

Излучение гравитационных волн космическими доменными стенками

Курсовая работа студента 443 группы
Данковского Ивана Дмитриевича
Научный руководитель:
член-корр. РАН, доктор физ.-мат. наук,
Горбунов Дмитрий Сергеевич

Научные консультанты: Бабичев Евгений, Викман Александр,
Рамазанов Сабир

Введение

$$\mathcal{L} = \frac{1}{2} (\partial_\mu \phi)^2 - \frac{\lambda}{4} (\phi^2 - \eta^2)^2 \quad \langle \phi \rangle = \pm \eta$$

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

$$\phi(z) = \eta \tanh \left(\frac{z}{\Delta} \right) \quad \Delta^2 = \frac{2}{\lambda \eta^2} \text{ - domain wall width}$$

Режим скейлинга

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

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

$$\xi_{dw} = \frac{\rho_{wall}}{\sigma_{wall}} t - \text{скейлинг-параметр}$$

$$\sigma_{dw} = \frac{2\sqrt{2\lambda}\eta^3}{3} - \text{натяжение доменных стенок}$$

Режим скейлинга

$$P \sim \ddot{Q}_{ij}^2 / (40\pi M_{Pl}^2) \quad Q_{ij} \sim M_{wall} / H^2 \quad M_{wall} \sim \sigma_{wall} / H^2$$

$$\rho_{gw} \sim PtH^3 \sim \frac{\sigma_{wall}^2}{40\pi M_{Pl}^2}$$

$$k\tau \ll 1$$

$$\frac{d\rho_{gw}}{d \ln k} \propto k^3$$

Начальные условия

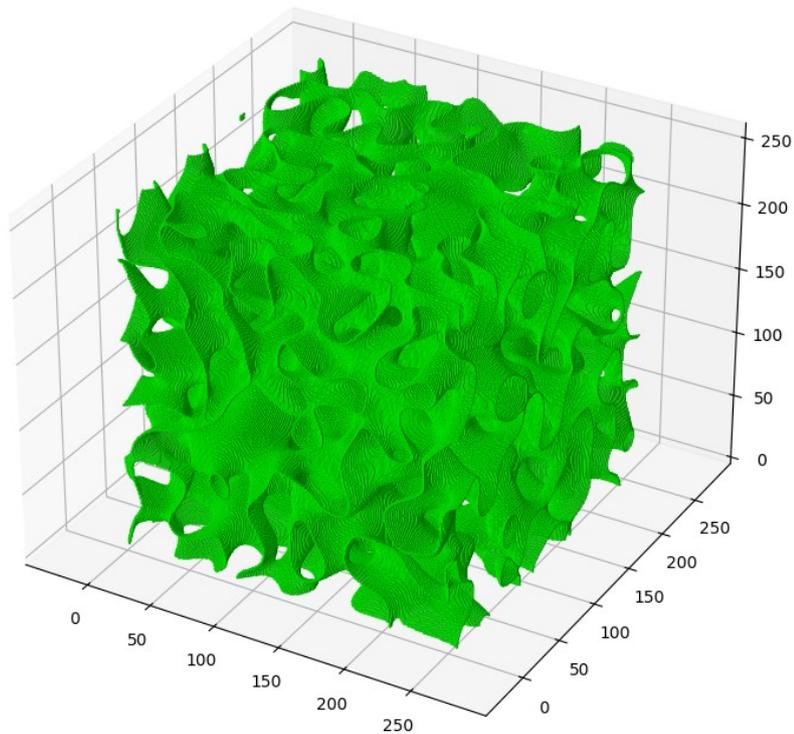
$$\langle \phi(\mathbf{k})\phi(\mathbf{q}) \rangle = A(k)\delta(\mathbf{k} + \mathbf{q}) \quad \text{Вакуумные:}$$

$$\langle \dot{\phi}(\mathbf{k})\dot{\phi}(\mathbf{q}) \rangle = B(k)\delta(\mathbf{k} + \mathbf{q}) \quad A(k) = \frac{1}{2k} \quad B(k) = \frac{k}{2}$$

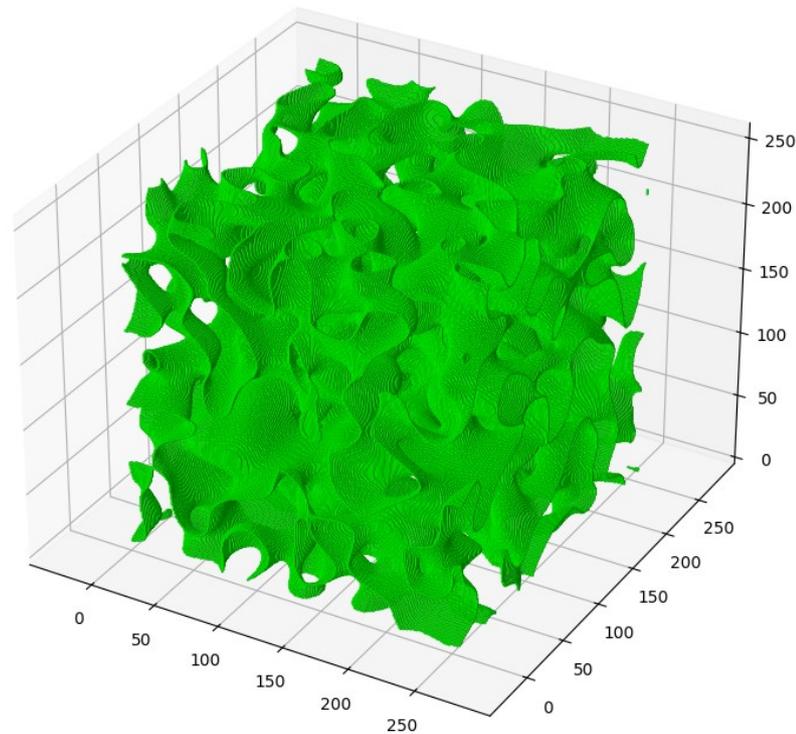
Термальные:

$$A(k) = \frac{1}{k \cdot \left(e^{\frac{k}{T}} - 1 \right)} \quad B(k) = \frac{k}{e^{\frac{k}{T}} - 1}$$

Эволюция системы доменных стенок

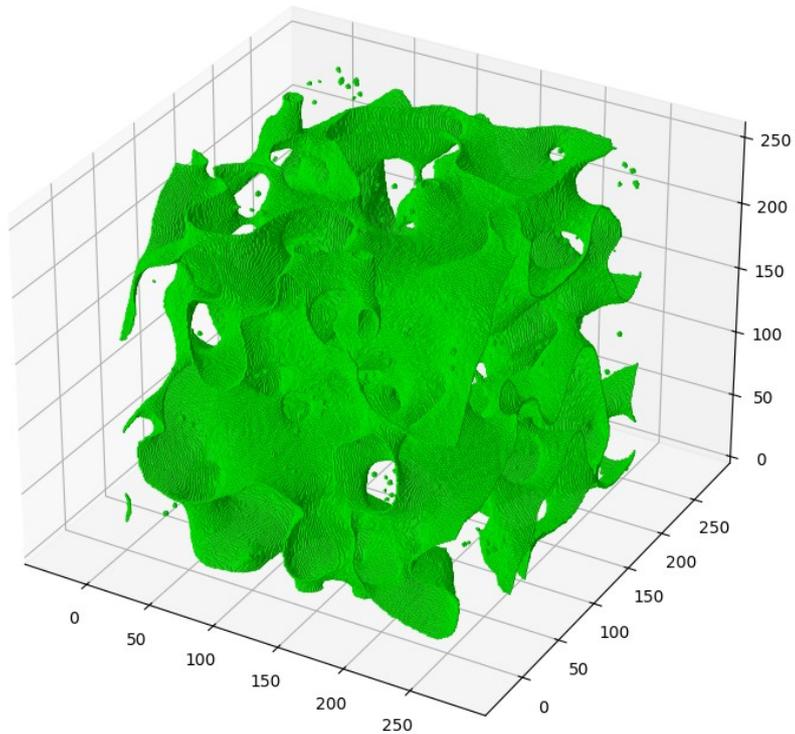


$\tau = 1$

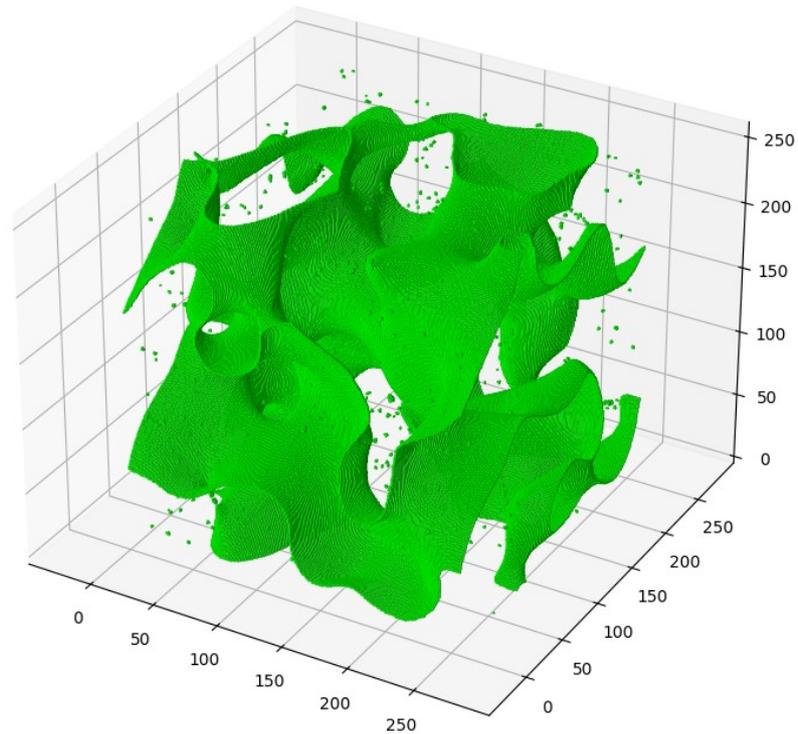


$\tau = 5$

Эволюция системы доменных стенок



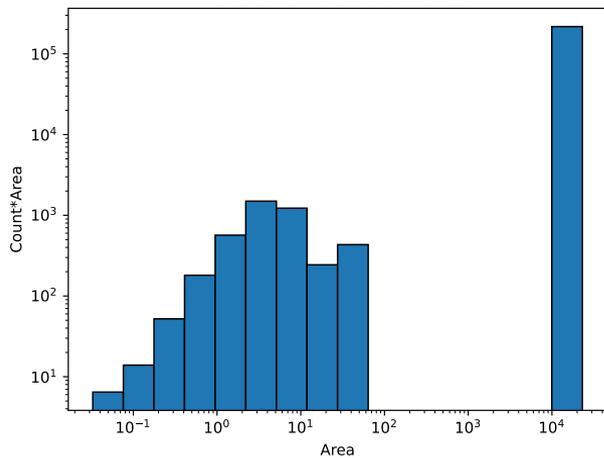
$\tau = 10$



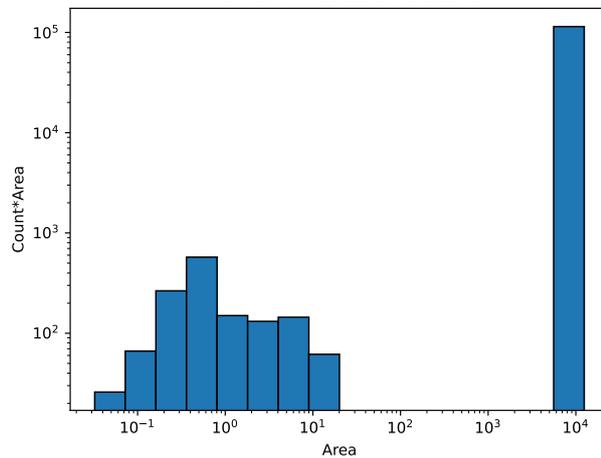
$\tau = 15$

Распределение по площадям

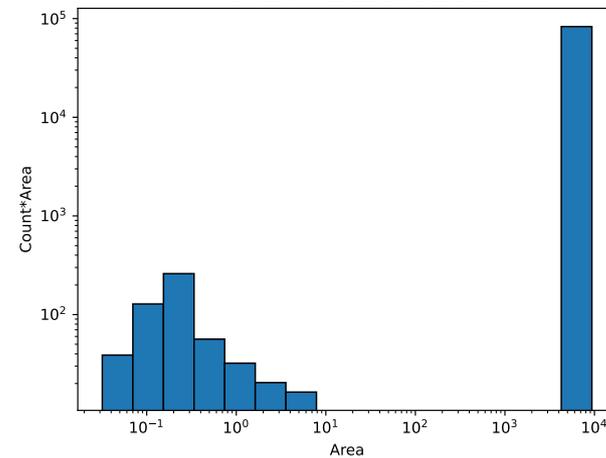
Thermal $\tau = 5$ 10 simulations



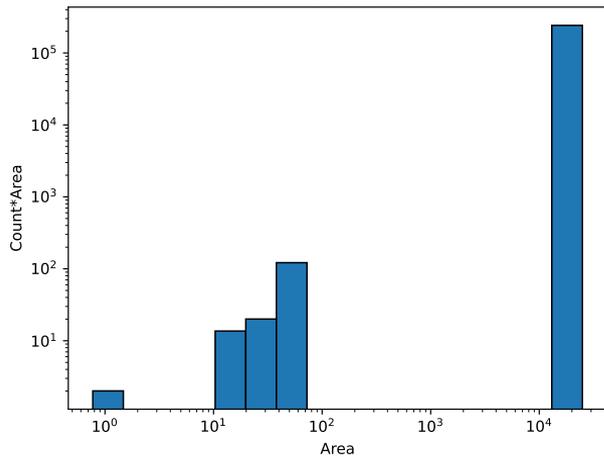
Thermal $\tau = 10$ 10 simulations



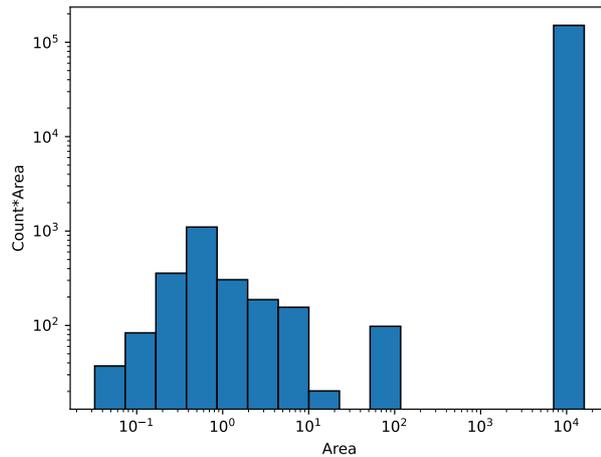
Thermal $\tau = 15$ 10 simulations



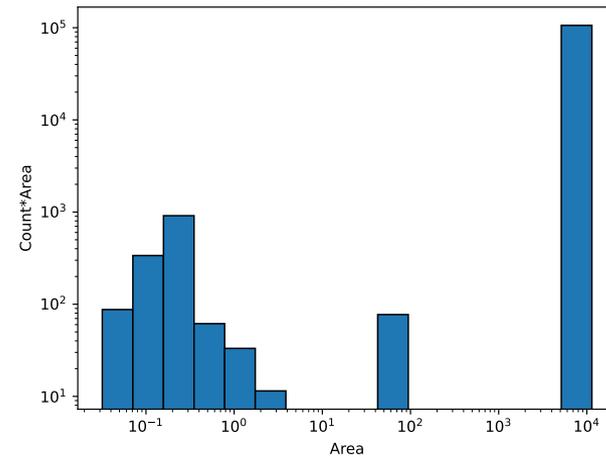
Gauss $\tau = 5$ 10 simulations



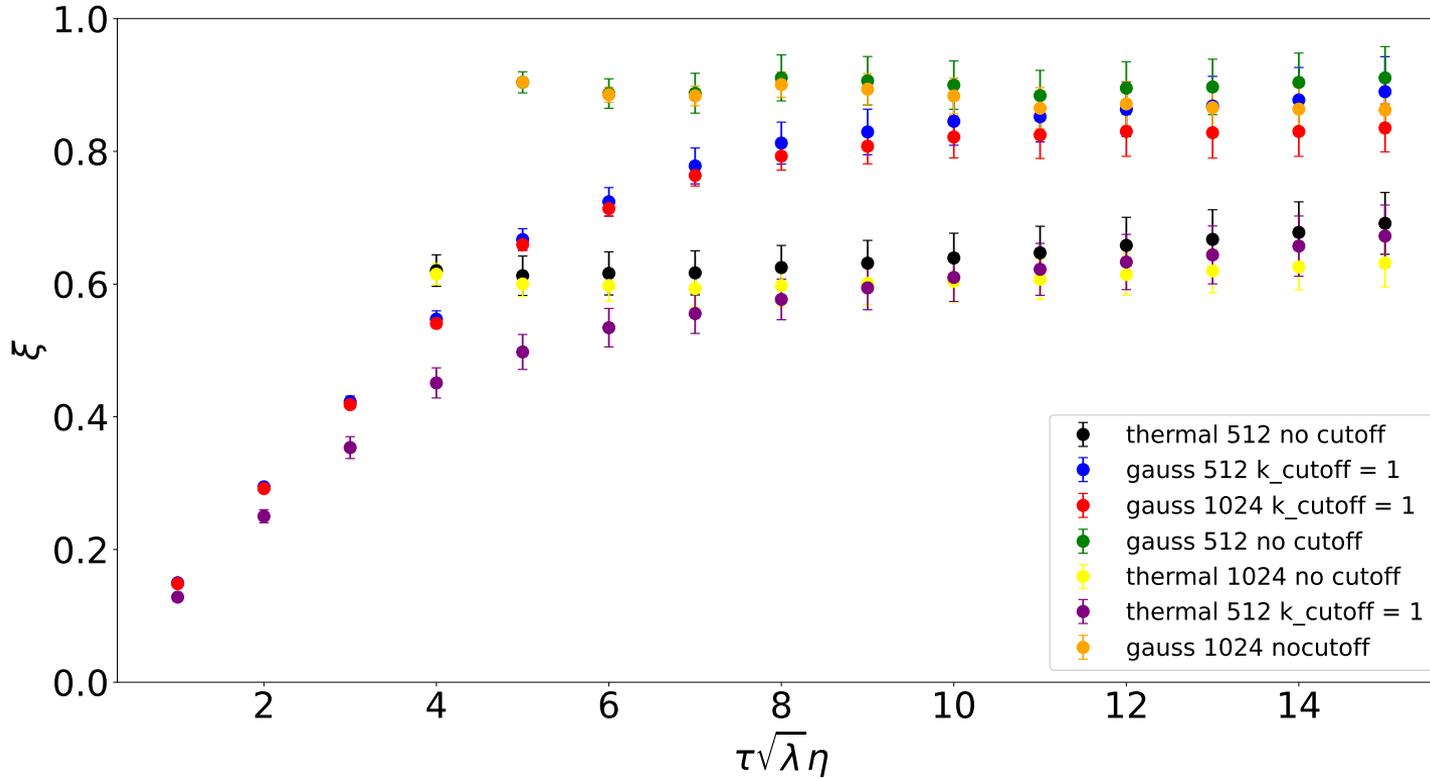
Gauss $\tau = 10$ 10 simulations



Gauss $\tau = 15$ 10 simulations



Скейлинг-параметр



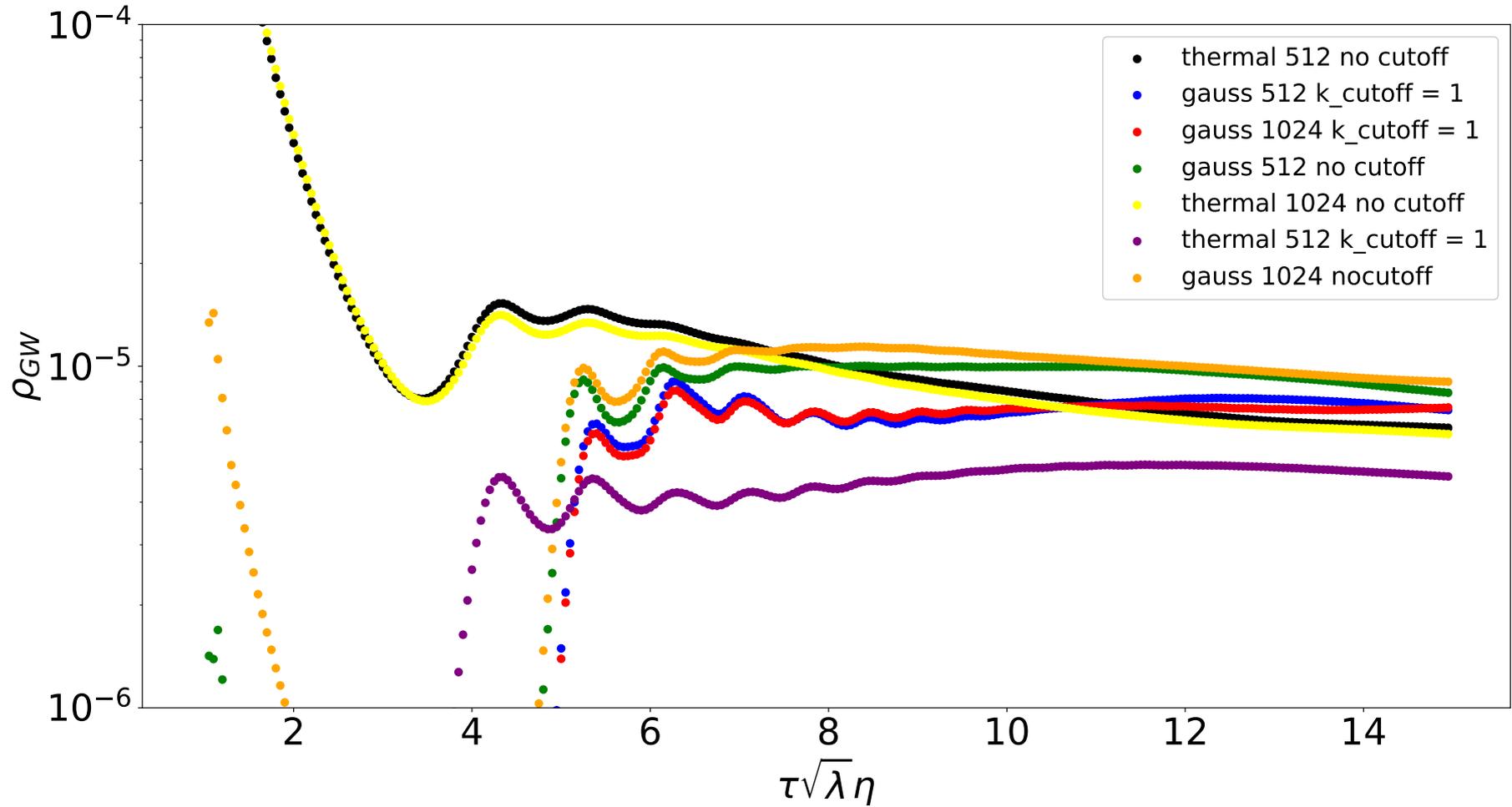
$$\tau_f \simeq \frac{5}{\sqrt{\lambda\eta}}$$

$$\delta_w \simeq 0.06 H^{-1}$$

$$\xi \simeq 0.8 \quad - \text{vacuum}$$

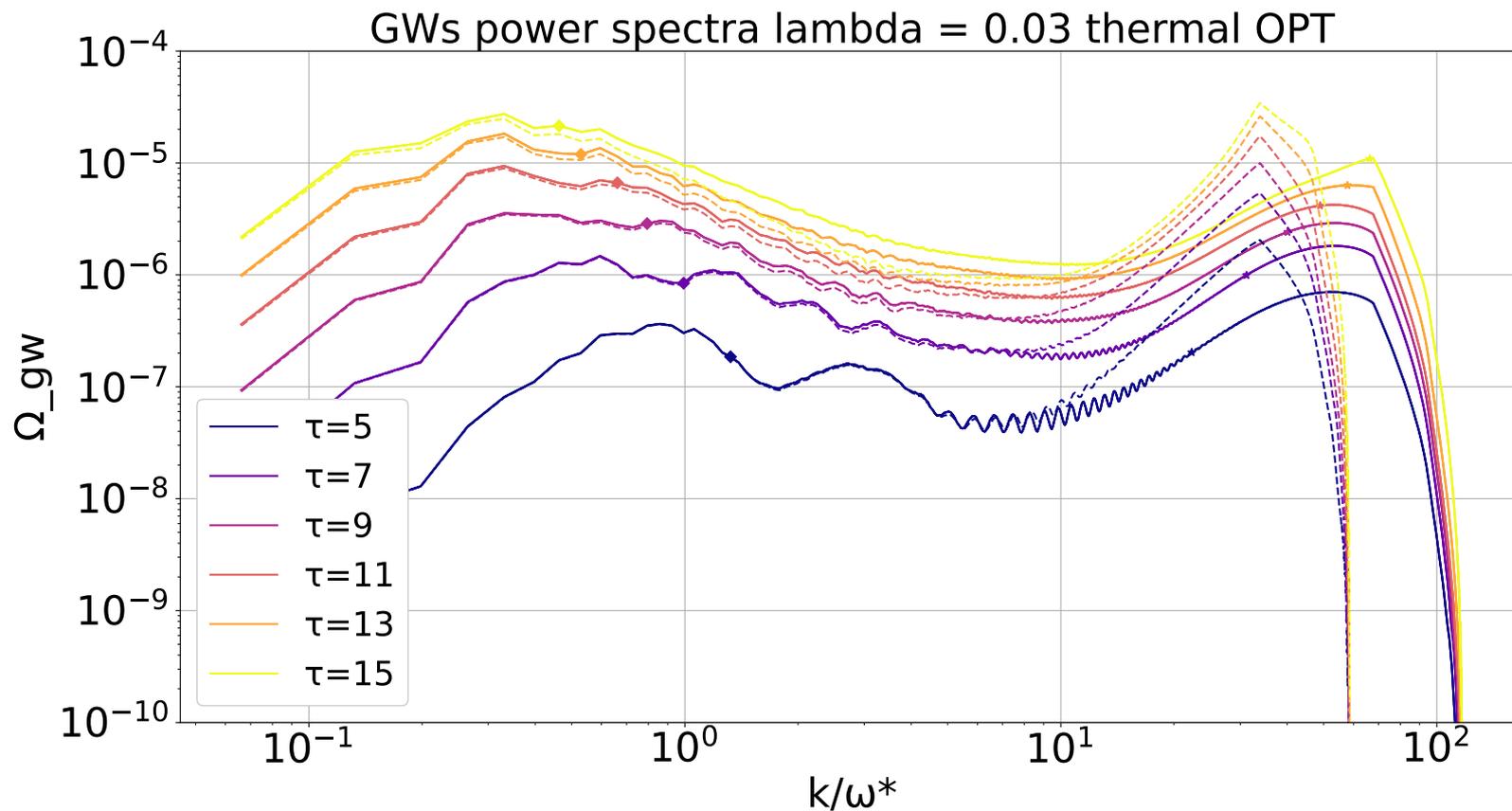
$$\xi \simeq 0.6 \quad - \text{thermal}$$

Плотность энергии грав. волн

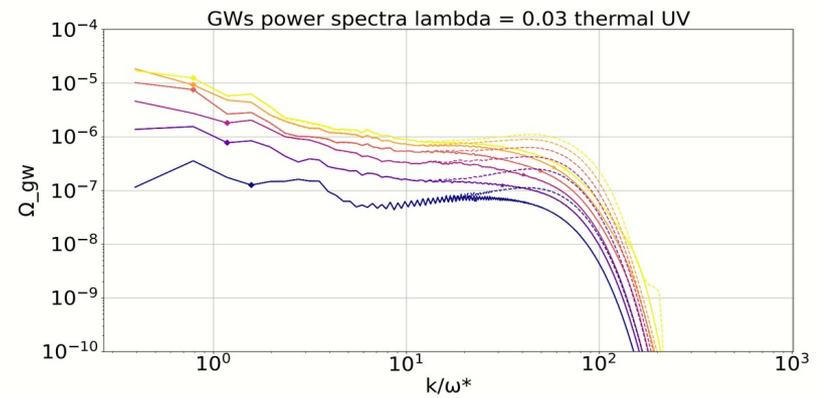
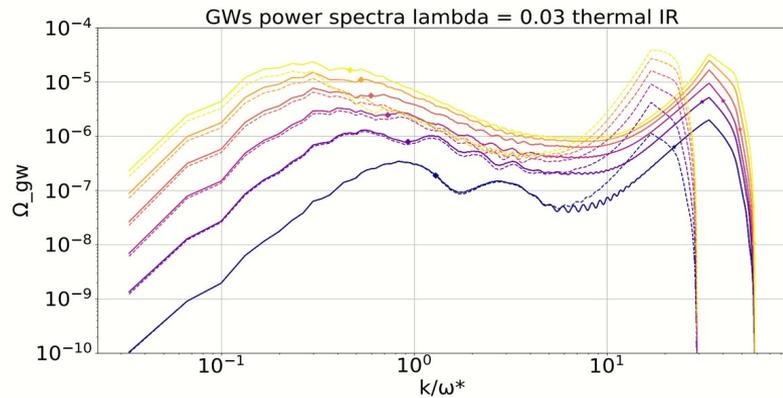
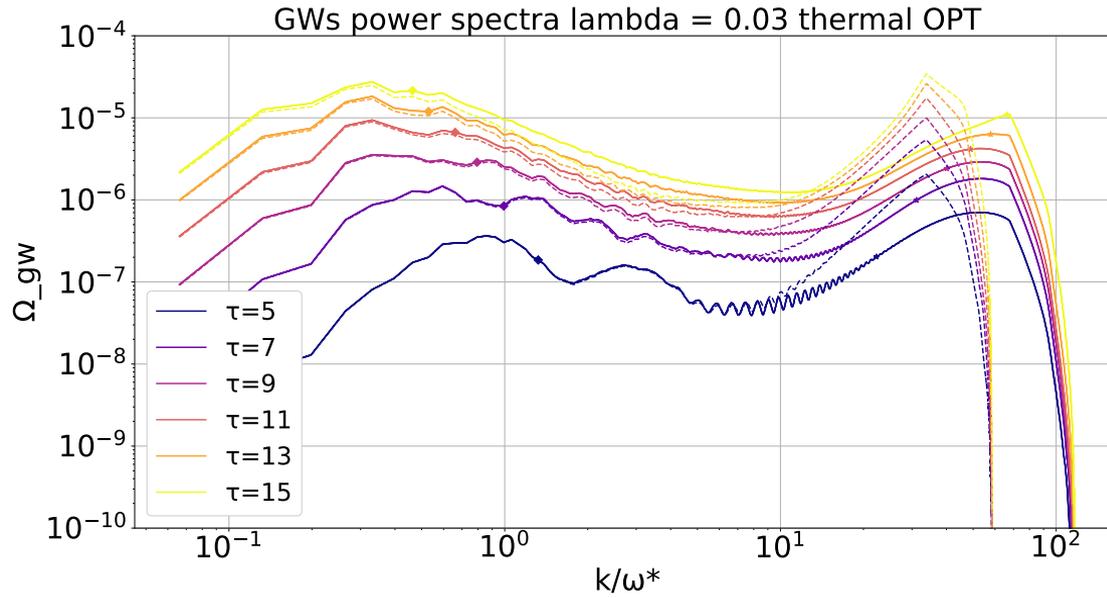


$$\Omega_{\text{GW}} \equiv \frac{1}{\rho_c} \frac{d\rho_{\text{GW}}}{d \ln k}$$

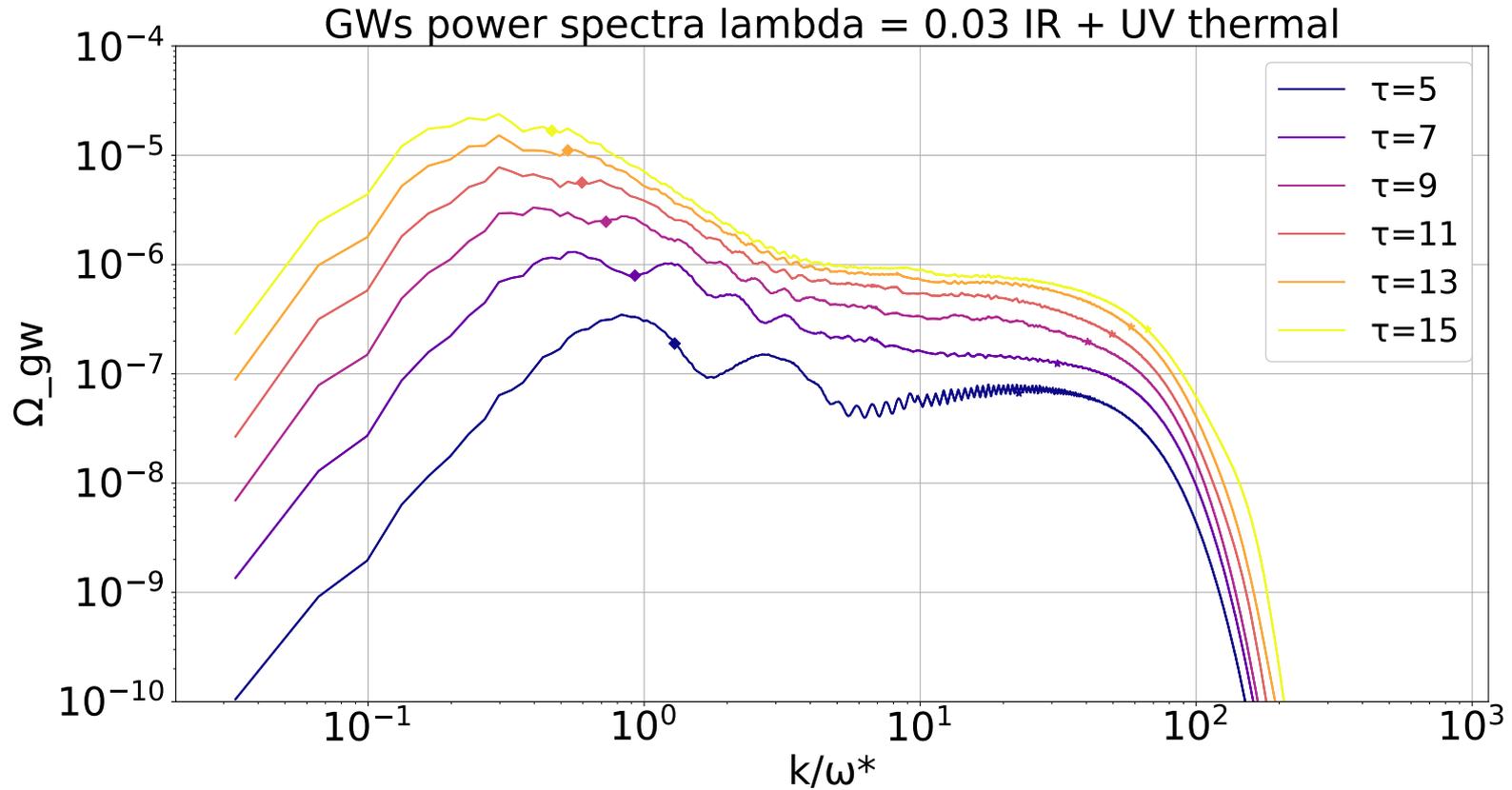
Численный артефакт



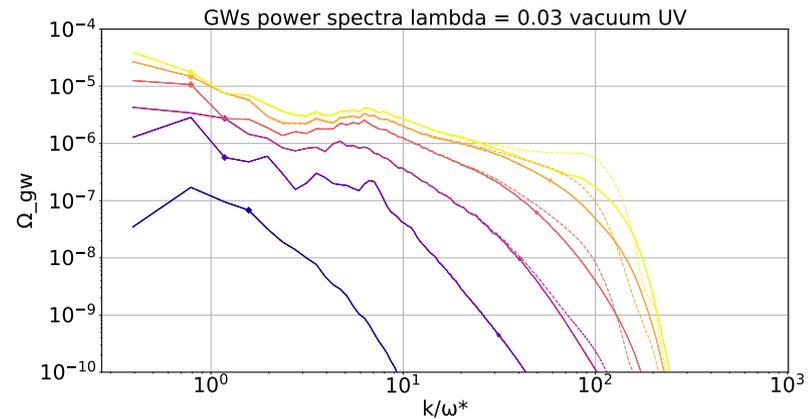
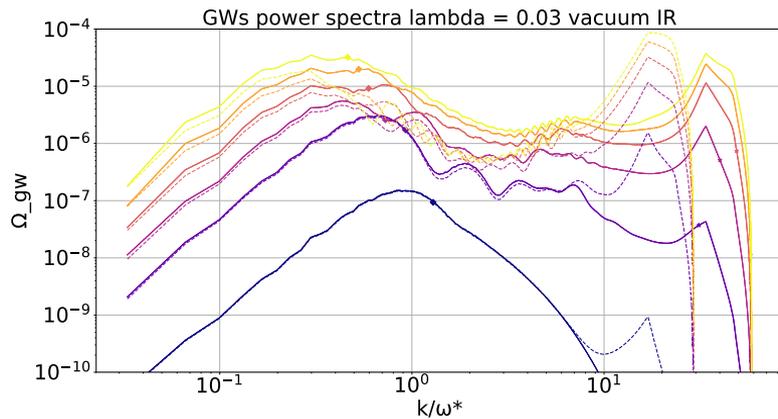
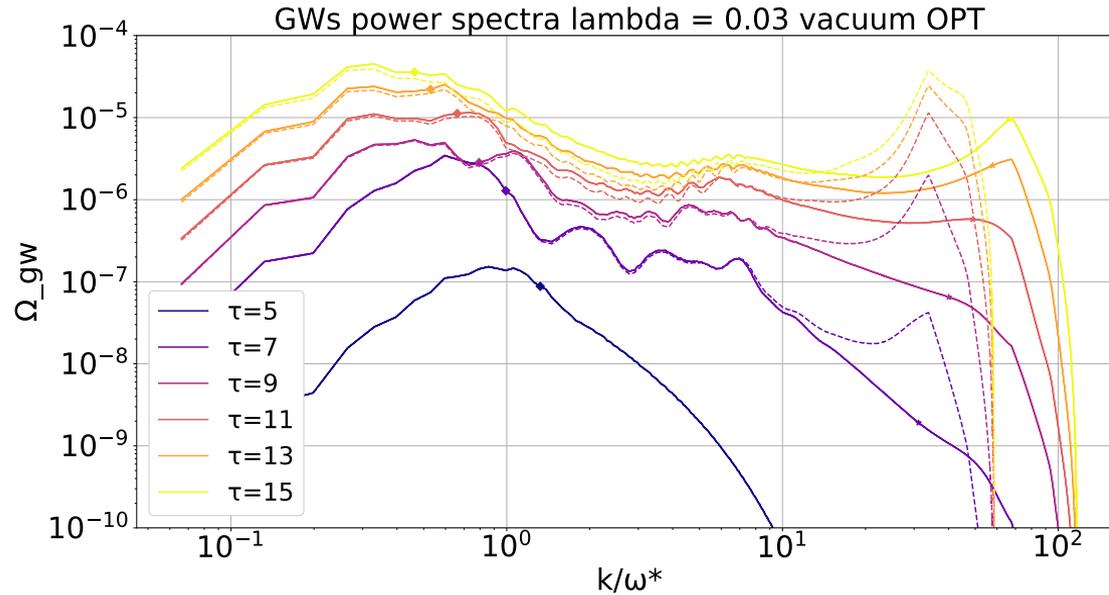
Спектр ГВ: термальные условия



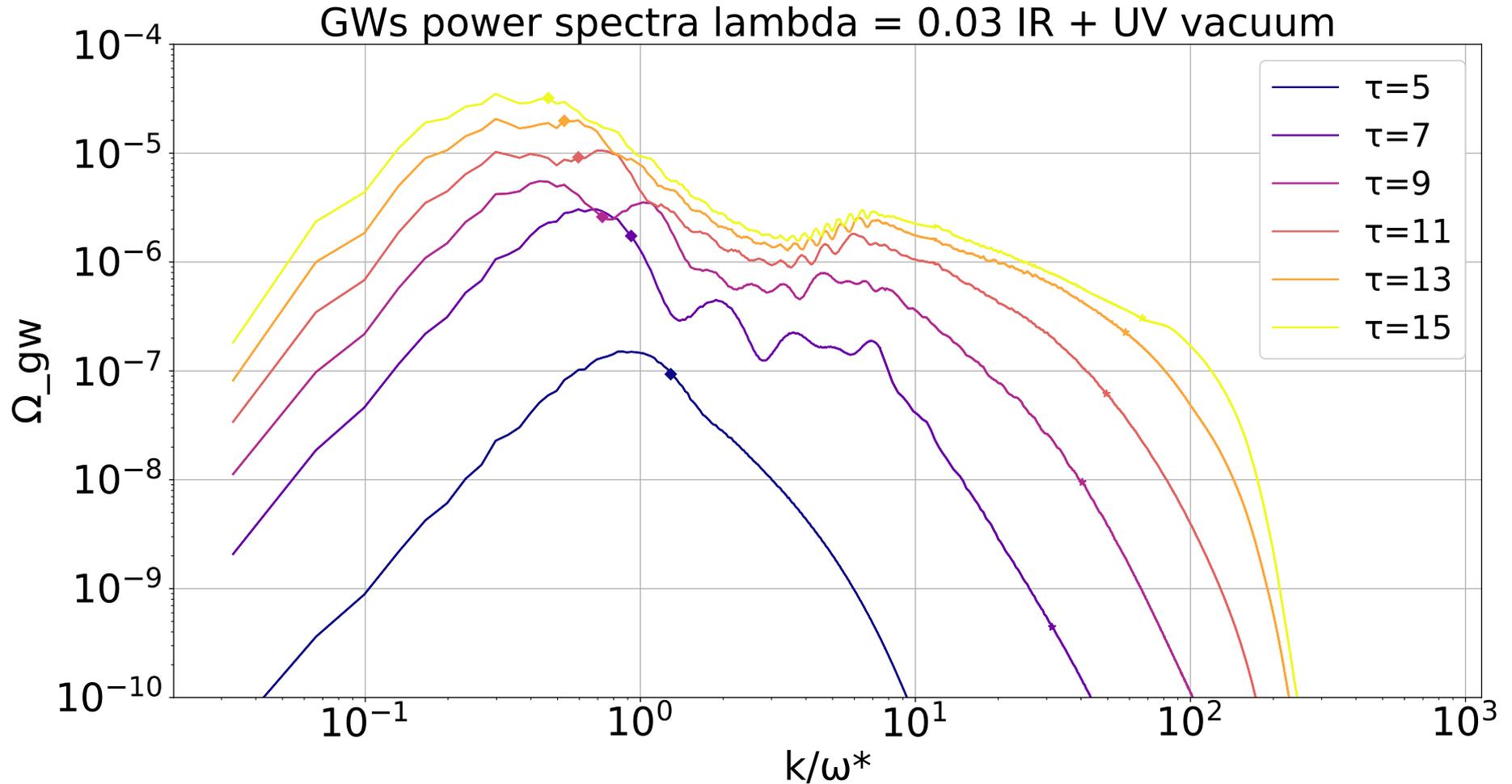
Спектр ГВ: термальные условия



Спектр ГВ: вакуумные условия



Спектр ГВ: вакуумные условия



Результаты

$$\Omega_{gw,peak}(\tau) \approx 4.6 \text{ (7.7)} \times 10^{-10} \cdot \left(\frac{H_i}{H(\tau)} \right)^2 \cdot \left(\frac{\eta}{6 \cdot 10^{16} \text{ GeV}} \right)^4 \quad \text{thermal (vacuum)}$$

$$\Omega_{gw,peak} h_0^2 \simeq 0.6 \text{ (1)} \cdot 10^{-10} \cdot \left(\frac{100 \text{ MeV}}{T_{dec}} \right)^4 \cdot \frac{\sigma_{wall}^2}{(100 \text{ TeV})^6} \cdot \left(\frac{10}{g_*(T_{dec})} \right)^{4/3} \quad \text{thermal (vacuum)}$$

$$\Omega_{gw} h_0^2 \propto k^3 \quad k \ll k_{peak} \quad k\tau \ll 1$$

$$\Omega_{gw} h_0^2 \propto k^{-1.3} \quad k_{peak} < k < k_* \quad \frac{d\rho_{gw}}{d \ln k} \propto k^3$$

$$\Omega_{gw} h_0^2 \simeq \text{const} \quad k_* < k < 2\pi a / \delta_w$$

$$f_{peak} = F_{peak} \cdot \frac{a_{dec}}{a_0} \simeq 0.7 H_{dec} \cdot \frac{a_{dec}}{a_0} \simeq 0.4 \text{ nHz} \left(\frac{T_{dec}}{100 \text{ MeV}} \right) \cdot \left(\frac{10}{g_*(T_{dec})} \right)^{1/3} \quad 16$$

Итоги

- Система доменных стенок входит в скейлинг-режим: ξ и плотность энергии г.в. становятся постоянными
- Разное значение ξ в случаях термальных и вакуумных начальных условий может иметь физическую причину
- В ИК части спектр ведет в соответствии с соображениями причинности
- Предложен путь избавления от численного артефакта в УФ части

Спасибо за внимание!