



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)),
- ❑ Вклад в расширение Вселенной (W.H. Press et al. , Astrophys. J. 347, 590 (1989)).

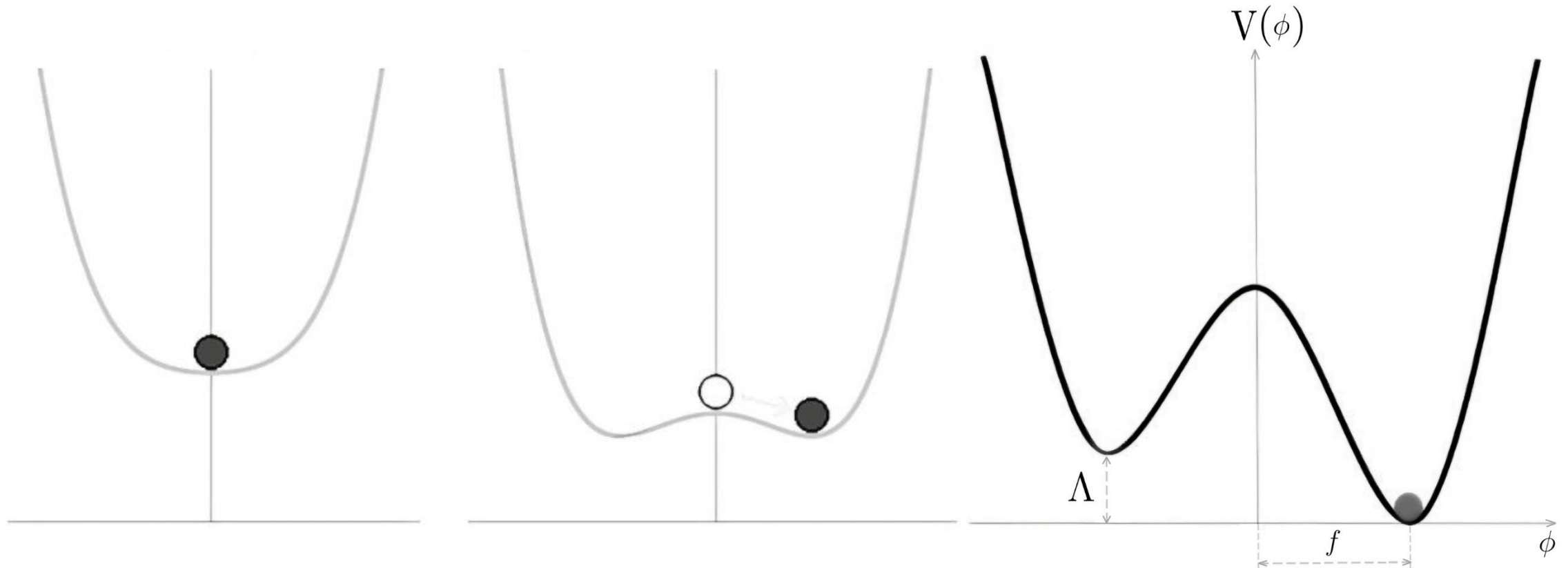
Цели и задачи работы

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

В рамках текущего семестра были поставлены задачи:

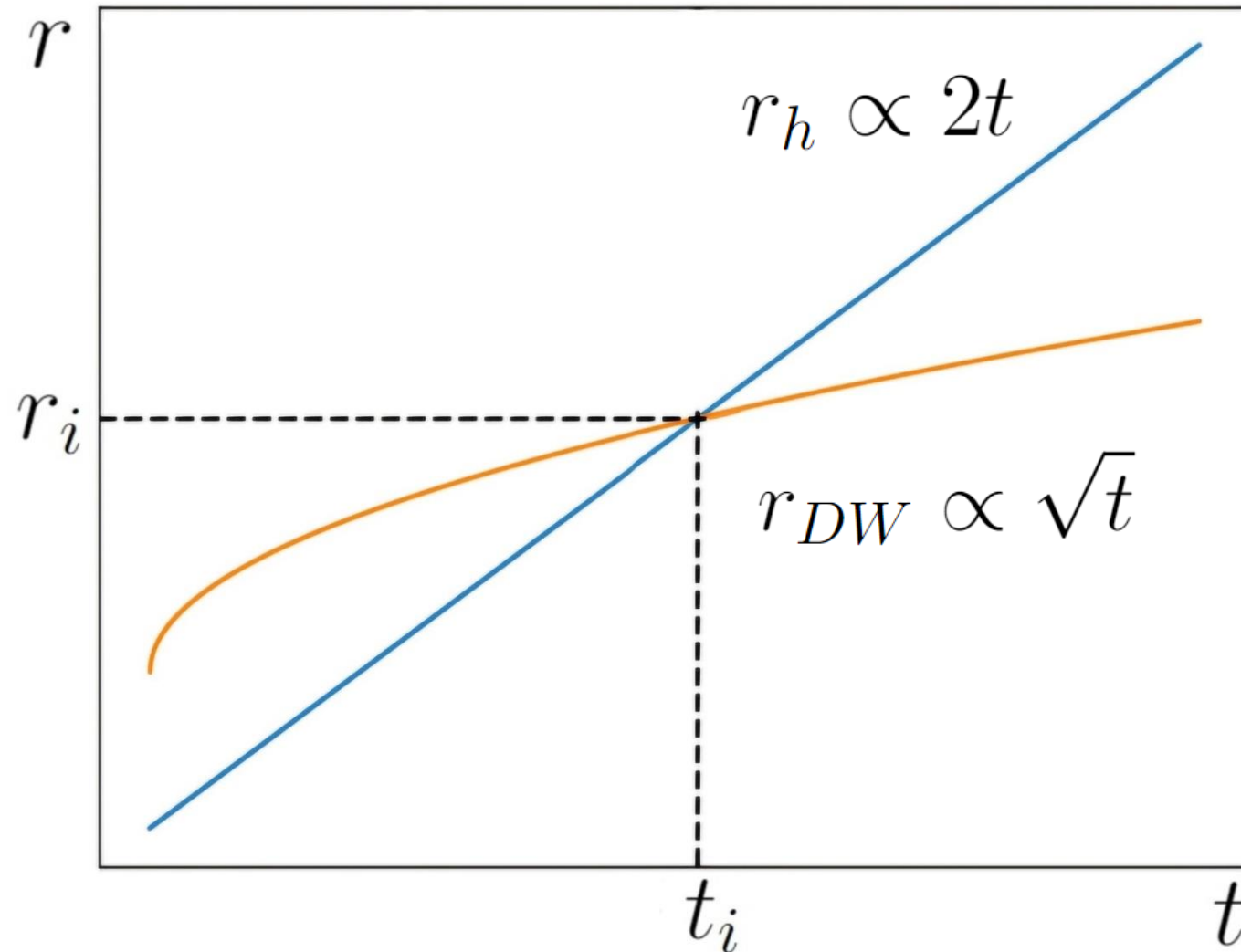
- ❑ Построение уравнения движения доменной стенки, взаимодействующей с газом скалярных частиц,
- ❑ Численное решение уравнения,
- ❑ Оценка возможности образования ПЧД.

Простейшая модель образования доменной стенки



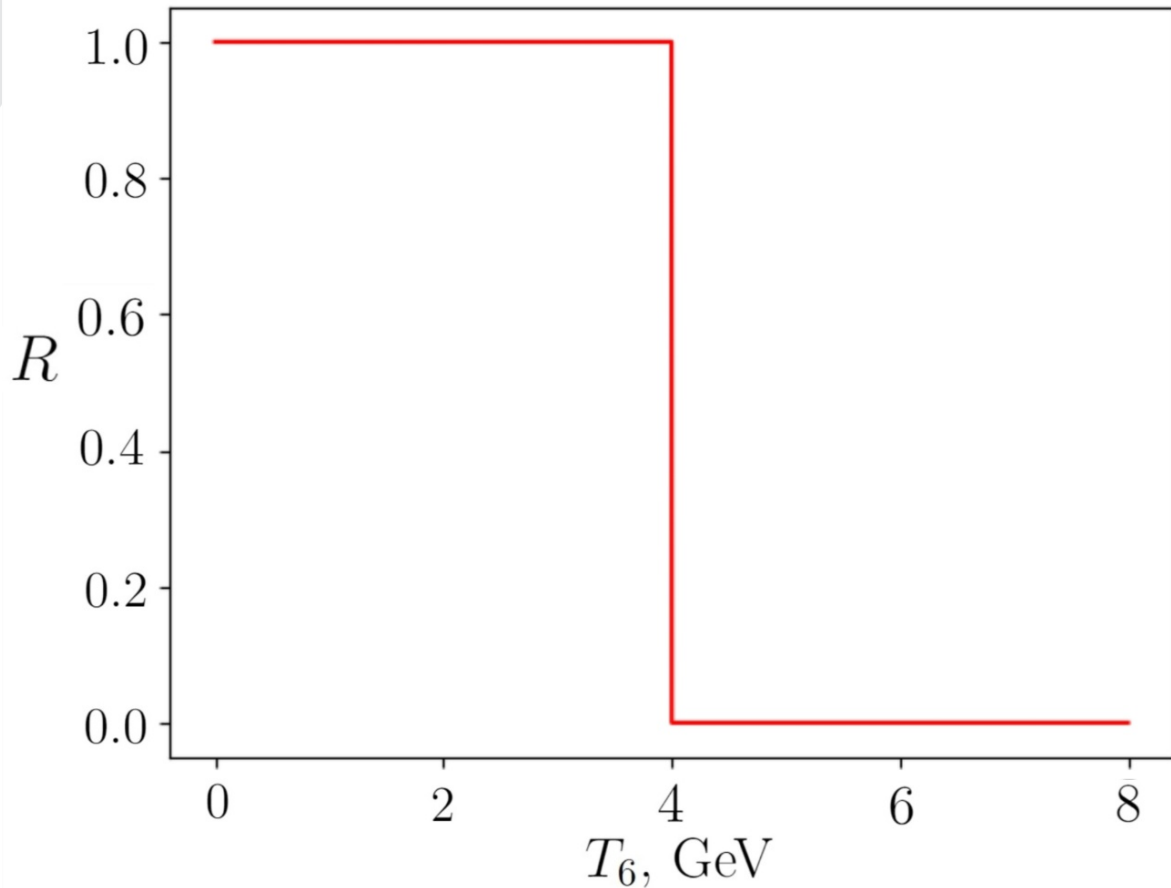
После фазового перехода скалярное поле оказывается в одном из потенциальных минимумов (A. Vilenkin, Phys. Rep. 121 (1985) 263)

Расширение стенки и горизонта



Схематичное изображение эволюции горизонта и доменной стенки после завершения инфляции

Коэффициент отражения



Коэффициент отражения R как функция температуры скалярных частиц. T_6 это 10^6 ГэВ.

Пороговая температура скалярных частиц

$$T_c \approx 4 \cdot 10^6 \text{ ГэВ} \left(\frac{\alpha_0}{1 \text{ ГэВ}} \right)^{\frac{1}{2}} \left(\frac{f}{10^{13} \text{ ГэВ}} \right)^{\frac{1}{2}}$$

Уравнение движения

Давление газа внутри

Поверхностное натяжение

$$\dot{v}(t) = (1 - v^2(t)) \left(\frac{1}{\sigma} (P_2(t) - P_1(t)) - \frac{2\pi}{r(t)} + 3H(t)v(t) \right)$$

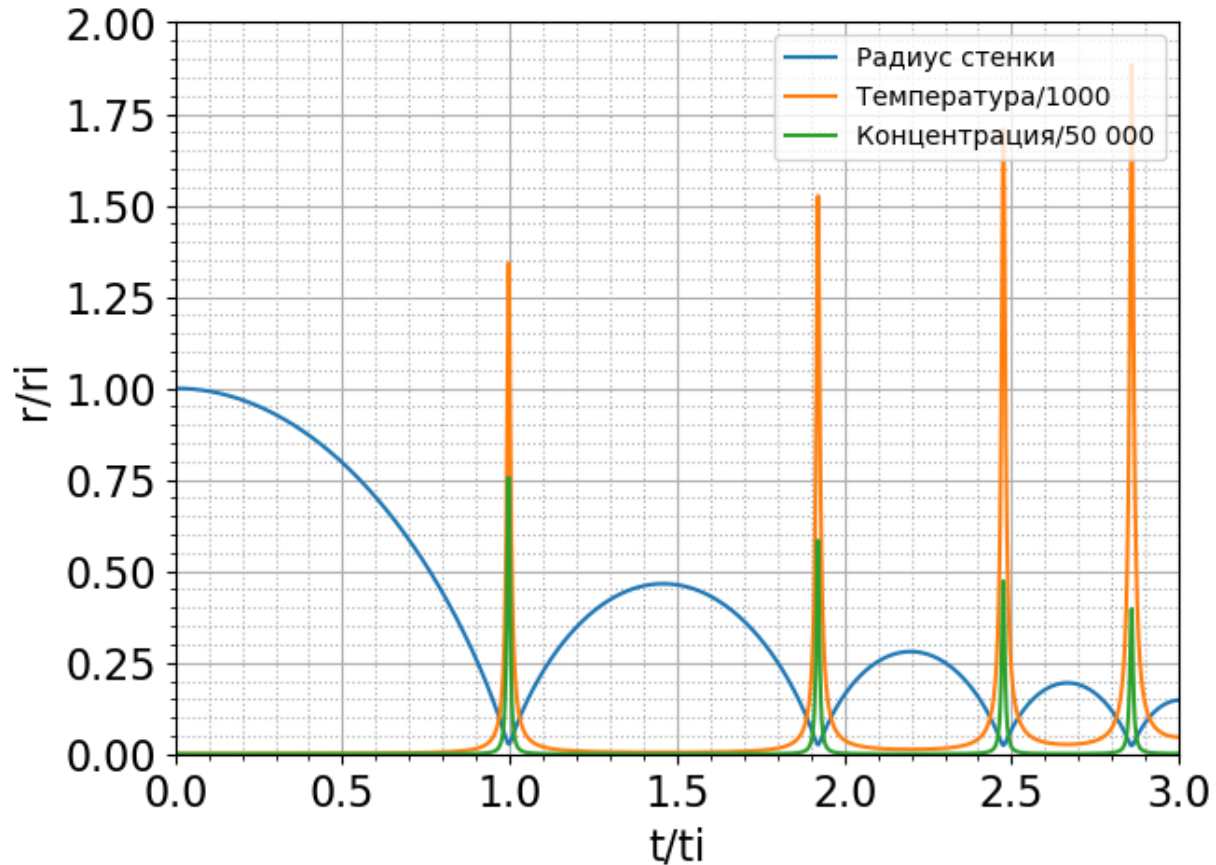
Давление газа снаружи

Расширение пространства

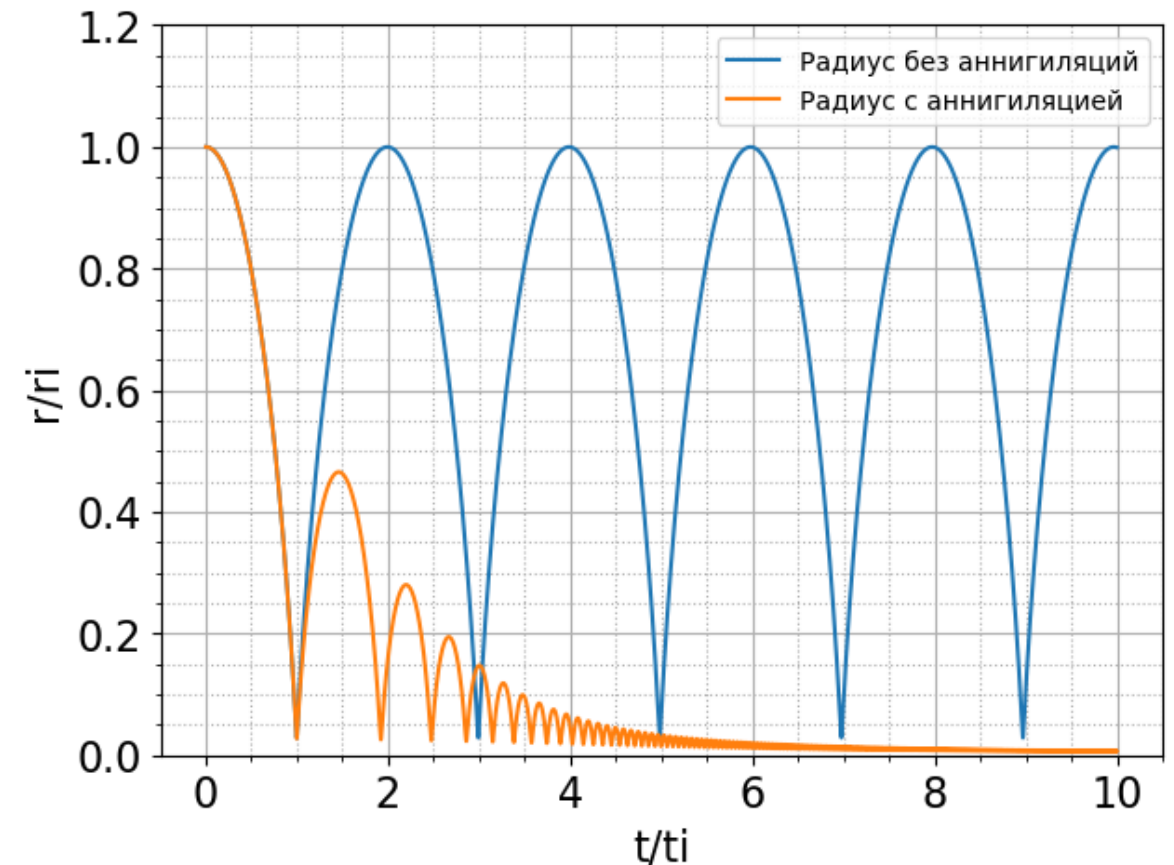
Система уравнений

$$\left\{ \begin{array}{l}
 \dot{v}(t) = (1 - v^2(t)) \left(\frac{1}{\sigma} (n_2(t)T_2(t) - n_1(t)T_1(t)) - \frac{2\pi}{r(t)} + 3H(t)v(t) \right) \\
 \dot{T}_2(t) = -2T_2(t) \frac{v(t)}{r(t)} \quad \text{— температура внутри} \\
 \dot{n}_2(t) = -\frac{1}{2} \langle \sigma v \rangle n_2^2(t) - 3n_2(t) \frac{v(t)}{r(t)} \quad \text{— концентрация внутри} \\
 \dot{T}_1(t) = -\frac{T_1(t)}{t} \quad \text{— температура снаружи} \\
 \dot{n}_1(t) = -\frac{1}{2} \langle \sigma v \rangle n_1^2(t) - \frac{3n_1(t)}{t} \quad \text{— концентрация снаружи}
 \end{array} \right.$$

Численное решение

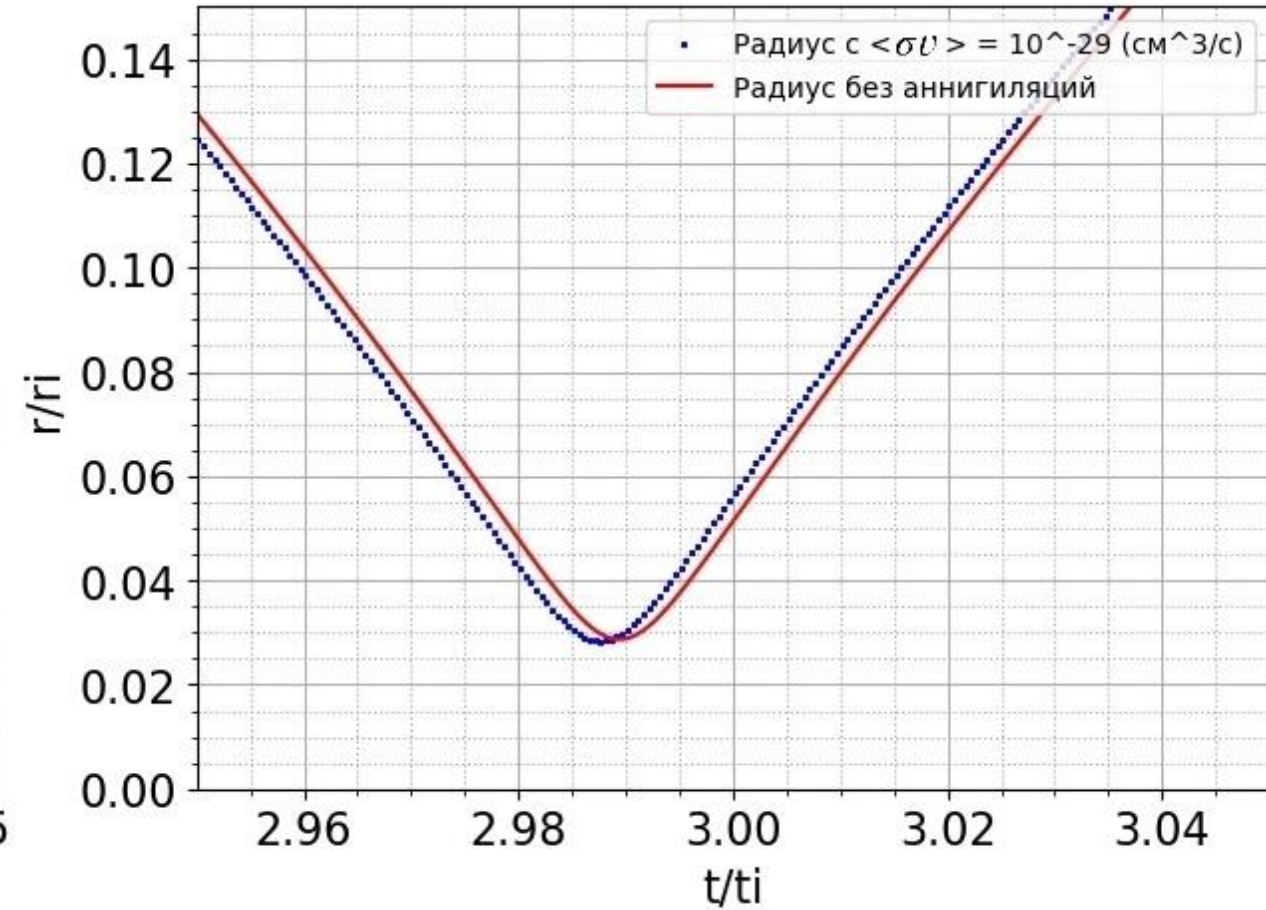
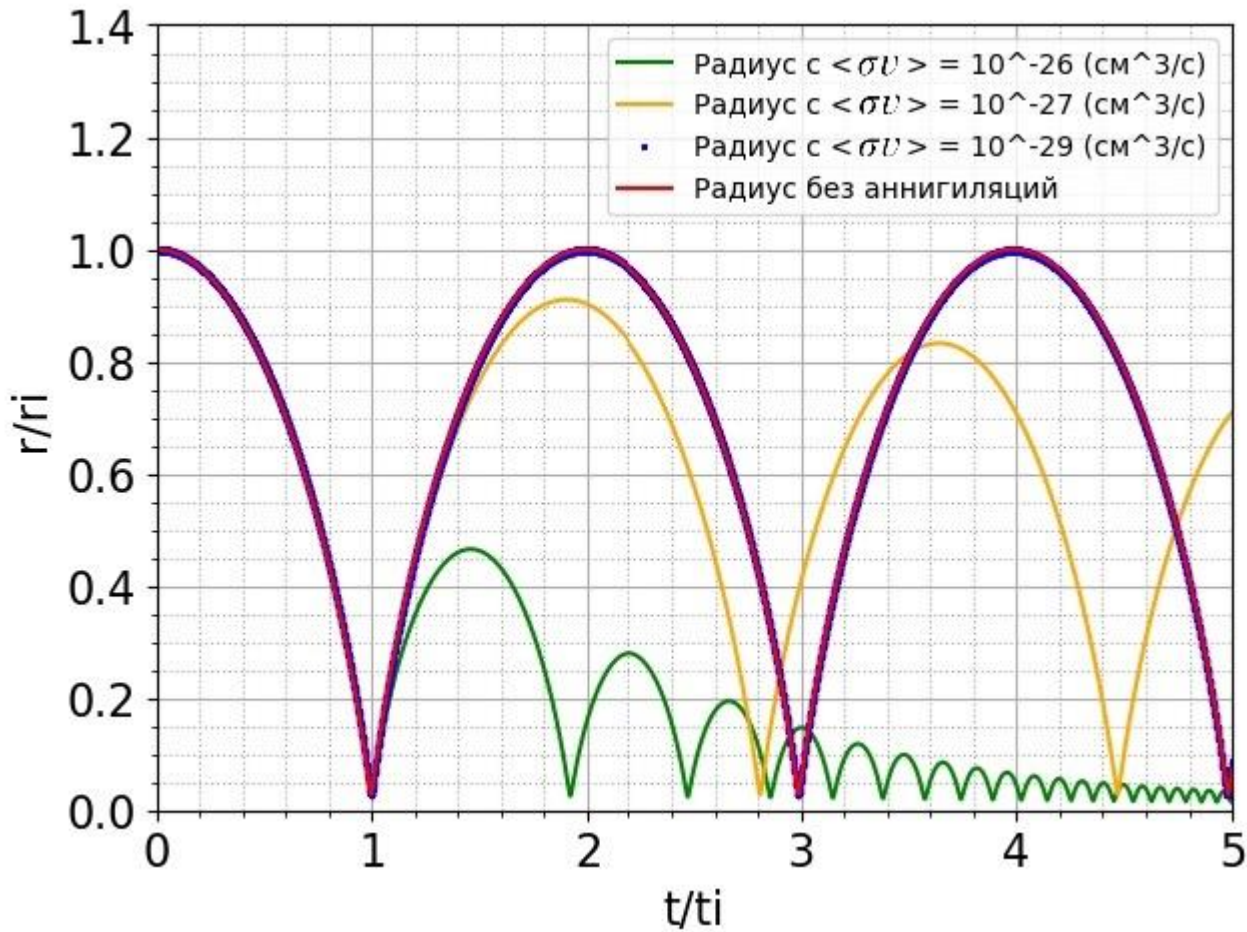


Изменение радиуса стенки, концентрации и температуры частиц
(в безразмерных единицах)



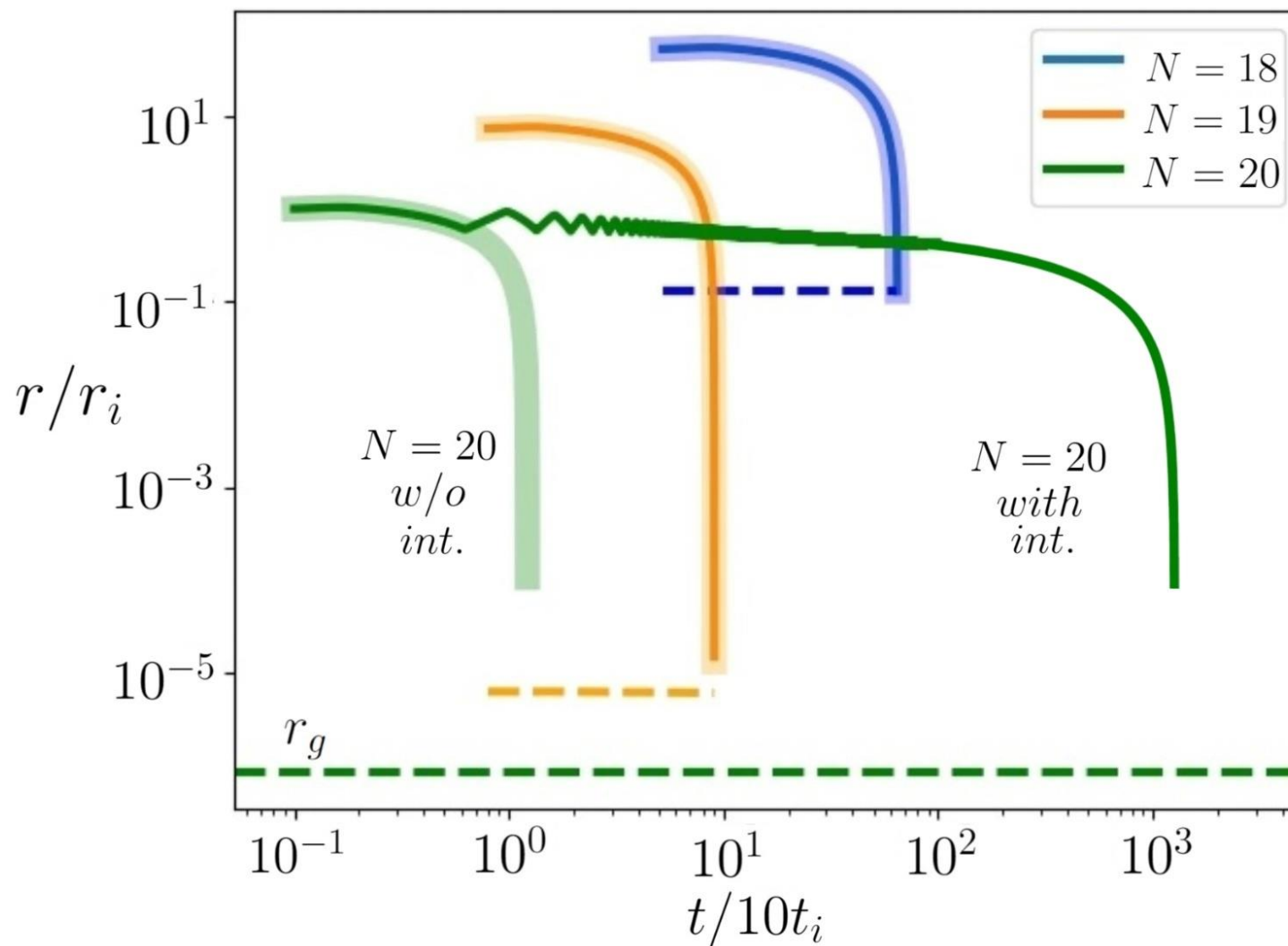
Изменение радиуса стенки с аннигиляцией и без аннигиляции частиц
(в безразмерных единицах)

Численное решение



Изменение радиуса стенки при различных значениях сечения взаимодействия

Численное решение

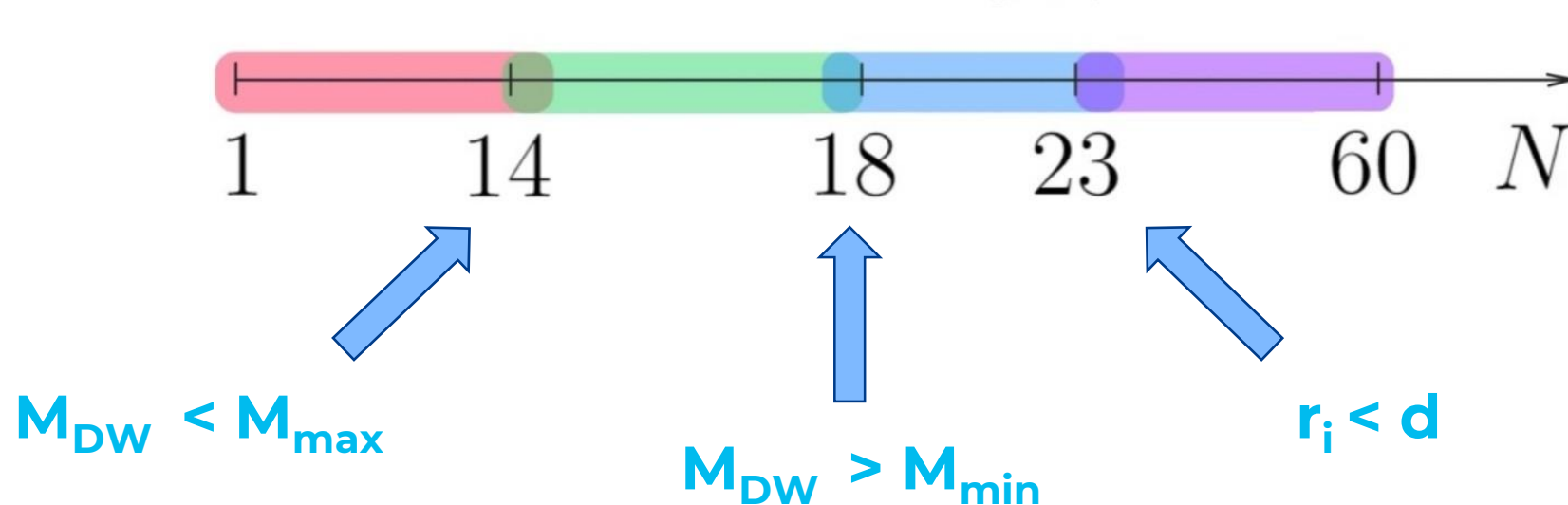


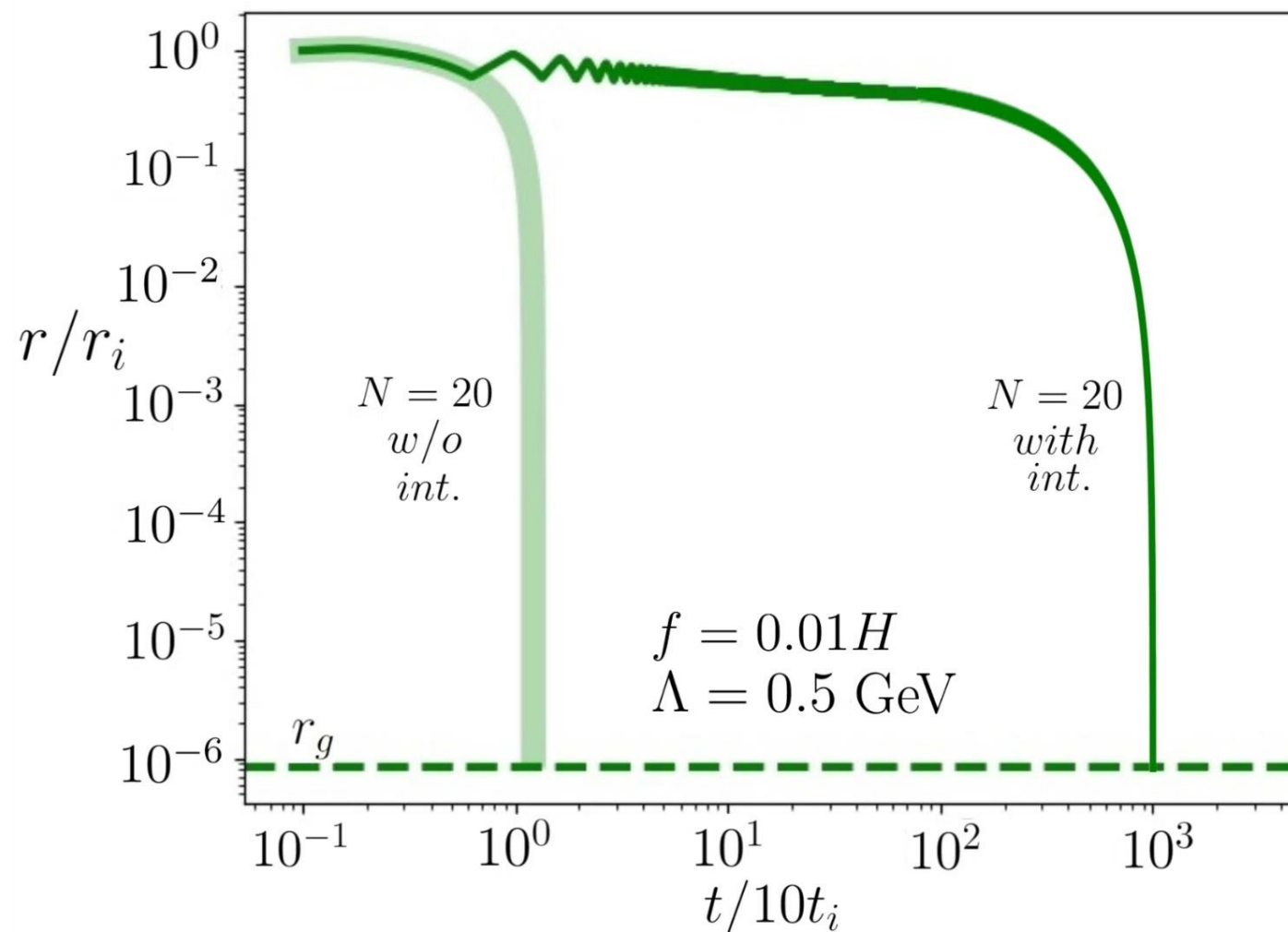
Изменение радиуса стенки для $N=18\div 20$ е-фолда.

Образование стенки на стадии инфляции

$$f = H = 10^{13} \text{ GeV}$$

$$\Lambda = 0.05 \text{ GeV}$$





Изменение радиуса стенки для $N=20$ е-фолда.

- ❑ Решено релятивистское уравнение движения доменной стенки:
 - при наличии/отсутствии аннигиляции скалярных частиц,
 - с учётом/без учёта взаимодействия ДС со скалярными частицами.

- ❑ Оценена возможность формирования ПЧД.



МИФИ

Национальный
исследовательский
ядерный университет

Спасибо за внимание!

26.12.2024



МИФИ

Национальный
исследовательский
ядерный университет

Дополнительные слайды

Ограничение на номер N

$$N > N_1 = \ln \left(e^{14} \frac{\Lambda}{0.05 \text{ ГэВ}} \sqrt{\frac{f}{10^{13} \text{ ГэВ}}} \right)$$

Из ограничения на M_{\max}

$$N < N_2 = \ln \left(e^{18} \frac{\Lambda}{0.05 \text{ ГэВ}} \right)$$

Из ограничения на M_{\min}

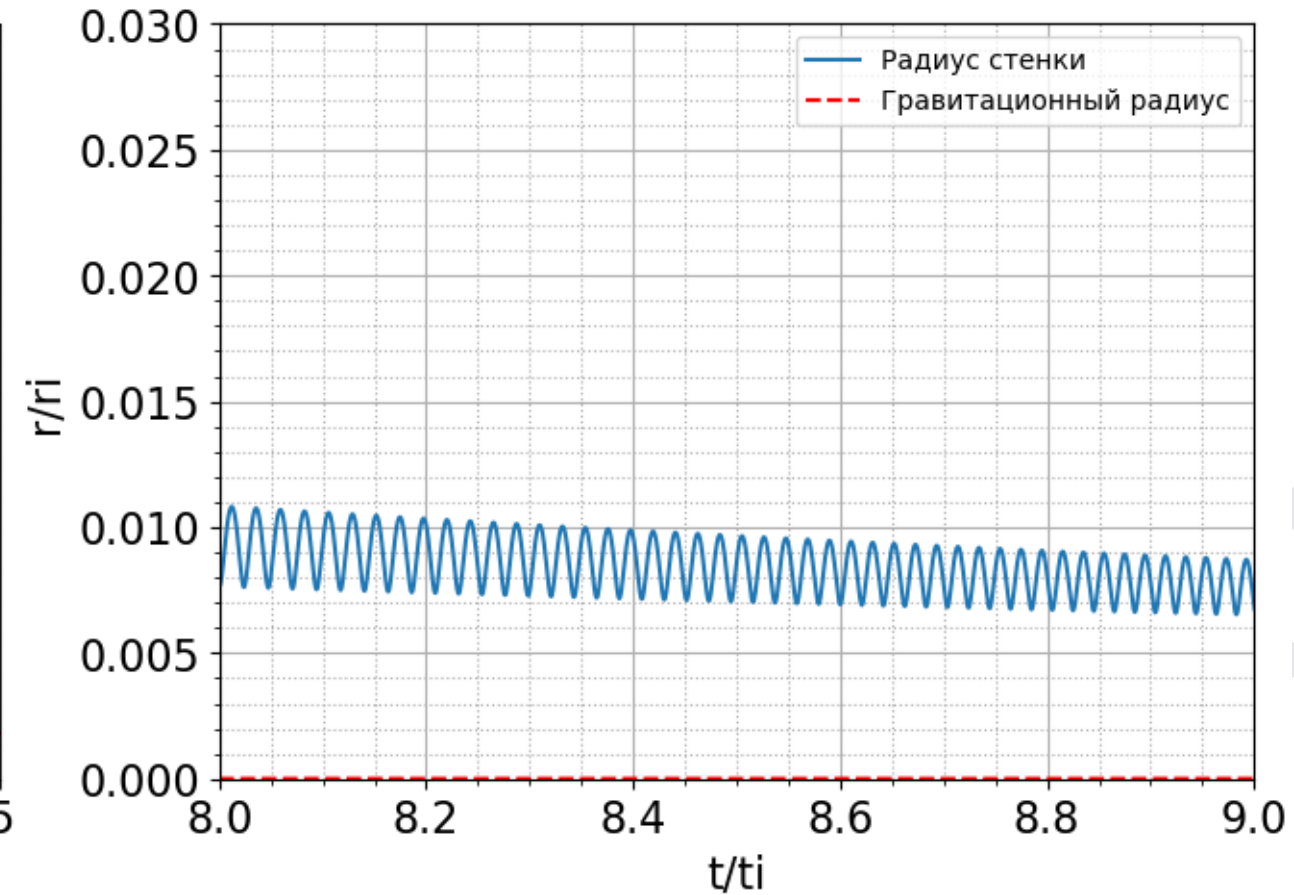
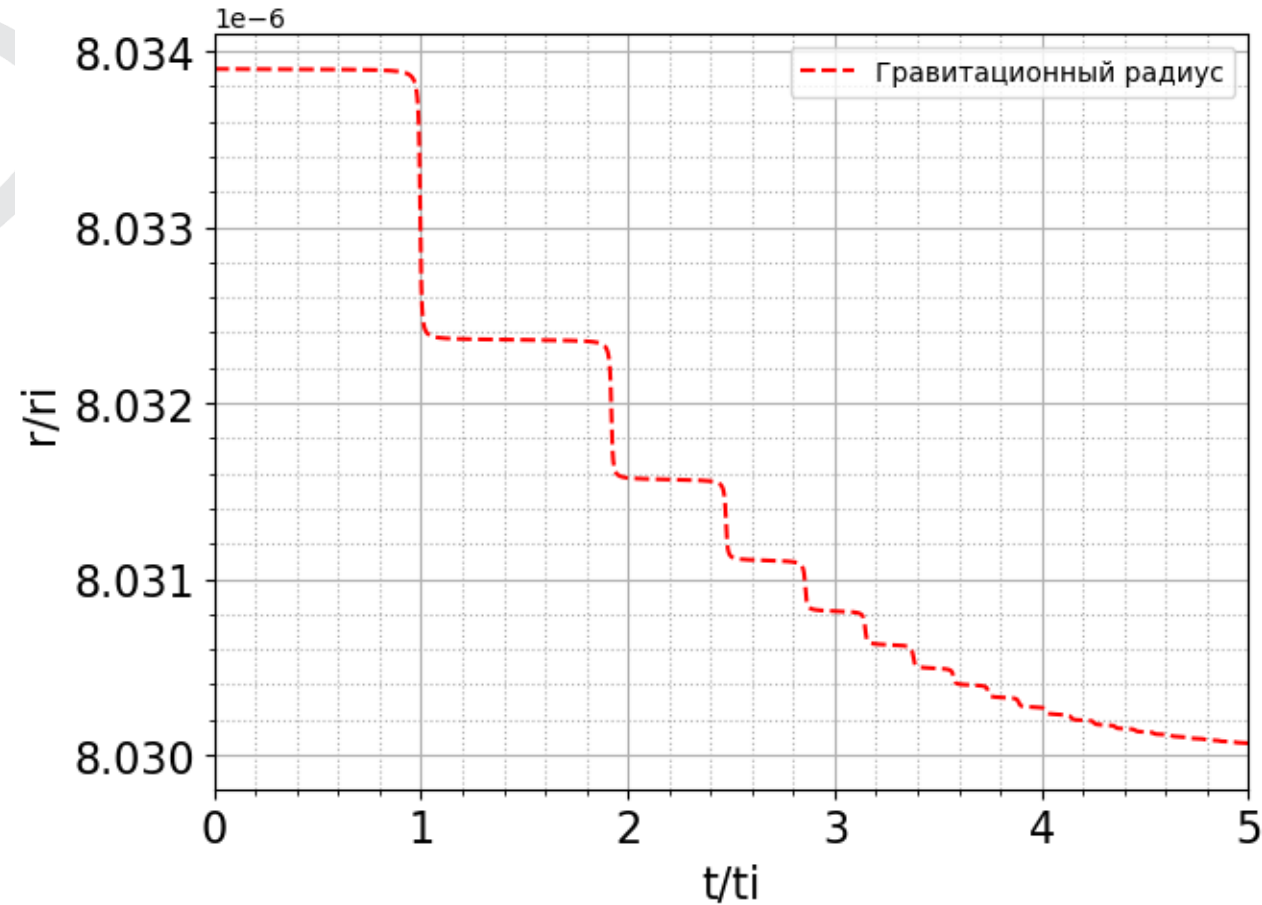
$$N < N_3 = \ln \left(e^{23} \frac{\Lambda}{0.05 \text{ ГэВ}} \sqrt{\frac{10^{13} \text{ ГэВ}}{f}} \right)$$

Из условия $r_i > d$

$$M_{\min} = 4.8 \cdot 10^{-4} M_{\odot} \left(\frac{f}{10^{13} \text{ ГэВ}} \right) \left(\frac{0.05 \text{ ГэВ}}{\Lambda} \right)^2$$

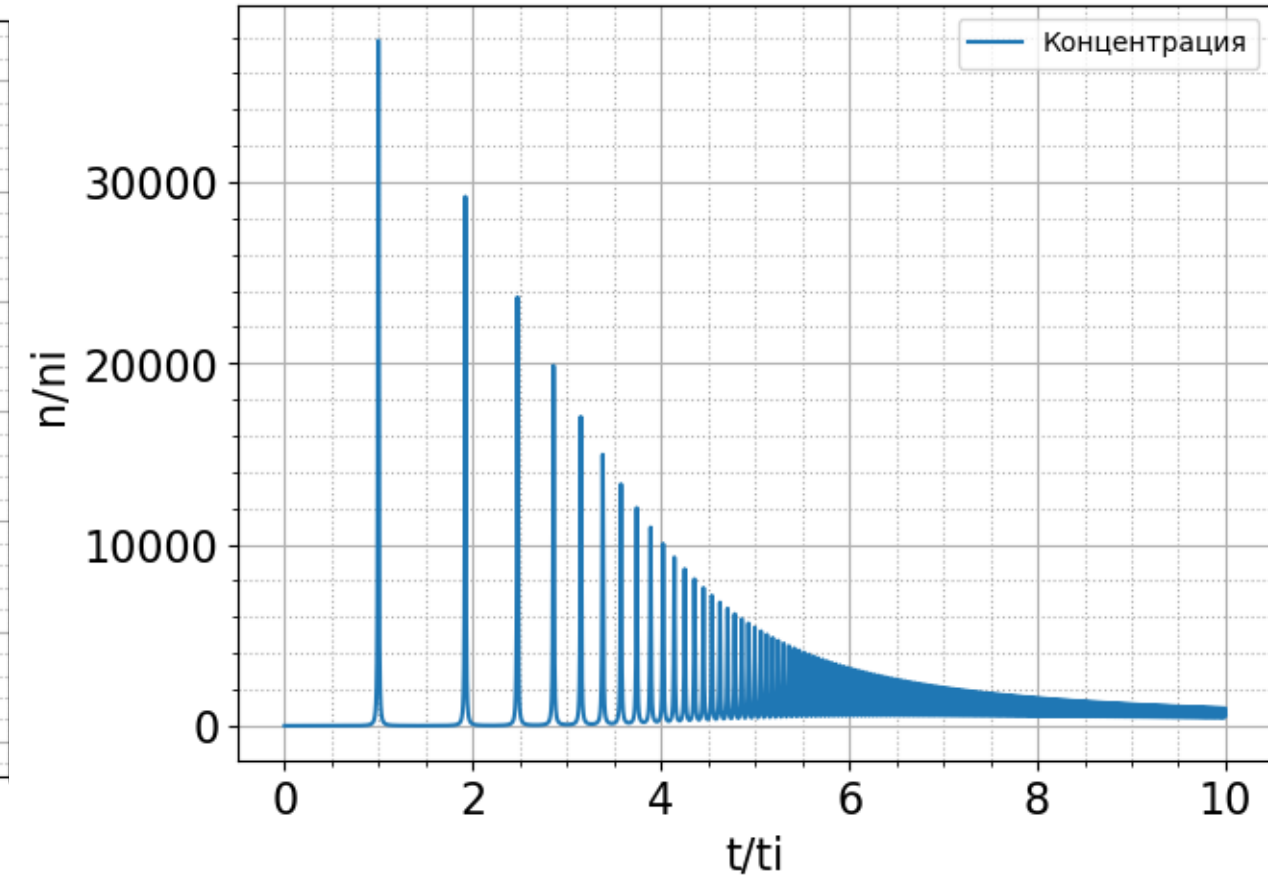
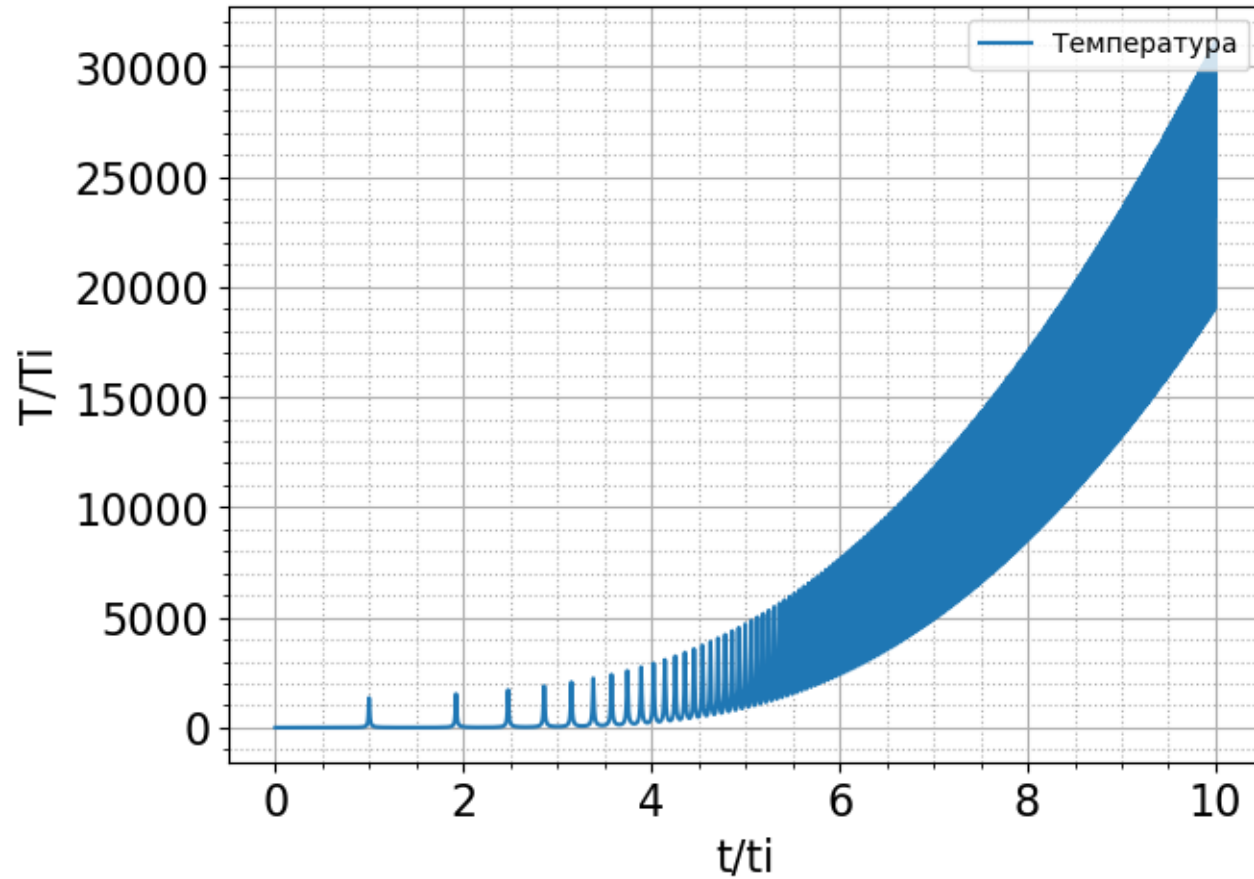
$$M_{\max} = 7 \cdot 10^8 M_{\odot} \left(\frac{10^{13} \text{ ГэВ}}{f} \right) \left(\frac{0.05 \text{ ГэВ}}{\Lambda} \right)^2$$

Численное решение

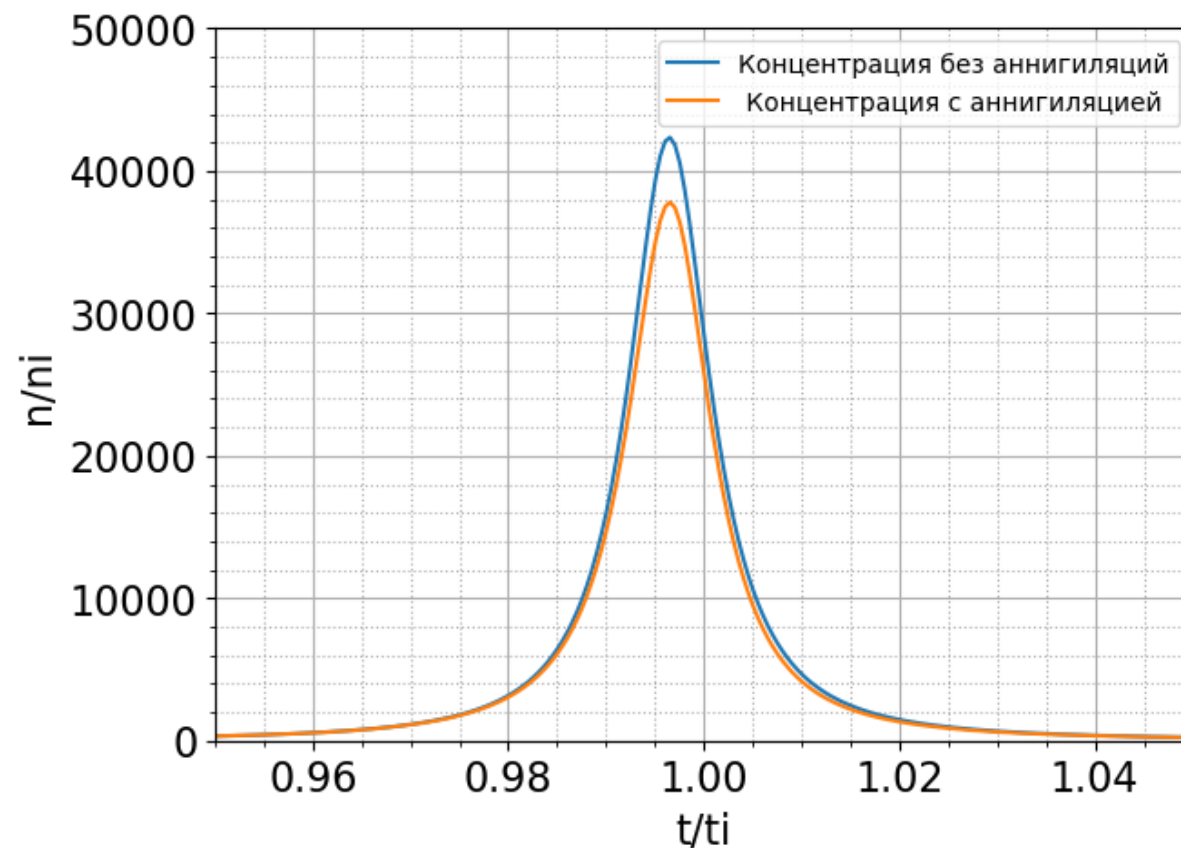
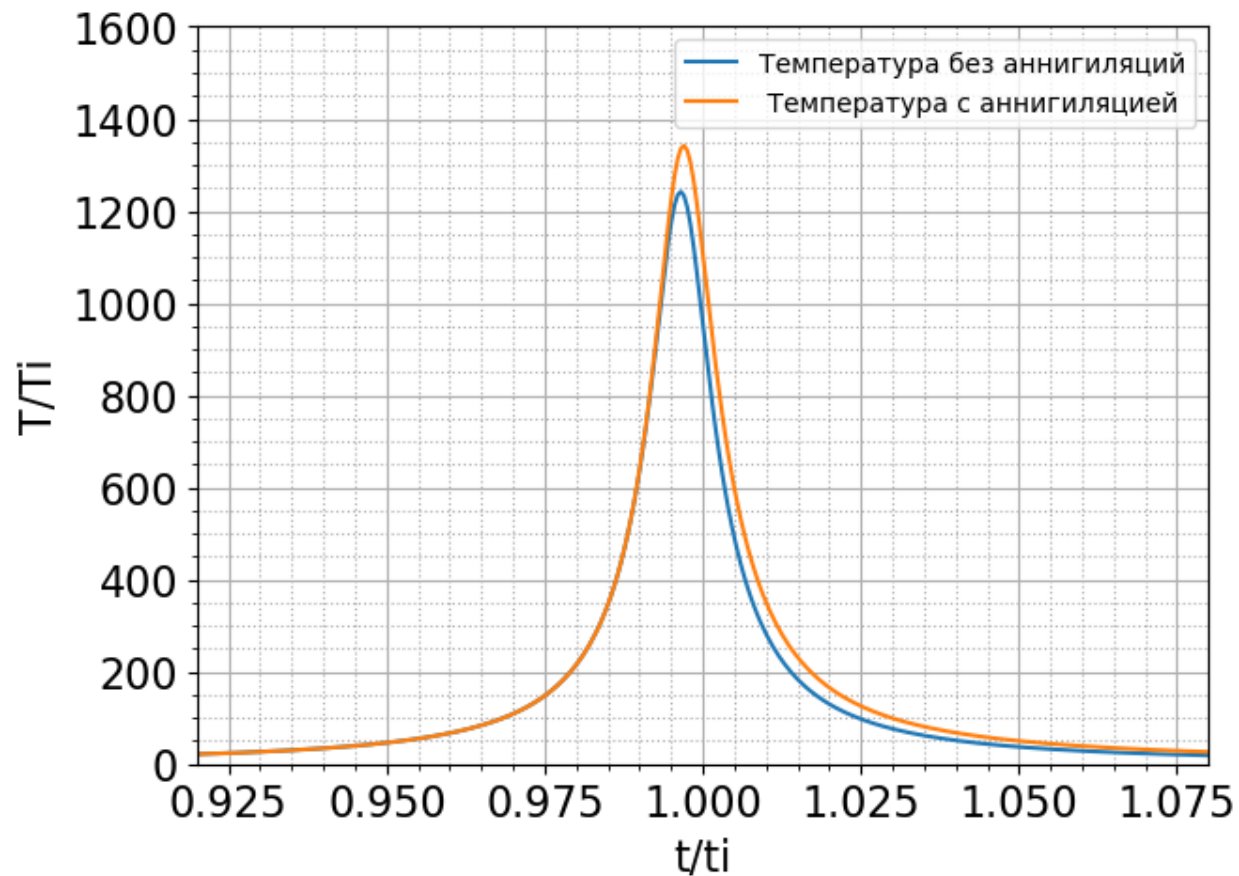


Изменение радиуса стенки и её гравитационного радиуса

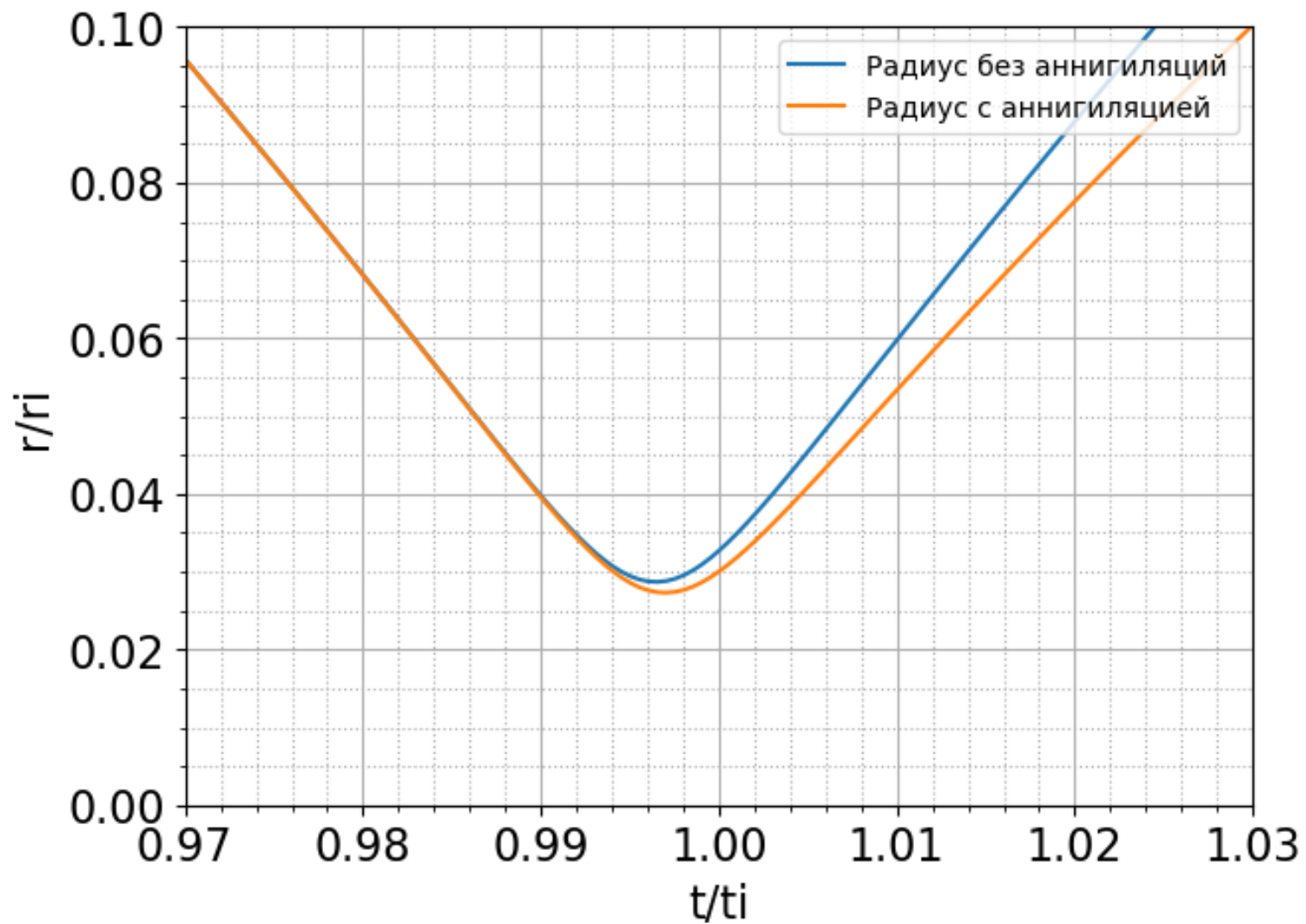
Изменение температуры и концентрации



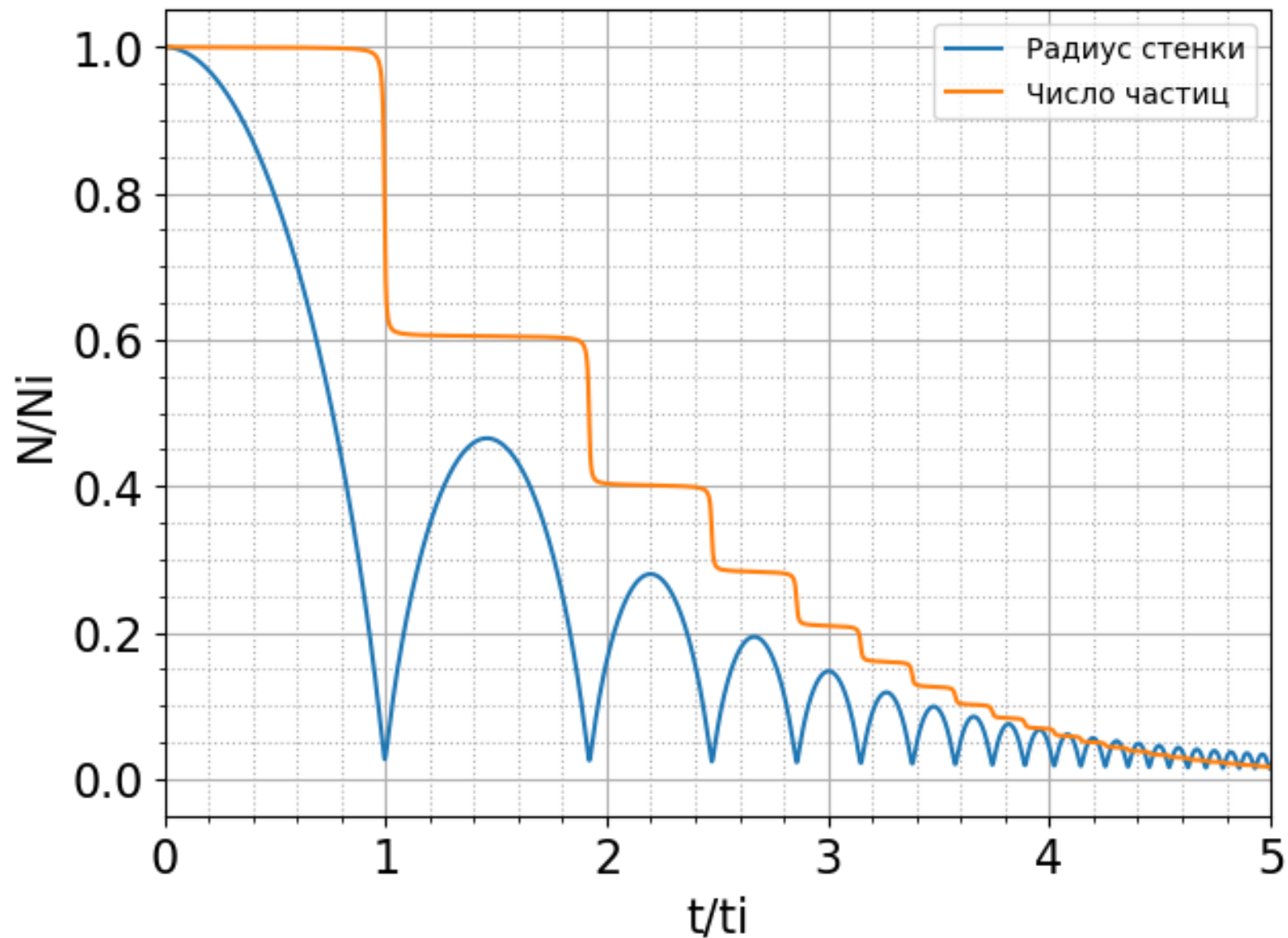
Сравнение температуры и концентрации



Сравнение радиусов



Изменение числа частиц



Лагранжиан комплексного скалярного поля

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

Лагранжиан скалярных частиц

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

Лагранжиан взаимодействия

$$\mathcal{L}_{int} = \frac{1}{2} \alpha_0 (\phi + \phi^*) \varphi^2$$

Начальная концентрация:

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

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

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

масса вещества

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

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

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

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

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

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

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

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

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