

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 ($\gtrsim 250 \text{ Мпк}$).
 - Глубокие обзоры галактик и квазаров \implies 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 λ ,
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° даже для треугольников
размера видимой части Вселенной.

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

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

\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 $a < 1$.

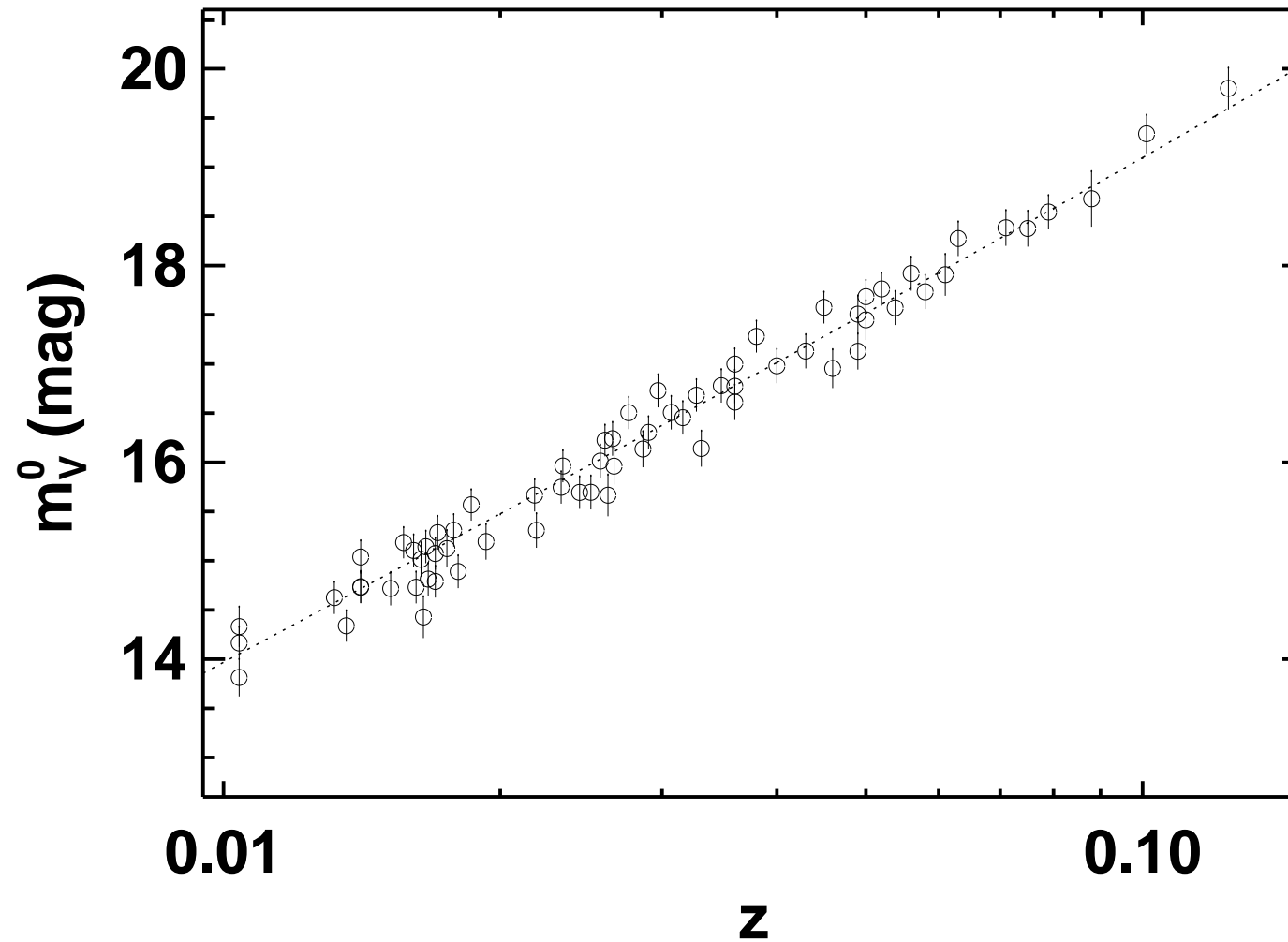
$H(t) = \frac{\dot{a}}{a}$: параметр Хаббла, темп расширения

- 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 1a



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

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

Температура CMB сегодня

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

Fig.

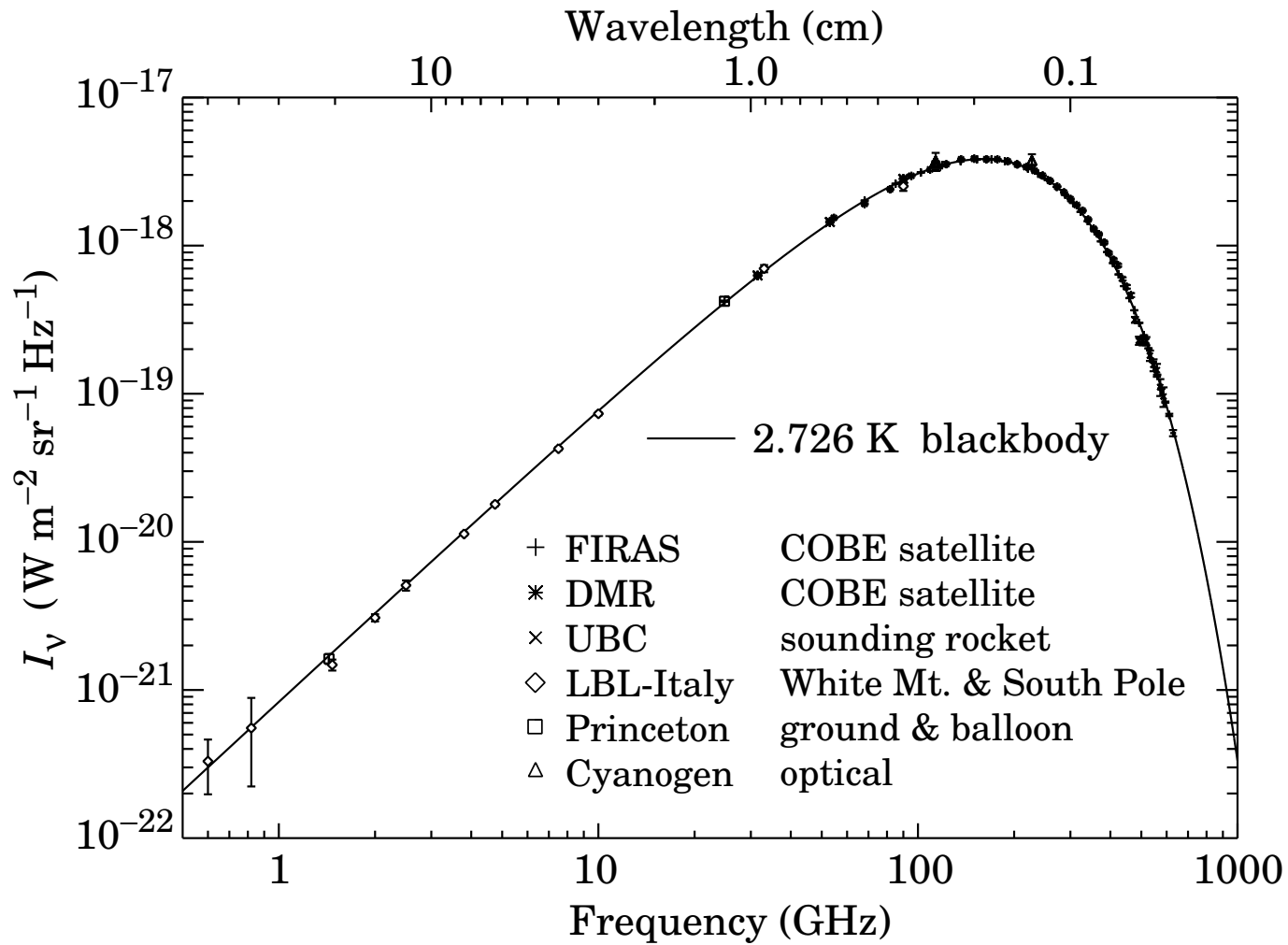
Раньше Вселенная была теплее и плотнее

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 ρ – полная плотность энергии, G ньютоновская гравитационная постоянная.

Спектр CMB



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

Известные ранние эпохи

- **Рекомбинация**, переход плазма \implies газ.

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

Последнее рассеяние фотонов СМВ

Фотография (буквально!) Вселенной той эпохи

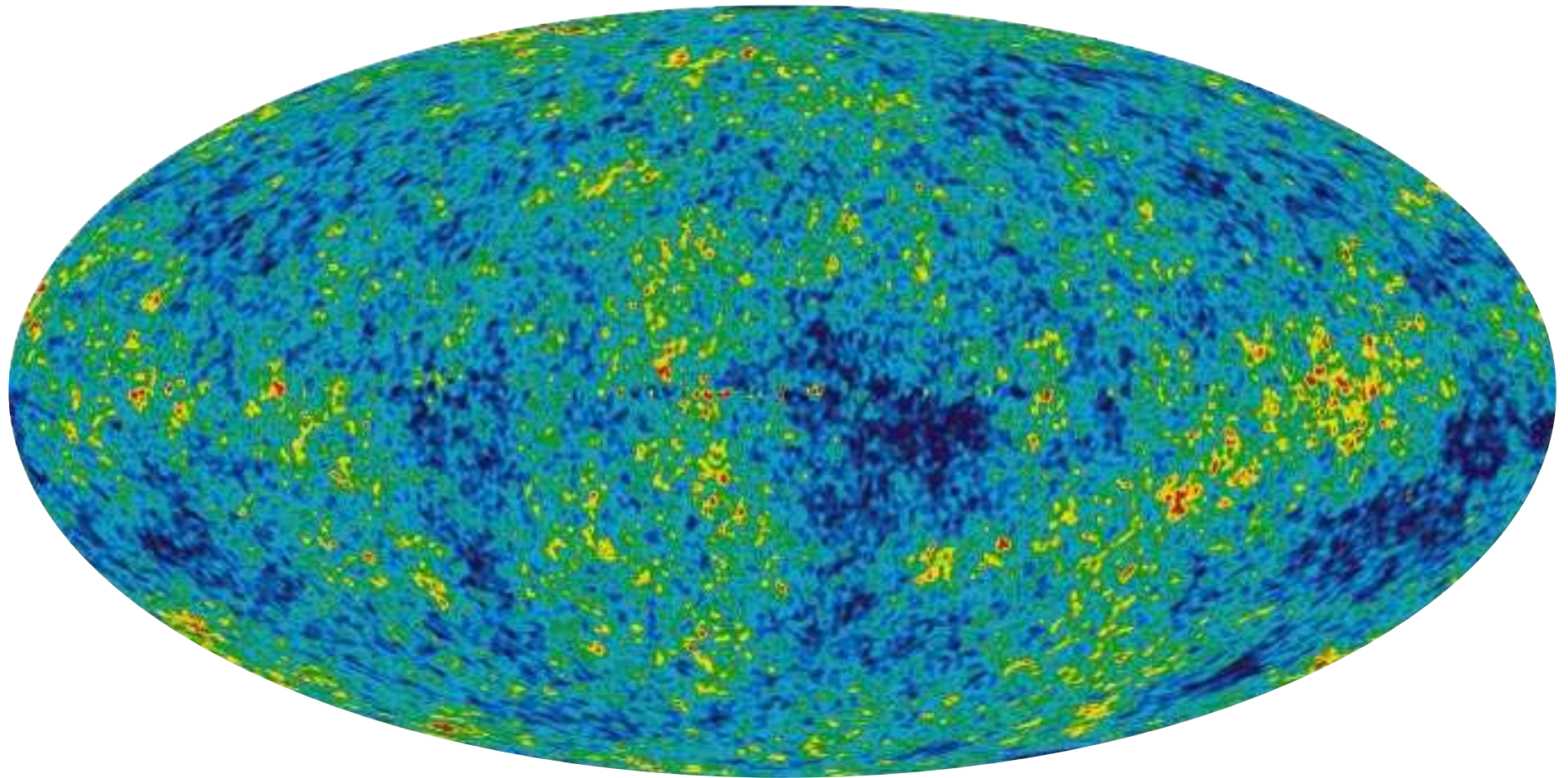
Fig.

Вселенная была гораздо более однородной: неоднородности на уровне

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

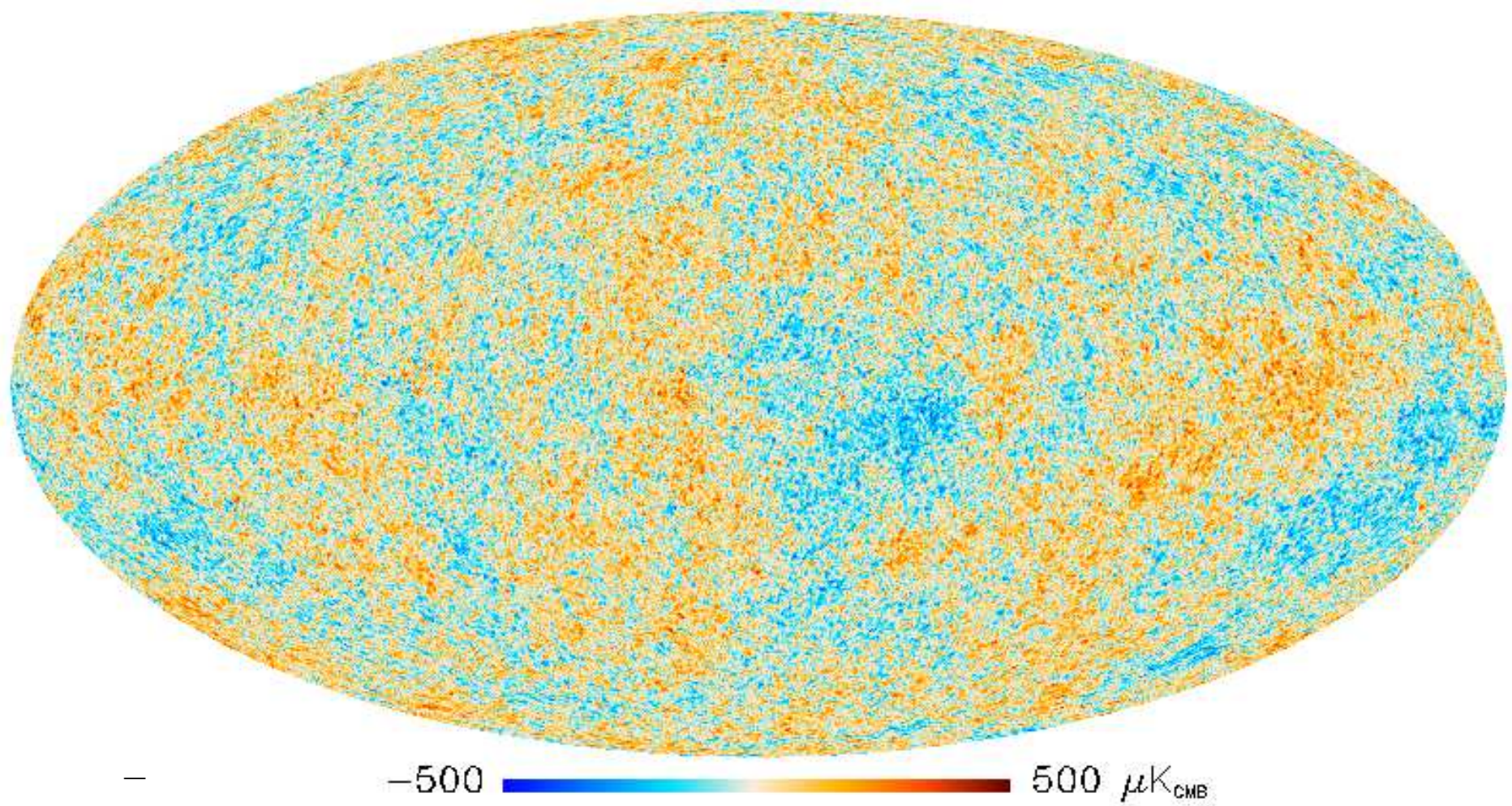
Но фотка очень информативная!

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



WMAP, 2003

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

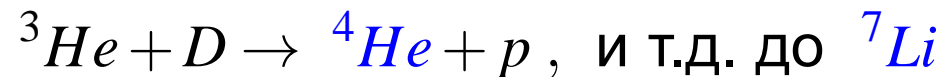
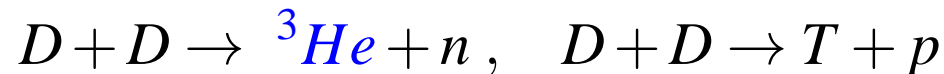
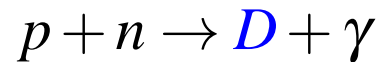


Planck, 2013

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:

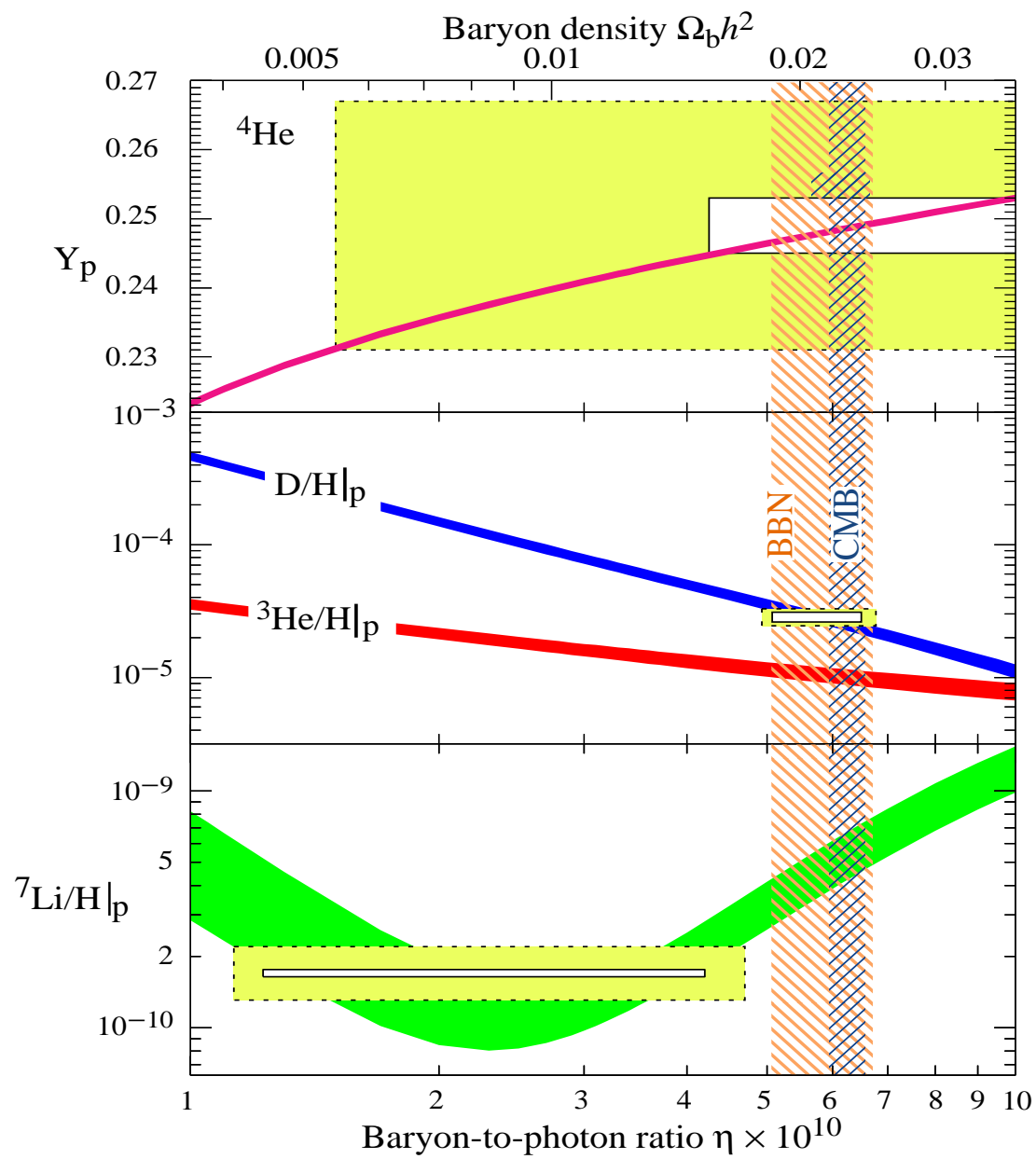
плотность барионов = протонов + нейтронов,

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



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

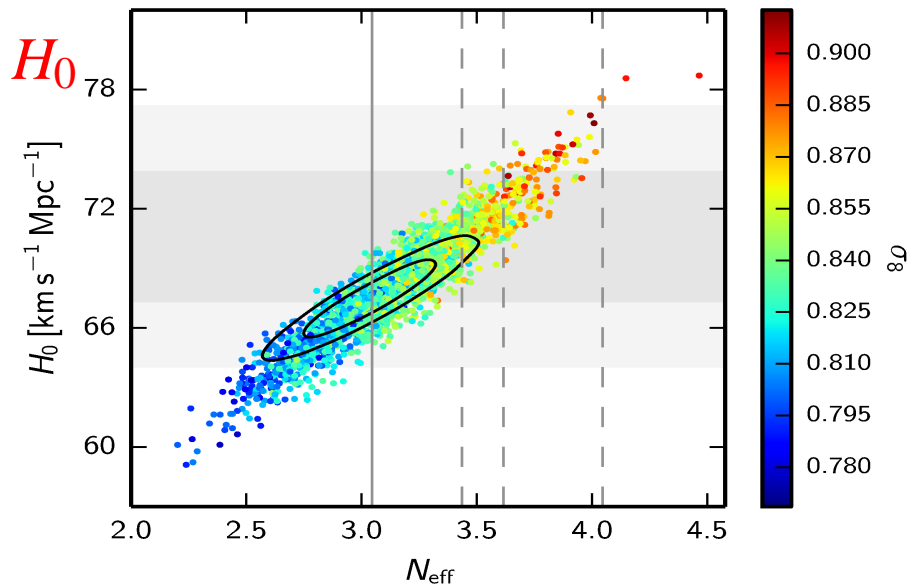
Эпоха заковки нейтрино

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

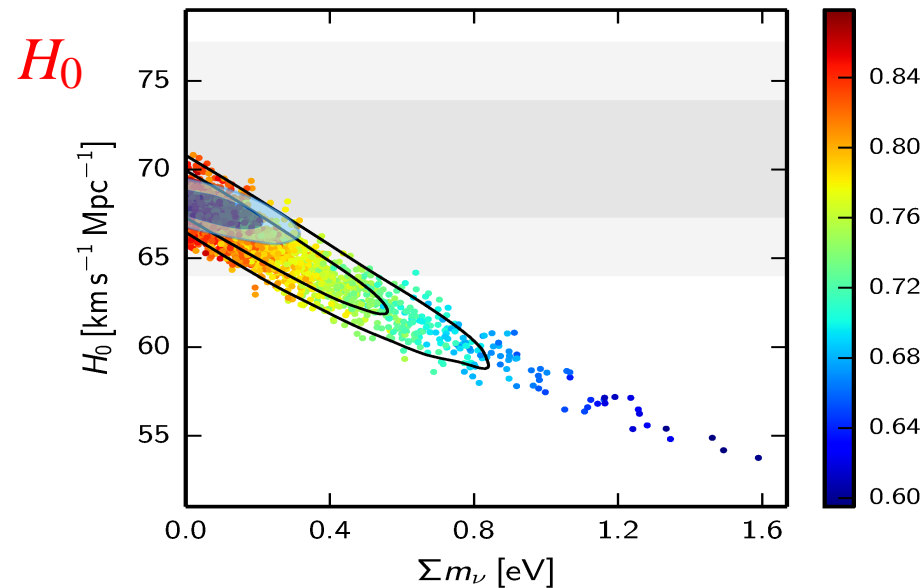
Выключение реакций типа $\nu\bar{\nu} \longleftrightarrow e^+e^-$

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

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



N_ν

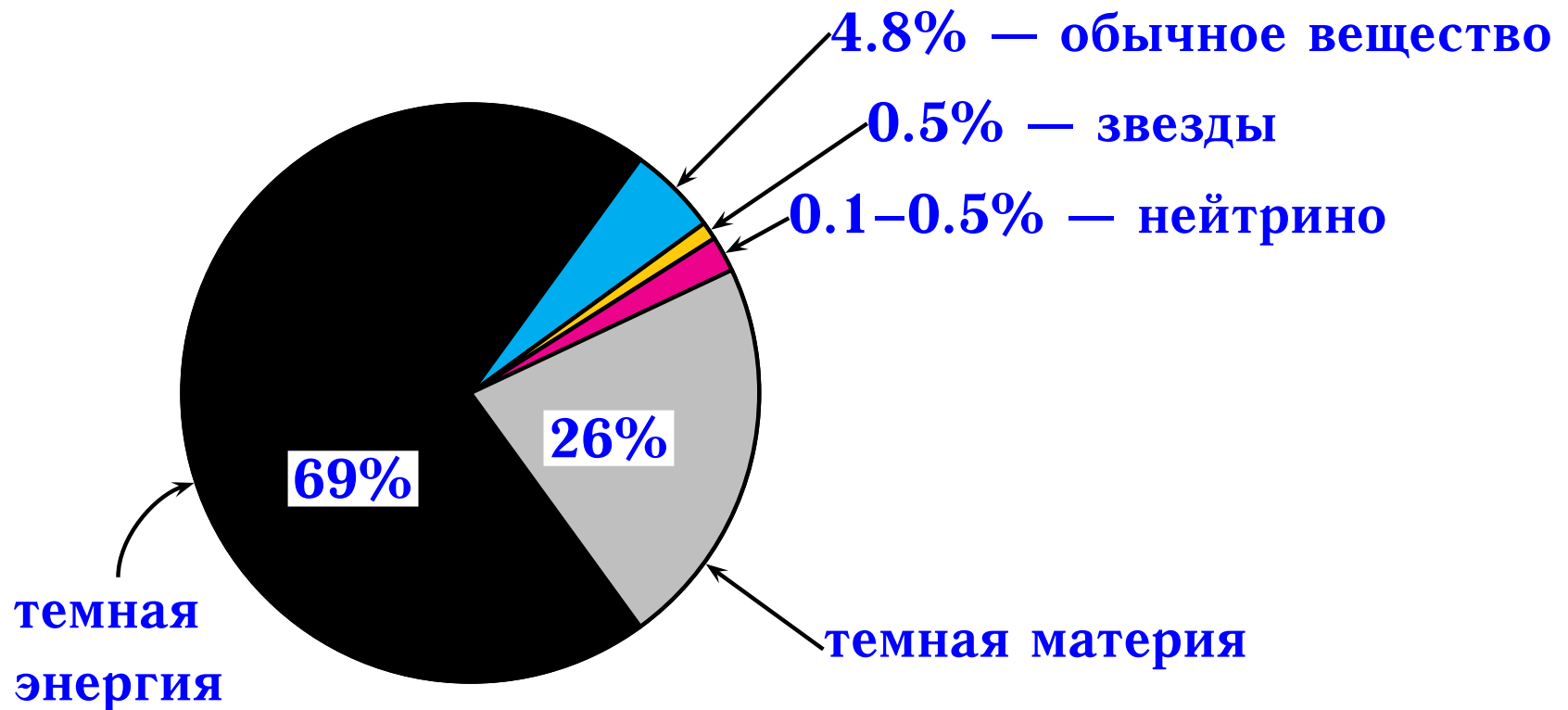


$\sum m_\nu$

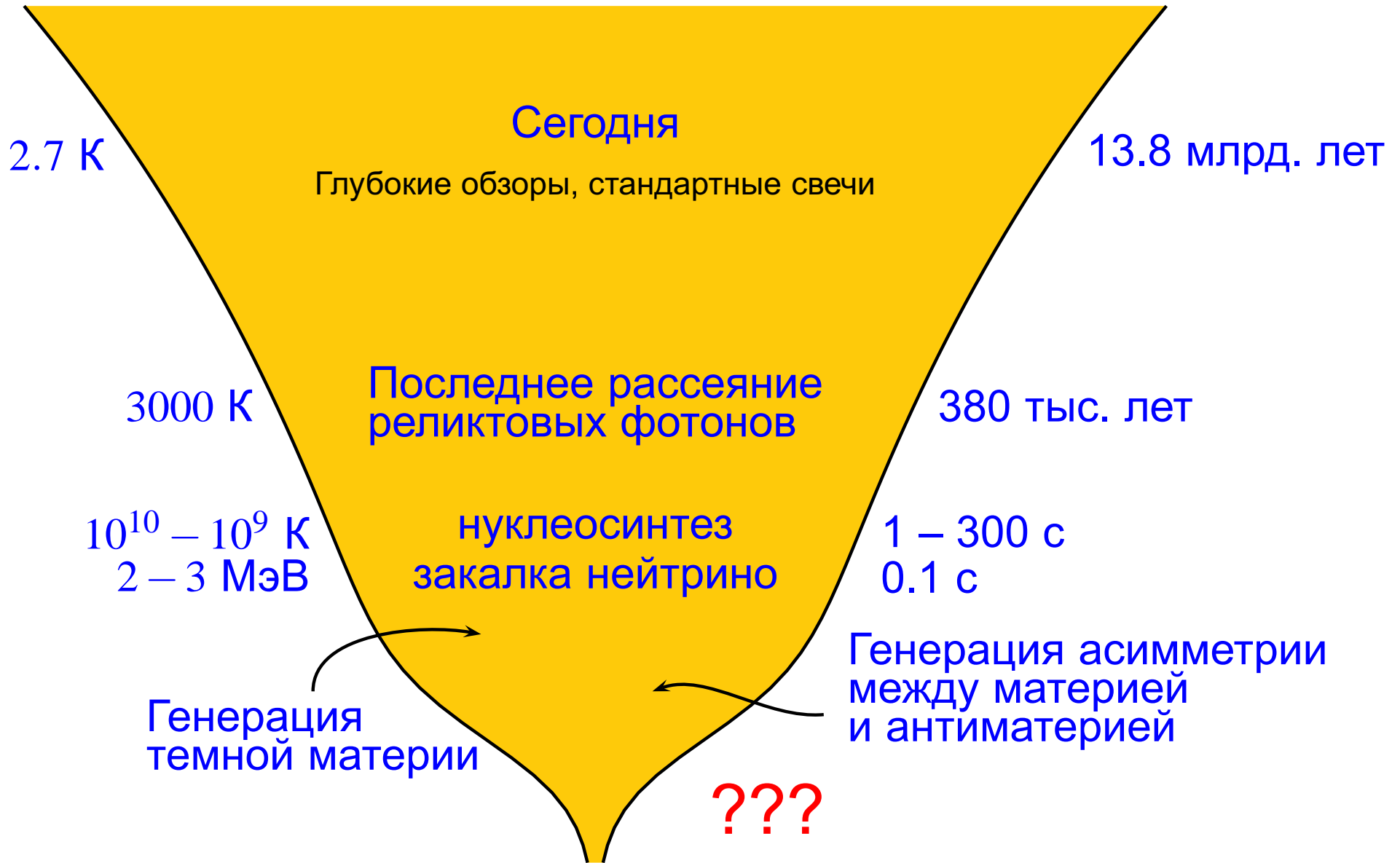
- Понимаем Вселенную в возрасте ~ 0.1 с, при температурах $\sim 2 - 3$ МэВ.
В частности, теория гравитации — общая теория относительности — работала так же, как сейчас.

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 $T \simeq 1$ eV, $t \simeq 60$ 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

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

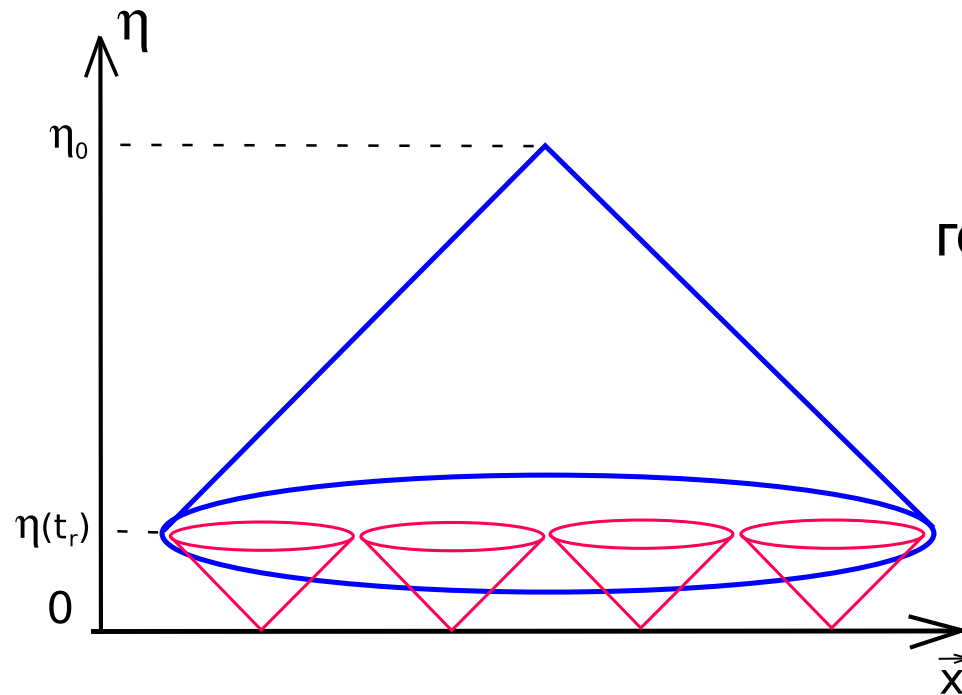
Длина волны возмущения растет как $a(t)$.
Например, при доминировании радиации

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

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.

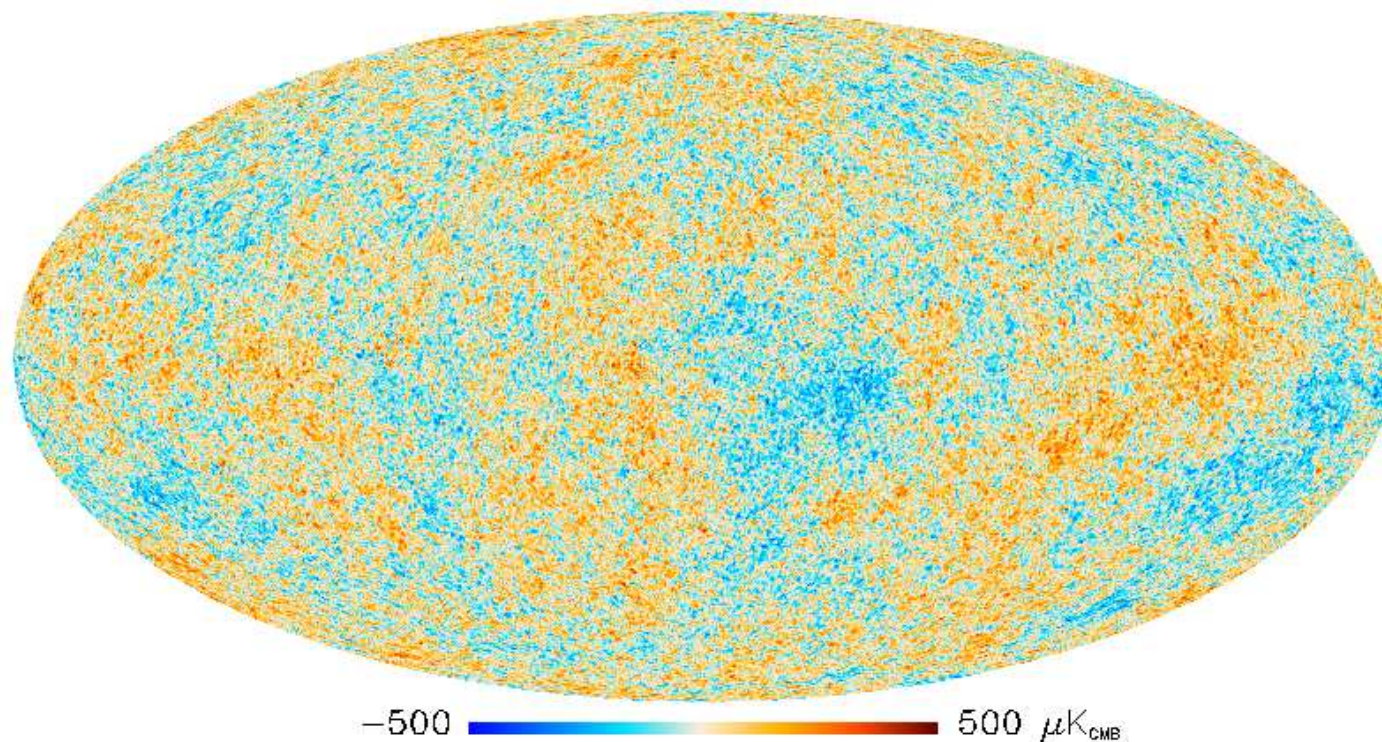


Современный угловой размер
горизонта эпохи рекомбинации

$$\approx 2^\circ$$

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° 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:**

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

(v_s = скорость звука в барион-фотонной среде)

ср. сахаровские осцилляции' 1965

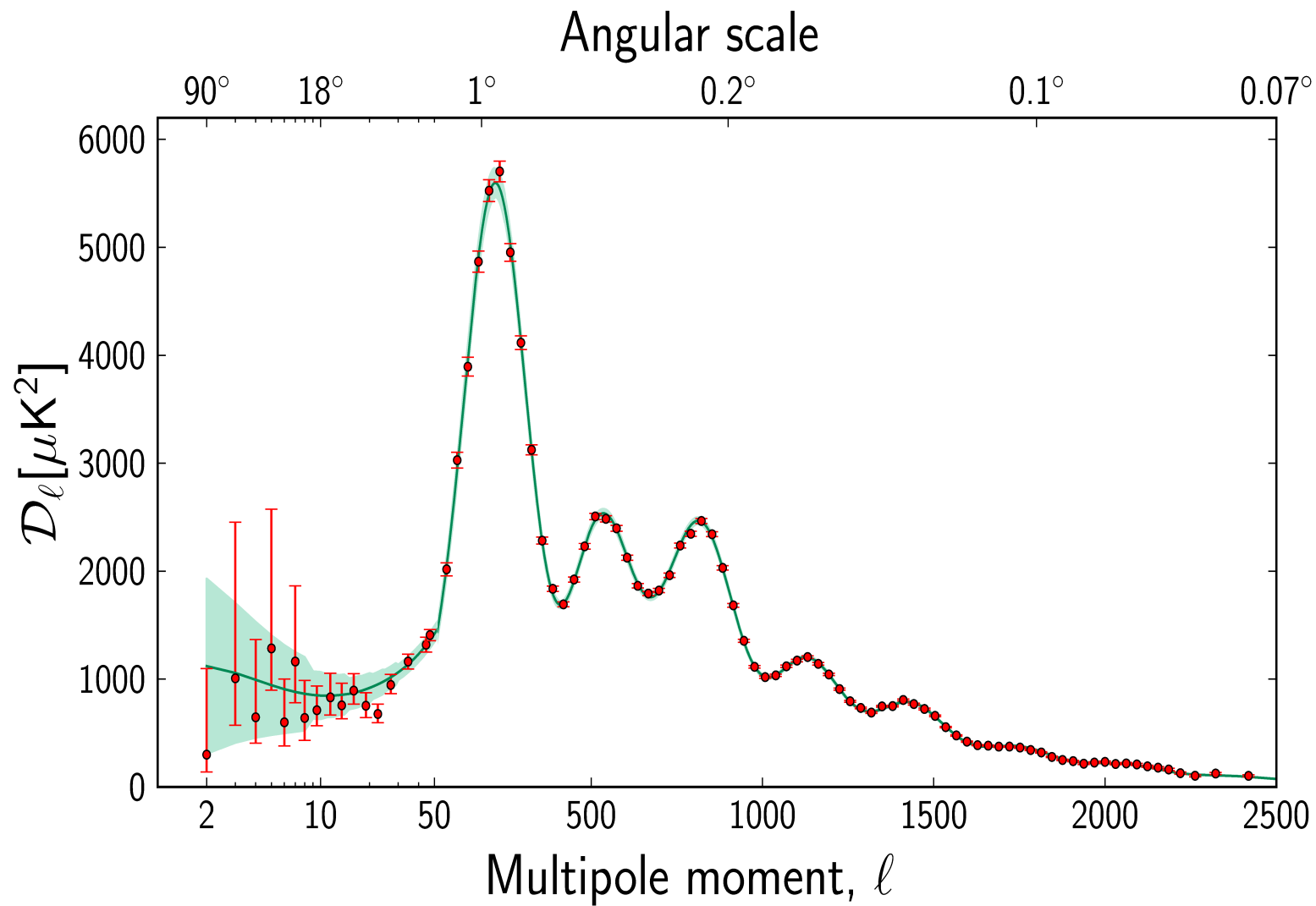
Осцилляции в угловом спектре температуры СМВ

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;

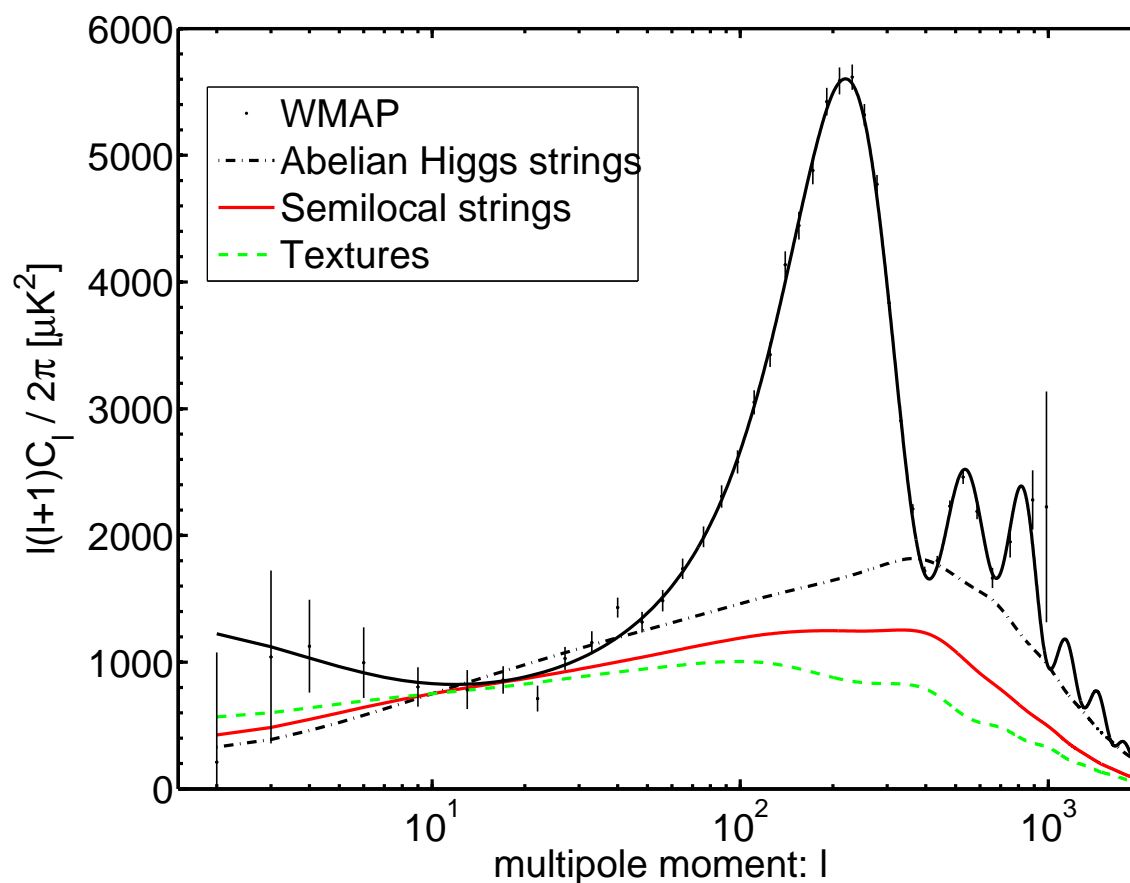
больше $l \iff$ меньше угловые масштабы, короче длины волн



Planck

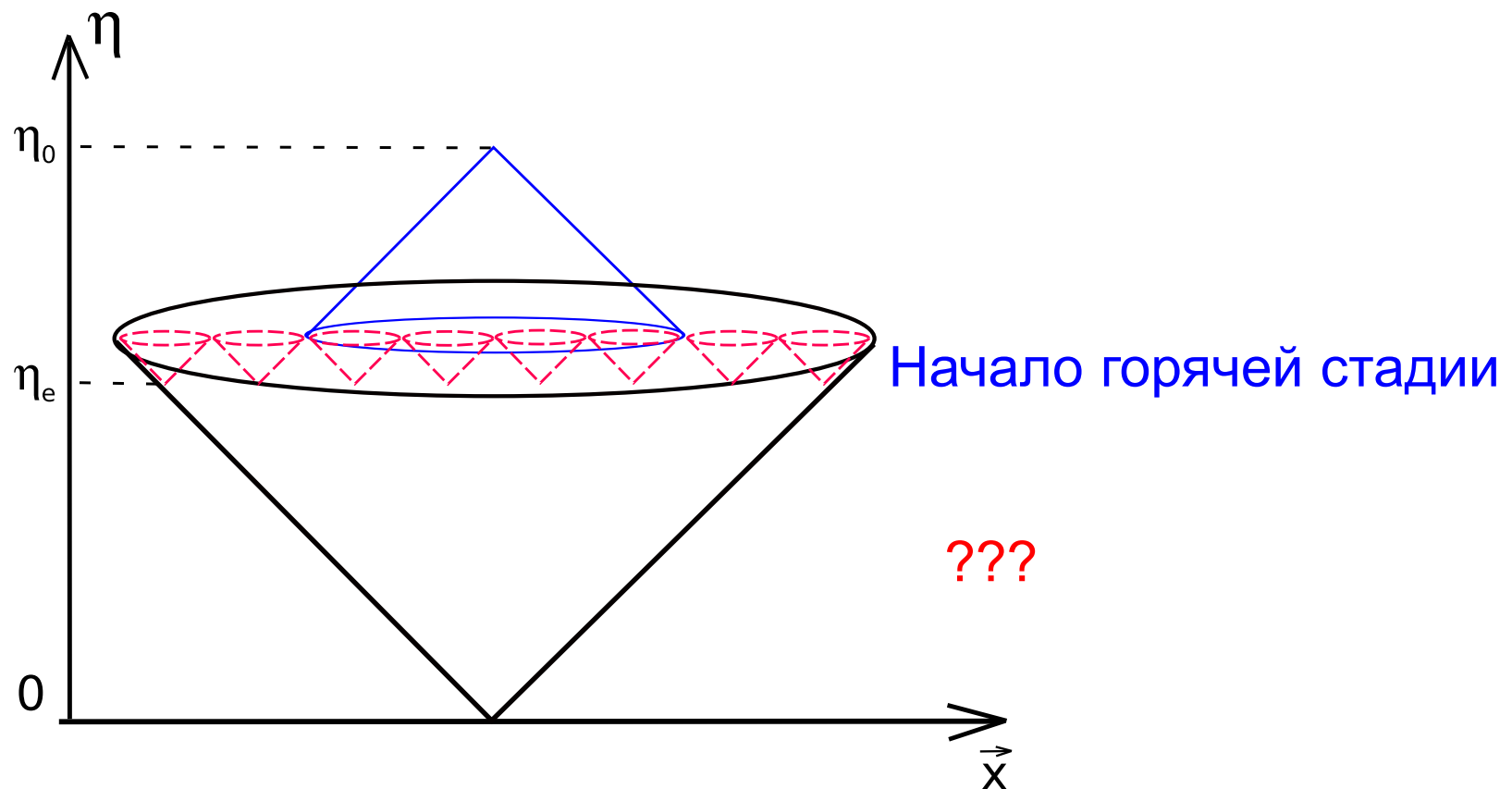
$$\mathcal{D}_l = \frac{l(l+1)}{2\pi} C_l$$

Осцилляции в угловом спектре отсутствовали 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:

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

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

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

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

Harrison' 70; Зельдович' 72,

Параметризация

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: $n_s = 0.97 \pm 0.01$

Плоскостность 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; ...

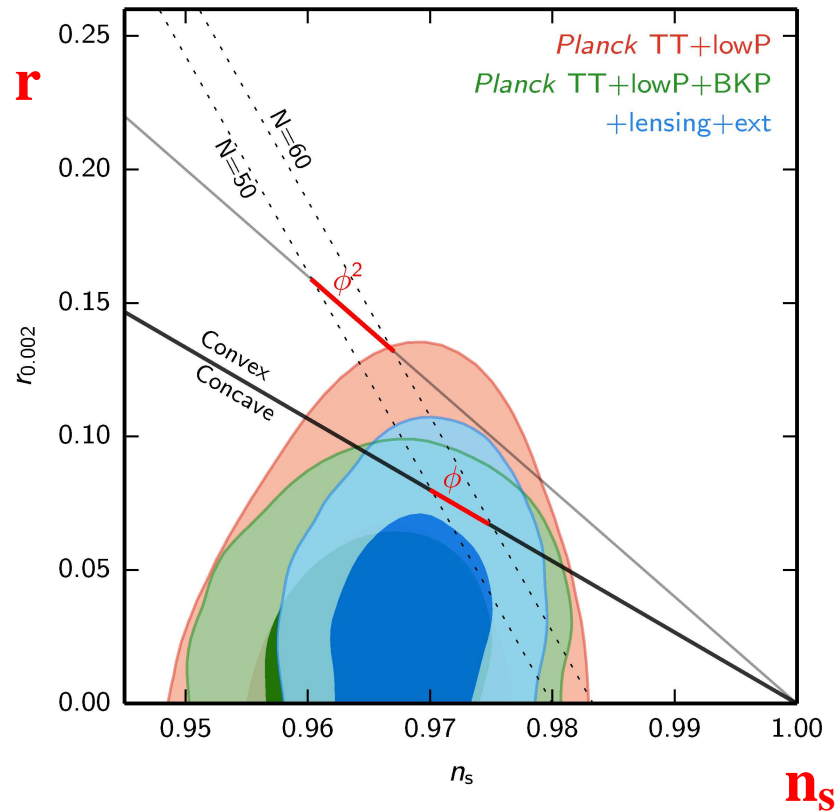
и особенно в поляризацию СМВ

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 BICEP-2 (март 2014): $r \approx 0.2$ не подтвердилась

● 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, Lehnars 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!