

# ВВЕДЕНИЕ В КОСМОЛОГИЮ

## лекция 7

### Инфляция

- Основные проблемы фридмановских моделей
- Экспоненциальное расширение
- Скалярное поле
- Проблема окончания инфляции
- «Хаотическая инфляция» и мульти-Вселенная

# Проблемы стандартной космологии

- Проблема горизонта (причинной связи)
- Проблема плоскостности:  $\Omega_{\text{total}} \approx 1$
- Проблема магнитных монополей
- Проблема размера Вселенной

Возраст Вселенной в планковских единицах:  $14 \cdot 10^{10} \text{ лет} / 10^{-43} \text{ с} \approx 10^{60}$ .

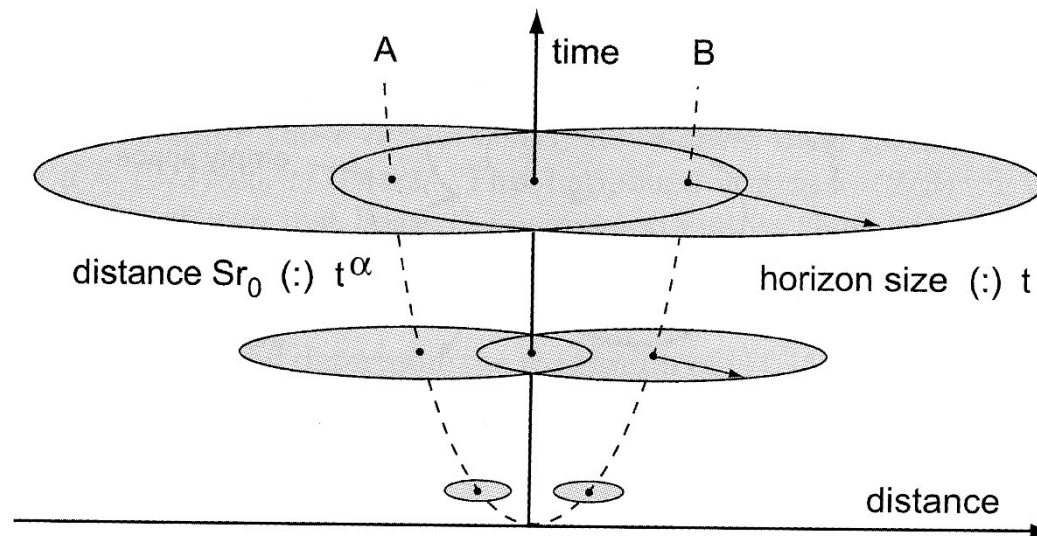
Размер видимой Вселенной (в тех же единицах):  $40 \cdot 10^{10} \text{ св.лет} / 10^{-33} \text{ см} \approx 10^{60}$ .

НО: по Фридмановской модели  $L/L_{Pl} \approx (t/t_{Pl})^{1/2} = 10^{30}$  !

**Вселенная бы имела размер в доли миллиметра!**

# Проблема горизонта (причинности)

масштабный фактор  $a(t) \propto t^\alpha$ , размер горизонта  $R_{h,0} = a_0 \int_0^t \frac{c dt'}{a(t')} \propto t$ .

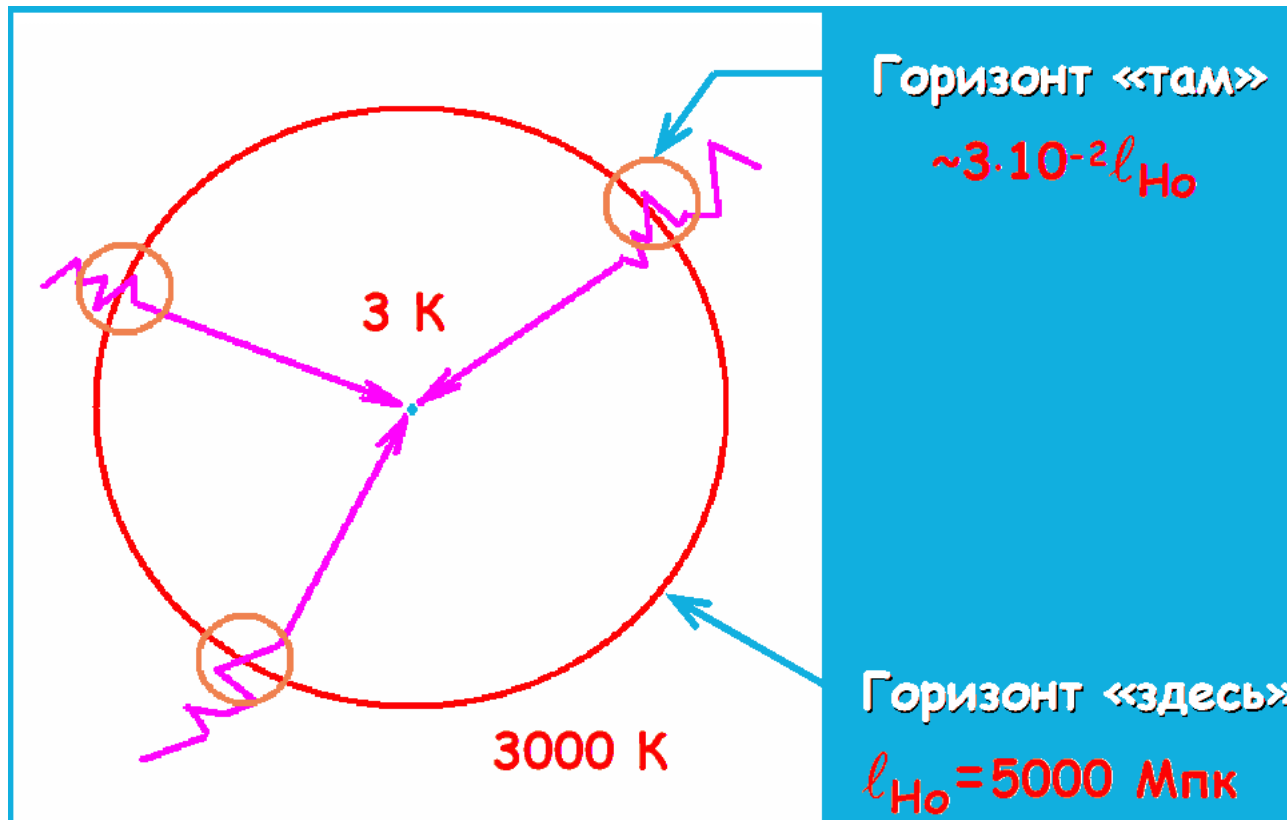


**Fig. 11.4.** The visible universe is the space inside the horizon of an observer. It contains all matter from which the observer may have received a light signal. The visible universes of any two observers  $A$  and  $B$  comoving with the Hubble flow overlap progressively, but were disjunct at some point in the past.  $A$  can only see  $B$  and vice versa after they have entered each other's horizon. This leads to the so-called *horizon problem*: why do  $A$  and  $B$  begin to participate in the expansion at the same moment?

В ранние моменты времени не было причинной связи между разными областями видимой сейчас однородной Вселенной

# Проблема горизонта (причинности)

Применительно к реликтовому излучению:



# Проблема кривизны (плоскостности)

$$H = \frac{\dot{a}}{a} \quad - \text{ параметр Хаббла}$$

$$\Omega_m = \frac{8\pi G\rho}{3H^2} \quad - \text{ вклад вещества}$$

$$\Omega_c = -\frac{k}{a^2 H^2} \quad - \text{ вклад кривизны}$$

$$\Omega_\Lambda = \frac{\Lambda}{3H^2} \quad - \text{ вклад } \Lambda\text{-члена}$$

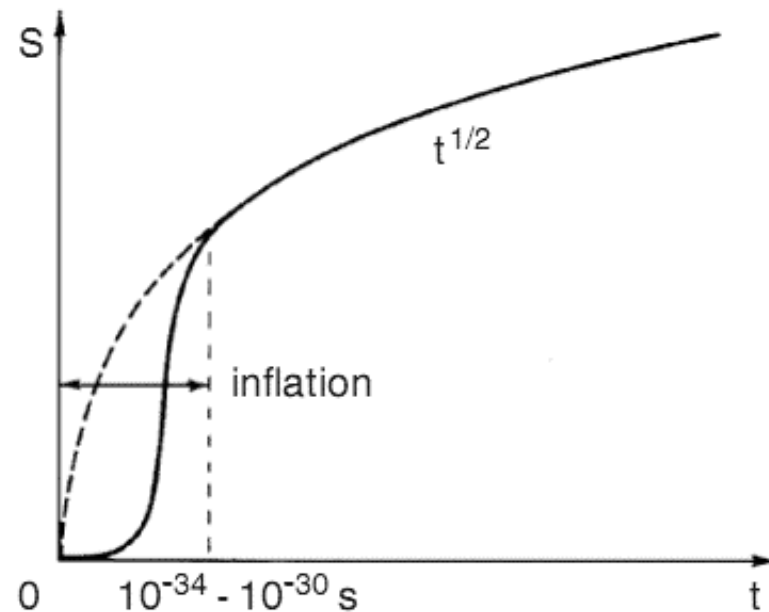
$$\Omega_m + \Omega_\Lambda = \Omega_{total} = 1 - \Omega_c \quad - \text{ уравнение Фридмана}$$

При движении в прошлое  $a(t)$  уменьшается,  $\dot{a}$  и  $H$  – увеличиваются

$$\implies \Omega_\Lambda \rightarrow 0, \quad \Omega_c \rightarrow 0, \quad \Omega_m \rightarrow 1.$$

Если Вселенная сейчас почти плоская ( $\Omega_{tot} \approx 1 \pm 0.02$ ), то в прошлом  $\Omega_{tot} = 1$  с огромной точностью.

## Решение проблем: стадия инфляции (экспоненциального расширения)



**Fig. 13.3.** Behaviour of the scale factor in the very early universe. The dotted line  $S \propto t^{1/2}$  causes all problems.

Стадия инфляции:  $a(t) \sim \exp(Ht)$ ,  $H = \text{const}$

(А.Старобинский 1979; А.Guth 1981; А.Линде 1981)

# Размер горизонта в эпоху эксп. расширения

Пусть  $a(t) \propto \exp(Ht)$ , тогда размер горизонта

$$R_H = a(t) \int_0^t \frac{c dt'}{a(t')} = a_0 \exp(Ht) \int_0^t \frac{c dt'}{a_0 \exp(Ht')} = \frac{ct \exp(Ht) - 1}{a_0 Ht}$$

Т.е. горизонт растёт гораздо быстрее, чем  $ct$ .

(В сопутствующих координатах  $x_H = R_H/a \approx \text{const}$ ).

## Решение проблемы плоскостности

$$\Omega_\Lambda = \frac{\Lambda}{3H^2} \rightarrow 1$$

$$\Omega_m = \frac{8\pi G \rho_0 \exp(-3Ht)}{3H^2} \rightarrow 0$$

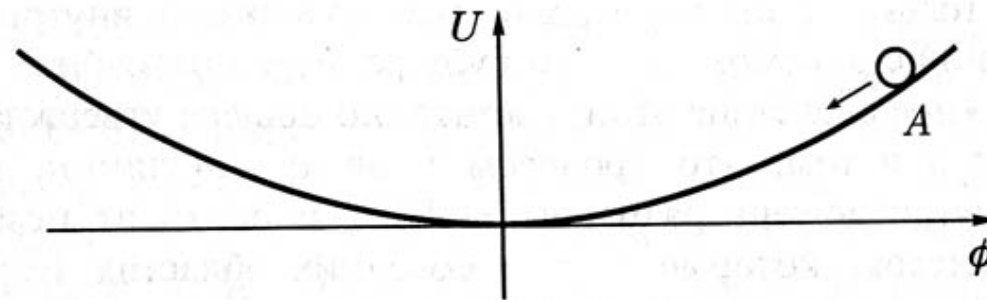
$$\Omega_c = -\frac{k}{H^2 a_0^2 \exp(2Ht)} \rightarrow 0$$

# Скалярное поле

Модель: Скалярное поле  $\psi$  с потенциалом  $V(\psi) = m^2\psi^2/2$  (свободная частица с массой  $m$ ).

Уравнение движения:  $\ddot{\psi} + 3H\dot{\psi} + m^2\psi = 0$  (осциллятор с затуханием).

Уравнение Фридмана:  $H^2 + k/a^2 = (\dot{\psi}^2 + m^2\psi^2)/6$ .



**Рис. 10.2.** Здесь изображен потенциал простейшего вида. Он представляет функцию, которая зависит от поля  $\phi$  квадратичным образом. График представляет из себя параболу, которая проходит через ноль. Форма кривой зависит только от одного параметра — массы скалярного поля. Она выбрана небольшой, чтобы потенциал являлся пологой кривой. Шарик, изображающий потенциальное поле, в начале инфляции находится «почти» на склоне в точке  $A$ . Из-за того, что кривая является полой, скалярное поле «скатывается» к положению равновесия медленно. Медленное скатывание гарантирует медленное изменение параметра Хаббла, расширение Вселенной почти по закону экспоненты и рождение небольших возмущений плотности

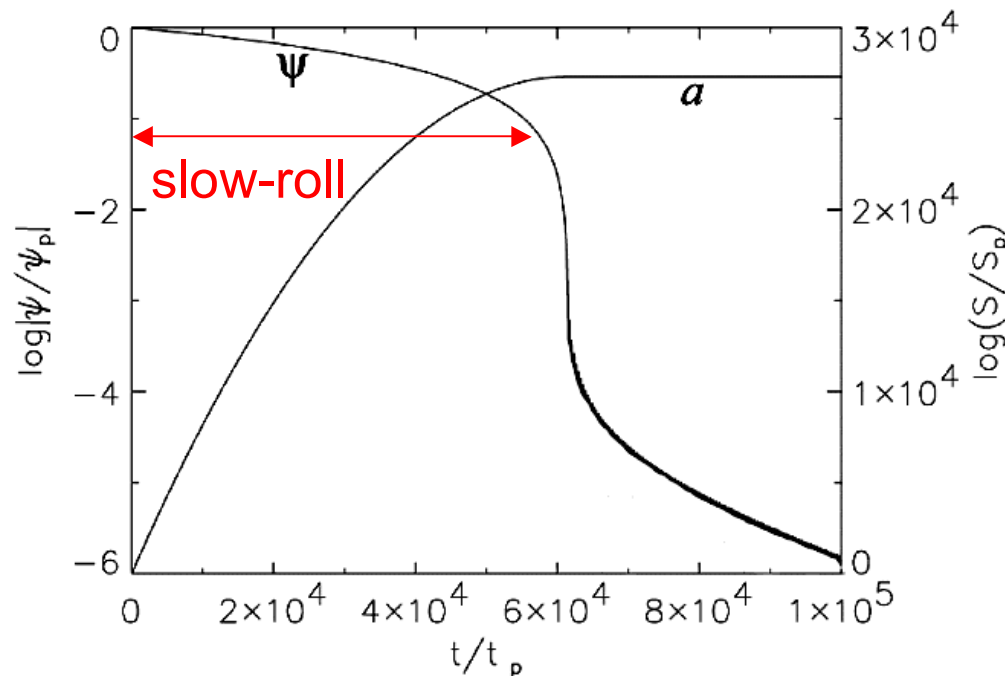


# Slow-roll inflation

Пусть в некоторый момент в области пространства имеем однородное поле  $\psi \sim M_{Pl}$ .

Пренебрегая кривизной ( $k = 0$ ) и считая поле большим, получим режим медленного скатывания (slow-roll):

$$H \gg m, \quad \dot{\psi} \ll m\psi, \quad 3H\dot{\psi} \approx -m^2\psi, \quad H \approx m\psi/\sqrt{6}, \quad \psi \approx \text{const.}$$



Т.е. реализуется близкий к экспоненциальному закон расширения

# Slow-roll inflation

Продолжительность стадии slow-roll:

$$t_{exp} \simeq \frac{\psi_{in}}{\dot{\psi}} = \sqrt{3/2} \frac{\psi_{in}}{m^2} \sim M_{Pl}/m^2.$$

Число «оборотов» инфляции (e-foldings):

$$\ln \frac{a_{fin}}{a_{in}} = H t_{exp} \sim \left( \frac{M_{Pl}}{m} \right)^2 \gg 1 \text{ при } m \ll M_{Pl}.$$



Для объяснения  
наблюдений достаточно

$$a_{fin} \geq 10^{30} a_{in},$$

или  $Ht \geq 70$

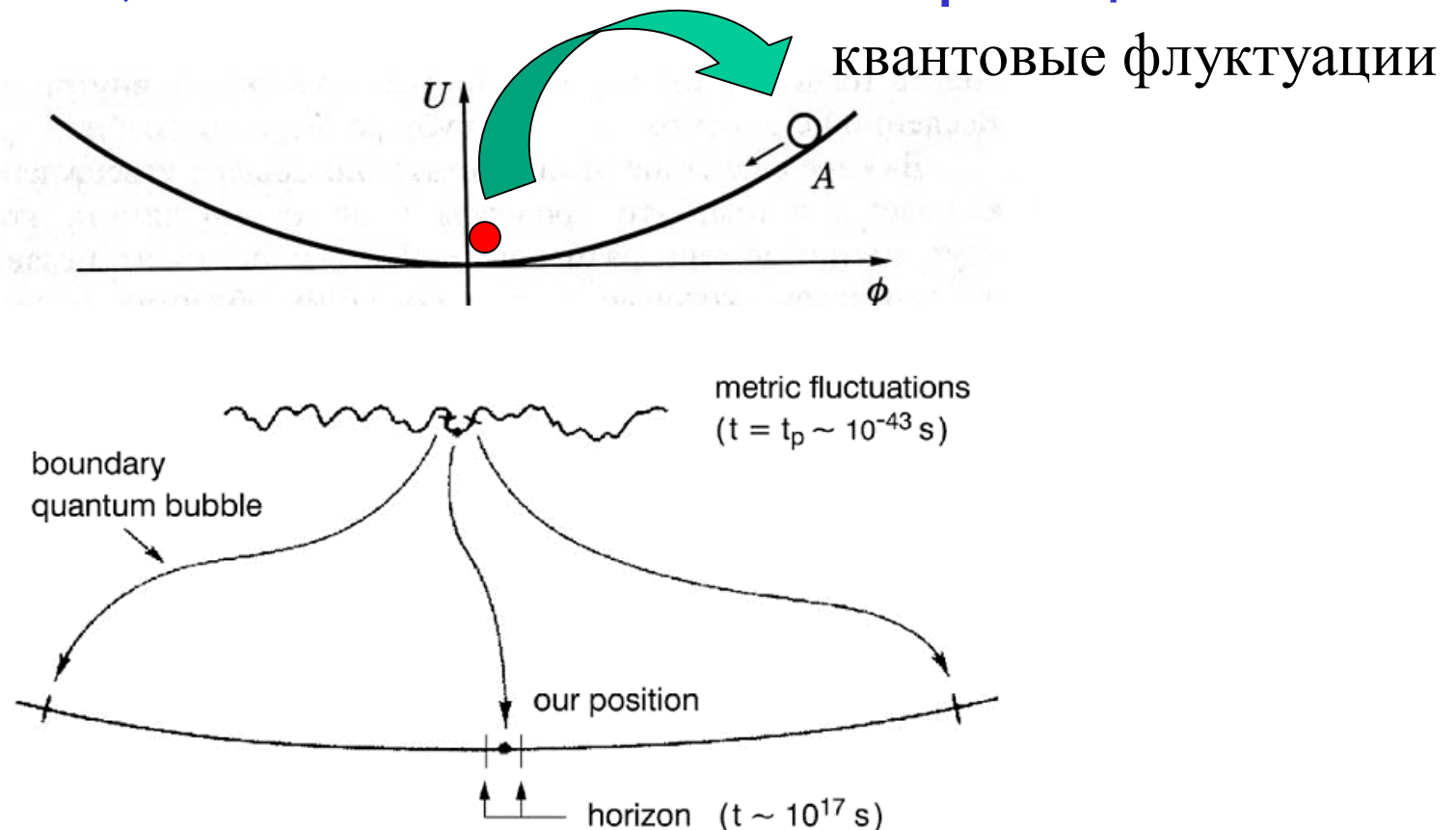
В некоторых моделях  
 $Ht \gg 1000$

# Окончание инфляции

- Распад инфляционного поля (инфлатона)
- Нагрев Вселенной (reheating) – «горячий Большой взрыв»
- Генерация возмущений плотности во время инфляции на уровне  $10^{-4}$  и соответствующего спектра возмущений; генерация грав. волн (вклад в поляризацию СМВ)
- Проблема «Graceful exit»

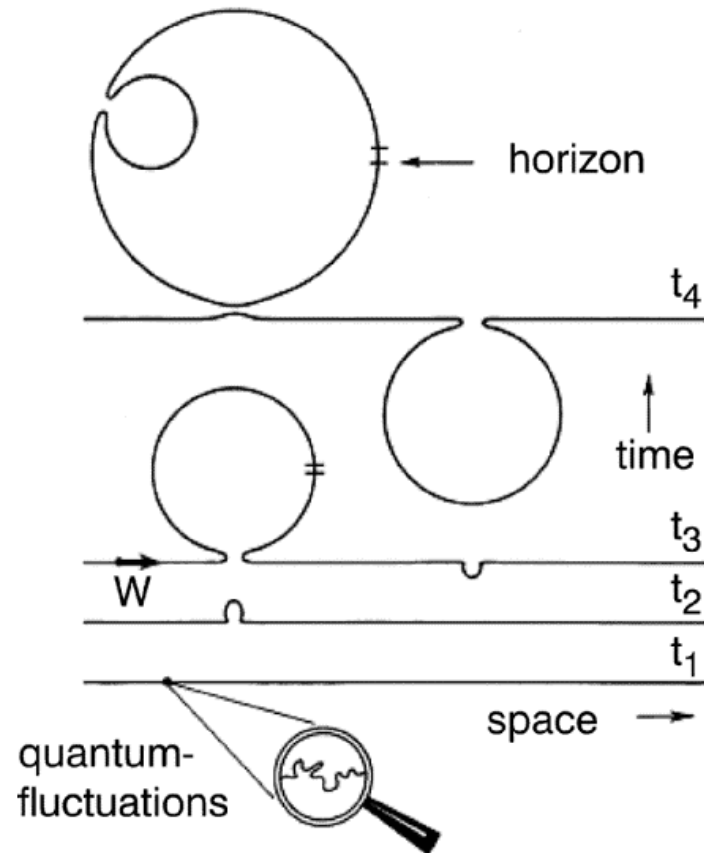
Множество различных моделей инфляции

# Вечная, или хаотическая инфляция



**Fig. 13.5.** In the chaotic inflation scenario a quantum fluctuation of characteristic size  $L_p$  in the metric of an existing spacetime, casually referred to as a 'quantum bubble', will inflate to huge proportions in about  $10^{-34}$  s, if the energy it may contain on the basis of the uncertainty relation resides in one scalar field. During the subsequent reheating phase, the energy of the scalar field is converted into particles, the quark-gluon plasma, marking the beginning of the hot Big Bang around  $t \sim 10^{-30}$  s (depending on the inflation scenario). Our visible universe is a minute fraction of the original bubble, and therefore homogeneous and flat.

# Вечная, или хаотическая инфляция



**Fig. 13.7.** Chaotic inflation may take the form of a hierarchical process creating many interconnected or decoupled universes. Observer  $W$  would just notice a small defect in his spacetime of size  $\sim L_p$  that may or may not disappear again. Our visible universe is a very small section of spacetime, for instance the space indicated by the two markers. Since observations beyond the horizon are impossible, we can only make 'reasonable' assumptions about what lies outside (such as the cosmological principle). This underlines the highly speculative character of ideas such as these.