



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

Научно-исследовательская работа на тему:

Взаимодействие доменных стенок с газом скалярных частиц 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 (S. G. Rubin et al., Grav. Cosmol. S 6, 51–58 (2000)),
- ❑ Тёмная энергия (W.H. Press et al. , Astrophys. J. 347, 590 (1989)).

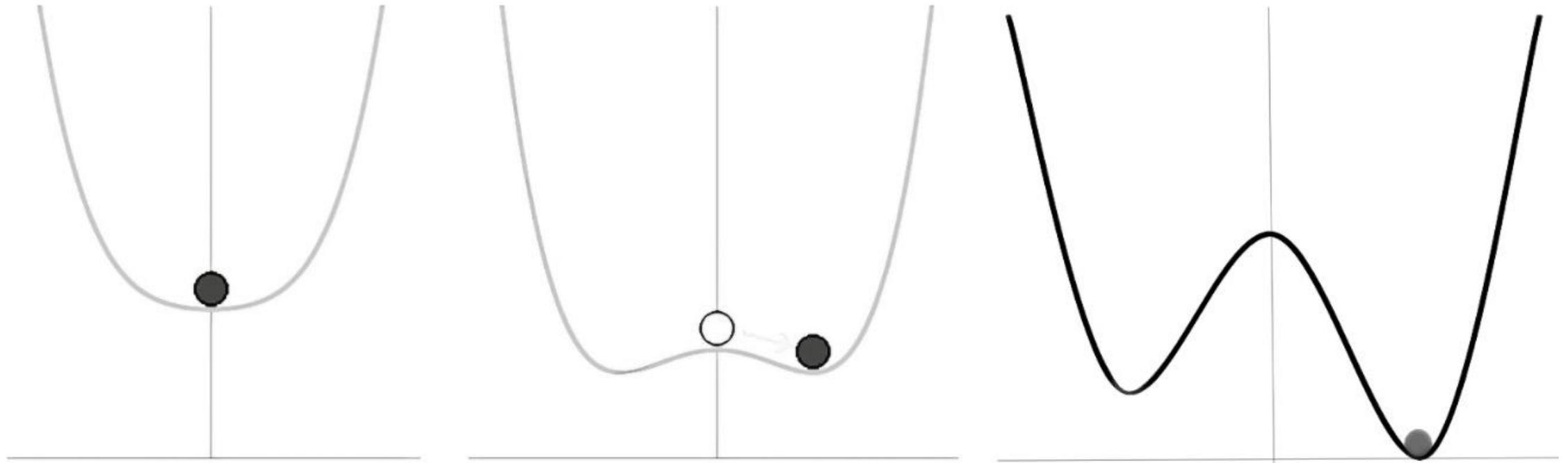
Цели и задачи работы

Целью работы является создание модели взаимодействия доменной стенки комплексного скалярного поля 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 (A. Vilenkin, Phys. Rep. 121 (1985) 263)

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

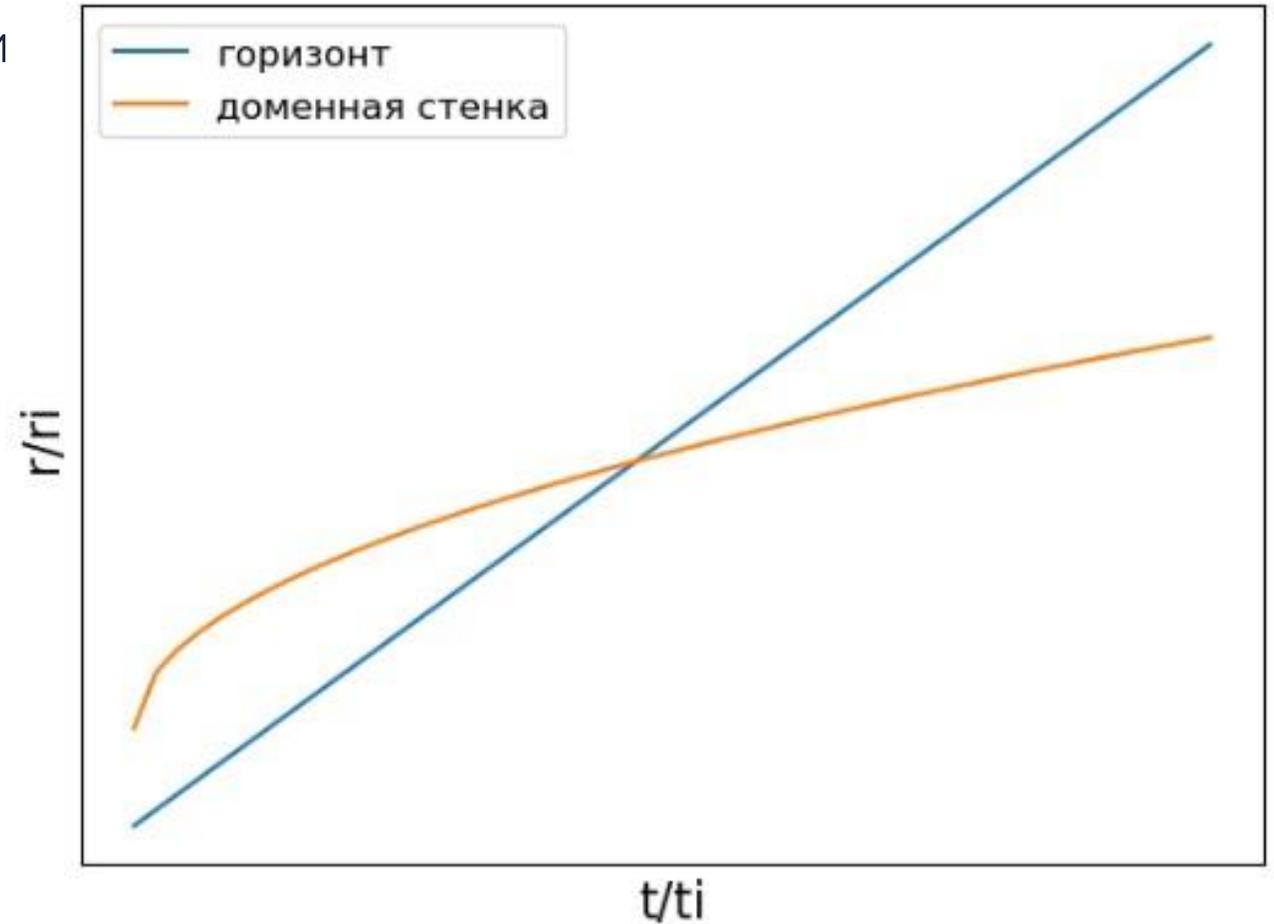
$$t_i = \frac{R_{inf}}{2} \sqrt{\frac{t_i}{t_{inf}}},$$

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

Радиус стенки:

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

$$r_i = \frac{R_{inf}^2}{2t_{inf}}.$$



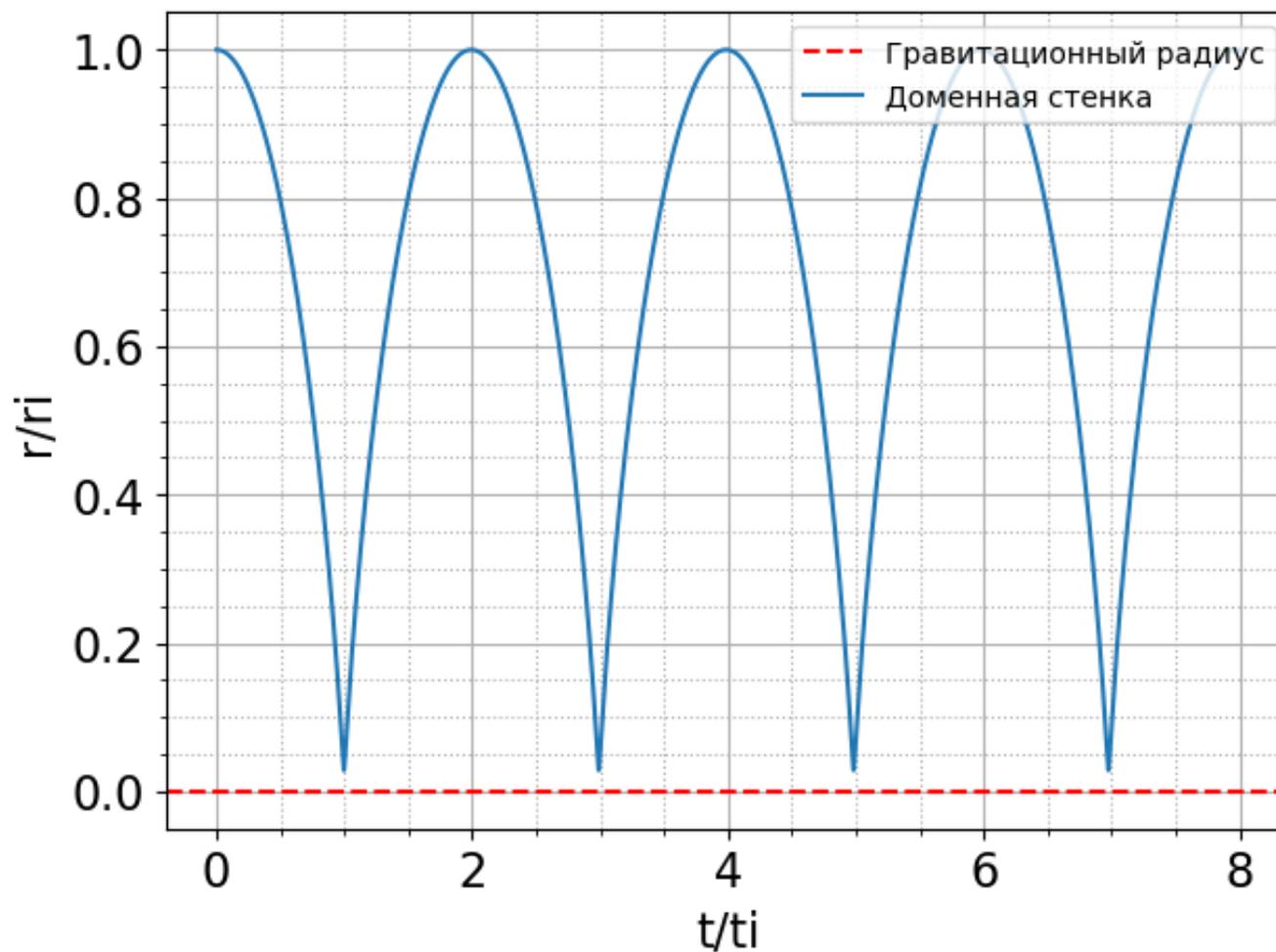
Схематичное изображение эволюции горизонта и доменной стенки после завершения инфляции

Обезразмеренное уравнение движения:

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

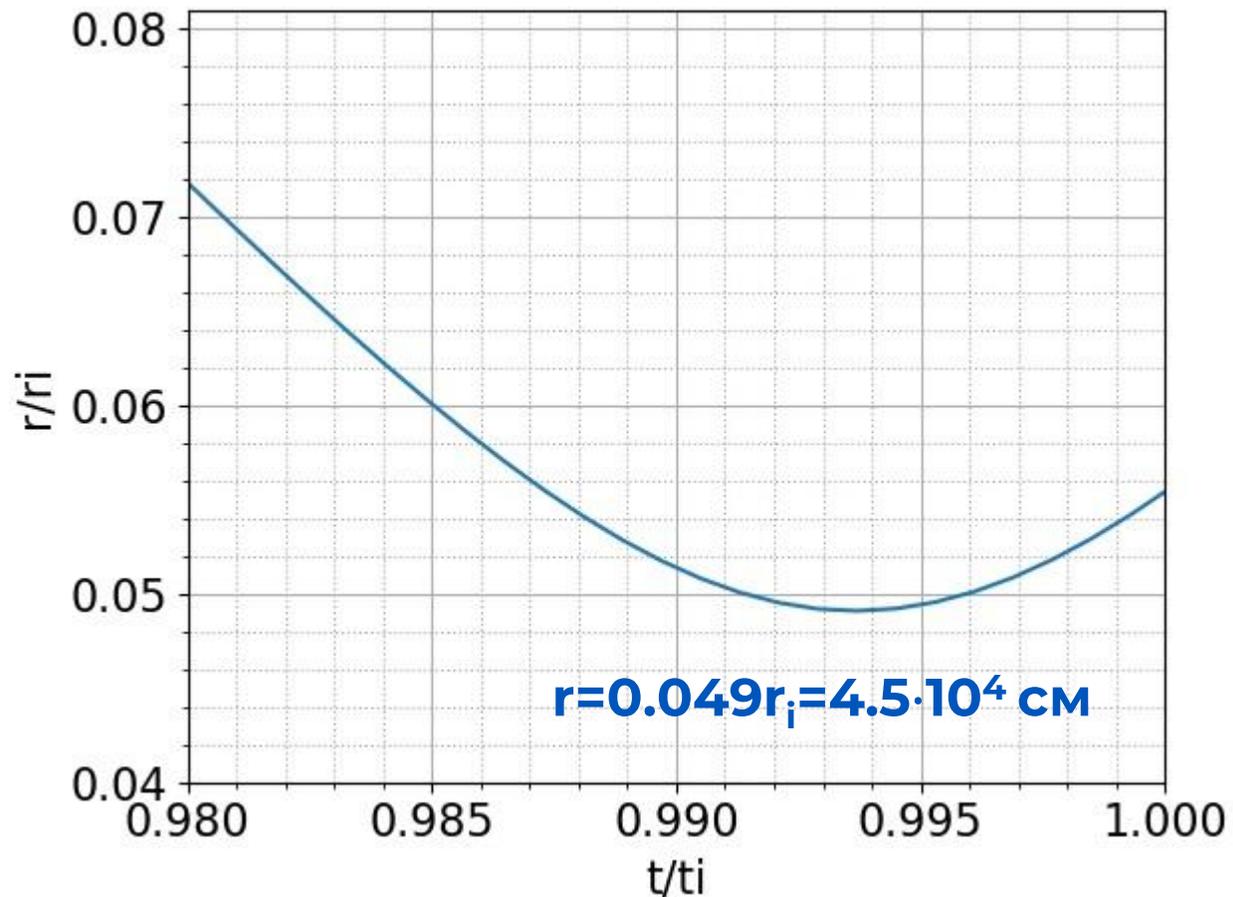
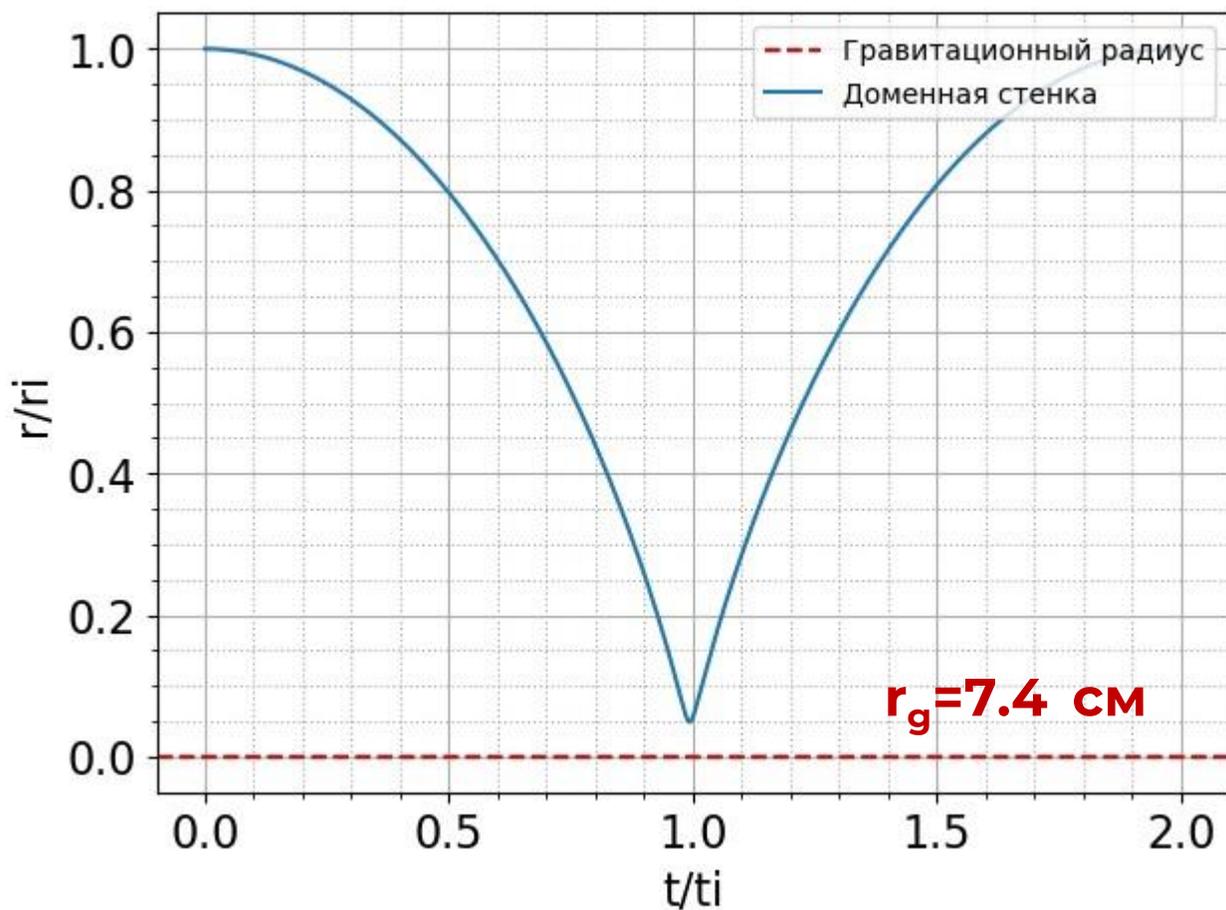
Начальные условия определим как:

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



Изменение радиуса доменной стенки
(в безразмерных единицах)

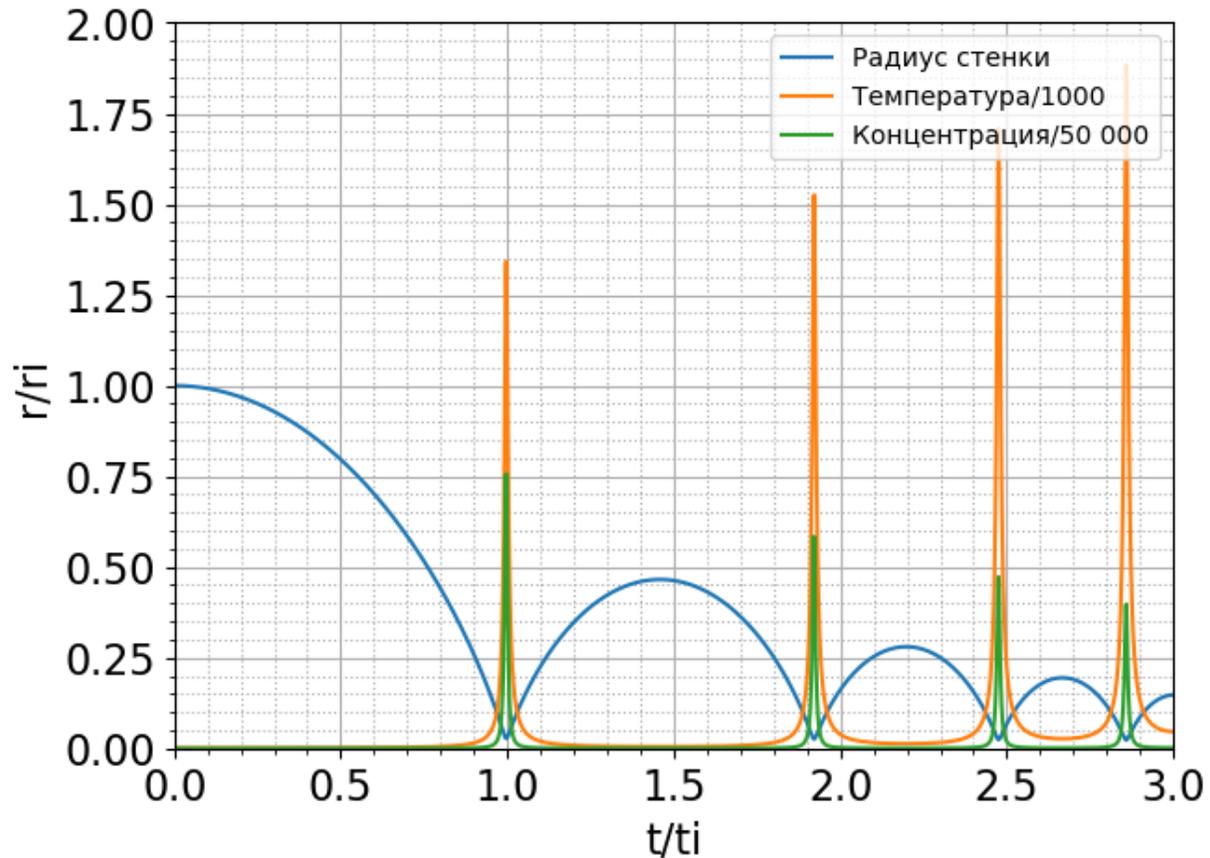
Численное решение



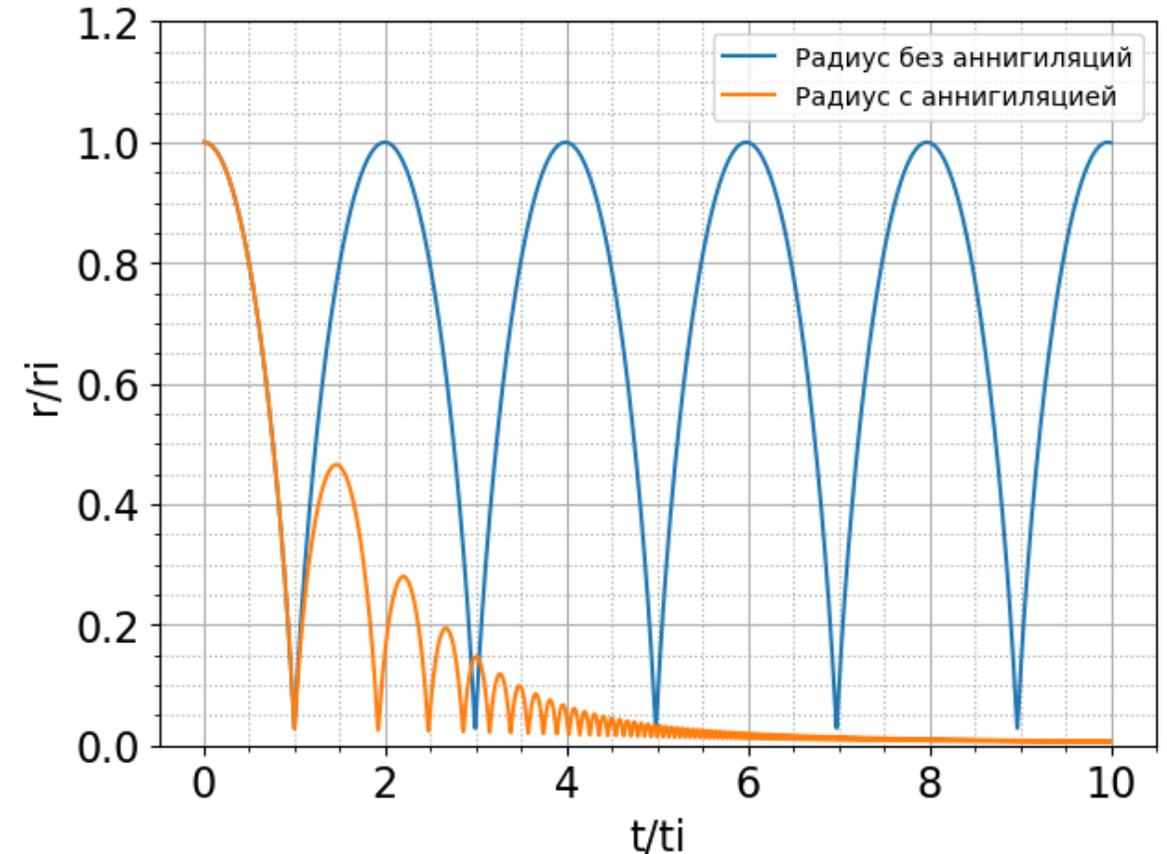
Изменение радиуса доменной стенки
(в безразмерных единицах)

$$\left\{ \begin{array}{l} \dot{T} = -2T \frac{\dot{r}}{r} - \text{изменение температуры} \\ \dot{n} = -\frac{1}{2} \langle \sigma v \rangle n^2 - 3n \frac{\dot{r}}{r} - \text{изменение концентрации} \\ \ddot{r} = \frac{1}{\mu} n T - \frac{2\pi}{r} - \text{уравнение движения} \end{array} \right.$$

Численное решение

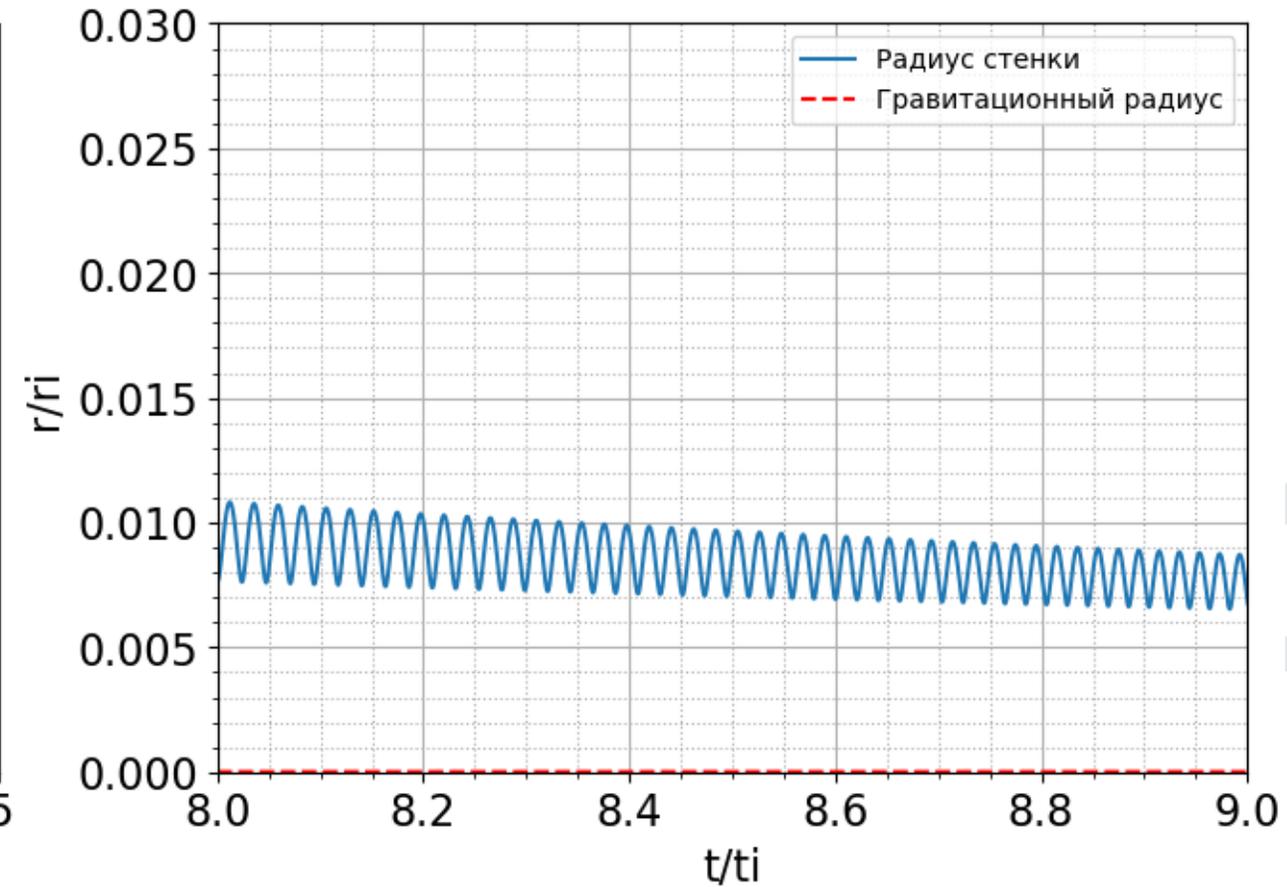
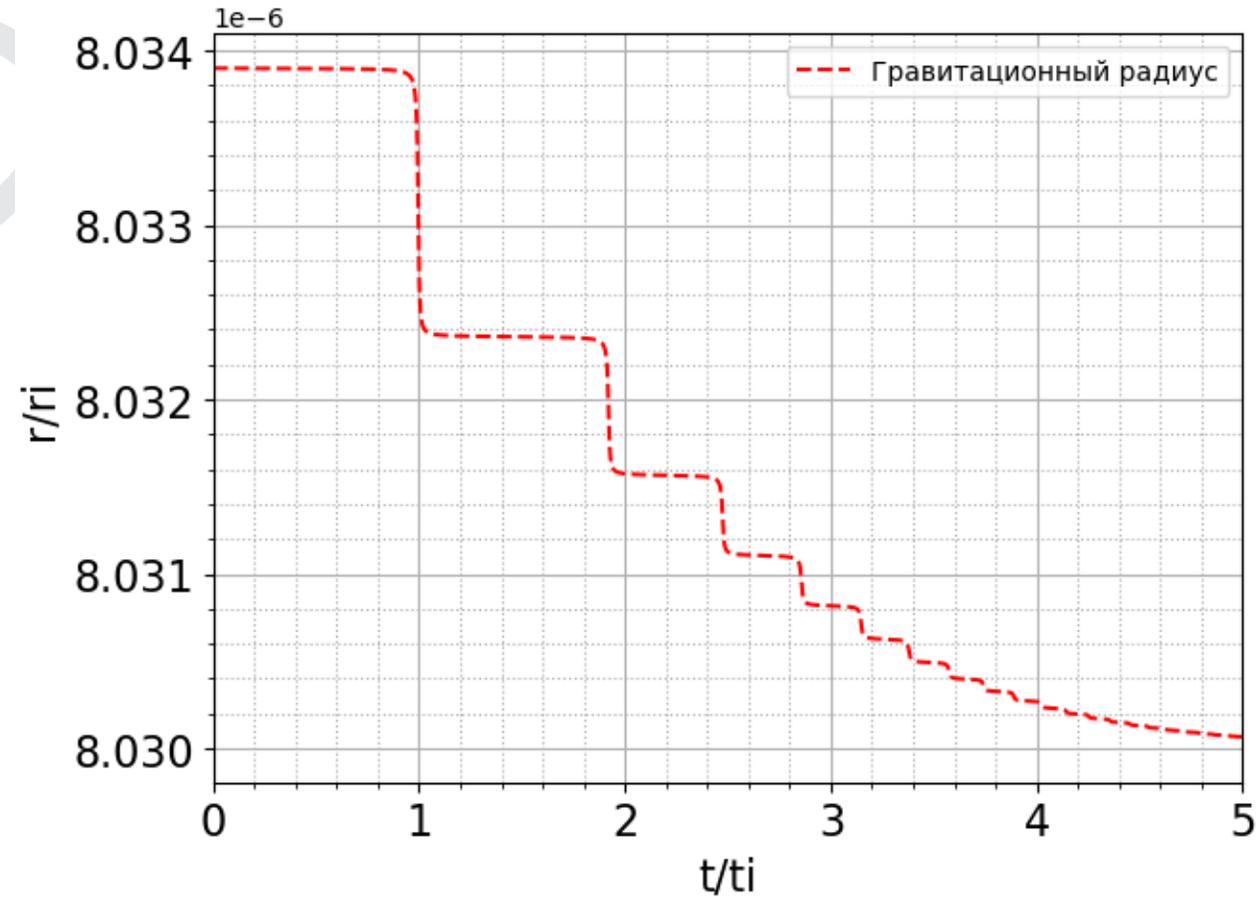


Изменение радиуса стенки, концентрации и температуры частиц
(в безразмерных единицах)



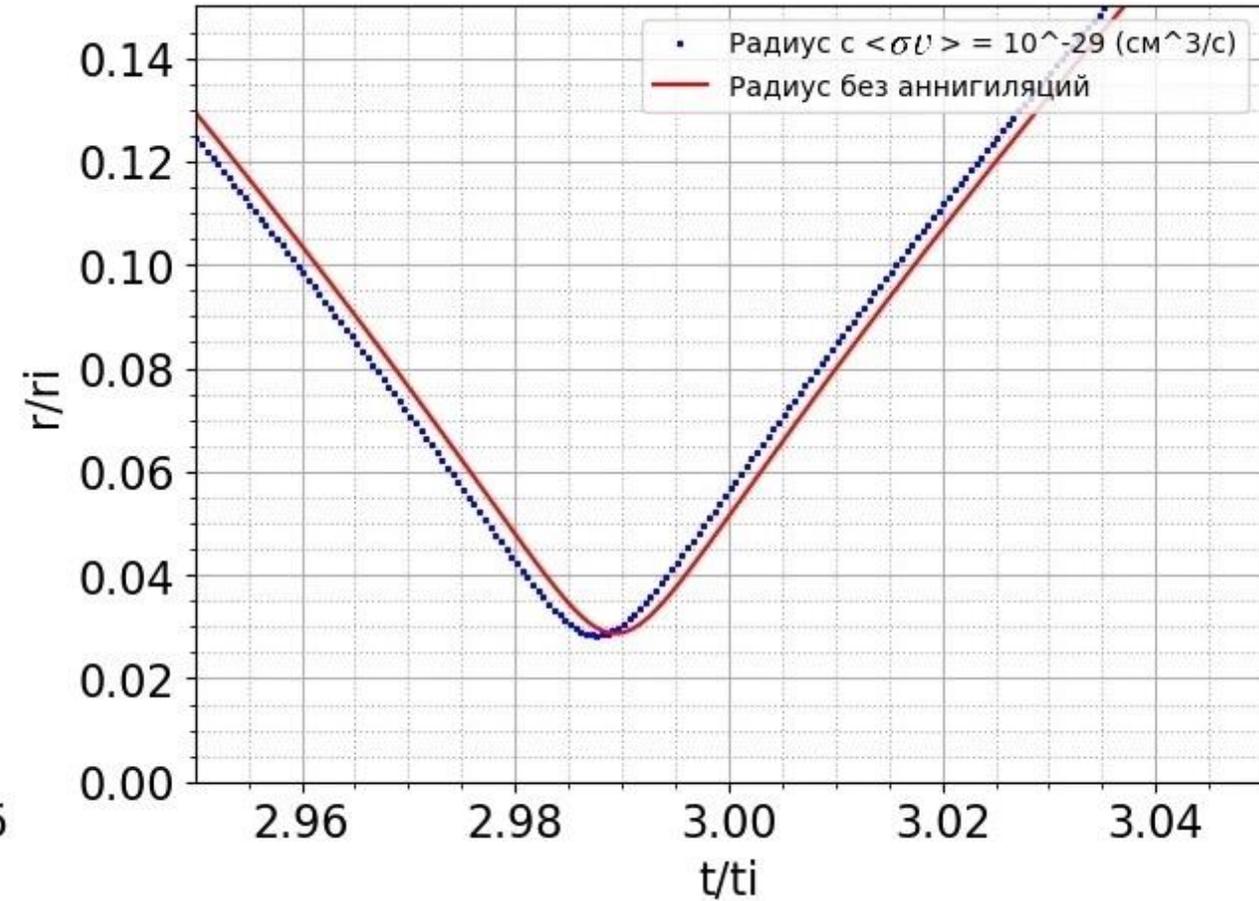
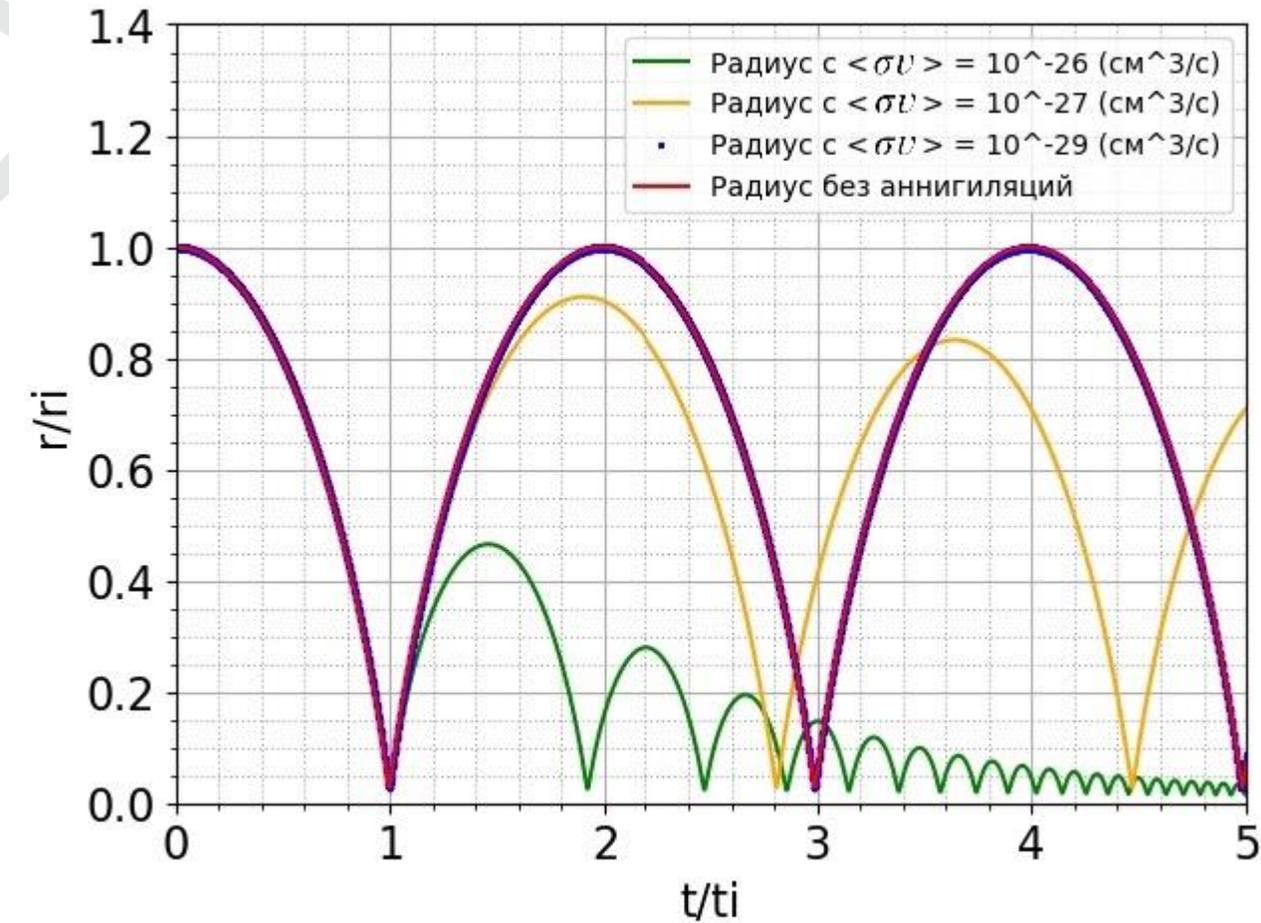
Изменение радиуса стенки с аннигиляцией и без аннигиляции частиц
(в безразмерных единицах)

Численное решение



Изменение радиуса стенки и её гравитационного радиуса

Численное решение



Изменение радиуса стенки при различных значениях сечения взаимодействия

- ❑ Решено нерелятивистское уравнение движения доменной стенки:
 - при отсутствии аннигиляции скалярных частиц,
 - с учётом аннигиляции скалярных частиц.

- ❑ Оценена возможность формирования ПЧД.



МИФИ

Национальный
исследовательский
ядерный университет

Спасибо за внимание!

25.12.2023

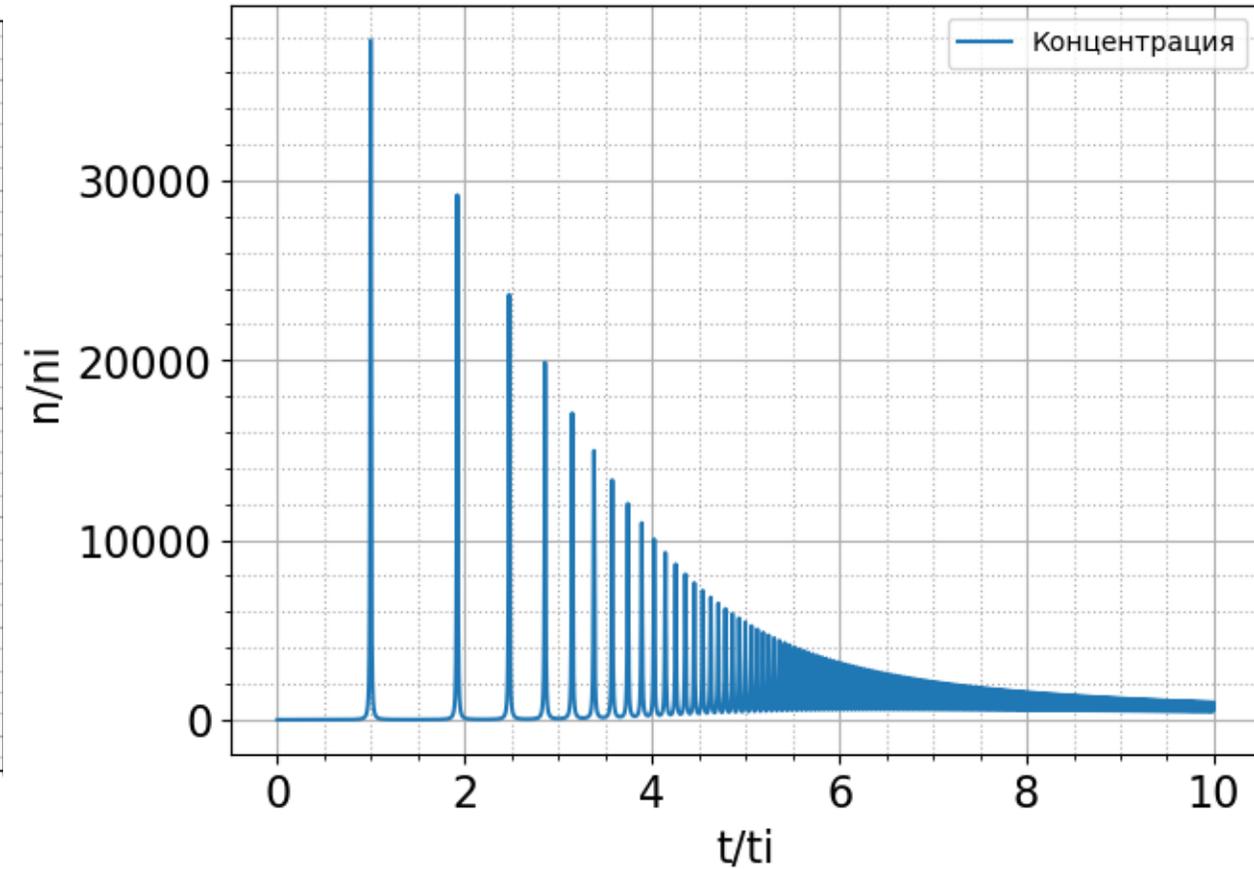
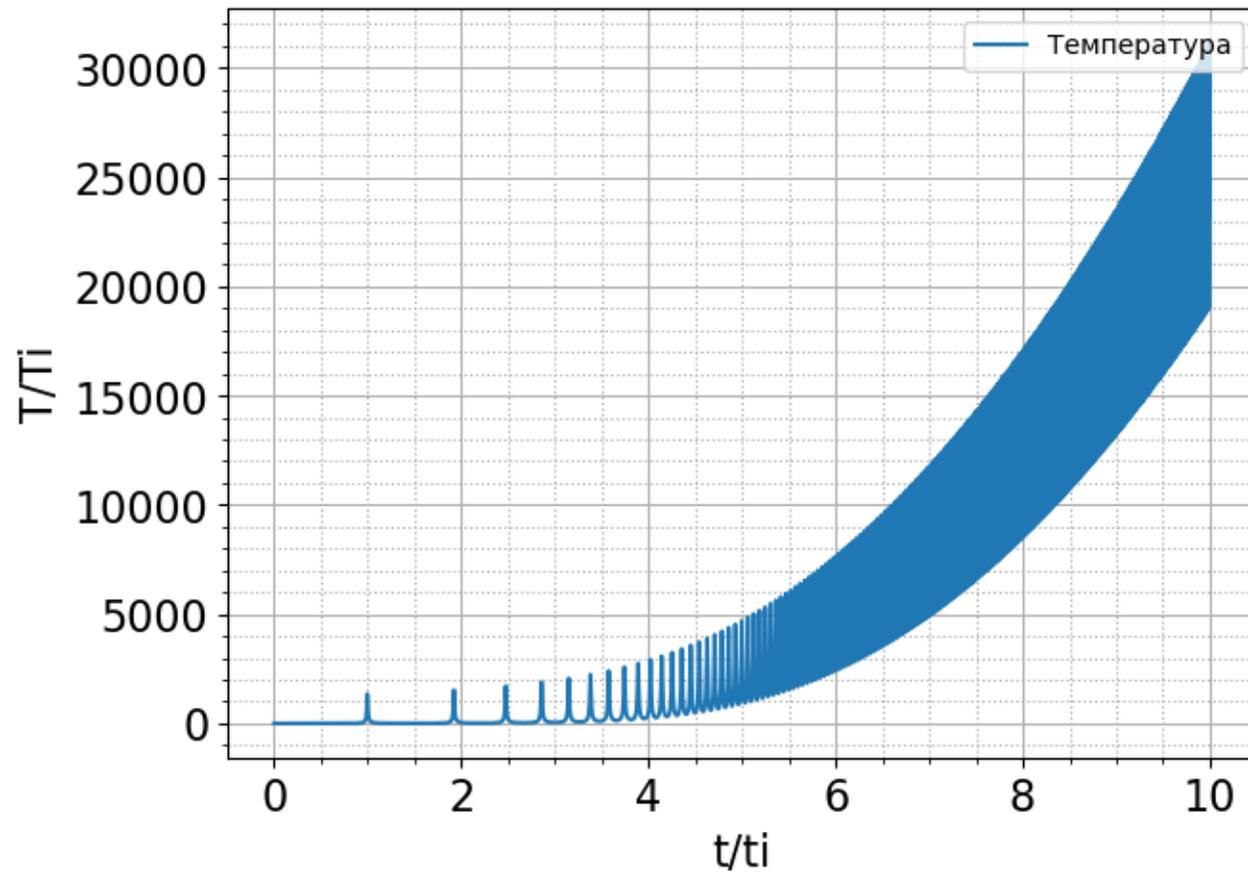


МИФИ

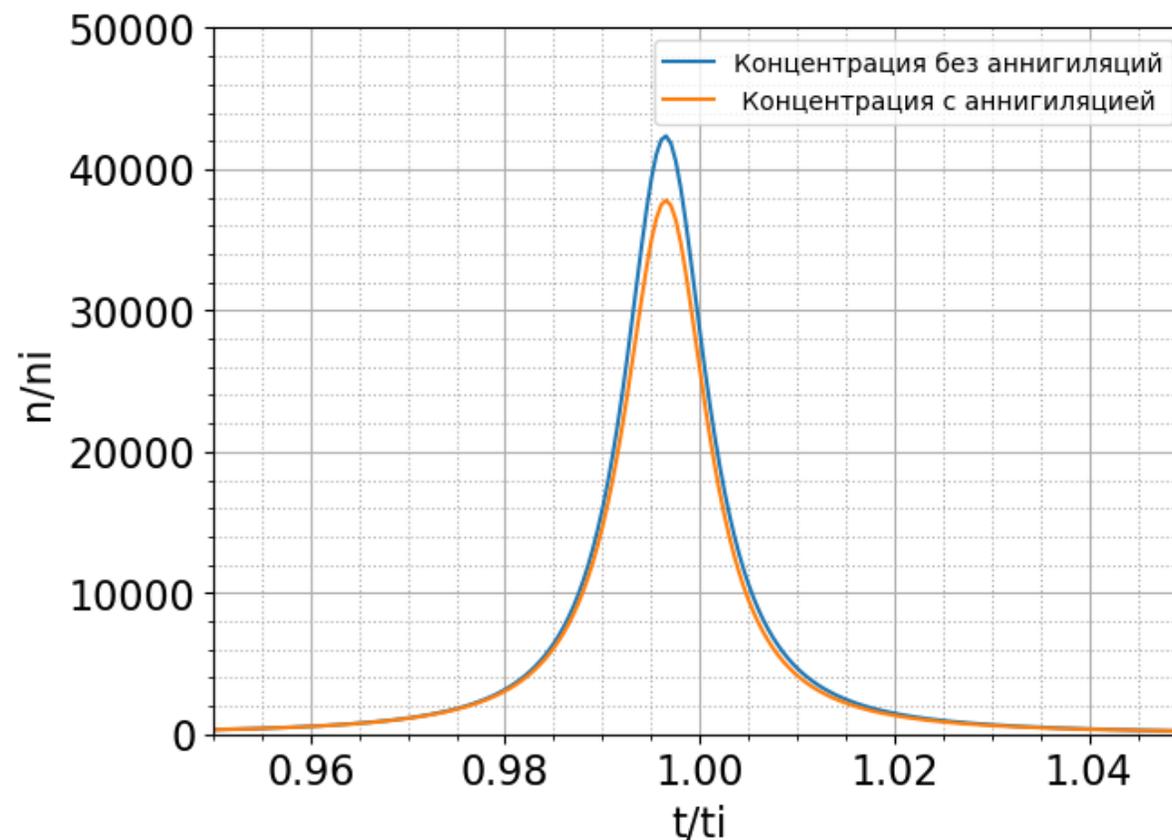
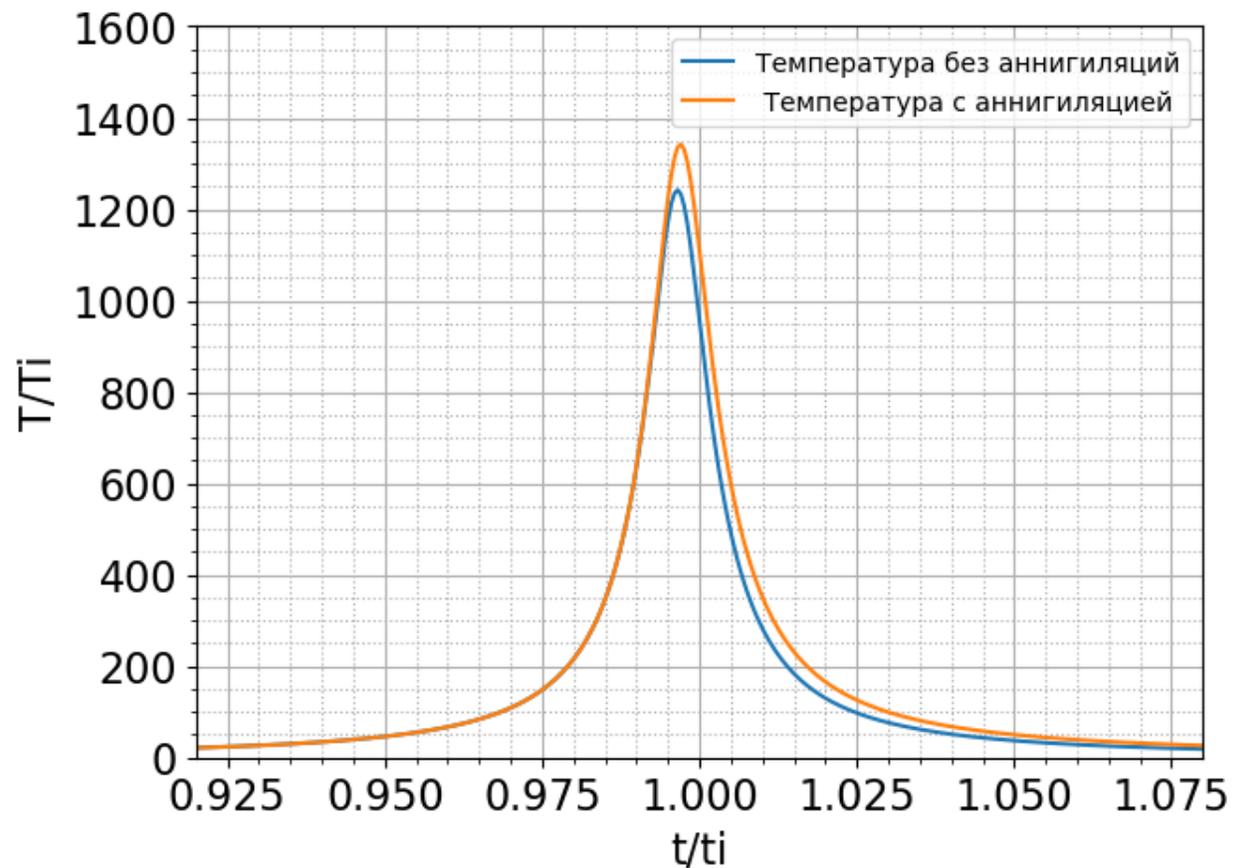
Национальный
исследовательский
ядерный университет

Дополнительные слайды

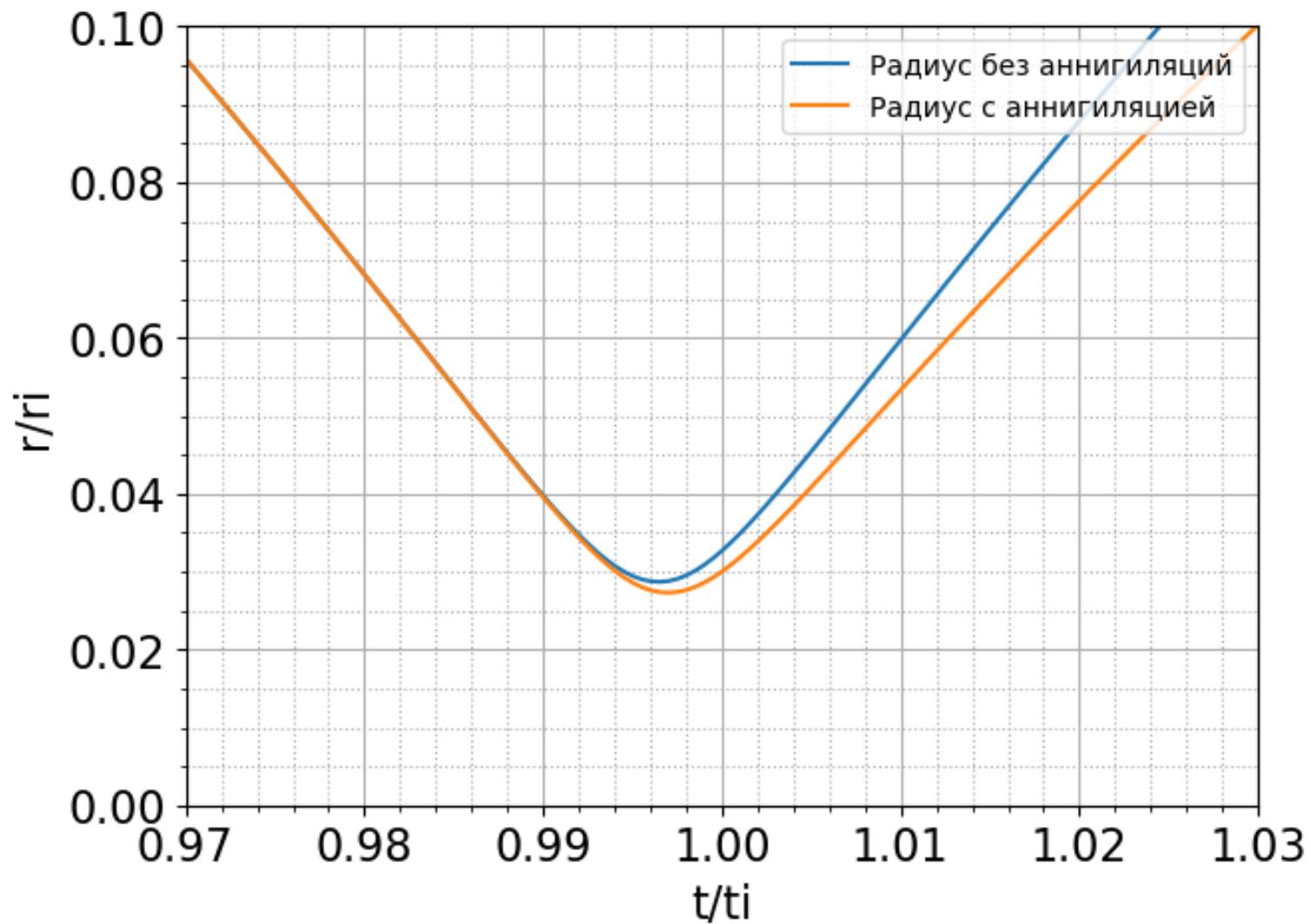
Изменение температуры и концентрации



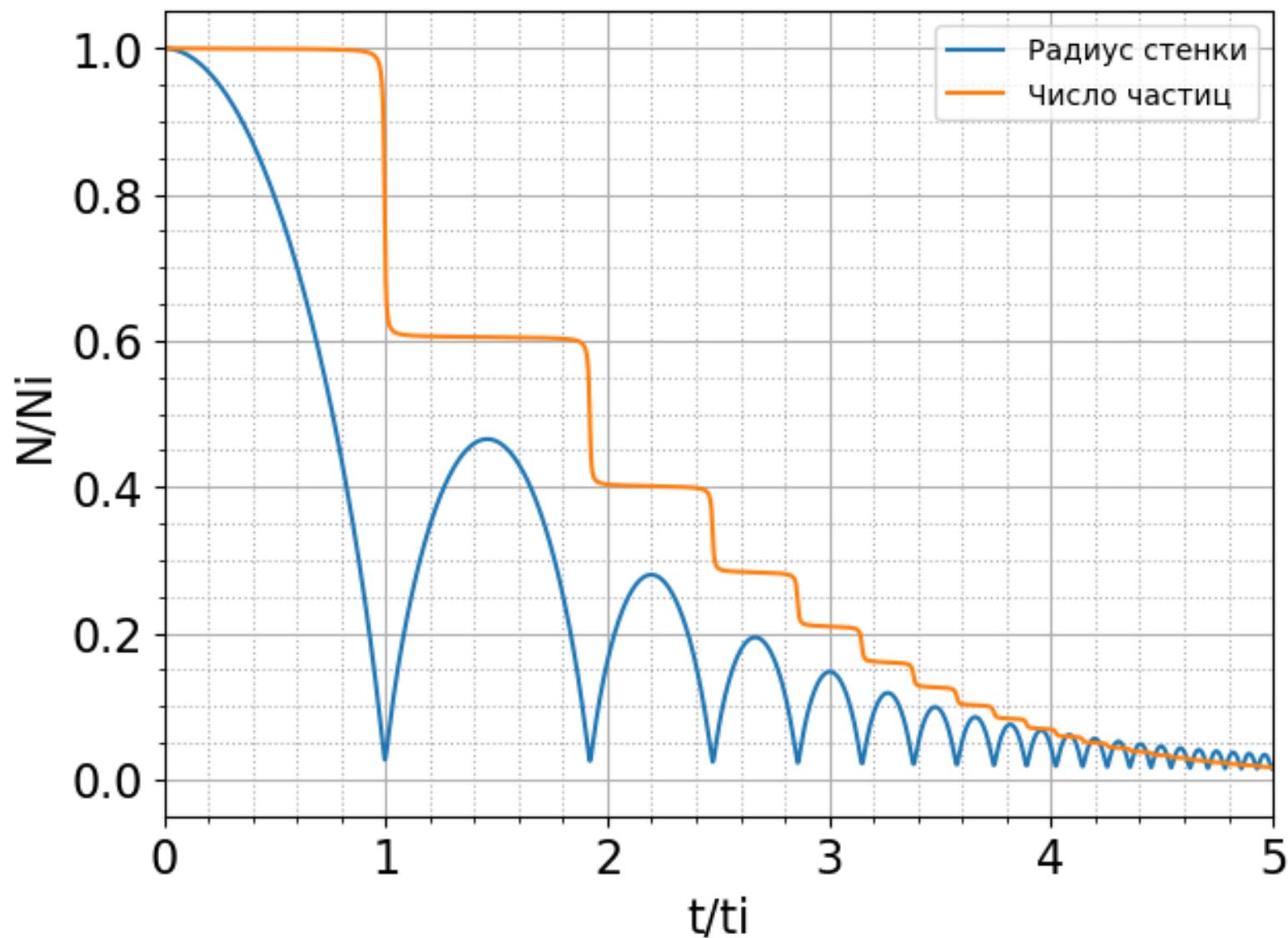
Сравнение температуры и концентрации



Сравнение радиусов



Изменение числа частиц



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

$$P = nT \quad - \text{давление не релятивистского газа}$$

$$P = \int_0^{\infty} \frac{(E^2 - m^2)^{3/2}}{e^{E/T} - 1} dE \quad - \text{давление релятивистского газа}$$

Лагранжиан взаимодействия

Лагранжиан комплексного скалярного поля

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

Лагранжиан скалярных частиц

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

Начальная температура

$$T_i = T_* \frac{(z_i + 1)^2}{(z_* + 1)^2} = 2.4 \cdot 10^{-3} \text{ГэВ} \frac{(1.4 \cdot 10^{12})^2}{(1.07 \cdot 10^{10})^2} = 41 \text{ ГэВ} \quad (4.12)$$

Начальная концентрация:

$$\begin{aligned} n_i = n_{CDM} &= \frac{\rho_{CDM}}{m_{CDM}} = \frac{\Omega_{CDM,0} \cdot \rho_{c,0}}{m_{CDM}} (z_i + 1)^3 \\ &= \frac{0.27 \cdot 5.2 \cdot 10^{-6}}{10^3} (1.4 \cdot 10^{12})^3 = 3.85 \cdot 10^{27} \frac{1}{\text{см}^3} \end{aligned} \quad (4.13)$$

Сечение взаимодействия $\langle \sigma v \rangle = 3 \cdot 10^{-26} \frac{\text{см}^3}{\text{с}}$

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

$$r_i = \frac{R_{inf}^2}{2t_{inf}} = 9.2 \cdot 10^5 \text{ см},$$

$$z_i + 1 = \sqrt{\frac{1}{2H_0 \sqrt{\Omega_{r,0} t_i}}} = 1.4 \cdot 10^{12}.$$

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

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

Масса доменной стенки

$$\begin{aligned}
 M_{DW} &= 4\pi r_i^2 \mu = \frac{4\pi \cdot (9.2 \cdot 10^5 \text{ см})^2 \cdot 10^{13} \text{ ГэВ}^3}{(0.2 \text{ ГэВ} \cdot 10^{-13} \text{ см})^2} = 2.66 \cdot 10^{52} \text{ ГэВ} = \\
 &= 4.43 \cdot 10^{28} \text{ Г} = 2.22 \cdot 10^{-5} M_{\odot},
 \end{aligned}$$

масса вещества

$$\begin{aligned}
 M &= V_i \rho_i = \frac{4}{3} \pi r_i^3 \rho_{c,0} \Omega_{CDM,0} (z_i + 1)^3 = \\
 &= \frac{4}{3} \pi \cdot (9.2 \cdot 10^5 \text{ см})^3 \cdot 5.2 \cdot 10^{-6} \frac{\text{ГэВ}}{\text{см}^3} \cdot 0.27 \cdot (1.4 \cdot 10^{12})^3 = \\
 &= 1.26 \cdot 10^{49} \text{ ГэВ} = 2.1 \cdot 10^{25} \text{ Г} = 1.05 \cdot 10^{-8} M_{\odot}
 \end{aligned}$$

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

$$r_g = 2 \cdot 2.66 \cdot 10^{52} \text{ ГэВ} \cdot \frac{0.2 \text{ ГэВ} \cdot 10^{-13} \text{ см}}{(1.2 \cdot 10^{19} \text{ ГэВ})^2} = 7.4 \text{ см}.$$

$$\phi = \frac{f}{\sqrt{2}}e^{i\theta} = \frac{f}{\sqrt{2}}e^{i\chi/f}. \quad (1.1)$$

лагранжиан стенки имеет вид:

$$L_{wall} = \partial_\mu \phi^+ \partial^\mu \phi - \frac{1}{4} \left(\phi^+ \phi - \frac{f^2}{2} \right)^2 - \Lambda^4 (1 - \cos(\theta)), \quad (1.2)$$

где ϕ — комплексное скалярное поле, θ — фаза. Подстановка уравнения (1.1) в (1.2) даст Лагранжиан, который описывает фазу поля:

$$L_{wall} = \frac{1}{2} (\partial_\mu \chi)^2 - \Lambda^4 (1 - \cos(\chi/f)). \quad (1.3)$$

Фаза χ определяется как в [9]:

$$\chi(x) = 4f \arctan \left[\exp \left(\frac{\Lambda^2}{f} x \right) \right]. \quad (1.4)$$

Рассмотрим Лагранжиан скалярного поля, колебания которого воспринимаются как частицы скрытой массы:

$$L_s = (\partial_\mu \varphi)^2 - \frac{1}{2} m^2 \varphi^2 - \frac{1}{2} \alpha_0 \phi \varphi^2 + h.c. \quad (1.5)$$

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

$$T_{\mu\nu} = \frac{\partial L_{wall}}{\partial(\partial^{\mu}\chi)}(\partial_{\nu}\chi) - g_{\mu\nu}L_{wall}. \quad (2.20)$$

Ненулевые компоненты тензора с учётом (1.4) имеют вид:

$$T_{00} = -T_{22} = -T_{33} = \Lambda^4(1 - \cos(\chi/f)) = 2\Lambda^4 \frac{1}{\cosh^2(2x/d)}. \quad (2.21)$$

Теперь найдём поверхностную плотность энергии доменной стенки:

$$\mu = \int_{-\infty}^{\infty} T_{00}(x)dx = 4f\Lambda^2 = 10^{12}\text{ГэВ}^3, \quad (2.22)$$

где $\Lambda = 0.05 \text{ ГэВ}$, $f = 10^{14} \text{ ГэВ}$.

$$D = \frac{\sinh^2 q}{\sinh^2 q + \cosh^2 w} \approx \frac{1}{1 + \exp 2(w - q)} \approx 0.$$

$$q = \frac{\pi}{2} d \sqrt{p_i^2 + \sqrt{2} \alpha_0 f} = 4.7 \cdot 10^{22},$$

$$w = \frac{\pi}{2} \sqrt{1 + 2\sqrt{2} \alpha_0 f d^2} = 6.7 \cdot 10^{22}.$$

