

Излучение гравитационных волн распадающимися доменными стенками

Дипломная работа студента 643 группы
Данковского Ивана Дмитриевича

Научный руководитель:
доктор физ.-мат. наук, член-корр. РАН, г.н.с. ОТФ ИЯИ РАН
Горбунов Дмитрий Сергеевич

- Метод пульсарного тайминга: NANOGrav, EPTA with InPTA, PPTA, и Chinese PTA →
- Стохастический гравитационно-волновой фон
- Двойные системы сверхмассивных черных дыр – наиболее вероятный источник
- Первичные источники также возможны
- Мы рассматриваем доменные стенки
- Численные симуляции с помощью компьютерного кода CosmoLattice – Figueroa et al., 2021

$$\mathcal{L} = \frac{1}{2}(\partial_\mu\phi)^2 - \frac{1}{4}\lambda_\phi(\phi^2 - \eta^2)^2$$

Проблема доменных стенок

$$\sigma_{dw} = \frac{2\sqrt{2}\lambda\eta^3}{3}$$

$$\rho_{dw} \sim \frac{H^{-2}\sigma_{wall}}{H^{-3}} \propto \frac{1}{a^2}; \rho_{rad} \propto \frac{1}{a^4}; \rho_M \propto \frac{1}{a^3}.$$

Варианты решения проблемы доменных стенок:

- Ограничение на поверхностную плотность энергии
- Явное нарушение симметрии
- Зависящее от времени вакуумное значение ("тающие" стенки)

$$S = \int d^4x \sqrt{-g} \left[\frac{1}{2} (\partial_\mu \chi)^2 - \frac{1}{4} \cdot \lambda (\chi^2 - v^2)^2 - V_{breaking} \right] \quad (1)$$

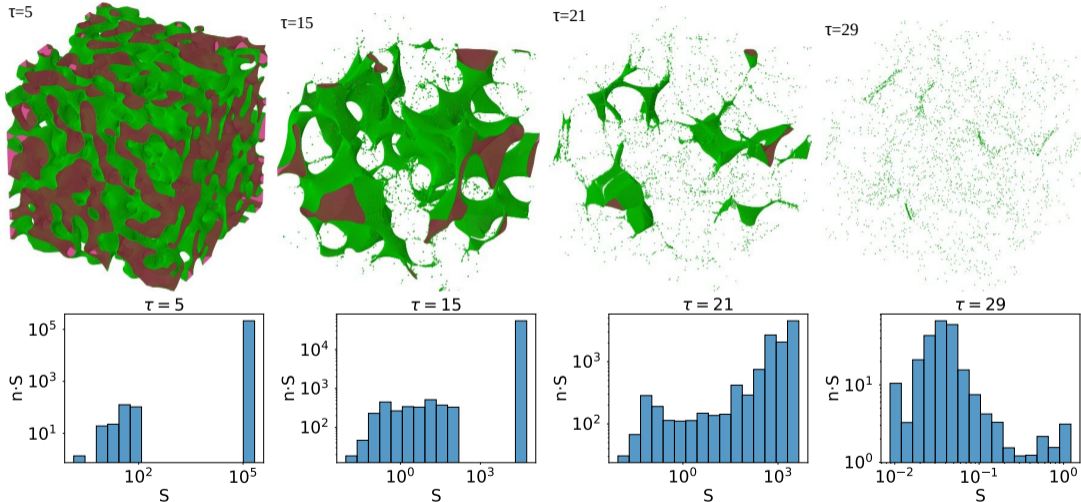
$$V_{breaking} = \epsilon \chi^3 \quad (2)$$

$$V_{bias} = V_{breaking}(\chi \approx v) - V_{breaking}(\chi \approx -v) \approx 2\epsilon v^3 \quad (3)$$

$$V_{bias} \ll \lambda v^4 \quad \epsilon \ll \lambda v \quad (4)$$

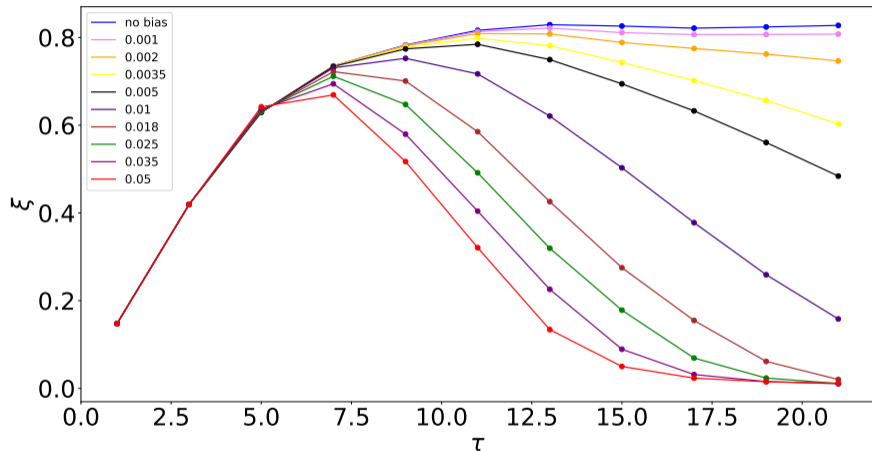
$$\langle \chi^2(\mathbf{x}) \rangle = \int_{k_{min}}^{k_{cut}} \frac{dk \cdot k}{4\pi^2}, \quad \langle \dot{\chi}^2(\mathbf{x}) \rangle = \int_{k_{min}}^{k_{cut}} \frac{dk \cdot k^3}{4\pi^2} \quad (5)$$

Конфигурации доменных стенок



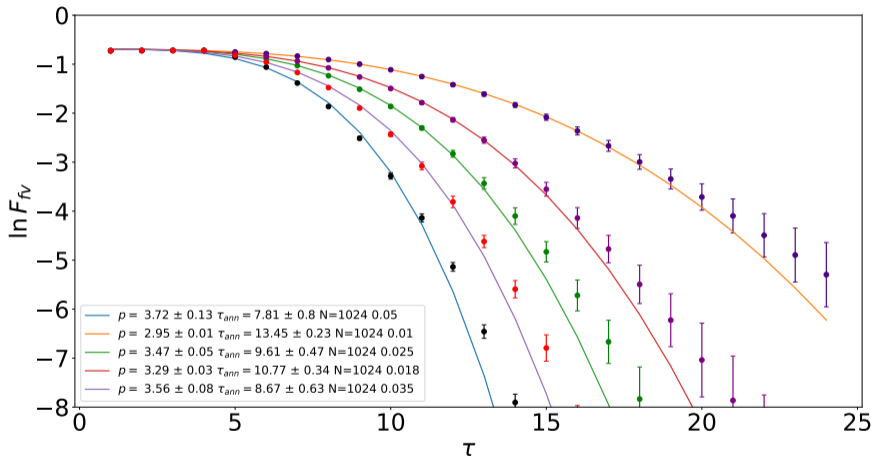
Вакуумные начальные условия, $N = 2048$, $\epsilon = 0.01\lambda v$. $S = \Delta x^2 \sum_{links} \delta \frac{|\nabla\chi|}{|\chi_{,x}| + |\chi_{,y}| + |\chi_{,z}|}$

Скейлинг-параметр



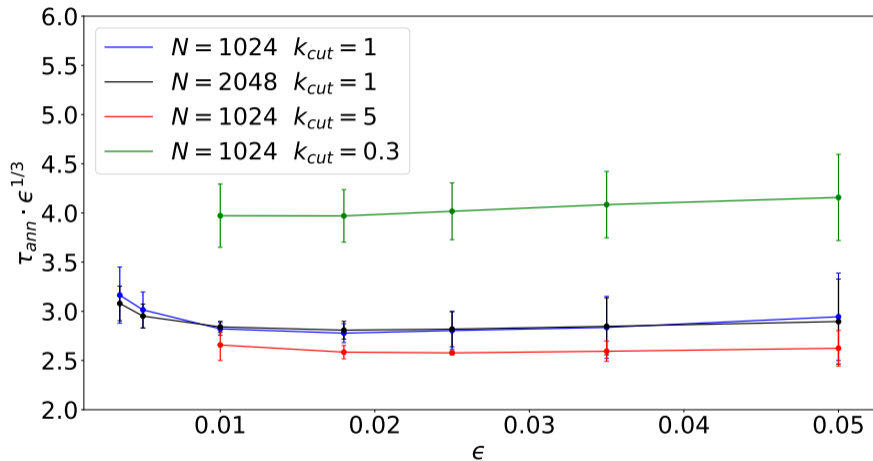
$$k_{cut} = 1, N = 1024. \xi_{dw} = \frac{\rho_{wall}}{\sigma_{wall}} t = \frac{St}{a(t)V}.$$

Доля ложного вакуума



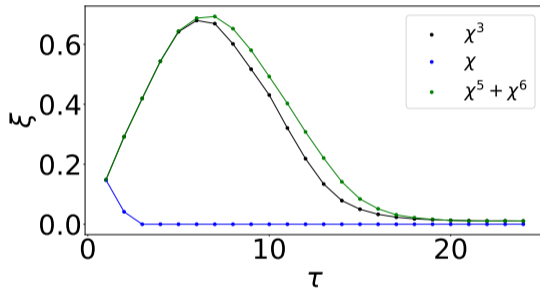
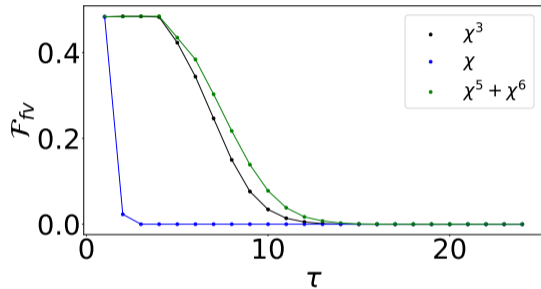
$$\mathcal{F}_{fv} = \frac{V_{false}}{V} \cdot \mathcal{F}_{fv} = \frac{1}{2} \cdot \exp \left[- \left(\frac{\tau}{\tau_{ann}} \right)^p \right] \cdot k_{cut} = 1, N = 1024.$$

Доля ложного вакуума



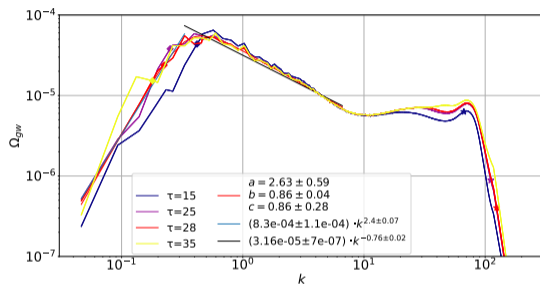
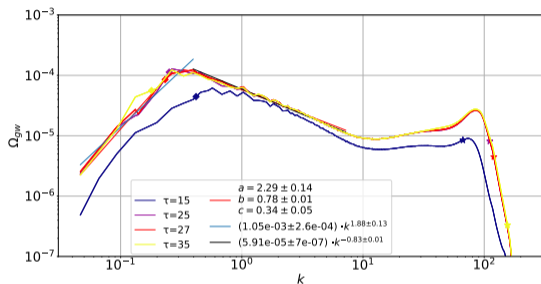
$$\rho_{wall} \sim V_{bias} \Rightarrow \tau_{ann} \propto 1/\sqrt{\epsilon}$$

Другие слагаемые, явно нарушающие симметрию



$k_{cut} = 1, N = 1024.$

Гравитационные волны



$k_{cut} = 1$, $N = 2048$, $\epsilon = 0.025\lambda_v$ (left) and $\epsilon = 0.05\lambda_v$ (right).

$$\Omega_{gw} = \Omega_{gw,peak} \cdot \frac{(a+b)^c}{(bx^{-a/c} + ax^{b/c})^c}$$

$$f_{peak} \simeq 8 \text{ nHz } \lambda^{1/4} \cdot \left(\frac{\epsilon}{10^{-36} \cdot \lambda \nu} \right)^{1/3} \cdot \sqrt{\frac{\nu}{100 \text{ TeV}}} \cdot \left(\frac{100}{g_*(T_{ann})} \right)^{1/12} \quad (6)$$

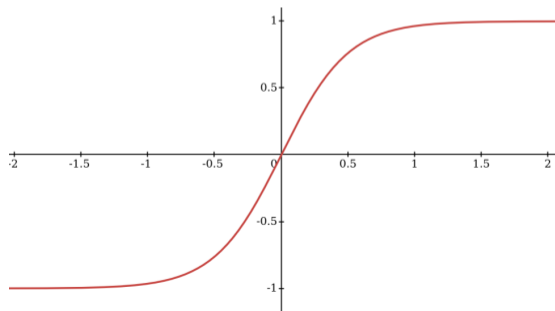
$$\Omega_{gw,peak} h_0^2 \simeq 1 \cdot 10^{-10} \cdot \left(\frac{\nu}{100 \text{ TeV}} \right)^4 \cdot \left(\frac{10^{-36} \cdot \lambda \nu}{\epsilon} \right)^{4/3} \cdot \left(\frac{100}{g_*(T_{ann})} \right)^{1/3} \quad (7)$$

- Явное нарушение симметрии в лагранжиане решает проблему доминирования доменных стенок.
- Разрушение доменных стенок происходит быстрее, чем следует из оценки $\rho_{dw} \sim V_{bias}$.
- Необходимо рассматривать меньшие ϵ для получения наблюдаемого сигнала гравитационных волн.

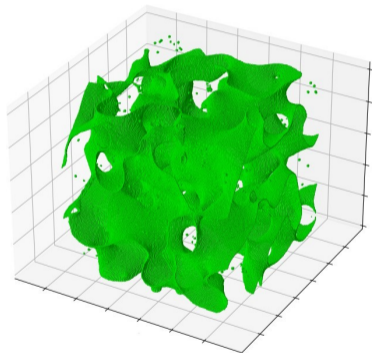
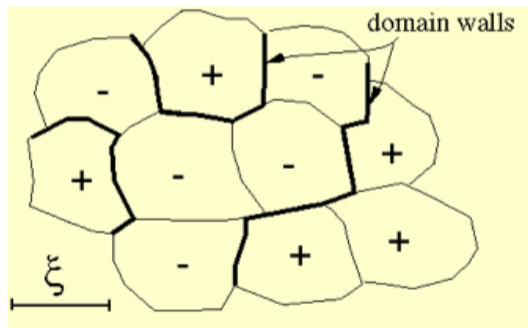
Спасибо за внимание!

$$\frac{d^2\phi}{dz^2} - \lambda(\phi^2 - \eta^2)\phi = 0 \quad \phi(z \rightarrow \pm\infty) = \pm\eta$$

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



Доменная стенка – кинк в 3+1 измерении



- Одна доменная стенка на горизонт
- Расстояние между стенками = радиус Хаббла

$$\rho_{wall} \sim \frac{H^{-2} \sigma_{wall}}{H^{-3}} \sim \sigma_{wall} / t$$

$\xi_{dw} = \frac{\rho_{wall}}{\sigma_{wall}} t = \frac{St}{a(t)V}$ – скейлинг-параметр; $\sigma_{dw} = \frac{2\sqrt{2}\lambda\eta^3}{3}$ – поверхностная плотность энергии

→ $\xi = \xi_{sc} = \text{const}$

Вычисление площади:

$$S = \Delta x^2 \sum_{links} \delta \frac{|\nabla\phi|}{|\phi_{,x}| + |\phi_{,y}| + |\phi_{,z}|}$$

Press, Ryden, Spergel, 1989