

Динамика несферических доменных стенок

Летягин Иван Дмитриевич
Научный руководитель к.ф.-м.н, доц., Никулин В.В.

Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

Отчет о научно-исследовательской работе

Москва, 28 декабря 2024 г.

Первичные чёрные дыры (ПЧД)

Ещё в 1967 году Зельдович Я.Б. и Новиков И.Д. выдвинули гипотезу о существовании первичных чёрных дыр, но до сих пор они не были обнаружены.

Эксперименты, направленные на поиск ПЧД: LIGO, VIRGO, GEO600, TAMA 300 и проекты LISA, NANOGrav.

Рассматриваемая теория образования ПЧД - коллапс полевых доменных стенок.

Главное отличие ПЧД от классических чёрных дыр заключается в крайне широком спектре масс ПЧД.

Доменная стенка — топологический солитон, образованный в процессе спонтанного нарушения калибровочной симметрии при охлаждении Вселенной или из-за квантовых флуктуаций вакуума. Она располагается между двумя соседними минимумами поля.

Действие

$$S = \int d^4x \left(\frac{1}{2} \phi_{,\mu} \phi^{,\mu} - V(\phi) \right) \quad (1)$$

ϕ^4 -потенциал

$$V(\phi) = \lambda(\phi^2 - v^2)^2 \quad (2)$$

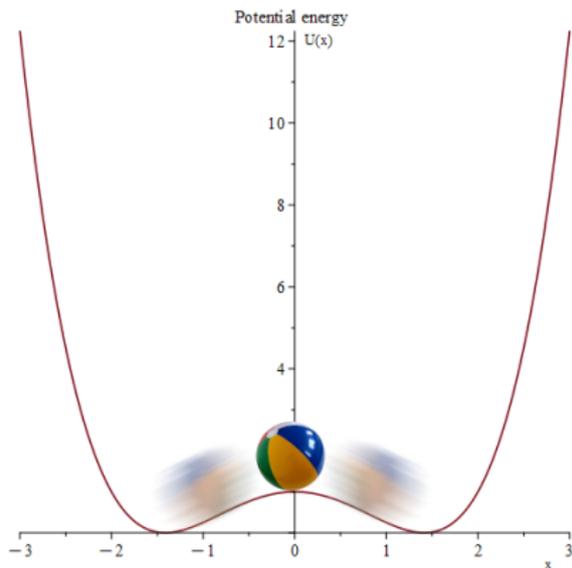


Рис.: Падение в один из минимумов из-за квантовых флуктуаций



Рис.: Минимумы разных знаков в пространстве

Эволюция полевой доменной стенки задаётся уравнением:

Уравнение Клейна-Гордона

$$\phi_{,\mu}{}^\mu + \frac{\partial V(\phi)}{\partial \phi} = 0 \quad (3)$$

Статическим решением уравнения (3) является топологический солитон - кинк:

Уравнение кинка в приближении тонкой стенки

$$\phi = v \operatorname{th}\left(\pm \sqrt{\frac{\lambda}{2}} v (r - r_0)\right) \quad (4)$$

В предыдущих исследованиях рассматривалась эволюция только сферических замкнутых доменных стенок («пузырей»), но в ходе компьютерного моделирования получают структуры более сложных геометрий.

Поэтому возникла новая задача – рассмотреть динамику несферических доменных стенок, а также узнать, какие доменные конфигурации коллапсируют в ПЧД.

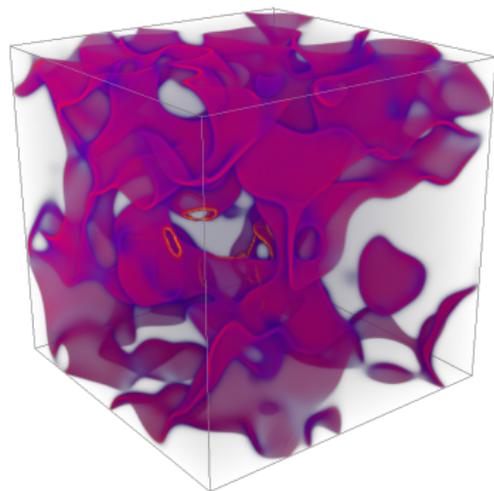


Рис.: «Солитонная пена»

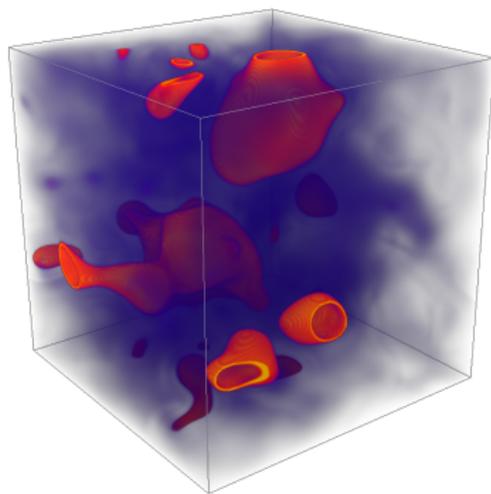


Рис.: «Доменные пузыри»

Проблема: Сложность численных расчётов стенок нетривиальных конфигураций.

Задача: Найти методы описания несферических геометрий пузырей.

Возможные решения:

- 1 Введение криволинейных 4-координат (похожих на сферические) с условием $\phi(X^\mu(t, R, \sigma_1, \sigma_2)) = 0$, которое задаёт поверхность стенки при постоянном значении R . Данное предположение даёт возможность перейти от уравнения $F(\phi) = 0$ к уравнению $F(X^\mu) = 0$ при описании доменной стенки.
- 2 Использование инструментария тетрадной теории гравитации. Встречается в статье *Antigravitating Bubbles*¹.

¹Andro Barnaveli and Merab Gogberashvili. *Antigravitating bubbles*, 1995. >

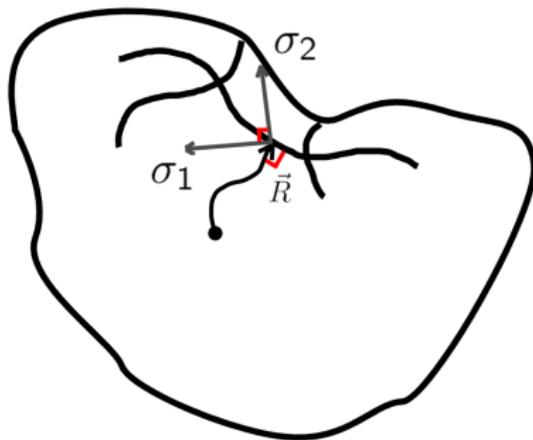


Рис.: Вид координатной сетки

В ходе научной работы в течение семестра были изучены:

- 1 Основы дифференциальной геометрии, используемой в теории гравитации
- 2 Простейшие солитонные структуры
- 3 Механизмы образования ПЧД
- 4 Структура полевых доменных стенок

Для дальнейшего изучения поставлена задача: описать геометрию доменных «пузырей» и их динамику.

Решение данной задачи позволит сравнить теоретические предсказания с экспериментальными данными, которые будут получены в ближайшие десять лет с детекторов гравитационных волн.