



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

# **Взаимодействие первичного газа с доменными стенками в ранней Вселенной**

Выполнил аспирант группы A25-121:  
Филиппов Д.П.

Научный руководитель:  
к.ф.-м.н. Кириллов А.А.



# Актуальность работы

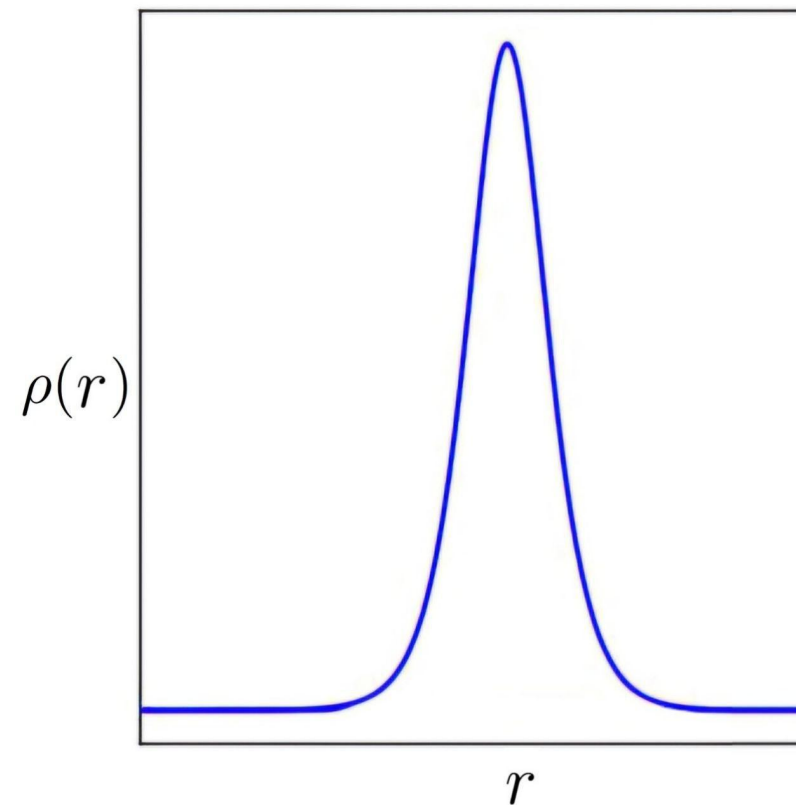
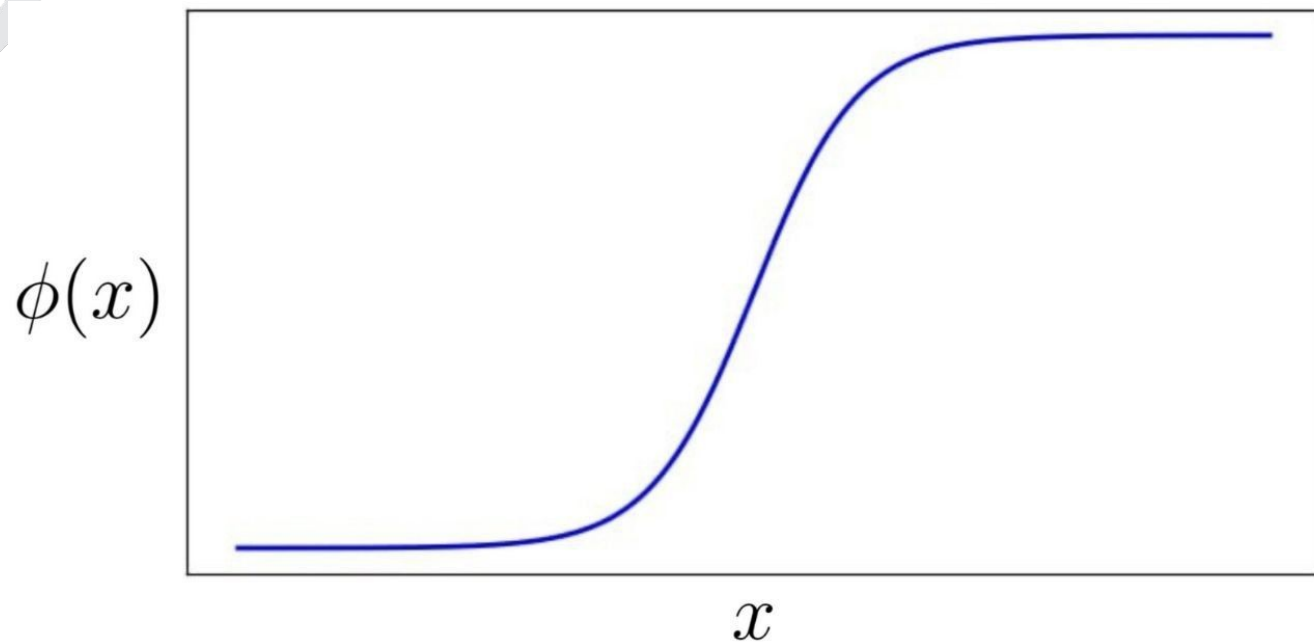
Первичные черные дыры (ПЧД) могут объяснить:

- ❑ происхождение квазаров при  $z > 6$ ;
- ❑ происхождение сверхмассивных черных дыр;
- ❑ скрытую массу.

## Цель работы

Оценка влияния плазмы частиц в постинфляционную эпоху на эволюцию доменных стенок (ДС) и формирование ПЧД.

# Что такое доменная стенка?



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

# Модель комплексного скалярного поля

## Потенциал

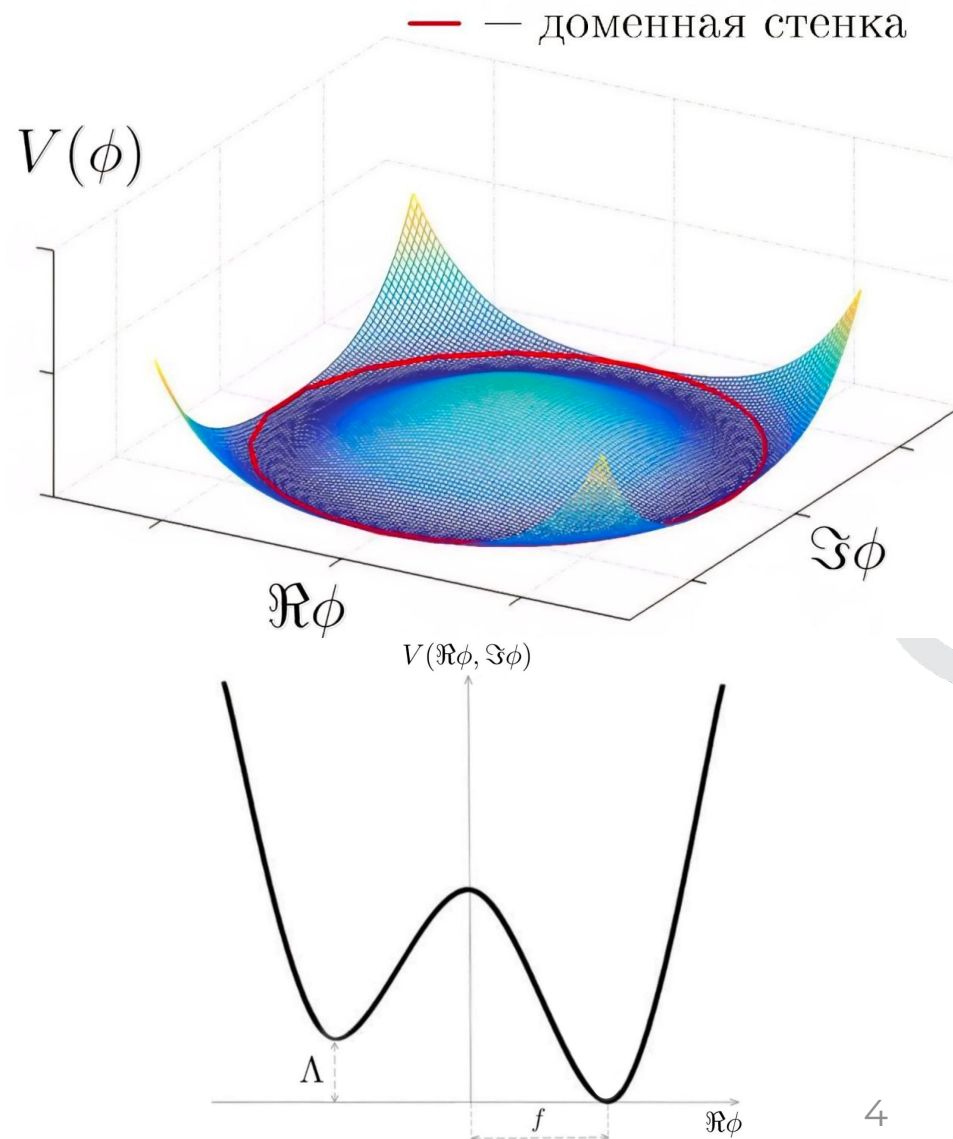
$$V = \frac{1}{4} \left( \phi^* \phi - \frac{f^2}{2} \right)^2 + \Lambda^4 (1 - \cos(\theta))$$

## Поле

$$\phi = \rho e^{i\theta}$$

## Решение стенки

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



# Взаимодействие с произвольным полем $\zeta$



## Взаимодействия с фазой поля

$$\mathcal{L} \supset \partial_\nu \theta \zeta \begin{cases} \partial_\nu \theta \bar{\psi} \gamma^5 \gamma^\nu \psi, \\ \partial_\nu \theta \varphi \partial^\nu \varphi. \end{cases}$$

создает барьер для частиц

$$\frac{\partial \mathcal{L}}{\partial \mu} = \partial_\nu \theta \sim \frac{\Lambda^2}{f} \frac{1}{\text{ch}(2x/d)}.$$

Высота барьера  $U_0 \sim \frac{\Lambda^2}{f}$

Стенки образуются при  $T \sim \Lambda$

Значение

$$f > 10^9 \text{ ГэВ}$$

## Юкавовское взаимодействие

$$\mathcal{L} \supset (\phi + \phi^*) \zeta,$$

создает барьер для частиц

$$\frac{\partial \mathcal{L}}{\partial \mu} = (\phi + \phi^*) \sim f \left( 1 - \frac{2}{\cosh^2(2x/d)} \right).$$

Высота барьера

$$U_0 \sim f$$

при  $x \rightarrow \pm\infty$

частицы приобретают массу  $\sim f$

# Модель с двумя действительными скалярными полями



$$V(\varphi, \chi) = \frac{m^2}{2}(\varphi^2 + \chi^2) + \Lambda^4 \exp \left[ -\frac{(\varphi - \varphi_0)^2 + (\chi - \chi_0)^2}{2\sigma^2} \right],$$

где  $\Lambda, \sigma, \varphi_0, \chi_0$  — параметры определяющие высоту, ширину и координаты пика.

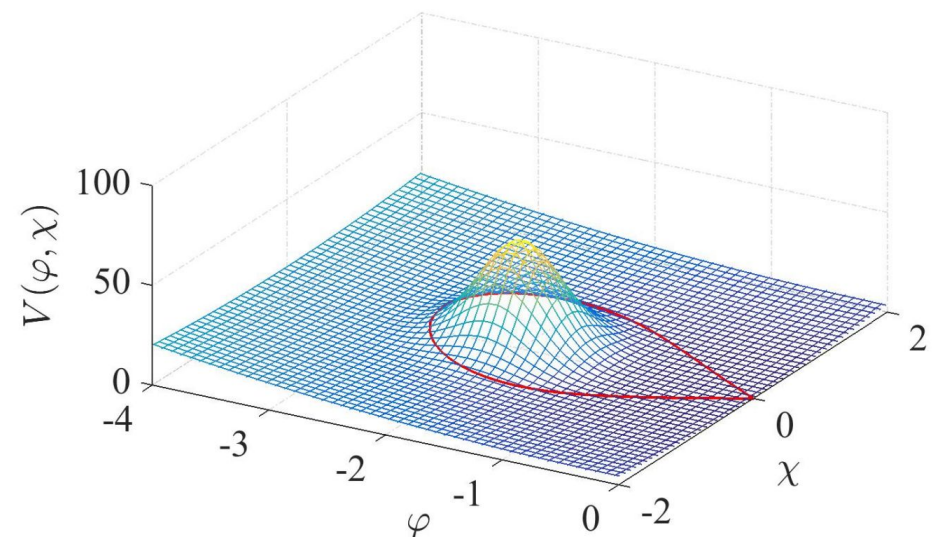
Юкавовское взаимодействие с полями

$$\mathcal{L} \supset (\varphi + \chi)\zeta,$$

где  $\zeta$  — произвольное поле частиц.

Высота потенциального барьера определяется координатами седловой точки

$$U_0 \propto (\varphi_s, \chi_s).$$



[Kirillov A. A., Murygin B. S., Nikulin V. V.,  
Phys. Lett. B - 2025, V.860.]

## В модели аксионоподобного поля:

- ❑ Взаимодействие с фазой поля способно запереть частицы внутри ДС, но его высота незначительна в сравнении с температурой плазмы после инфляции;
- ❑ Юкавовское взаимодействие полей способно запереть частицы внутри ДС, но даёт массу частицам;

## В модели двух действительных скалярных полей:

- ❑ Юкавовское взаимодействие полей способно запереть частицы внутри ДС, и не придаёт массу частицам, пока вакуум находится в 0.



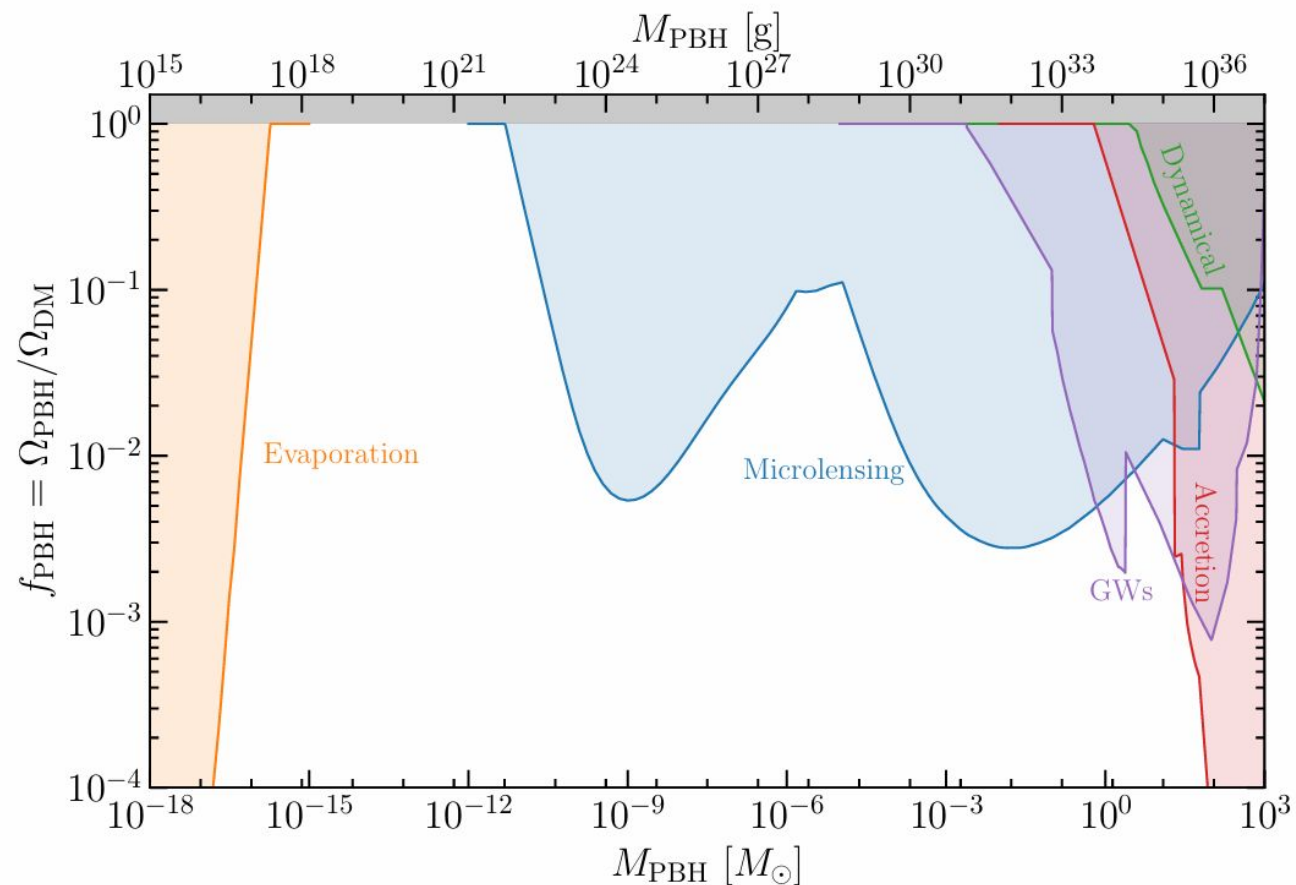
**Спасибо за внимание!**





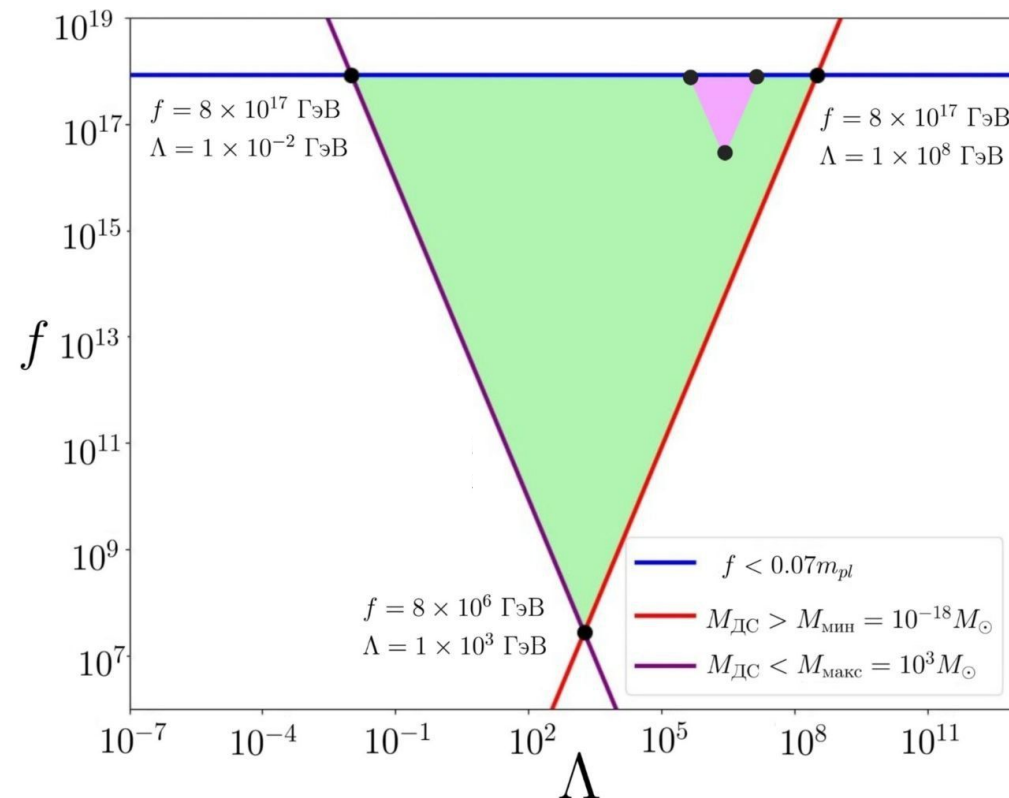
**Дополнительные слайды**

# Ограничения на параметры модели



Наблюдательные ограничения на массы чёрных дыр, составляющих скрытую массу

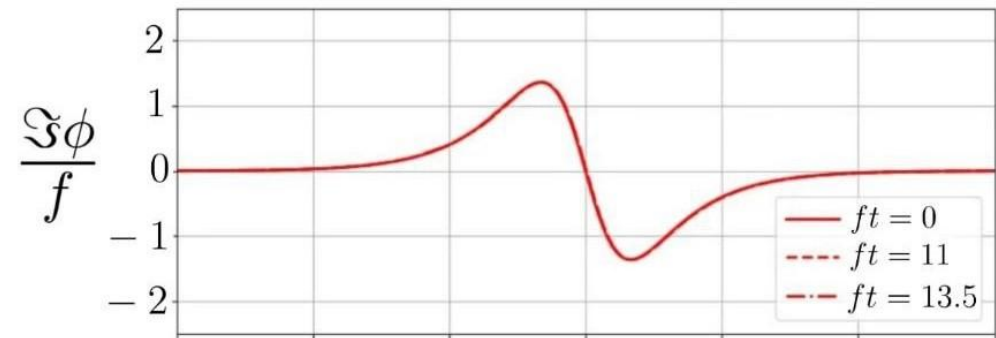
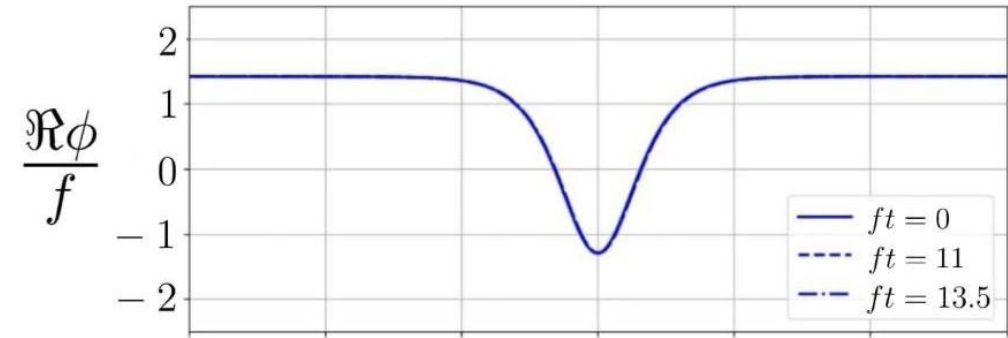
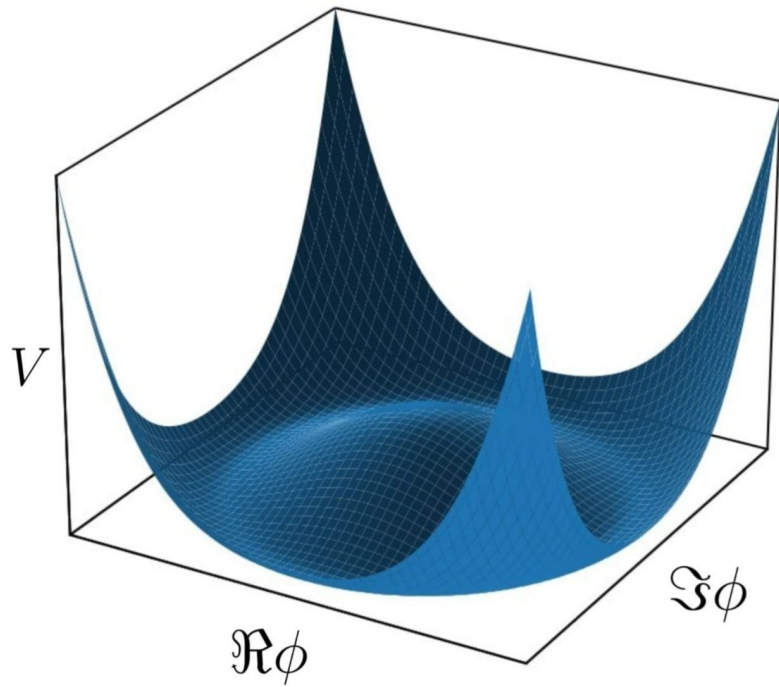
[Carr B. J., Green A. M. arXiv: 2406.05736]



Пространство параметров  $f$ ,  $\Lambda$ , удовлетворяющих ограничениям на массы чёрных дыр, составляющих скрытую массу

# Комплексное скалярное поле

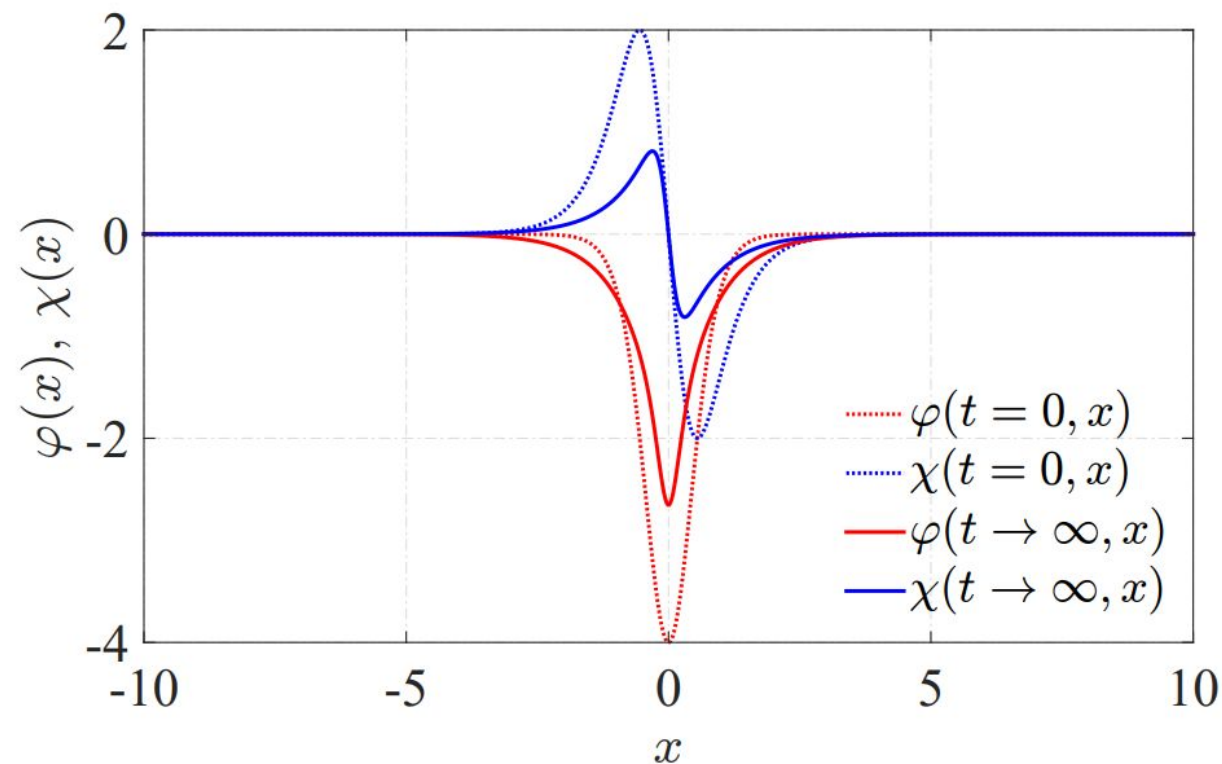
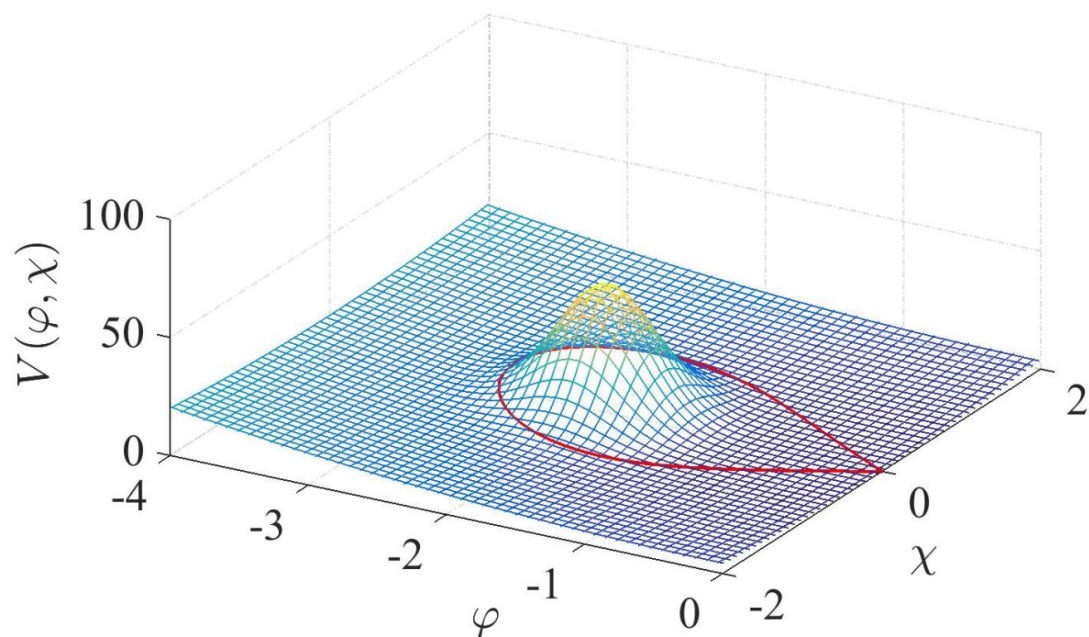
$$V = \frac{1}{4} \left( \phi^* \phi - \frac{f^2}{2} \right)^2 + \Lambda^4 (1 - \cos(\theta))$$



# Действительные скалярные поля



$$V(\varphi, \chi) = \frac{m^2}{2}(\varphi^2 + \chi^2) + \Lambda^4 \exp \left[ -\frac{(\varphi - \varphi_0)^2 + (\chi - \chi_0)^2}{2\sigma^2} \right],$$



[Gani V. A., Kirillov A. A., Rubin S. G.  
JCAP - 2018, №04.]

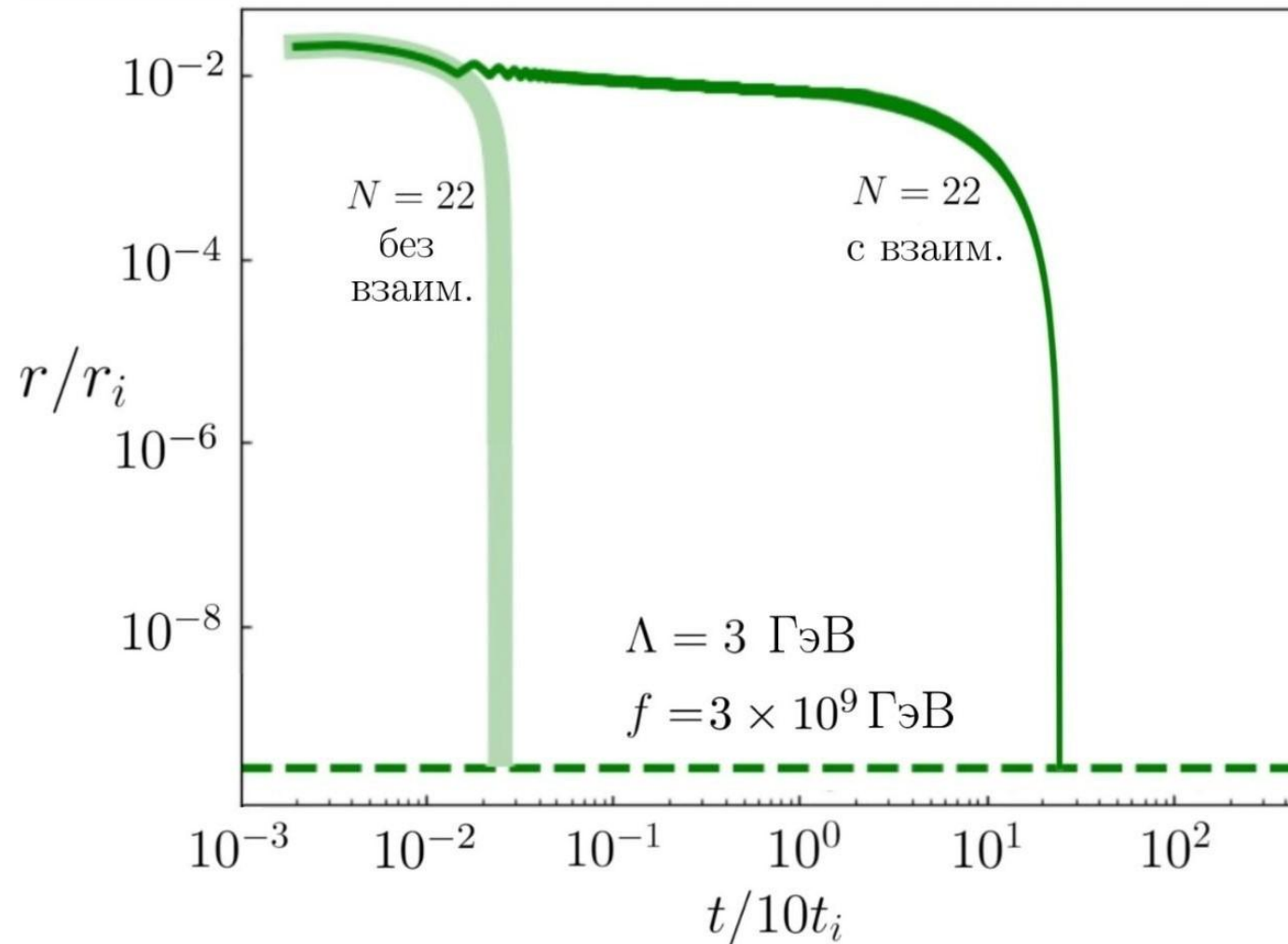
$$\phi = \frac{f}{\sqrt{2}} e^{i\theta} \quad \theta(x) = 4 \arctan \left[ \exp \left( \frac{2x}{d} \right) \right],$$

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

$$\mathcal{L} = -\frac{1}{4}F_{\mu\nu}F^{\mu\nu} - k\theta F_{\mu\nu}\tilde{F}^{\mu\nu}$$

$$p \sim \frac{\alpha^2}{\pi^2} m_a^2 T^2$$

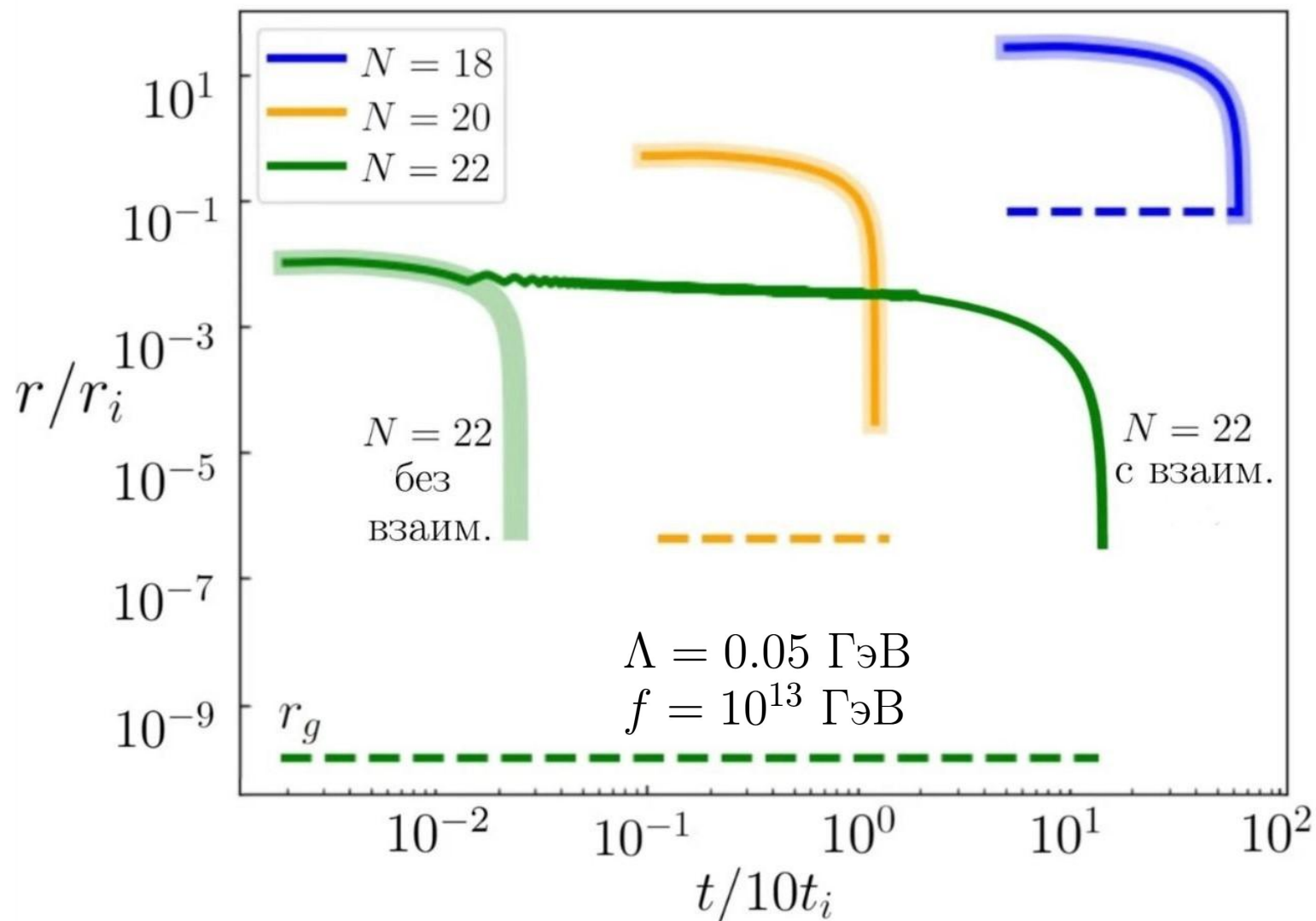
[M. C. Huang and P. Sikivie  
PHYSICAL REVIEW D - 1985, V.32, N°6]



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



# Эволюция доменной стенки



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



# Ограничение на номер е-фолда



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

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

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

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

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

# Образование стенки на стадии инфляции

$$f = H = 10^{13} \text{ ГэВ}$$

$$\Lambda = 0.05 \text{ ГэВ}$$

