

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 \implies 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)

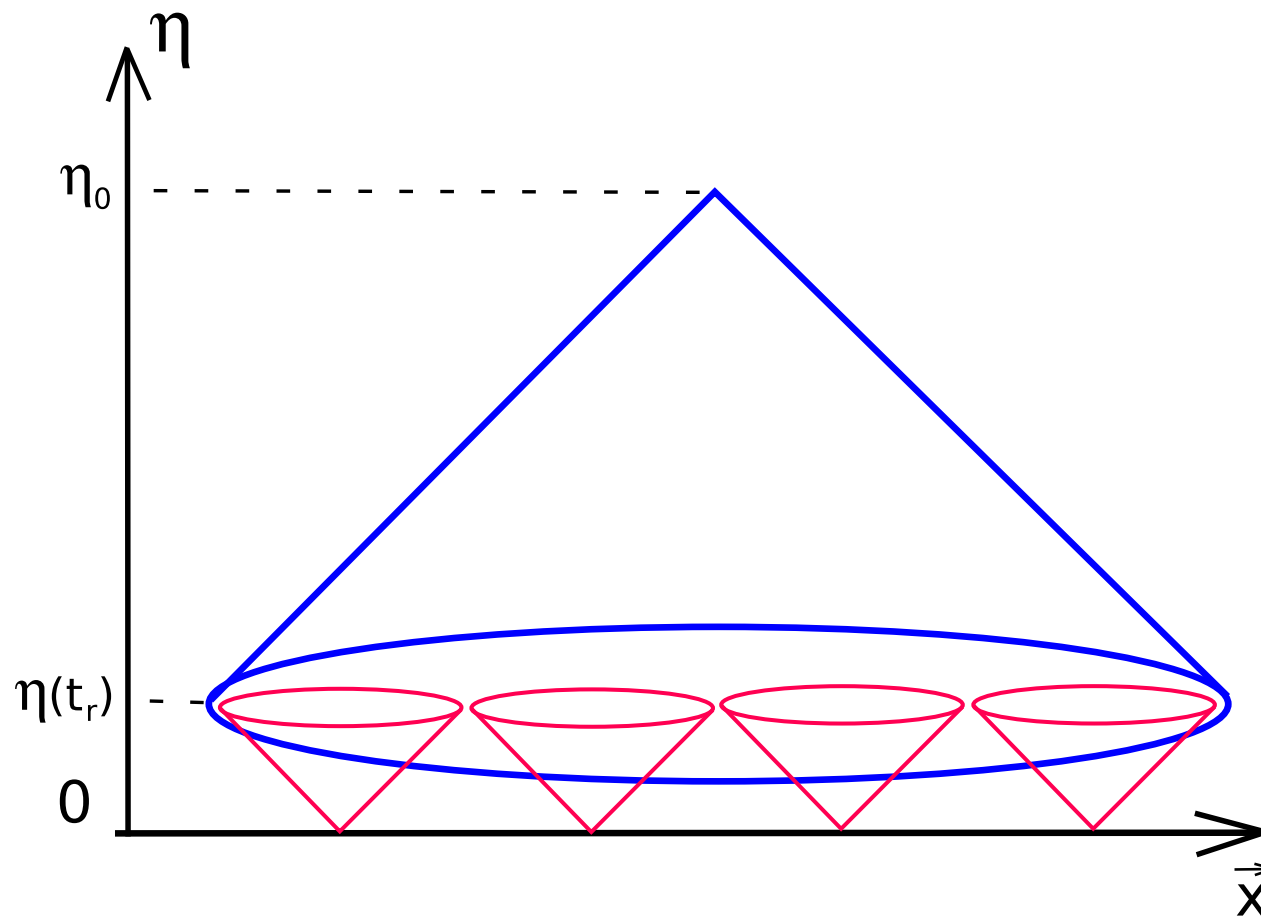
$$l_H(t_r) \sim 380 \text{ тыс. св. лет} \approx 130 \text{ кпк (точнее, 260 кпк)}.$$

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

А размер современного горизонта ($t = 13.8$ млрд. лет)

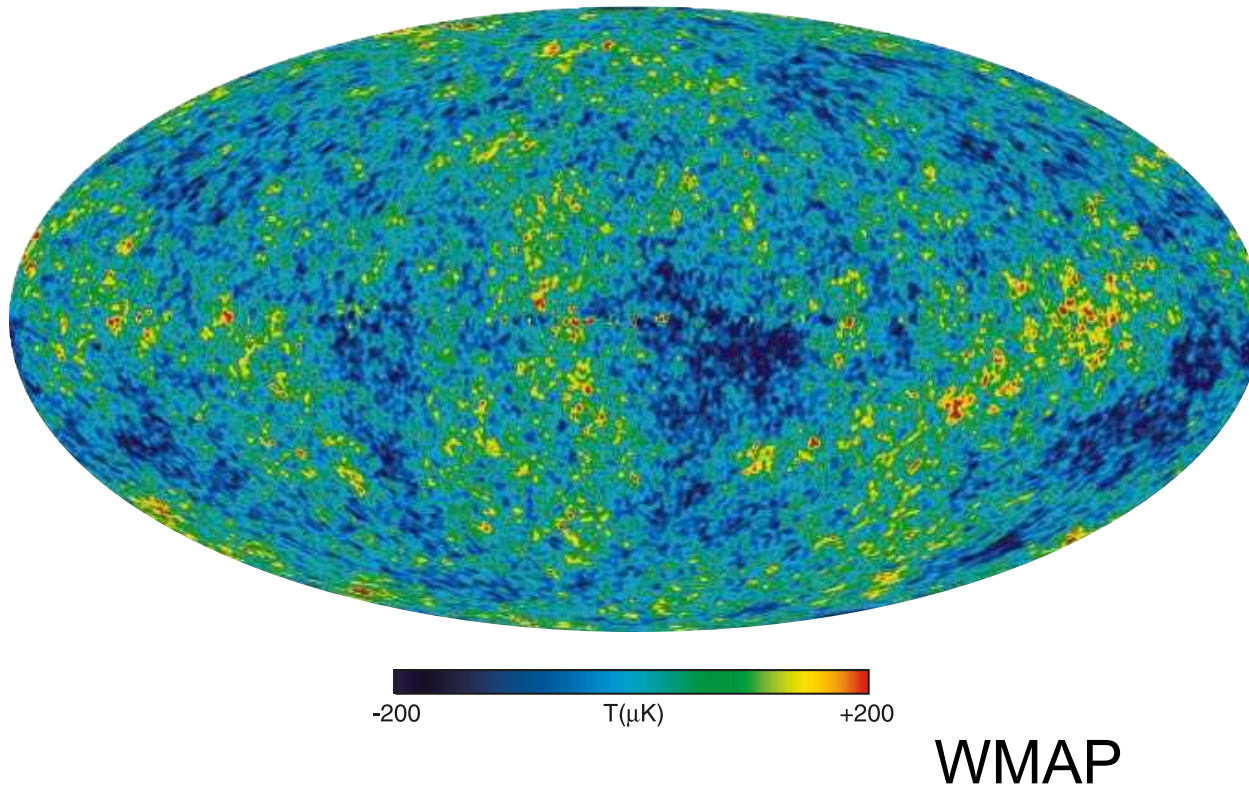
$$l_{H,0} = 15000 \text{ Мпк} \approx 45000 \text{ млн. св. лет}$$

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



Тем не менее, все эти области одинаковы!

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



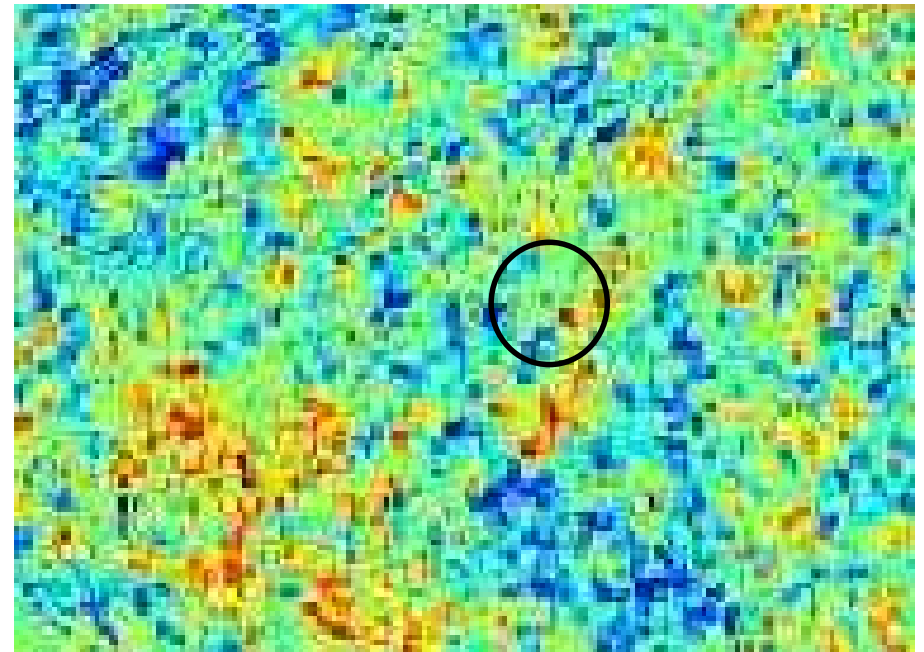
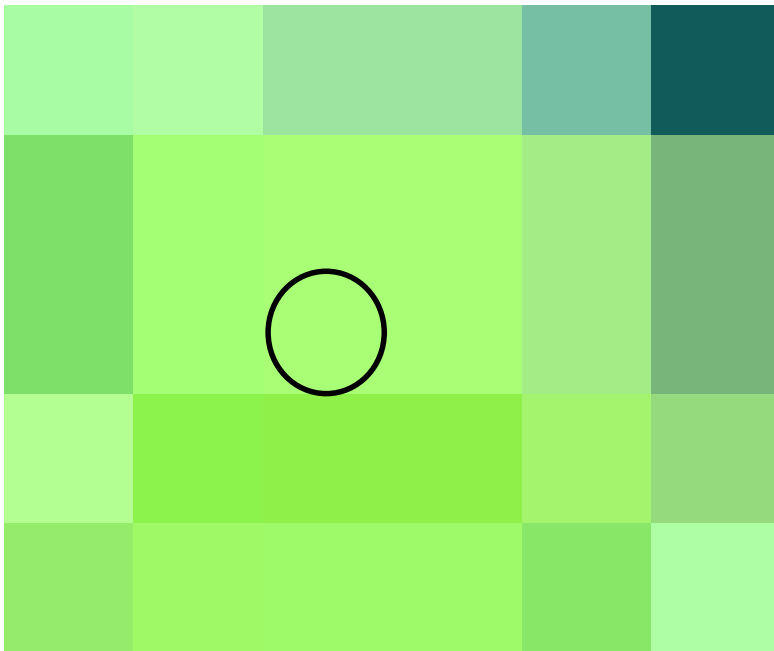
Объяснения этому теория горячей Вселенной не дает.
Проблема горизонта.

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, $r \gg \gg \gg l_H$.

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

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

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

Вспоминаем уравнение Фридмана:

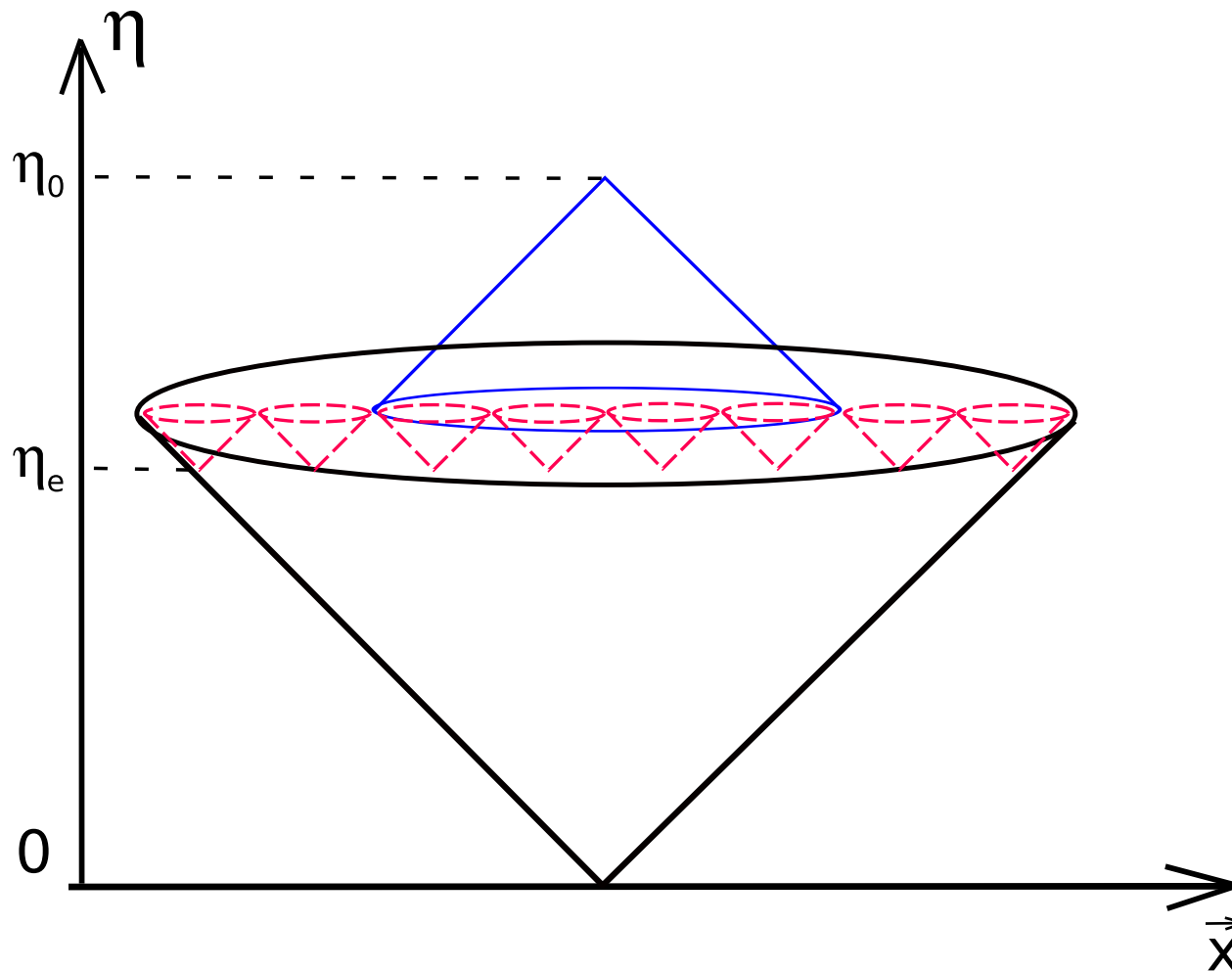
$$H^2(t) \equiv \left(\frac{\dot{r}}{r} \right)^2 (t) = \frac{8\pi}{3} G_{\text{НЬЮТОН}} \cdot \varepsilon_{infl}$$

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

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

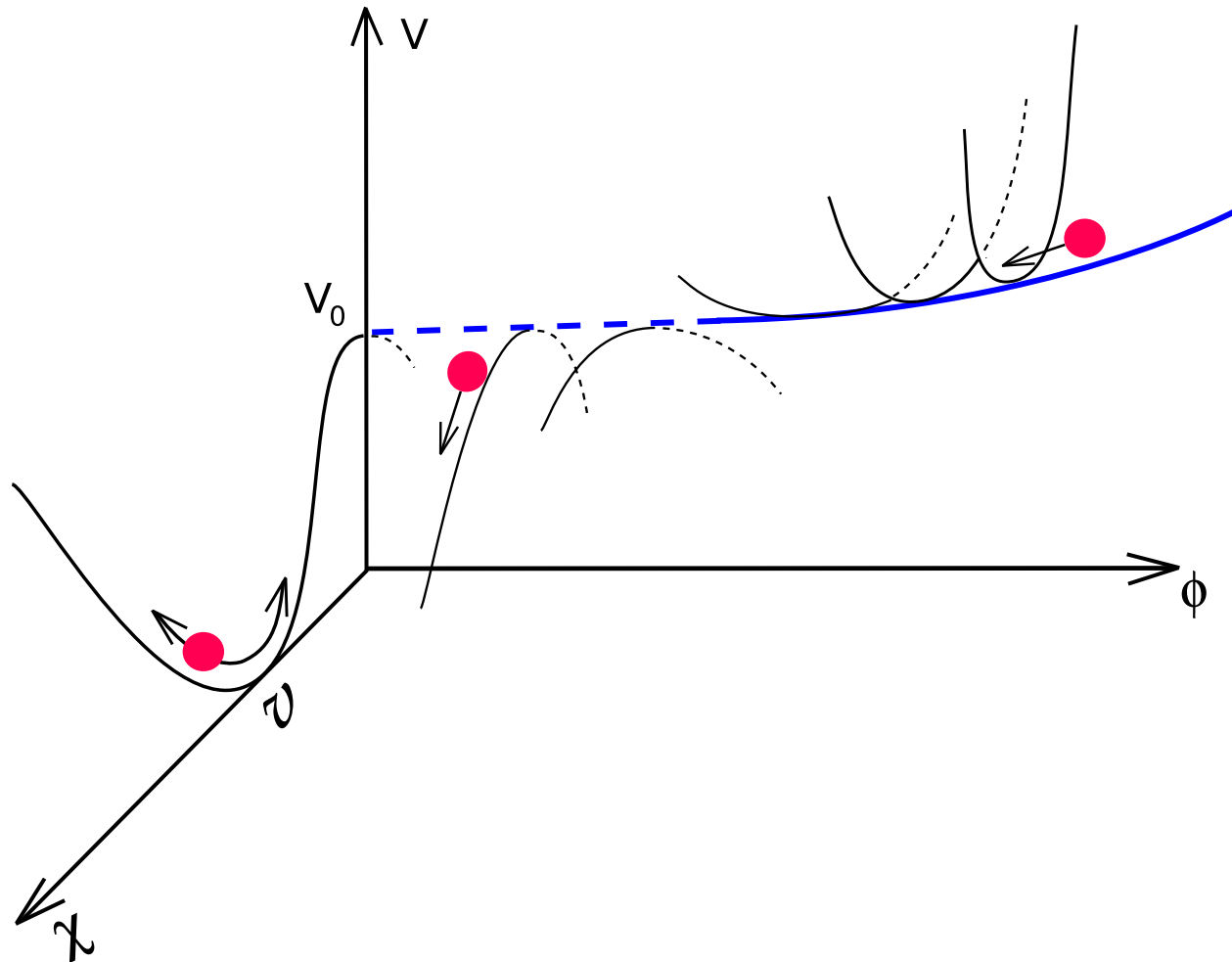
- Неоднородности, если были, разглаживаются, Вселенная становится везде одинаковой
- Пространство растягивается, пространственная кривизна уменьшается
- В конце инфляции энергия инфлатона переходит в тепло, генерируется обычное вещество
- Характерные времена: $H_{infl}^{-1} \sim 10^{-37}$ с (зависит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

- Достаточная длительность инфляции $\sim 140H_{infl}^{-1}$. За это время область планковского размера $l_{Pl} = 10^{-33}$ см растянется 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 чем дело?

Осциллятор колеблется даже в низшем по энергии состоянии.

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

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

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

Флуктуации координаты

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

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

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

λ — длина волны.

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

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

Итак, вакуумные флуктуации безмассового поля характерного пространственного размера λ

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

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:

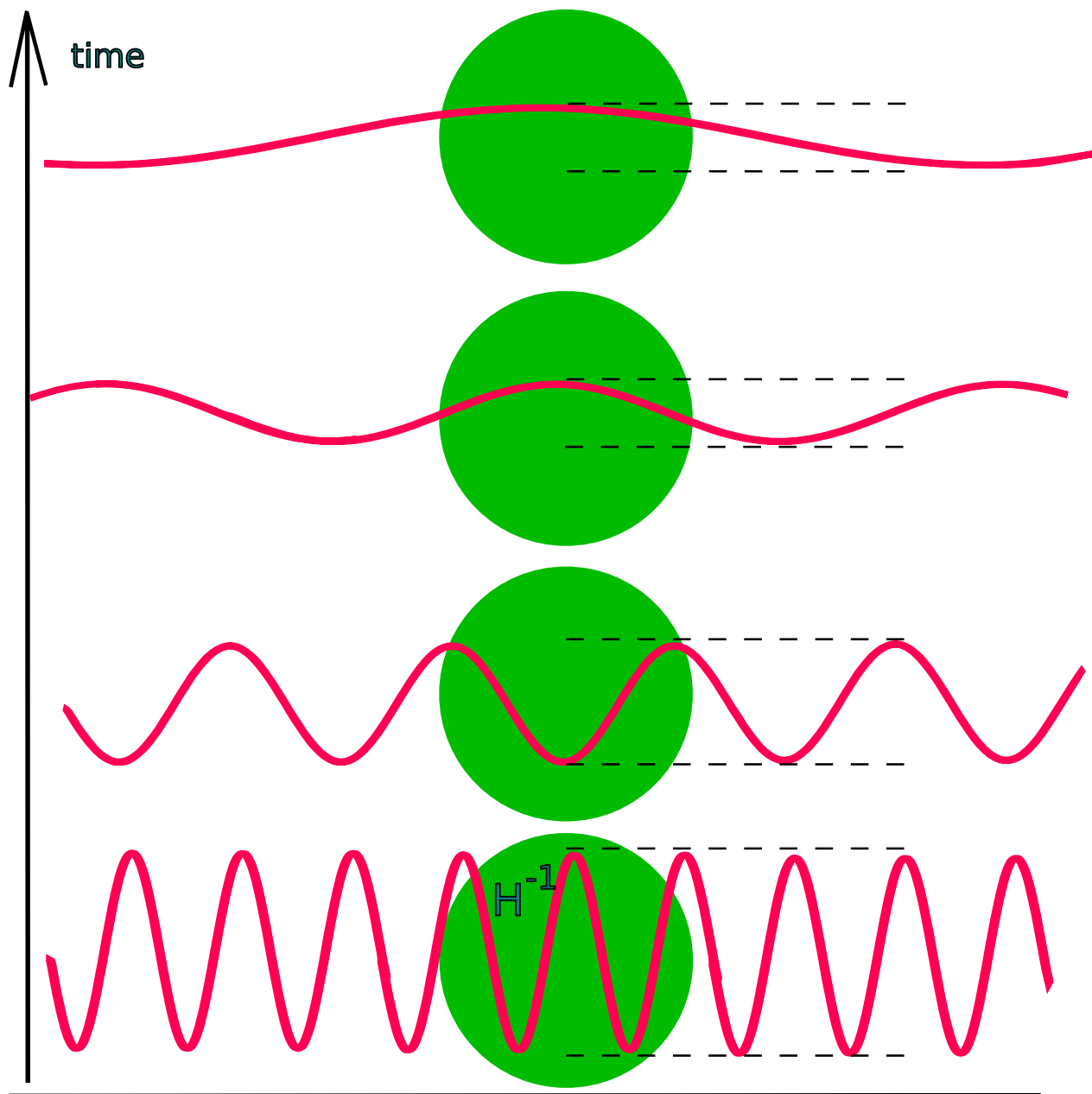
Изначально коротковолновые флуктуации увеличивают свою длину волны из-за расширения Вселенной. Пока $\lambda < H_{infl}^{-1}$ амплитуда флуктуации убывает как $1/\lambda(t)$.

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

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

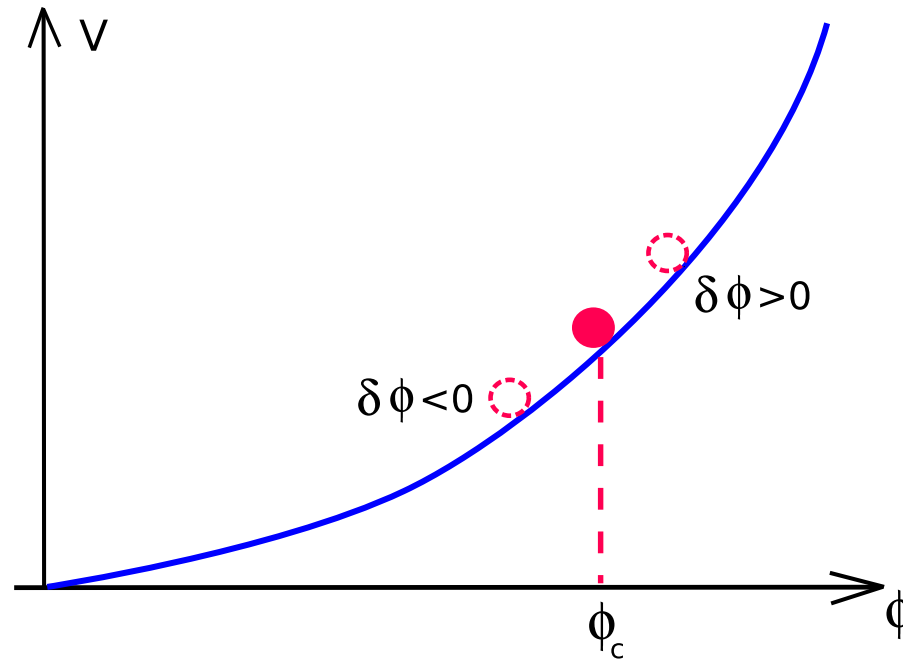
Большие флуктуации почти всех длин волн.

Амплитуда почти не зависит от длины волны.



Неоднородности плотности энергии

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

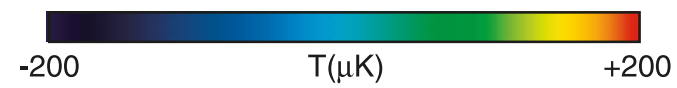
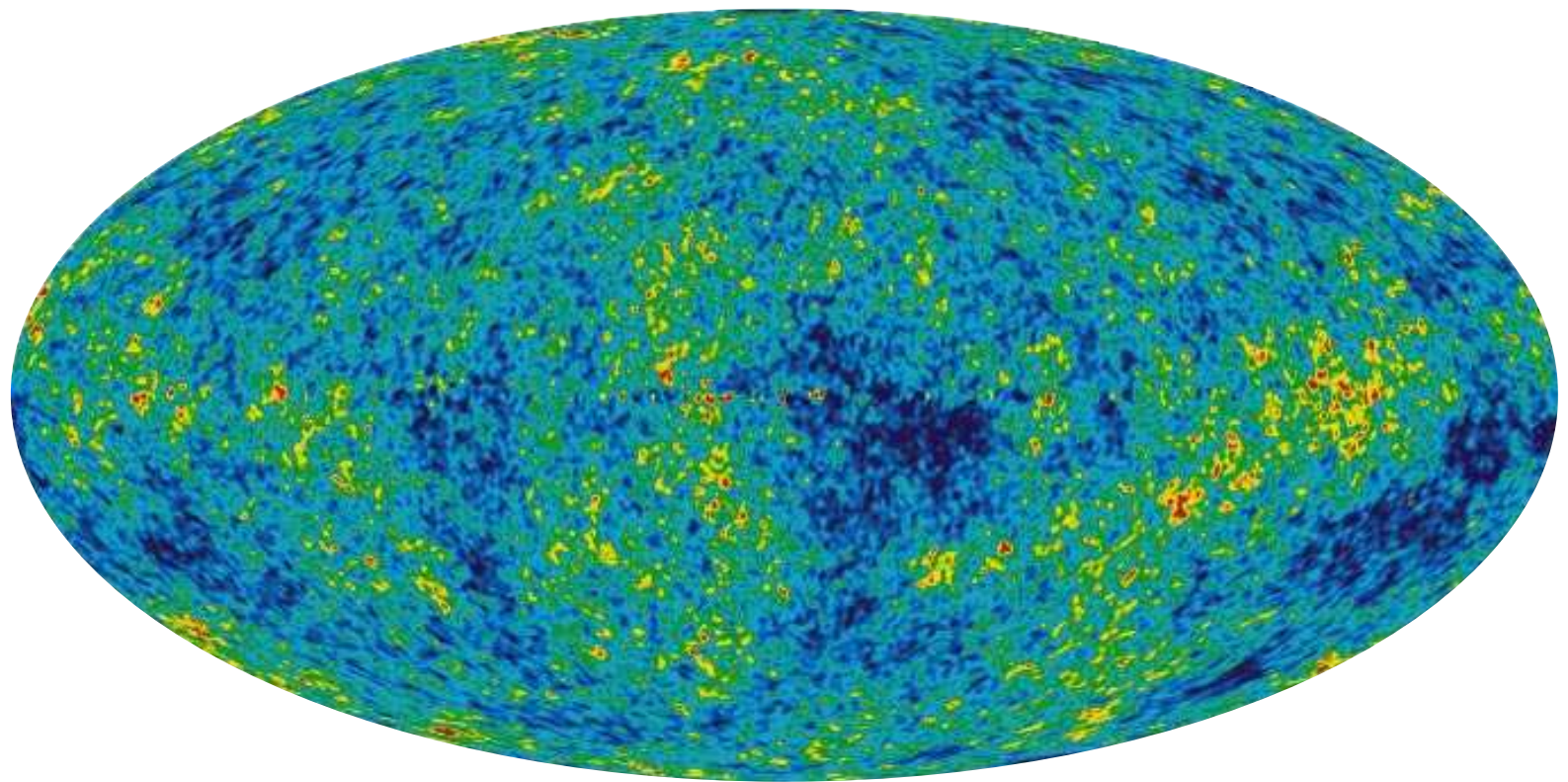


Плотность энергии тоже немного разная. Что и требуется.

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

Подтверждается наблюдениями!

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



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.

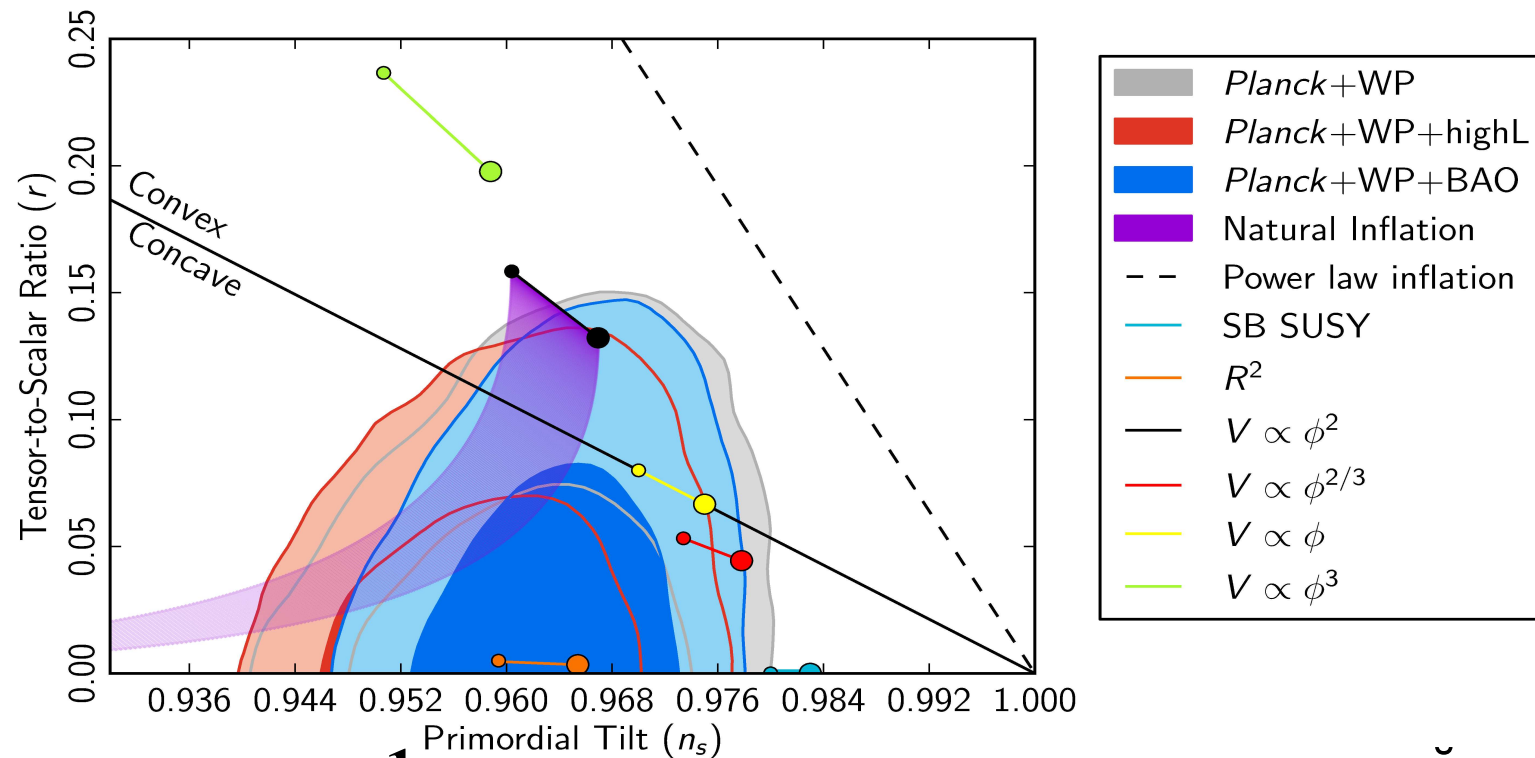
[Гравитационные волны с меньшими длинами имеют меньшие амплитуды.]

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



$n_s - 1 =$ **наклон спектра неоднородностей плотности**

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

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

Альтернативы инфляции

Начальная стадия изучения вопроса.

Самосогласованные сценарии, альтернативные инфляции, имеются!

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

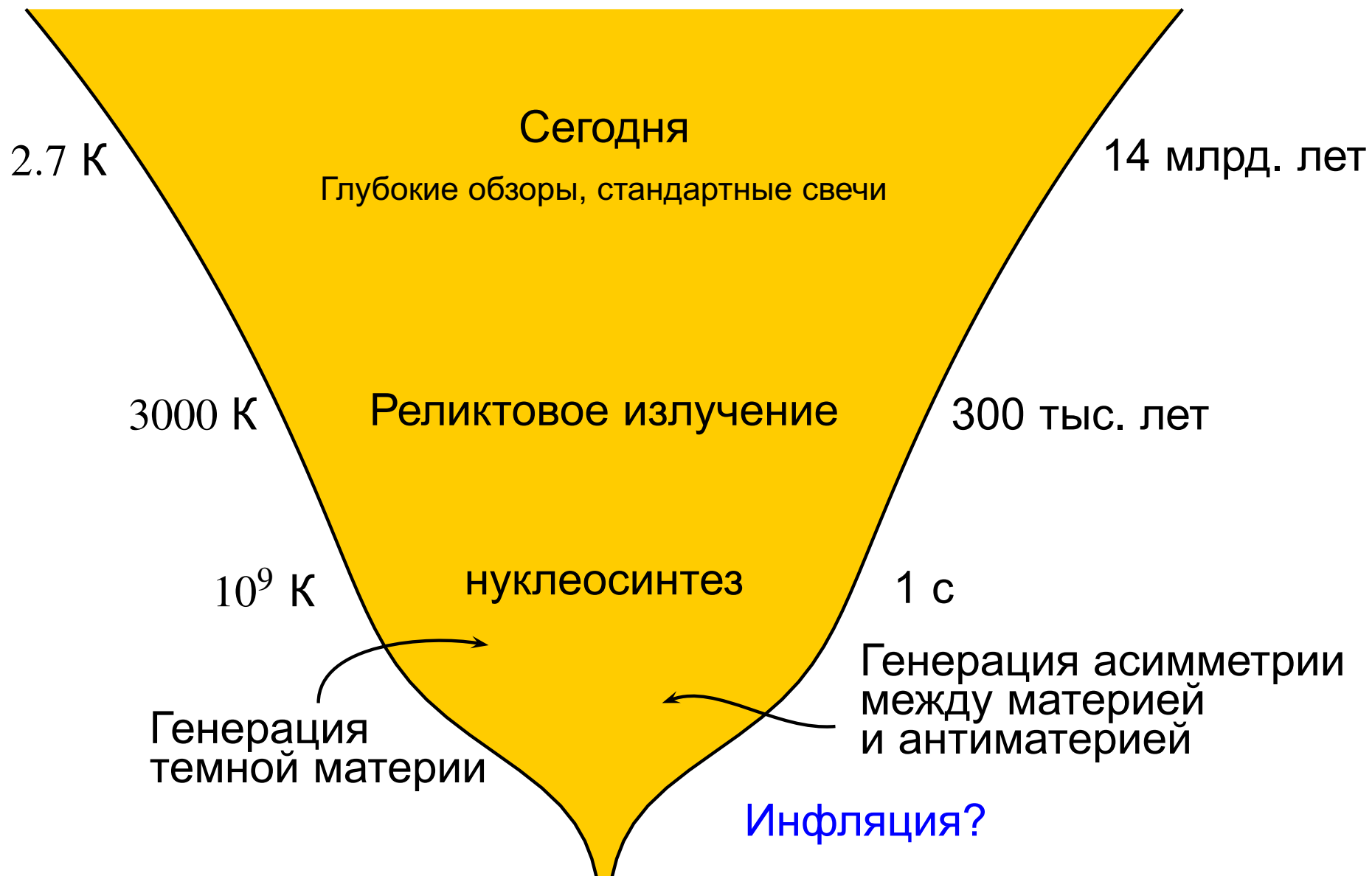
Сегодня наблюдения не позволяют дать ответа, какой из сценариев на самом деле работал

Нужно искать (теоретически и экспериментально) тонкие эффекты

Реликтовые гравитационные волны предсказываются только инфляцией.

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

Какой была Вселенная до горячей
стадии?



Итак,

- Картина 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