



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

# **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

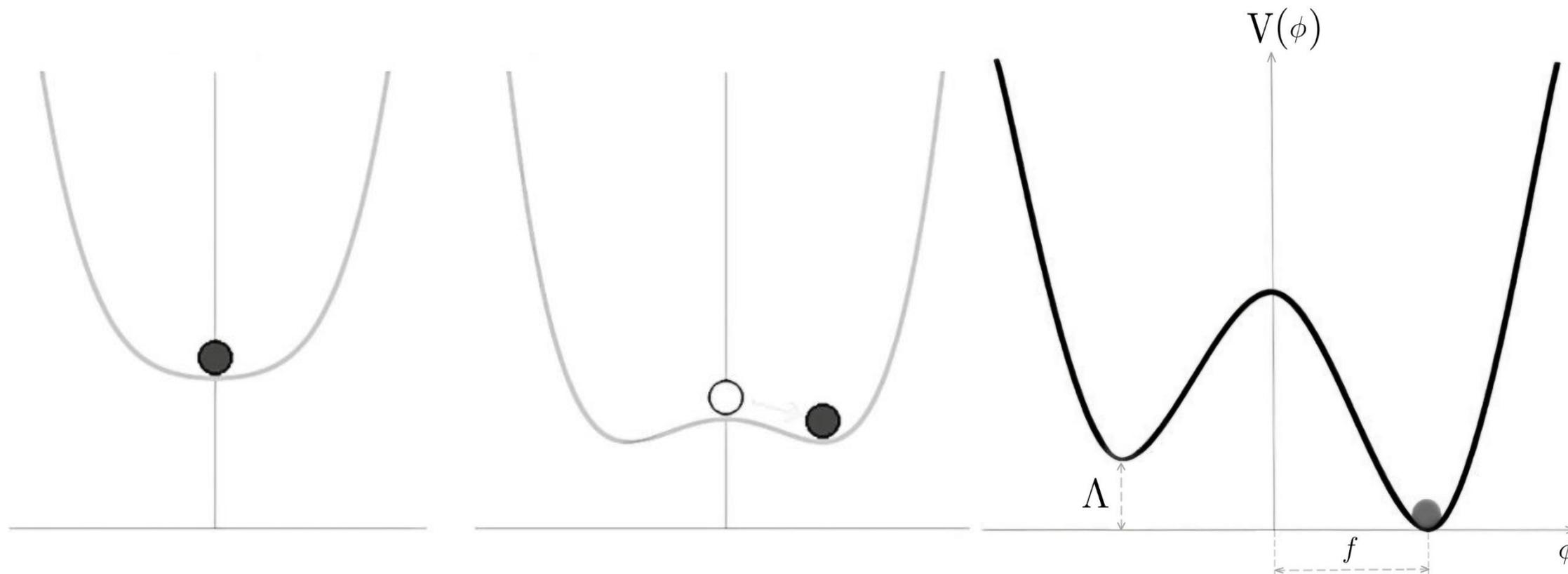
Первичные черные дыры (ПЧД) могут объяснить:

- происхождение квазаров в ранней Вселенной
- происхождение сверхмассивных черных дыр
- скрытую массу

## Цель работы

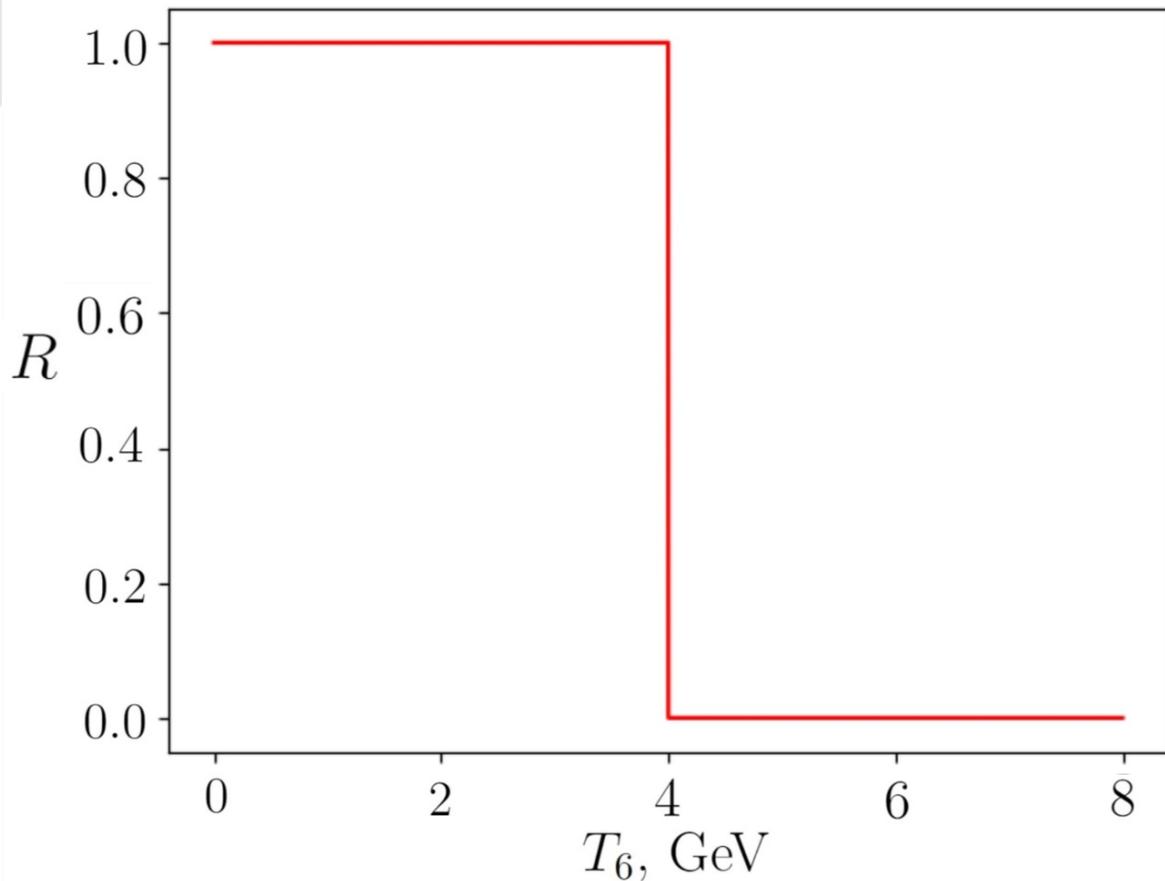
Изучить динамику одиночной доменной стенки (ДС) с учетом давления скалярных частиц, запертых внутри стенки

# Модель образования доменной стенки



После фазового перехода скалярное поле оказывается в одном из потенциальных минимумов.

# Коэффициент отражения

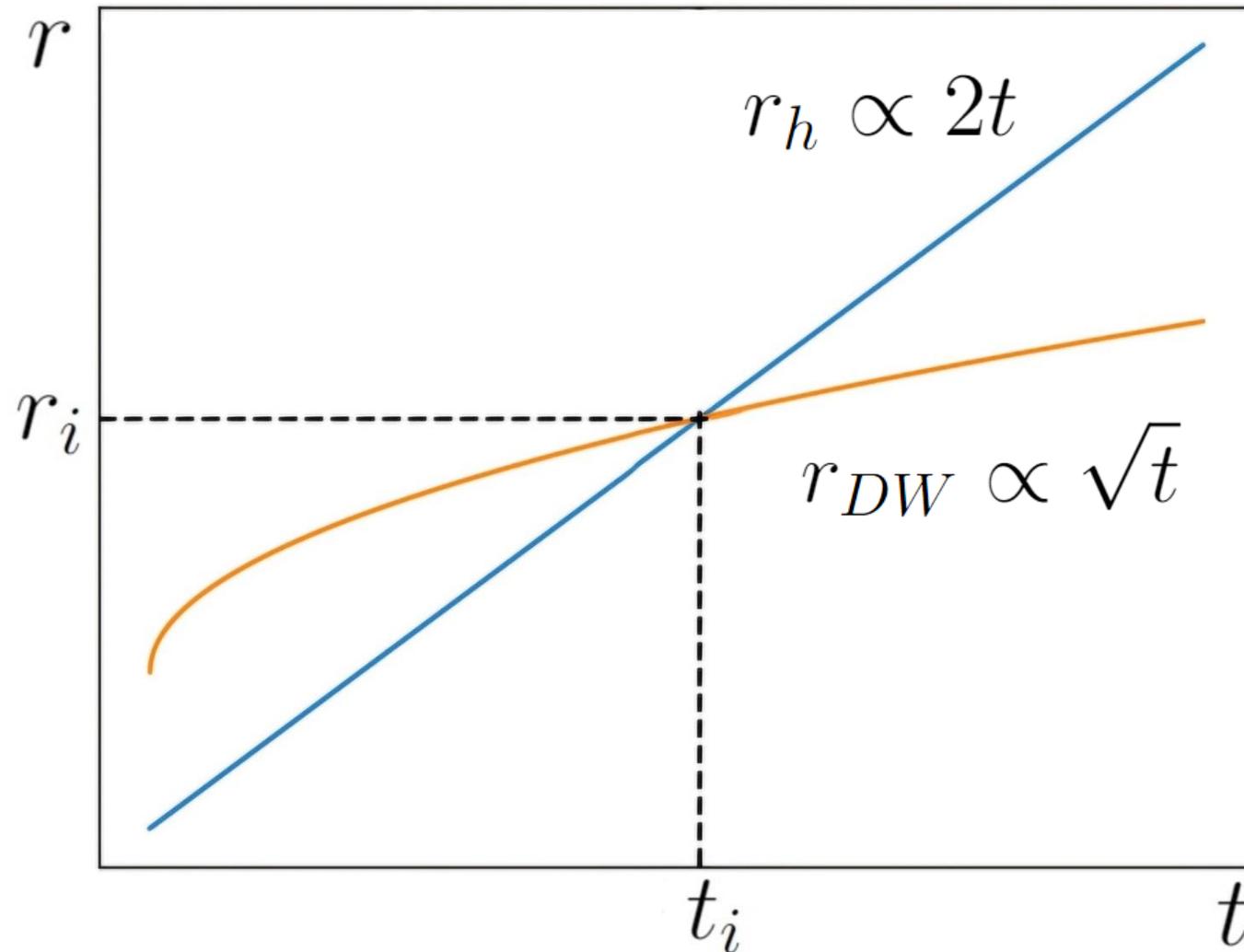


Пороговая температура скалярных частиц

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

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

# Расширение стенки и горизонта



Схематичное изображение эволюции горизонта и доменной стенки после завершения инфляции

# Система уравнений движения стенки

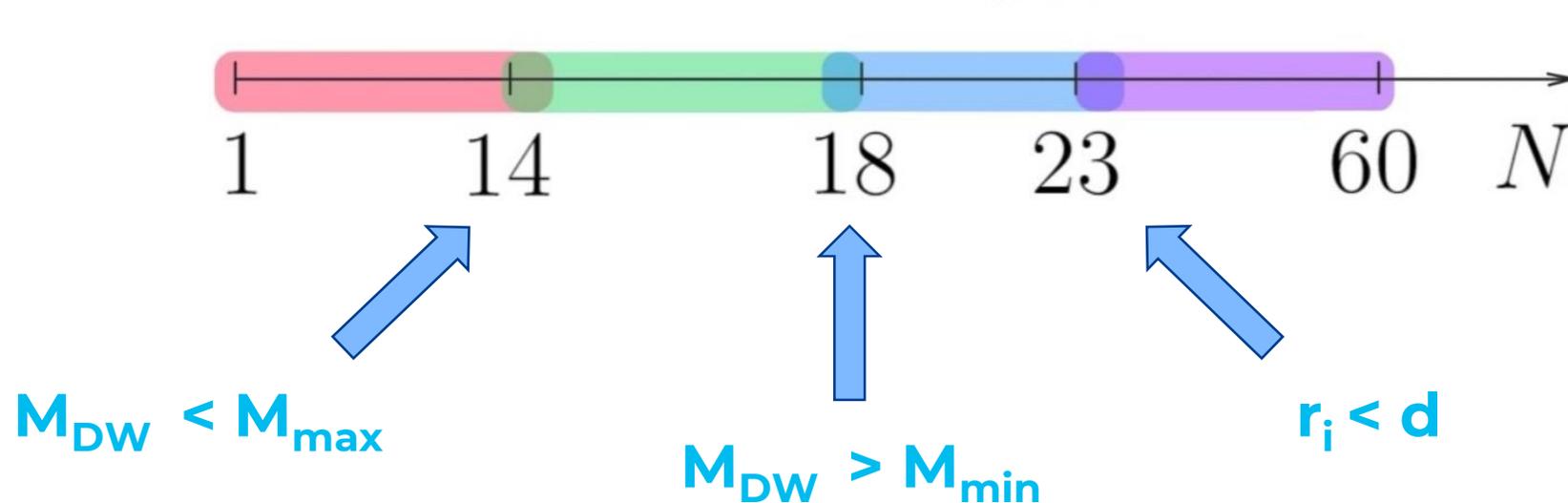


$$\left\{ \begin{array}{l} \dot{v}(t) = (1 - v^2(t)) \left( \frac{1}{\sigma} (n_2(t)T_2(t) - n_1(t)T_1(t)) - \frac{2\pi}{r(t)} + 3H(t)v(t) \right) \\ \dot{T}_2(t) = -2T_2(t) \frac{v(t)}{r(t)} \quad \text{— температура внутри} \\ \dot{n}_2(t) = -\frac{1}{2} \langle \sigma v \rangle n_2^2(t) - 3n_2(t)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

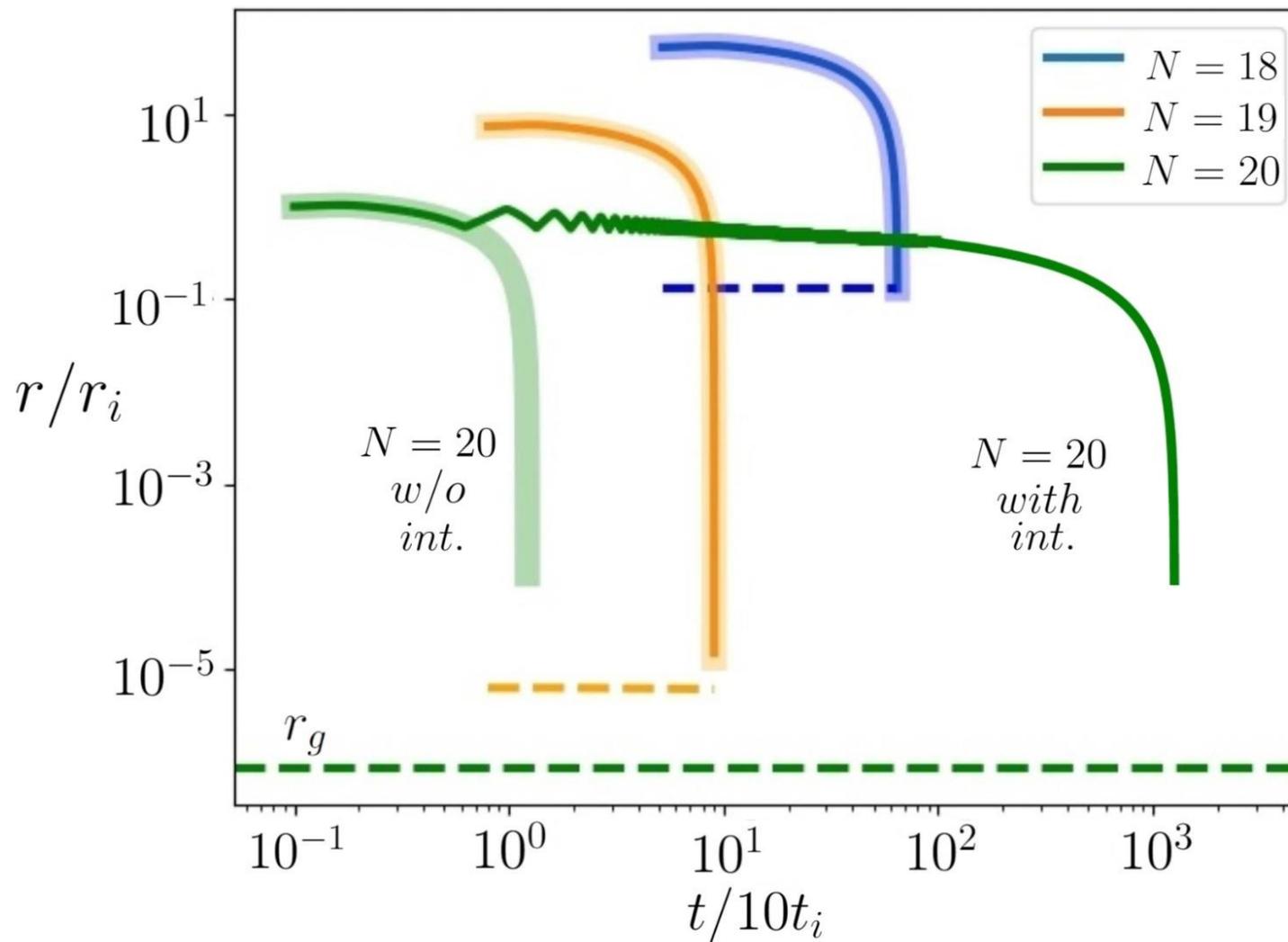
# Образование стенки на стадии инфляции

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

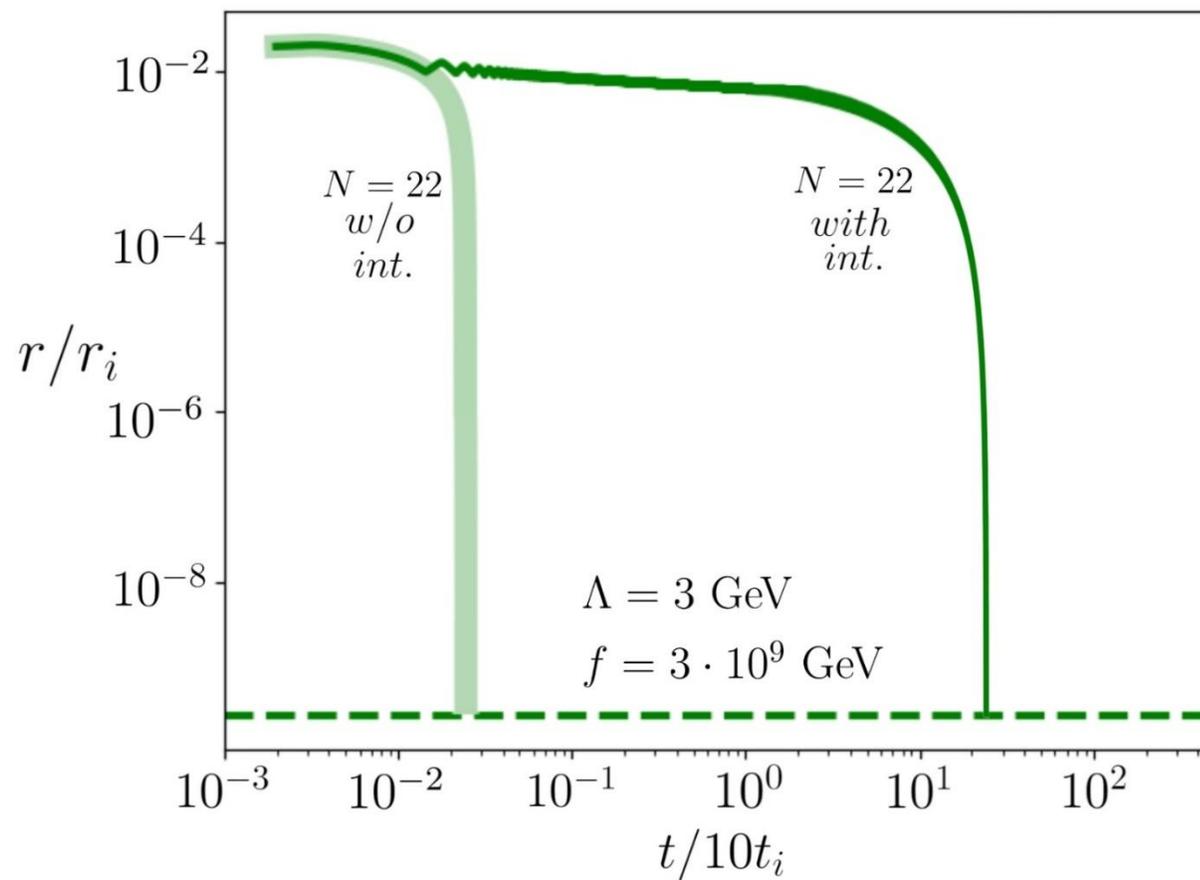
$$\Lambda = 0.05 \text{ GeV}$$



# Численное решение



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



Изменение радиуса стенки для  $N=22$  е-фолда

## Формирование ДС

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

Лагранжиан комплексного скалярного поля  $\phi$

$$\mathcal{L}_{\text{wall}} = \partial_\mu \phi^* \partial^\mu \phi - \lambda \left( \phi^* \phi - \frac{f^2}{2} \right)^2 - \Lambda^4 (1 - \cos(\theta)) - \frac{1}{2}\alpha_0 (\phi + \phi^*) \varphi^2$$

Действительная и мнимая часть поля

$$\phi = \rho e^{i\theta} = \rho \cos \theta + i \rho \sin \theta = \Re \phi + i \Im \phi,$$

Лагранжиан скалярных частиц  $\varphi$

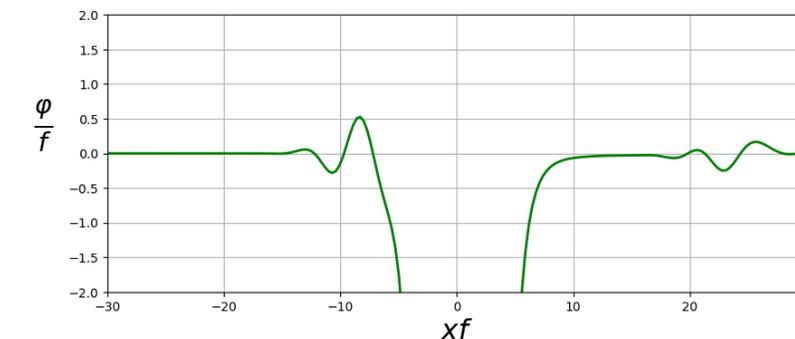
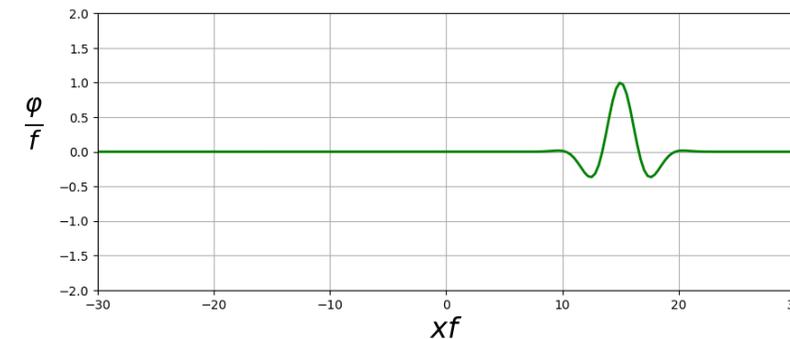
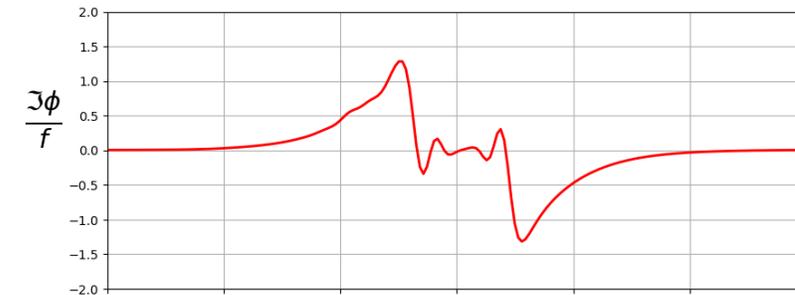
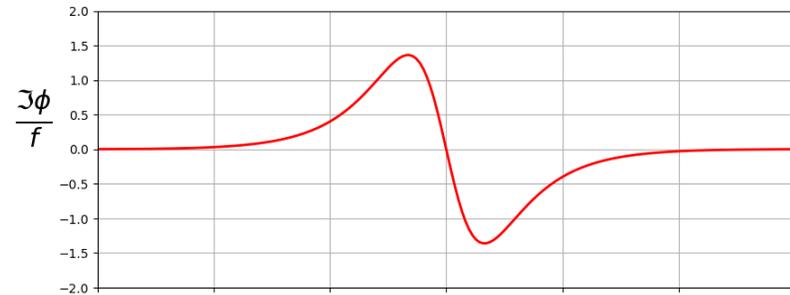
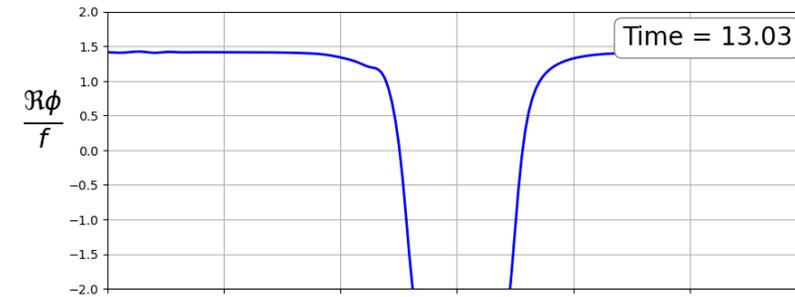
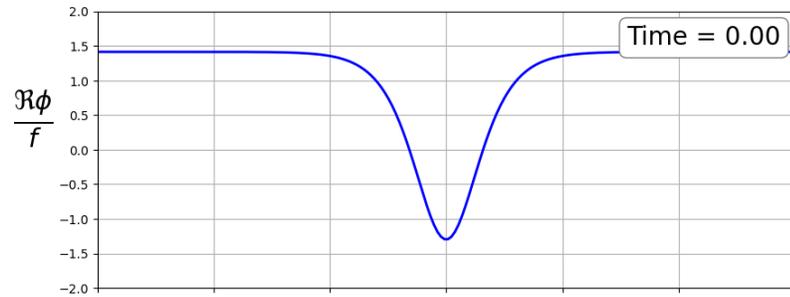
$$\mathcal{L}_{DM} = (\partial_\mu \varphi)^2 - \frac{1}{2}m^2 \varphi^2 - \frac{1}{2}\alpha_0 (\phi + \phi^*) \varphi^2$$

# Взаимодействие вида

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



$$\Lambda = 10^{13} \text{ GeV}, \quad f = 10^{13} \text{ GeV}, \quad \lambda = 2, \quad \alpha_0 = 1 \text{ GeV}, \quad H = 0$$

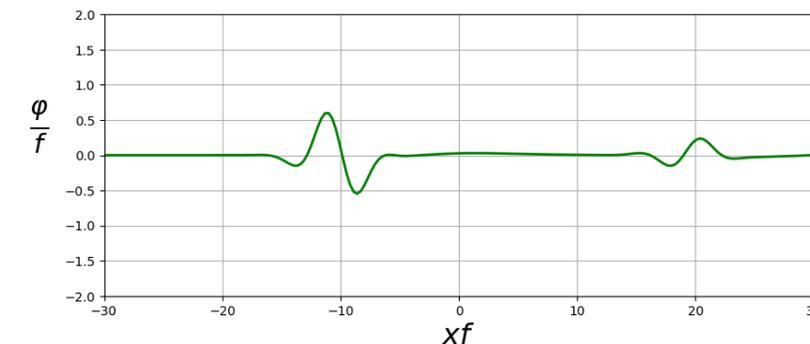
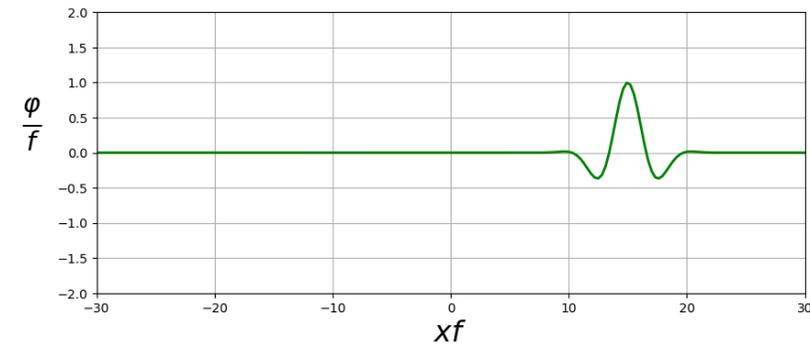
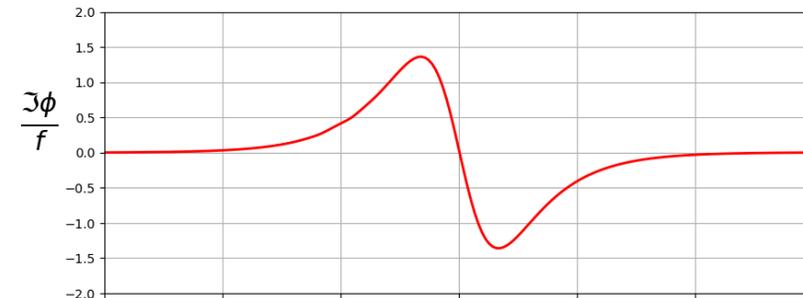
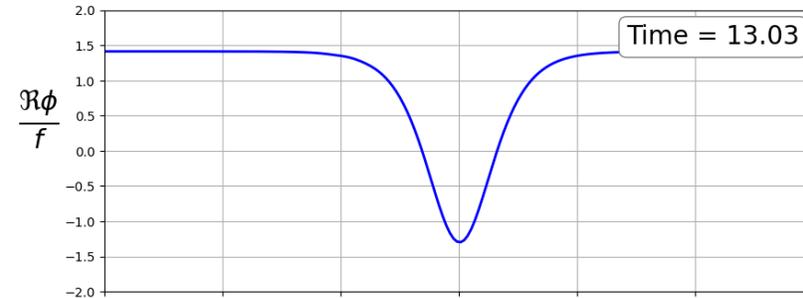
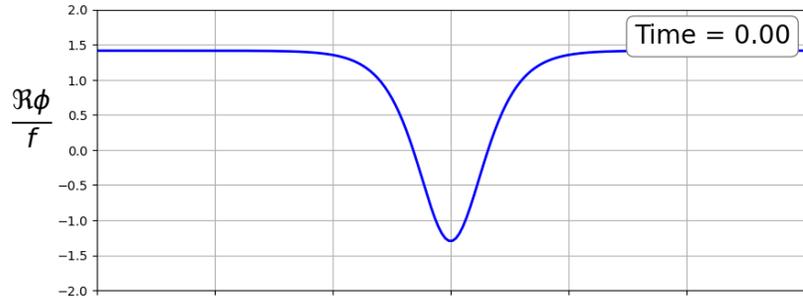


# Взаимодействие вида

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



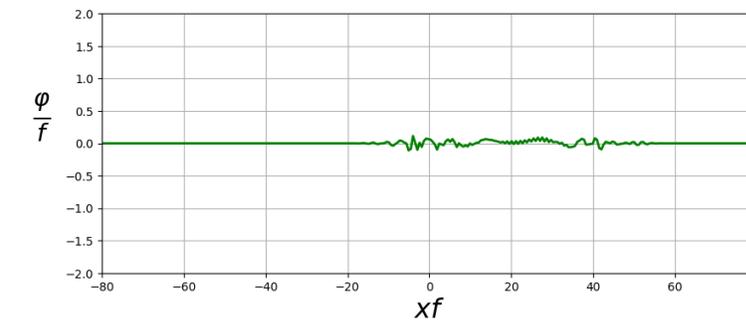
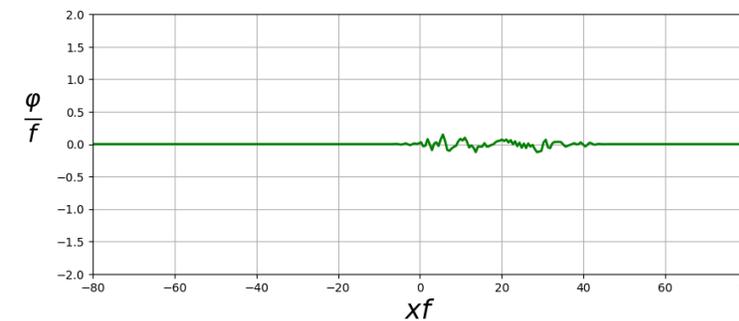
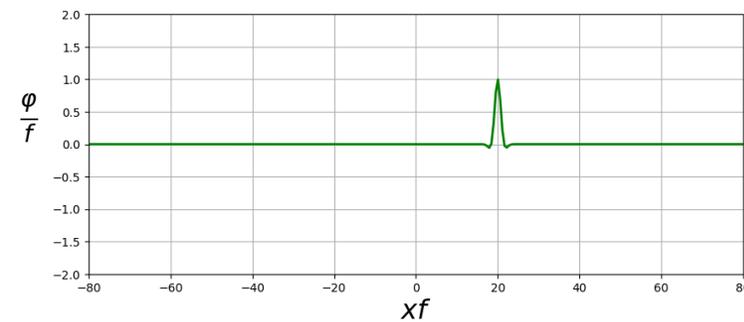
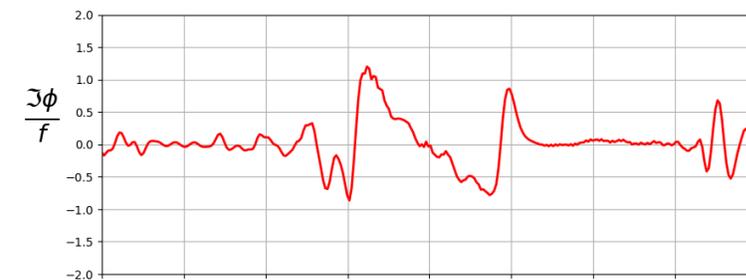
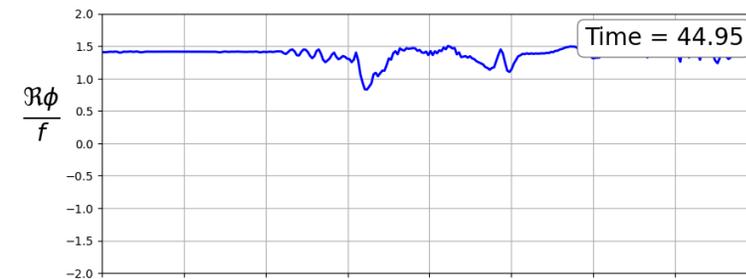
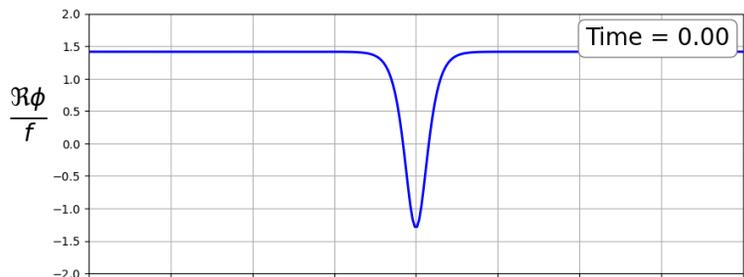
$\Lambda = 10^{13} \text{ GeV}, f = 10^{13} \text{ GeV}, \lambda = 2, \alpha_0 = 0.1 \text{ GeV}, H = 0$



# Взаимодействие вида

$$\mathcal{L}_{int} = \alpha_1 \varphi^2 \phi \phi^*$$

$$\Lambda = 10^{13} \text{ GeV}, \quad f = 10^{13} \text{ GeV}, \quad \lambda = 2, \quad \alpha_1 = 20, \quad H = 0$$

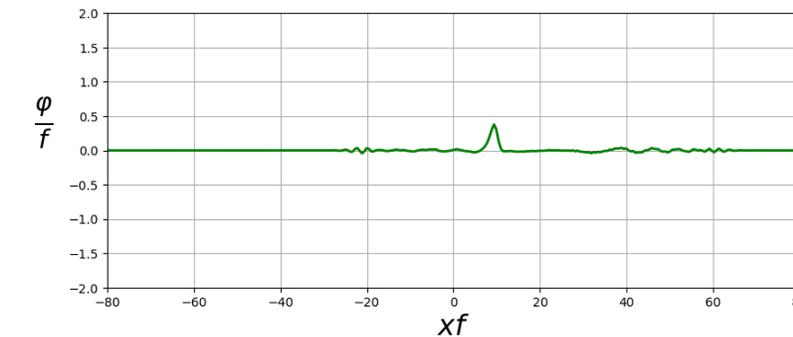
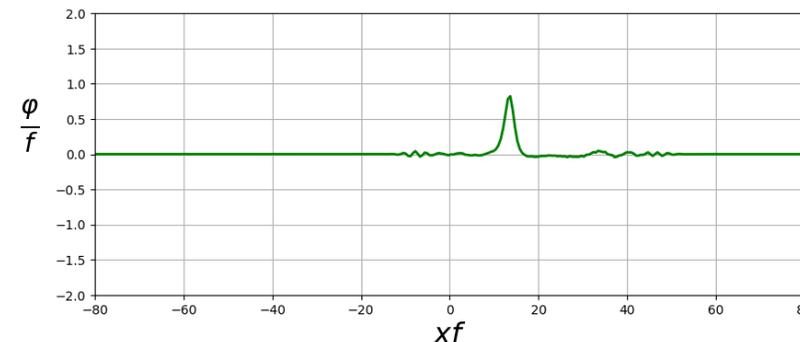
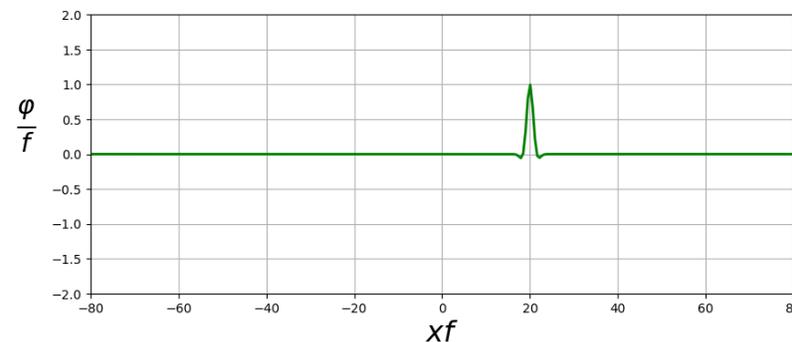
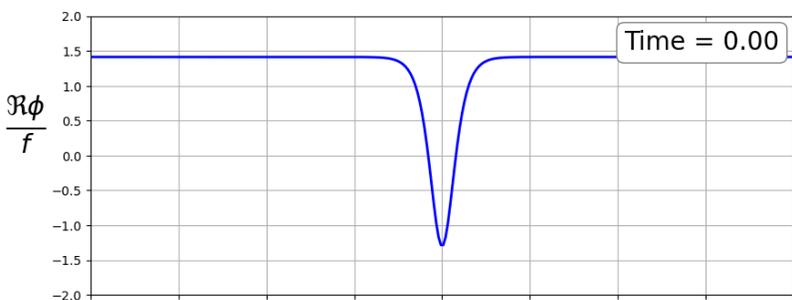


# Взаимодействие вида

$$\mathcal{L}_{int} = \alpha_1 \varphi^2 \phi \phi^*$$



$$\Lambda = 10^{13} \text{ GeV}, \quad f = 10^{13} \text{ GeV}, \quad \lambda = 2, \quad \alpha_1 = 10, \quad H = 0$$



- ❑ Изменение параметров модели может привести к замедленному формированию ПЧД.
- ❑ Взаимодействие скалярных частиц с ДС может приводит к нагреву частиц до пороговой температуры.
- ❑ Коллапс ДС может сопровождаться образованием гало скалярных частиц.
- ❑ Разрушение ДС при взаимодействии вида  $\alpha_0(\phi + \phi^*)\phi^2$  происходит когда амплитуда скалярных частиц  $\phi$  и константа взаимодействия  $\alpha_0 \geq f = 10^{13}$  ГэВ.
- ❑ Разрушение ДС при взаимодействии вида  $\alpha_1 \phi^2 \phi \phi^*$  происходит когда амплитуда скалярных частиц  $\phi \geq f$  и константа взаимодействия  $\alpha_1 \geq 20$ .



**МИФИ**

Национальный  
исследовательский  
ядерный университет

**Спасибо за внимание!**



**МИФИ**

Национальный  
исследовательский  
ядерный университет

**Дополнительные слайды**

$$\mathcal{L}_{wall} = \partial_\mu \phi^* \partial^\mu \phi - \lambda \left( \phi^* \phi - \frac{f^2}{2} \right)^2 - \Lambda^4 (1 - \cos(\theta)) - \frac{1}{2} \alpha_0 (\phi + \phi^*) \varphi^2$$

$$\mathcal{L}_{DM} = (\partial_\mu \varphi)^2 - \frac{1}{2} m^2 \varphi^2 - \frac{1}{2} \alpha_0 (\phi + \phi^*) \varphi^2$$

$$\begin{cases} \Re \phi_{tt} = \Re \phi_{xx} - 3H \Re \phi_t - 2\lambda \Re \phi \left( \Re \phi^2 + \Im \phi^2 - \frac{f^2}{2} \right) + \frac{\Lambda^4}{2} \frac{\Im \phi^2}{(\Re \phi^2 + \Im \phi^2)^{1.5}} - \frac{1}{2} \alpha_0 \varphi^2, \\ \Im \phi_{tt} = \Im \phi_{xx} - 3H \Im \phi_t - 2\lambda \Im \phi \left( \Re \phi^2 + \Im \phi^2 - \frac{f^2}{2} \right) - \frac{\Lambda^4}{2} \frac{\Im \phi \cdot \Re \phi}{(\Re \phi^2 + \Im \phi^2)^{1.5}}, \\ \varphi_{tt} = \varphi_{xx} - 3H \varphi_t - m^2 \varphi - 2\alpha_0 \varphi \Re \phi. \end{cases}$$

$$\mathcal{L}_{int} = \alpha_1 \varphi^2 \phi \phi^* \quad \begin{cases} \Re \phi_{tt} = \dots - \alpha_1 \varphi^2 \Re \phi, \\ \Im \phi_{tt} = \dots - \alpha_1 \varphi^2 \Im \phi, \\ \varphi_{tt} = \dots - 2\alpha_1 \varphi (\Re \phi^2 + \Im \phi^2). \end{cases}$$

# Начальные и граничные условия



$$\begin{cases} \Re\phi(t; +\infty) = \Re\phi(t; -\infty), \\ \Im\phi(t; +\infty) = \Im\phi(t; -\infty), \\ \Re\phi_x(t; +\infty) = \Re\phi_x(t; -\infty), \\ \Im\phi_x(t; +\infty) = \Im\phi_x(t; -\infty). \end{cases}$$

$$\begin{cases} \Re\phi(x; 0) = \frac{\sqrt{2}}{2} \cos\left(4 \arctan\left(\exp\left(x \frac{\Lambda^2}{f}\right)\right)\right), \\ \Im\phi(x; 0) = \frac{\sqrt{2}}{2} \sin\left(4 \arctan\left(\exp\left(x \frac{\Lambda^2}{f}\right)\right)\right), \\ \Re\phi_t(x; 0) = 0, \\ \Im\phi_t(x; 0) = 0. \end{cases}$$

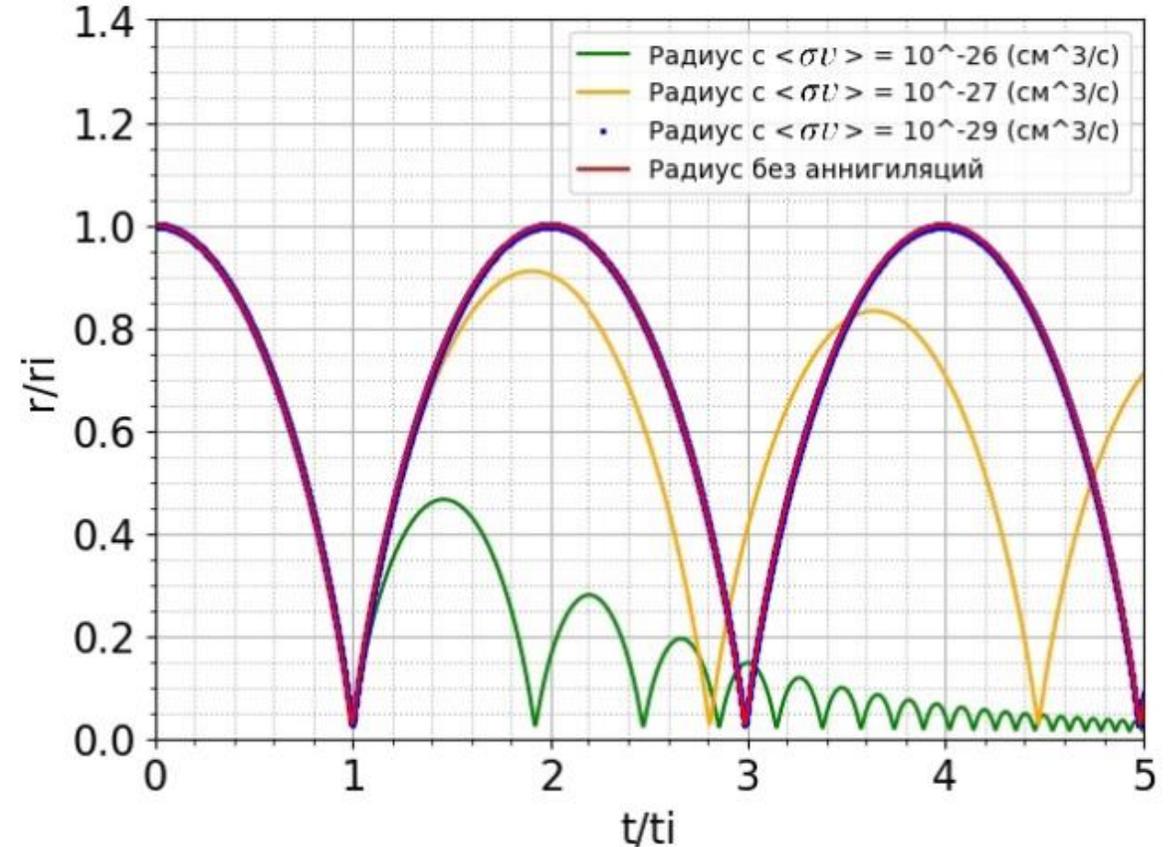
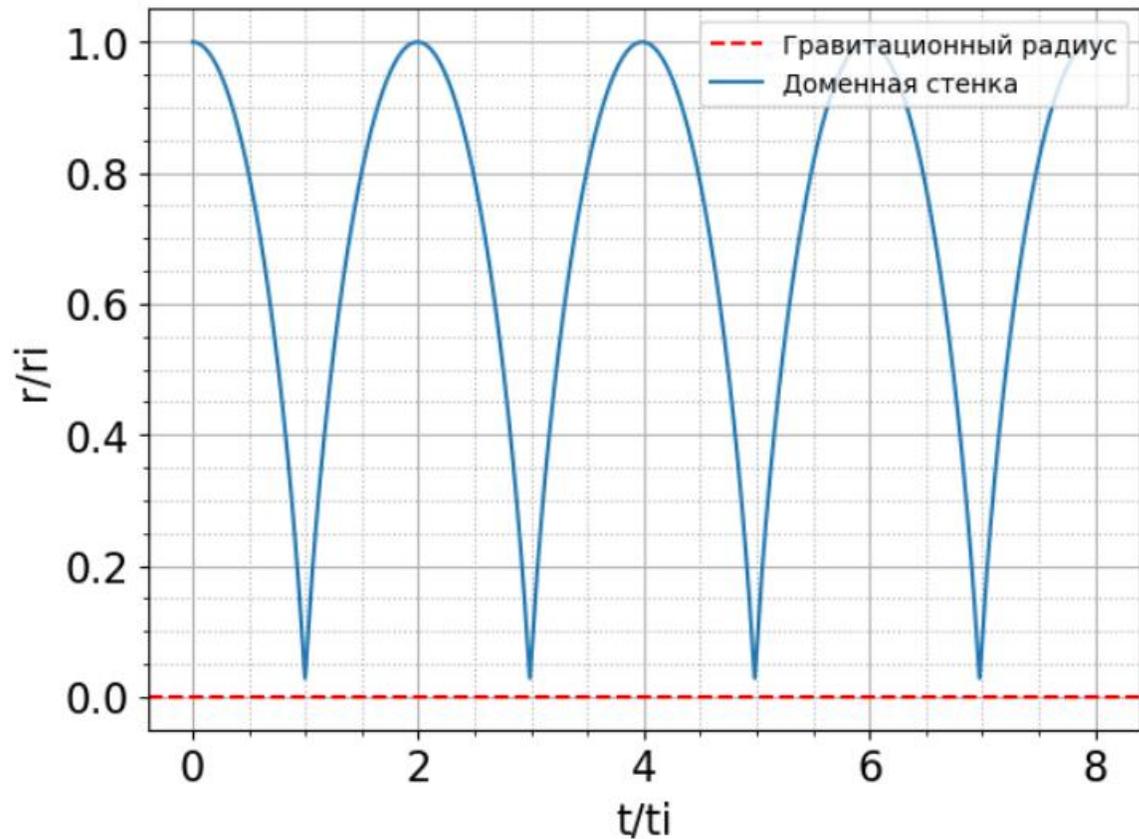
$$\begin{cases} \varphi_x(t; +\infty) = 0, \\ \varphi_x(t; -\infty) = 0. \end{cases}$$

$$\begin{cases} \varphi(x, 0) = A \cos(kx) \exp\left(-\frac{x^2}{2\sigma^2}\right) \\ \varphi_t(x, 0) = -A\omega \sin(kx) \exp\left(-\frac{x^2}{2\sigma^2}\right) + A\left(-\frac{xv}{\sigma^2}\right) \cos(kx) \exp\left(-\frac{x^2}{2\sigma^2}\right) \end{cases}$$

# Нерелятивистское уравнение движения



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



# Ограничение на номер е-фолда



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

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

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

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

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