо быстрее**

Основное уравнение расширяющейся Вселенной — уравнение Фридмана<sup>a</sup>

$$H^2(t) \equiv \left( \frac{\dot{r}}{r} \right) (t) = \frac{8\pi}{3} G_{\text{Ньютона}} \cdot \varepsilon_{tot}$$

$\varepsilon_{tot}$  — полная плотность энергии всех форм материи.

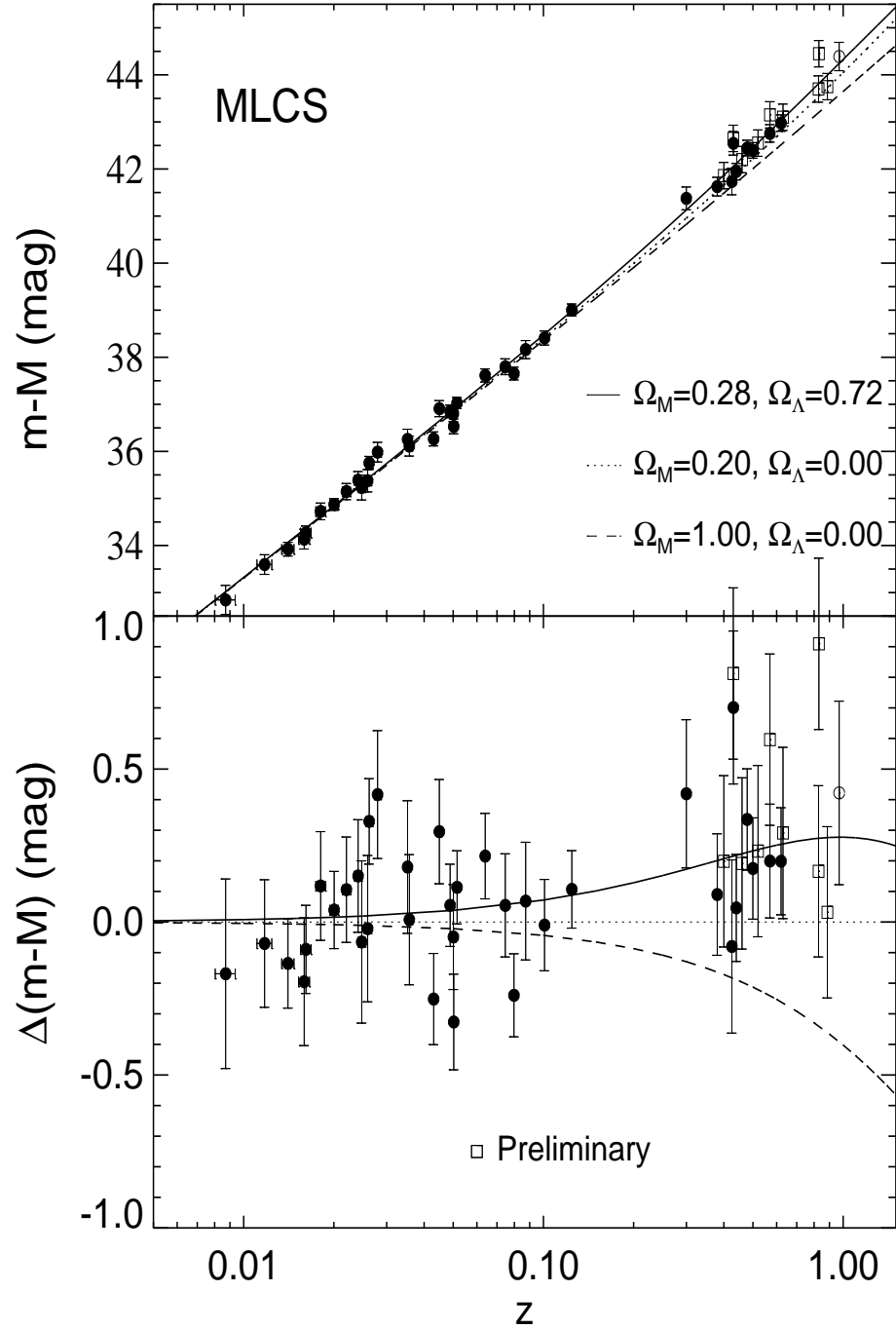
“Стандартные свечи (SNe 1a)”: измеряется зависимость красного смещения от расстояния.

Для больших расстояний  $z(r)$  зависит от темпа расширения в прошлом  $\implies$

зависимость от времени плотности энергии во Вселенной

---

<sup>a</sup> Для евклидова 3-мерного пространства



$$m - M \propto \ln r$$

- Глубокие обзоры галактик  $\Rightarrow$   
распределение галактик во Вселенной  $\Rightarrow$

### Карта Вселенной:

Состояние и эволюция Вселенной сегодня и в прошлом

**SDDS: положение во Вселенной более миллиона галактик, расстояния до 15 млрд. световых лет**

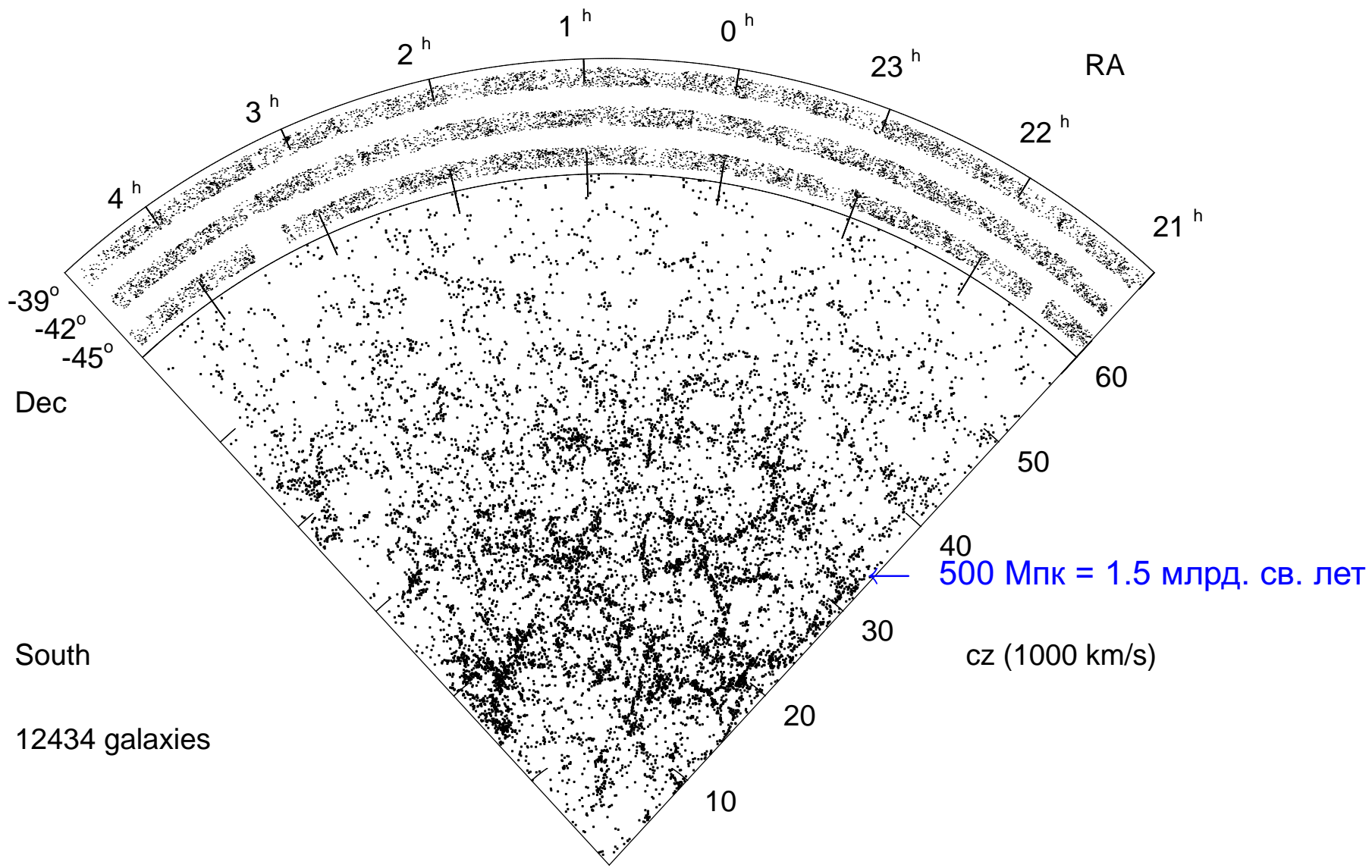
Результат:

**На больших масштабах расстояний ( $r > 300$  Мпк) Вселенная одинакова везде и во всех направлениях**

(однородность и изотропия)

На меньших масштабах это, конечно, не так.





Лас Кампанас, середина 90-х

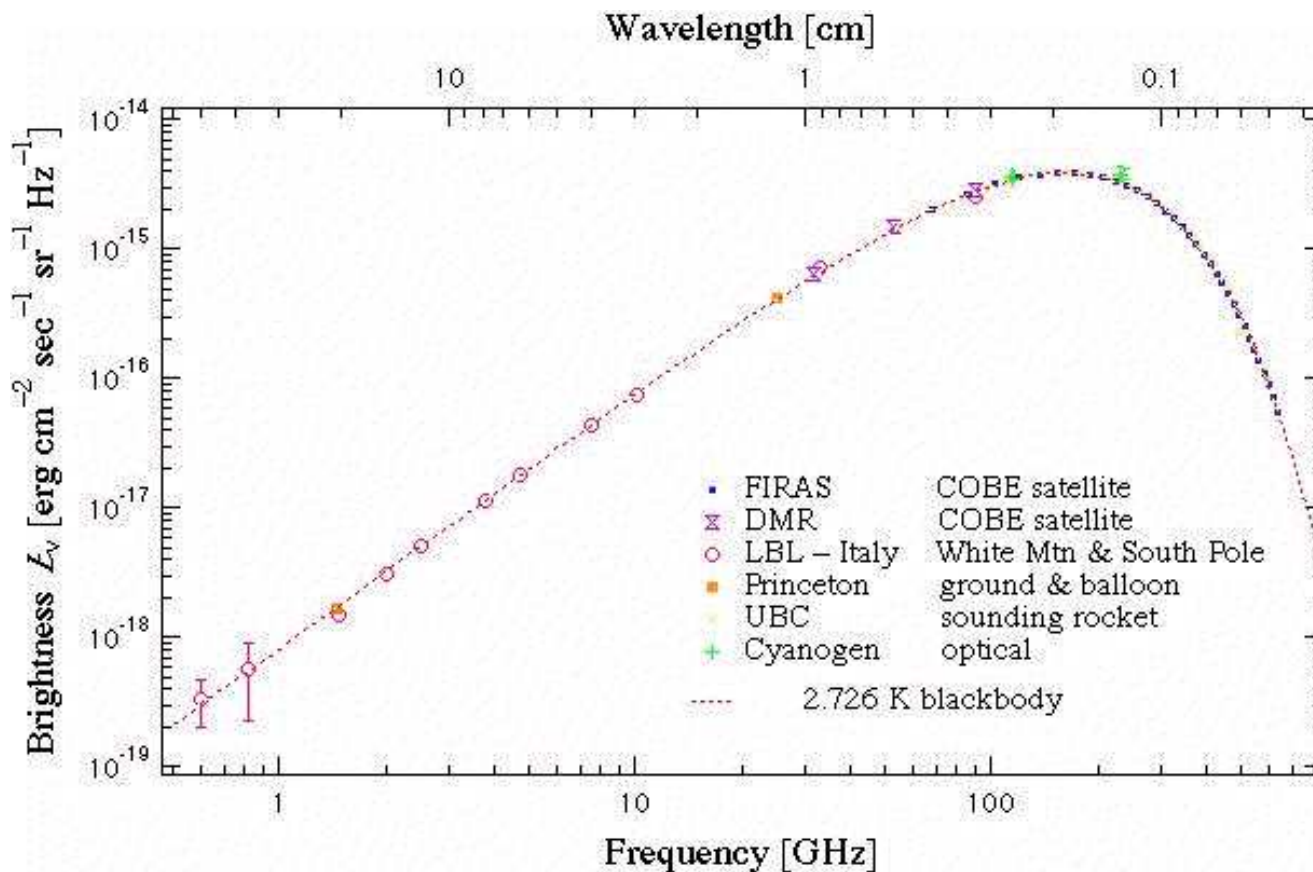
# Теплая Вселенная

Наполнена реликтовым микроволновым излучением

$$T_0 = 2.725 \text{ K}$$

(меньше температуры жидкого гелия)

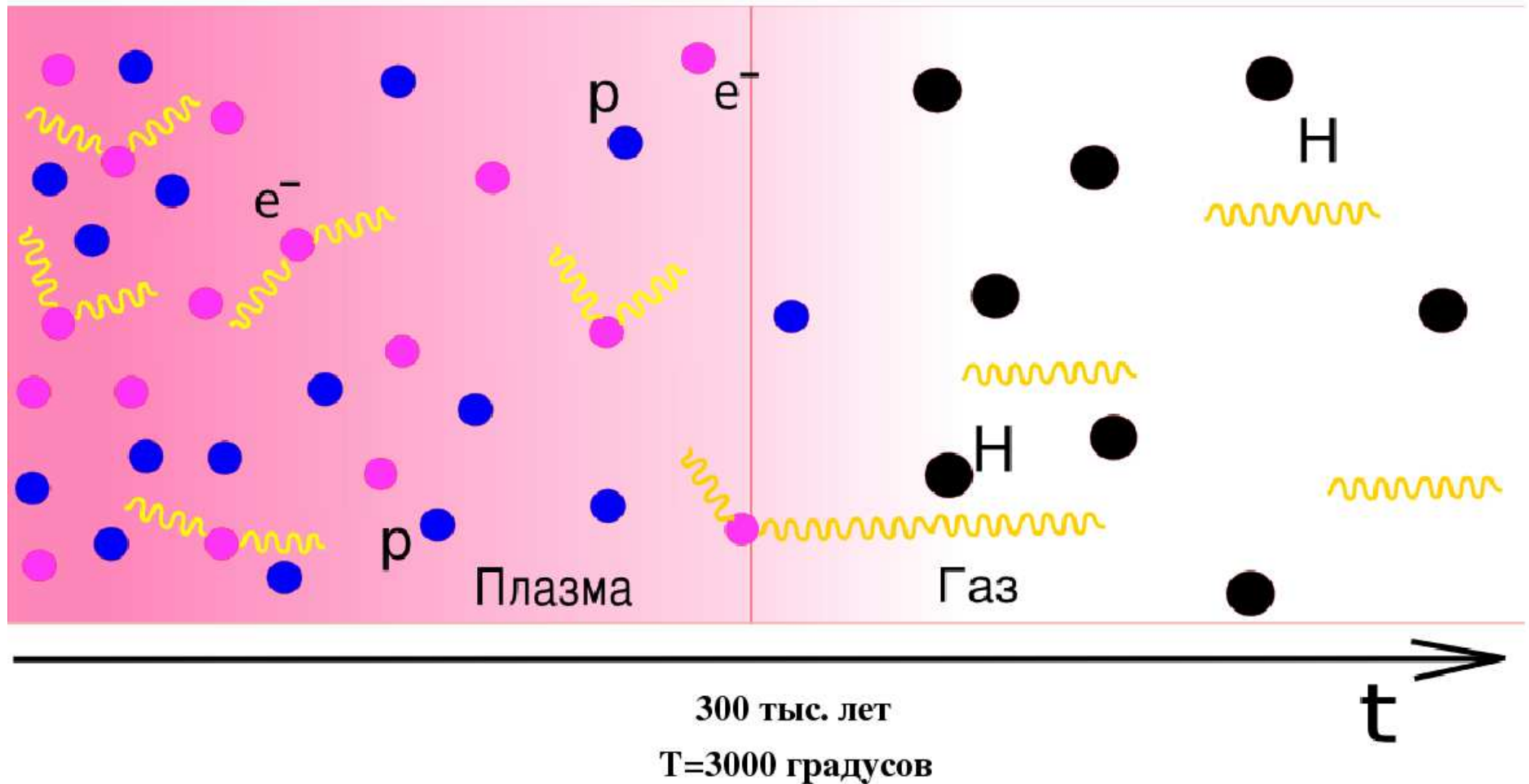
Тепловой спектр



Вселенная расширялась в течение всей своей истории  $\Rightarrow$   
В прошлом вещество во Вселенной было гораздо более  
плотным и горячим

- Наивное продолжение эволюции назад во времени  $\Rightarrow$  момент Большого Взрыва: “начало“, бесконечная плотность вещества, бесконечная скорость расширения.
- Потом Вселенная расширялась, остывала; плотность вещества уменьшалась
- При  $T > 3000$  К вещество находилось в фазе плазмы, при  $T = 3000$  К произошел переход плазмы в газ (водород)

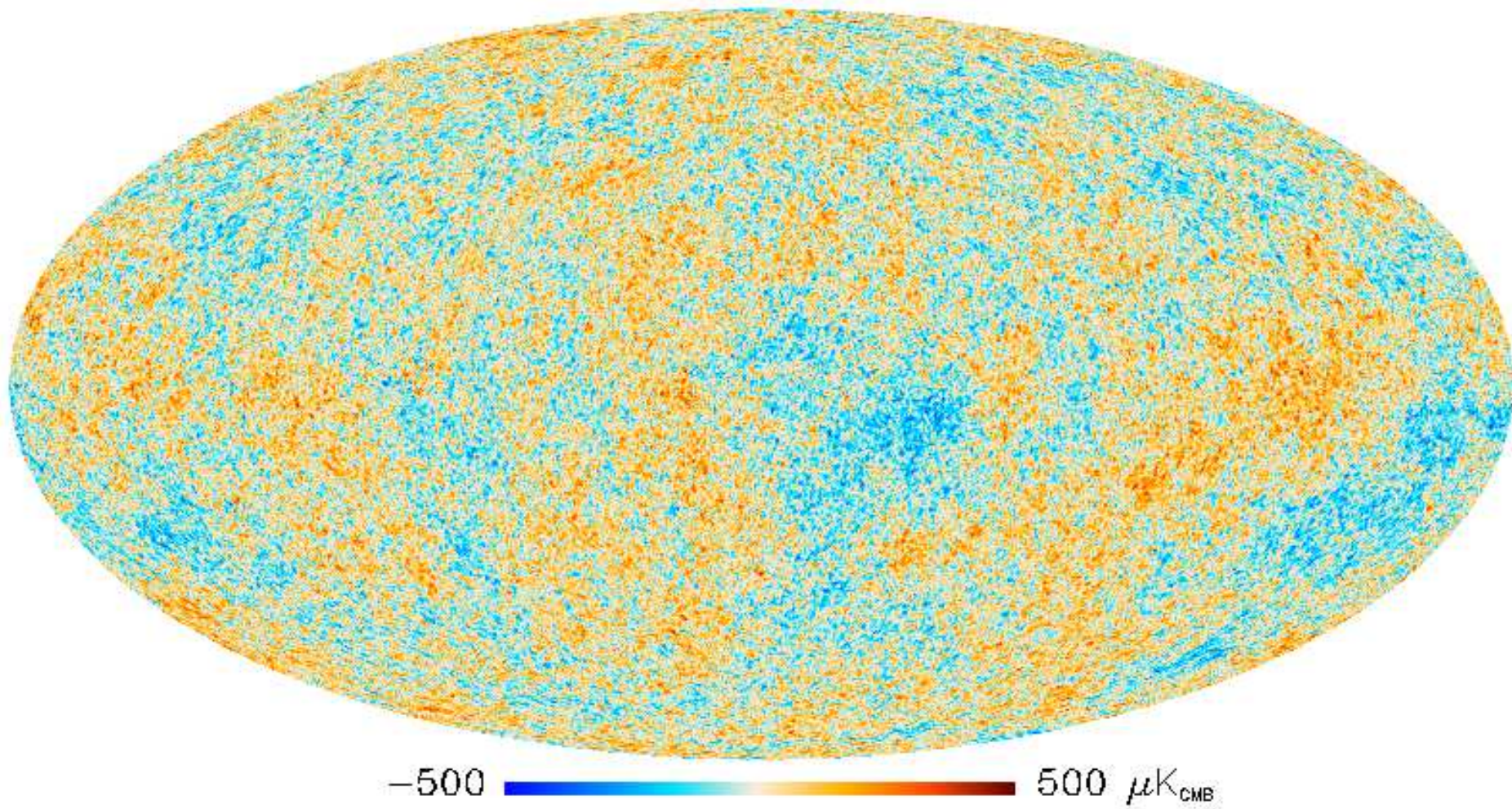
# Переход плазма – газ



- Измерения распределения температуры реликтового излучения на небесной сфере  $\Rightarrow$  фотоснимок Вселенной в возрасте 380 тыс. лет (сегодня — 13.8 млрд. лет), при температуре  $T = 3000$  К.

До этого вещество во Вселенной находилось в состоянии плазмы, непрозрачной для фотонов. При  $T = 3000$  К электроны и протоны рекомбинировали в нейтральный водород, среда стала прозрачной. С тех пор реликтовые фотоны распространяются свободно по Вселенной.

$$T = 2.725^{\circ}\text{K}, \quad \frac{\delta T}{T} \sim 10^{-5}$$



Planck, 21 марта 2013 г.

- При  $T = 3000$  К,  $t = 300$  тыс. лет Вселенная была почти однородной,

относительные неоднородности плотности были на уровне  $10^{-4} - 10^{-5}$ .

- Из них впоследствии образовались структуры (первые звезды, галактики, скопления галактик) благодаря гравитационной неустойчивости

В карте реликтового излучения закодировано много космологической информации

- **Пространственная кривизна Вселенной**  
(физика: нарастание звуковых волн в космической плазме; максимумы при периодах, кратных  $\text{const} \cdot 380$  тыс. лет, абсолютная длина волны фиксирована  $\iff$  угол, под которым она видна, зависит от пространственной геометрии )

Трехмерное пространство Евклидово с высокой точностью

Сумма углов треугольника = 180 градусам.

Речь идет о треугольниках со сторонами 30 млрд. световых лет !

Видимая часть Вселенной – не более 1/1000 ее полного объема.



Еще закодированная информация:

- Свойства первичных неоднородностей плотности
- Состав материи/энергии во Вселенной

Пространственная плоскостность + уравнения гравитации  $\Rightarrow$   
полная плотность энергии всех форм материи

$$\epsilon_{\text{tot}} = \frac{3}{8\pi G_{\text{Ньютон}}} H_0^2 = 5 \frac{\text{ГэВ}}{\text{м}^3}$$

А обычное вещество (барионы = протоны + нейтроны в ядрах;  
энергия покоя,  $E = mc^2$ )

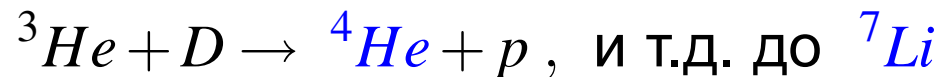
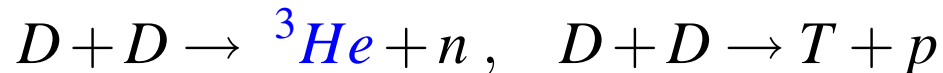
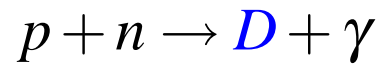
$$\epsilon_{\text{В}} = 0.25 \frac{\text{ГэВ}}{\text{м}^3}$$

Всего 4.8% !

# Первичный термоядерный синтез

Температура  $10^{10} \rightarrow 10^9$  К, время жизни  $1 \rightarrow 300$  секунд (!)

Эпоха термоядерных реакций



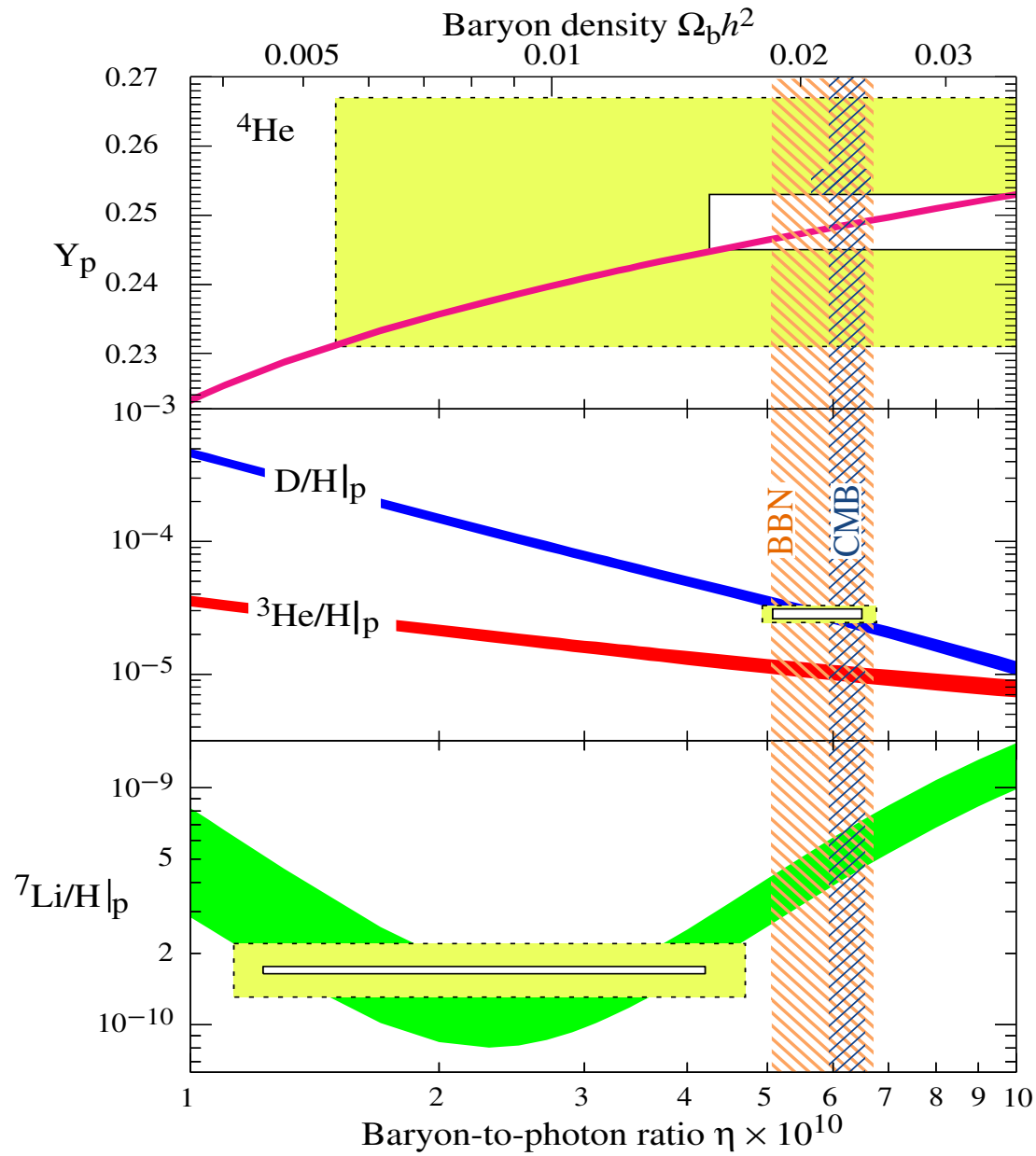
Параметр:

плотность барионов = протонов + нейтронов,

Измерения концентрации элементов  $\Rightarrow$

состав и эволюция Вселенной в возрасте 1 с — 5 мин.

$\Rightarrow$  концентрация барионов в современной Вселенной



$$\eta_{10} = \frac{\text{число барионов}}{\text{число фотонов}} \cdot 10^{10}$$

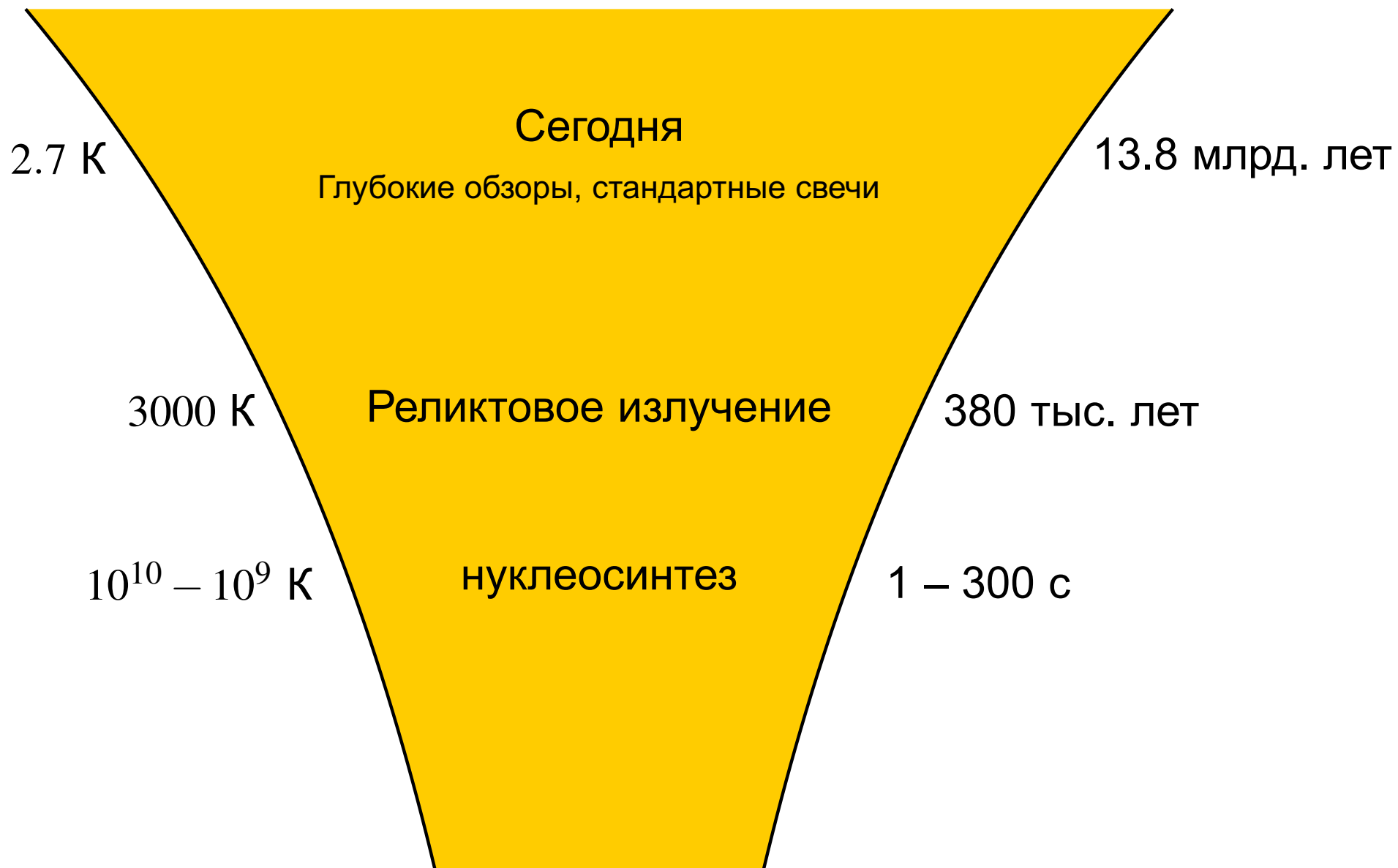
Согласие между независимыми определениями плотности барионов.

- Теория гравитации — общая теория относительности — работает по крайней мере начиная с 1 секунды после Большого взрыва, температуры 10 млрд. градусов.
- В современной Вселенной

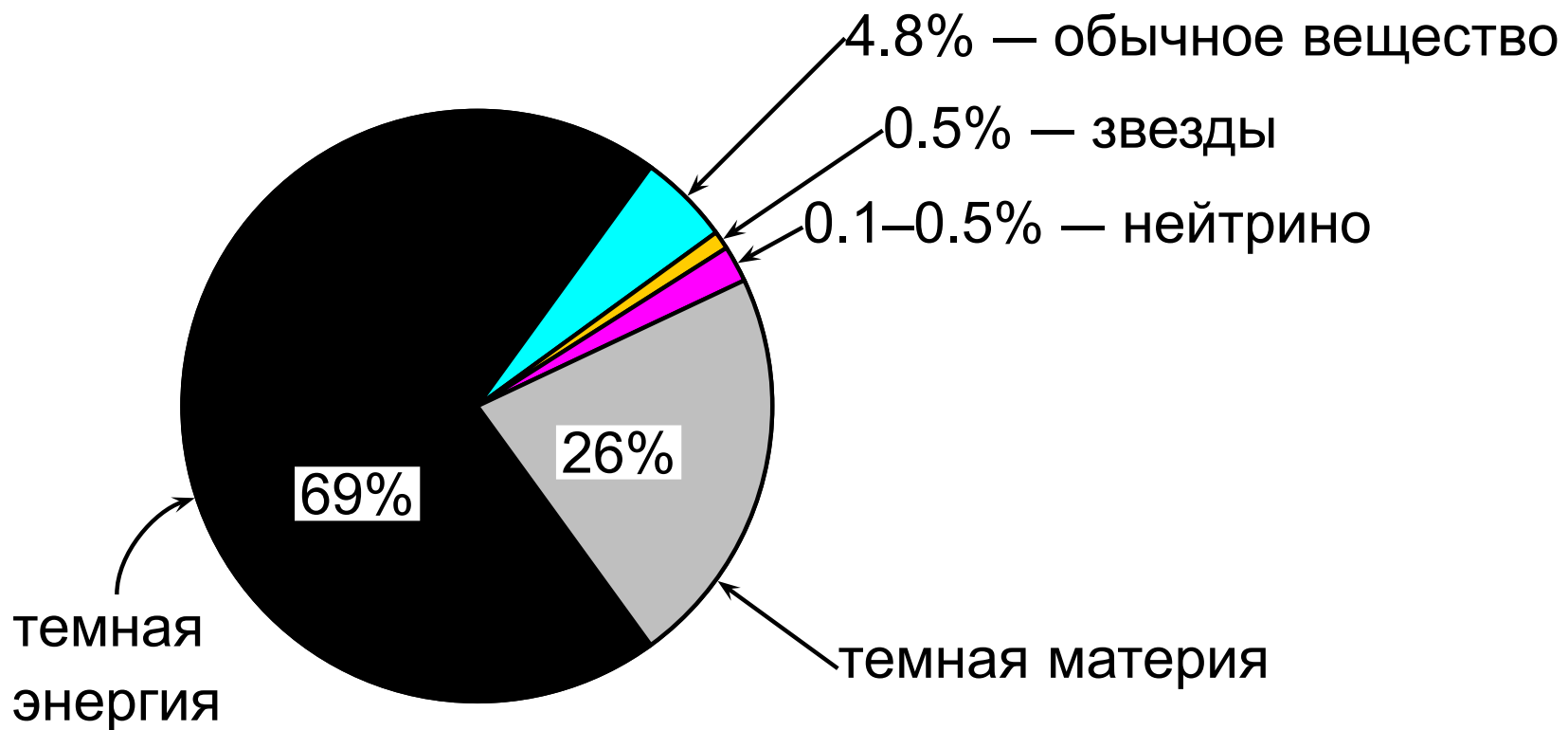
$$\frac{\epsilon_B}{\epsilon_{\text{tot}}} = 0.05$$

Остальная энергия – “неизвестно что”

# Этапы эволюции Вселенной и данные о них



## Баланс энергий в современной Вселенной



# Результат

Существующих знаний о фундаментальных частицах и их взаимодействиях недостаточно для описания наблюдаемого мира