

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

Лекция 9

Предыдущие лекции:  
горячая стадия эволюции Вселенной.

Нет сомнений,  
что не она была самой первой,  
хотя пока точно не известно,  
какая именно стадия  
ей предшествовала

# Проблемы теории горячей Вселенной

- Экстраполяция назад во времени  $\Rightarrow$  Большой взрыв, очень высокая (формально, бесконечная) плотность энергии, очень высокий (формально, бесконечный) темп расширения.
- В такой картине непонятно
  - Почему Вселенная такая большая и однородная?
  - Почему она была такая горячая?
  - Почему наше 3-мерное пространство евклидово?
  - etc.
- Точнее, имеются **проблемы начальных данных**

Обсудим подробнее

# Проблема горизонта

Горизонт в момент времени  $t$  = расстояние, которое прошел к этому времени световой сигнал, испущенный в момент Большого взрыва. Обозначаем  $l_H(t)$ .

По порядку величины

$$l_H(t) \sim ct \sim cH^{-1}(t) .$$

Это – размер причинно-связанной области в момент  $t$ .  
Области, находящиеся на расстоянии больше  $l_H(t)$ , в момент  $t$  ничего не знают друг о друге.

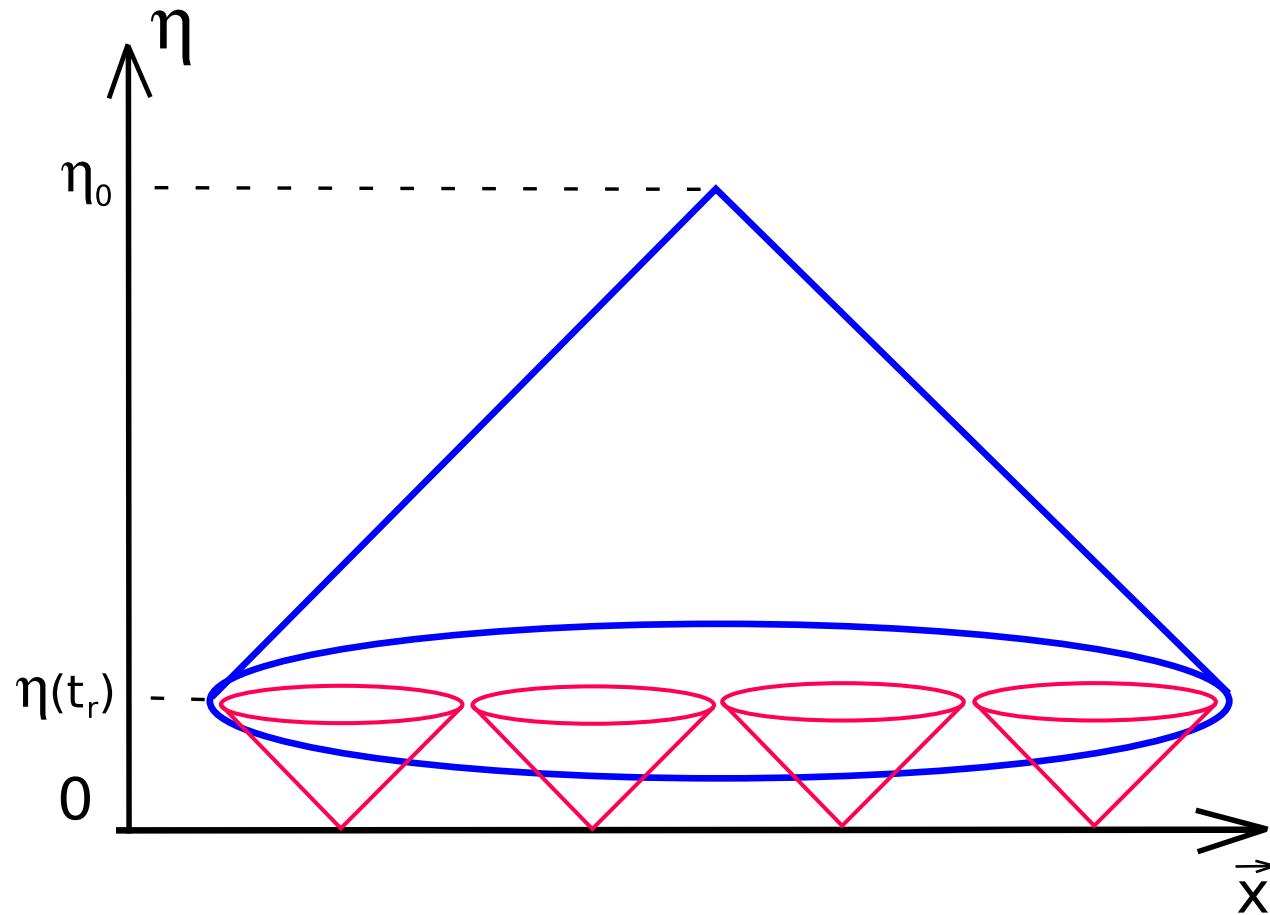
Размер горизонта растет со временем, горизонт расширяется.

Например, в эпоху рекомбинации ( $t_r = 380$  тыс. лет)  
 $l_H(t_r) \sim 380$  тыс. св. лет  $\approx 130$  кпк (точнее, 260 кпк).

С тех пор этот размер растянулся в 1100 раз из-за расширения Вселенной, сегодня это 290 Мпк = 900 млн. св. лет.

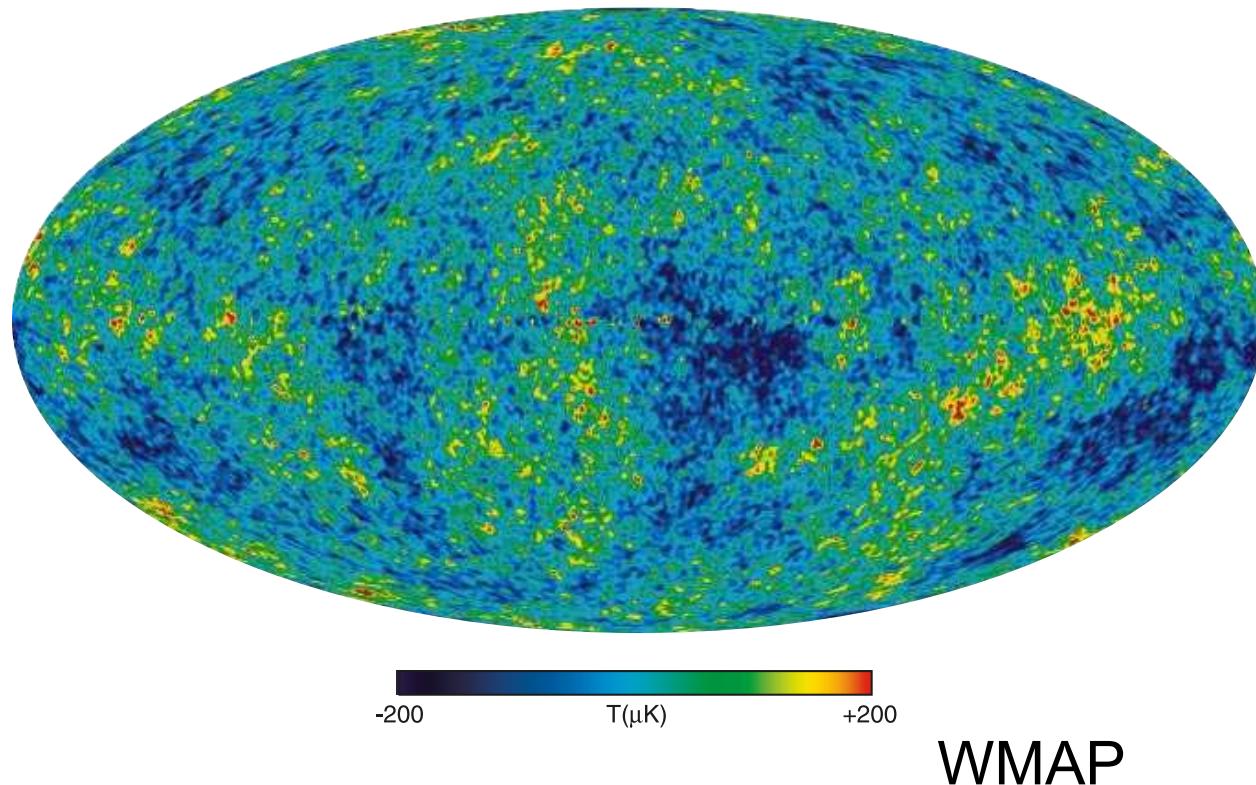
А размер современного горизонта ( $t = 13.8$  млрд. лет)  
 $l_{H,0} = 15000$  Мпк  $\approx 45000$  млн. св. лет

Мы видим  $50^3 = 125000$  областей, причинно несвязанных к времени рекомбинации



Тем не менее, все эти области одинаковы!

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



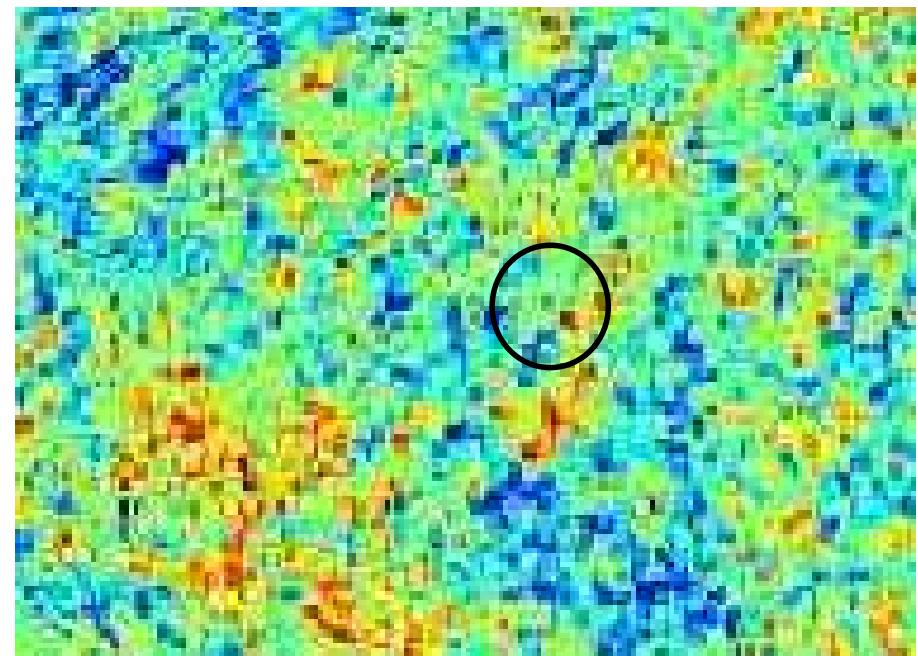
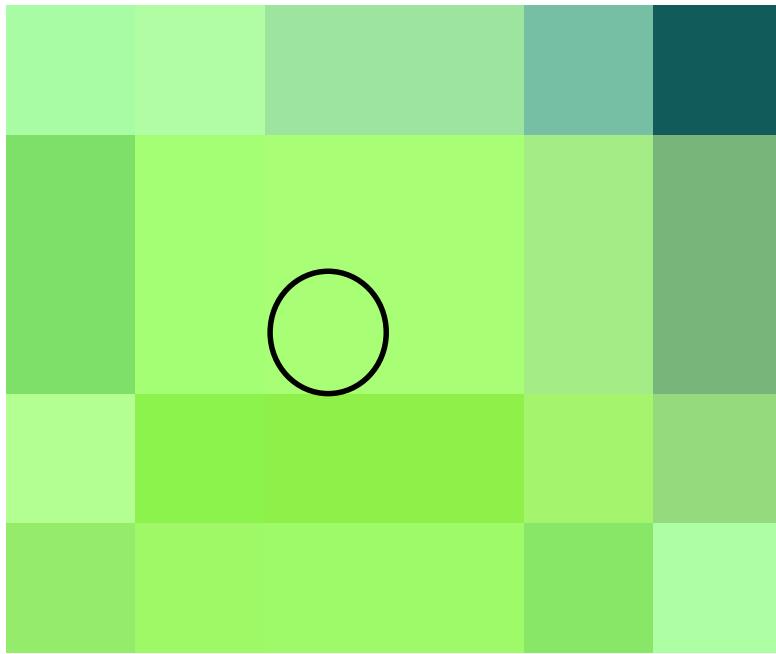
Объяснения этому теория горячей Вселенной не дает.  
**Проблема горизонта.**

# Проблема начальных неоднородностей

В ранней Вселенной были неоднородности плотности  
всех пространственных размеров

в том числе больше размера тогдашнего горизонта

В теории горячей Вселенной они существовали сразу после  
Большого взрыва. Их происхождение необъяснимо.



сначала размер неоднородности был больше горизонта,  
потом стал меньше

# Проблема кривизны пространства

$r(t)$  – радиус кривизны 3-мерного пространства

Сравниваем с размером горизонта

$$l_H(t) \sim cH^{-1}(t)$$

Уравнение Фридмана

$$H^2(t) = \frac{8\pi}{3}\varepsilon(t)$$

Для обычной материи  $\varepsilon \propto 1/r^3$ . Поэтому  $H \propto 1/r^{3/2}$  и

$$l_H(t) \propto r^{3/2}, \quad \frac{l_H}{r} \propto \sqrt{r}$$

Сегодня пространство (почти?) евклидово,  $r_0 \gg l_{H,0}$ .

Раньше и подавно,  $r \ggg l_H$ .

В теории горячей Вселенной сразу после Большого взрыва она была очень плоской. Объяснения нет.

# Проблема энтропии

Откуда во Вселенной столько вещества?

---

Сколько?

Количество фотонов с  $T = 2.7$  К:

$$n_\gamma = 410 \frac{1}{\text{см}^3}$$

Всего в видимой части

$$N_\gamma = 410 \frac{1}{\text{см}^3} \cdot (1500 \text{ Мпк})^3 = 10^{85} \text{ штук}$$

В теории горячей Вселенной необъяснимо.

# Горячая стадия – не первая!

Что было до горячей стадии – пока область гипотез.

Наиболее популярная и правдоподобная – инфляция.

А. А. Старобинский;

A. Guth;

А. Д. Линде; A. Albrecht, J. Steinhardt

конец 70-х – начало 80-х

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

Оно происходит за счёт нового поля – “инфлатона” –  
плотность энергии которого почти не зависит от времени

---

$$\varepsilon_{infl} \approx \text{const}$$

Похоже на современную эпоху, но только плотность энергии  
на много порядков выше

Вспоминаем уравнение Фридмана:

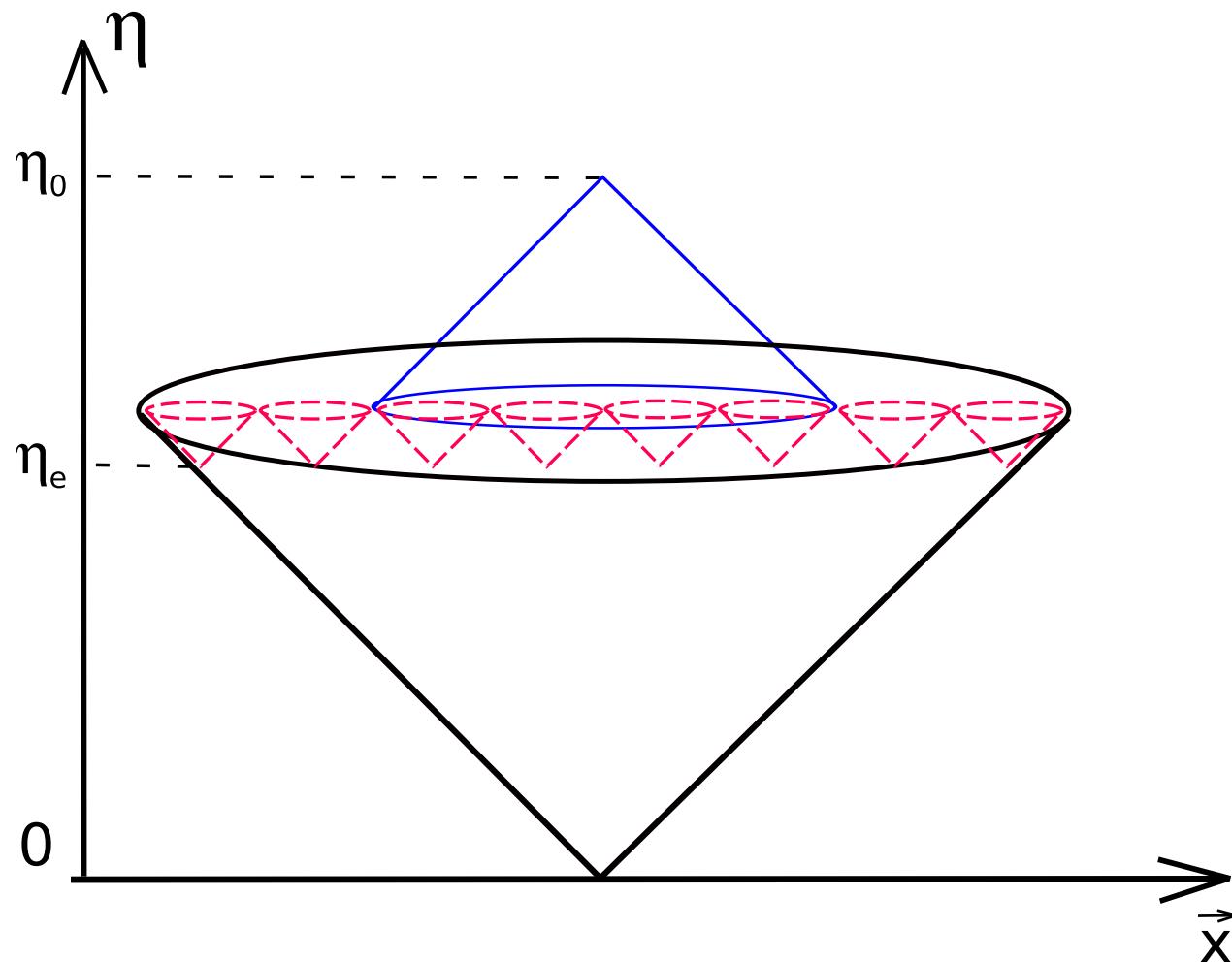
$$H^2(t) \equiv \left(\frac{\dot{r}}{r}\right)^2(t) = \frac{8\pi}{3} G_{\text{Ньютона}} \cdot \epsilon_{infl}$$

$$\epsilon_{infl} \approx \text{const} \implies \dot{r} = H_{infl} r \implies$$

$$r = c \exp(H_{infl} t), \quad H_{infl} = \sqrt{\frac{8\pi}{3} G \epsilon_{infl}} \approx \text{const}$$

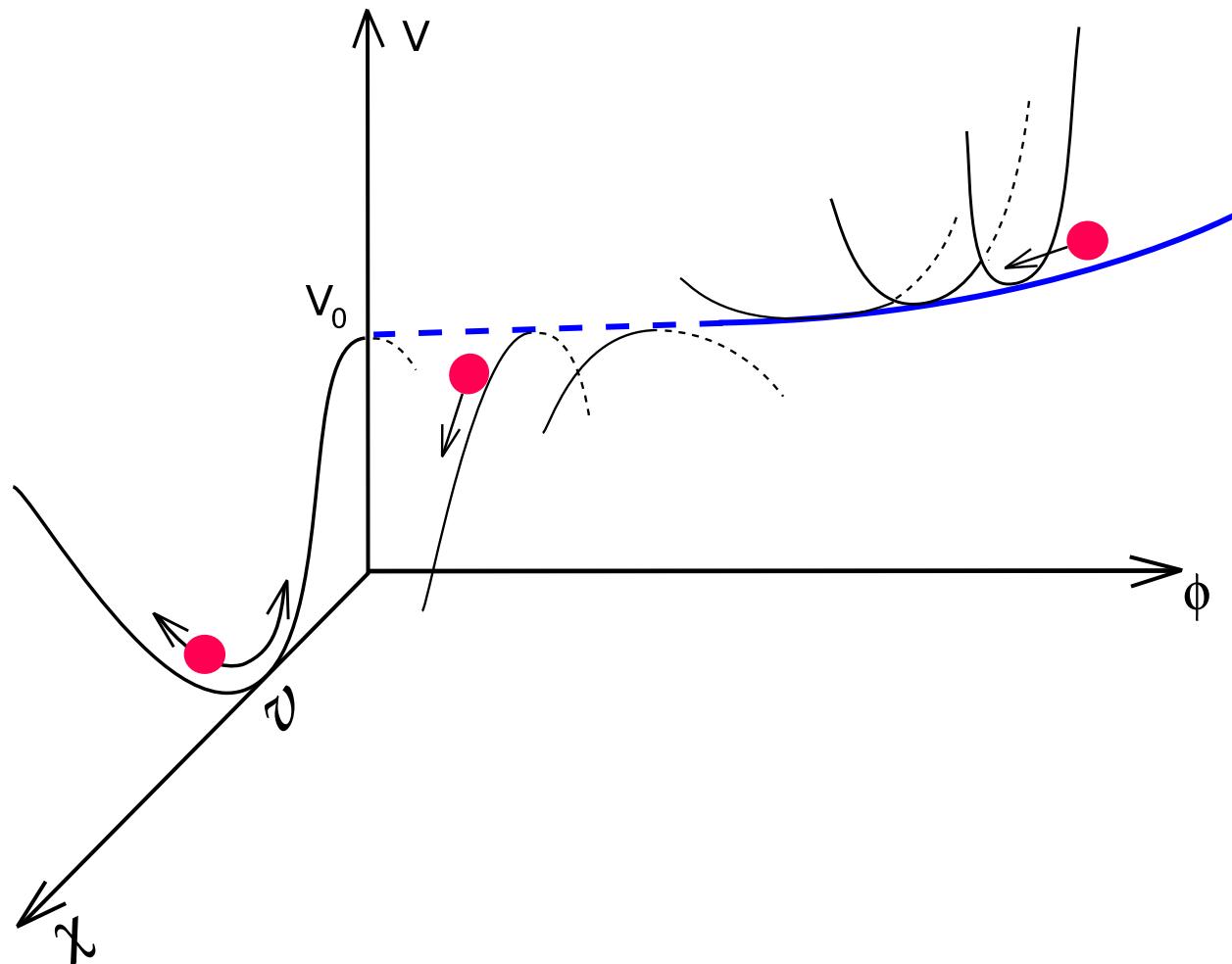
- Неоднородности, если были, разглаживаются, Вселенная становится везде одинаковой
- Пространство растягивается, пространственная кривизна уменьшается
- В конце инфляции энергия инфлатона переходит в тепло, генерируется обычное вещество
- Характерные времена:  $H_{infl}^{-1} \sim 10^{-37}$  с (зависит от конкретной модели).

- Достаточная длительность инфляции  $\sim 140H_{infl}^{-1}$ . За это время область планковского размера  $l_{Pl} = 10^{-33}$  см растягивается до видимой Вселенной:  $l = 10^{33} \cdot e^{140}$  см  $\sim l_{H,0}$   
 [Экспонента – страшная сила!] Типично – гораздо больше.



# Как такое может быть?

Механическая аналогия:



В конце концов энергия колебаний переходит в тепло. Сразу во всем огромном пространстве.

Механизм генерации  
начальных неоднородностей плотности энергии:  
**усиление вакуумных флуктуаций квантовых полей**

Муханов, Чибисов;  
Hawking;  
Старобинский;  
Guth, Pi  
начало 80-х

Галактики, скопления галактик, мы с вами —  
потомки вакуумных флуктуаций квантового поля.

NB: Это утверждение, похоже, не зависит от того, верна или нет инфляционная теория.

## Квантовые флуктуации

- Осциллятор (лекция 3). Энергия

$$H = \frac{P^2}{2} + \omega^2 \frac{X^2}{2}$$

Энергия основного состояния  $E = \hbar\omega/2 \neq 0$

В чём дело?

Осциллятор колеблется даже в низшем по энергии состоянии.

Согласуется с  $\Delta P \cdot \Delta X \gtrsim \hbar$ .

- Осциллятор в основном состоянии (положим  $\hbar = 1$ )

$$\langle \frac{1}{2}P^2 \rangle = \langle \frac{\omega^2}{2}X^2 \rangle = \frac{\omega^2}{2}$$

Флуктуации координаты

$$\langle X^2 \rangle \sim \frac{1}{\omega}$$

- Квантовое поле – набор осцилляторов (лекция 5).  
Интересен случай нулевой массы. Тогда

$$\omega = p = 2\pi/\lambda,$$

$\lambda$  – длина волны.

В единице объема волн с длинами порядка  $\lambda$  имеется  $1/\lambda^3$  типов  $\Rightarrow 1/\lambda^3$  осцилляторов.

- Флуктуации поля с длинами волн порядка  $\lambda$ :  
 $\langle \varphi^2 \rangle \sim (1/\omega) \cdot (1/\lambda^3) \sim 1/\lambda^2$

Итак, вакуумные флуктуации безмассового поля характерного пространственного размера  $\lambda$

$$\langle \phi^2 \rangle \sim \frac{1}{\lambda^2} \implies \sqrt{\langle \phi^2 \rangle} \sim \frac{1}{\lambda}$$

Заметную амплитуду имеют только вакуумные флуктуации малых размеров.

NB: Электрическое, магнитное поле =  $\dot{\vec{\phi}}, \vec{\nabla} \times \vec{\phi} \implies \sqrt{\langle H^2 \rangle} \sim 1/\lambda^2$ .

NB:  $1/\text{cm}^2 \sim 10^{-8}$  Гаусс.

Для сравнения, магнитное поле Земли = 0.5 Гаусс.

NB: Эффекты, вызванные вакуумными флуктуациями полей, надежно проверены экспериментом.

NB: Вакуумные флуктуации квантовых полей = виртуальные частицы (лекция 5). Разный язык для одного и того же.

$$\langle \phi^2 \rangle \sim \frac{1}{\lambda^2} \implies \sqrt{\langle \phi^2 \rangle} \sim \frac{1}{\lambda}$$

- В расширяющейся Вселенной это верно только для волн малой длины. Если же  $\lambda > H^{-1}$ , то флуктуации заморожены, их амплитуда не зависит от времени.
- Режим инфляции:

Изначально коротковолновые флуктуации увеличивают свою длину волны из-за расширения Вселенной. Пока  $\lambda < H_{infl}^{-1}$  амплитуда флуктуации убывает как  $1/\lambda(t)$ .

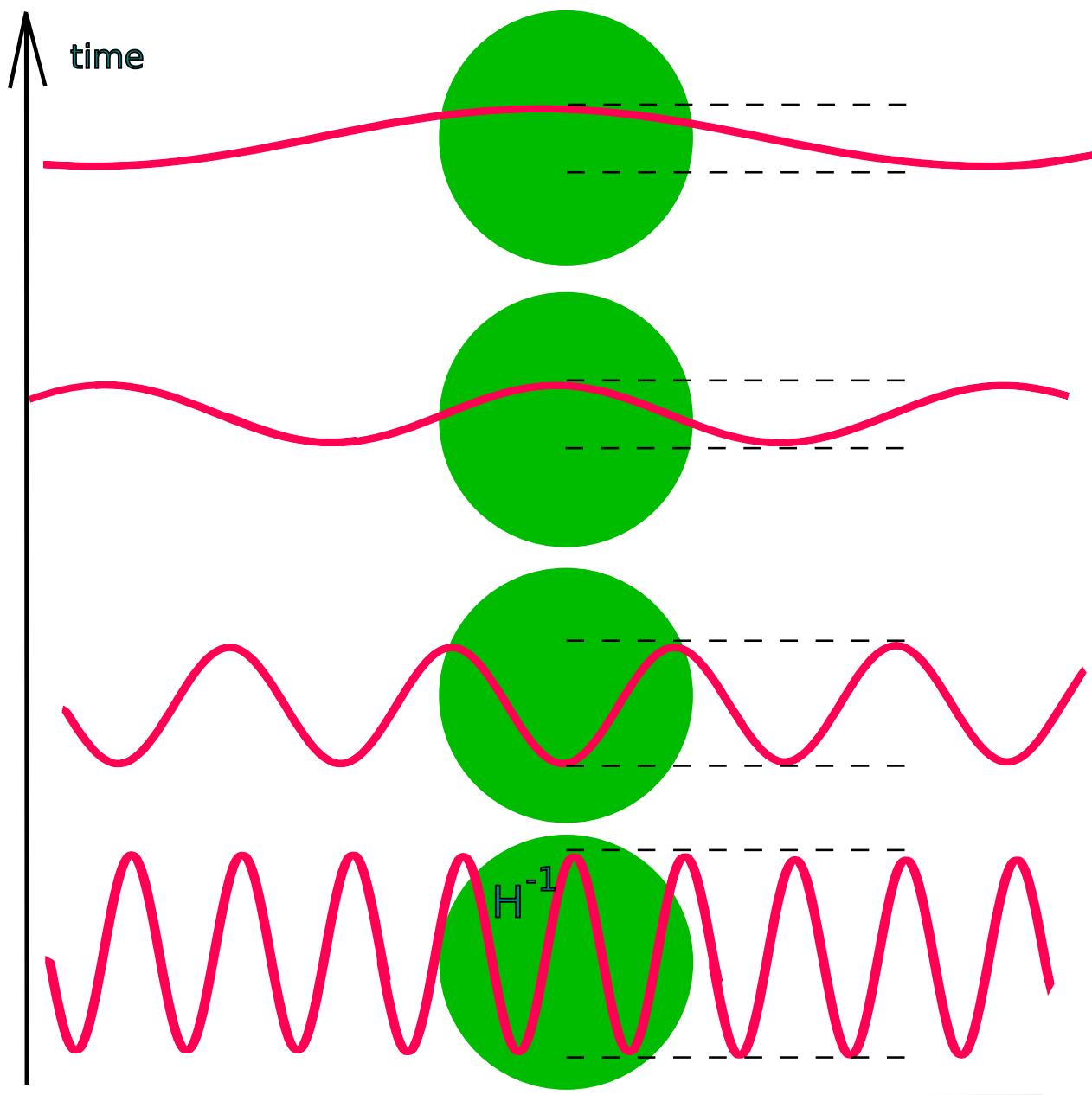
В момент, когда  $\lambda \sim H_{infl}^{-1}$ , амплитуда замораживается.

После этого

$$\langle \phi^2 \rangle \sim H_{infl}^2 \implies \sqrt{\langle \phi^2 \rangle} \sim H_{infl}$$

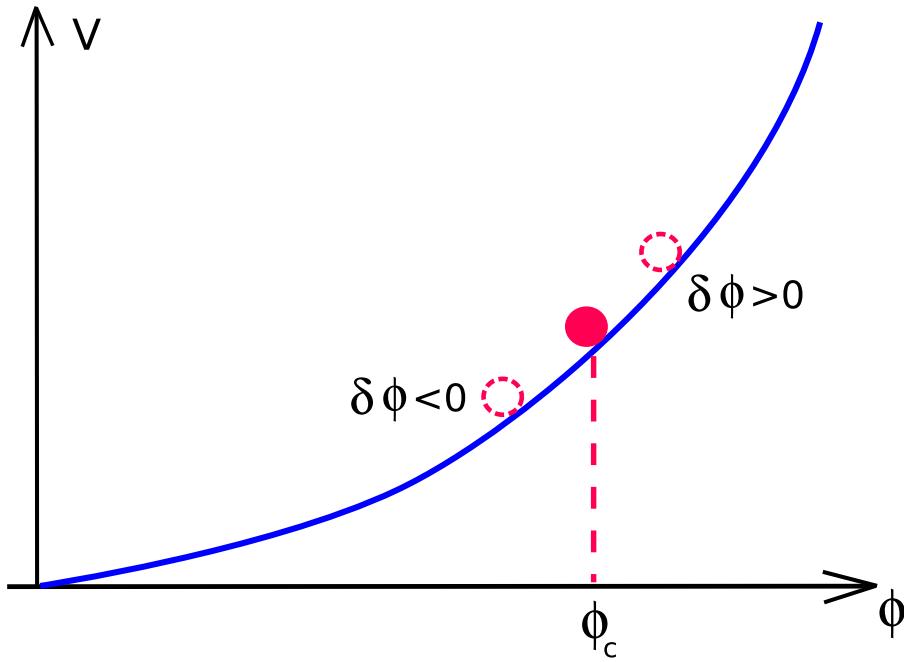
Большие флуктуации почти всех длин волн.

Амплитуда почти не зависит от длины волны.



# Неоднородности плотности энергии

Флуктуации инфлатона  $\Rightarrow$  в разных областях Вселенной поле инфлатона немного разное

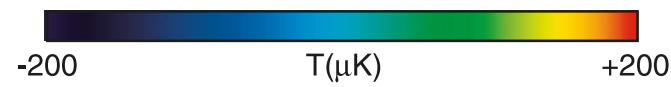
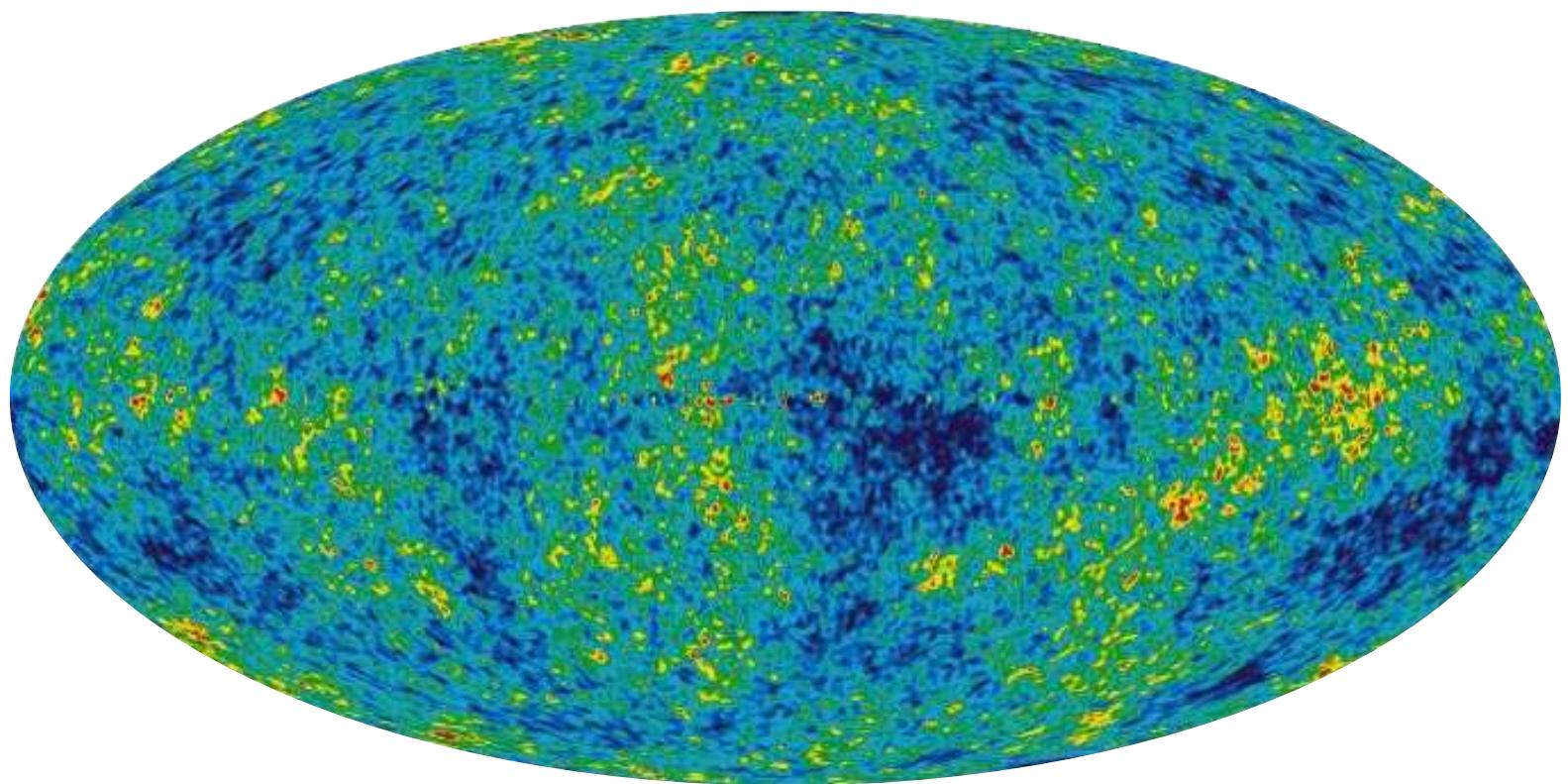


Плотность энергии тоже немного разная. Что и требуется.

Предсказание: амплитуда неоднородности почти не зависит от ее пространственного размера (почти “плоский спектр”).

Подтверждается наблюдениями!

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



WMAP

# 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.

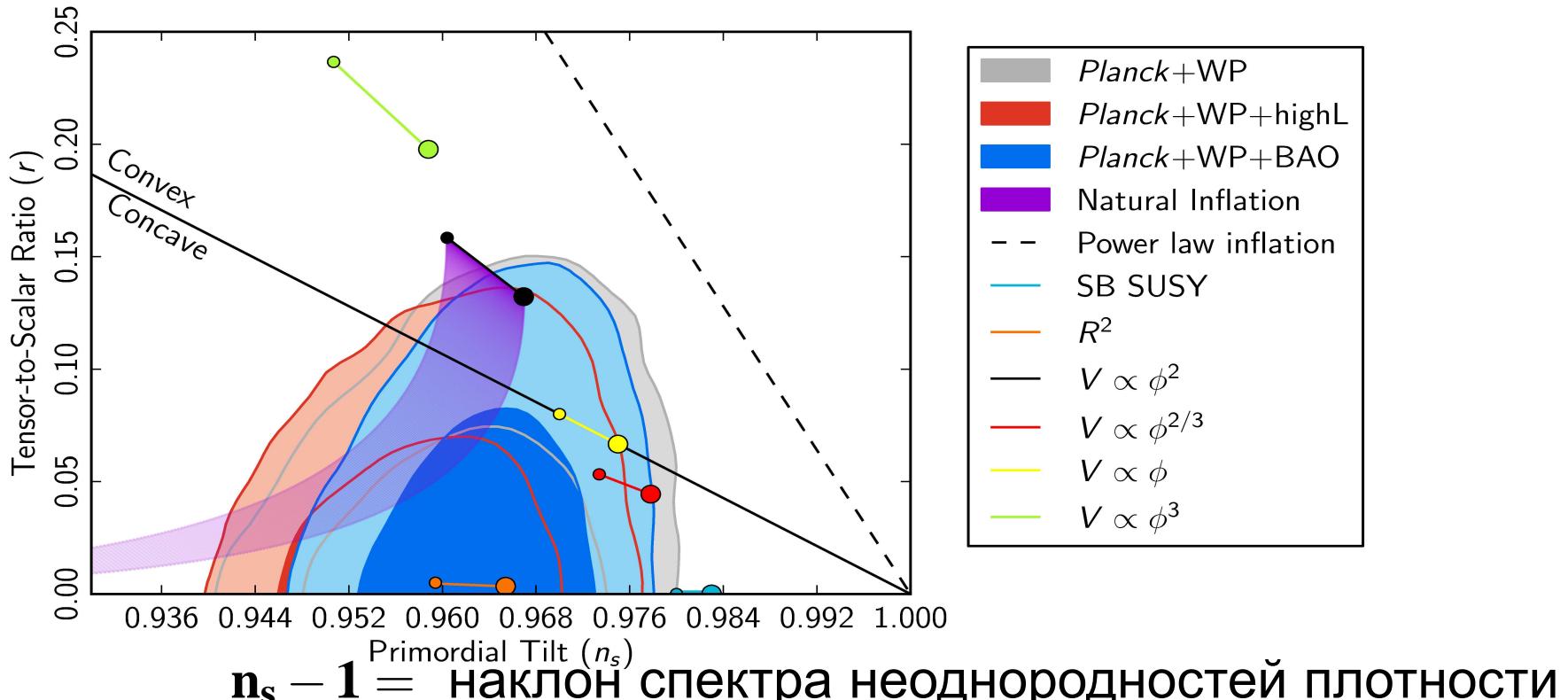
[Гравитационные волны с меньшими длинами имеют меньшие амплитуды.]

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



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

Наклон  $n_s < 1$  плюс, возможно, гравитационные волны

# Альтернативы инфляции

Начальная стадия изучения вопроса.

Самосогласованные сценарии, альтернативные инфляции, имеются!

- Сжатие  $\Rightarrow$  отскок  $\Rightarrow$  расширение  $\Rightarrow$  переход на горячую стадию  
("экпирозис"; вариант: циклическая Вселенная)
- "Генезис":  
статическая Вселенная с  $\varepsilon = 0 \Rightarrow$  разгоняющееся расширение, рост  $\varepsilon \Rightarrow$  переход на горячую стадию

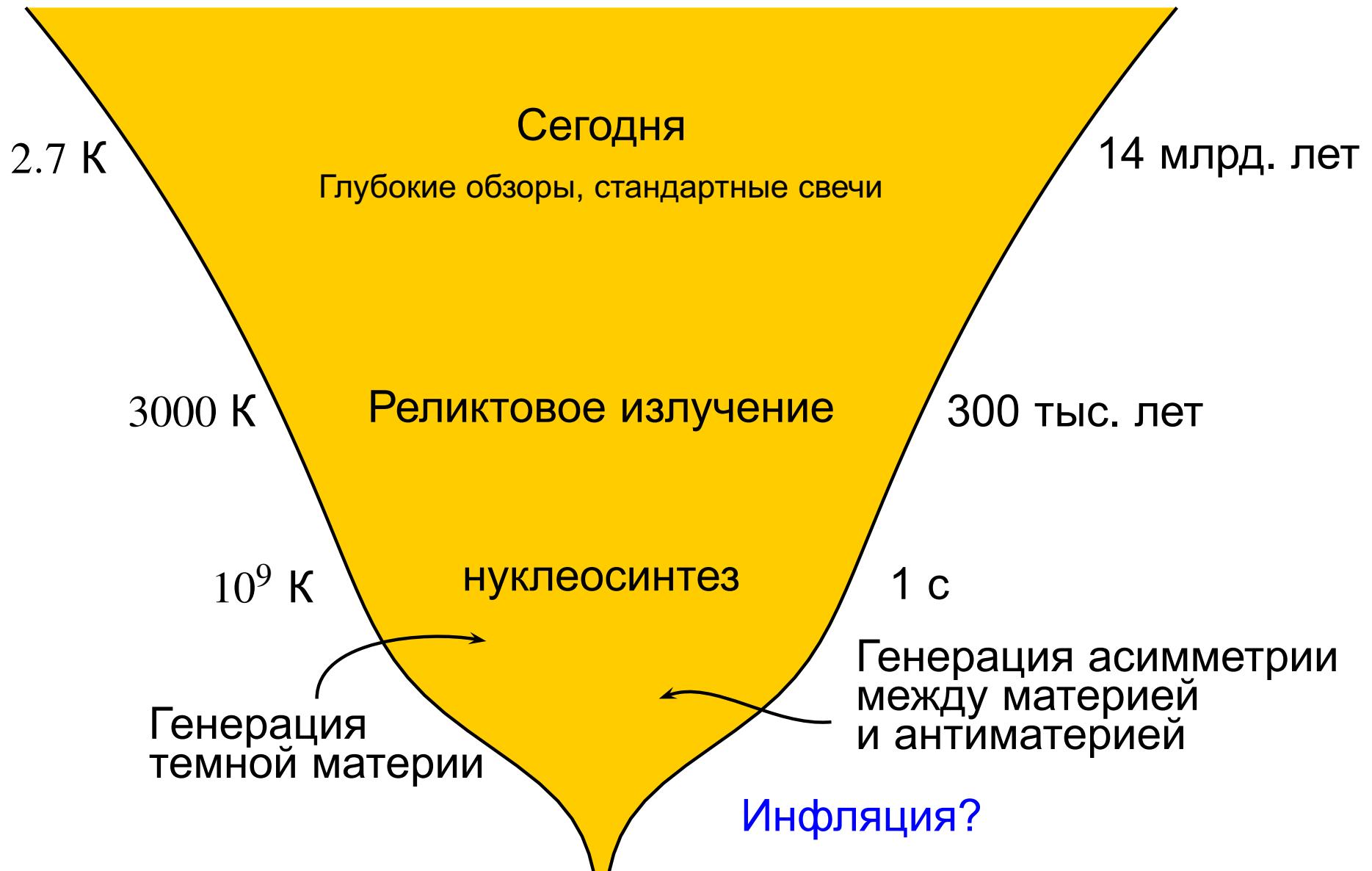
Сегодня наблюдения не позволяют дать ответа, какой из сценариев на самом деле работал

Нужно искать (теоретически и экспериментально) тонкие эффекты

Реликтовые гравитационные волны предсказываются только инфляцией.

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

Какой была Вселенная до горячей  
стадии?



## Итак,

- Картину развития Вселенной по крайней мере начиная с возраста 1 с известна на количественном уровне
- Она ставит многочисленные вопросы физике частиц
  - Кто такие частицы тёмной материи?
  - Каков механизм генерации асимметрии между материей и антиматерией во Вселенной?
  - Почему плотность массы тёмной материи близка к плотности массы обычного вещества?
  - Какова природа тёмной энергии?
- Нет сомнений, что горячей стадии предшествовала другая стадия — эпоха генерации первичных неоднородностей. Возможно, инфляция. Но вопрос есть:
  - Какой была Вселенная до горячей стадии?

По крайней мере на некоторые из этих вопросов в обозримом будущем будут получены ответы из наземных экспериментов и космологических наблюдений