



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 А25-121:

Филиппов Д.П.

Научный руководитель:

к.ф.-м.н. Кириллов А.А.

Актуальность работы

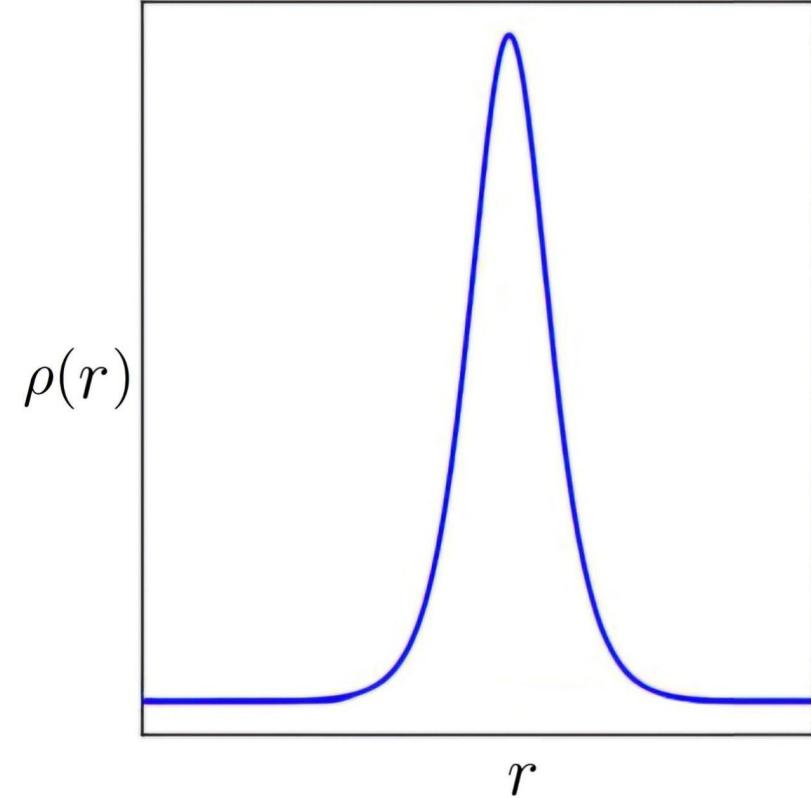
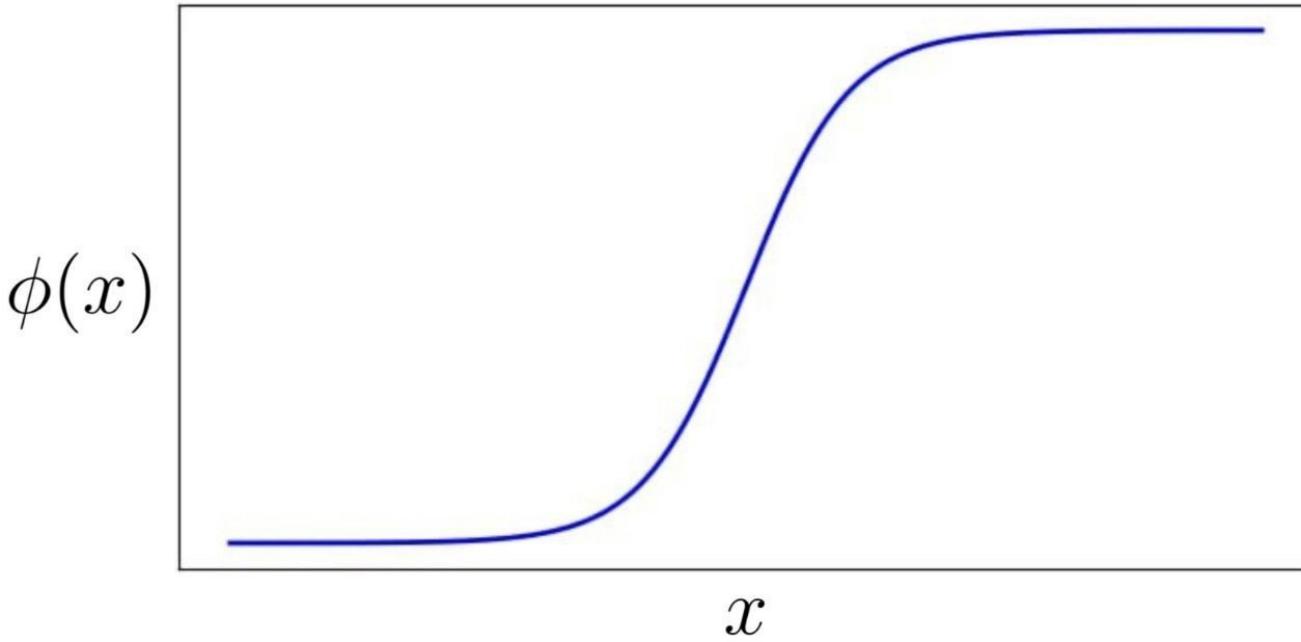
Первичные черные дыры (ПЧД) могут объяснить:

- 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

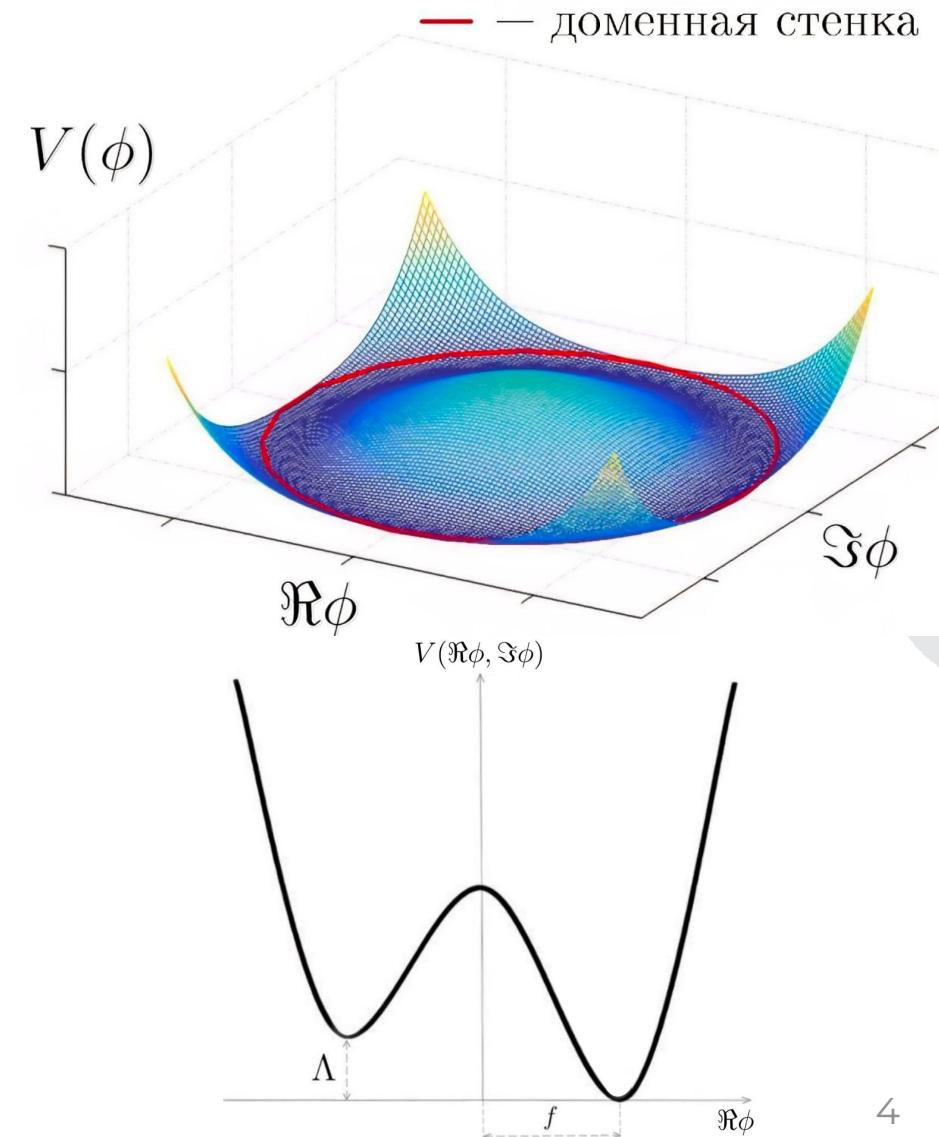
$$V = \frac{1}{4} \left(\phi^* \phi - \frac{f^2}{2} \right)^2 + \Lambda^4 (1 - \cos(\theta))$$

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



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.

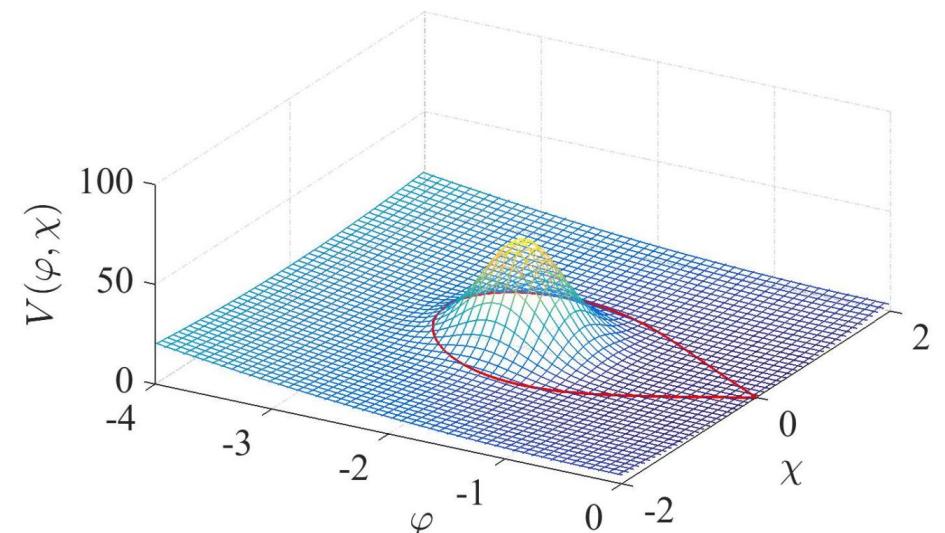
Юкавовское взаимодействие с полями

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

где ζ 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.]

Выводы

В модели аксионоподобного поля:

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

В модели двух действительных скалярных полей:

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

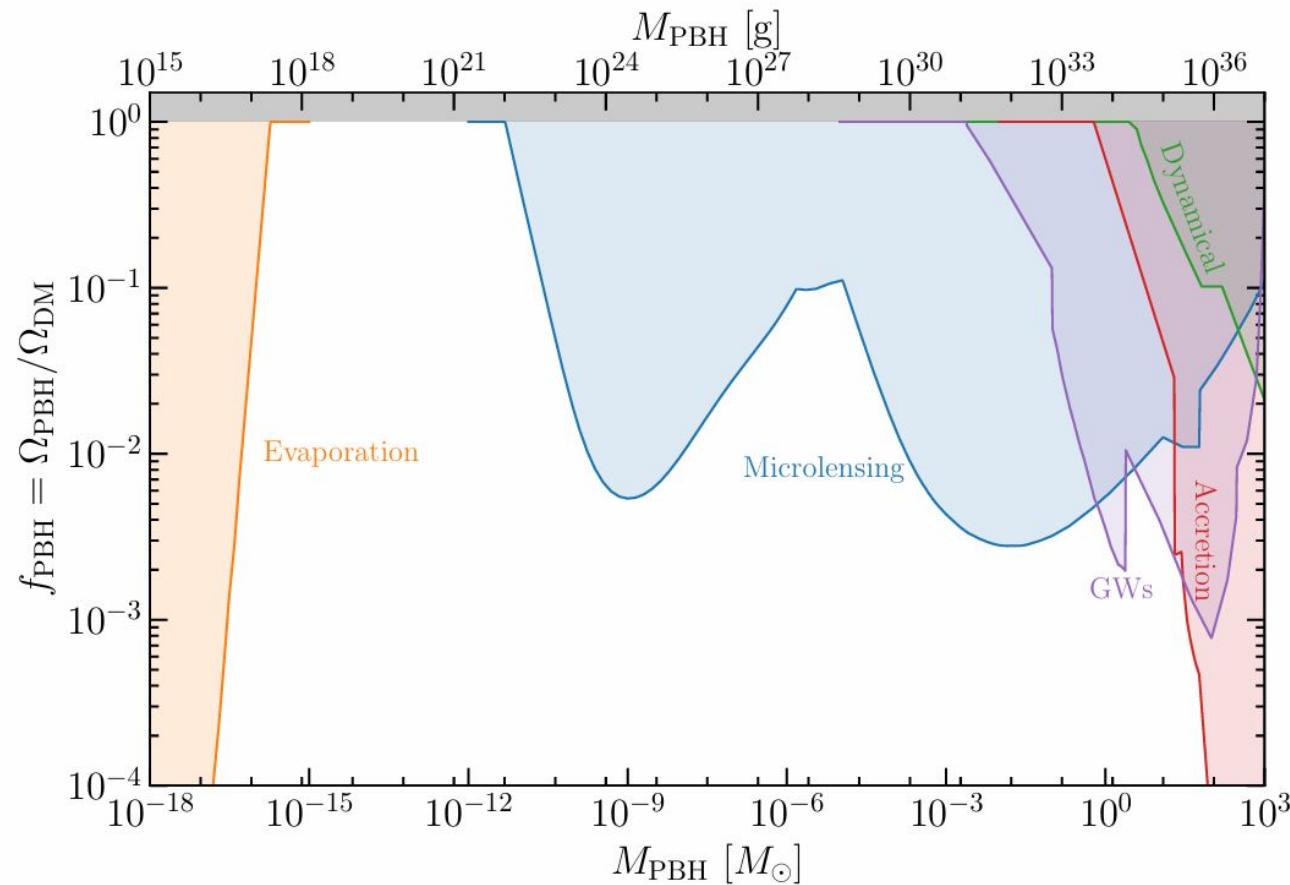


Спасибо за внимание!



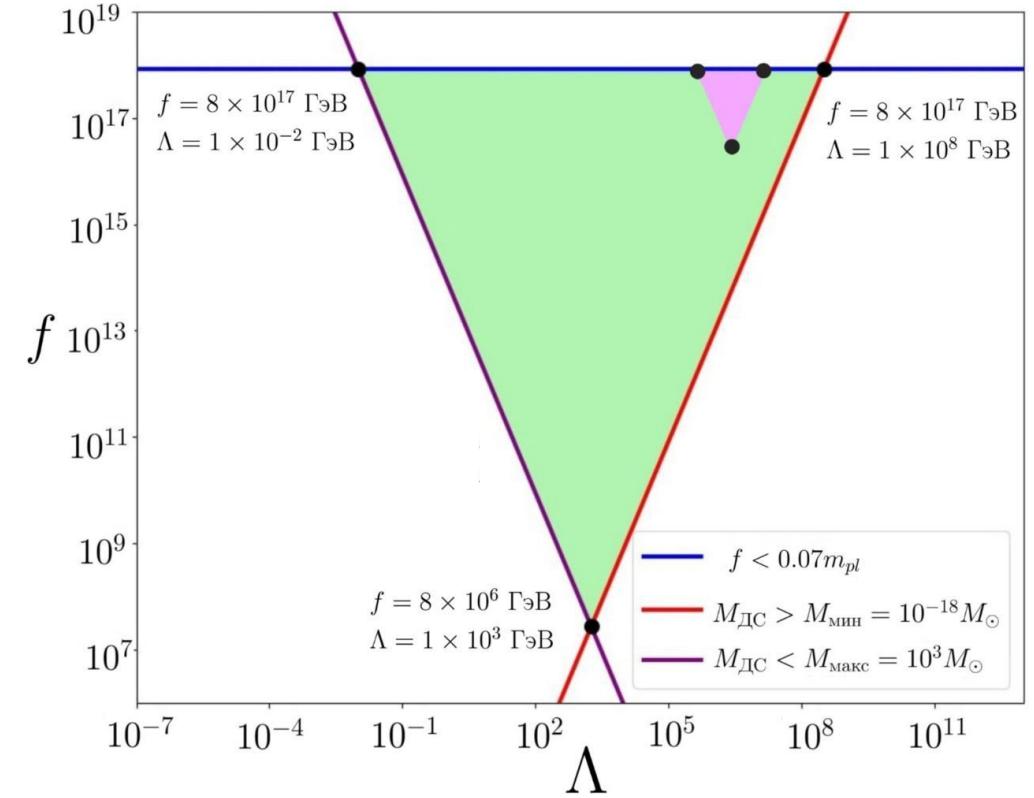
Дополнительные слайды

Ограничения на параметры модели



Наблюдательные ограничения на массы чёрных дыр, составляющих скрытую массу

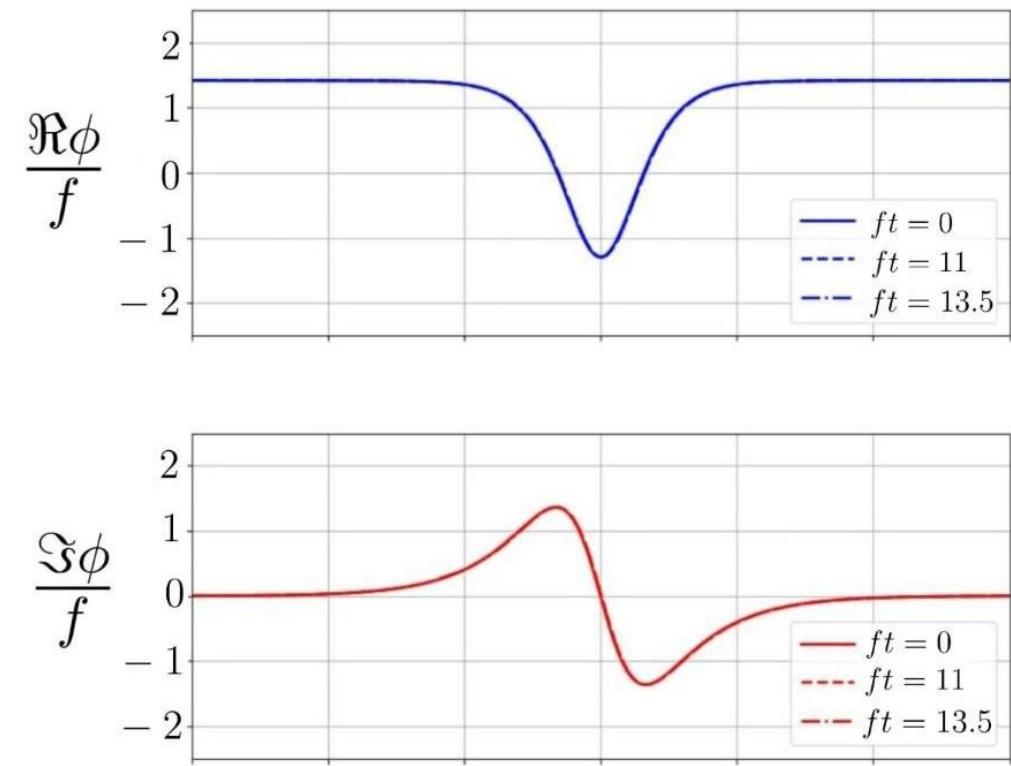
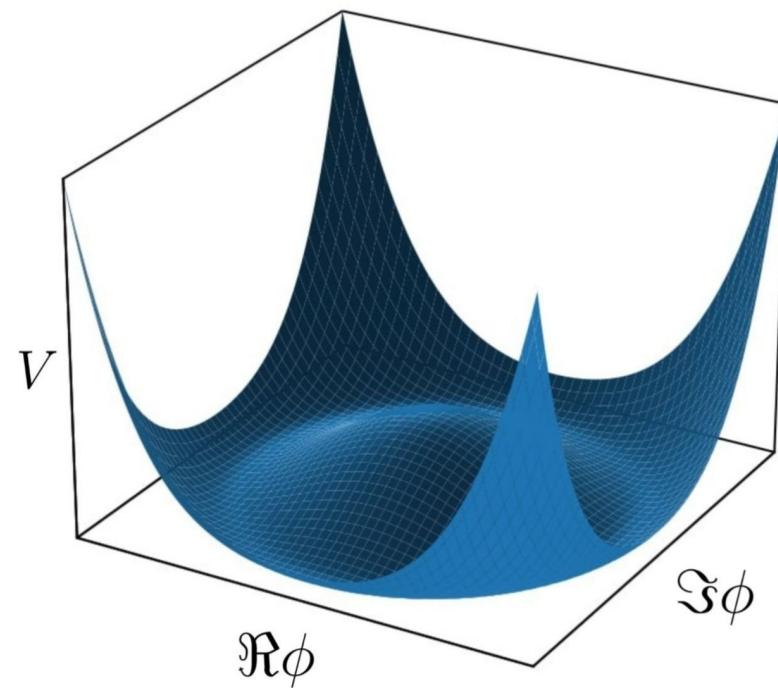
[Carr B. J., Green A. M. arXiv: 2406.05736]



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

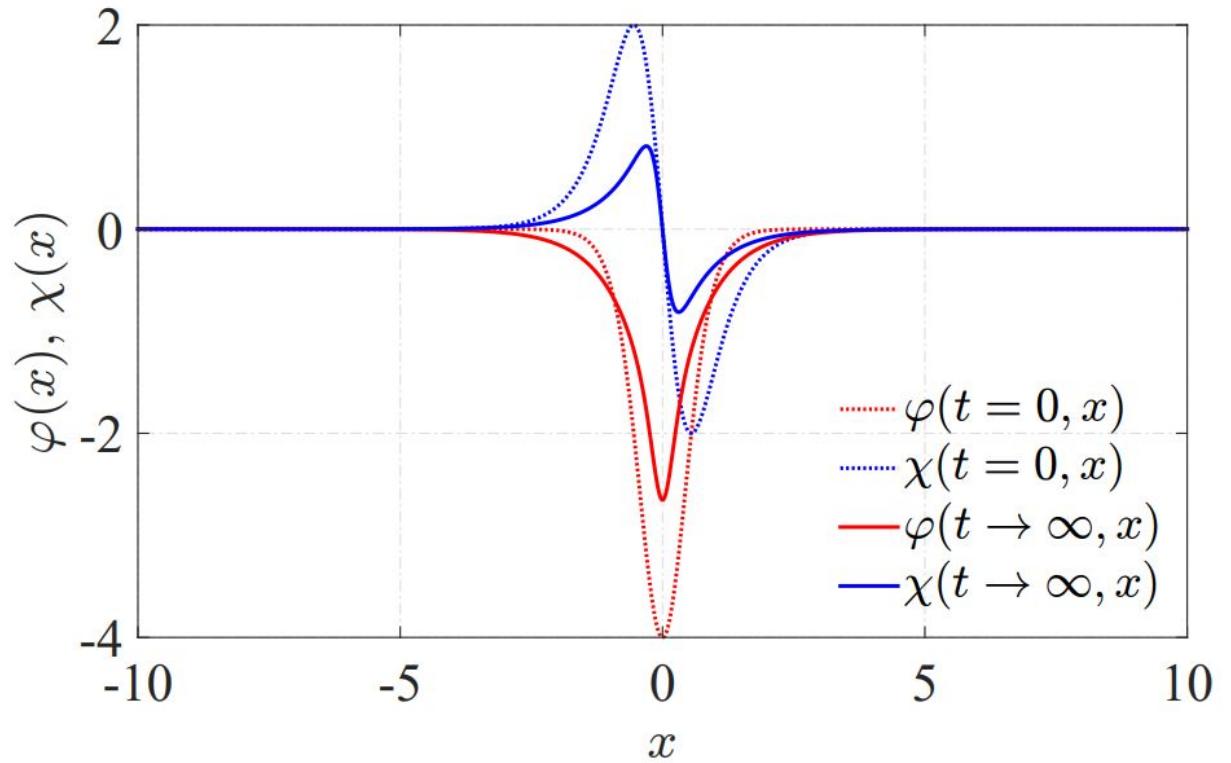
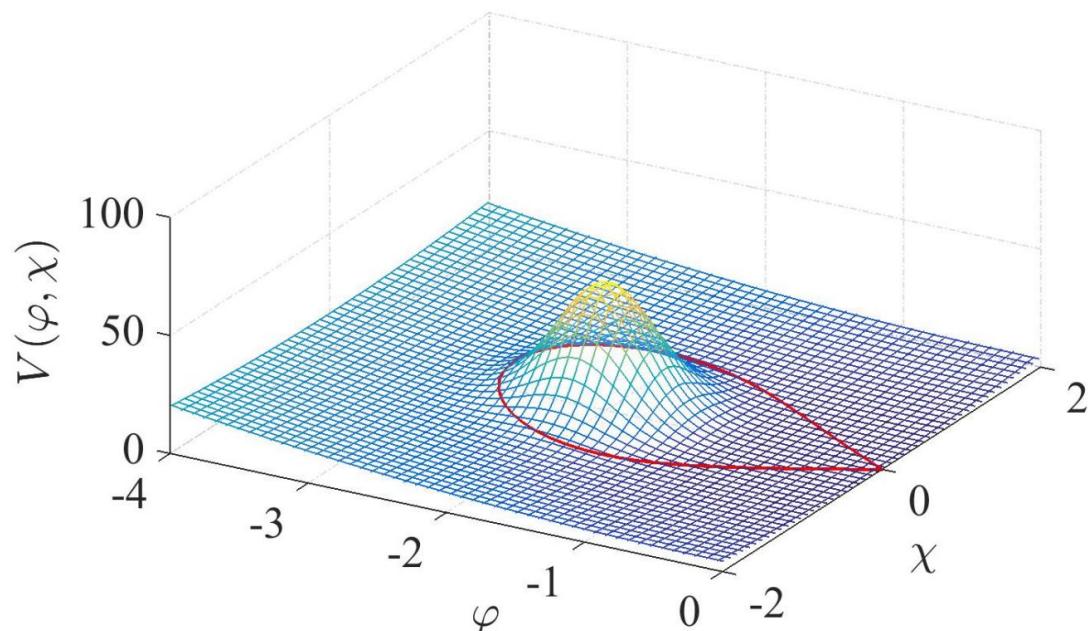
Комплексное скалярное поле

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



Действительные скалярные поля

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



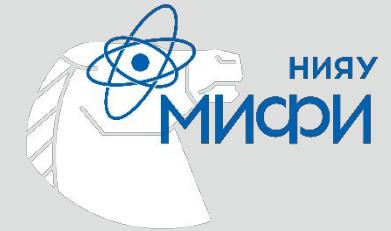
[Gani V. A., Kirillov A. A., Rubin S. G.
JCAP - 2018, №04.]

Потенциальный барьер ДС

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

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

Взаимодействие с фотонами

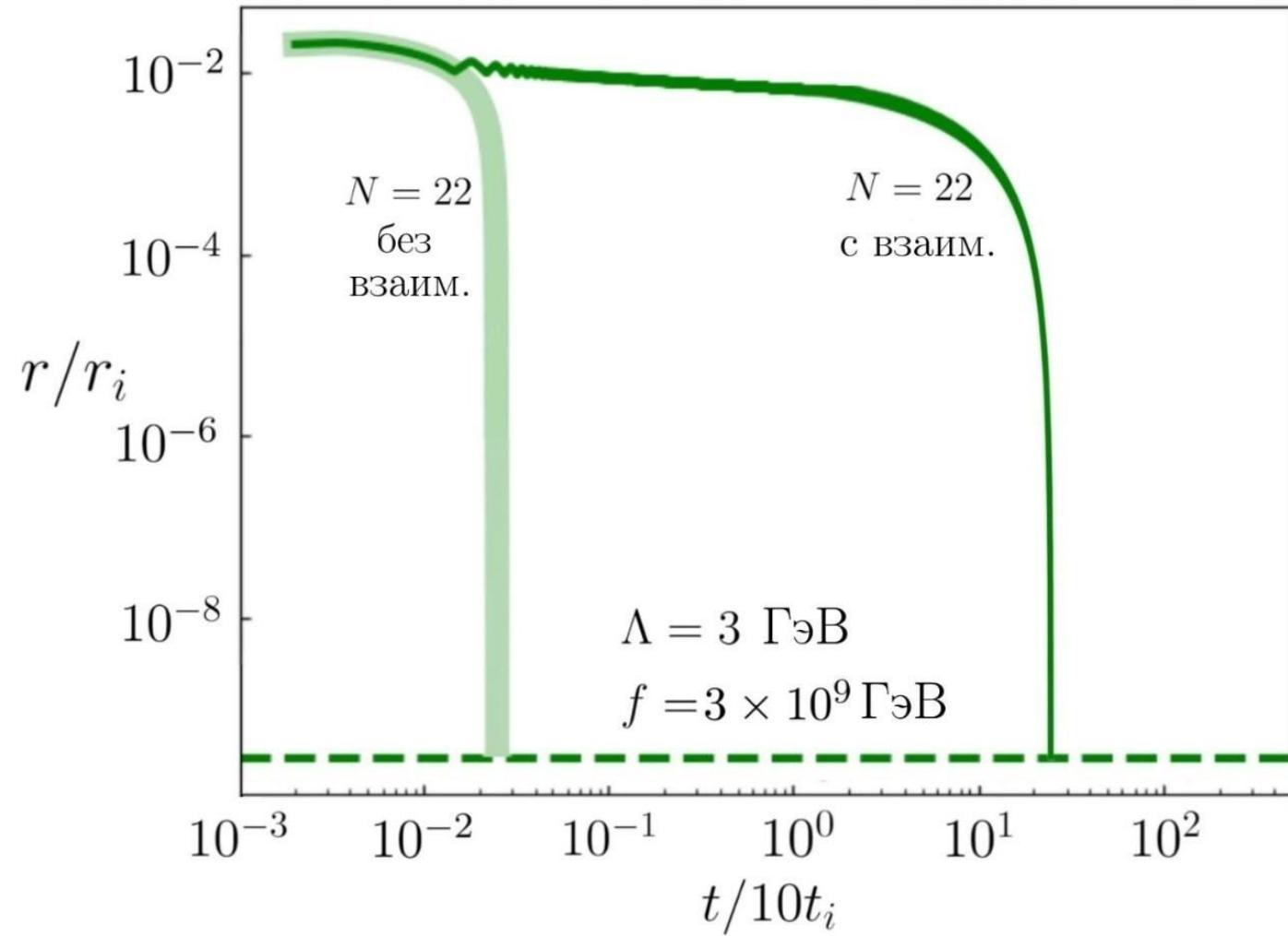


$$\mathcal{L} = -\frac{1}{4}F_{\mu\nu}F^{\mu\nu} - k\theta F_{\mu\nu}\tilde{F}^{\mu\nu}$$

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

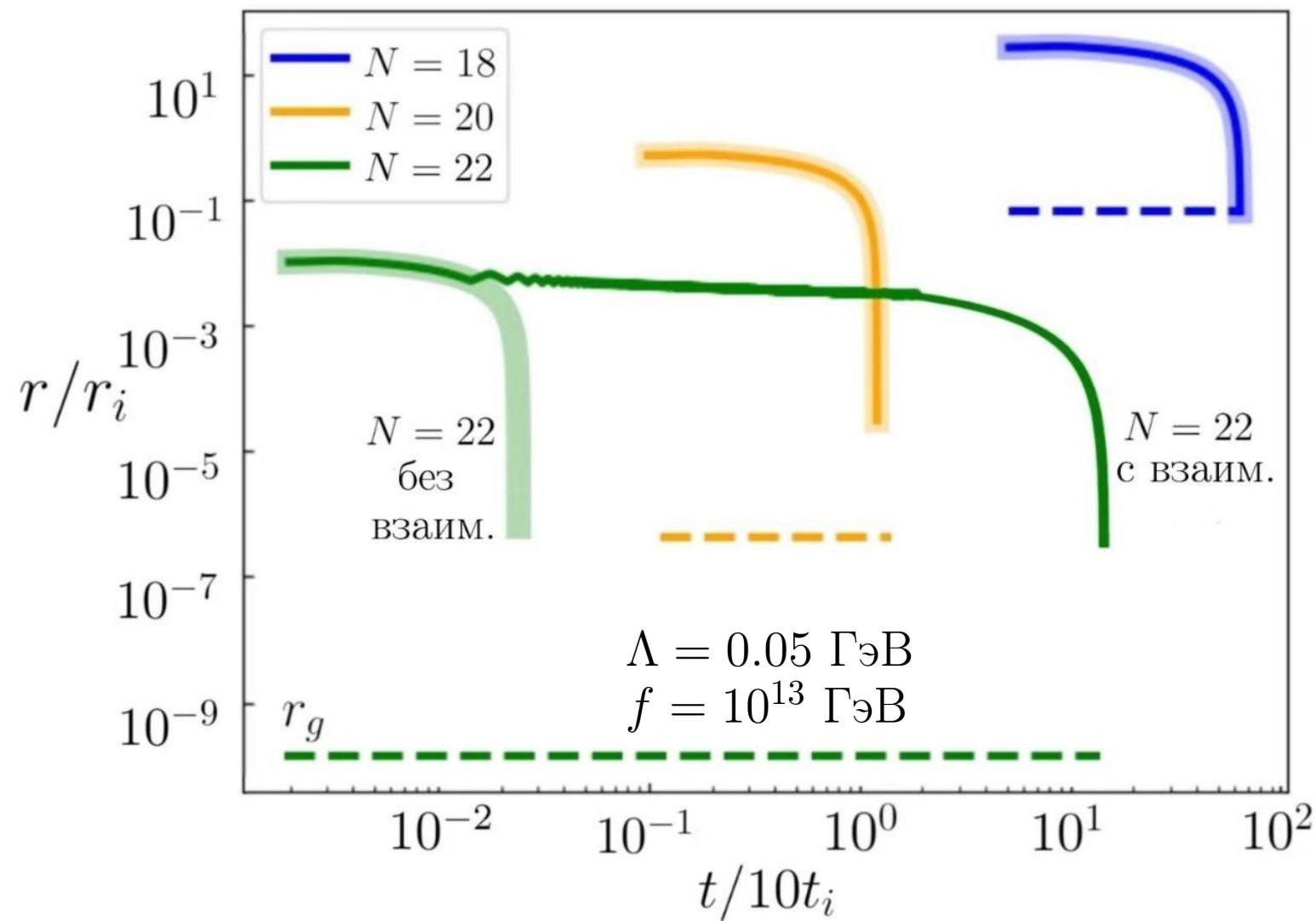
[M. C. Huang and P. Sikivie
PHYSICAL REVIEW D - 1985, V.32, №6]

Отложенное во времени формирование ПЧД



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

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

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

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

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

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

Образование стенки на стадии инфляции

$$f = H = 10^{13} \text{ ГэВ}$$

$$\Lambda = 0.05 \text{ ГэВ}$$

