



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:
к.ф.-м.н. Кириллов А.А.



Актуальность работы

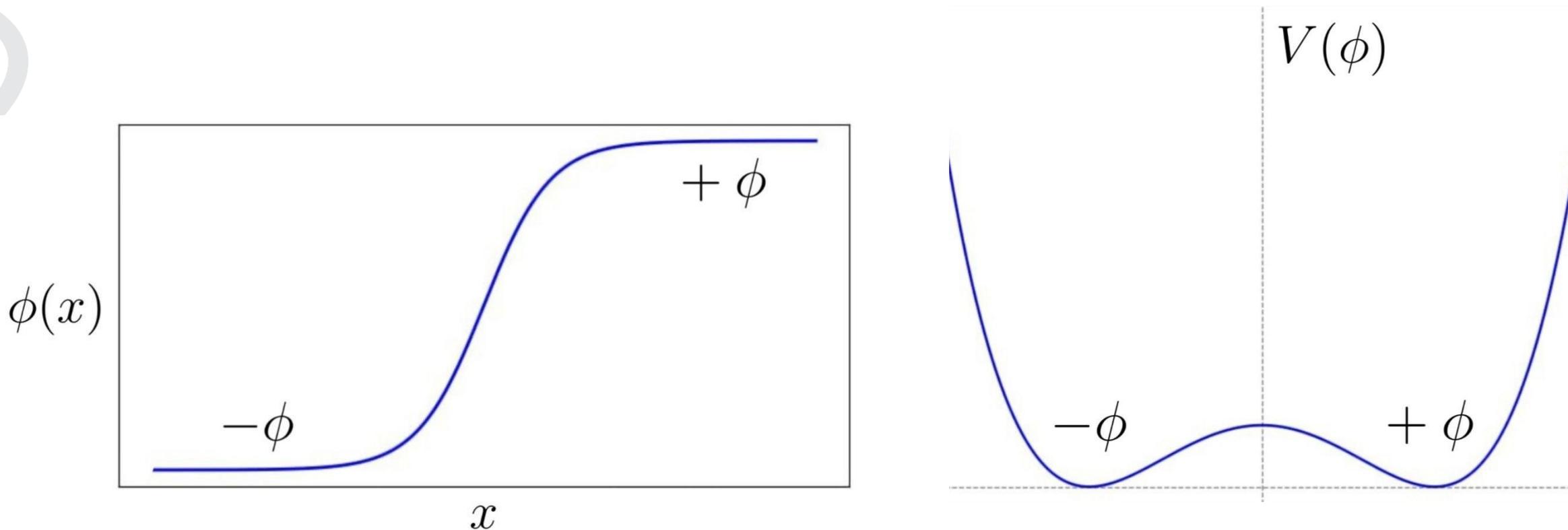
Первичные черные дыры (ПЧД) могут объяснить:

- ❑ происхождение квазаров при $z > 7$
(*Astrophys. J. Lett.* — Т. 823, № 2. — С. L25.);
- ❑ происхождение сверхмассивных черных дыр
(*Nat. Rev. Phys.* **3**, 732–743 — 2021);
- ❑ скрытую массу
(*Annu. Rev. Nucl. Part. Sci.* — 2020. — Т. 70, № 1).

Цель работы

Оценка влияния давления скалярных частиц, запертых внутри доменной стенки (ДС), на её эволюцию и формирование ПЧД.

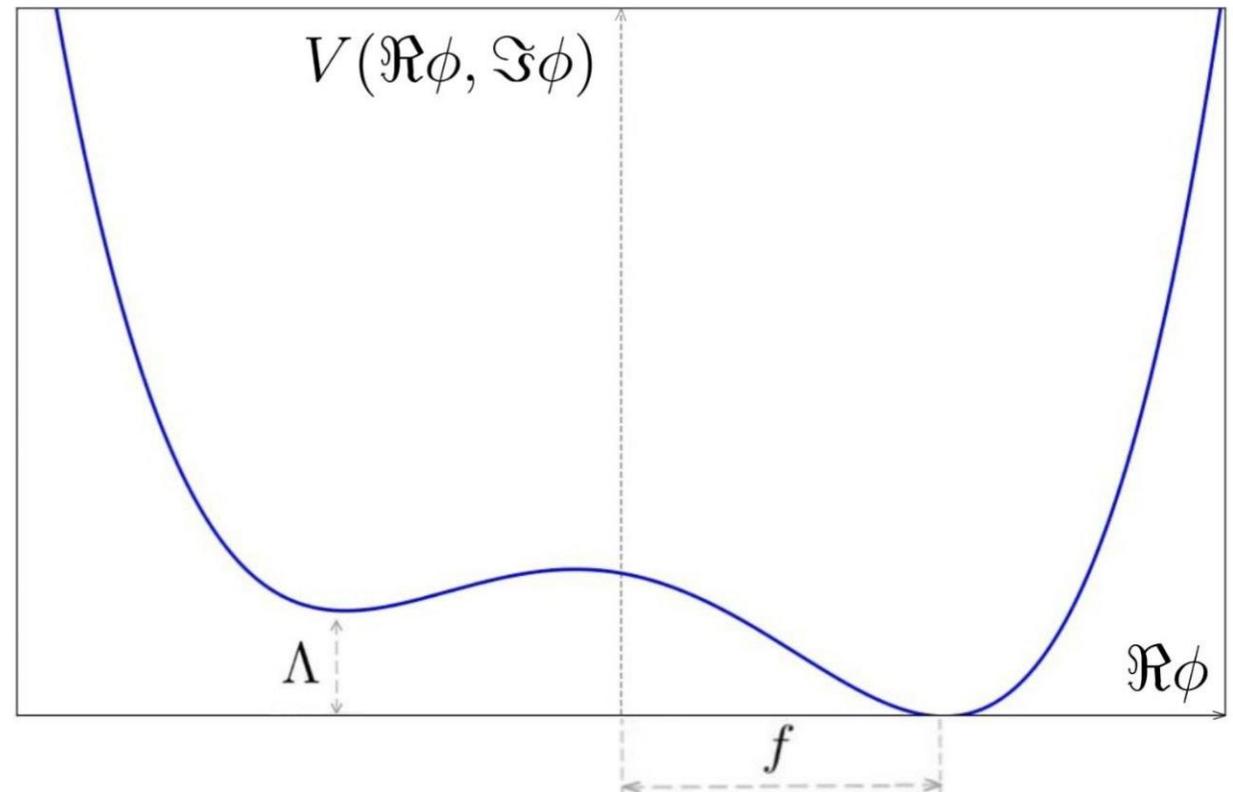
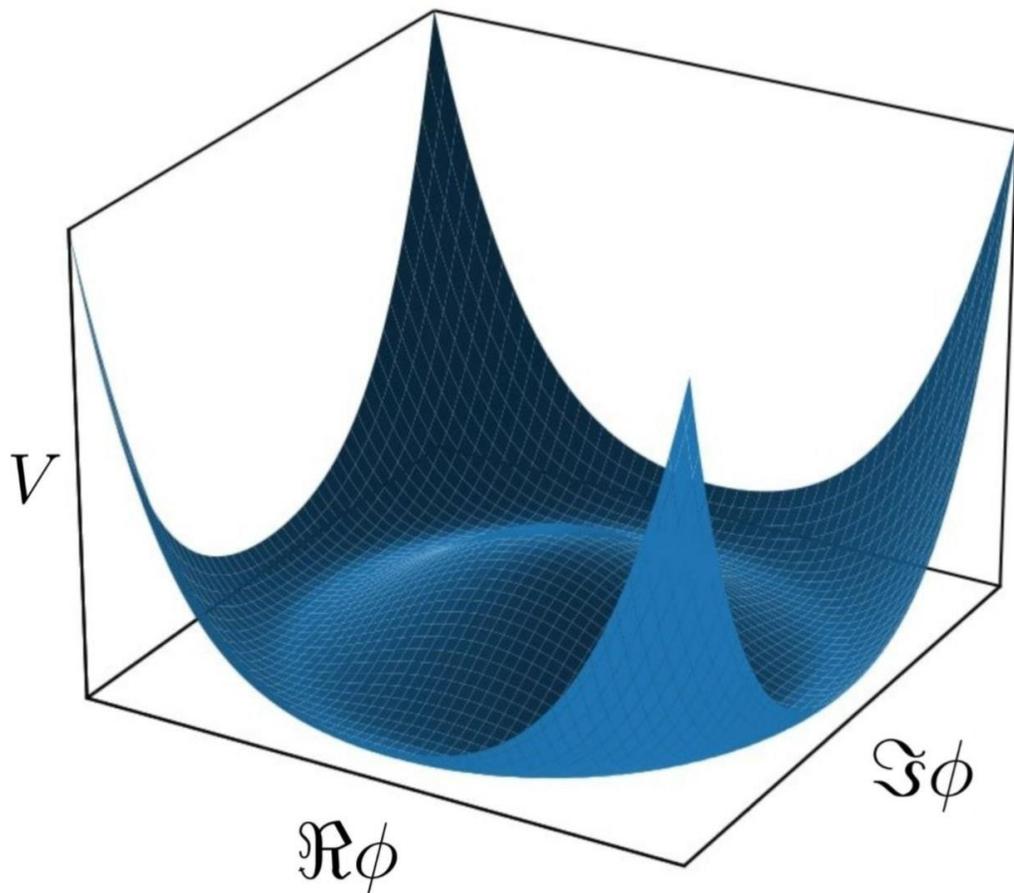
Что такое доменная стенка?



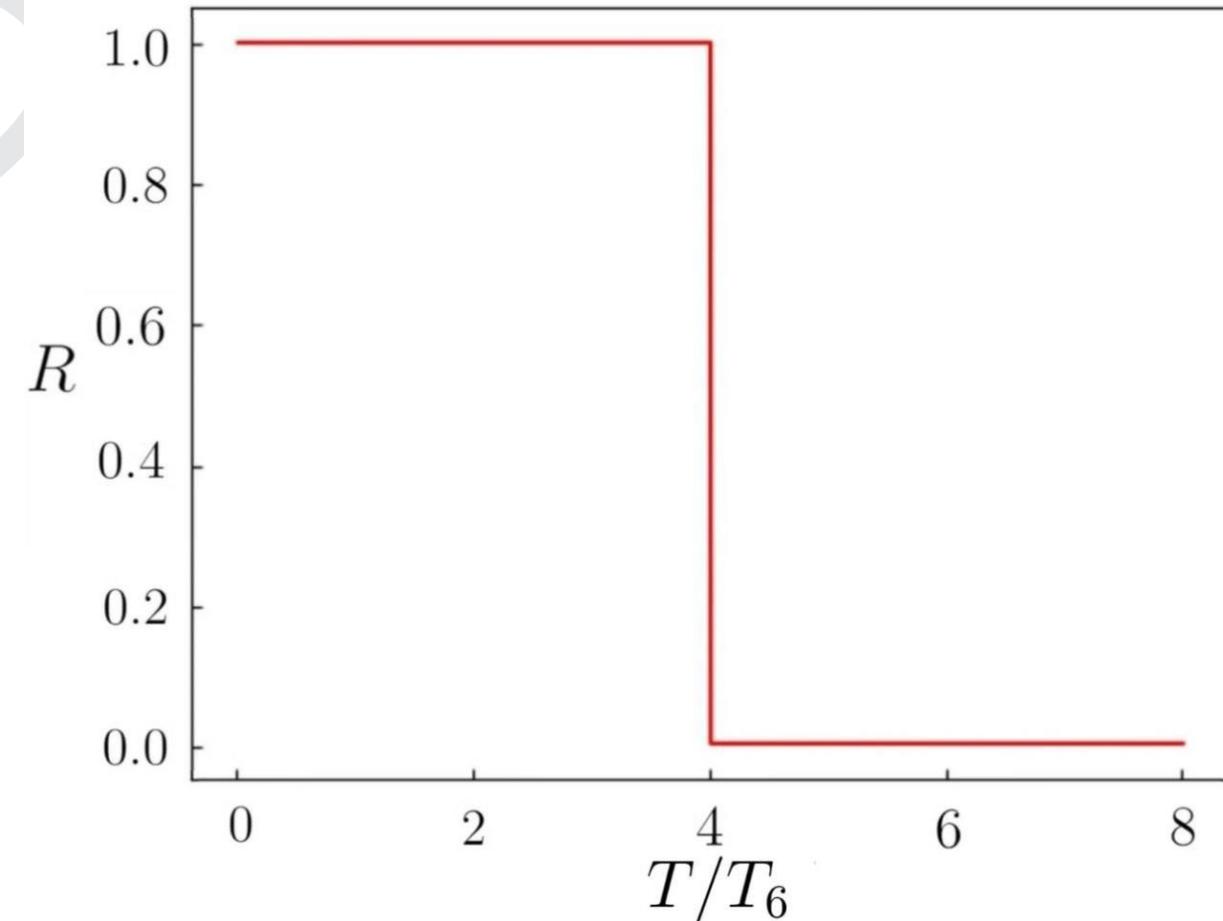
Доменная стенка — это ненулевая плотность энергии, разделяющая вакуумные состояния поля

Потенциал поля ДС

$$V = \frac{1}{4} \left(\phi^* \phi - \frac{f^2}{2} \right)^2 + \Lambda^4 (1 - \cos \theta)$$



Коэффициент отражения



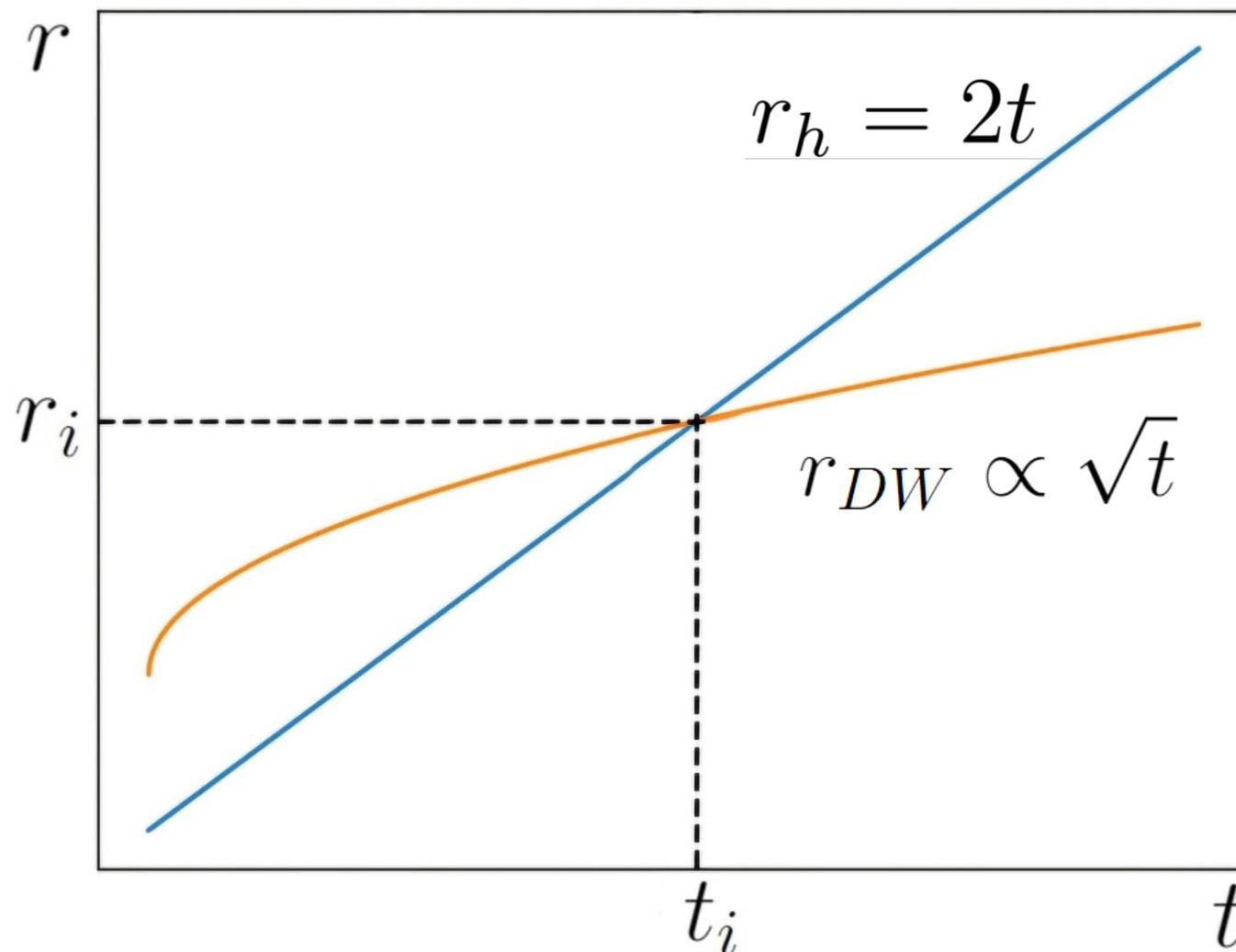
Предположение: поле частиц не влияет на формирование ДС

Пороговая температура:

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

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

Отцепление стенки от расширения Вселенной



Схематичное изображение эволюции горизонта и доменной стенки после завершения инфляции

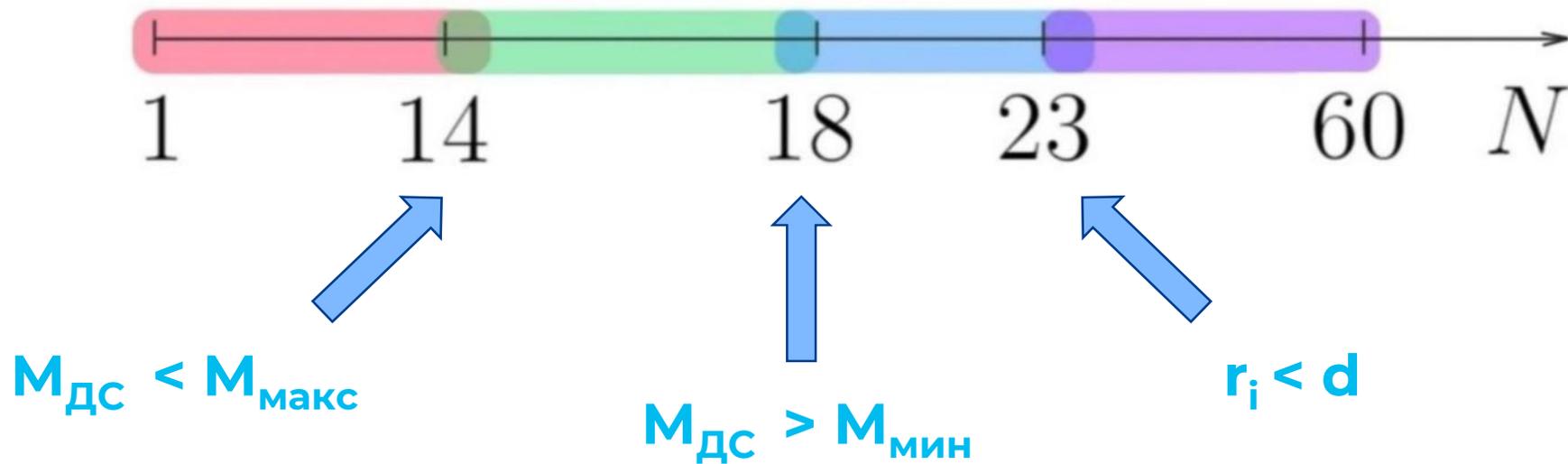
Релятивистское уравнение движения

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

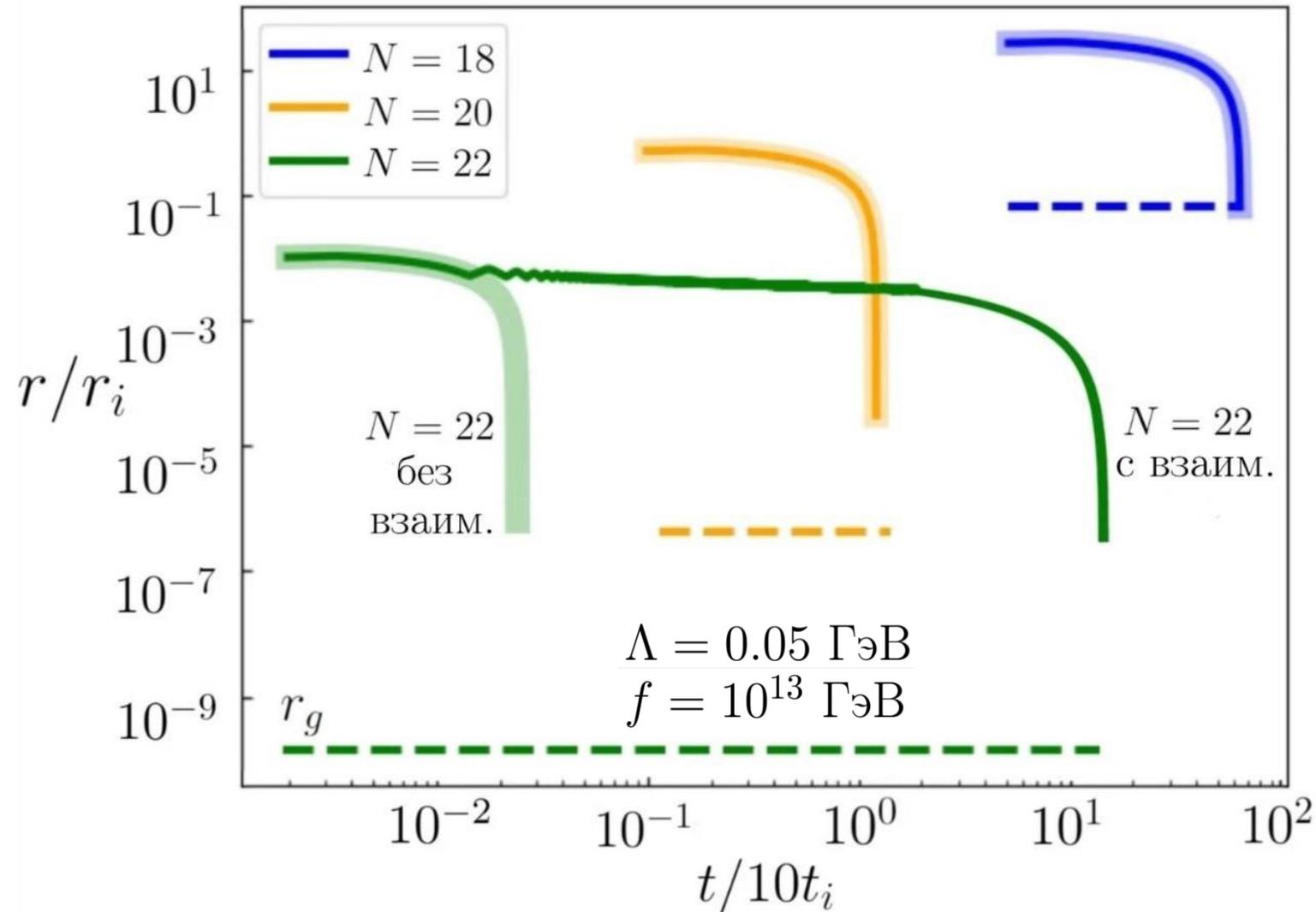
Образование стенки на стадии инфляции

$$f = H = 10^{13} \text{ ГэВ}$$

$$\Lambda = 0.05 \text{ ГэВ}$$

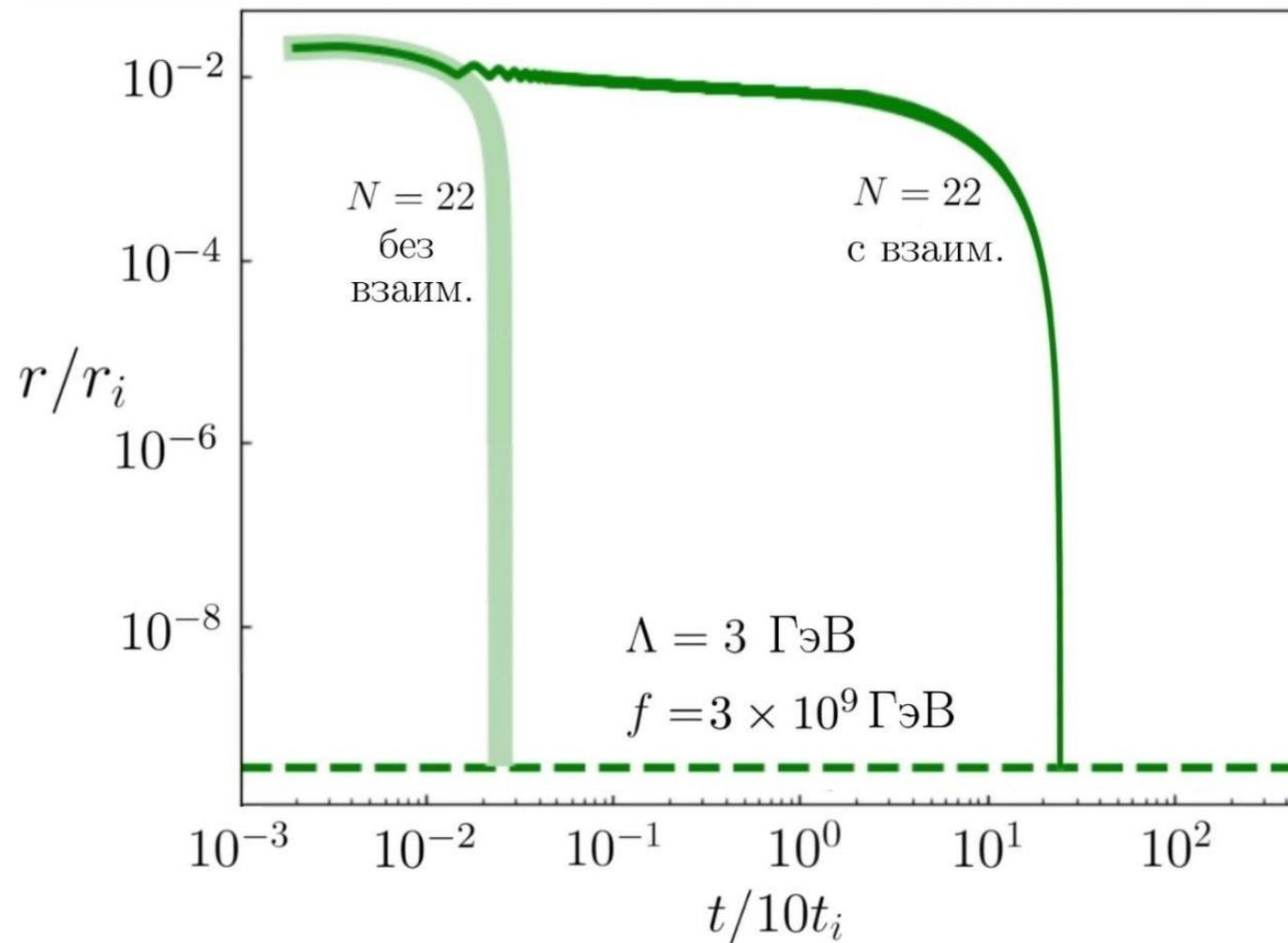


Эволюция доменной стенки



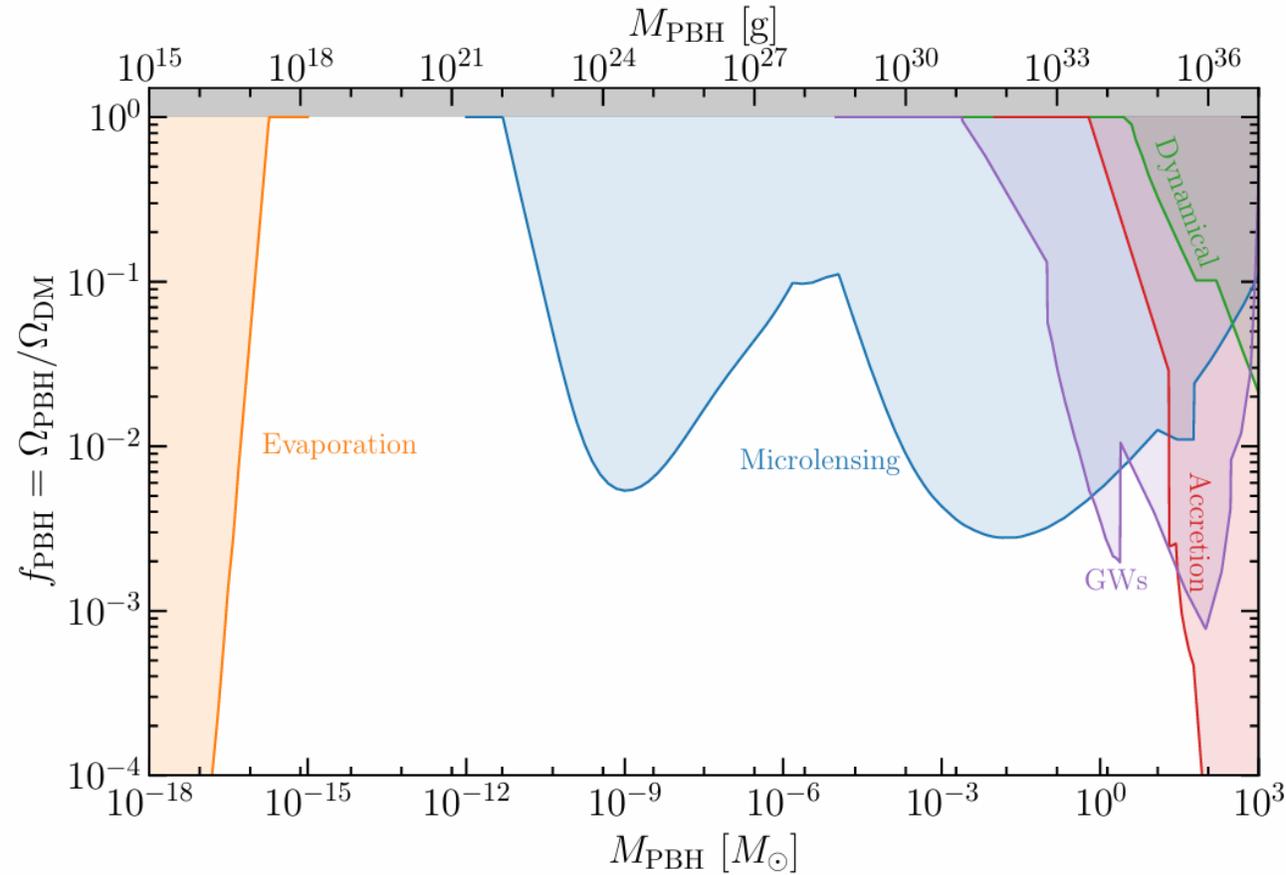
Изменение радиуса стенки для $N=18 \div 22$ e-фолда

Отложенное во времени формирование ПЧД

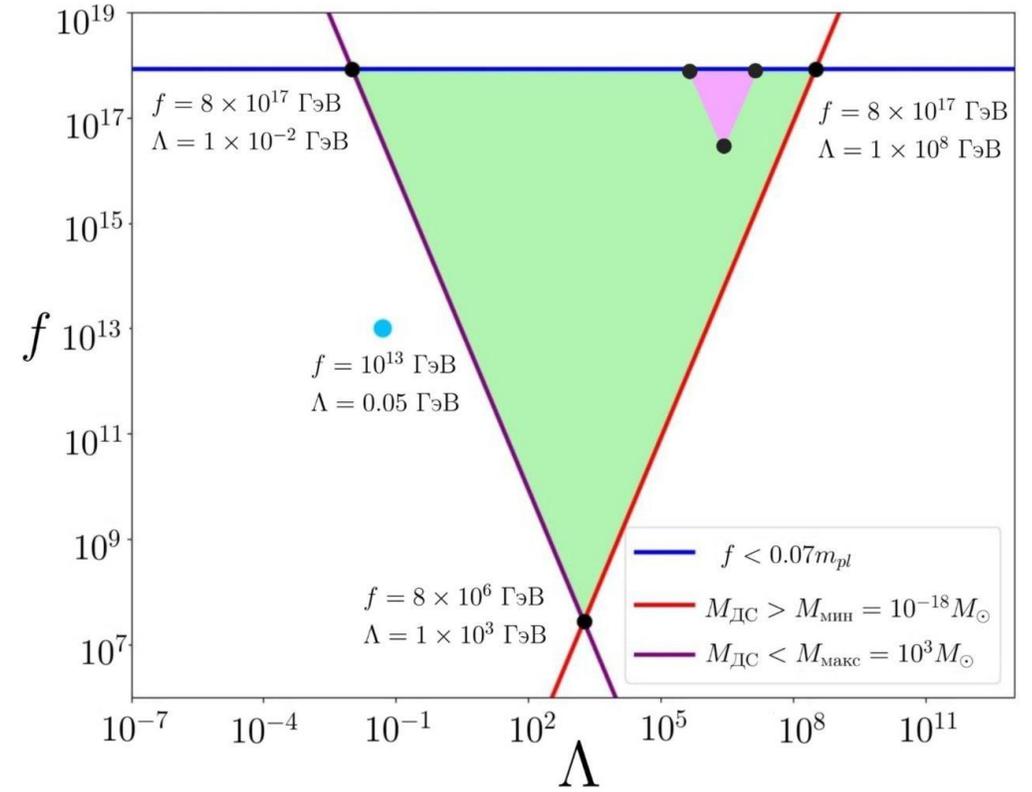


Изменение радиуса стенки для $N=22$ е-фолда

Ограничения на параметры модели



Наблюдательные ограничения на массы чёрных дыр, составляющих скрытую массу
(arXiv: 2406.05736)



Пространство параметров f , Λ , удовлетворяющих ограничениям на массы чёрных дыр, составляющих скрытую массу

Влияние скалярных частиц на формирование ДС

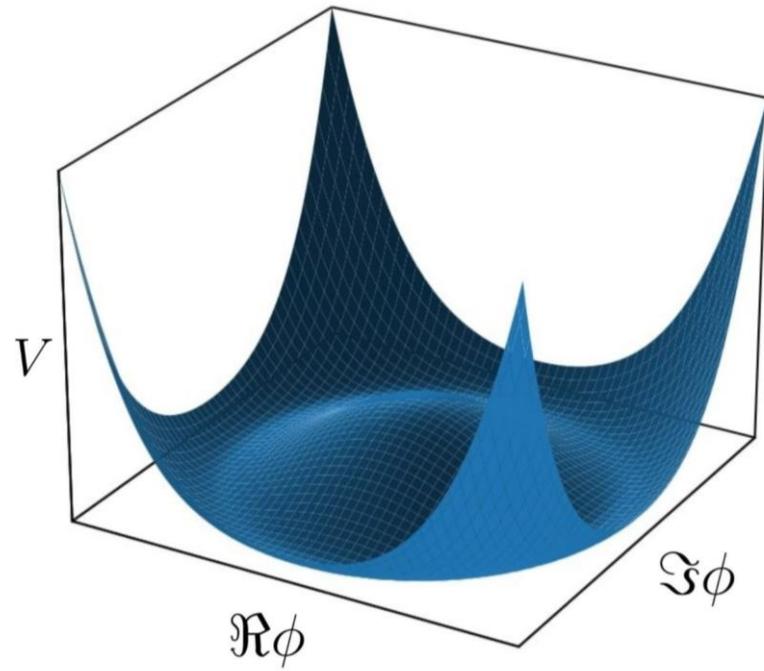
Взаимодействие вида $\mathcal{L}_{\text{взаим}} = \frac{1}{2}\alpha_0(\phi + \phi^*)\varphi^2$ и $\mathcal{L}_{\text{взаим}} = \alpha_1\phi\phi^*\varphi^2$

Лагранжиан комплексного скалярного поля стенки ϕ

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

Действительная и мнимая часть поля ϕ

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

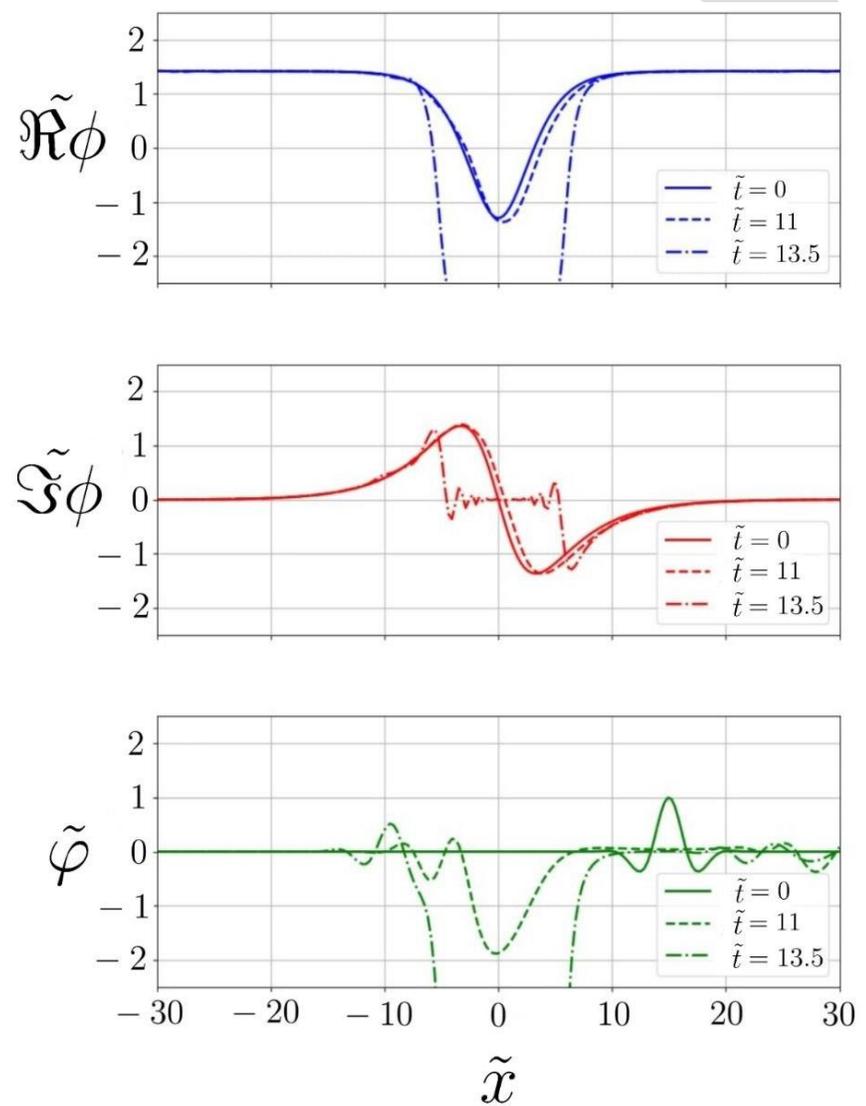
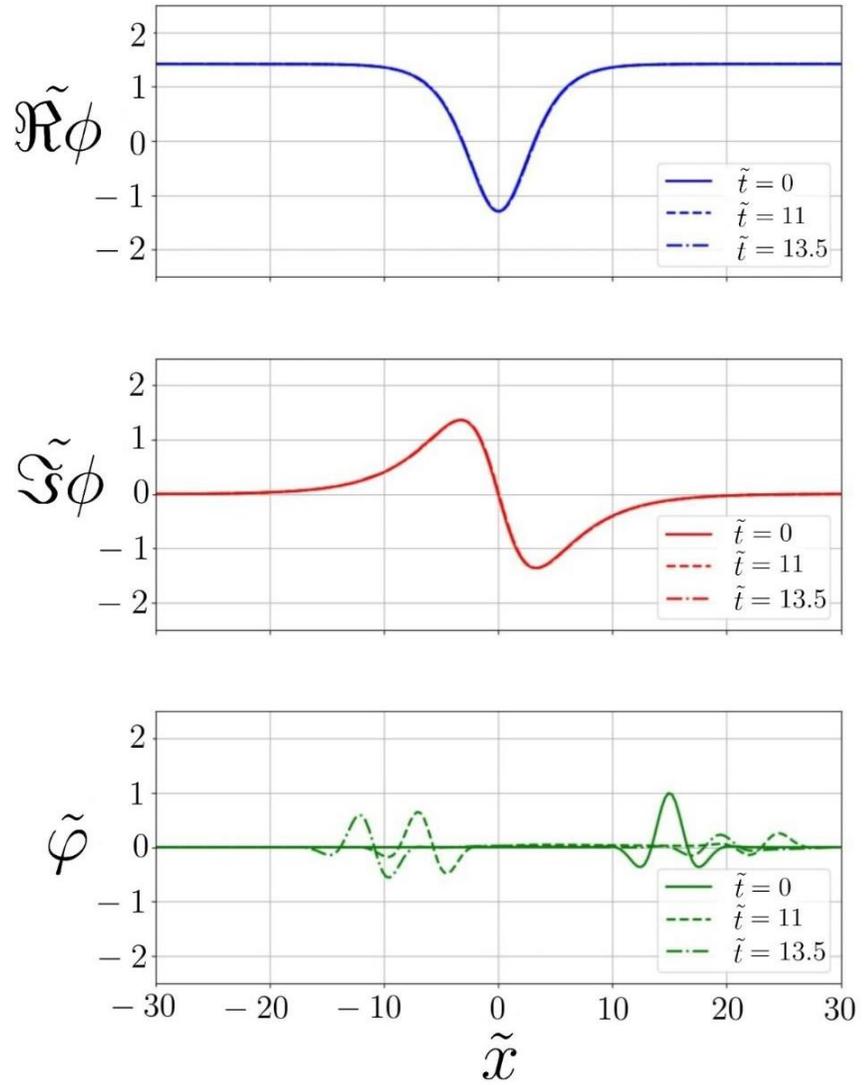


Лагранжиан скалярных частиц φ (CDM)

$$\mathcal{L}_{\text{CDM}} = (\partial_\mu\varphi)^2 - \frac{1}{2}m^2\varphi^2 - \mathcal{L}_{\text{взаим}}$$

Взаимодействие вида

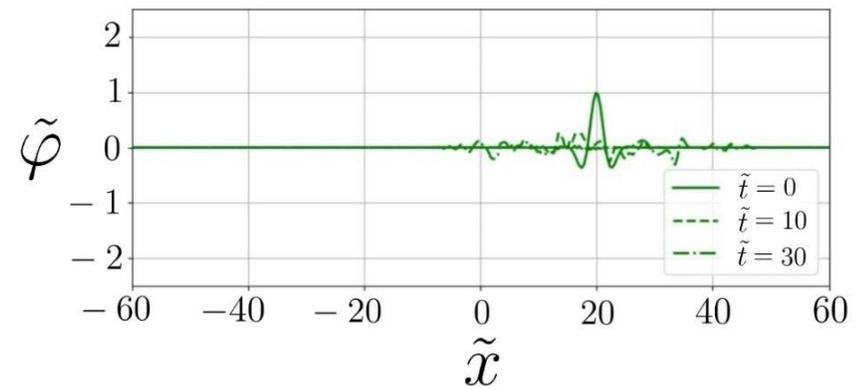
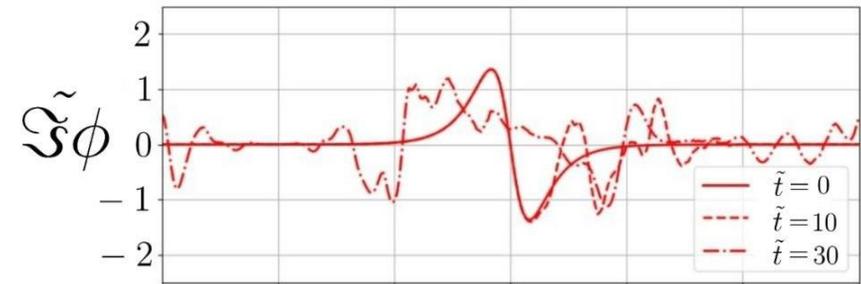
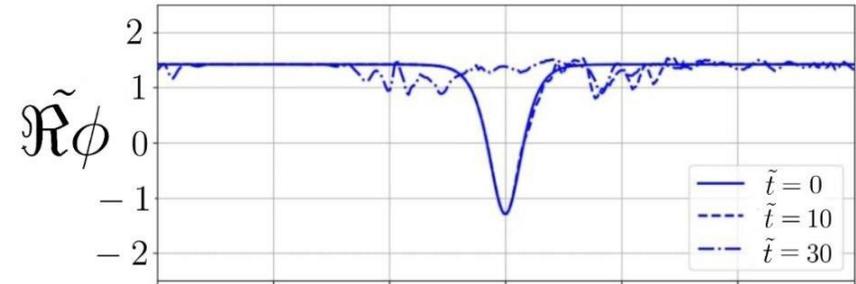
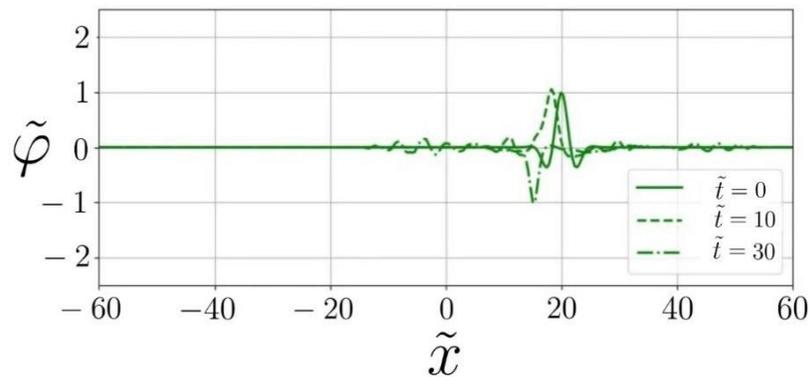
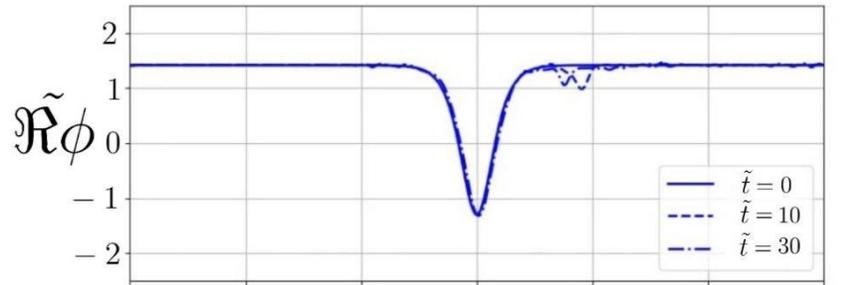
$$\mathcal{L}_{\text{взаим}} = \frac{1}{2} \alpha_0 (\phi + \phi^*) \varphi^2$$



ДС не разрушается при $\alpha_0 = 10^{12}$ ГэВ

ДС разрушается при $\alpha_0 = 10^{13}$ ГэВ

Взаимодействие вида $\mathcal{L}_{\text{взаим}} = \alpha_1 \phi \phi^* \varphi^2$



ДС не разрушается при $\alpha_1 = 10$

ДС разрушается при $\alpha_1 = 20$

- ❑ Изменение параметров модели может привести к временной задержке формирования ПЧД.
- ❑ Взаимодействие скалярных частиц с ДС может приводит к их запиранию внутри стенки.
- ❑ В процессе эволюции стенки частицы могут нагреваться до пороговой температуры и просачиваться сквозь стенку (и как следствие образовывать гало).
- ❑ Разрушение ДС при взаимодействии вида $\alpha_0(\phi + \phi^*)\phi^2$ происходит когда амплитуда скалярных частиц $\phi \geq f$ и константа взаимодействия $\alpha_0 \geq f$.
- ❑ Разрушение ДС при взаимодействии вида $\alpha_1\phi^2\phi\phi^*$ происходит когда амплитуда скалярных частиц $\phi \geq f$ и константа взаимодействия $\alpha_1 \geq 20$.
- ❑ При значениях $\alpha_0 \leq f$ и $\alpha_1 \leq 20$ можно пользоваться приближением, что поле скалярных частиц CDM не влияет на форму ДС.



МИФИ

Национальный
исследовательский
ядерный университет

Спасибо за внимание!

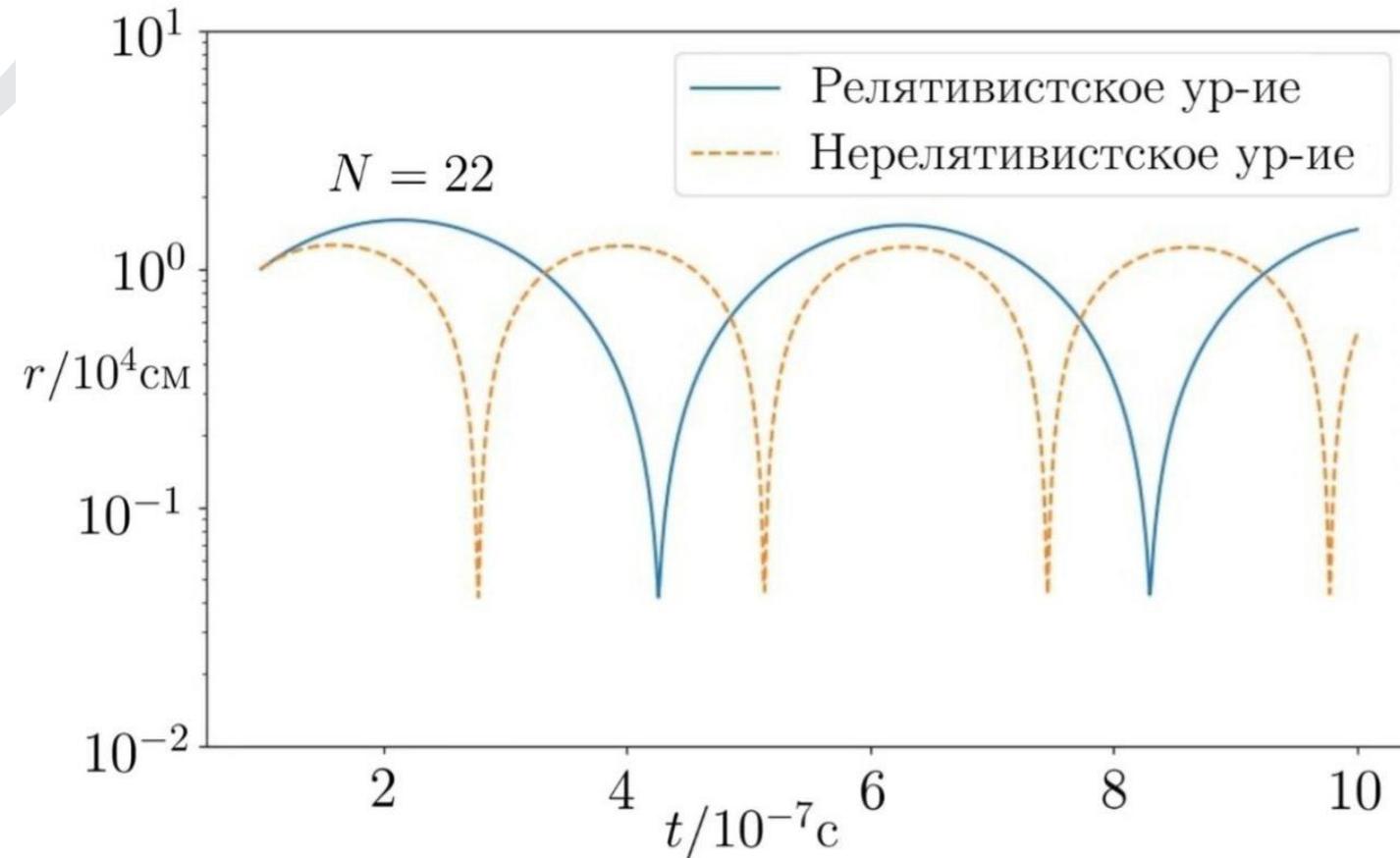


МИФИ

Национальный
исследовательский
ядерный университет

Дополнительные слайды

Сравнение ур-ий движения без аннигиляции частиц



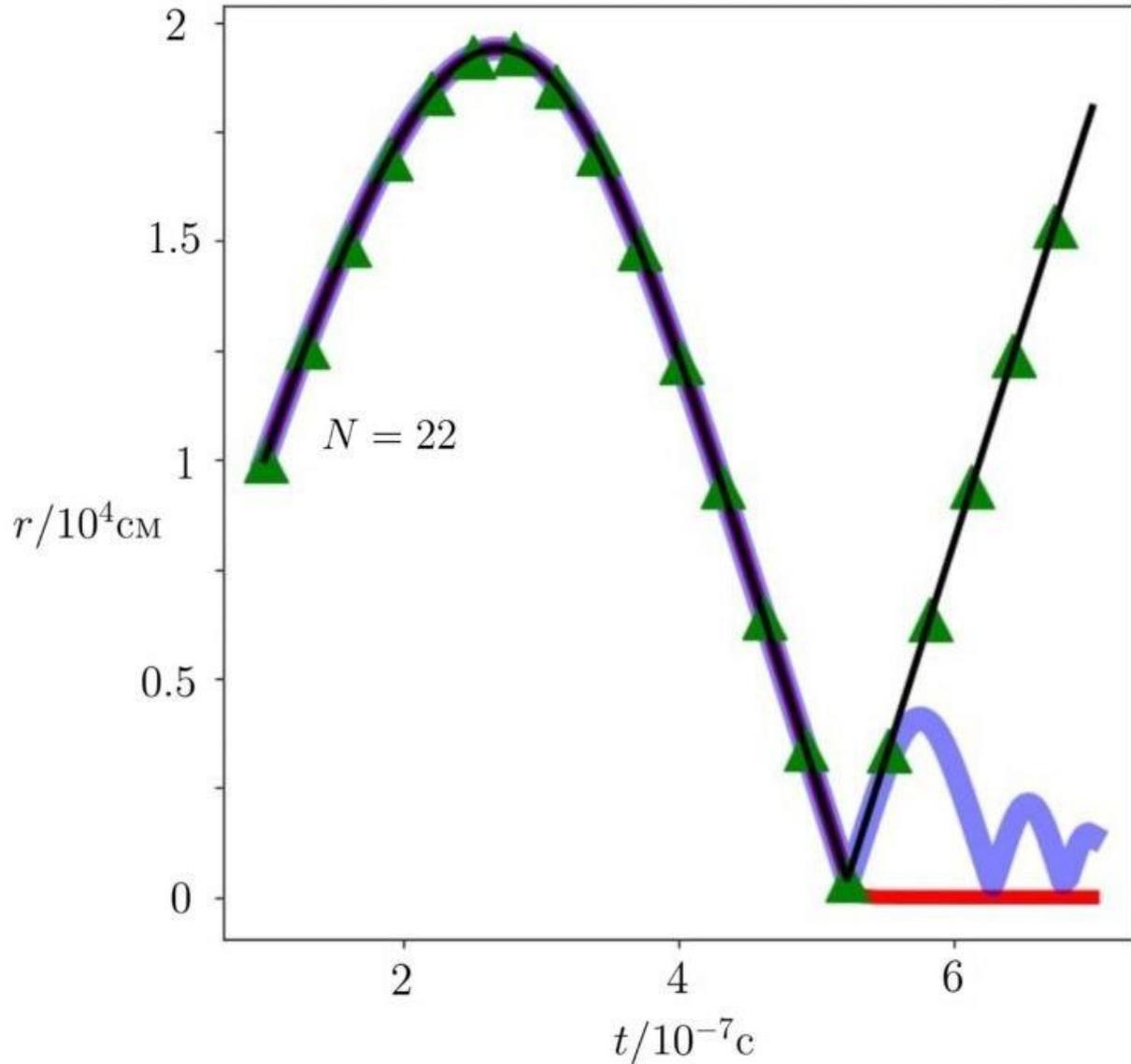
Нерелятивистское ур-ие

$$\dot{v}(t) = \frac{1}{\mu} n_2 T_2 - \frac{2\pi}{r(t)}$$

Релятивистское ур-ие

$$\dot{v}(t) = (1 - v^2(t)) \left(\frac{1}{\mu} n_2 T_2 - \frac{2\pi}{r(t)} \right)$$

Сравнение аннигиляции



- Сечение аннигиляции $\langle \sigma v \rangle = 10^{-23} \text{ см}^3/\text{с}$
- Сечение аннигиляции $\langle \sigma v \rangle = 10^{-26} \text{ см}^3/\text{с}$
- ▲ Сечение аннигиляции $\langle \sigma v \rangle = 10^{-29} \text{ см}^3/\text{с}$
- Сечение аннигиляции $\langle \sigma v \rangle = 0 \text{ см}^3/\text{с}$

$$\begin{cases} \dot{v}(t) &= (1 - v^2(t)) \left(\frac{1}{\sigma} (n_2(t)T_2(t) - n_1(t)T_1(t)) - \frac{2\pi}{r(t)} + 3H(t)v(t) \right) \\ \dot{T}_2(t) &= -2T_2(t) \frac{v(t)}{r(t)} \\ \dot{n}_2(t) &= -\frac{1}{2} \langle \sigma v \rangle n_2^2(t) - 3n_2(t) \frac{v(t)}{r(t)} \\ \dot{T}_1(t) &= -\frac{T_1(t)}{t} \\ \dot{n}_1(t) &= -\frac{1}{2} \langle \sigma v \rangle n_1^2(t) - \frac{3n_1(t)}{2t} \end{cases}$$

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

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

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

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

Начальные и граничные условия



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

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

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

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

Ограничение на номер е-фолда



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

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

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

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

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

Плотность энергии поля ДС

