



Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»  
Институт ядерной физики и технологий  
Кафедра физики элементарных частиц №40

Научно-исследовательская работа на тему:

# **Взаимодействие топологических солитонов с газом в ранней Вселенной**

Выполнил студент группы М23-114:  
Филиппов Д.П.

Научный руководитель: Кириллов А.А.



# Актуальность работы



Доменные стенки как:

- ❑ Источник первичных чёрных дыр (Рубин, Grav. Cosmol. S 6, 51–58 (2000))
- ❑ Тёмная энергия (Пресс, Astrophys. J. 347, 590 (1989))

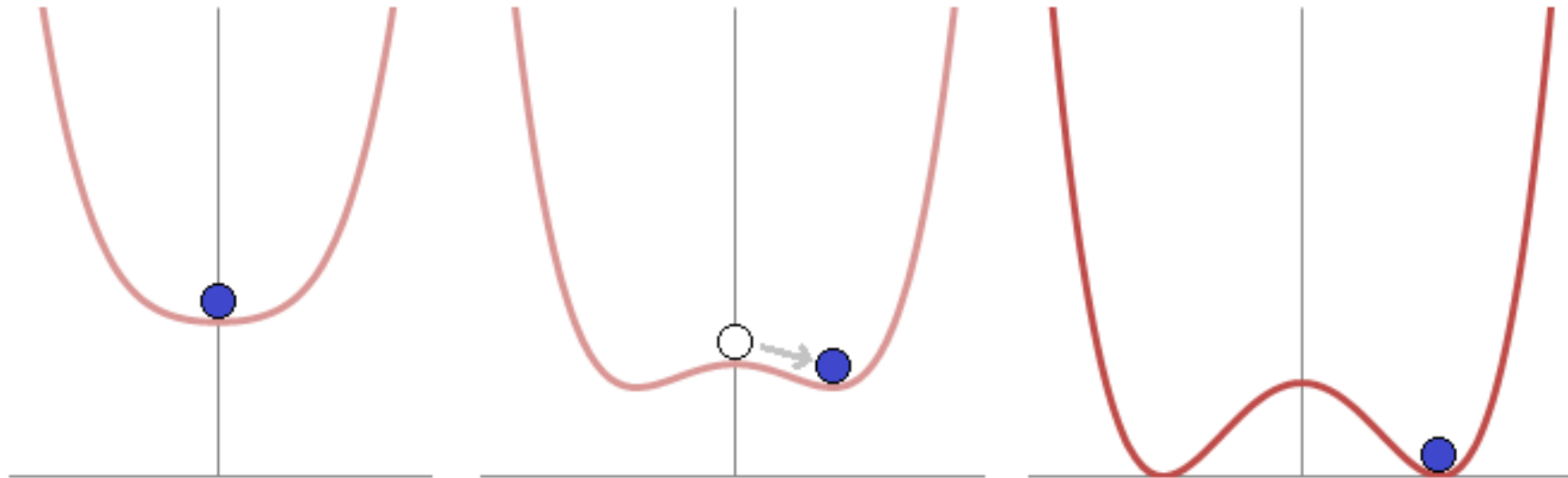
# Цели и задачи работы

Целью работы является создание модели взаимодействия доменной стенки с газом скалярных частиц скрытой массы.

В рамках текущего семестра были поставлены задачи:

- ❑ Построение уравнения движения доменной стенки, взаимодействующей с газом скалярных частиц.
- ❑ Численное решение уравнения.
- ❑ Оценка возможности образования ПЧД.

# Простейшая модель образования доменной стенки



После фазового перехода скалярное поле оказывается в одном из потенциальных минимумов (Виленкин, Phys. Rep. 121 (1985) 263)

## Лагранжиан доменной стенки

$$L_{wall} = \partial_\mu \phi^+ \partial^\mu \phi - \frac{1}{4} \left( \phi^+ \phi - \frac{f^2}{2} \right)^2 - \Lambda^4 (1 - \cos(\theta)).$$

## Лагранжиан скалярных частиц

$$L_s = (\partial_\mu \varphi)^2 + \frac{1}{2} m^2 \varphi^2 + \frac{1}{2} \alpha_0 \phi \varphi^2 + h.c.$$

## Лагранжиан взаимодействия

$$\begin{aligned} L_{int} &= \frac{1}{2} \alpha_0 (\phi + \phi^*) \varphi^2 = \frac{1}{2} \alpha_0 f \sqrt{2} \cos(\chi/f) \varphi^2 = \\ &= \frac{1}{2} \alpha_0 f \sqrt{2} \left( 1 - \frac{2}{\cosh^2(2x/d)} \right) \varphi^2, \end{aligned}$$

# Уравнение движения

$$\ddot{r} = \frac{P(r(t))}{\mu} - \frac{2\pi}{r(t)} - \frac{P_1(t)}{\mu}$$

Давление газа внутри

Поверхностное натяжение

Давление газа снаружи

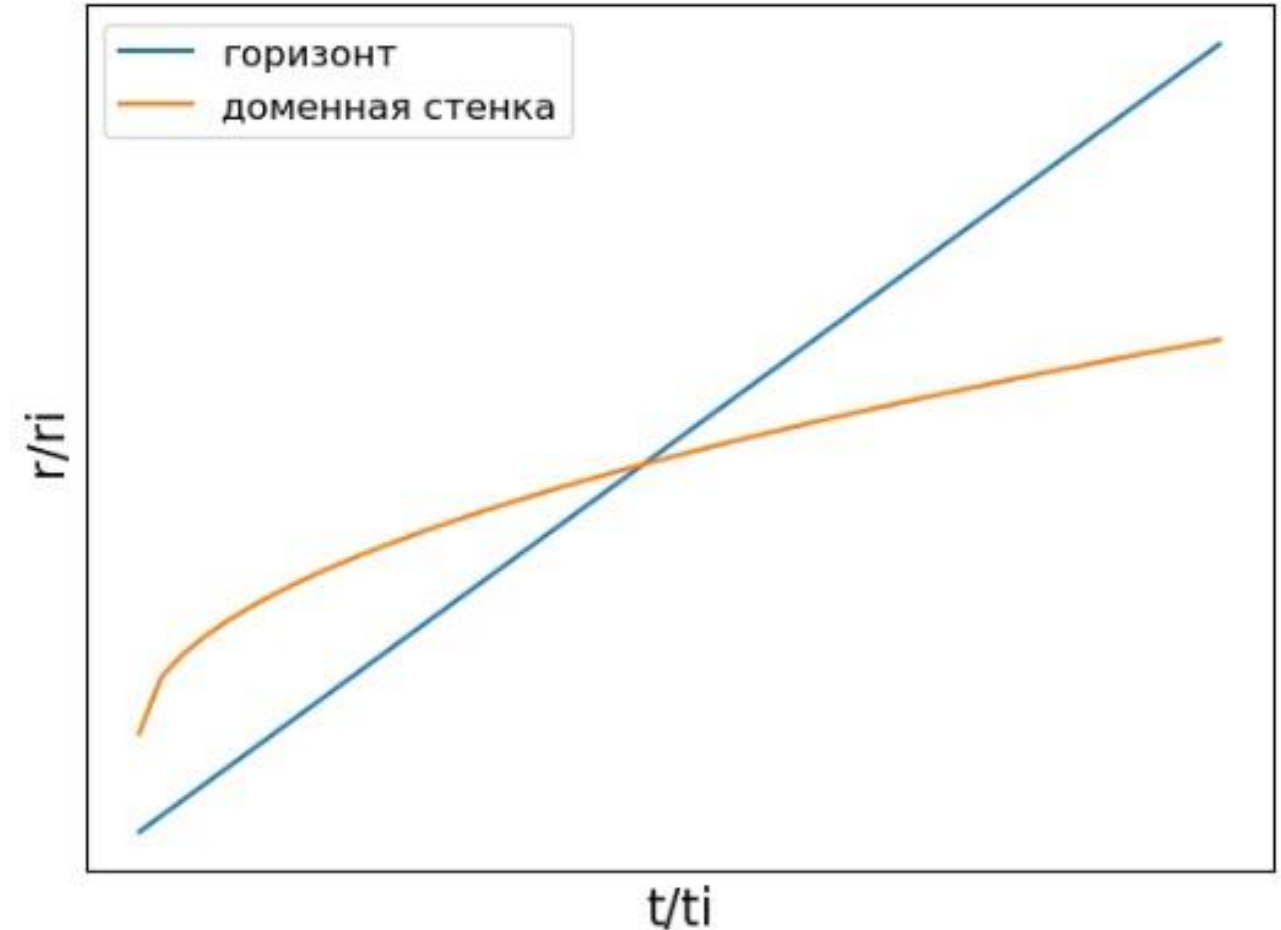
# Расширение стенки и горизонта

Время пересечения горизонта и стенки:

$$t_i = \frac{R_{inf}^2}{4t_{inf}}$$

Радиус стенки:

$$r_i = R_{inf} \sqrt{\frac{t_i}{t_{inf}}}$$



Схематичное изображение эволюции горизонта и доменной стенки после завершения инфляции

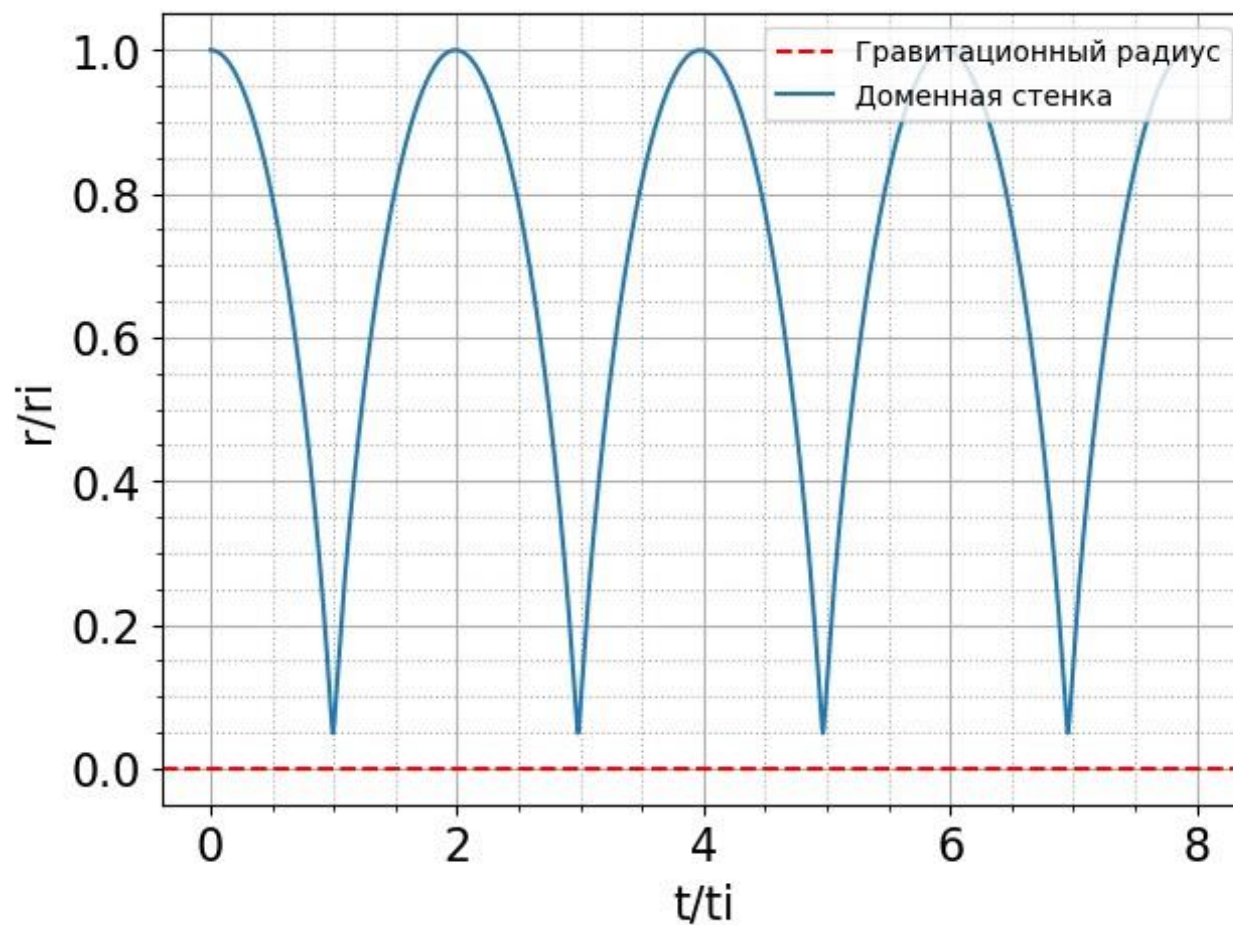
Когда все необходимые параметры определены, обезразмерим уравнение движения, после чего оно примет вид:

$$\ddot{x} = \frac{P_{CDM} t_i^2}{r_i \mu} \left( \frac{1}{x} \right)^5 - \frac{2\pi}{x} \left( \frac{t_i}{r_i} \right)^2$$

Начальные условия определим как:

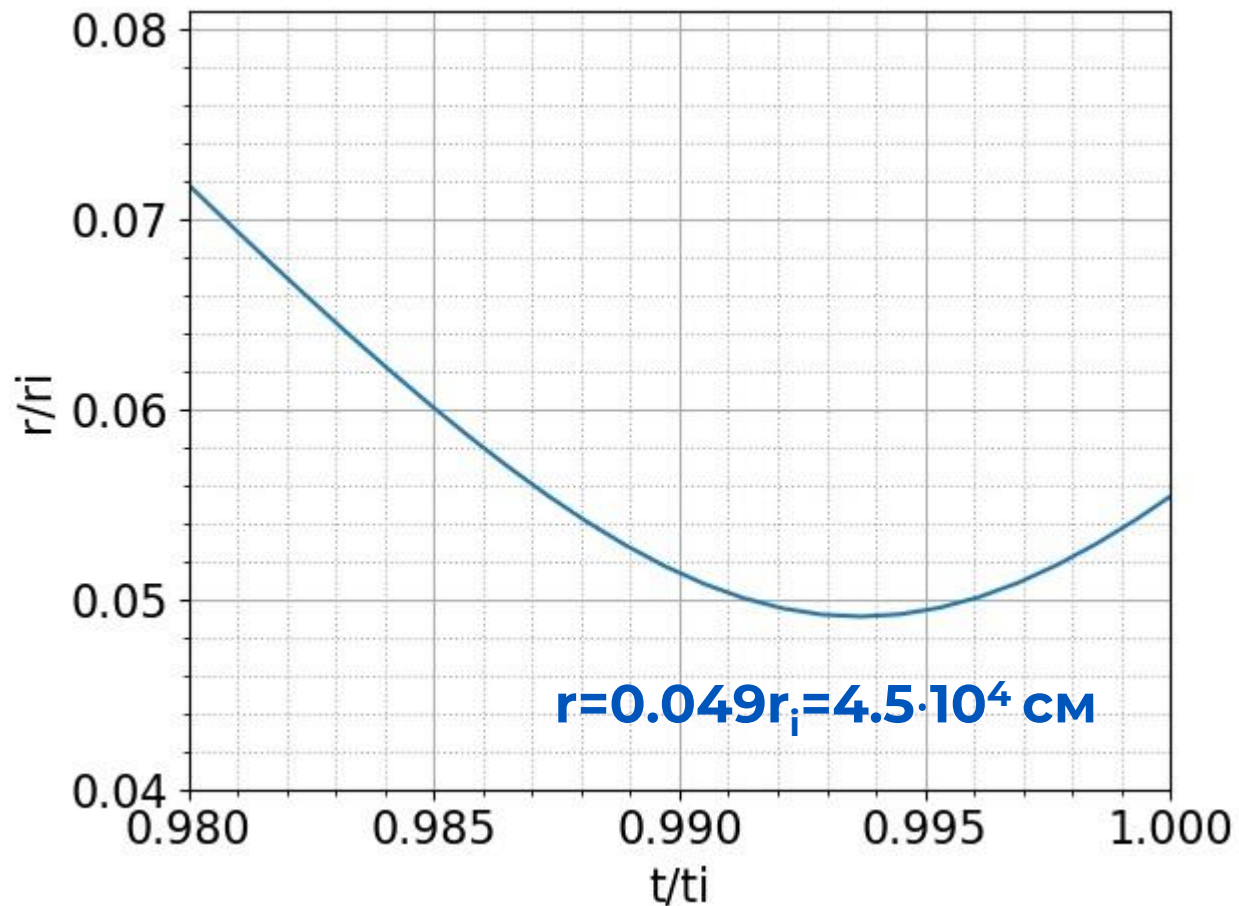
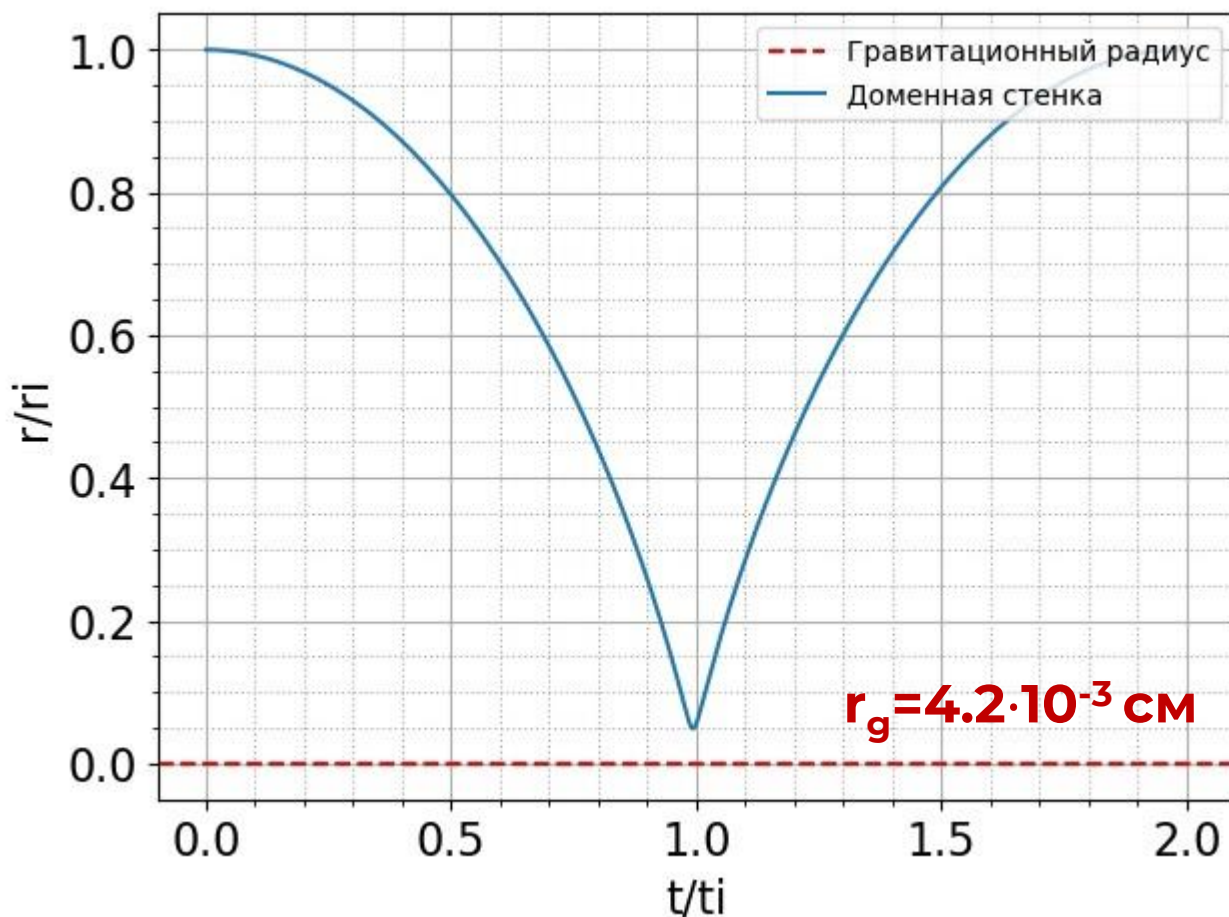
$$\begin{cases} v(1) = 0 \\ x(1) = 1 \end{cases}$$





Изменение радиуса доменной стенки  
(в безразмерных координатах)

# Численное решение



Изменение радиуса доменной стенки  
(в безразмерных координатах)

- ❑ Решено уравнение движения доменной стенки
- ❑ Оценена возможность формирования ПЧД
- ❑ Показано, что формируется стабильная структура



**МИФИ**

Национальный  
исследовательский  
ядерный университет

**Спасибо за внимание!**

25.12.2023



**МИФИ**

Национальный  
исследовательский  
ядерный университет

**Дополнительные слайды**

# Определение гравитационного радиуса



$$r_g = 2G(M + M_{DW})$$

$$M_{DW} = 4\pi r_i^2 \mu = 4.25 \cdot 10^9 \Gamma \text{ЭВ} = 7 \cdot 10^{-15} \Gamma$$

$$M = \frac{4}{3}\pi r_i^3 \rho = \frac{4}{3}\pi r_i^3 \rho_{c,0} \Omega_m (z_i + 1)^3 = 1.5 \cdot 10^{49} \Gamma \text{ЭВ} = 2.5 \cdot 10^{25} \Gamma$$

$$r_g = 2 \cdot \frac{2.5 \cdot 10^{25} \Gamma \cdot 0.2 \Gamma \text{ЭВ} \cdot 10^{-13} \text{см}}{2 \cdot 10^{-5} \Gamma \cdot 1.2 \cdot 10^{19} \Gamma \text{ЭВ}} = 4.2 \cdot 10^{-3} \text{см}$$

# Определение поверхностной плотности энергии



$$\phi = \frac{f}{\sqrt{2}} e^{i\theta} = \frac{f}{\sqrt{2}} e^{i\frac{\chi}{f}}.$$

$$L_{wall} = \partial_\mu \phi^+ \partial^\mu \phi - \frac{1}{4} \left( \phi^+ \phi - \frac{f^2}{2} \right)^2 - \Lambda^4 (1 - \cos(\theta)),$$

$$L_{wall} = \frac{1}{2} (\partial_\mu \chi)^2 - \Lambda^4 (1 - \cos(\chi/f)).$$

$$\chi(x) = 4f \arctan \left[ \exp \left( \frac{\Lambda^2}{f} x \right) \right].$$

$$L_s = (\partial_\mu \varphi)^2 + \frac{1}{2} m^2 \varphi^2 + \frac{1}{2} \alpha_0 \phi \varphi^2 + h.c.$$

$$\begin{aligned} L_{int} &= \frac{1}{2} \alpha_0 (\phi + \phi^*) \varphi^2 = \frac{1}{2} \alpha_0 f \sqrt{2} \cos(\chi/f) \varphi^2 = \\ &= \frac{1}{2} \alpha_0 f \sqrt{2} \left( 1 - \frac{2}{\cosh^2(2x/d)} \right) \varphi^2, \end{aligned}$$

$$T_{\mu\nu} = \frac{\partial L_{wall}}{\partial (\partial^\mu \chi)} (\partial_\nu \chi) - g_{\mu\nu} L_{wall}.$$

$$T_{00} = -T_{22} = -T_{33} = \Lambda^4 (1 - \cos(\chi/f)) = 2\Lambda^4 \frac{1}{\cosh^2(2x/d)}.$$

$$\mu = \int_{-\infty}^{\infty} T_{00}(x) dx = 4f\Lambda^2 = 10^{13} \Gamma \text{эВ}^3,$$

# Определение параметров стенки



$$PV^{\frac{5}{3}} = P_{CDM}V_i^{\frac{5}{3}}$$

$$P = P_{CDM} \left( \frac{r_i}{r} \right)^5$$

$$P_{CDM} = nkT = \frac{\rho_{CDM}}{m_{CDM}}kT = \Omega_{CDM,0}\rho_{c,0}(z+1)^3 \frac{kT}{m_{CDM}}$$

$$T = T_* \frac{(z+1)^2}{(z_*+1)^2}$$

$$P_{CDM} = \Omega_{CDM,0}\rho_{c,0} \frac{kT_*}{m_{CDM}} \frac{(z+1)^5}{(z_*+1)^2}$$

$$(z_*+1) = \frac{T_*}{T_0} = \frac{2.4 \cdot 10^6 \cdot 1.2 \cdot 10^4}{2.7} = 1.07 \cdot 10^{10}$$



# Определение параметров стенки



$$t_i = \frac{R_{inf}^2}{4} \sqrt{\frac{t_i}{t_{inf}}}$$

$$t_i = \frac{R_{inf}^2}{4t_{inf}}$$

$$r_i = R_{inf} \sqrt{\frac{t_i}{t_{inf}}}$$

$$R_{inf} = \frac{e^{N_{inf}-N}}{H_{inf}} = \frac{e^{60-20}}{10^{13} \Gamma \text{ЭВ}} 0.2 \Gamma \text{ЭВ} \cdot 10^{-13} \text{ см} = 4.7 \cdot 10^{-10} \text{ см}$$

$$t_{inf} = \frac{N_{inf}}{H_{inf}} = \frac{60}{10^{13} \Gamma \text{ЭВ} \cdot 3 \cdot 10^{10} \text{ см/с}} \cdot 0.2 \Gamma \text{ЭВ} \cdot 10^{-13} \text{ см} = 4.7 \cdot 10^{-36} \text{ с}$$

$$t_i = \frac{1}{c^2} \frac{R_{inf}^2}{4t_{inf}} = 1.534 \cdot 10^{-5} \text{ с}$$

$$r_i = 9.2 \cdot 10^5 \text{ см}$$

$$\begin{aligned} z_i + 1 &= \sqrt{\frac{1}{2H_0 \sqrt{\Omega_{r,0} t_i}}} = \\ &= \sqrt{\frac{10^6 \cdot 3 \cdot 10^{18} \cdot \text{см} \cdot \text{с}}{2 \cdot 67 \cdot 10^5 \cdot \text{см} \cdot \sqrt{5.4 \cdot 10^{-5} \cdot 1.534 \cdot 10^{-5} \cdot \text{с}}}} = 1.4 \cdot 10^{12} \end{aligned}$$

# Определение параметров стенки



$$\ddot{r} = \frac{P_{CDM}}{\mu} \left(\frac{r_i}{r}\right)^5 - \frac{2\pi}{r}$$

$$\left(\frac{r_i}{r}\right) = \left(\frac{1}{x}\right)$$

$$\left(\frac{t_i}{t}\right) = \left(\frac{1}{\tau}\right)$$

$$\ddot{x} = \frac{P_{CDM}t_i^2}{r_i\mu} \left(\frac{1}{x}\right)^5 - \frac{2\pi}{x} \left(\frac{t_i}{r_i}\right)^2$$

$$\frac{P_{CDM}t_i^2}{r_i\mu} = 1.1 \cdot 10^{-4}$$

$$\left(\frac{t_i c}{r_i}\right)^2 = 0.25$$