

Национальный исследовательский ядерный университет
"МИФИ"

Численное моделирование эволюции сети доменных стенок

Студент: И.В. Грачев, группа Б23-102
Научный руководитель: М.Ю. Хлопов, д.ф-м.н., проф. каф. №40

Лагранжиан:

$$\mathcal{L} = \frac{1}{2}(\partial_\mu\phi)^2 - V(\phi), \quad (1)$$

где :

$$V(\phi) = \frac{\lambda}{4}(\phi^2 - \eta^2)^2, \quad (2)$$

где λ - постоянная самодействия, η - вакуумное ожидаемое значение. Для данной модели известно точное статическое решение:

$$\phi(z) = \eta \tanh \left(\left(\frac{\lambda}{2} \right)^{\frac{1}{2}} \eta z \right) \quad (3)$$

Физическая толщина такой стенки приблизительно равна:

$$\delta \simeq (\sqrt{\lambda}\eta)^{-1} \quad (4)$$

Поверхностное натяжение:

$$\sigma = \int T_{00} dz = \int (\phi')^2(z) dz = \frac{2\sqrt{2}}{3} \sqrt{\lambda}\eta^3 \quad (5) \quad 2$$

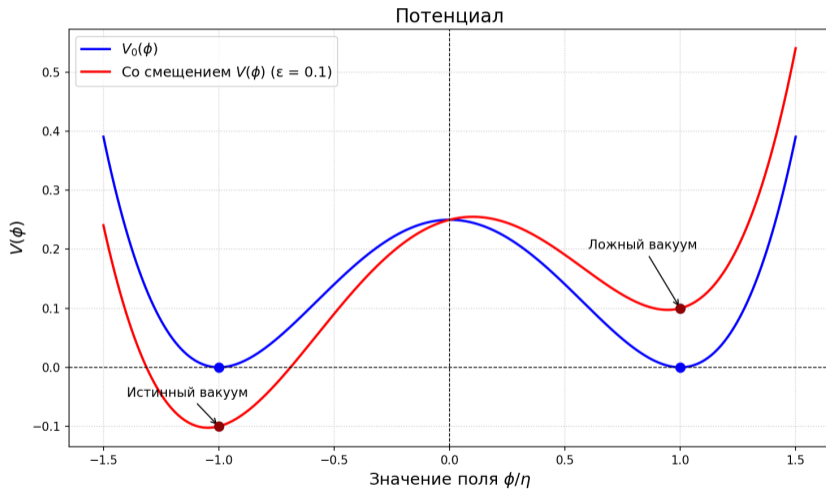
Вклад стенок в плотность энергии Вселенной при достижении скейлингового режима:

$$\rho_w \sim \frac{\sigma R^2}{R^3} \sim \sigma H, \quad (6)$$

то есть уменьшается медленнее других компонент. В данной работе введен линейный член, нарушающий Z_2 симметрию:

$$V(\phi) = \frac{\lambda}{4}(\phi^2 - \eta^2)^2 + \epsilon\eta^3\phi, \quad (7)$$

где $\epsilon > 0$ - малый параметр. Вид потенциала со смещением изображен на рисунке 4.



Численное моделирование эволюции сети доменных стенок было произведено при помощи CosmoLattice на решетке 1024^3 . Моделирование происходит в программных единицах (обозначены с тильдой): $t \rightarrow \tilde{\eta}$, $x^i \rightarrow \tilde{x}^i$, $\phi \rightarrow \tilde{\phi}$. Преобразование физических единиц в программные происходит следующим образом:

$$\tilde{\phi} \equiv \frac{\phi}{f_*}, \quad d\tilde{\eta} \equiv a^{-1} w_* dt, \quad d\tilde{x}^i \equiv w_* dx^i, \quad (8)$$

где w_* , f_* - константы размерности энергии. Для рассматриваемой модели ϕ^4 -кинка выбраны: $f_* = \eta$, $w_* = \sqrt{\lambda}\eta$. Так как рассматривается рд-стадия, то:

$$a(t) \sim \sqrt{t} \quad (9)$$

Для удобства выбрано: $\tilde{\eta}_i = 1$, $a(\tilde{\eta}_i) = 1$, $H(\tilde{\eta}_i) = 1$,

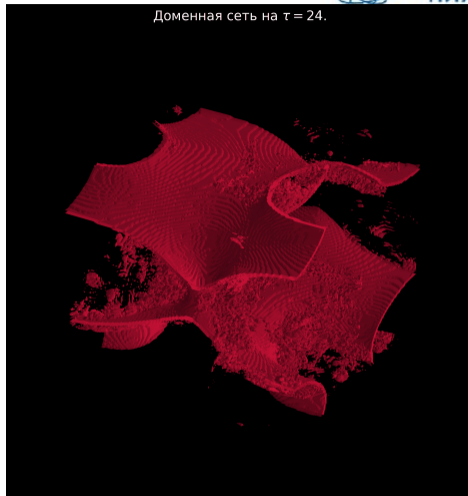
где $\tilde{\eta}_i$ - начальное время симуляции в программных единицах. Подставляя это в 9, получаем: $a(\tilde{\eta}) = \tilde{\eta}$, $H = \frac{\dot{a}}{a} \rightarrow H(\tilde{\eta}) = \frac{1}{\tilde{\eta}^2}$.

Доменная сеть на $\tau = 3$.



$\tau = 3$

Доменная сеть на $\tau = 24$.

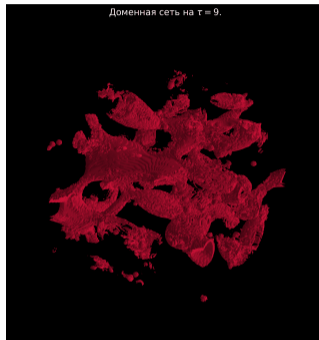


$\tau = 24$

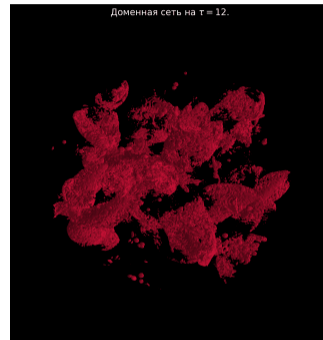
Эволюция сети доменных стенок с $\epsilon = 0$



$\tau = 6$



$\tau = 9$



$\tau = 12$

Эволюция сети доменных стенок с $\epsilon = 0.02$

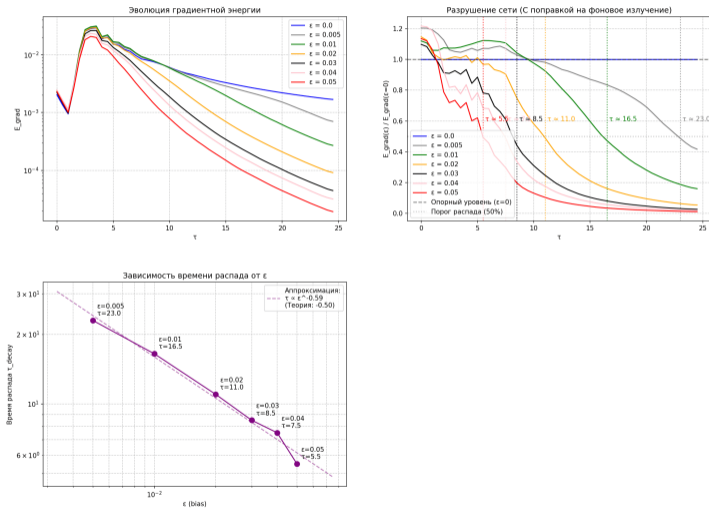


Рис. 1 Анализ градиентной энергии сети для симуляции с $\tau_f = 26$

В режиме скейлинга: $\rho_w \sim t^{-1} \implies E_G \sim t^{-1} \implies E_G \sim \tau^{-2}$ Согласно теории $t_{ann} \sim \epsilon^{-1}$. Так как согласно 8, $dt = a d\tau$ и как было получено $a(\tau) = \tau \implies t \sim \tau^2 \implies \tau_{ann} \sim \epsilon^{-\frac{1}{2}}$. Согласно данным симуляции получено, что для симуляции с $\tau_f = 26$ $\tau_{ann} \sim \epsilon^{-0.59}$

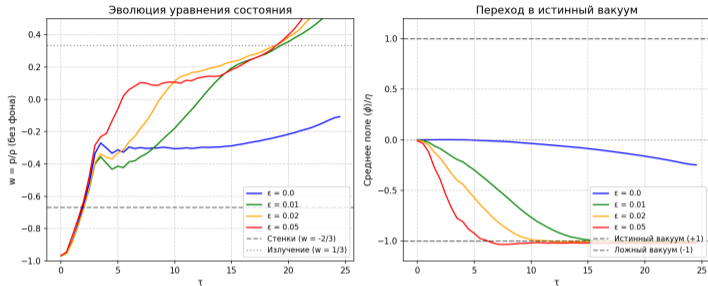


Рис. 2 Термодинамическое отражение распада сети

Для чистой рд-стадии характерно уравнение состояния: $w = \frac{p}{\rho} = \frac{1}{3}$. Для сети доменных стенок, так как в безразмерных единицах в CosmoLattice $\rho = E_K + E_G + V$, а $p = E_K - \frac{1}{3}E_G - V$, кинетическая энергия стенок мала, а градиентная и потенциальная энергии примерно равны, характерно $w = -\frac{2}{3}$

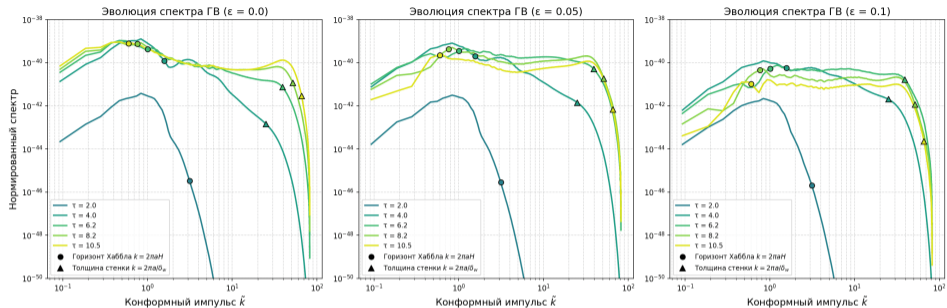


Рис. 3 Спектр гравитационных волн, сгенерированных сетью доменных стенок с возмущением и без.

Вертикальная ось графика отражает безразмерную плотность энергии гравитационных волн в программных единицах. Порядки в $10^{-50} - 10^{-38}$ обусловлены множителем $(\frac{f_*}{m_p})^4$, где f_* - характерный энергетический масштаб модели δ , а m_p -планковская масса.

- ▶ Подтвержден выход сети доменных стенок без возмущения на скейлинговый режим
- ▶ Доказана эффективность механизма аннигиляции стенок при добавлении малого возмущения, нарушающего Z_2 - симметрию.
- ▶ Установлено, что зависимость конформного времени распада от величины возмущения $\tau_{ann} \sim \epsilon^{-0.59}$ находится в хорошем соответствии с теоретическим предсказанием $\tau_{ann} \sim \epsilon^{-\frac{1}{2}}$.
- ▶ Отслежена эволюция макроскопического уравнения состояния системы $w = \frac{p}{\rho}$ от режима доминирования сети доменных стенок к фазе доминирования излучения с характерными значениями w .
- ▶ Подтверждено, что генерация гравитационных волн прекращается при распаде сети стенок, формируя замороженный реликтовый фон, который можно было бы наблюдать в настоящее время. Полученные безразмерные спектры гравитационных волн при определении энергетического масштаба сети доменных стенок могут быть сравнены со спектрами, наблюдаемыми детекторами.