

**За что дали Нобелевскую премию в 2011 г.?**

**Какой была Вселенная до горячего  
Большого Взрыва?**

В. А. Рубаков

Институт ядерных исследований РАН, физфак МГУ

# За что дали Нобелевскую премию?

- Вселенная расширяется, пространство растягивается, галактики разбегаются друг от друга

- Длина волны фотона тоже растет, фотон краснеет.

Все это описывается выражением для интервала

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

вместо интервала пространства Минковского

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

Если длина волны фотона в момент излучения равна  $\lambda$ , то сегодня она равна

$$\lambda_0 = \lambda \frac{a_0}{a(t_{\text{исп}})} \equiv 1 + z(t_{\text{исп}})$$

$a_0 \equiv a(t_0)$  — современное значение масштабного фактора.  
 $z(t)$  — красное смещение, соответствующее моменту  $t$  в прошлом.

- Небольшие  $t_0 - t \iff$  небольшие  $z$ : закон Хаббла (1930-е годы)

$$z = H_0 r, \quad H_0 = \frac{\dot{a}}{a}(t_0)$$

Рис.

$H_0$  = современный темп расширения Вселенной  
= параметр Хаббла

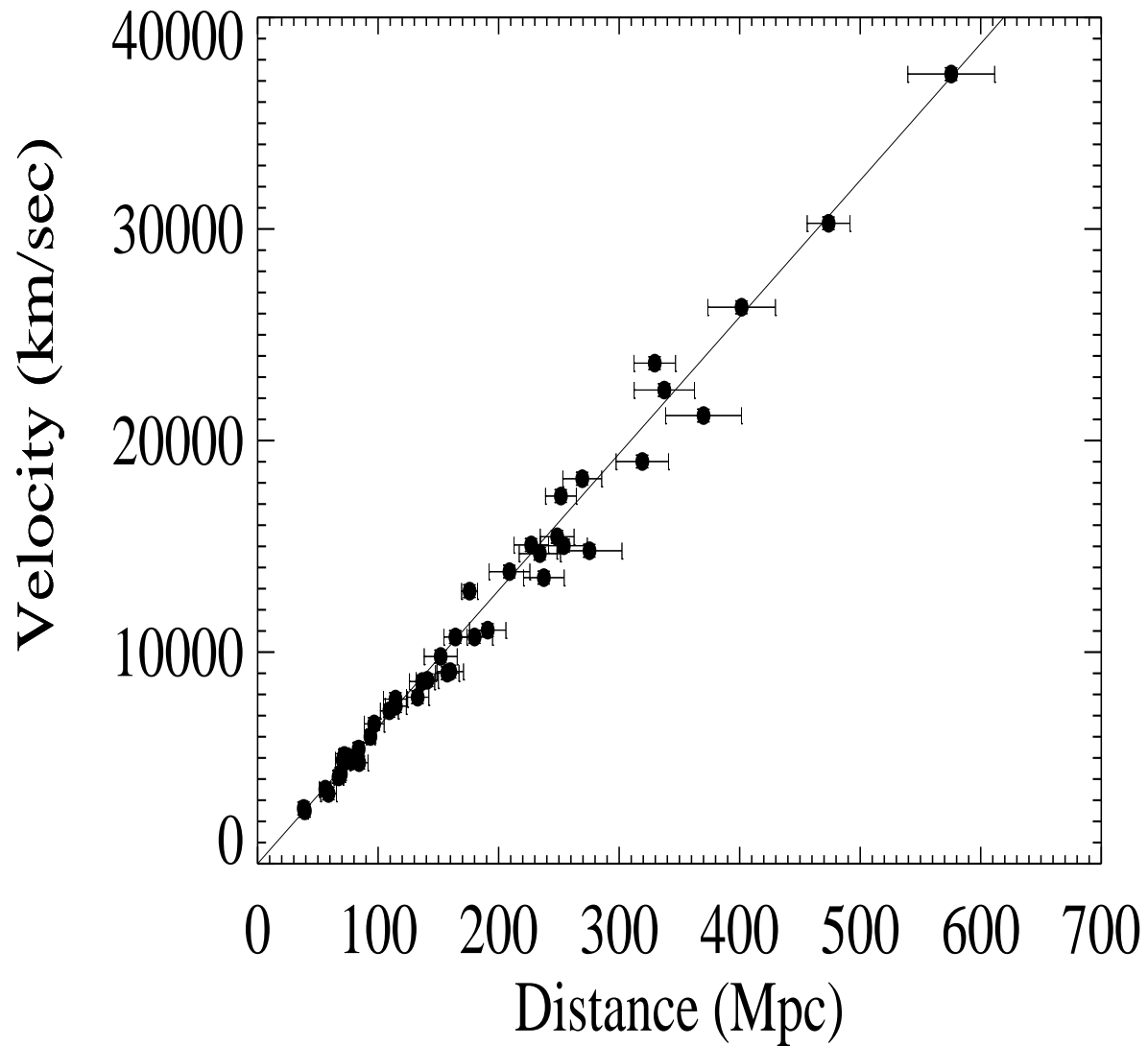
$$H_0 = 71 \pm 2 \frac{\text{км/с}}{\text{Мпк}}$$

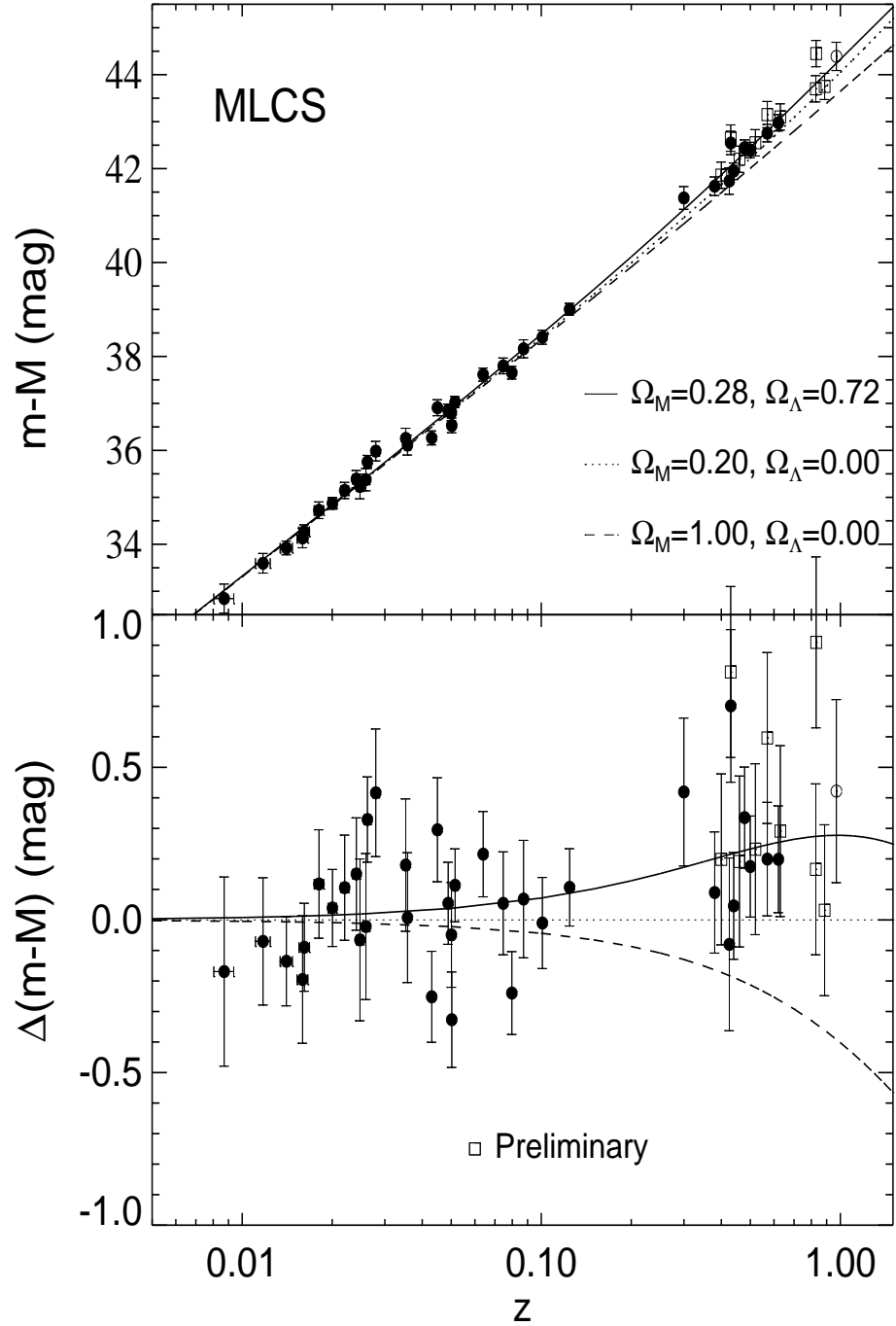
**NB: 1 Мпк = 3 млн. световых лет**

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

- Вселенная сегодня расширяется **с ускорением**,  $\ddot{a} > 0$ .  
**Нобелевская премия за 2011 г.**
- Первое надежное свидетельство: **наблюдения сверхновых типа 1a** (стандартных свеч), 1998 г.

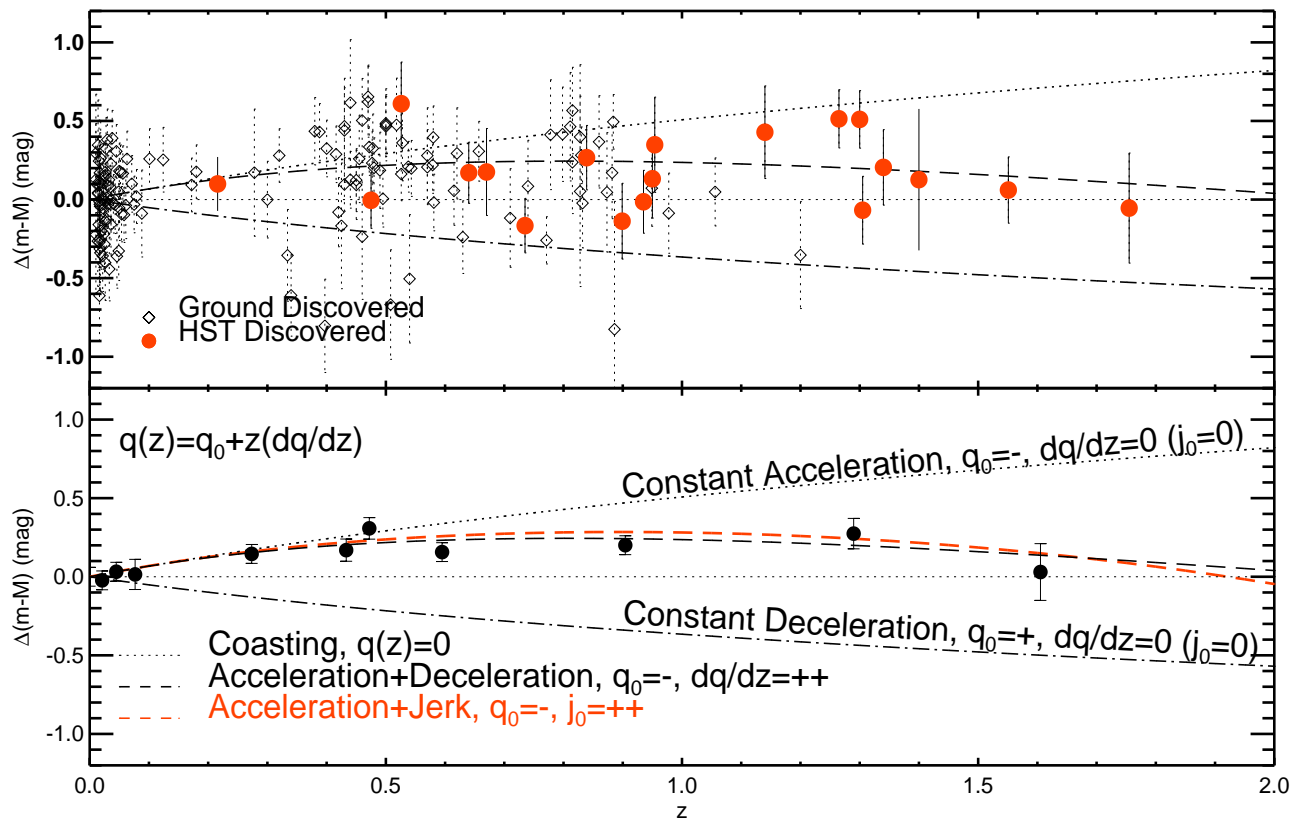
# Небольшие $z$ : закон Хаббла





$$\Omega_M = \frac{\text{плотность темной материи}}{\text{полная плотность энергии}} ;$$

$$\Omega_\Lambda = \frac{\text{плотность темной энергии}}{\text{полная плотность энергии}}$$



## Интерпретация:

- В рамках общей теории относительности:

Темп расширения **растет**



АНТИГРАВИТАЦИЯ

- Новая “субстанция” — темная энергия.  
Разлита равномерно во Вселенной, не собирается в галактики.
  - Нет противоречия с общей теорией относительности, если субстанция имеет **отрицательное давление**.
  - Энергия вакуума  $\equiv$  космологическая постоянная?
  - Новое сверхслабое поле?
- Или новая гравитация на сверхбольших расстояниях?

# Природа темной энергии — возможно главная загадка физики XXI века

Плотность темной энергии  $\varepsilon_{DE} = 4 \frac{\text{ГэВ}}{\text{м}^3} \implies$

масштаб энергий  $\Lambda_{DE} \sim 10^{-3} \text{ эВ}$

$\sim 10^{-12} \Lambda_{QCD} \sim 10^{-14} M_W \sim 10^{-31} M_{Pl}$

$\Lambda_{QCD} \sim 100 \text{ МэВ} = 10^8 \text{ эВ}$ ,  $M_W \sim 100 \text{ ГэВ} = 10^{11} \text{ эВ}$ ,  
 $M_{Pl} \sim 10^{19} \text{ ГэВ} = 10^{28} \text{ эВ}$  — энергетические масштабы сильных,  
электрослабых и гравитационных взаимодействий.

**СКОЛЬКО-НИБУДЬ ПРАВДОПОДОБНОГО ОБЪЯСНЕНИЯ  
ЭТОМУ МАСШТАБУ НЕТ**

40 лет теоретических поисков без результата



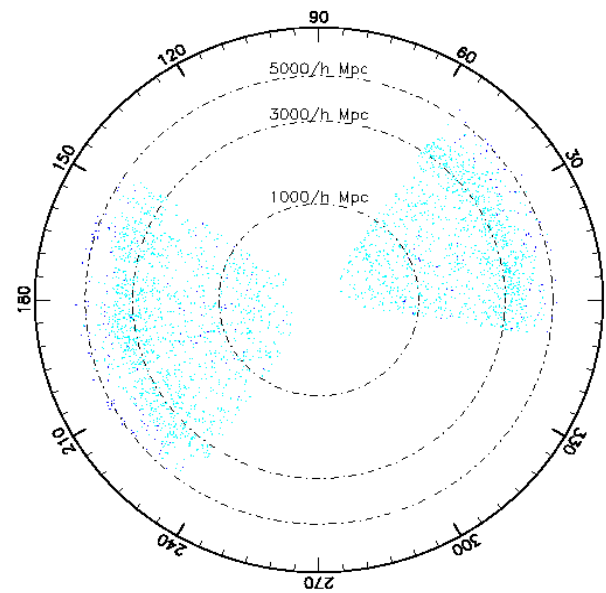
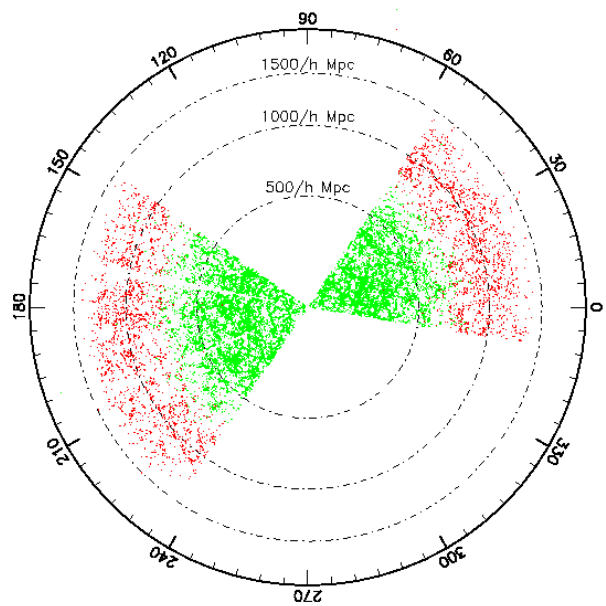
# Какой была Вселенная до горячего Большого Взрыва?

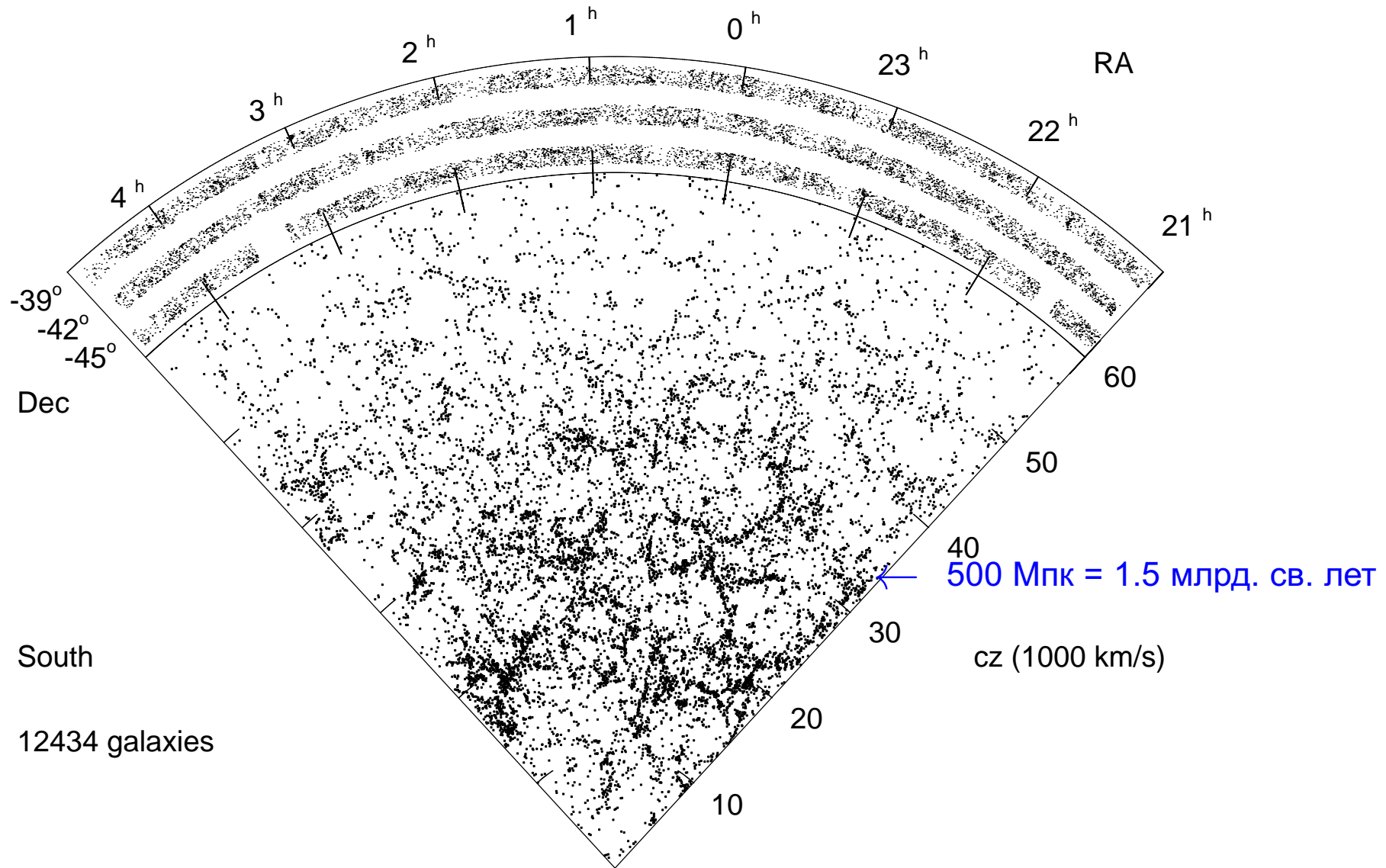
## Однородность/неоднородность Вселенной

- Вселенная сегодня: однородна на больших масштабах, сильно неоднородна на малых
  - Глубокие обзоры галактик ⇒  
распределение галактик во Вселенной ⇒  
**Карта Вселенной:**  
Состояние и эволюция Вселенной сегодня и в прошлом  
**SDDS:** положение во Вселенной более 1 млн.  
галактик, расстояния до 10 млрд. световых лет

Рис.

# Карта Вселенной





# Прошлое:

Вселенная расширялась в течение всей своей истории ⇒

В прошлом вещество во Вселенной было гораздо более плотным и горячим

- Наивное продолжение эволюции назад во времени ⇒ момент Большого Взрыва: “начало“, бесконечная плотность вещества, бесконечная скорость расширения.

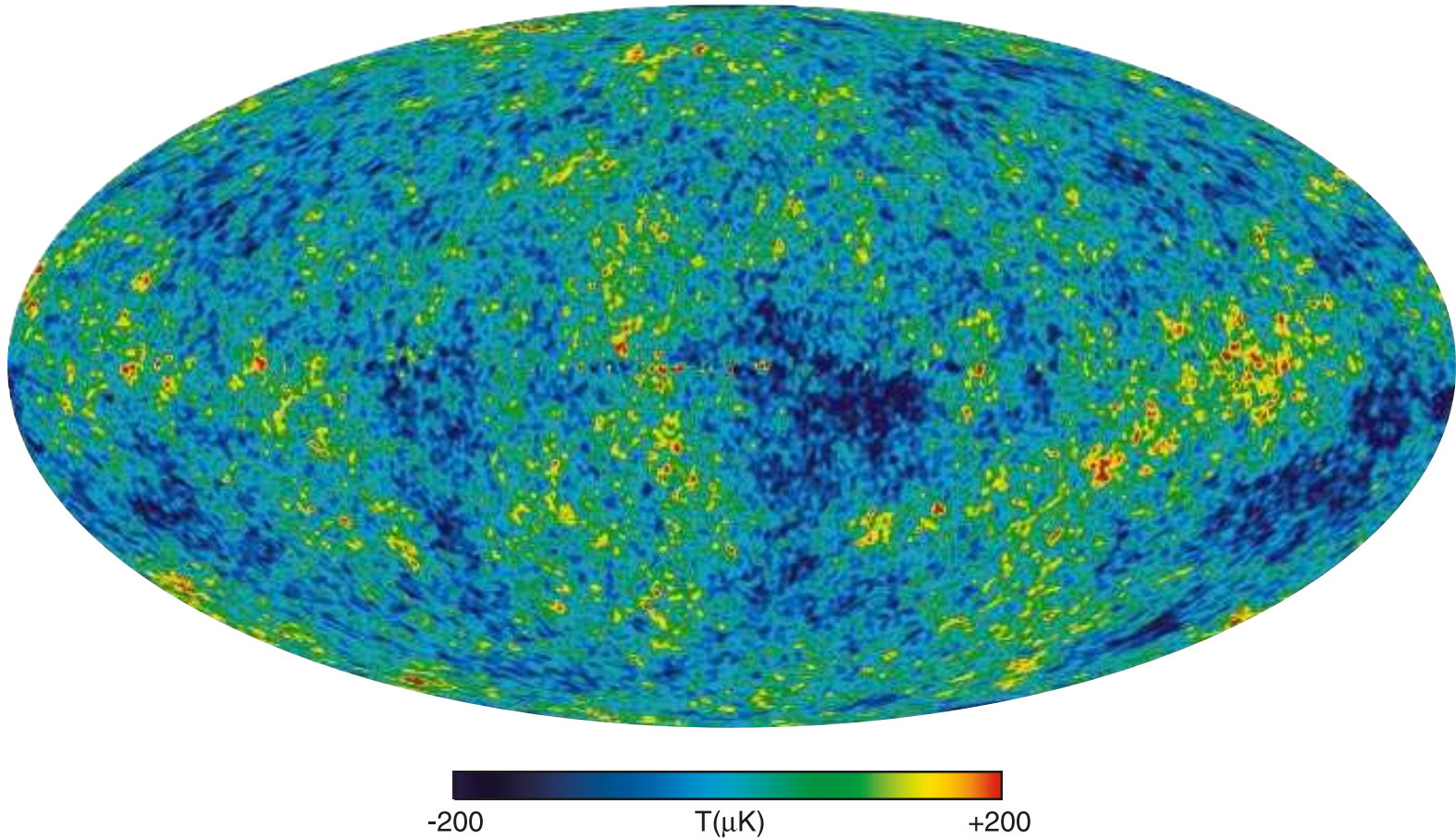
Сегодня можно с уверенностью сказать, что известная нам эпоха горячего Большого Взрыва — не самая ранняя.

Ей предшествовала какая-то другая стадия эволюции Вселенной с необычными свойствами.

# Теоретические аргументы

- Эпоха горячего Большого взрыва: 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)
- $T > 3000$  К: тепловые фотоны перестали взаимодействовать с веществом  $\Rightarrow$  летают по Вселенной, краснея из-за расширения пространства  $\Rightarrow$  **наблюдаемое реликтовое излучение,  $T_0 = 2.726$  К**
- Измерения распределения температуры реликтового излучения на небесной сфере  $\Rightarrow$  фотоснимок Вселенной в возрасте 380 тыс. лет (сегодня — 14 млрд. лет), при температуре  $T = 3000$  К.

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



WMAP

- При  $T = 3000$  К,  $t = 300$  тыс. лет Вселенная была почти однородной, относительные неоднородности плотности были на уровне  $10^{-5}$  на всех доступных наблюдениям масштабах длин

от 30 миллиардов световых лет до 1 миллиона световых лет

от 10 Гигапарсек (масштаб видимой части Вселенной) до 300 килопарсек (масштаб области, из которой вещество собралось в небольшую галактику)

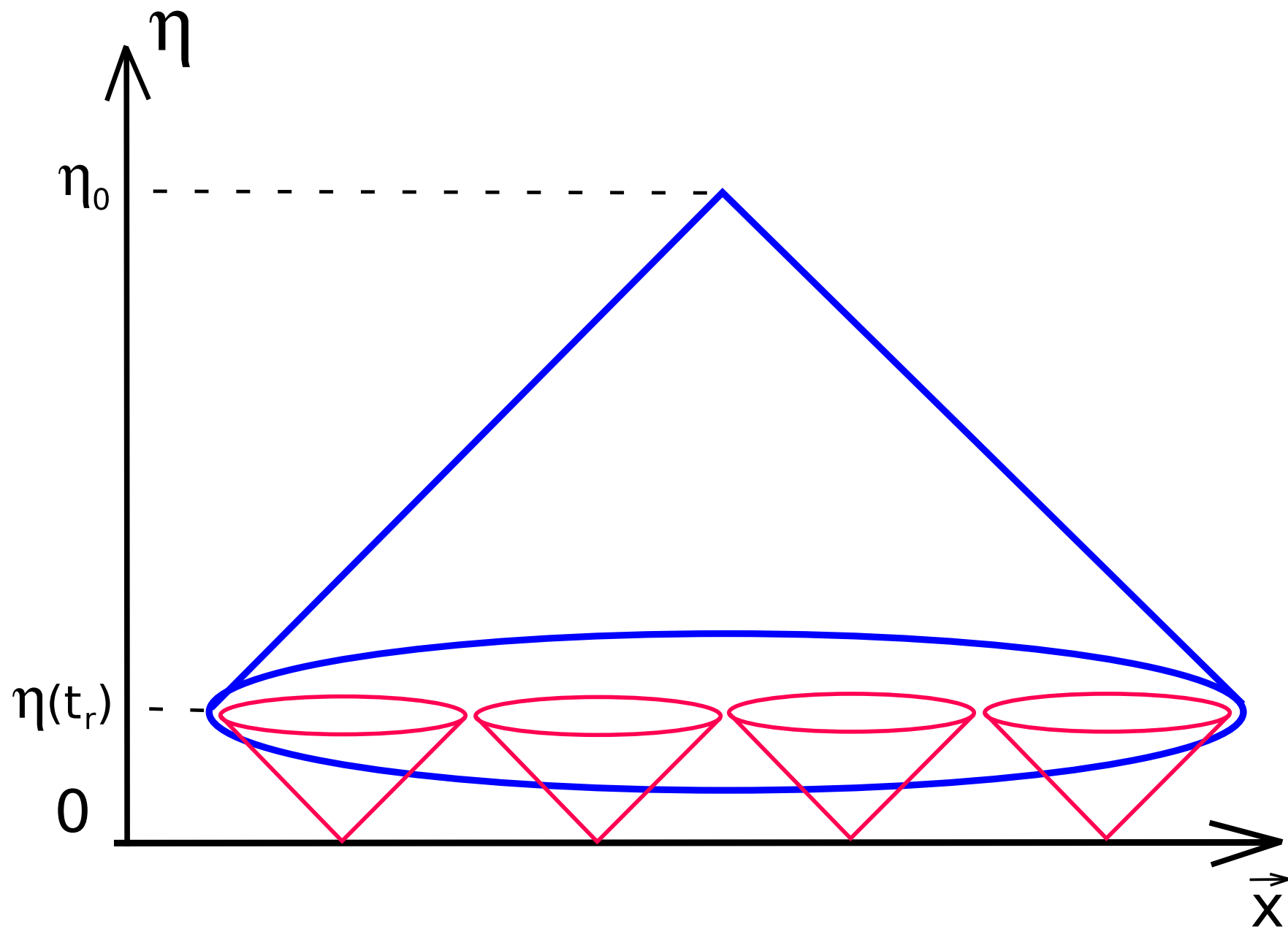
# Ну и что?

- Через  $3 \cdot 10^5$  лет после Большого Взрыва размер причинно связанной области был  $6 \cdot 10^5$  св. лет
- Сегодня это  $6 \cdot 10^8$  св. лет (Вселенная растянулась в 1000 раз)
- А видимый сегодня размер —  $3 \cdot 10^{10}$  св. лет, в 50 раз больше!
- Тем не менее, все  $50^3$  причинно несвязанные области одинаковые!!!

ЧТО-ТО НЕ ТО!

ПРОБЛЕМА ОДНОРОДНОСТИ/ГОРИЗОНТА





# Проблемы начальных условий

“Естественные начальные условия”: в момент начала классической стадии эволюции Вселенной

- Неоднородности плотности большие на всех пространственных масштабах, разные области Вселенной ничего не знают друг о друге
- Кривизна 3-мерного пространства порядка кривизны 4-мерного пространства-времени
- энтропия (безразмерное число) порядка единицы

Эволюция с такими начальными данными привела бы к картине, совершенно не похожей на реальность

- Вселенная осталась бы сильно неоднородной (неоднородности плотности растут со временем) — в реальности неоднородности на уровне  $10^{-5}$
- Пространственная кривизна была бы на много порядков больше наблюдательного ограничения
- Энтропия в видимой части реальной Вселенной порядка

$$S \sim T^3 R_U^3 \sim \left( \frac{R_U}{\lambda_{CMB}} \right)^3 \sim 10^{88}$$

# Начальные неоднородности плотности

Что про них сегодня известно?

- Возмущения плотности — гауссово случайное поле.

Сильное указание на источник: усиленные **вакуумные флуктуации** какого-то квантового поля.

Пусть  $\hat{q}$  — оператор координаты гармонического осциллятора,  $\hat{A} = \text{const} \cdot \hat{q}$ .

Если осциллятор в основном состоянии, то  $\hat{A}$  — гауссова случайная величина.

$$\langle A^n \rangle = \int dA e^{-\text{const} \cdot A^2} A^n$$

Аналогично для невзаимодействующего квантового поля

- Возмущения плотности — гауссово случайное поле.
- Спектр начальных возмущений плотности близок к плоскому, но, возможно, не точно плоский,

$$\left\langle \left( \frac{\delta\rho}{\rho} \right)^2 \right\rangle = \left( \frac{k}{k_0} \right)^{n_s - 1}, \quad n_s \approx 1$$

Красный спектр :  $n_s < 1$ .

Синий спектр :  $n_s > 1$ .

$n_s = 1$ : спектр Гarrisона–Зельдовича

- Неоднородности имелись уже в начале эпохи горячего Большого Взрыва!

## Свойства неоднородностей в обычной, “горячей” Вселенной.

Неоднородности в обычном веществе (плазме) — звуковые волны.

Метрика:

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

$a(t) \propto t^{1/2}$  до  $T \simeq 1$  эВ,  $t \simeq 60$  тыс. лет

$a(t) \propto t^{2/3}$  после этого (до недавнего времени).

Горизонт (в предположении, что до горячей стадии ничего не было)

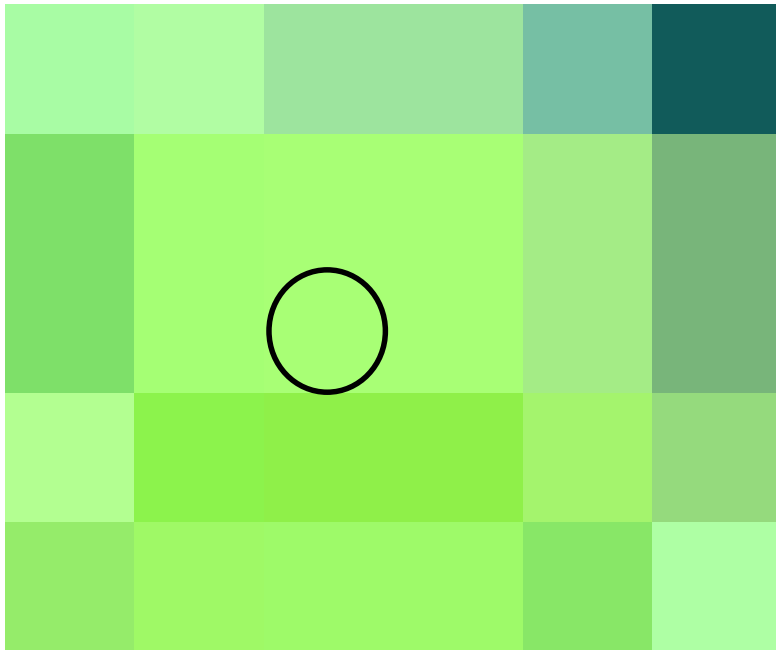
$$l_H(t) = (2 - 3)t$$

Длина волны растет как  $a(t)$ , а горизонт как  $t$ . На раннем этапе

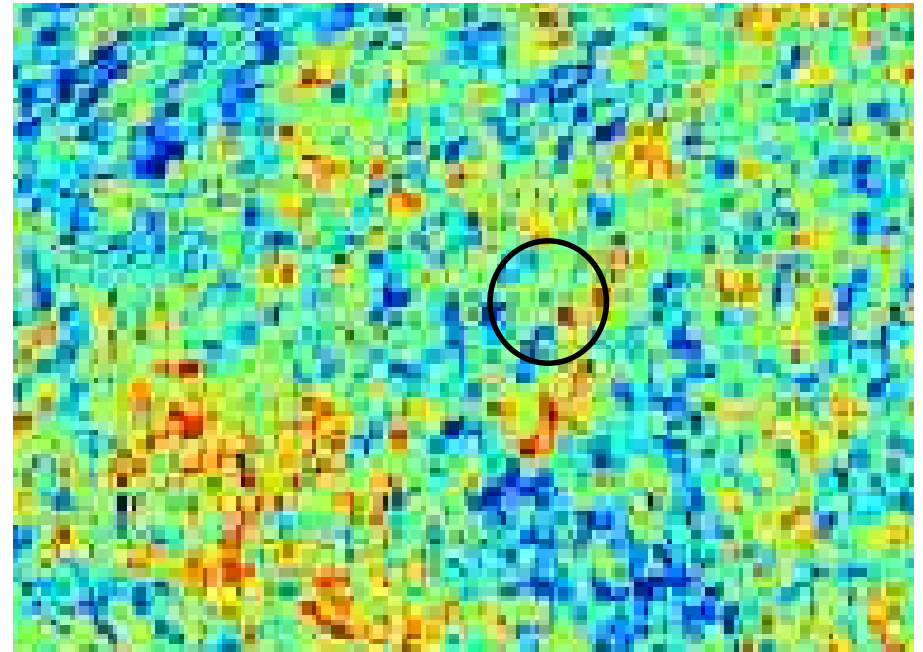
$$\lambda(t) \propto t^{1/2} \quad \text{тогда как} \quad l_H \propto t$$

Сегодня  $\lambda < l_H$ , режим “под горизонтом”

На ранней стадии  $\lambda(t) > l_H$ , режим “за горизонтом”.



режим “за горизонтом”



режим “под горизонтом”

Совершенно разная эволюция!

# Ключевой вопрос: происхождение неоднородностей

Причинность  $\implies$  генерация неоднородностей может происходить только тогда, когда их длина волны меньше горизонта.

Возможности две:

- Генерация на горячей стадии. Неоднородности никогда не были за горизонтом.

Пример: налипание на космические струны

Не соответствует наблюдениям!

- Генерация на стадии, предшествующей эпохе горячего Большого Взрыва



Если неоднородности в плазме были когда-то за горизонтом, то звуковые волны **имеют вполне определенную фазу**

Причина: решения волнового уравнения в **режиме за горизонтом**:

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

Второе решение не годится, оно соответствует сильно неоднородной Вселенной при  $t \rightarrow 0$

В предположении, что возмущения **были за горизонтом**, имеем **однозначное** (с точностью до амплитуды) начальное условие

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

Акустические осцилляции начинаются после входа под горизонт в фазе с нулевой скоростью среды  $\implies$  фаза осцилляций однозначно определена.

## Звуковые волны в плазме

$$\frac{\delta\rho}{\rho}(\mathbf{x}, t) = e^{i\mathbf{k}\mathbf{x}} \cdot \cos\left(\int_0^t \omega_k(t) dt + \alpha_k\right)$$

предсказание:

$$\alpha_k = 0$$

Примеси **sin** нет. Проявление: осцилляции в спектре анизотропии реликтового излучения.

Поздняя генерация возмущений  $\implies$  фаза  $\alpha_k$  — случайная функция  $k$ . Осцилляций в угловом спектре CMB нет.

Разложение “Фурье” флуктуаций температуры на небесной сфере:

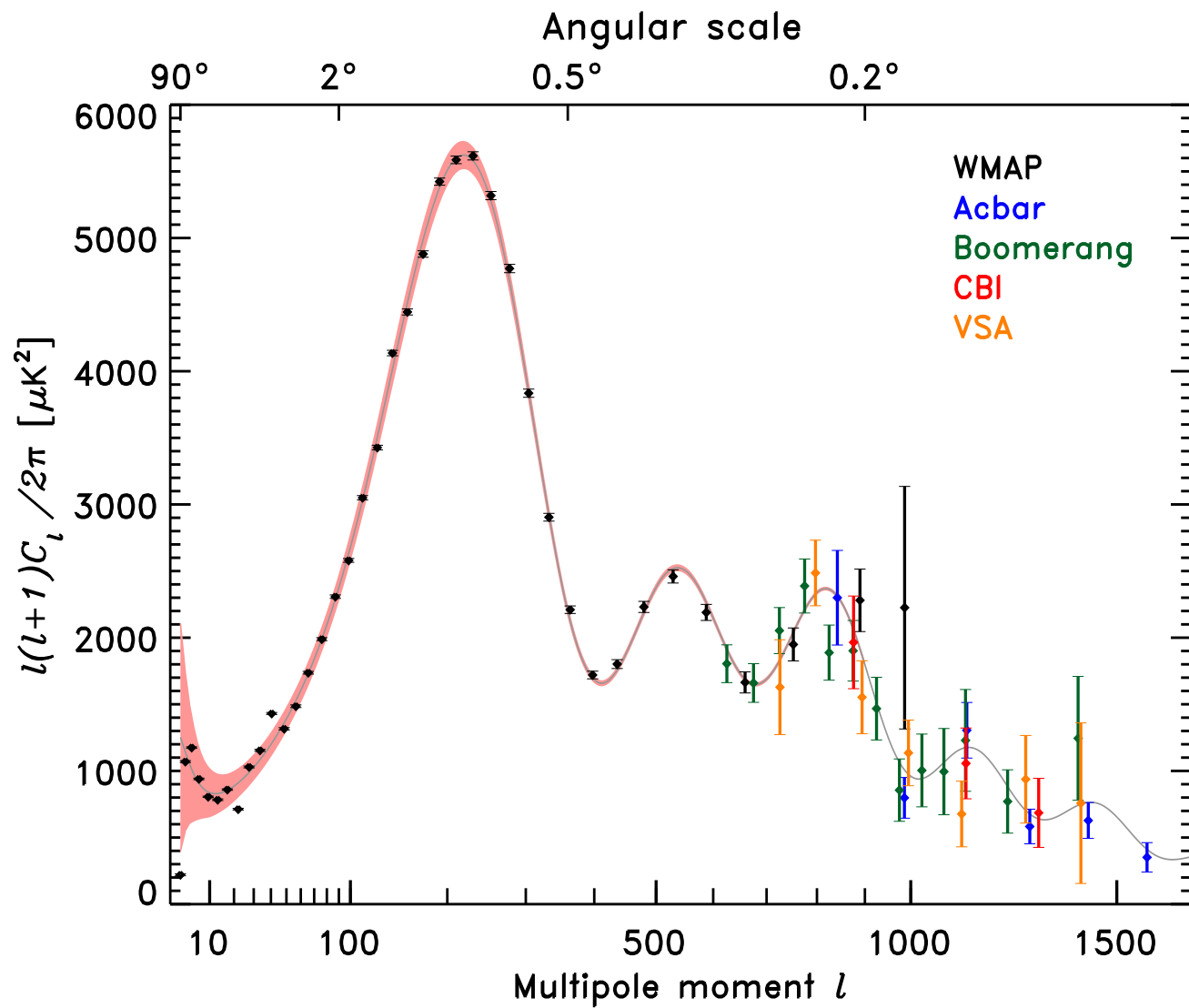
$$\frac{\delta T}{T}(\theta, \varphi) = \sum_{l,m} C_{lm} Y_{lm}(\theta, \varphi)$$

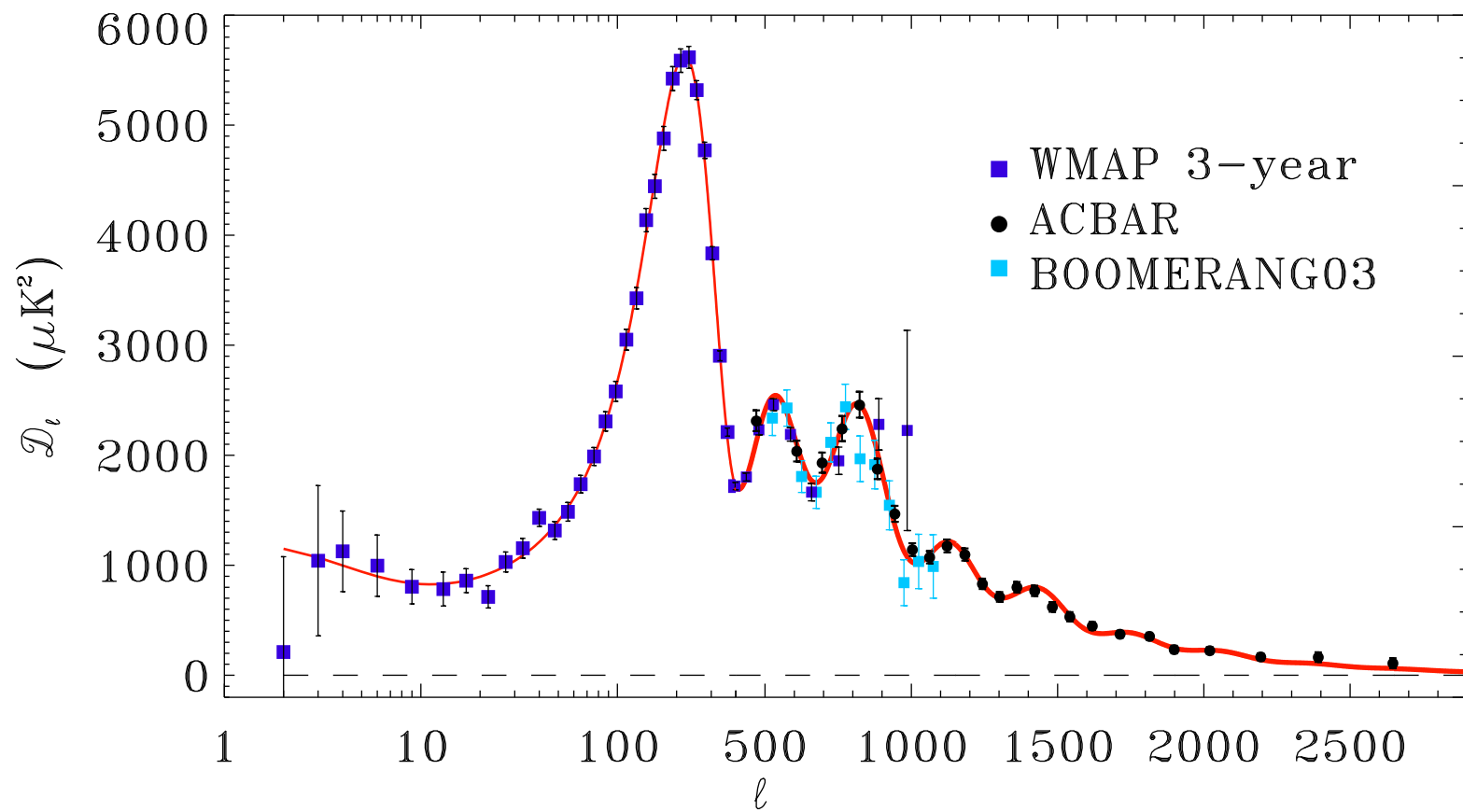
$C_{lm}$  измеряются;

большие  $l \iff$  малые угловые масштабы

Соответствие:  $l \iff kr_{rec}$

$r_{rec}$  — радиус сферы последнего рассеяния фотонов.

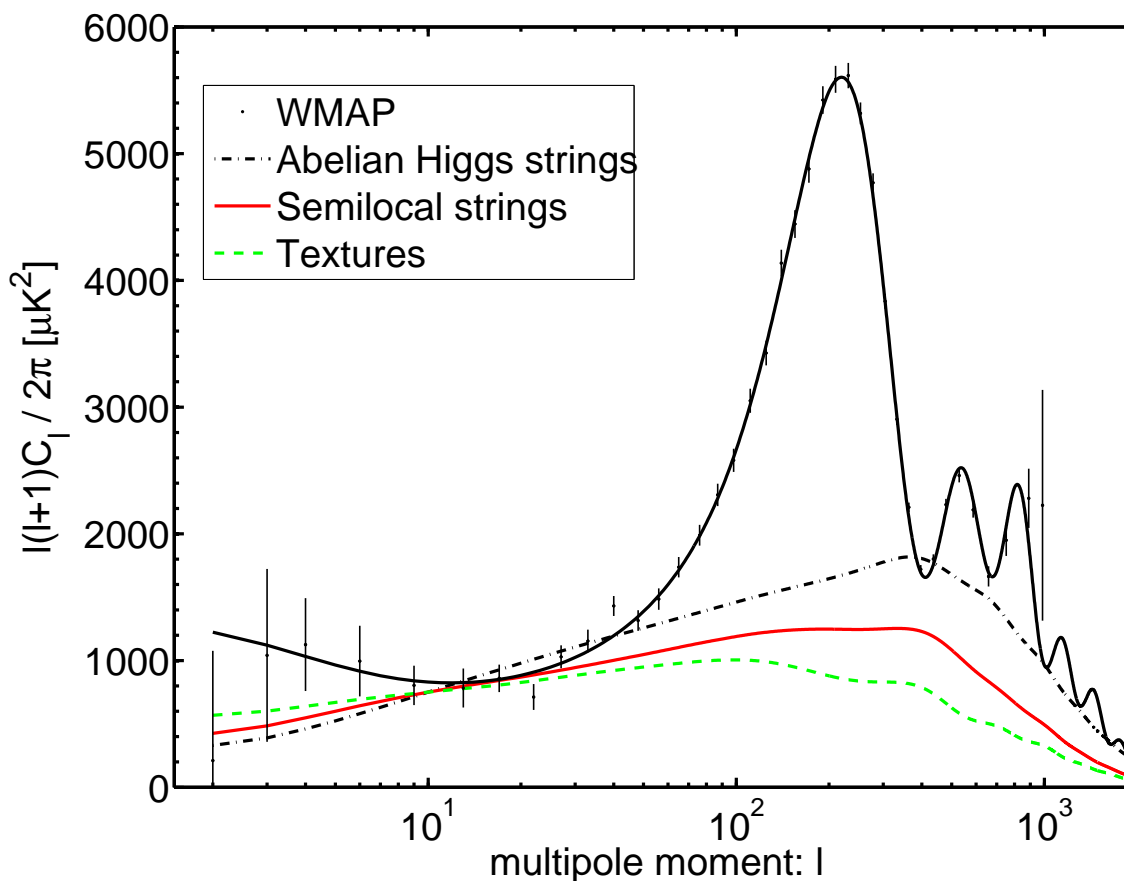




Большие угловые масштабы,  $l \lesssim 50 \implies$  возмущения за горизонтом в момент последнего рассеяния фотонов

Они есть!

Этих свойств не было бы, если бы генерация возмущений происходила на горячей стадии, а не до нее.



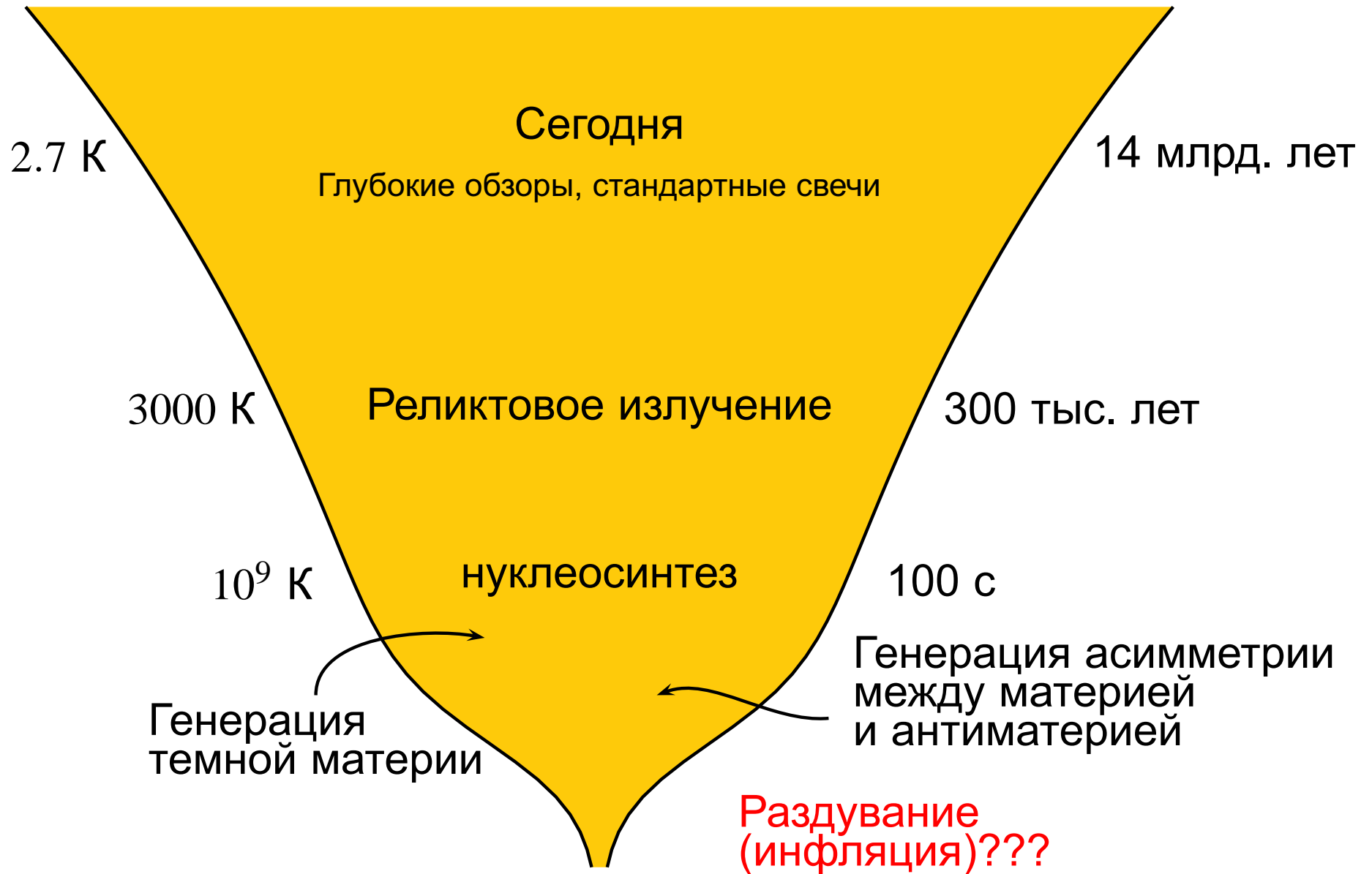
# Популярная гипотеза: инфляция

Раздувание  $\equiv$  инфляция =  
расширение с гигантским ускорением,  
с микро- до макро-размеров за малые доли секунды.

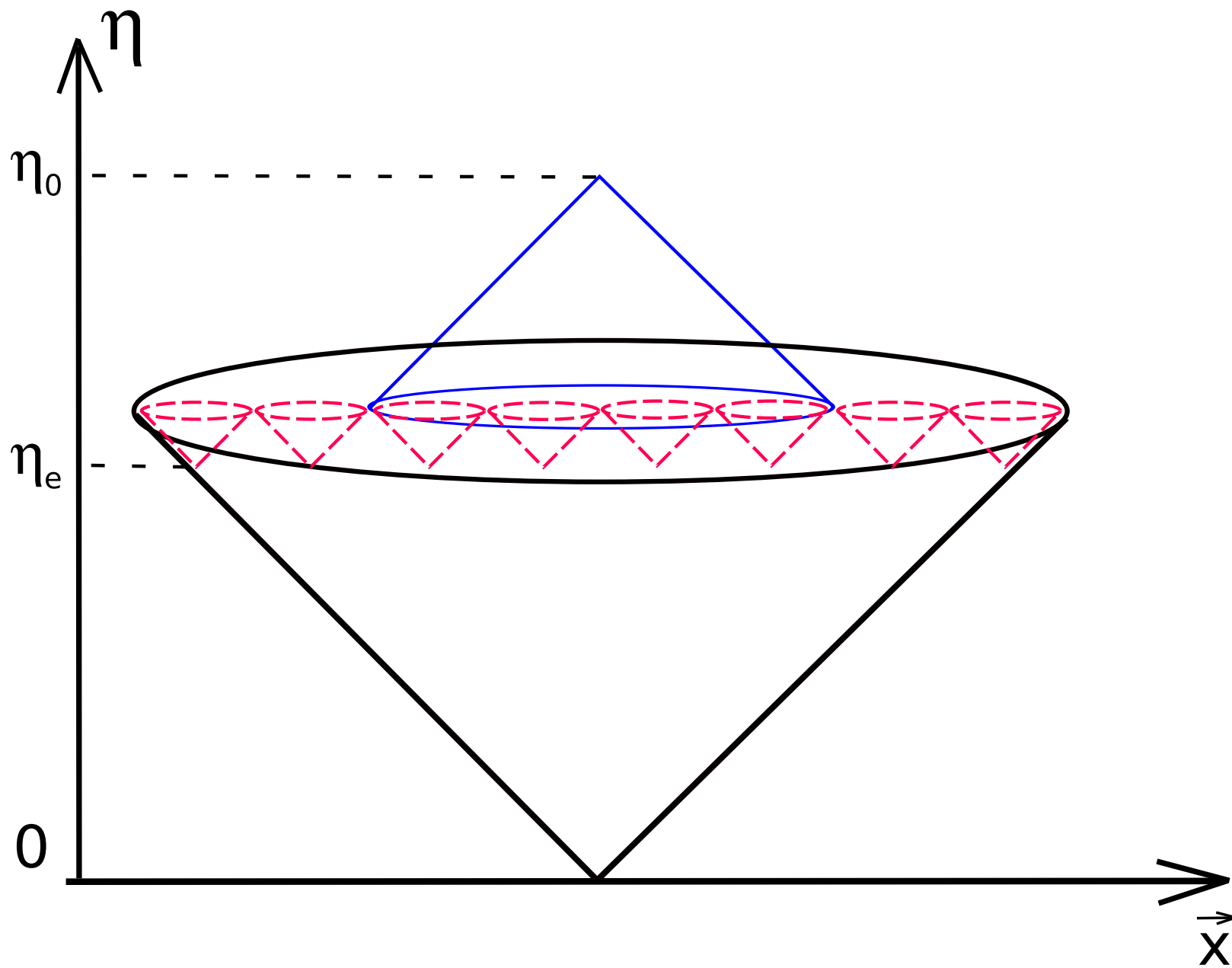
Оно происходит за счёт энергии нового поля — “инфлатона”

- Неоднородности разглаживаются
- Пространство растягивается, пространственная кривизна уменьшается
- В конце инфляции энергия инфлатона переходит в тепло, генерируется энтропия
- Характерные времена:  $10^{-37}$  с

# Этапы эволюции Вселенной







# Инфляционная теория

Дает механизм генерации начальных возмущений плотности: усиление вакуумных флуктуаций квантовых полей.

- **Предсказания:**

- Возмущения плотности — гауссово случайное поле.
- Спектр начальных возмущений плотности близок к плоскому, но не точно плоский.  
Возможен как красный, так и синий спектр, в зависимости от конкретной модели.

# Ещё предсказание

- Генерация реликтовых гравитационных волн с большими длинами и заметной амплитудой

$$\sqrt{\langle h^2 \rangle} \sim 10^{-6},$$

для волн с длинами  $\lambda \gtrsim 500$  Мпк.

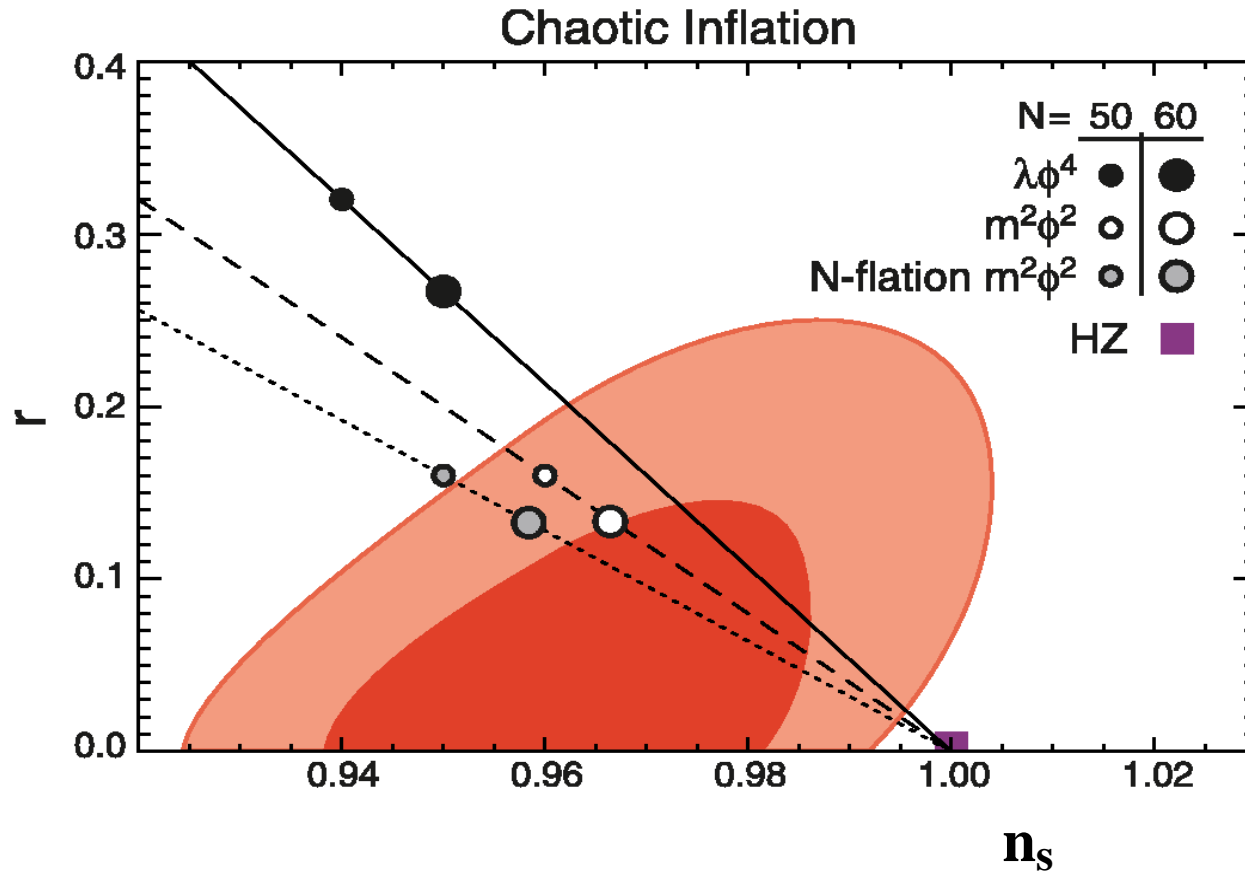
- Гравитационные волны с меньшими длинами имеют меньшие амплитуды.

Эти предсказания доступны проверке:

- Анизотропия и поляризация реликтового излучения
- Глубокие обзоры, карта Вселенной
- Будущие космические детекторы гравитационных волн

Имеющиеся данные согласуются с предсказаниями инфляционной теории

# Современная ситуация



$$r = \frac{\text{грав. волны}}{\text{неоднородности плотности}}$$

Либо гравитационные волны, либо наклон  $n_s < 1$ ,  
либо и то, и другое.

Новые данные: Planck, полетел в 2009 году.

# Альтернативы инфляции

Начальная стадия изучения вопроса.

- Можно иметь смену сжатия расширением (под теоретическим контролем)
- Можно организовать разгоняющееся расширение Вселенной из изначально статического состояния с нулевой плотностью энергии
- Можно генерировать правильные возмущения плотности
- Гравитационные волны с плоским спектром получить невозможно

**НУЖНО НАПРЯЧЬ ФАНТАЗИЮ**

# Итак,

- Тот факт, что скалярные возмущения (= возмущения плотности энергии) когда-то были за горизонтом на радиационно-доминированной стадии, прямо говорит о существовании **другой, предшествующей стадии**.

Генерация возмущений происходила именно на этой, предшествующей стадии

- Наблюдаемая **гауссовость** скалярных возмущений — сильнейшее указание на то, что их первоисточником являются **вакуумные флуктуации слабо взаимодействующих квантовых полей**
- Наиболее популярная гипотеза о первоначальной космологической эпохе — **инфляция**

Простые (а, значит, наиболее правдоподобные) модели инфляции предсказывают:

- Возмущения — **однородные изотропные случайные поля**

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

- **(практически) гауссовы скалярные возмущения** (возмущения плотности энергии) **со спектром мощности, близким к плоскому**,  $\mathcal{P}(k) \approx$  не зависит от  $k$
- **Небольшой наклон скалярного спектра** (отрицательный для степенных потенциалов)
- Довольно значительные **тензорные возмущения** с почти плоским спектром

smoking gun!

## Самосогласованные сценарии, альтернативные инфляции, имеются!

- Сжатие  $\implies$  отскок  $\implies$  расширение  $\implies$  переход на горячую стадию  
(“экпирозис”; вариант: циклическая Вселенная)
- “Генезис”:  
статическая Вселенная с  $\rho = 0 \implies$  разгоняющееся расширение, рост  $\rho \implies$  переход на горячую стадию

Сегодня наблюдения не позволяют дать ответа, какой из сценариев на самом деле работал

Нужно искать (теоретически и экспериментально) тонкие эффекты: **тензорные возмущения, негауссовость, глобальную анизотропию и/или неоднородность**



Классическая + квантовая теория поля  $\implies$  сравнение с  
наблюдательными данными  $\implies$  ответ на вопрос:

Какой была Вселенная до горячего Большого Взрыва?

