

Формирование доменных стенок и струн в ранней Вселенной

А. А. Кириллов, Б. С. Мурыгин

НИЯУ МИФИ

2021

Введение

- ▶ Существует множество различных моделей инфляции с потенциалами как степенной, так и нестепенной формы
- ▶ Некоторые из этих потенциалов содержат множество минимумов и седловых точек
- ▶ Сложная форма потенциала делает возможным появление топологических дефектов — солитонов
- ▶ Существование солитонов в ранней Вселенной может влиять на ее эволюцию
- ▶ Коллапс таких солитонов, как струны и доменные стенки может привести к образованию одиночных ПЧД или кластеров ПЧД

Модель

Лагранжиан для двух скалярных полей:

$$\mathcal{L} = \frac{1}{2} g_{\mu\nu} (\partial^\mu \varphi \partial^\nu \varphi + \partial^\mu \chi \partial^\nu \chi) - \mathcal{V}(\varphi, \chi)$$

Уравнения движения:

$$\begin{cases} \varphi_{tt} + 3H\varphi_t - \varphi_{xx} - \varphi_{yy} = -\frac{\partial\mathcal{V}}{\partial\varphi}, \\ \chi_{tt} + 3H\chi_t - \chi_{xx} - \chi_{yy} = -\frac{\partial\mathcal{V}}{\partial\chi}. \end{cases}$$

Модель

Граничные условия:

$$-\infty \leq x \leq \infty, -\infty \leq y \leq \infty$$

$$\begin{cases} \varphi_x(\pm\infty, y, t) = 0, \\ \varphi_y(x, \pm\infty, t) = 0. \end{cases} \quad \begin{cases} \chi_x(\pm\infty, y, t) = 0, \\ \chi_y(x, \pm\infty, t) = 0. \end{cases}$$

Начальные условия:

$$\begin{cases} \varphi(x, y, 0) = \mathcal{R} \cos \Theta + l_1, \\ \chi(x, y, 0) = \mathcal{R} \sin \Theta + l_2, \\ \varphi_t(x, y, 0) = 0, \\ \chi_t(x, y, 0) = 0, \end{cases} \quad \begin{cases} \mathcal{R}(r) = \frac{\mathcal{R}_0}{\cosh \frac{r_0}{r}}, \\ \Theta = \theta. \end{cases}$$

$\mathcal{R}_0, l_1, l_2, r_0$ — параметры.

Модель

Потенциал:

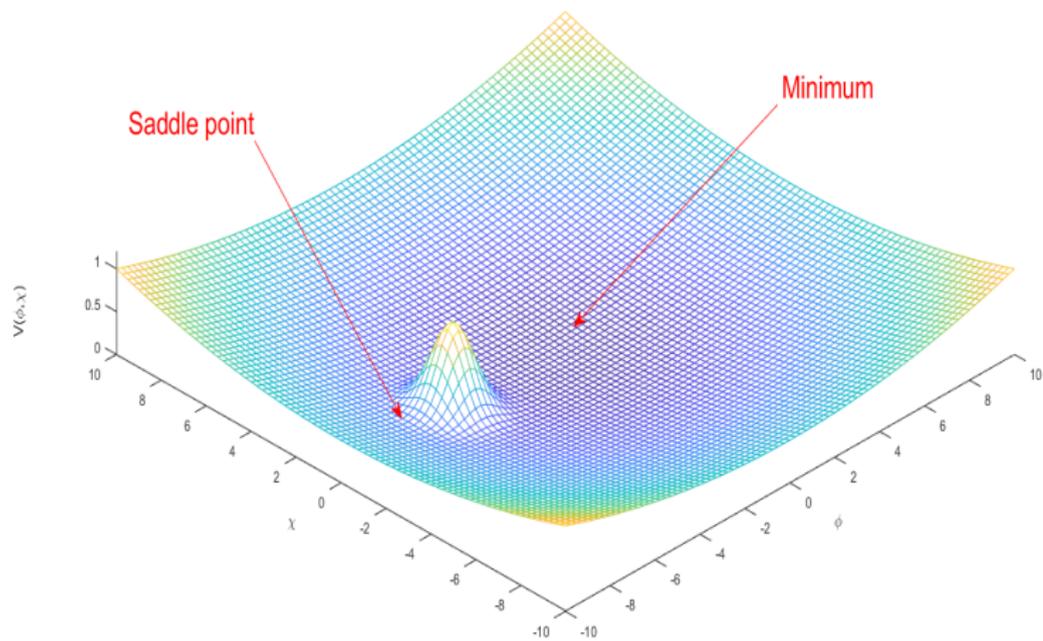
$$\mathcal{V}(\varphi, \chi) = \frac{m^2}{2}(\varphi^2 + \chi^2) + \Lambda^4 \exp \left[-\lambda((\varphi - \varphi_0)^2 + (\chi - \chi_0)^2) \right], \quad (1)$$

Параметры¹: $m, \Lambda, \lambda, \varphi_0 = -5, \chi_0 = 0$.

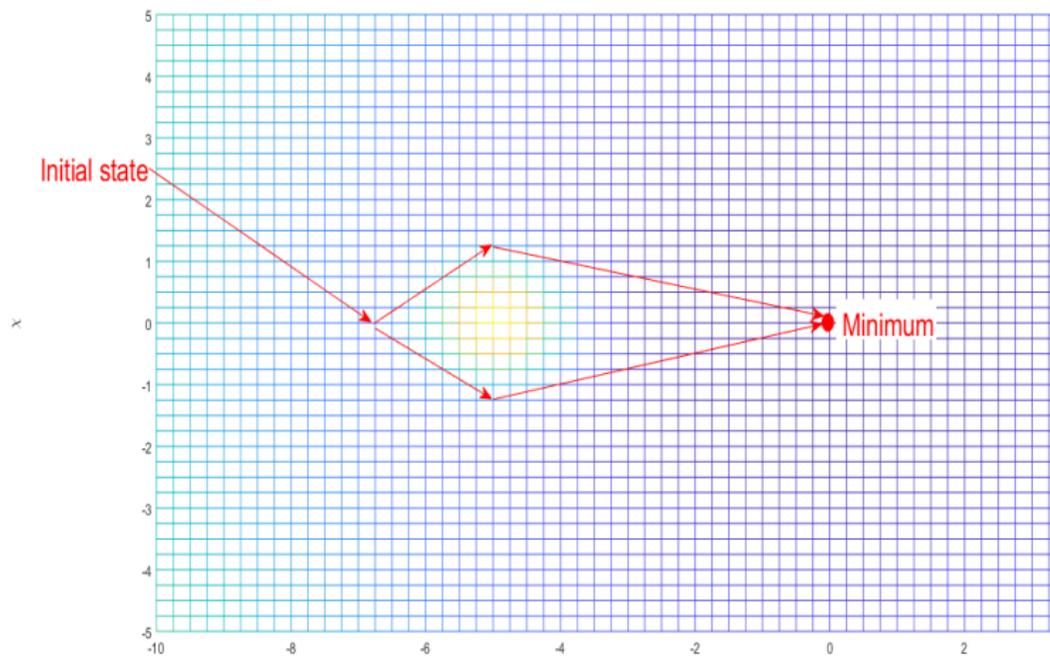
При таких значениях параметров потенциал имеет локальный максимум в точке $\varphi = -5, \chi = 0$.

¹Далее все величины даны в хаббловских единицах

Модель

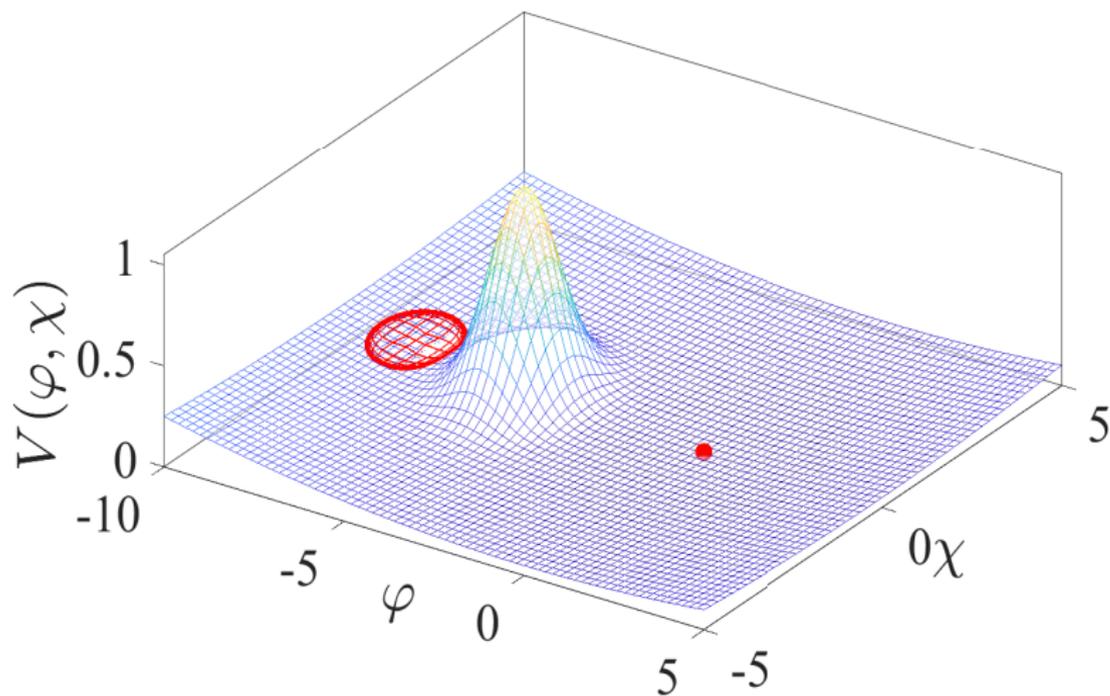


Модель



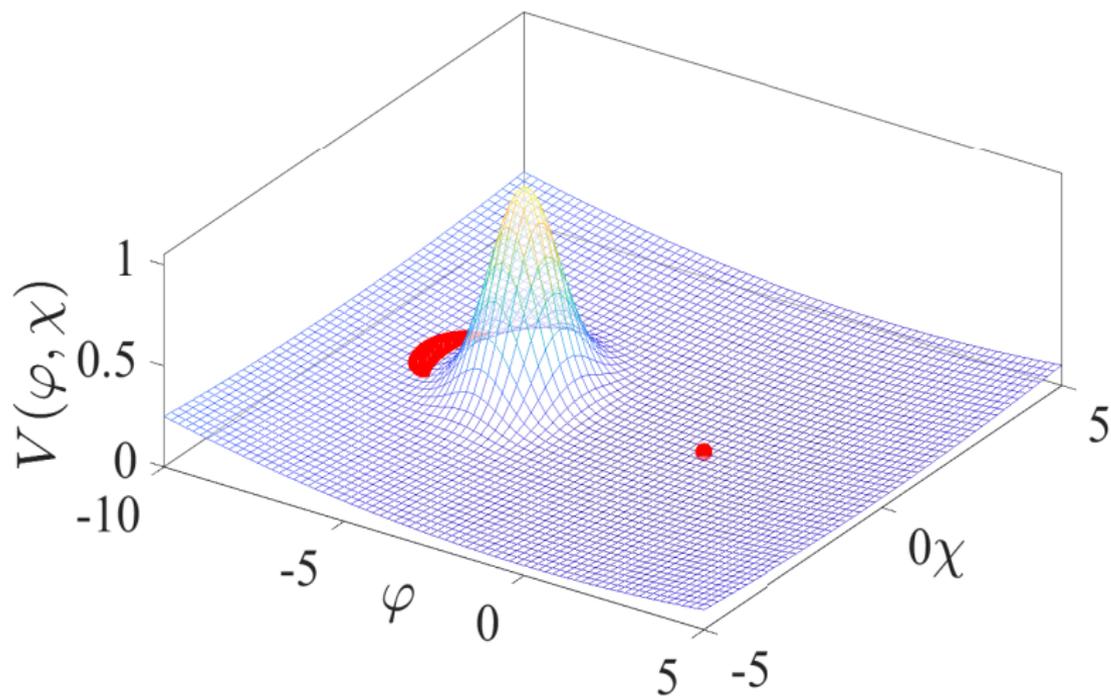
Эволюция локальных срезов

Значения параметров: $m = 0.06$, $\Lambda = 1$, $\lambda = 1$, $\varphi_0 = -5$, $\chi_0 = 0$
 $\mathcal{R}_0 = 1$, $r_0 = 1$, $l_1 = -8$, $l_2 = 0$, ,



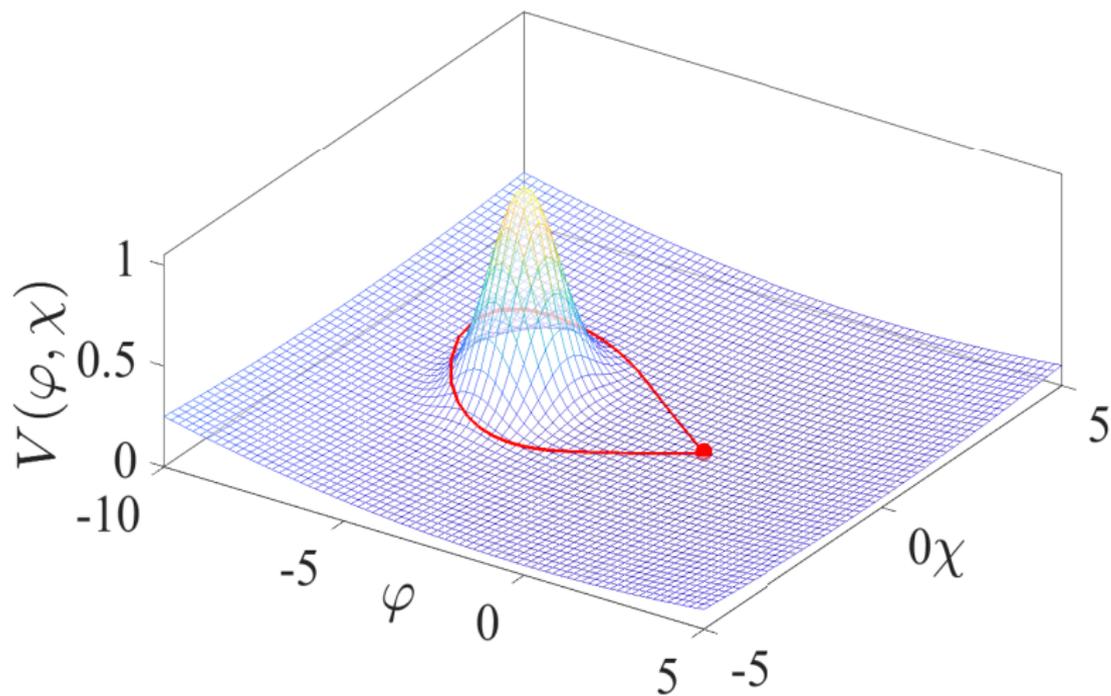
Эволюция локальных срезов

Промежуточное состояние



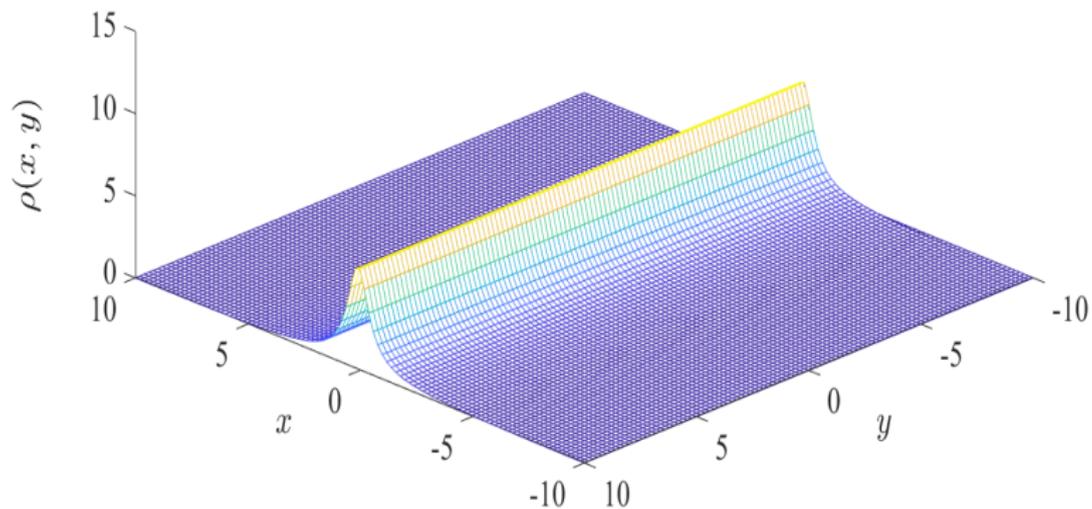
Эволюция локальных срезов

Конечное состояние



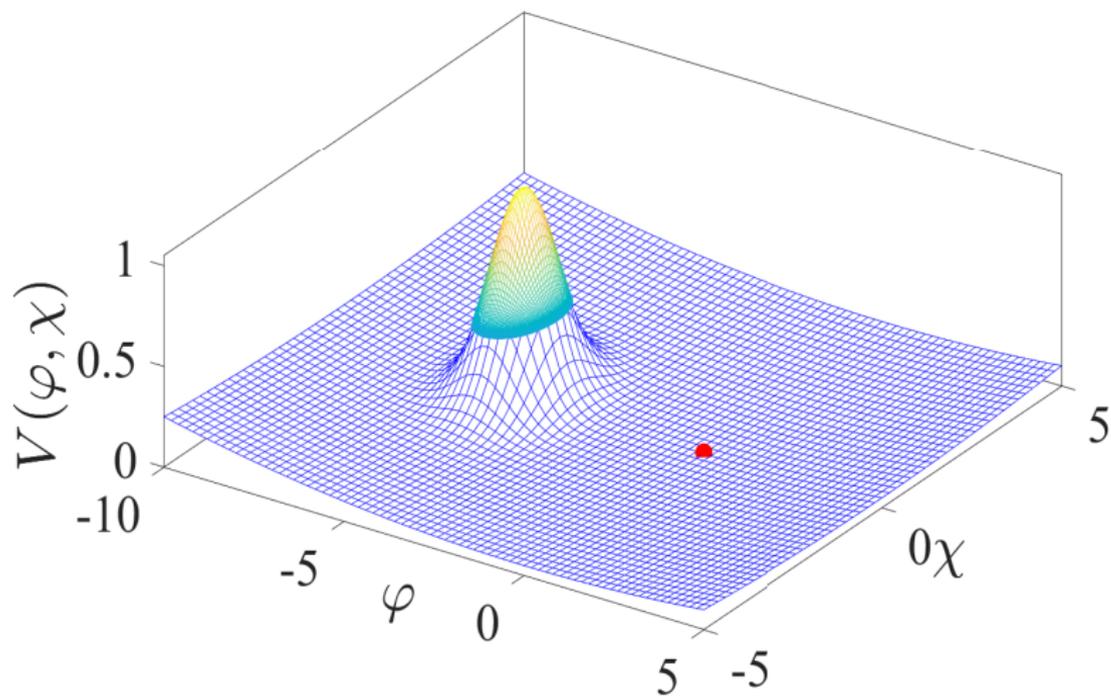
Эволюция локальных срезов

Плотность энергии в конечном состоянии



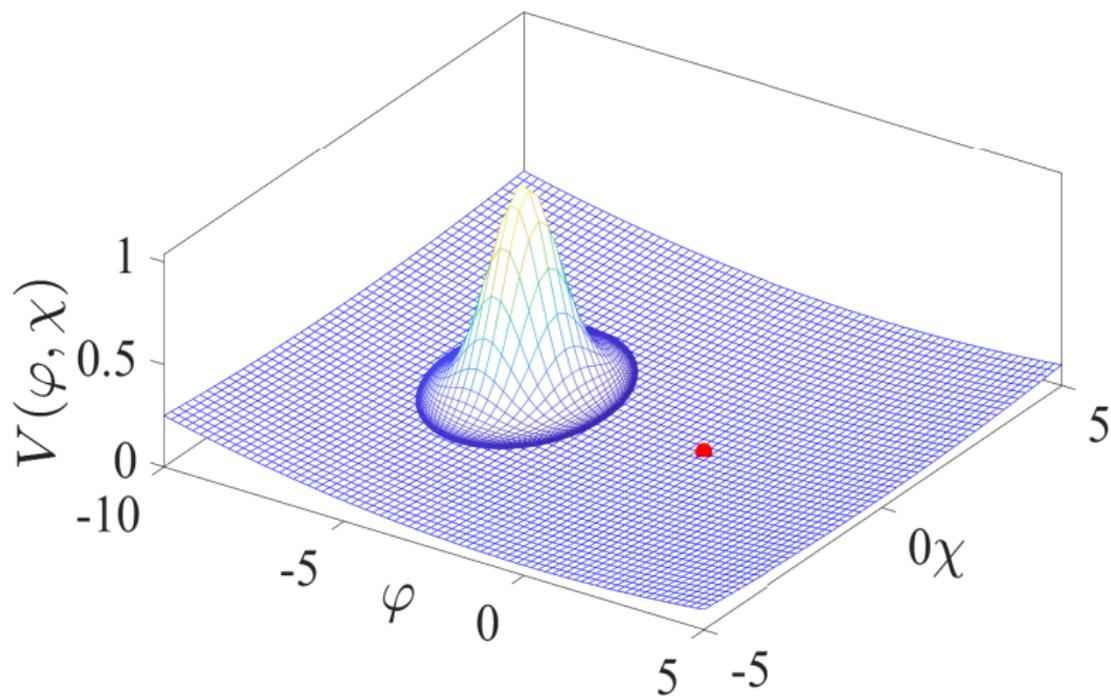
Эволюция локальных срезов

Значения параметров те же, что и в первом случае, за исключением $l_1 = -5$



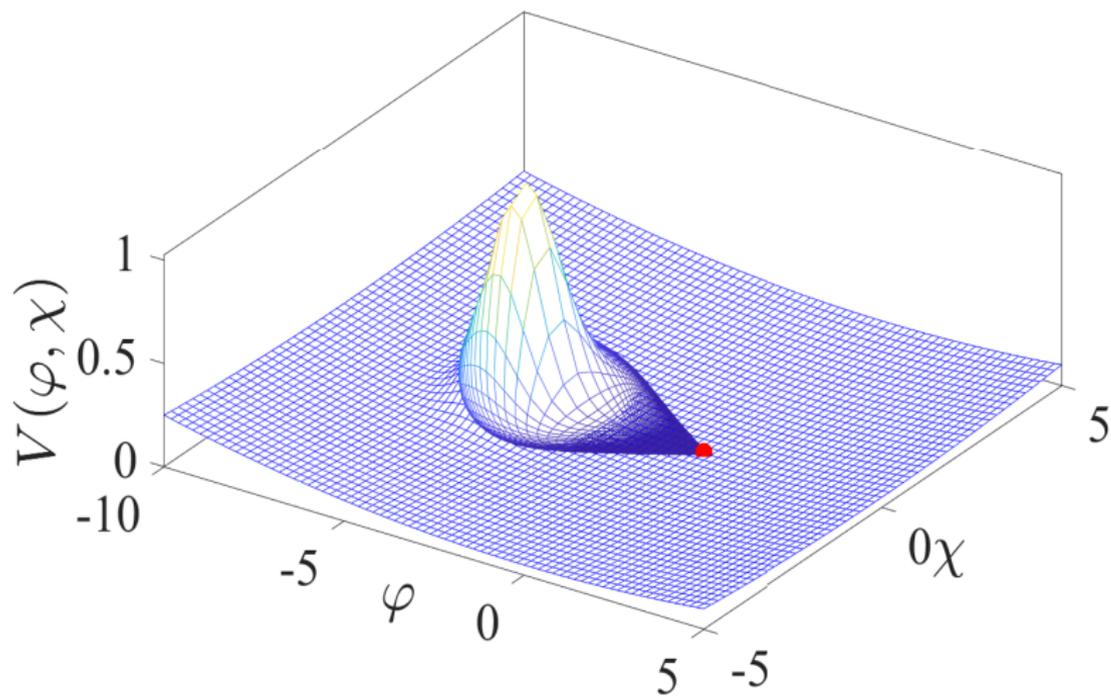
Эволюция локальных срезов

Промежуточное состояние



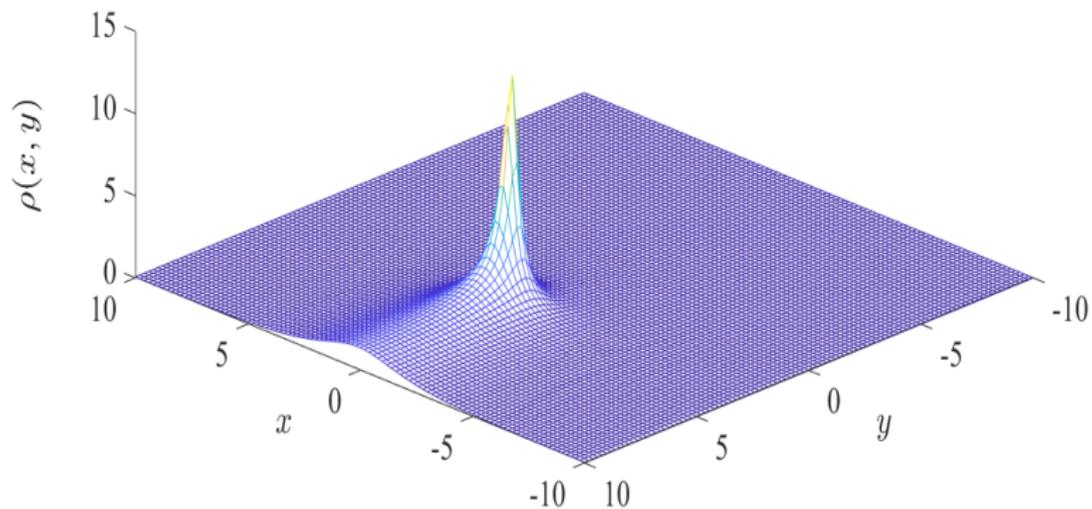
Эволюция локальных срезов

Конечное состояние



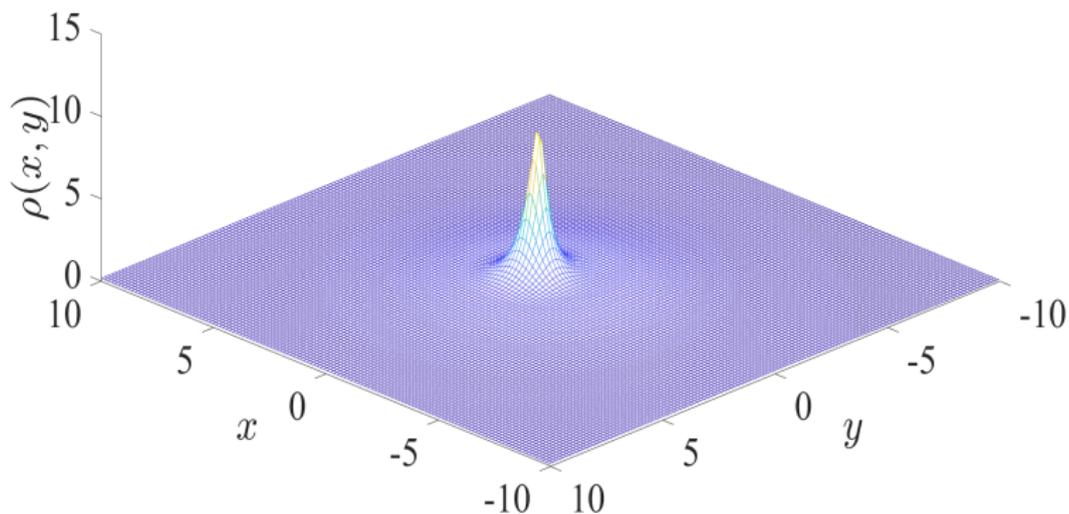
Эволюция локальных срезов

Плотность энергии в конечном состоянии



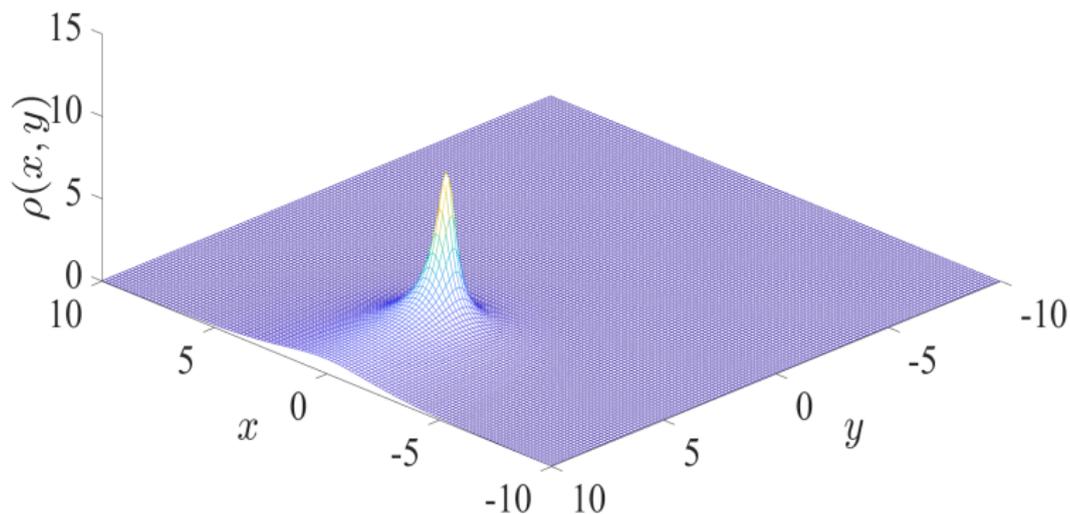
Эволюция локальных срезов

Движение струны вдоль гребня



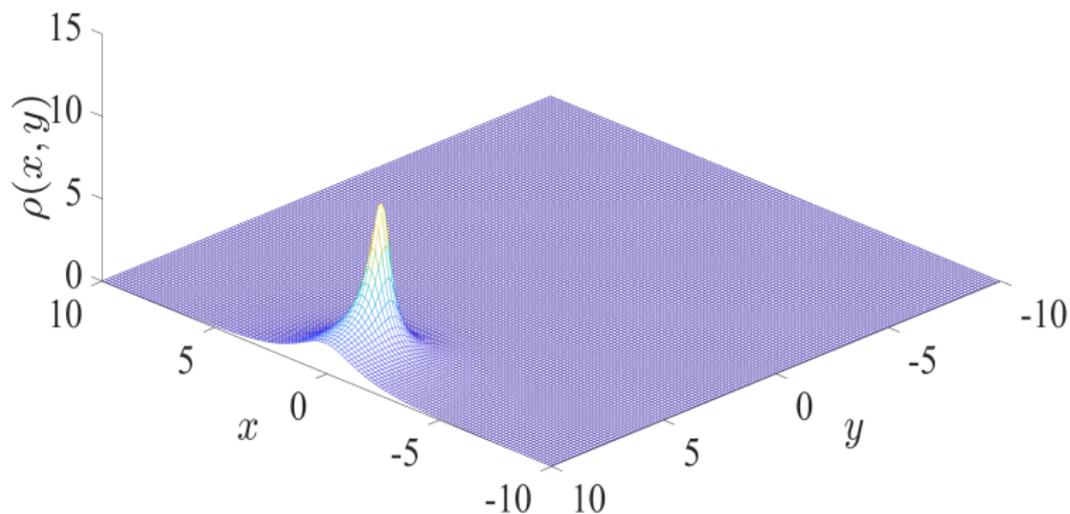
Эволюция локальных срезов

Движение струны вдоль гребня



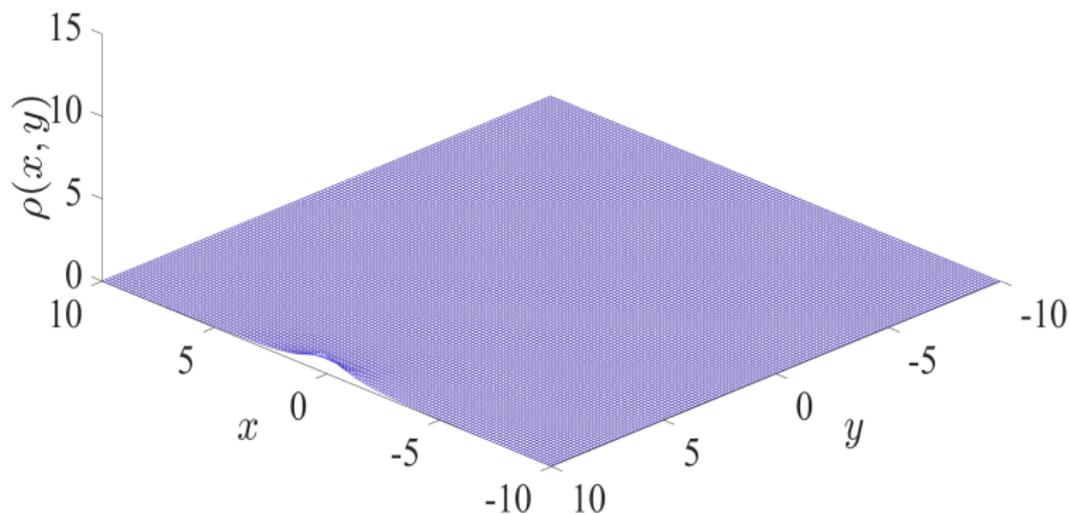
Эволюция локальных срезов

Движение струны вдоль гребня



Эволюция локальных срезов

Движение струны вдоль гребня

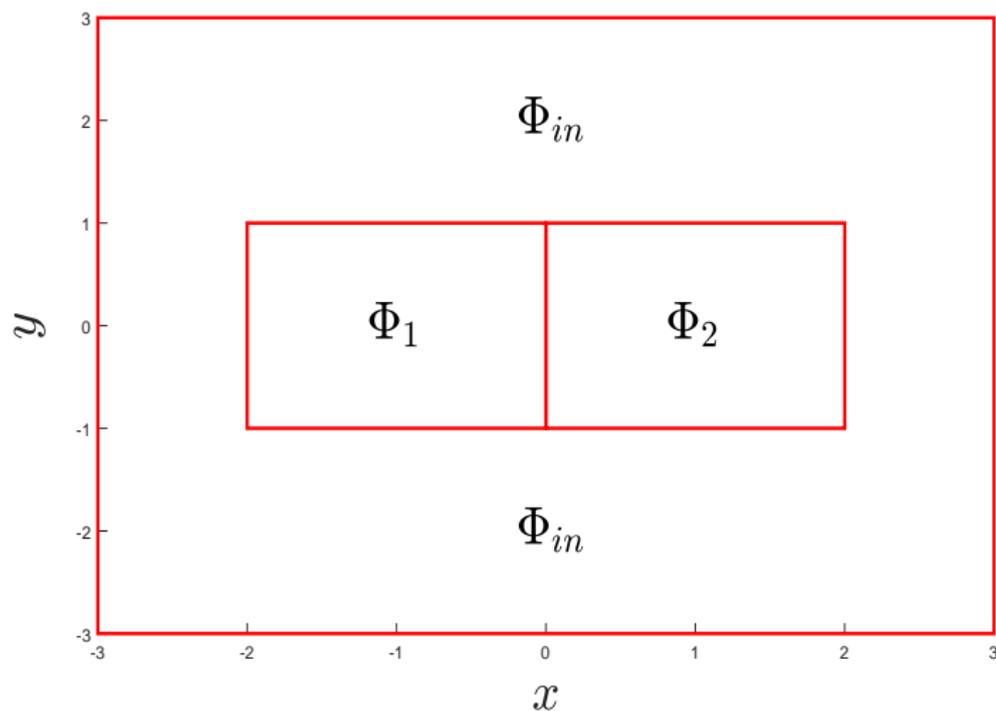


Модель 2

- ▶ В рассмотренных ранее случаях граничные значения полей не лежат в вакууме
- ▶ Это говорит о том, что рассмотренные двухмерные срезы не охватывают всю полевую конфигурацию, а лишь ее часть
- ▶ Чтобы рассмотреть полный срез нужно положить краевыми условиями вакуумные значения полей
- ▶ Кроме того, необходимо соблюсти определенные условия для появления солитонов в конфигурации

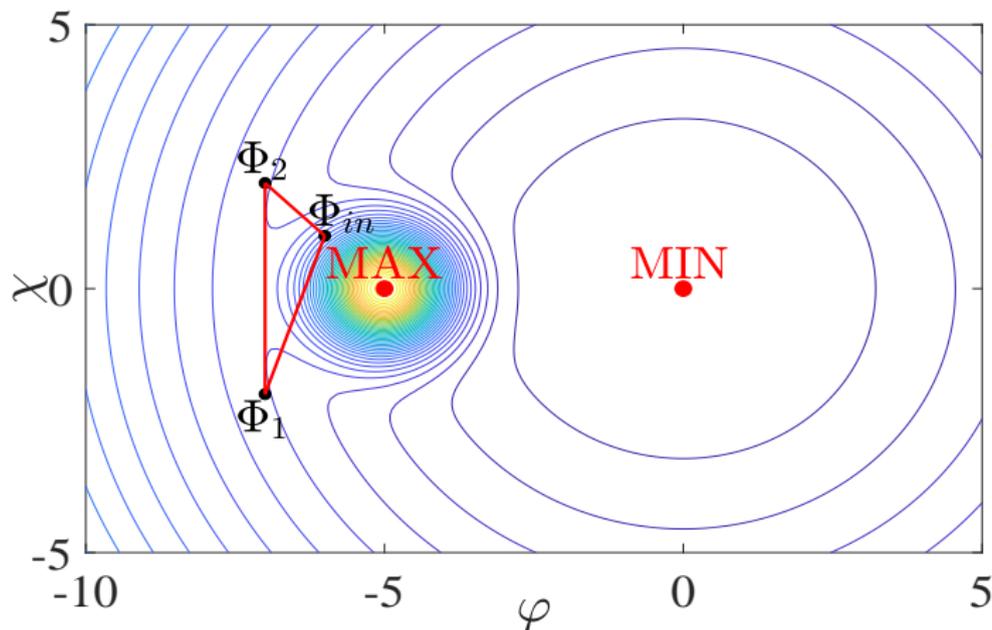
Модель 2

Конфигурация для рассмотрения полного среза



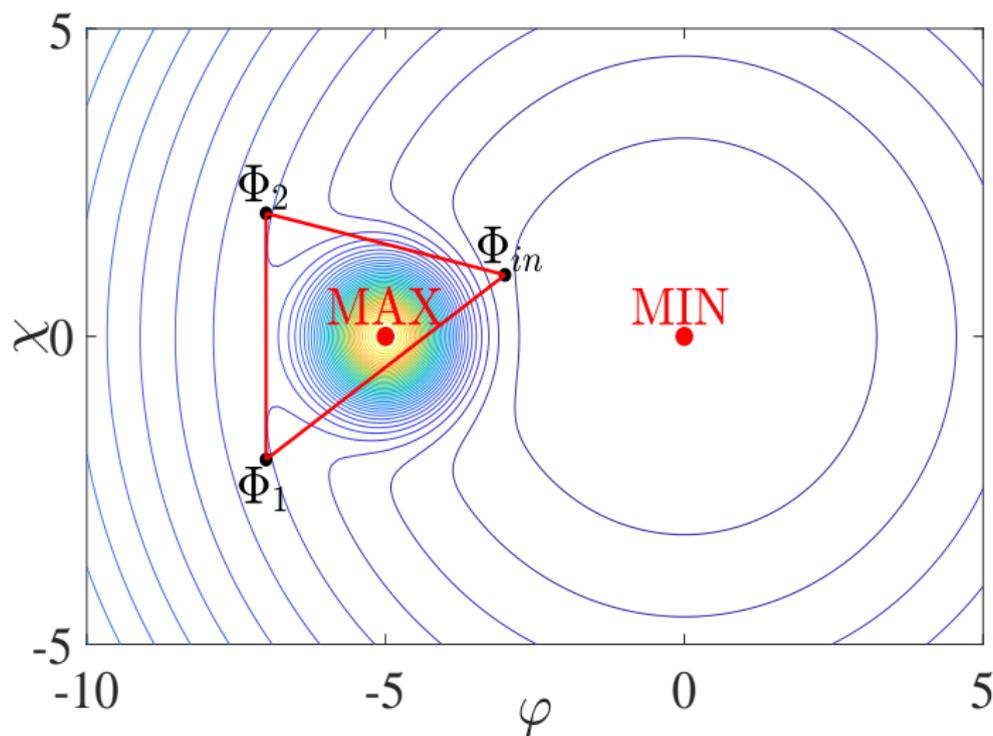
Модель 2

Значения $\Phi_{in} = [\varphi_{in}, \chi_{in}]$ и Φ_1, Φ_2 должны соответствовать условиям необходимым для образования струн и доменных стенок. Конфигурация полей удовлетворяющая условию для появления доменных стенок ($\Phi_{in} = [-6, 1]$, $\Phi_1 = [-7, -2]$ и $\Phi_2 = [-7, 2]$):



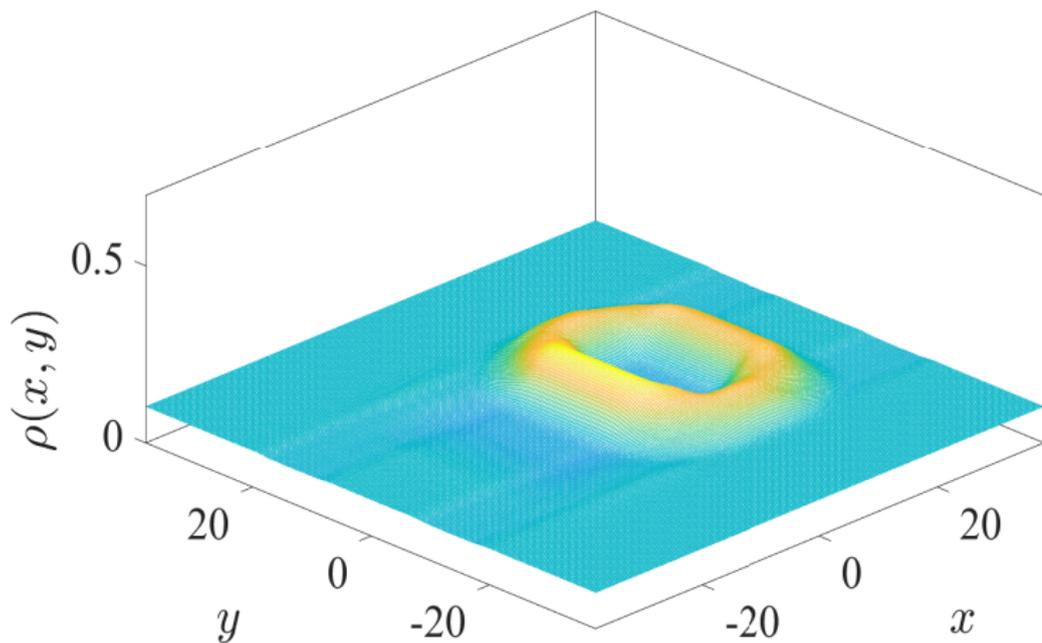
Модель 2

Конфигурация полей удовлетворяющая условию для появления струн ($\Phi_{in} = [-3, 1]$, $\Phi_1 = [-7, -2]$ и $\Phi_2 = [-7, 2]$):



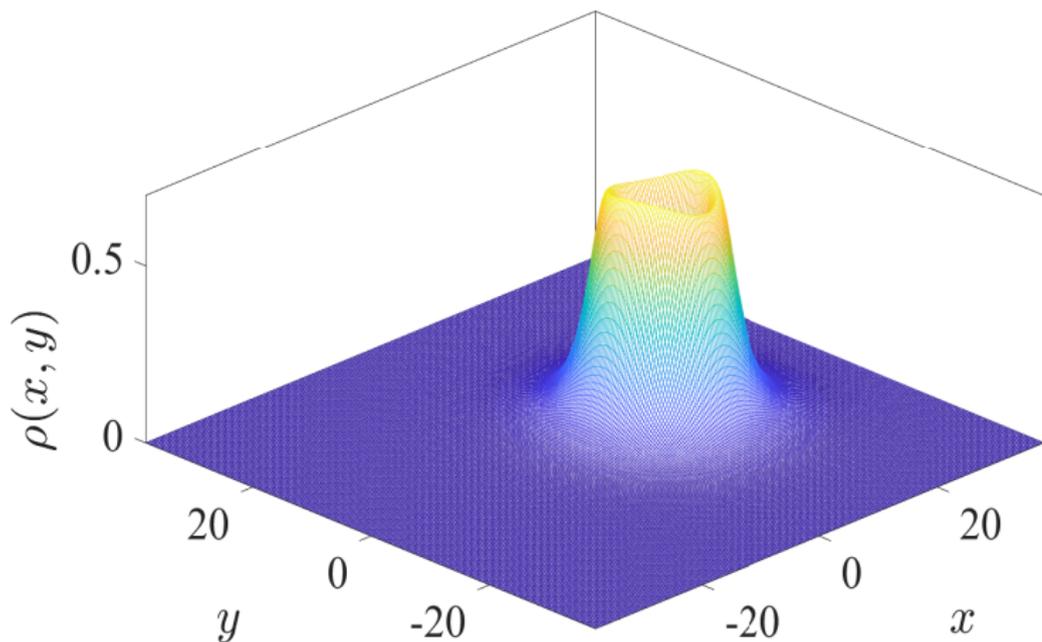
Эволюция срезов цельных структур

Начальное состояние для пузыря



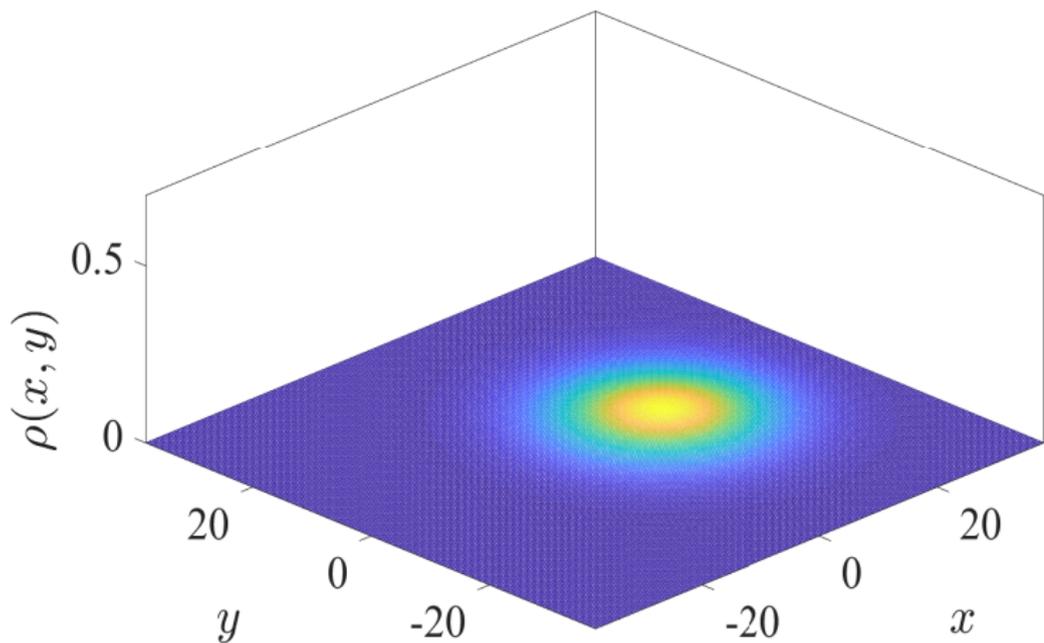
Эволюция срезов цельных структур

Промежуточное состояние для пузыря



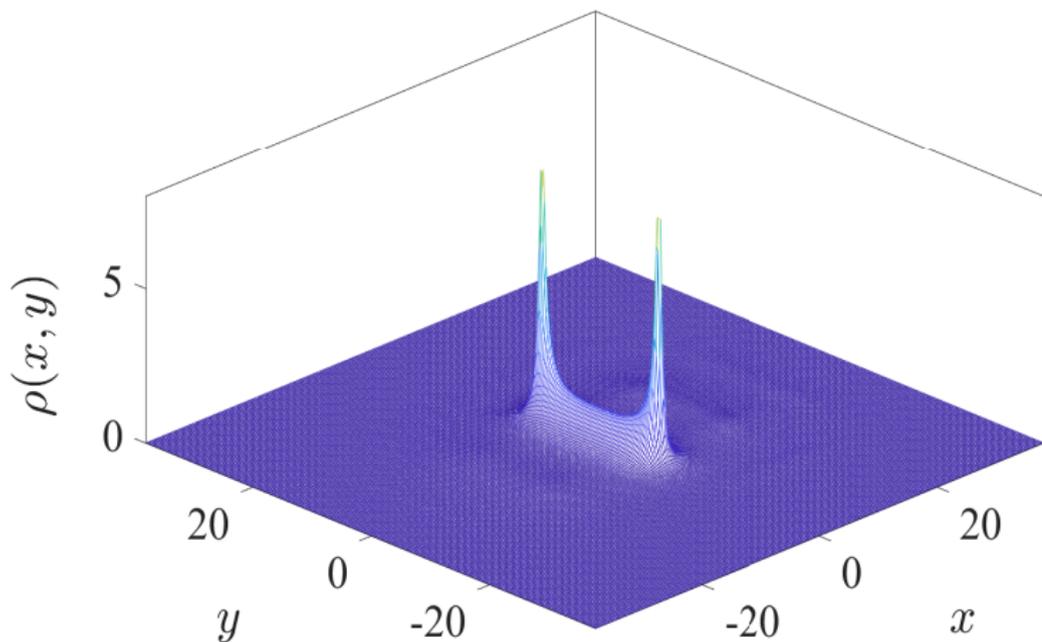
Эволюция срезов цельных структур

Конечное состояние для пузыря



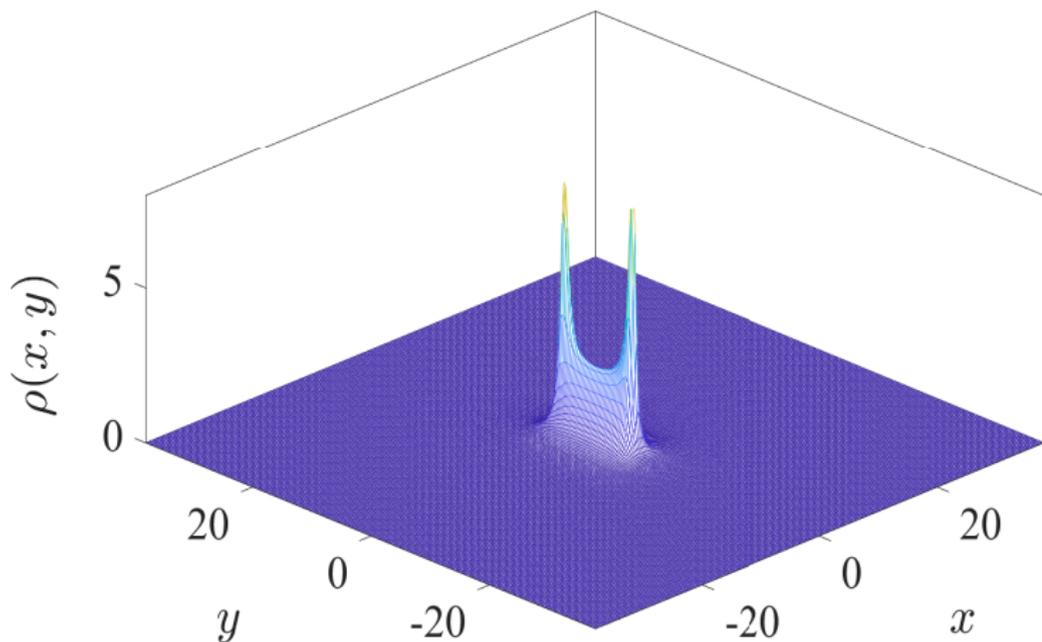
Эволюция срезов цельных структур

Начальное состояние для блина



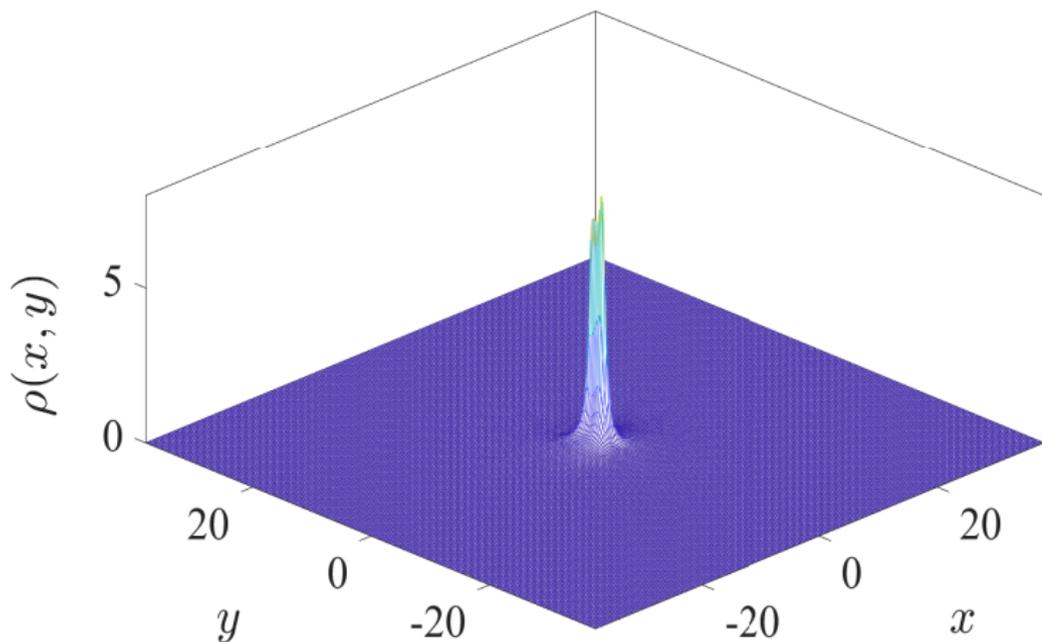
Эволюция срезов цельных структур

Промежуточное состояние для блина



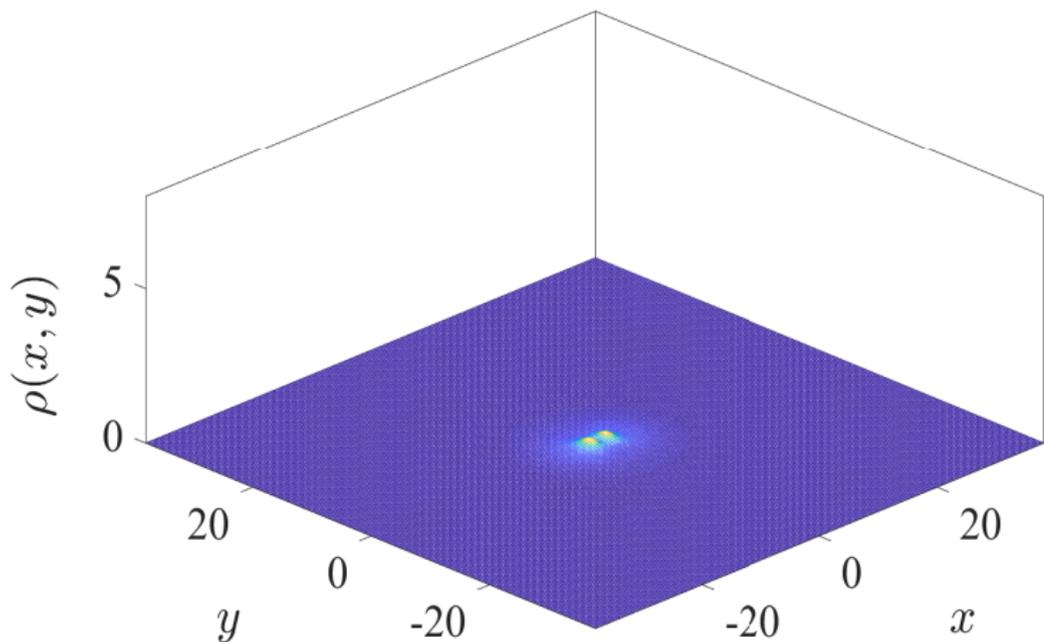
Эволюция срезов цельных структур

Промежуточное состояние для блина



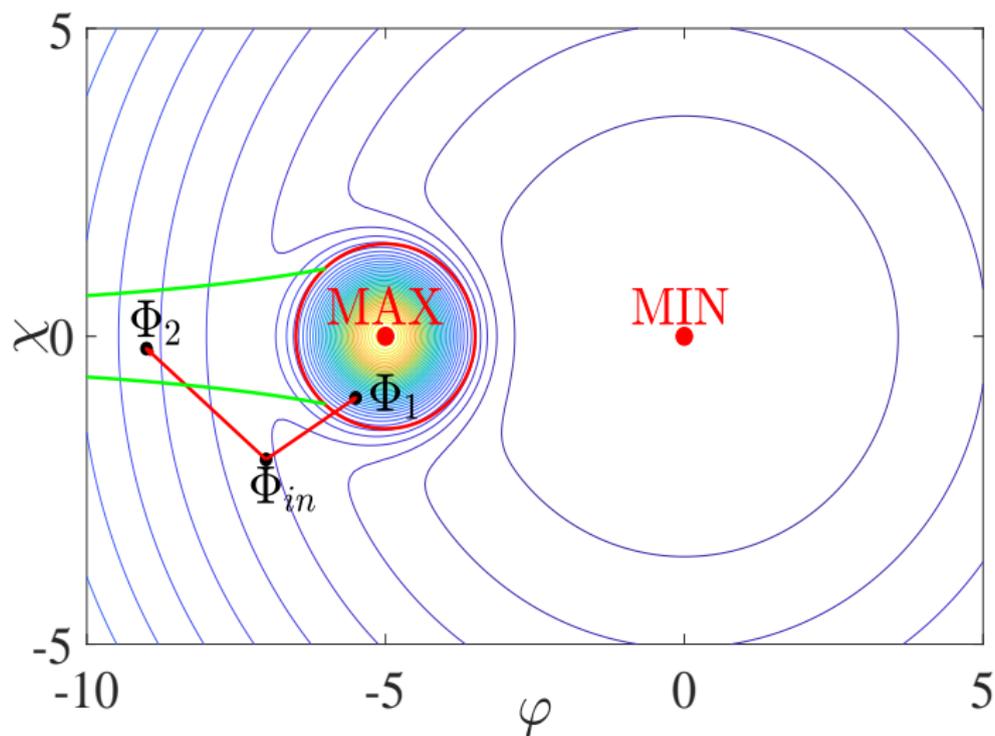
Эволюция срезов цельных структур

Конечное состояние для блина



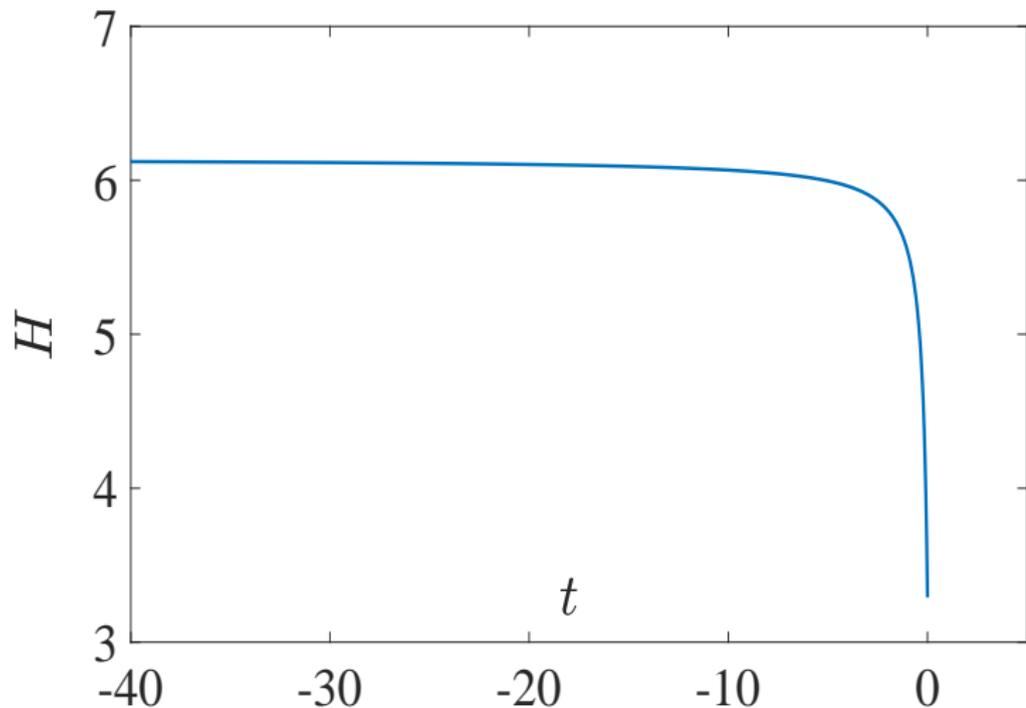
Качественная оценка вероятности образования

$$\kappa \sim 10^3$$



Учет зависимости параметра Хаббла от времени

$$V = V_0 \left(1 - \exp^{-\sqrt{2/3}\sigma}\right)^2 \quad (2)$$



Заклучение

- ▶ Было показано, что в результате эволюции системы могут образовываться доменные стенки или струны в зависимости от начальных условий
- ▶ Показано, что в данной модели струны не могут образовываться отдельно от стенок
- ▶ Показано поведение целого двумерного среза конфигурации полей
- ▶ Результатом эволюции полей может явиться появление пузырей, блинов и тривиальное скатывание в вакуум
- ▶ Была учтена зависимость параметра Хаббла от времени
- ▶ Проведена качественная оценка вероятности появления доменных стенок и струн

Дополнительные слайды

