

# Вселенная до горячего Большого взрыва

В.А. Рубаков

Институт ядерных исследований РАН,  
кафедра физики частиц и космологии  
физического факультета МГУ



# План

- Свойства современной Вселенной
- Известные ранние эпохи
- Реликт: космологические возмущения (неоднородности плотности, реликтовые гравитационные волны)
  - Ключевое слово — причинность
  - Горячая стадия не была первой
- Инфляция и альтернативы
- А как на самом деле?
- Заключение

# Свойства современной Вселенной:

- Видимая часть Вселенной – **большая**  
Ее размер = **15 Гигапарсек**  $\approx$  45 млрд световых лет  
 $1 \text{ Мпк} = 3 \cdot 10^6 \text{ св. лет} = 3 \cdot 10^{24} \text{ см}$
- Вселенная – **пожилая**  
Ее время жизни – по крайней мере **13.8 млрд лет**
- Вселенная однородна на больших масштабах расстояний ( $\gtrsim 250$  Мпк).
  - Глубокие обзоры галактик и квазаров  $\Rightarrow$  карта большей части видимой Вселенной

- Вселенная расширяется

Пространство растягивается во все стороны.

Расстояния между галактиками растут.

Длина волны фотона увеличивается.

Фотон, испущенный во время  $t$  с длиной волны  $\lambda$ ,  
приходит к нам с длиной волны

$$\lambda_0 = (1 + z)\lambda$$

$z = z(t)$ : красное смещение, измеримая величина

- 3-мерное пространство евклидово (наблюдательный факт!)

Сумма углов треугольника =  $180^\circ$  даже для треугольников размера видимой части Вселенной.

- Все это закодировано в метрике пространства-времени (метрика Фридмана–Леметра–Робертсона–Уокера)

$$ds^2 = dt^2 - a^2(t) \mathbf{dx}^2$$

$\mathbf{x}$  : сопутствующие координаты, нумеруют галактики;

$a(t)dx$  : физическое расстояние

$a(t)$ : масштабный фактор, растет со временем.

Можно считать, что сегодня  $a = 1$ , тогда в прошлом  $a < 1$ .

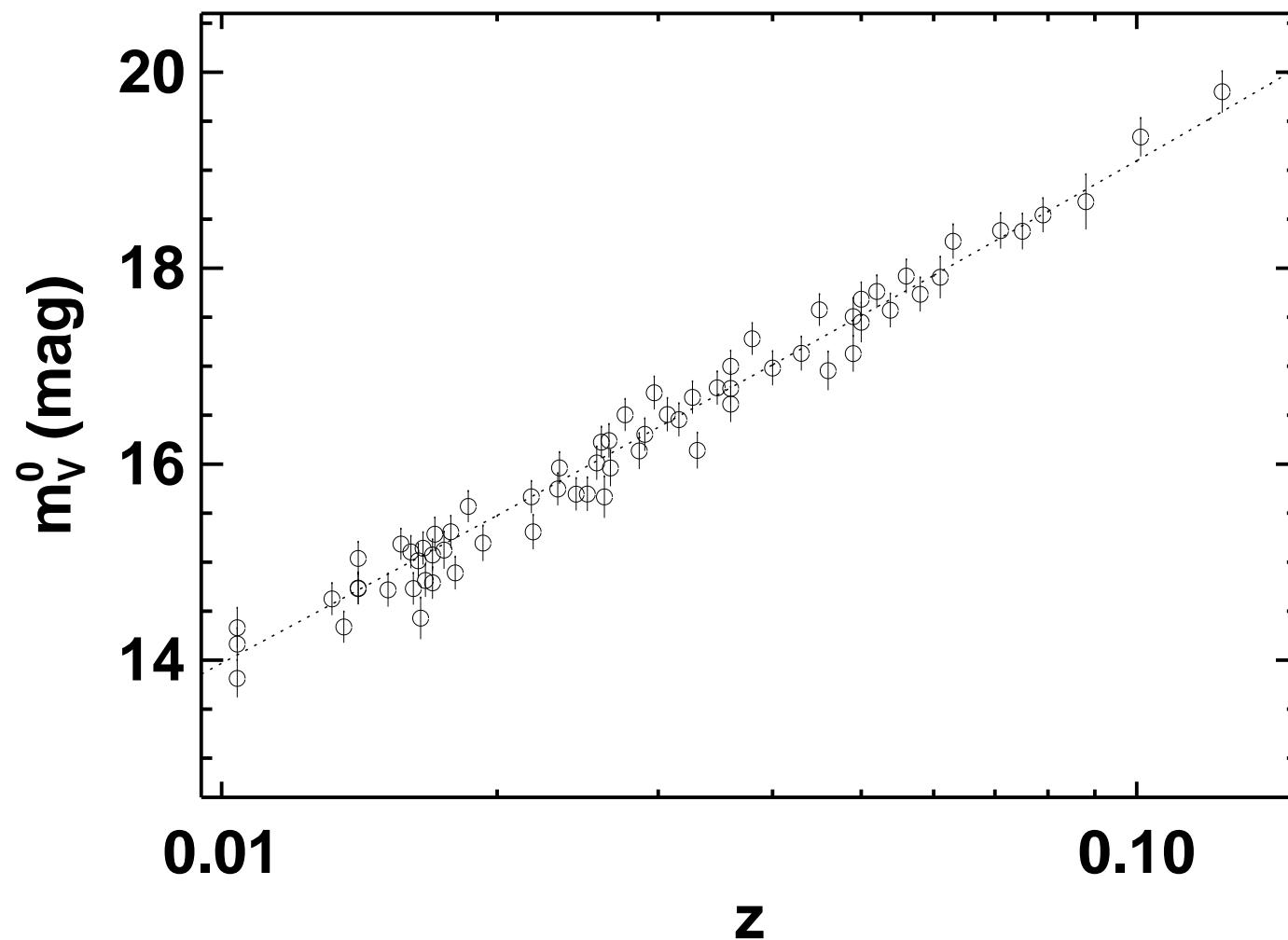
$H(t) = \frac{\dot{a}}{a}$  : параметр Хаббла, темп расширения

- Современное значение

$$H_0 = (67.8 \pm 0.8) \frac{\text{км/с}}{\text{Мпк}} = (14 \cdot 10^9 \text{ лет})^{-1}$$

- Закон Хаббла (справедлив при  $z \ll 1$ ):  $z = H_0 r$

# Диаграмма Хаббла для сверхновых Ia



$$\text{mag} = 5 \log_{10} r + \text{const}$$

- Вселенная **теплая**. Заполнена реликтовым микроволновым излучением (Cosmic Microwave Background, **CMB**):  
фотоны, испущенные, когда Вселенная была юной и горячей

Температура СМВ сегодня

$$T_0 = 2.7255 \pm 0.0006 \text{ K}$$

Fig.

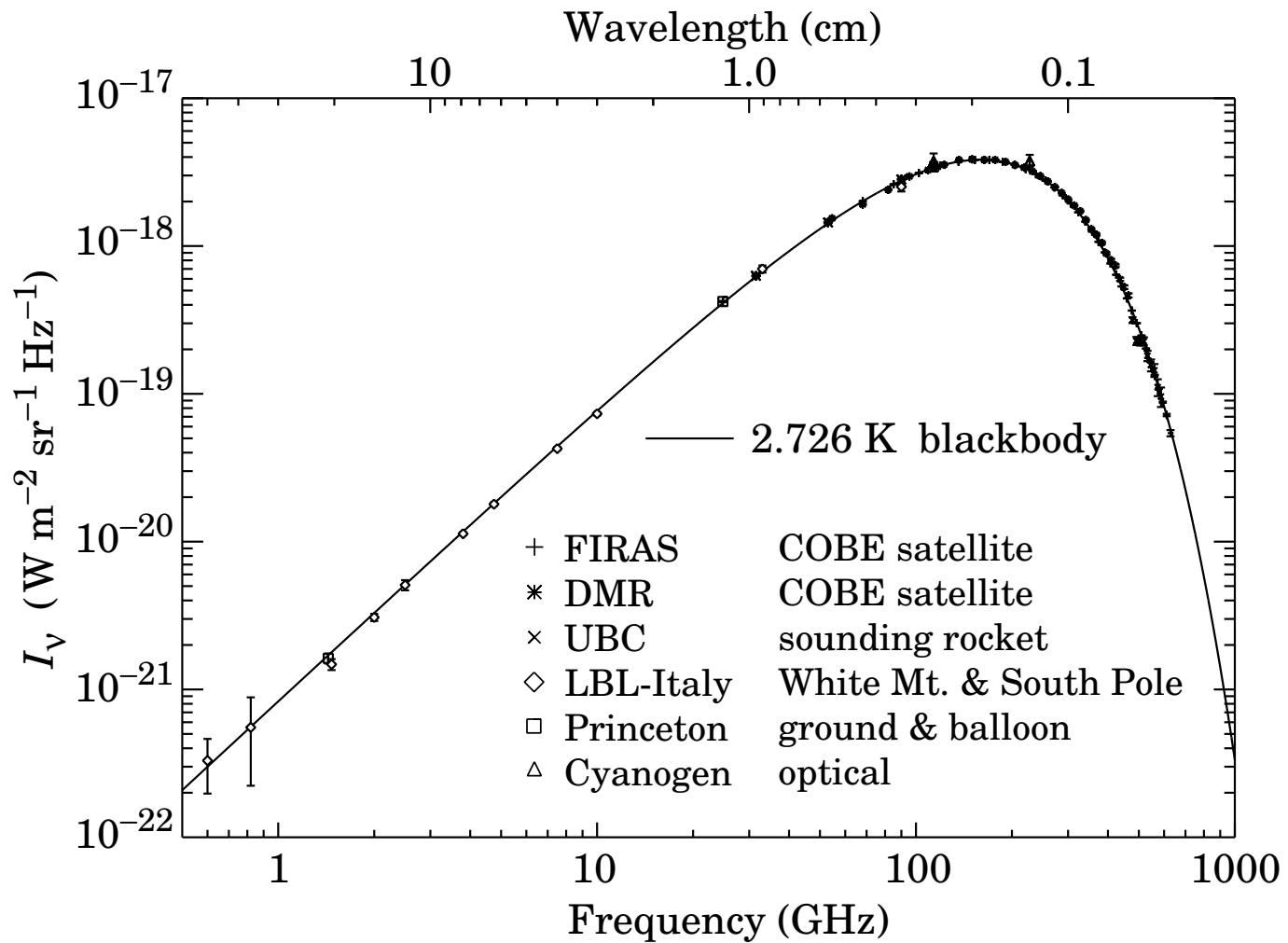
Раньше Вселенная была теплее и плотнее

И расширялась она **гораздо быстрее** в прошлом:  
согласно общей теории относительности, темп  
расширения подчиняется **уравнению Фридмана**

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

где  $\rho$  – полная плотность энергии,  $G$  ньютоновская  
гравитационная постоянная.

# Спектр CMB



$$T = 2.726 \text{ K}$$

# Известные ранние эпохи

- Рекомбинация, переход плазма  $\Rightarrow$  газ.

$$z = 1090, T = 3000 \text{ K}, \quad t = 380 \text{ 000 лет}$$

Последнее рассеяние фотонов СМВ

Фотография ( буквально!) Вселенной той  
эпохи

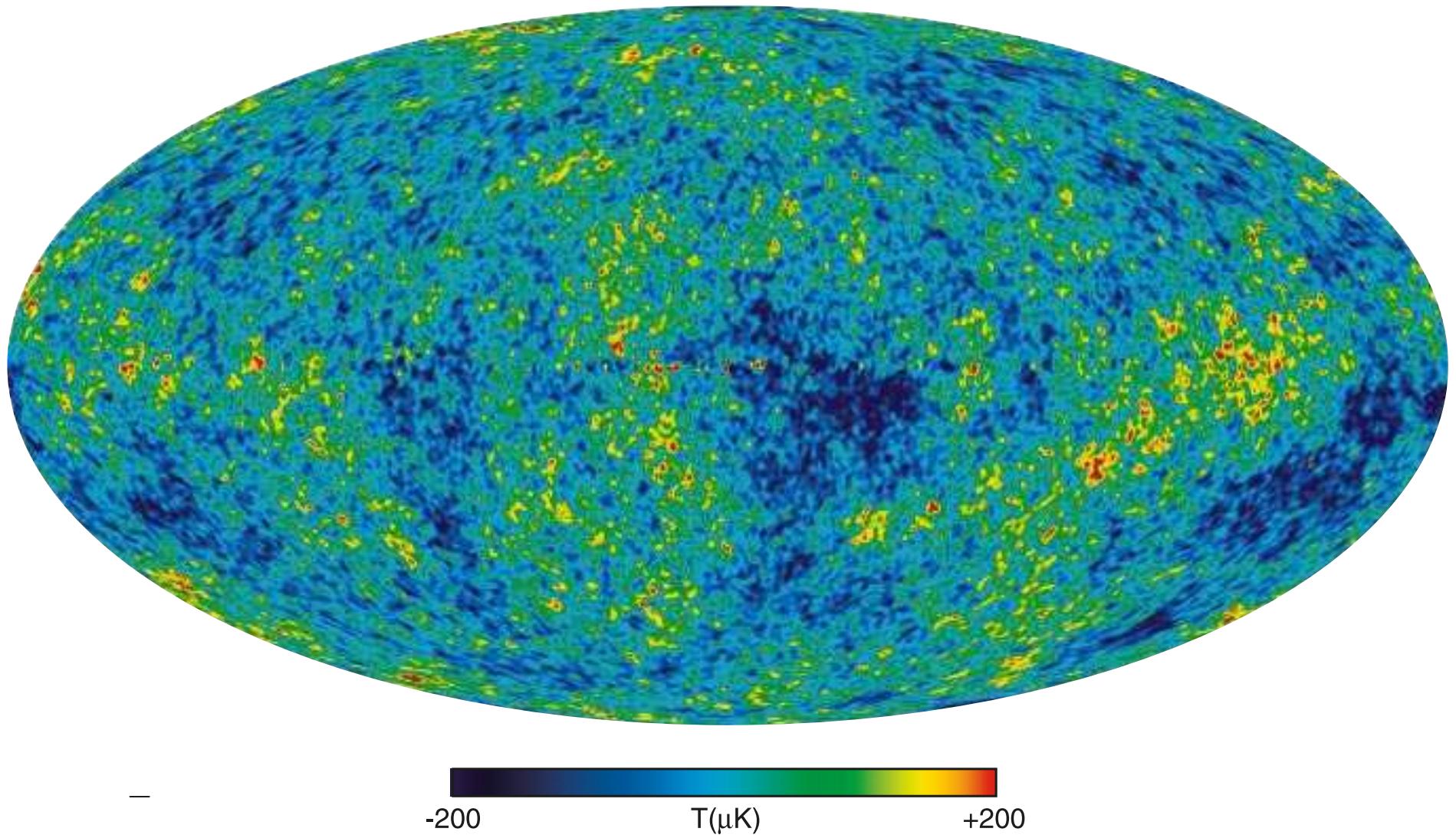
Fig.

Вселенная была гораздо более однородной:  
неоднородности на уровне

$$\frac{\delta\rho}{\rho} \sim 10^{-4} - 10^{-5}$$

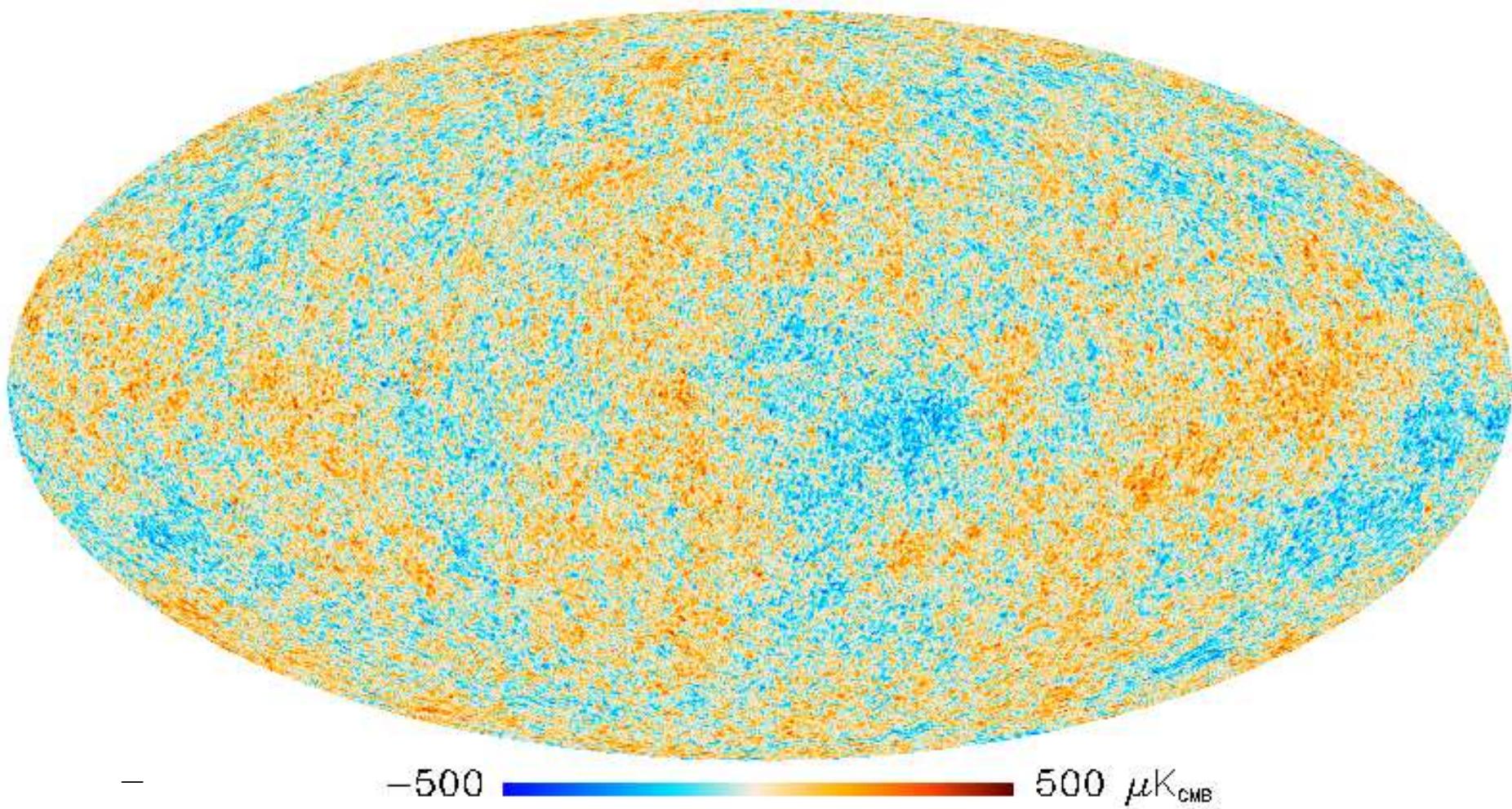
Но фотка очень информативная!

$$T = 2.726^{\circ}K, \frac{\delta T}{T} \sim 10^{-4} - 10^{-5}$$



WMAP, 2003

$$T = 2.726^{\circ}K, \frac{\delta T}{T} \sim 10^{-4} - 10^{-5}$$

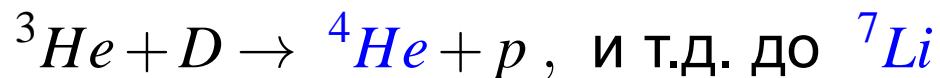
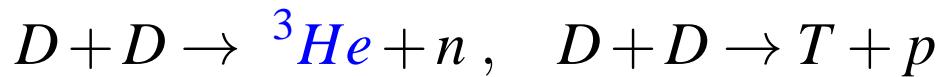
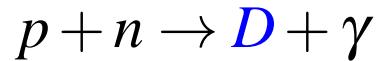


Planck, 2013

# Первичный термоядерный синтез

Температура  $10^{10} \rightarrow 10^9$  К (1 МэВ  $\rightarrow$  30 кэВ),  
время жизни  $1 \rightarrow 300$  секунд (!)

Эпоха термоядерных реакций

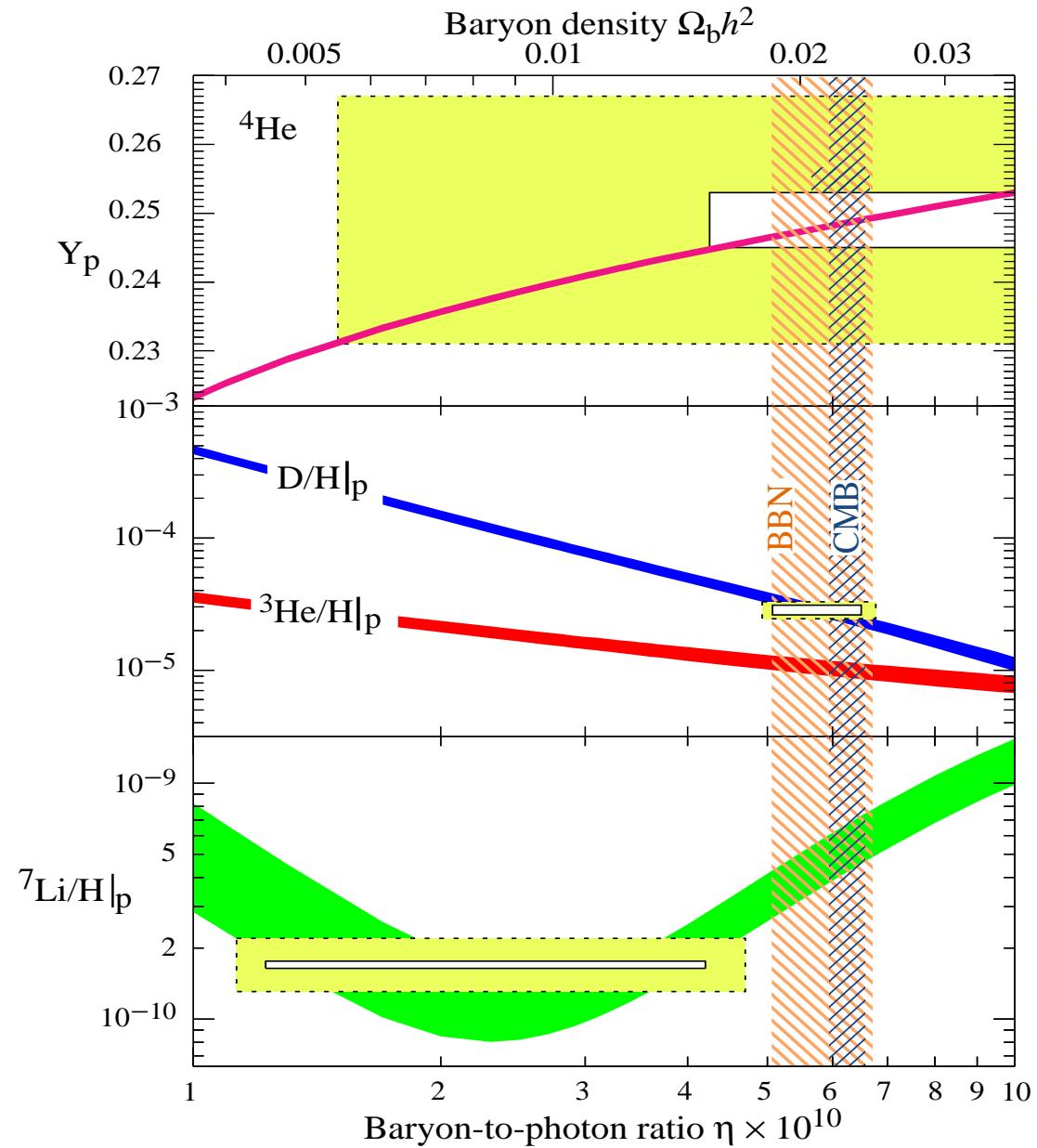


Параметр:

плотность барионов = протонов + нейтронов,

Измерения концентрации элементов  $\Rightarrow$   
состав и эволюция Вселенной в возрасте 1 с — 5 мин.,  
концентрация барионов в современной Вселенной

- Согласие между независимыми определениями концентрации барионов



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

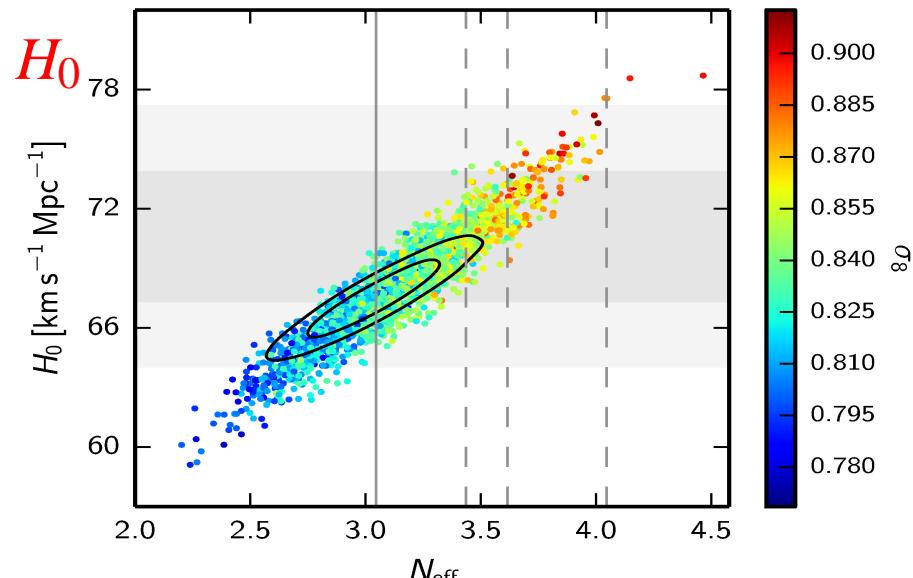
# Эпоха закалки нейтрино

Температура  $2 - 3$  МэВ,  $t \sim 0.1$  с

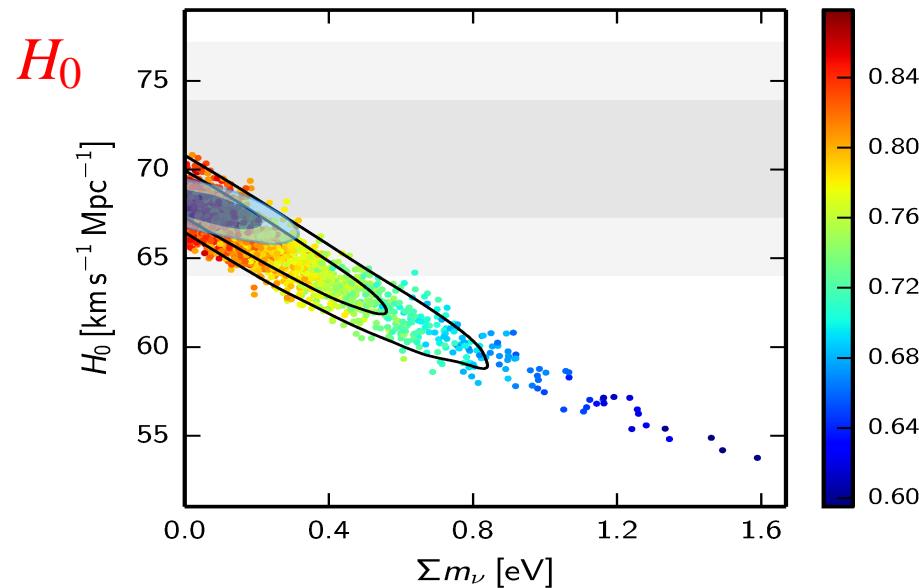
Выключение реакций типа  $\nu\bar{\nu} \longleftrightarrow e^+e^-$

$\implies$  сегодня в Вселенной  $110 \text{ см}^{-3}$  нейтрино каждого типа. Их “видно” в свойствах СМВ, структур.

$N_\nu \approx 3$  в согласии с физикой частиц,  $\sum m_\nu \lesssim 0.3$  эВ



$N_\nu$

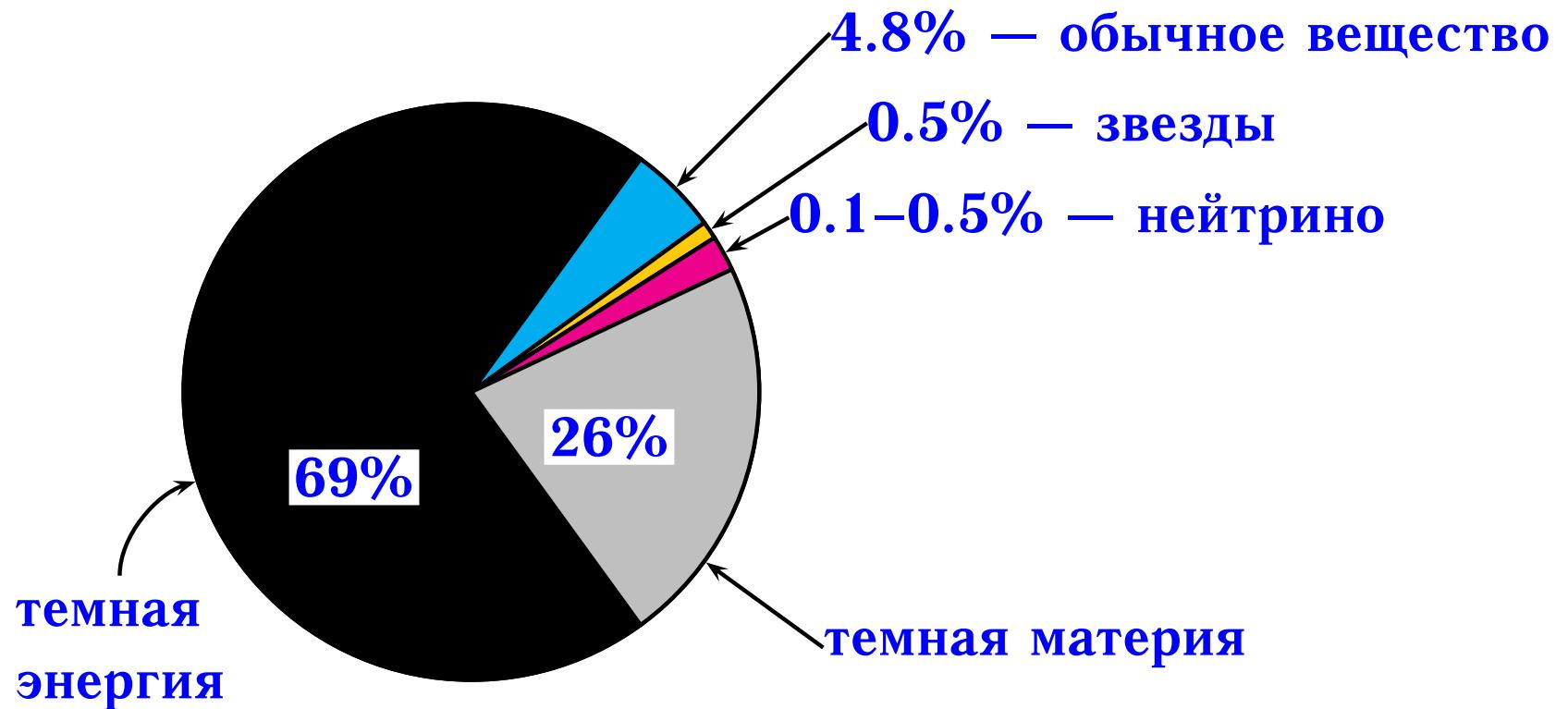


$\sum m_\nu$

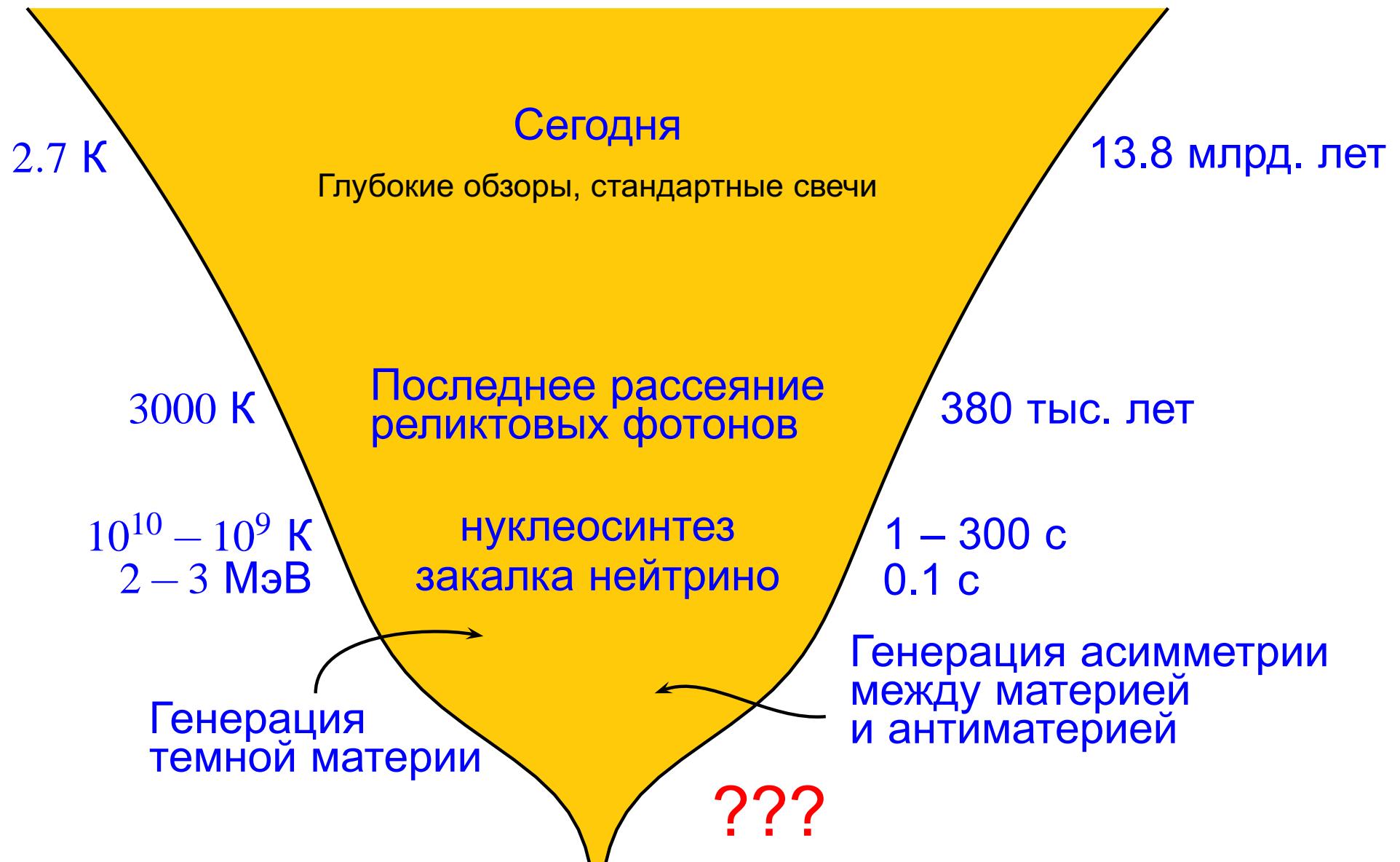
- Понимаем Вселенную в возрасте  $\sim 0.1$  с, при температурах  $\sim 2 - 3$  МэВ. В частности, теория гравитации — общая теория относительности — работала так же, как сейчас.

Неизвестные (пока) эпохи:

- Генерация темной материи
- Генерация асимметрии между веществом и антивеществом



# Этапы эволюции Вселенной



Идущие и будущие эксперименты по физике частиц, возможно,  
позволят нам “проникнуть” во Вселенную  
при температурах  $T \sim 100$  ГэВ и возрасте  $t \sim 10^{-10}$  с

Сможем ли мы узнать что-то о более ранних эпохах?

# Реликт: космологические возмущения

- неоднородности плотности и связанные с ними гравитационные потенциалы (3d скаляры, спин 0);

Имелись еще до горячей эпохи (!)

- гравитационные волны (3d тензоры, спин 2) – пока не обнаружены

Сегодня: неоднородности плотности большие по амплитуде, в нелинейном режиме.

В прошлом: амплитуды малы

$$\frac{\delta \rho}{\rho} = 10^{-4} - 10^{-5}$$

Работает линеаризованная теория.

# Ключевое слово: причинность

Поведение возмущений в стандартной “горячей” Вселенной  
Метрика Фридмана

$$ds^2 = dt^2 - a^2(t)d\vec{x}^2$$

Расширение Вселенной:

$a(t) \propto t^{1/2}$  на радиационно-доминированной стадии (до  $T \simeq 1$  еВ,  $t \simeq 60$  тыс. лет)

$a(t) \propto t^{2/3}$  на пылевидной стадии (до недавнего времени)

Космологический горизонт (предполагая, что эволюция началась сразу с горячей стадии): расстояние, которое проходит свет с момента Большого взрыва

$$l_H(t) = (2 - 3)t$$

Длина волны возмущения растет как  $a(t)$ .

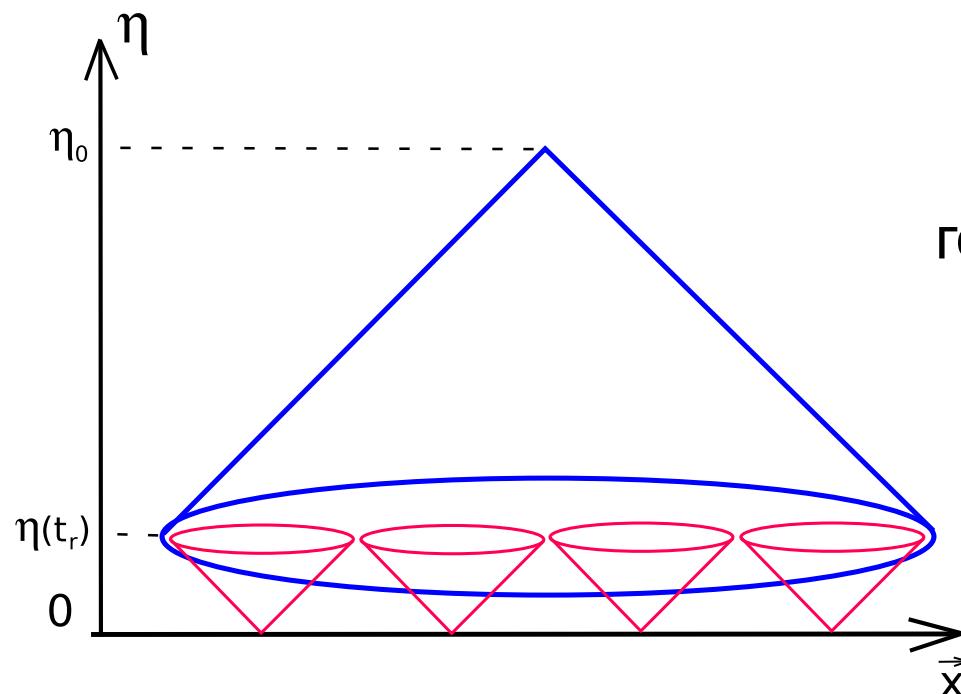
Например, при доминировании радиации

$$\lambda(t) \propto t^{1/2} \quad \text{тогда как} \quad l_H \propto t$$

Сегодня  $\lambda < l_H$ , режим под горизонтом

Раньше  $\lambda(t) > l_H$ , режим за горизонтом.

Причинная структура пространства-времени в теории горячего Большого взрыва,  $\eta = \int dt/a$  — конформное время.

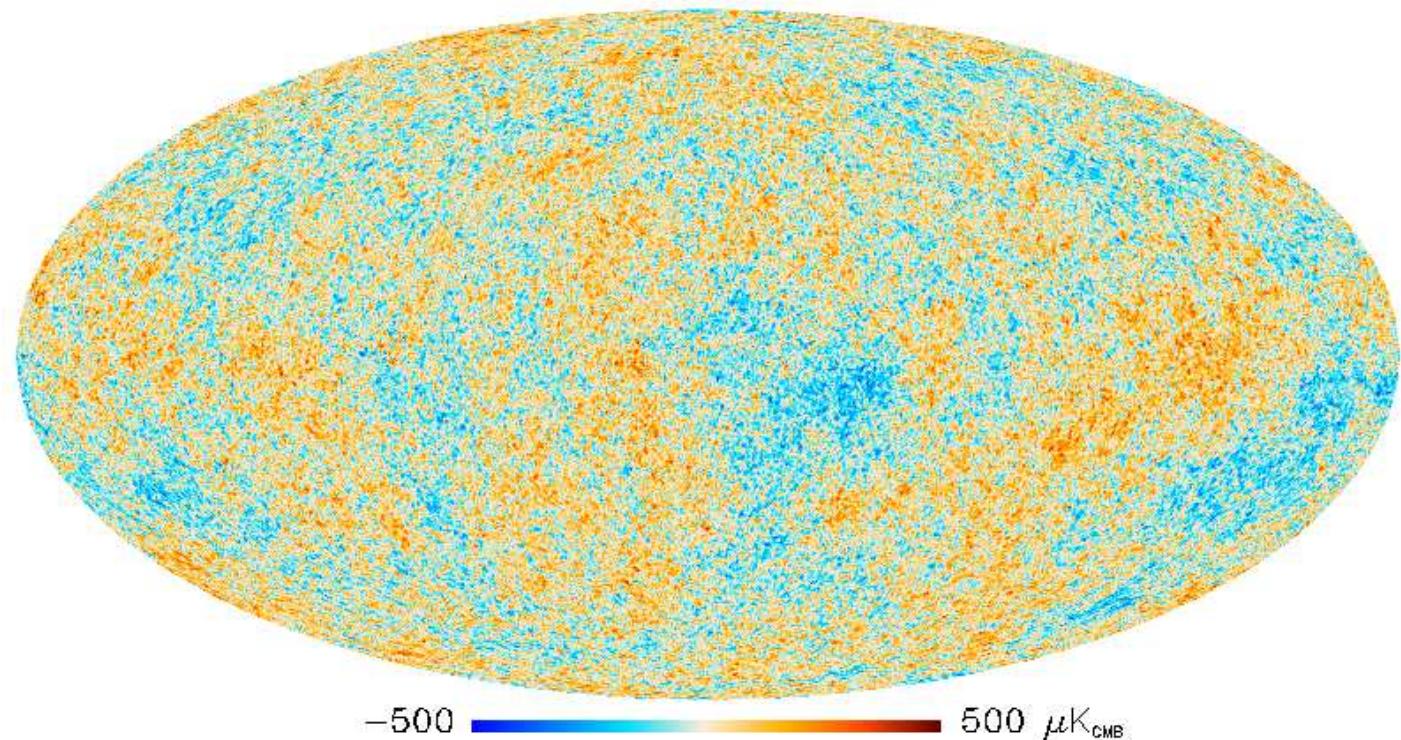


Современный угловой размер  
горизонта эпохи рекомбинации

$$\approx 2^\circ$$

Если бы горячая стадия была первой, то:

- проблема горизонта  
почему разные области, разделенные на  $\Delta\theta > 2^\circ$ ,  
выглядят одинаково (с точностью лучше  $10^{-4}$ )?
- неоднородности углового размера больше  $2^\circ$  не могли  
образоваться. А они есть!



Более короткие волны: неоднородности в барион-фотонной среде = звуковые волны **Если они были с самого начала, то есть за горизонтом, то осцилляции начинаются в одной и той же фазе, независимо от длины волны.**

Причина: решение волнового уравнения за горизонтом

$$\frac{\delta\rho}{\rho} = \text{const} \quad \text{и} \quad \frac{\delta\rho}{\rho} = \frac{\text{const}}{t^{3/2}}$$

Самосогласованность: Вселенная не была сильно неоднородной вначале. Тогда начальное условие (с точностью до амплитуды)

$$\frac{\delta\rho}{\rho} = \text{const} \implies \frac{d}{dt} \frac{\delta\rho}{\rho} = 0$$

Акустические осцилляции начинаются после входа под горизонт **при нулевой скорости среды**  $\implies$  фаза осцилляций фиксирована,

$$\frac{\delta\rho}{\rho} = A \cos \left( \int_0^t v_s \frac{k}{a(t')} dt' \right)$$

К эпохе рекомбинации волны подходят в разных фазах **в зависимости от волнового вектора:**

$$\frac{\delta\rho}{\rho}(t_r) \propto \cos \left( \int_0^{t_r} dt v_s \frac{k}{a(t)} \right) = \cos kr_s$$

( $v_s$  = скорость звука в барион-фотонной среде)

ср. сахаровские осциляции' 1965

Осцилляции в угловом спектре температуры СМВ

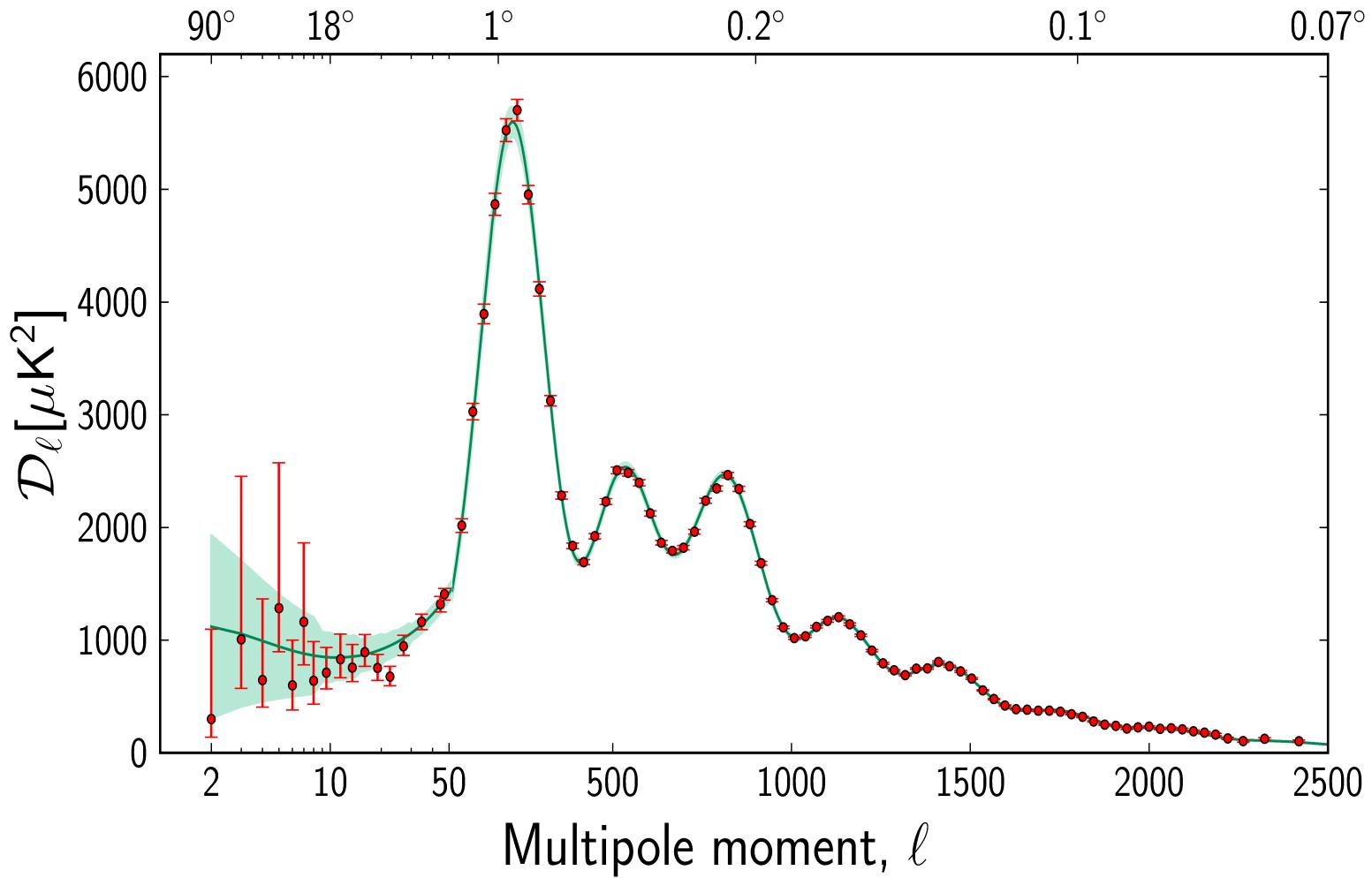
Разложение Фурье температуры по небесной сфере:

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

$\langle a_{lm}^* a_{lm} \rangle = C_l$ , угловой спектр температуры;

больше  $l \iff$  меньше угловые масштабы, короче длины волн

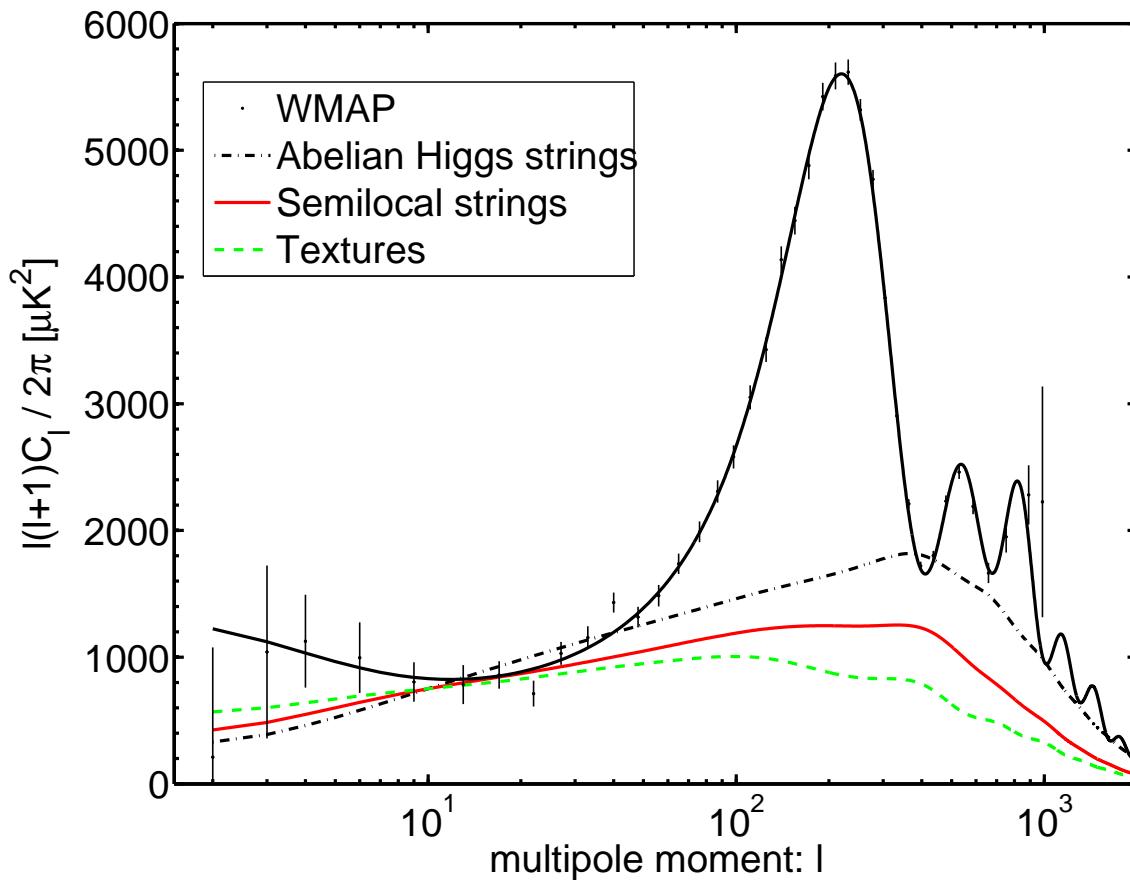
Angular scale



Planck

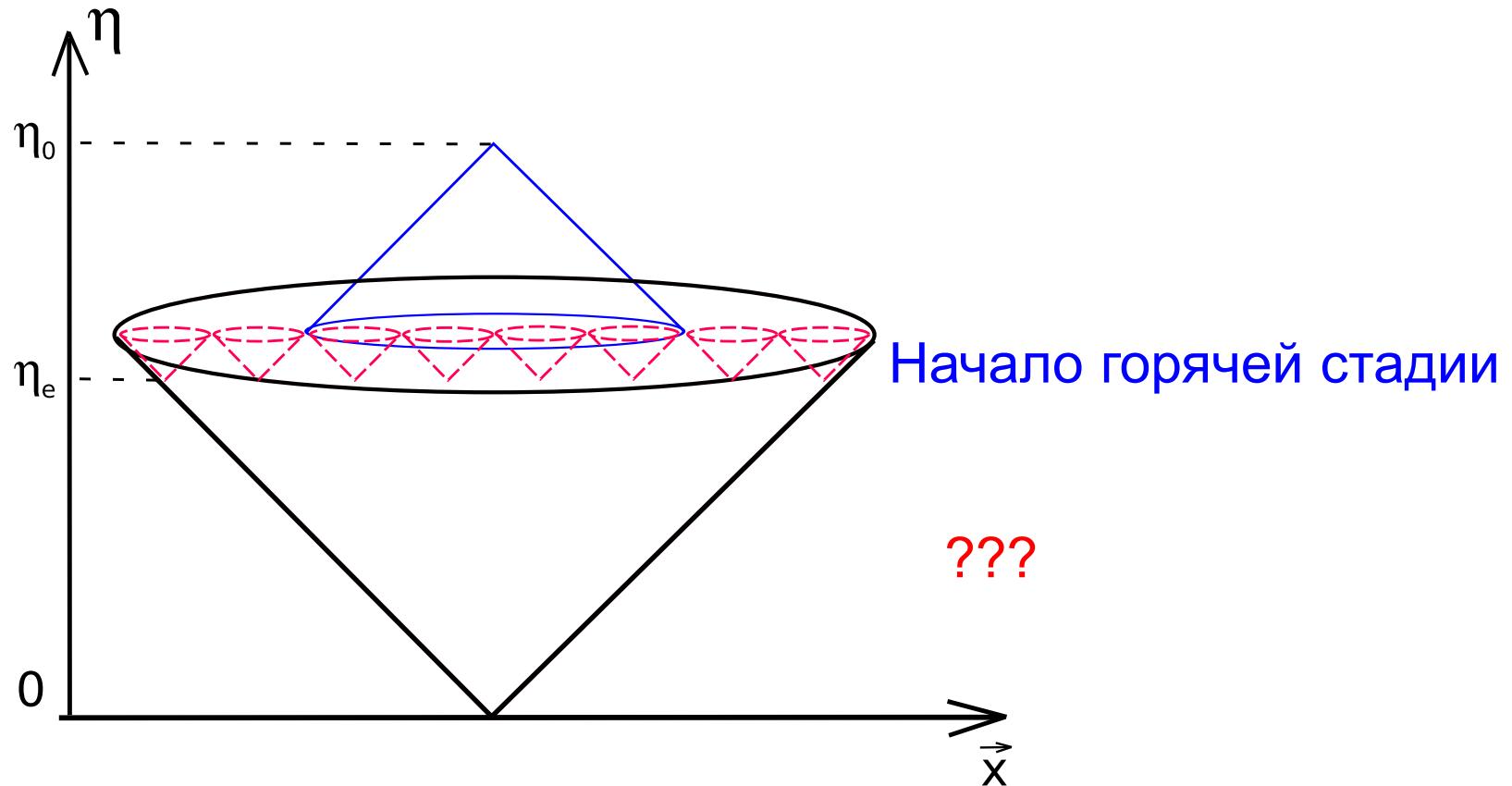
$$\mathcal{D}_l = \frac{l(l+1)}{2\pi} C_l$$

Осцилляции в угловом спектре оствтствовали бы, если бы возмущения генерировались на горячей стадии с соблюдением принципа причинности. Фазы были бы случайными. Что и происходит в конкретных моделях.



Первичные неоднородности образовались на какой-то эпохи до горячей стадии.

Эта эпоха была длительной (в конформном времени) и необычной: неоднородности были под горизонтом в начале этой эпохи. Вся наша Вселенная была в одной причинно-связанной области.



# Лучшая на сегодня гипотеза: инфляция

Старобинский'79; Guth'81; Линде'82; Albrecht and Steinhardt'82

Экспоненциальное расширение Вселенной с почти постоянным темпом (параметром Хаббла)

$$ds^2 = dt^2 - a^2(t)d\vec{x}^2$$

$$a(t) = e^{\int H dt}, \quad H \approx \text{const}$$

- Начальный микроскопический участок пространства растягивается до всей видимой части Вселенной за  $t \sim 100 H^{-1} \Rightarrow$  при  $t \gg 100 H^{-1}$  Вселенная ОЧЕНЬ большая.

**NB:** Характерный временной масштаб инфляции

$$H^{-1} \sim 10^{-37} \text{ с}$$

энергетический масштаб

$$\rho^{1/4} \simeq \sqrt{M_{Pl} H} \sim 10^{16} \text{ ГэВ}$$

# Альтернативы инфляции:

- Вселенная с отскоком: сжатие — отскок — растяжение
- “Генезис”: старт с пространства Минковского

Creminelli et.al.'06; '10

Трудно, но возможно  
Уравнения Эйнштейна:

$$H^2 = \frac{8\pi}{3} G\rho , \quad \frac{dH}{dt} = -4\pi(\rho + p)$$

$\rho = T_{00}$  плотность энергии,  $p = T_{11} = T_{22} = T_{33}$  эффективное давление.

Требуется  $\Rightarrow \frac{dH}{dt} > 0 \Rightarrow \rho > 0$  и  $p < -\rho$

Очень экзотическая материя или модифицированная гравитация.

Тем не менее, теоретико-полевые примеры есть (теории с галилеонами).

## Еще свойства неоднородностей плотности (верны с точностью до ошибок измерений!)

- Первичные неоднородности – гауссово случайное поле

Указание на источник: усиленные вакуумные флуктуации слабовзаимодействующего квантового поля

- Инфляция работает очень хорошо: она усиливает вакуумные флуктуации всех полей, включая инфлатон – поле, несущее основную энергию  
⇒ возмущения плотности энергии.

Муханов, Чибисов'81; Hawking'82; Старобинский' 82;  
Guth, Pi'82; Bardeen et.al.'83

- Усиление вакуумных флуктуаций далеко не автоматическое в альтернативных сценариях

- Спектр первичных возмущений почти плоский: нет выделенного масштаба длин

Однородное изотропное гауссово случайное поле:

$$\langle \frac{\delta\rho}{\rho}(\vec{k}) \frac{\delta\rho}{\rho}(\vec{k}') \rangle = \frac{1}{4\pi k^3} \mathcal{P}(k) \delta(\vec{k} + \vec{k}')$$

$\mathcal{P}(k)$  = спектр мощности, флуктуация в логарифмическом интервале длин волн

$$\langle \left( \frac{\delta\rho}{\rho}(\vec{x}) \right)^2 \rangle = \int_0^\infty \frac{dk}{k} \mathcal{P}(k)$$

Плоский спектр:  $\mathcal{P}$  не зависит от  $k$

Параметризация

Harrison' 70; Зельдович' 72,

Peebles,Yu' 70

$$\mathcal{P}(k) = A \left( \frac{k}{k_*} \right)^{n_s - 1}$$

$A$  = амплитуда,  $(n_s - 1)$  = наклон,  $k_*$  = вопрос удобства.

Плоский спектр  $\iff n_s = 1$ . Эксперимент:  $n_s = 0.97 \pm 0.01$

## Плоскость спектра $\iff$ симметрия?

- Инфляция: симметрия пространства де Ситтера  $SO(4, 1)$

$$ds^2 = dt^2 - e^{2Ht} d\vec{x}^2$$

В частности, симметрия относительно растяжений пространства, дополненных сдвигом времени

$$\vec{x} \rightarrow \lambda \vec{x}, \quad t \rightarrow t - \frac{1}{2H} \log \lambda$$

- Альтернатива: конформная симметрия  $SO(4, 2)$

включает растяжения,  $x^\mu \rightarrow \lambda x^\mu$

$\implies$  возможность генерировать плоский спектр

Отмечали Antoniadis, Mazur, Mottola' 97

Конкретные сценарии: B.P.' 09;

Creminelli, Nicolis, Trincherini' 10.

NB: (Супер)конформная симметрия давно привлекает внимание в контексте квантовой теории поля и физики частиц. Особенно сейчас: adS/CFT соответствие, и т.д.

Что если наша Вселенная стартовала или проходила через метастабильное конформно-инвариантное состояние, а затем перешла в менее симметричное современное состояние?

Начало пути: пока упрощенные модели и общие аргументы.

# А как на самом деле?

Пока неизвестно. Нужно предсказать и обнаружить более тонкие свойства первичных возмущений

- Реликтовые гравитационные волны предсказываются простыми (и, значит, правдоподобными) инфляционными моделями, отсутствуют в неинфляционных сценариях  
Длины волн от 100 Мпк до размера видимой Вселенной

Большие амплитуды,  $h \sim 10^{-5} - 10^{-6}$  (ср.  $h \lesssim 10^{-22}$  для грав. волн астрофизического происхождения)

Почти плоский спектр мощности

Должны давать вклад в анизотропию температуры СМВ

В.Р., Сажин, Веряскин' 82; Fabbri, Pollock' 83; ...

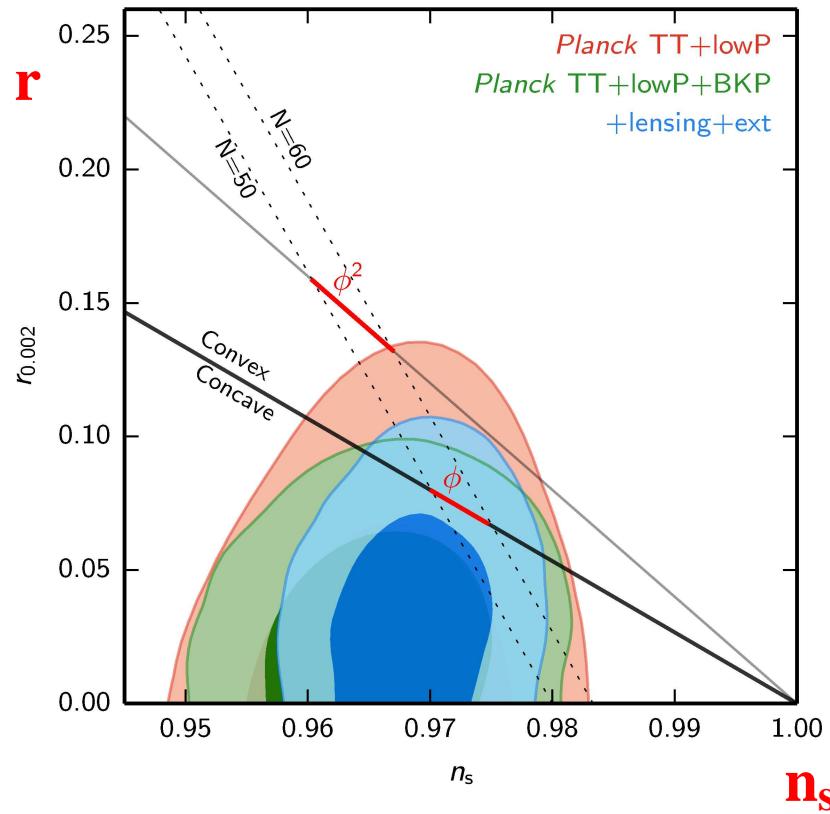
и особенно в поляризацию СМВ

Баско, Полнарев' 1980; Полнарев' 1985; Sazhin, Benitez' 1995  
Kamionkowski, Kosowsky, Stebbins' 96; Seljak, Zaldarriaga' 96; ...

Открытие = доказательство инфляции

# Сегодня

Скалярный спектральный индекс и грав. волны



$$r = \left( \frac{\text{амплитуда грав. волн}}{\text{амплитуда возмущений плотности}} \right)^2$$

Заявка ВICEP-2 (март 2014):  $r \approx 0.2$  не подтвердились

- Негауссовость

- Очень мала в простых инфляционных моделях

Maldacena' 03

- заметна в более вычурных моделях инфляции и в альтернативных сценариях

Например, трехточечная **функция**

$$\left\langle \frac{\delta\rho}{\rho}(\mathbf{k}_1) \frac{\delta\rho}{\rho}(\mathbf{k}_2) \frac{\delta\rho}{\rho}(\mathbf{k}_3) \right\rangle = \delta(\mathbf{k}_1 + \mathbf{k}_2 + \mathbf{k}_3) G(k_i^2, \mathbf{k}_1 \mathbf{k}_2, \mathbf{k}_1 \mathbf{k}_3)$$

Вид  $G(k_i^2, \mathbf{k}_1 \mathbf{k}_2, \mathbf{k}_1 \mathbf{k}_3)$  зависит от модели  $\implies$   
потенциально можно сделать выбор между моделями.

- Форма четырехточечной функции своеобразна в конформных моделях

Либанов, Миронов, В.Р.' 10, 11

## ● Статистическая анизотропия

$$\mathcal{P}(\mathbf{k}) = \mathcal{P}_0(k) \left( 1 + w_{ij}(k) \frac{k_i k_j}{k^2} + \dots \right)$$

- Анизотропия Вселенной до горячей стадии
- Возможна в инфляционных моделях с большими векторными полями (очень вычурно!)

Ackerman, Carroll, Wise' 07; Pullen, Kamionkowski' 07;  
Watanabe, Kanno, Soda' 09

- Естественна в конформных моделях

Либанов, В.Р.' 10; Либанов, Рамазанов, В.Р.' 11

Уже сейчас есть довольно жесткие ограничения

Рамазанов, Рубцов' 14

# Итак

- Нет сомнений, что горячей стадии предшествовала какая-то другая эпоха. Вопрос: **какой была эта эпоха?**
- **Инфляция** согласуется со всеми наблюдательными данными. Но есть и альтернативы: например, **(супер)конформное начало космологической эволюции.** Есть и другие сценарии.

Отскок с материей, Finelli, Brandenberger' 01.

Отрицательный экспоненциальный потенциал, Lehners et. al.' 07;  
Buchbinder, Khouri, Ovrut' 07; Creminelli, Senatore' 07.

скаляр Лифшица, Mukohyama' 09

- Пока известны только общие свойства неоднородностей
- Требуется обнаружить и изучить **более тонкие свойства**

Изучая Вселенную  
на гигантских масштабах расстояний  
(сотни миллионов — миллиарды  
световых лет),  
мы рассчитываем узнать  
о первых мгновениях ее эволюции  
и процессах, происходивших  
при сверхвысоких энергиях

Изучая Вселенную  
на гигантских масштабах расстояний  
(сотни миллионов — миллиарды  
световых лет),  
мы рассчитываем узнать  
о первых мгновениях ее эволюции  
и процессах, происходивших  
при сверхвысоких энергиях

И узнаем!