

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 λ , 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

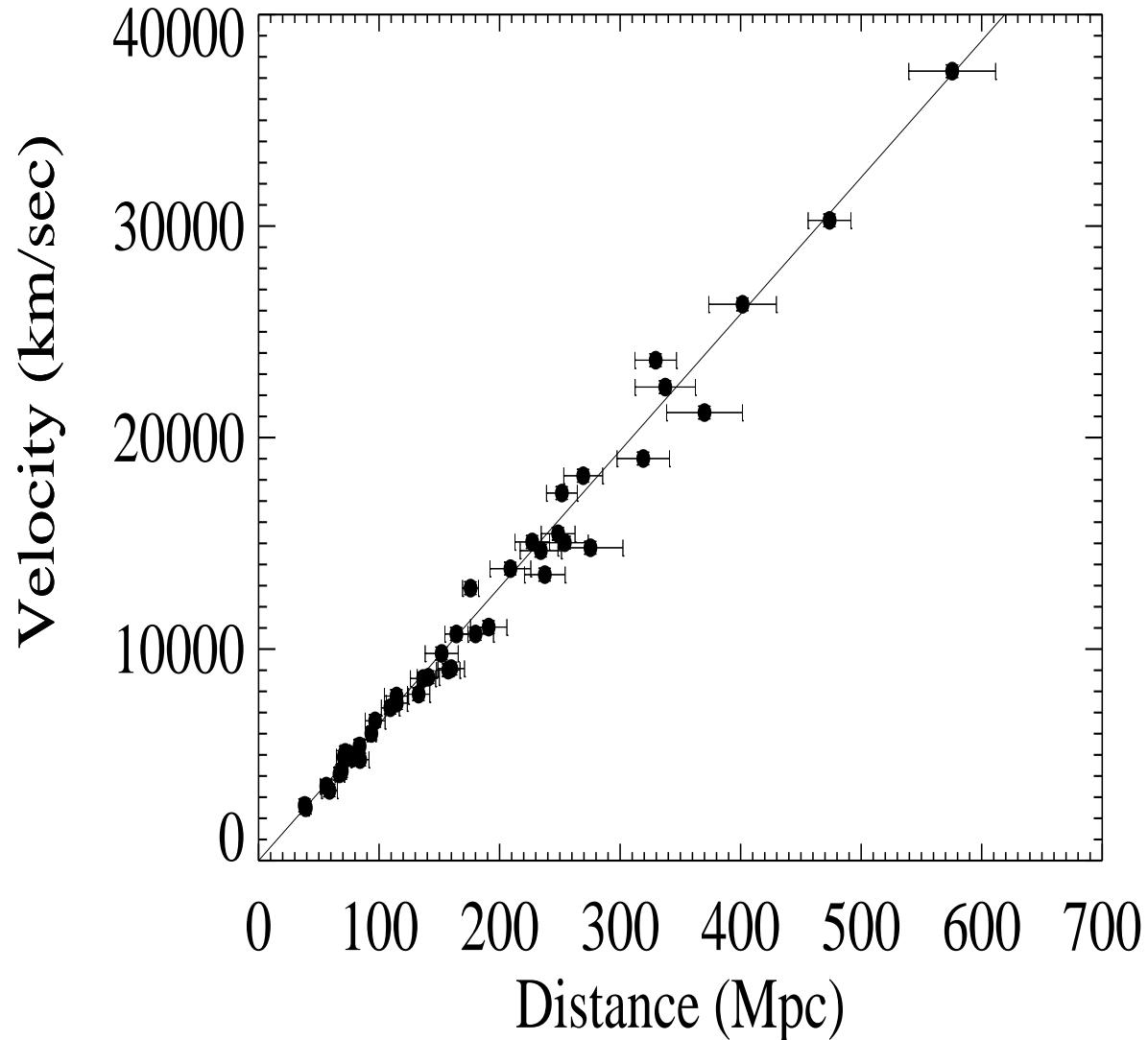
$$H_0 = 71 \pm 2 \frac{\text{км/с}}{\text{Мпк}}$$

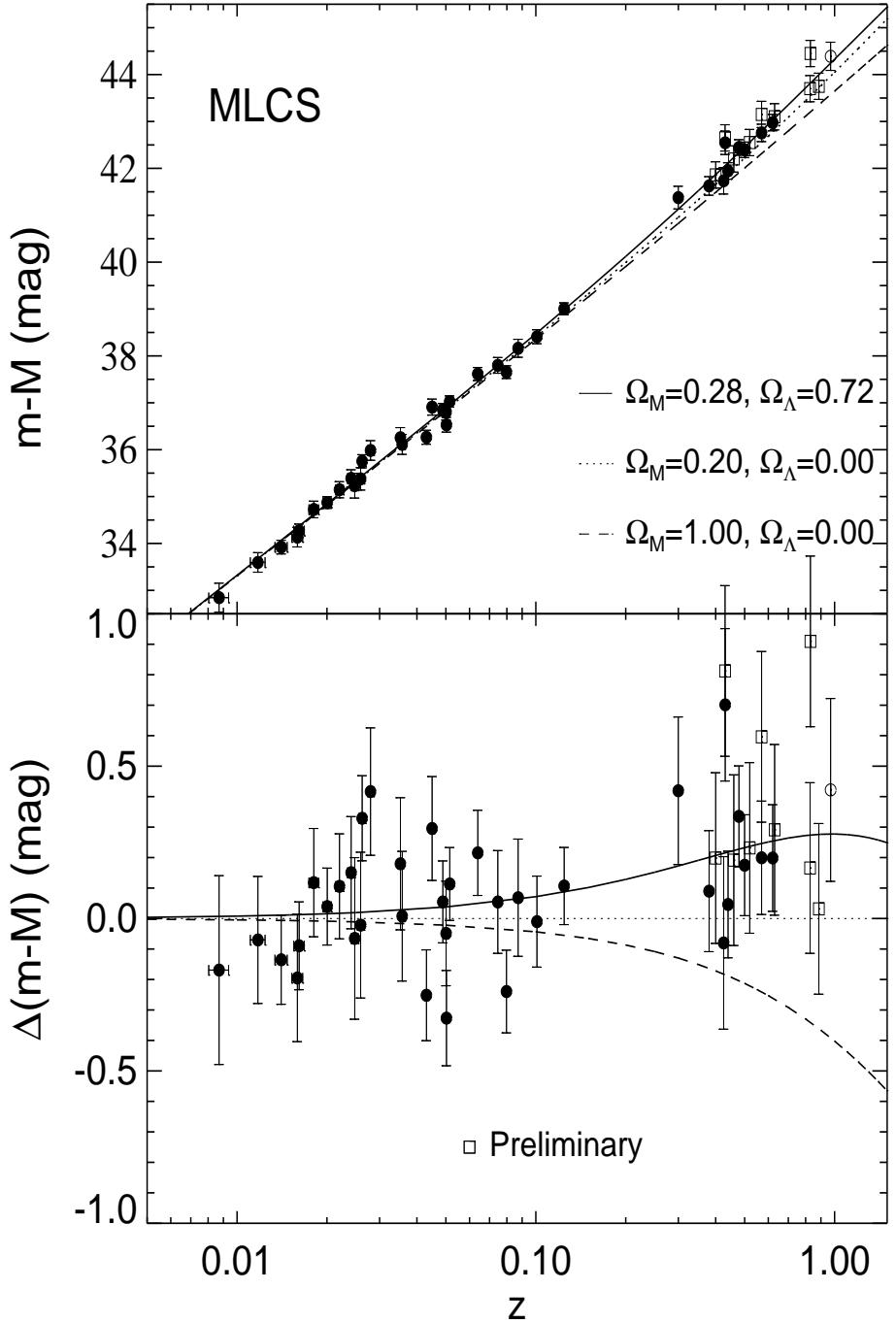
NB: 1 Мпк = 3 млн. световых лет

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 1а (стандартных свеч), 1998 г.

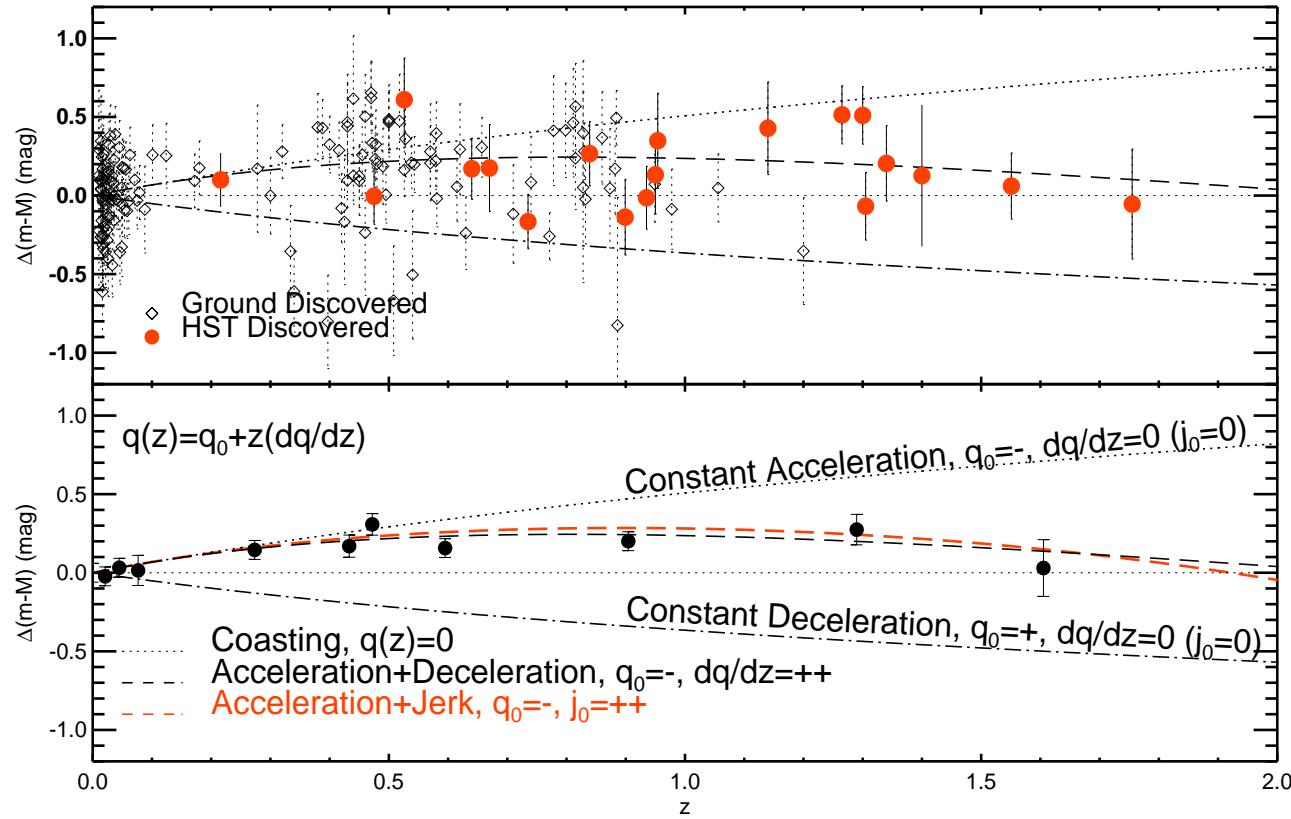
Небольшие z : закон Хаббла





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

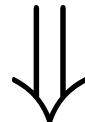
$$\Omega_\Lambda = \frac{\text{плотность темной энергии}}{\text{полная плотность энергии}}$$



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 $\varepsilon_{DE} = 4 \frac{\text{ГэВ}}{\text{М}^3} \Rightarrow$

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

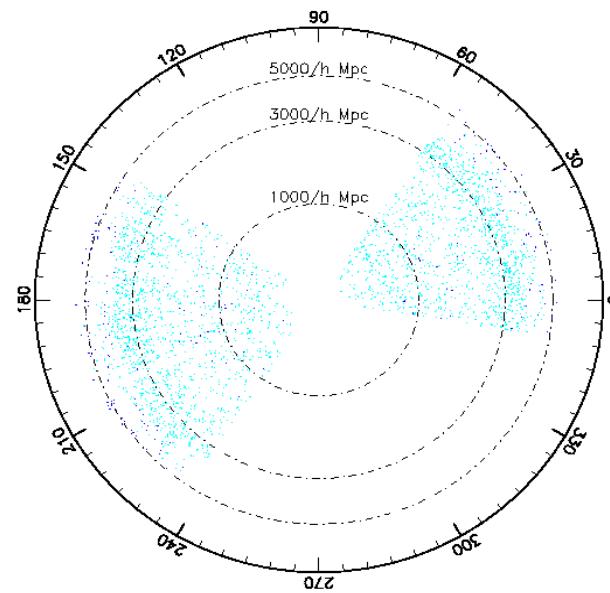
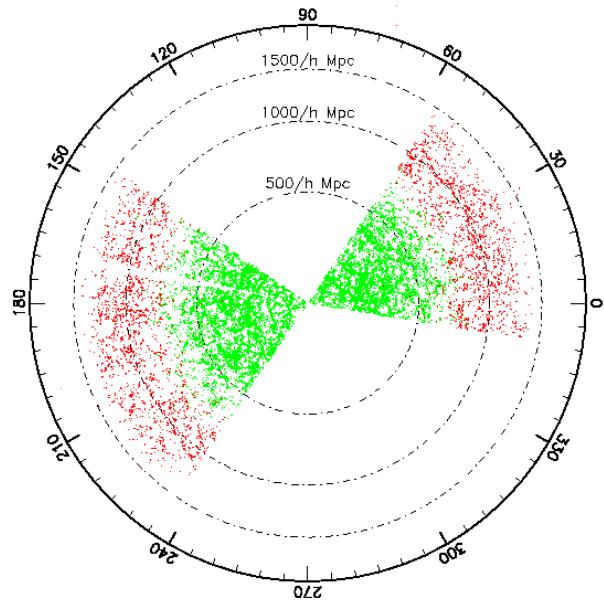
Какой была Вселенная до горячего Большого Взрыва?

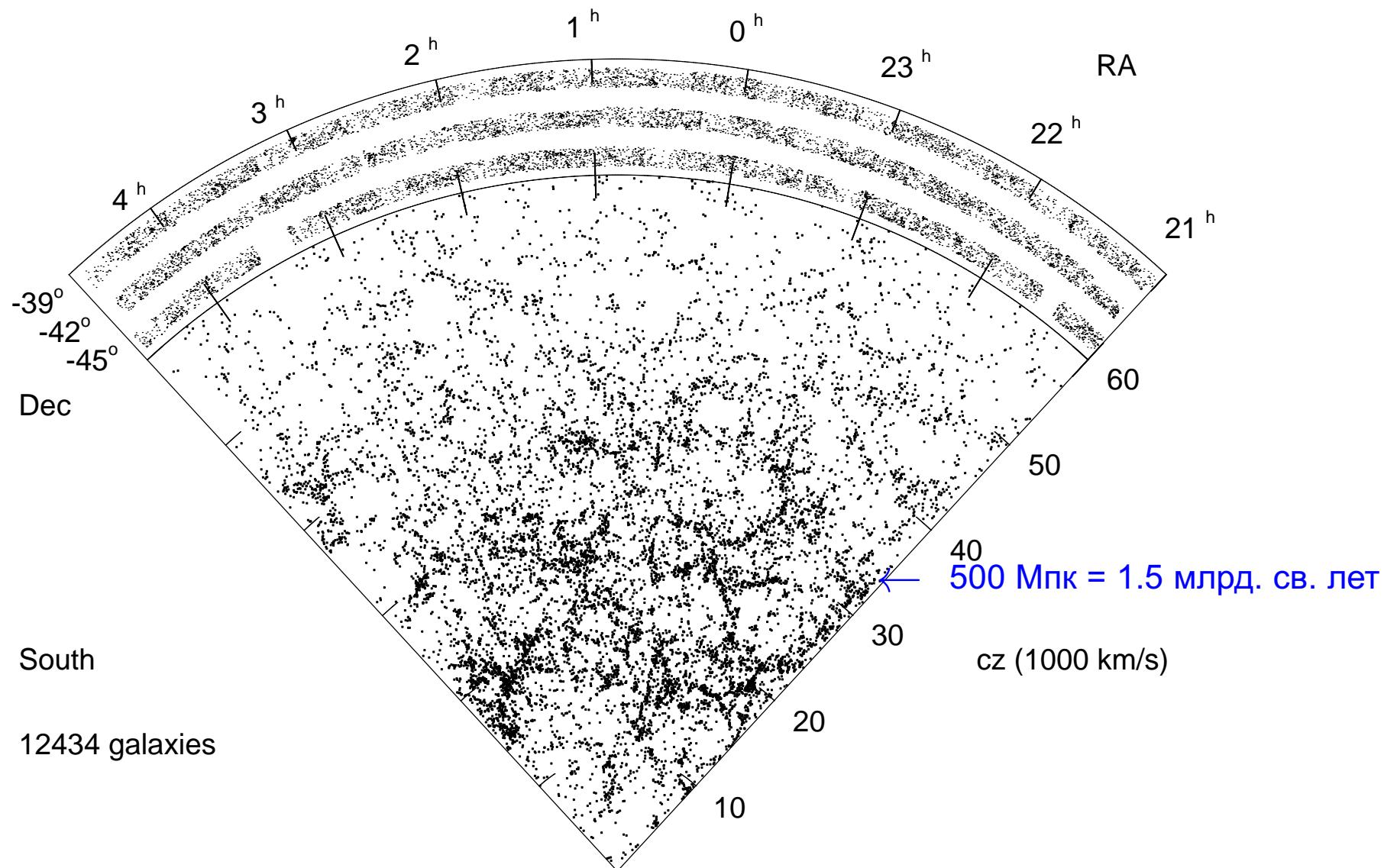
Однородность/неоднородность Вселенной

- Вселенная сегодня: однородна на больших масштабах, сильно неоднородна на малых
 - Глубокие обзоры галактик \Rightarrow распределение галактик во Вселенной \Rightarrow **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

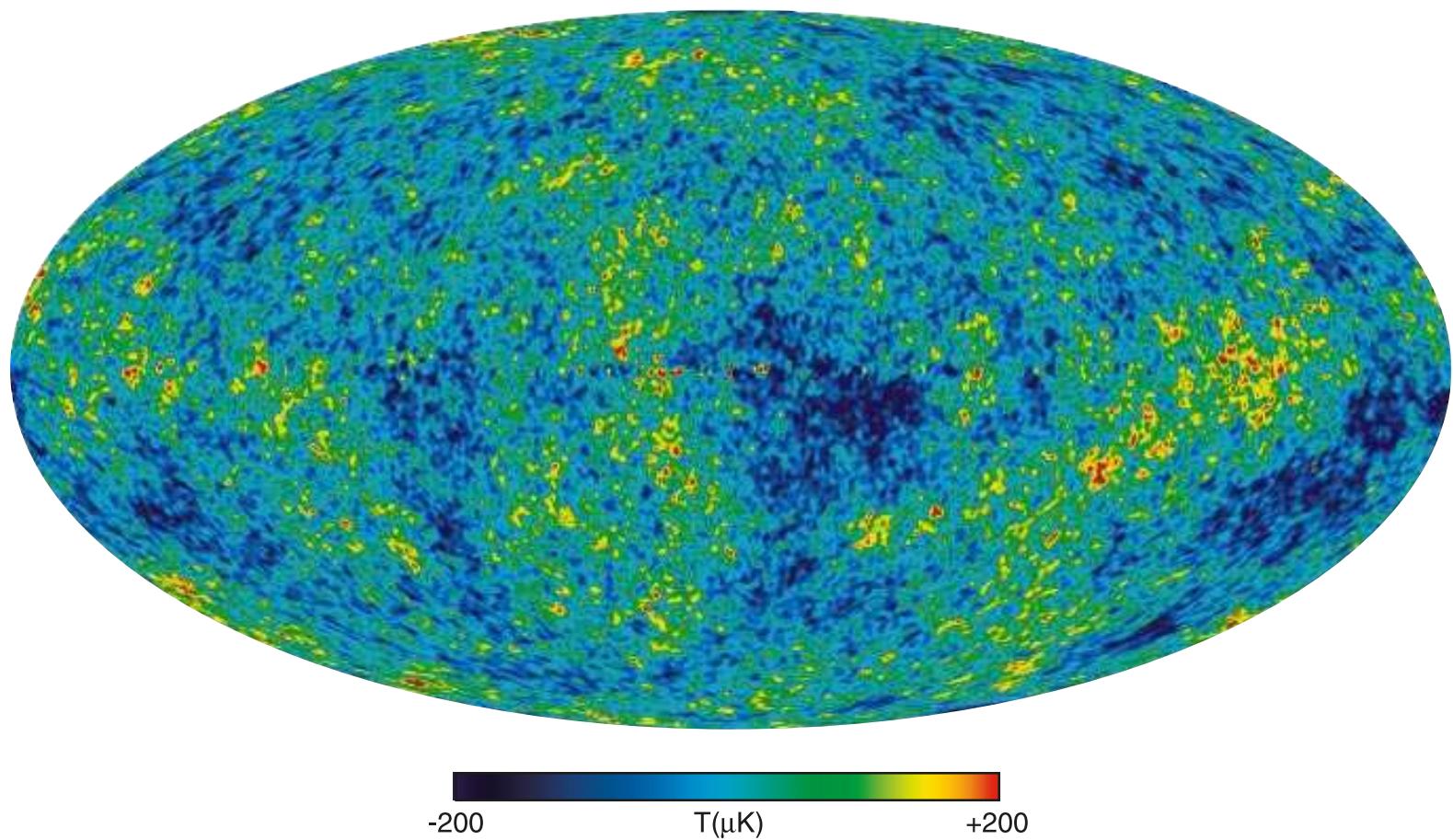
- Наивное продолжение эволюции назад во времени ⇒
момент Большого Взрыва: “начало”, бесконечная
плотность вещества, бесконечная скорость расширения.

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 фотонны 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.

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



WMAP

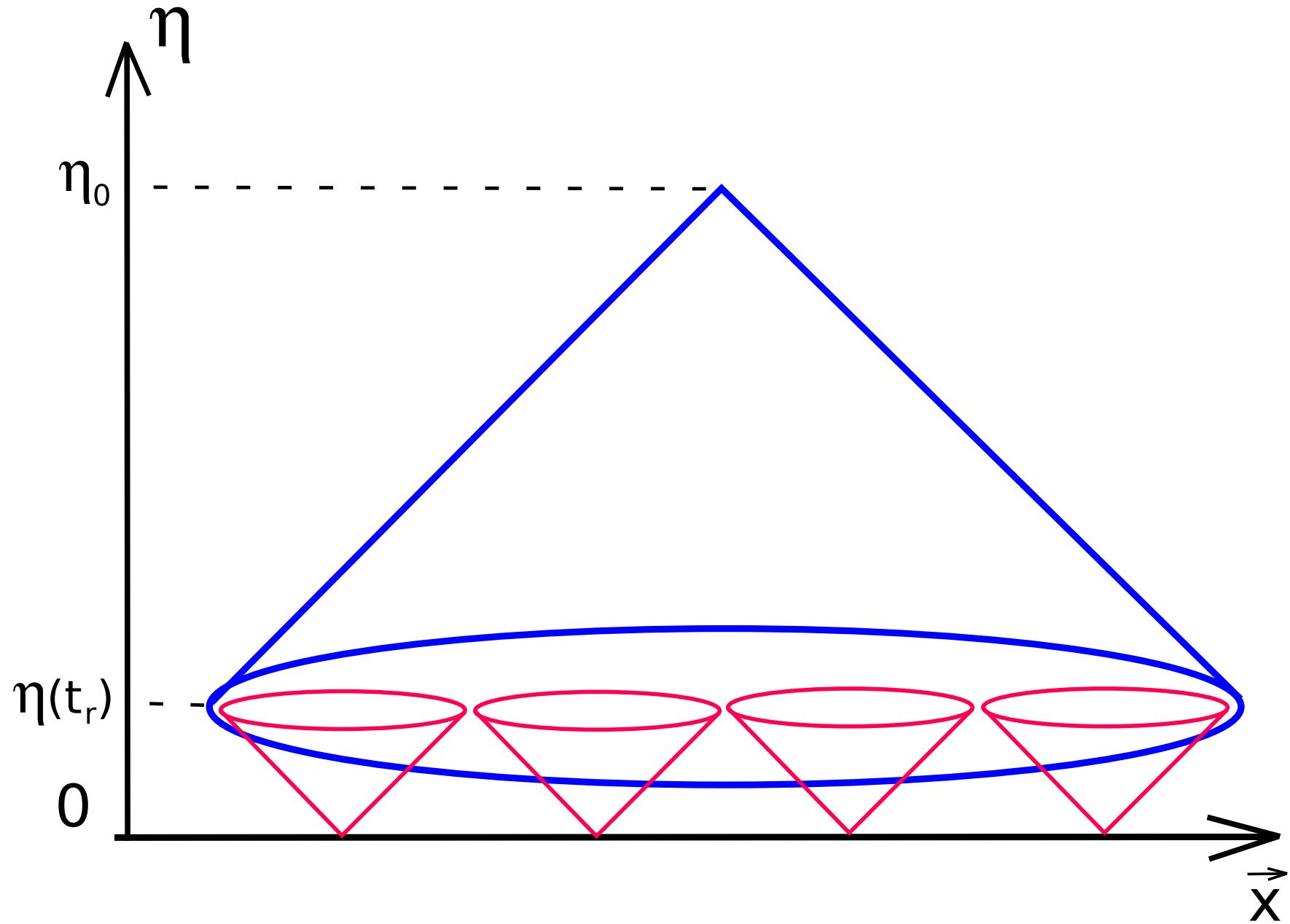
- При $T = 3000$ К, $t = 300$ тыс. лет Вселенная была почти однородной, относительные неоднородности плотности были на уровне 10^{-5} на всех доступных наблюдениям масштабах длин от 30 миллиардов световых лет до 1 миллиона световых лет от 10 Гигапарсек (масштаб видимой части Вселенной) до 300 килопарсек (масштаб области, из которой вещество собралось в небольшую галактику)

Ну и что?

- Через $3 \cdot 10^5$ лет после Большого Взрыва размер причинно связанный 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 флукутации** 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,

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

Красный спектр : $n_s < 1$.

Синий спектр : $n_s > 1$.

$n_s = 1$: спектр Гаррисона–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)

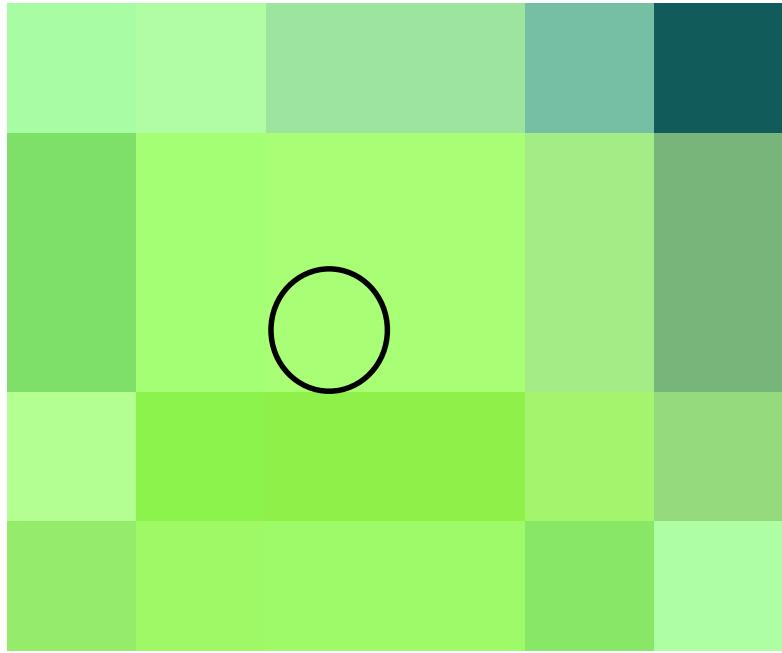
$$l_H(t) = (2 - 3)t$$

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

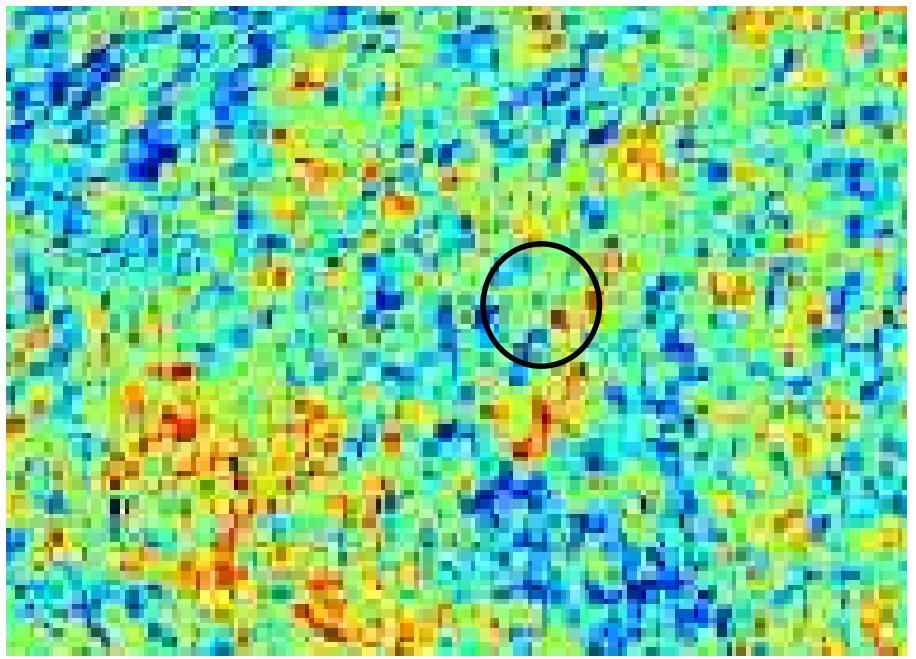
$$\lambda(t) \propto t^{1/2} \quad \text{тогда как} \quad l_H \propto t$$

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 \Rightarrow 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, предшествовавшей 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: осциляции в спектре анизотропии реликтового излучения.

Поздняя генерация возмущений \Rightarrow фаза α_k – случайная функция k . Осциляций в угловом спектре СМВ нет.

Разложение “Фурье” флуктуаций температуры на небесной сфере:

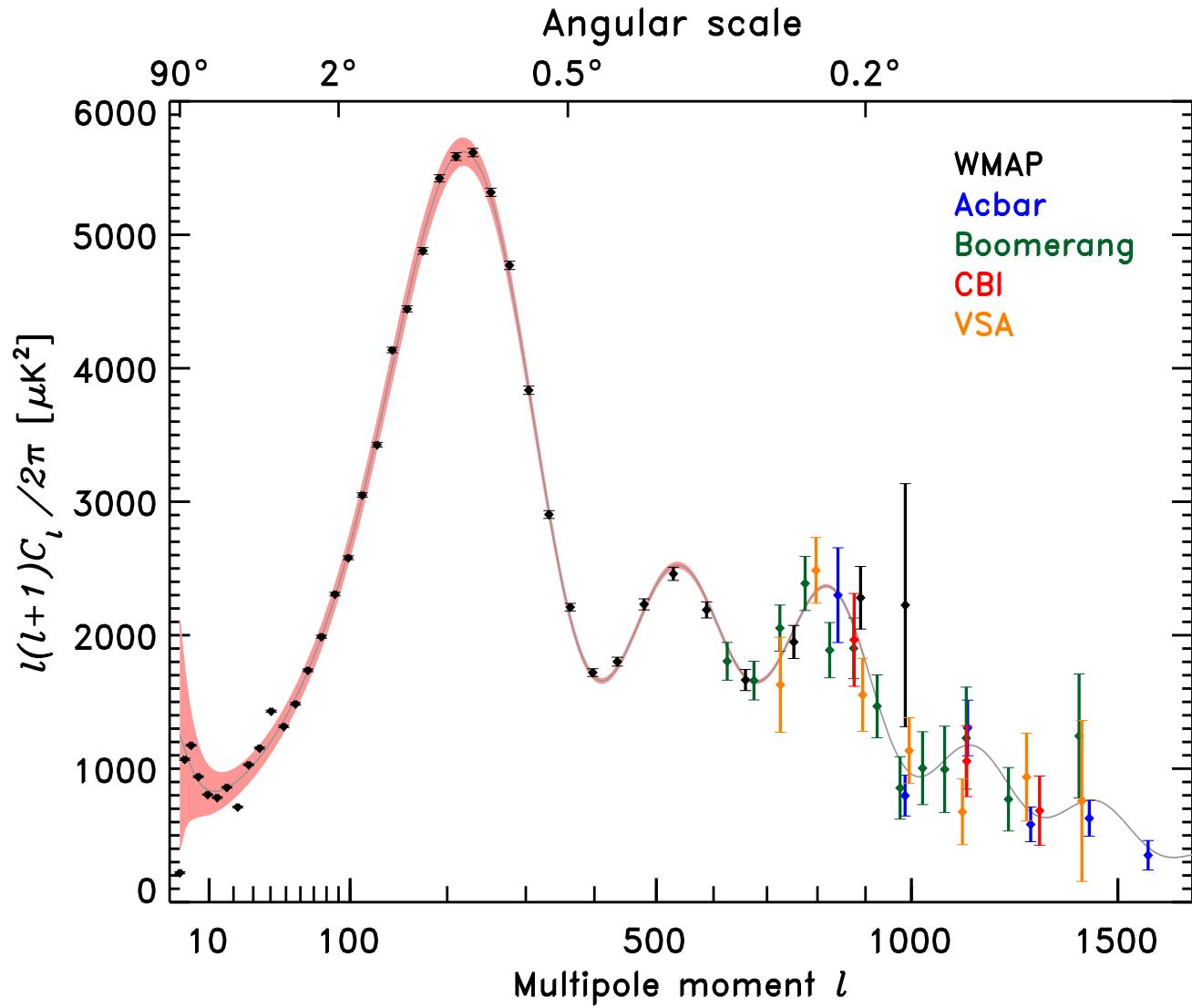
$$\frac{\delta T}{T}(\theta, \varphi) = \sum_{l,m} C_{lm} Y_{lm}(\theta, \varphi)$$

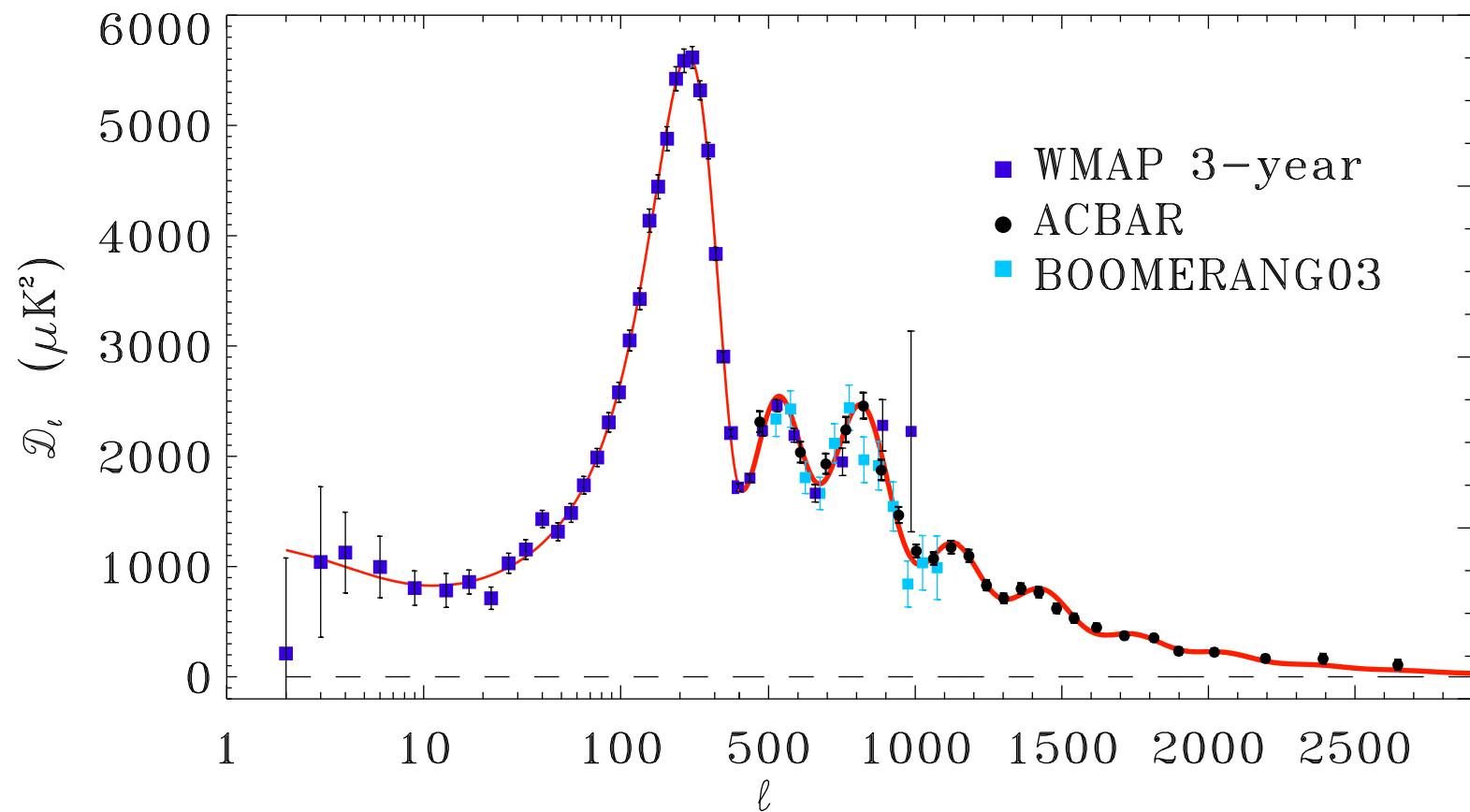
C_{lm} измеряются;

большие $l \iff$ малые угловые масштабы

Соответствие: $l \iff kr_{rec}$

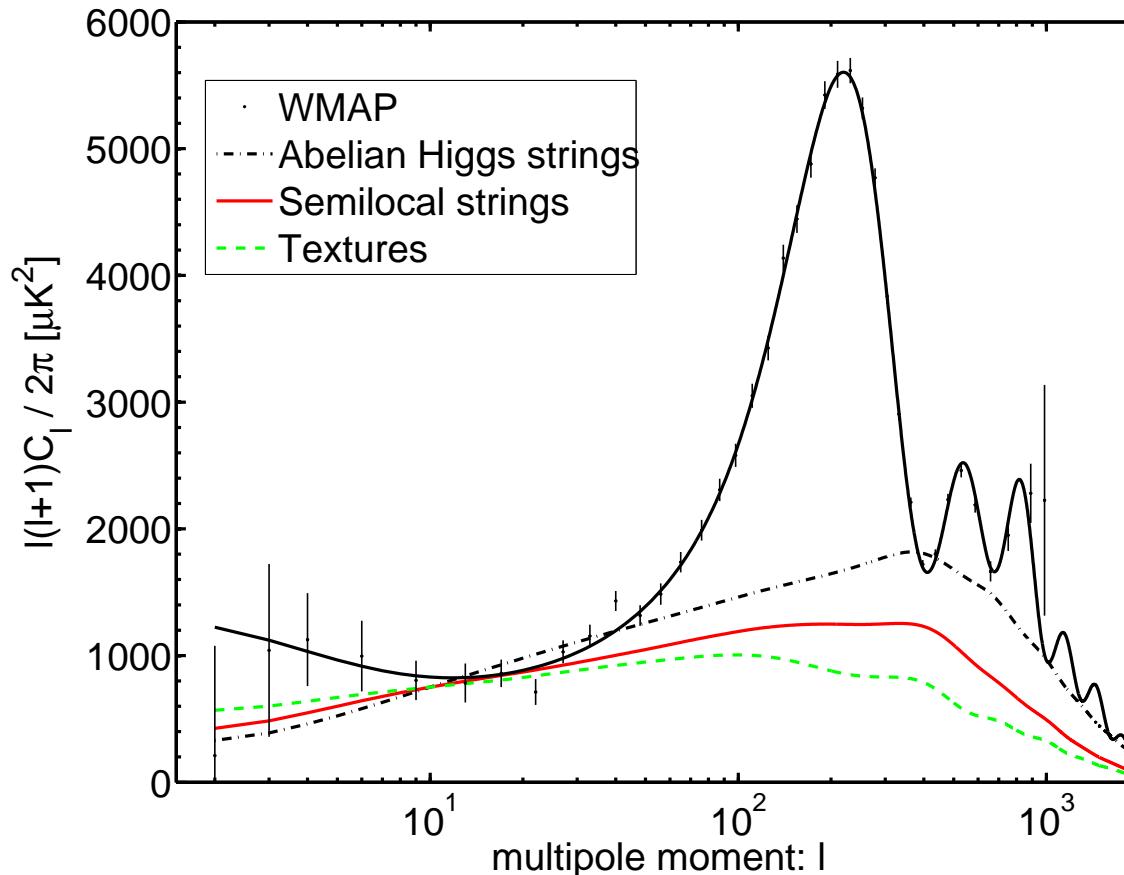
r_{rec} — радиус сферы последнего рассеяния фотонов.





Большие угловые масштабы, $l \lesssim 50 \Rightarrow$ 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.



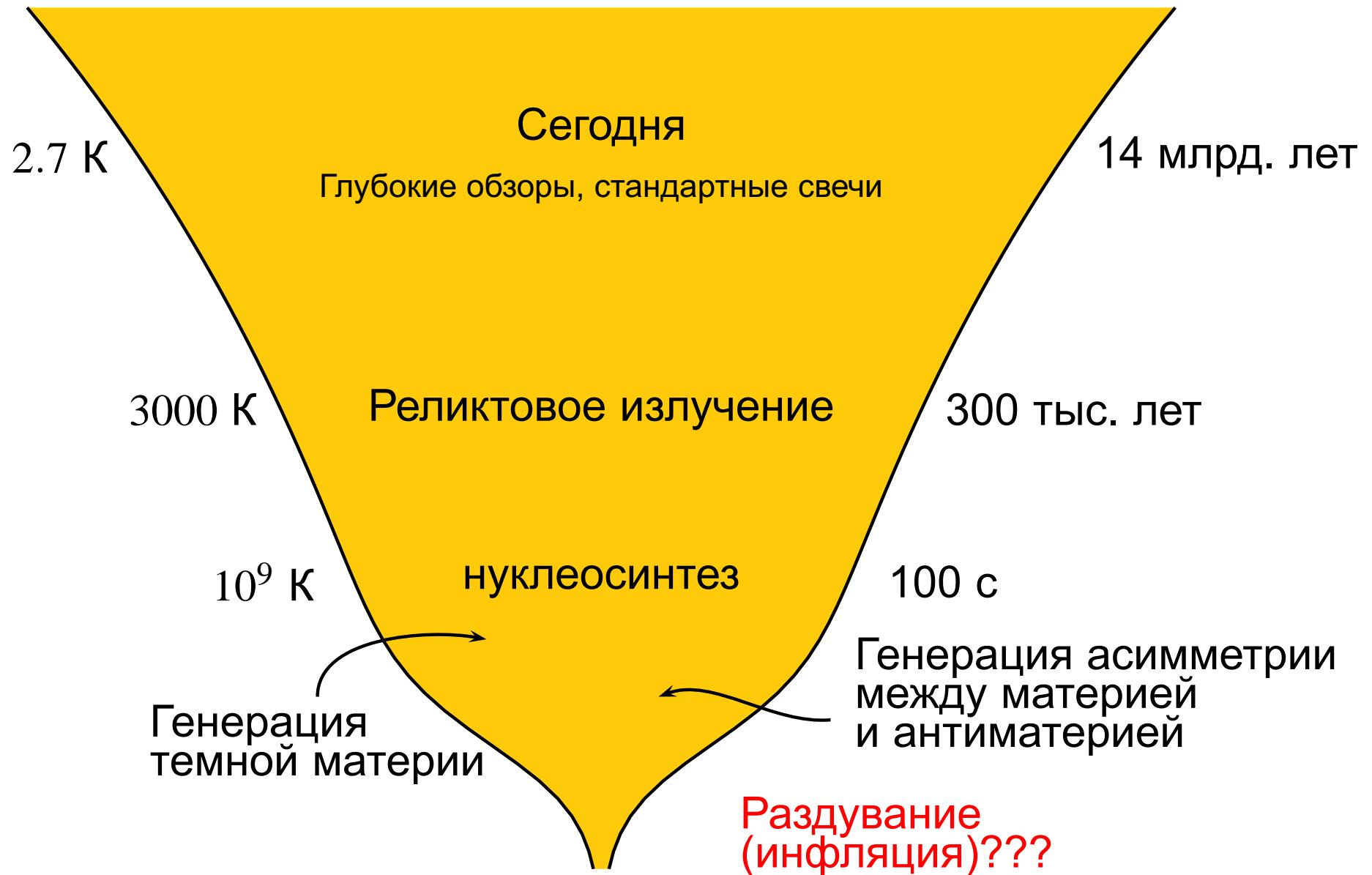
Популярная гипотеза: инфляция

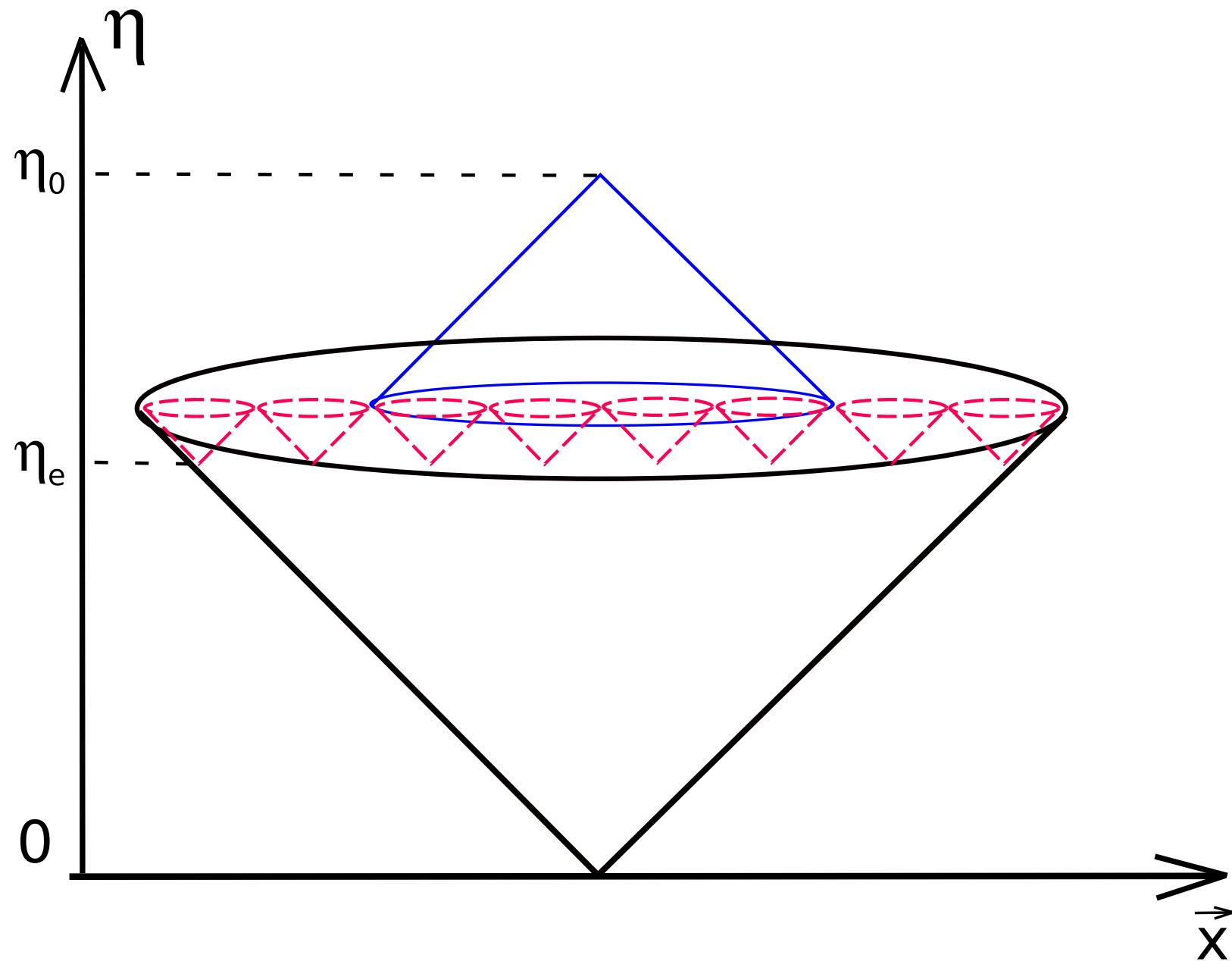
Раздувание \equiv инфляция =
расширение с гигантским ускорением,
с микро- до макро-размеров за малые доли секунды.

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.

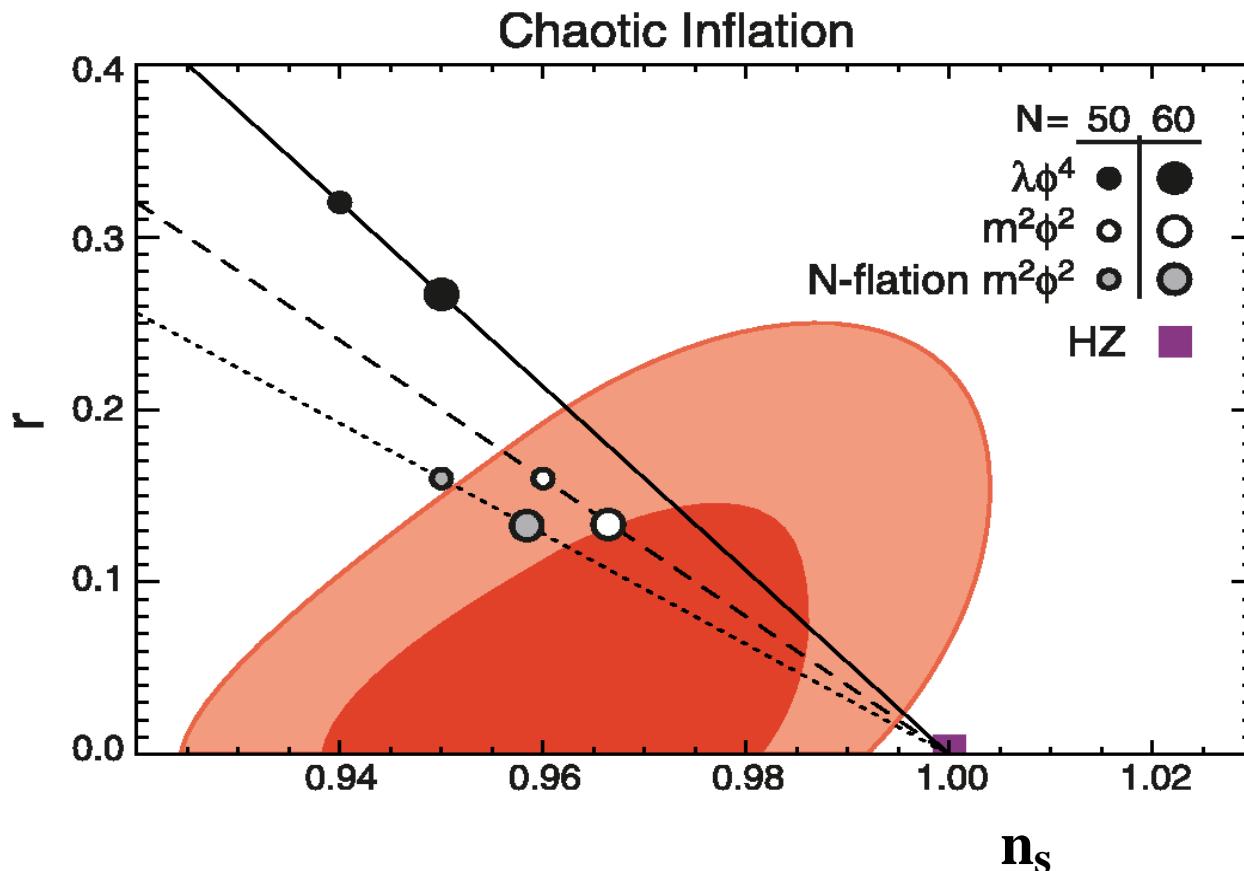
- Гравитационные волны с меньшими длинами имеют меньшие амплитуды.

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 флукутации слабовзаимодействующих квантовых полей**
- Наиболее популярная гипотеза о первоначальной космологической эпохе — **инфляция**

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

- Возмущения — однородные изотропные случайные поля

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

- (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 \Rightarrow отскок \Rightarrow расширение \Rightarrow переход на горячую стадию (“экпирозис”; вариант: циклическая Вселенная)
- “Генезис”: статическая Вселенная с $\rho = 0 \Rightarrow$ разгоняющееся расширение, рост $\rho \Rightarrow$ 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 \Rightarrow сравнение с
наблюдательными данными \Rightarrow ответ на вопрос:

Какой была Вселенная до горячего Большого Взрыва?

