

# Наблюдательные ограничения на параметры космологических суперструн

А. И. Мухаева

Государственный университет "Дубна"

## Введение

Физика ранней Вселенной сводится к струнам, которые не являются микроскопическими, а расширяются вместе со Вселенной, становясь очень большими. В последнее время становятся все более разнообразными типы теоретически возможных космических струн, которые различаются не только широким диапазоном энергий, но и происхождением. Работа посвящена поиску наблюдательной проверки теории суперструн, а именно выявлению наблюдательных характеристик, позволяющих различать типы космологических суперструн.

## Понятие о космологических суперструнах

Космические струны представляют собой теоретически предсказанные [1], но до сих пор не обнаруженные одномерные объекты космологических масштабов [2].

На сегодняшний день различают топологические образования (бесконечные или замкнутые), сформированные в результате фазовых переходов вакуума на этапах остывания и расширения ранней Вселенной, также существуют гибридные тополого-полевые конфигурации (струна с концами монополями и конгломераты таких элементов). Однако с наблюдательной точки зрения наибольший интерес представляют гибридные струны, поскольку механизм их образования (фазовые переходы вакуума) хорошо изучен в других разделах физики (переходы в ферромагнетиках, явление сверхпроводимости и др.). Также с точки зрения наблюдательных данных по анизотропии реликтового излучения [3] они являются наиболее предпочтительными.

## Методы поиска космологических суперструн

1. Обнаружение струн с помощью оптических обзоров, которое заключается в поиске гравитационно-линзовых событий, возникающих при линзировании фоновых источников (галактик) на струнах.
2. Исследование структуры анизотропии реликтового излучения, индуцируемое струнами, а также определение характерных амплитуд этих структур.

## Суперструны как возможные космологические объекты

Впервые суперструны стали рассматриваться как возможные космологические объекты в связи с пониманием того факта, что их энергия может быть существенно ниже планковской (порядка  $10^{19}$  ГэВ). Таким образом, натяжение космологических суперструн окажется сопоставимым с наблюдательными пределами. Такой подход реализуется в представлении модели "мира на бране", другими словами, в многомерном пространстве-времени, когда дополнительные пространственные измерения обладают определенными свойствами.

## Функция деформации в 10-мерном пространстве-времени

Основа модели “мира на бране” – введение функции деформации (т. н. warp factor) пространства-времени.

В деформированном пространстве-времени вводится интервал:

$$ds^2 = e^{-A(y)}(dt^2 - dx^2) - dy^2, \quad (1)$$

здесь  $x$  – трехмерный пространственный вектор,  $y$  – координат(ы) дополнительного компактного измерения,  $e^{-A(y)}$  – положительная функция дополнительного измерения, называемая функцией деформации ( $A(y) > 0$ ). Физический смысл этой функции – гравитационное красное смещение в компактном дополнительном измерении.

## Связь между четырехмерными космологическими суперструнами и 10-мерными суперструнами

Для наблюдателя, находящегося в четырехмерном пространстве-времени вышесказанное означает, что наблюдаемое натяжение космологической фундаментальной струны есть

$$\mu_0 = e^{-A(y)} * \mu, \quad (2)$$

где  $\mu$  определяется в 10-мерном пространстве-времени.

Натяжение фундаментальной струны, наблюдаемое в обычном четырехмерном пространстве-времени, связано с ее 10-мерным натяжением пропорционально функции деформации:

$$\mu_0 = e^{-A(y)} * \mu_{p,q}^{(10)}. \quad (3)$$

Индексы  $p$  и  $q$  обозначают количество F- и D-струн.

Натяжение космической струны с точки зрения четырехмерного наблюдателя зависит от скорости ее движения и от величины генерируемой этой струной анизотропии реликтового излучения [5], [6]:

$$\frac{\delta T}{T} = \frac{8\pi G \mu_0}{c^2} \frac{\beta}{\sqrt{1 - \beta^2}}. \quad (4)$$

Здесь  $\beta$  – перпендикулярная лучу зрения составляющая скорости космической струны, нормированная на скорость света;  $T = 2.73$  К – температура реликтового излучения,  $\delta T = 40$  мкК – наблюдательное ограничение на максимально возможную величину анизотропии реликтового излучения, генерируемой одиночной космической струной [4]. В планковской системе единиц ( $\hbar = c = 1$ ):

$$\mu_0 = \Delta\Theta \frac{1}{8\pi} \frac{1}{l_p^2}, \quad (5)$$

где  $l_p = \sqrt{G}$  – планковская длина, а  $\Delta\Theta = 8\pi G \mu_0 / c^2$  – т.н. дефицит угла космической струны. Дефицит угла есть угол раствора трехмерного пространственного конуса, который заменяет трехмерное евклидово пространство нашей Вселенной в присутствии космической струны. С точки зрения наблюдений дефицит угла пропорционален (а в случае большой удаленности космической струны от наблюдателя асимптотически равен) угловому расстоянию между компонентами пар гравитационно-линзовых изображений далеких галактик, линзируемых на космической струне.

С другой стороны, 10-мерное натяжение выражается формулой:

$$\mu_{p,q}^{(10)} = \frac{1}{2\pi l_s^2} \sqrt{p^2 + \frac{q^2}{g_s^2}}, \quad (6)$$

где  $g_s$  – струнная константа связи, а  $l_s$  – длина фундаментальной струны (определяемая энергией ее рождения).

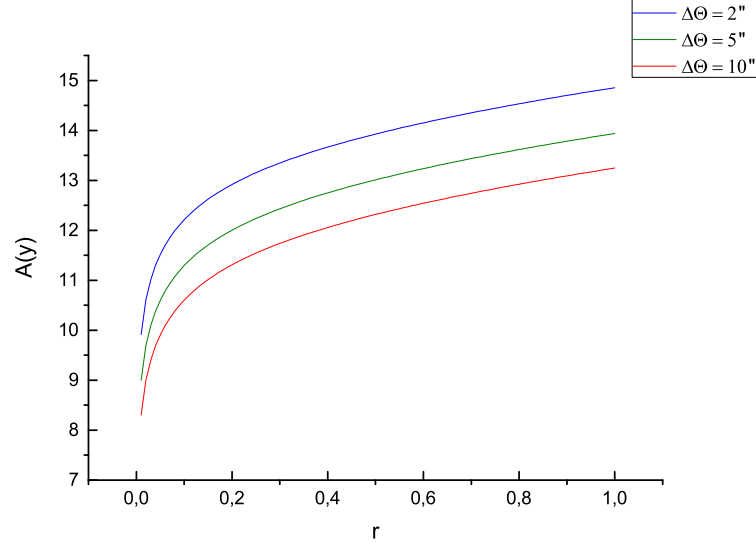


Рис. 1: Зависимость показателя функции деформации  $A(y)$  дополнительного измерения от отношения планковской длины к длине фундаментальной струны  $r = l_p/l_s$  (сечения при разных  $\Theta$  поверхности для  $p = q = 1$ ). Когда длина струны много больше планковской (модель больших дополнительных измерений), фундаментальные струны рождаются во время инфляции, что соответствует функции деформации порядка  $10^{-4}$  или  $A(y)$ . Величины показателя функции деформации значимо чувствительны к наблюдательному параметру струны – дефициту угла.

Подставим в (2) выражения (4) и (5):

$$\Delta\Theta \frac{1}{8\pi} \frac{1}{l_p^2} = e^{-A(y)} \frac{1}{2\pi} \frac{1}{l_s^2} \sqrt{p^2 + q^2 \frac{l_s^2}{l_p^2}}. \quad (7)$$

Преобразовав последнее выражение, получим:

$$e^{A(y)} = \frac{4}{\Delta\Theta} \left(\frac{l_p}{l_s}\right)^2 \sqrt{p^2 + q^2 \frac{l_s^2}{l_p^2}}. \quad (8)$$

Окончательно получаем ограничение на минимально возможное натяжение FD-струны:

$$G\mu_0 > \left(\frac{\Delta\Theta}{2}\right) \frac{3 * 10^{13}}{q}. \quad (9)$$

Заметим, что полученное ограничение не зависит от количества F-струн. Полученное выражение согласуется с оценками других авторов ( $10^{-12} < G\mu_0 < 10^{-6}$ ) и уточняет их сообразно наблюдательным данным.

## Выводы

Таким образом, допустимый интервал для натяжения космологической FD-струны

$$\left(\frac{\Delta\Theta}{2''}\right)^2 \frac{10^{-10}}{16q^2} < G\mu_0 < 7.36 * 10^{-7}. \quad (10)$$

При данном значении  $\delta T/T$  (определенном по анализу данных по анизотропии реликтового излучения [4]) существует однозначная взаимозависимость скорости струны  $\beta$  и дефицита угла  $\Delta\Theta$ . Для классических струн (не суперструн) определение независимыми методами (например путем поиска цепочек гравитационно-линзовых пар далеких галактик) дефицита угла струны позволит

однозначно восстановить и ее скорость, и ее линейную плотность  $\mu$ . В случае суперструн по величине дефицита угла можно будет восстановить функцию деформации  $e^{-A(y)}$  и определить энергию рождения струны.

## Список литературы

- [1] Planck Collaboration: P. A. R. Ade, N. Aghanim, C. Armitage-Caplan, et al. Planck 2013 results. XXV. Searches for cosmic strings and other topological defects. 571, A25 (2014) arXiv:1303.5085
- [2] M. B. Hindmarsh, T. W. B. Kibble Cosmic strings. Rept. Prog. Phys. 58:477-562 (1995) arXiv:hep-ph/9411342
- [3] O. S. Sazhina, Diana Scognamiglio, M. V. Sazhin Observational constraints on the types of cosmic strings. The European Physical Journal C 74:2972 (2014) arXiv:1312.6106
- [4] A. C. Davis, T. W. B. Kibble Fundamental cosmic strings. Contemp. Phys. 46 313-322 (2005) arXiv:hep-th/0505050
- [5] Allen B., Shellard, E.P.S. Cosmic string evolution — a numerical simulation. Phys. Rev. Lett. 64 119 (1990)
- [6] O.S. Sazhina, M.V. Sazhin, V.N. Sementsov, M. Capaccioli, G. Longo, G. Riccio, G. D'Angelo CMB Anisotropy Induced by a Moving Straight Cosmic String. Journal of Experimental and Theoretical Physics 106, 5, pp 878-887 (2008)