

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации  
Федеральное государственное автономное образовательное  
учреждение высшего образования «Национальный исследовательский  
ядерный университет «МИФИ»

УДК 539.12.01

Отчет  
О научно-исследовательской работе

**Проявление аксионоподобных моделей**

Научный руководитель  
д. ф-м. н.

\_\_\_\_\_ М. Ю. Хлопов

Студент

\_\_\_\_\_ Э. М. Ульмаскулов

Москва 2021

# 1 Введение

Аксион – гипотетическая элементарная частица, постулированная теорией Печчи-Куинна в 1977 году для решения проблемы сильного CP-нарушения в квантовой хромодинамике. Это нарушение проявляется в так называемом  $\theta$ -члене в лагранжиане КХД.[1]

$$\Delta L = \frac{g^2}{16\pi} \theta_{\text{КХД}} G_{\mu\nu} \tilde{G}_{\mu\nu} \quad (1)$$

Если аксионы существуют и имеют низкую массу в определенном диапазоне, они представляют интерес как возможный компонент холодной темной материи.

## 1.1 Общее свойство аксионоподобных моделей

Общее свойство аксионоподобных моделей состоит в рассмотрении (комплексного) скалярного поля с потенциалом

$$V(\theta) = \lambda(|\varphi|^2 - f^2/2)^2 + \delta V(\theta) \quad (2)$$

где  $\varphi = r e^{i\theta}$ .  
член

$$\delta V(\theta) = \Lambda^4 (1 - \cos\theta) \quad (3)$$

является незначительным на инфляционной стадии. Основное состояние соответствует минимуму потенциала, поэтому если член (3) мал, то  $\varphi = \frac{f}{\sqrt{2}} e^{i\theta}$  т.к. математическое ожидание  $\langle \varphi \rangle = f$ . (?проверить)

После нарушения условия

$$m_\theta = \frac{\Lambda^2}{f} \ll H \quad (4)$$

Где  $m_\theta$  – радиальная масса (не нашел объяснения, что именно за масса и как она появляется?),  $H$  – параметр Хаббла на инфляционной стадии ( $10^{13}$ ?), член (3) вносит значительный вклад в потенциал (2) и явно нарушает непрерывную симметрию вдоль углового направления. Таким образом, потенциал (2) в конечном итоге имеет ряд дискретных вырожденных минимумов в угловом направлении в точках  $\theta_{min} = 0; \pm 2\pi; \pm 4\pi; \dots$  которые соответствуют истинному вакууму(?).

## 2 Космологические проявления аксионо-подобных моделей

### 2.1 Домены антивещества в барионной асимметричной Вселенной

Механизм спонтанного бариогенеза предполагает существование сложного скалярного поля  $\chi = (f/\sqrt{2}) \exp(i\theta)$ , несущее барионный заряд. Как и в

случае с ALP, глобальный U(1) симметрия барионного заряда нарушается спонтанно и явно. Явное нарушение U(1) симметрии обусловлено зависящим от фазы членом[2]:

$$V(\theta) = \Lambda^4(1 - \cos\theta) \quad (5)$$

Взаимодействие поля  $\chi$  с полями материи нарушает барионное и лептонное число:

$$\mathcal{L} = g\chi\bar{Q}L + \text{h.c.} \quad (6)$$

где Q и L - тяжелые кварковые и лептонные поля, связанные с обычными полями материи. фаза  $\theta$  приобретает динамический смысл и начинает колебаться около минимума своего потенциала (5) распадаясь на поля материи. Взаимодействие (6) приводит к следующему: оно создает барионный избыток, когда фаза начинает опускаться по часовой стрелке, и избыток антибариона, если он начинает опускаться против часовой стрелки, поэтому избыток барионов или антибариона определяется начальным значением  $\theta$ , зафиксированным на стадии инфляции соответствующей обозримой сейчас области вселенной. Эта специфика проиллюстрирована на рисунке[2]:

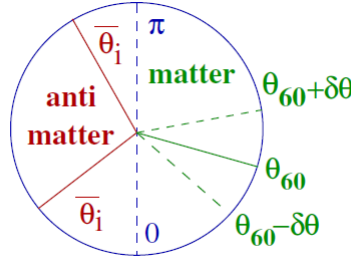


Рис. 1: Эволюция фазы на стадии инфляции вселенной

Если значение фазы  $\theta_N$  в  $e$ -фолдинге, соответствующем наблюдаемой части современной Вселенной, находится в диапазоне  $[\pi, 0]$ , создается чистый избыток барионов, однако на последовательных стадиях инфляции, создается барионная материя, но на последовательных стадиях инфляции, на каждом последующем  $e$ -фолдинге, соответствующем меньшим масштабам, это значение претерпевает изменение

$$\partial\theta = H_{infl}/(2\pi f) \quad (7)$$

,где  $H_{infl}$ - параметр Хаббла на инфляционной стадии. Обычный масштаб колебания  $\partial\theta$  равен  $H_{infl}^{-1}$ . Домен содержащий фазу  $\theta_N$ , разделяется после одного  $e$ -фолдинга на  $e^3$  причинно несвязанные области радиуса  $H_{infl}^{-1}$ . Каждая новая область содержит почти однородное значение фазы [2]

$$\theta_{N-1} = \theta_N \pm \partial\theta. \quad (8)$$

Этот процесс повторяется в каждой области с каждым последующим  $e$ -фолдингом, и на некотором шаге  $N$  фаза  $\theta_N$  может пересекать значение  $\pi$ . В этой области направление убывания к минимуму потенциала (Рис.2) - против часовой стрелки, и в этой области генерируется избыток антибарионов, окруженный избытком барионов за ее пределами.

## 2.2 Первичные черные дыры(ПЧД)

Хорошо известно, что любой объект, находящийся в пределах его гравитационного радиуса, образует черную дыру (ЧД). В настоящее время ЧД могут быть естественным образом созданы только в результате гравитационного коллапса звезд с массой, превышающей три массы Солнца в конце их эволюции.

Исходя из аксионоподобной модели, как только угловая масса  $m_\theta$  становится порядка величины параметра Хаббла  $H$ , фаза начинает колебаться вокруг потенциального минимума, начальные значения которого различны в различных пространственных областях. Более того, в областях, где начальная фаза лежит в области  $\pi < \theta < 2\pi$ , колебания происходят вблизи потенциального минимума  $\theta_{min} = 2\pi$ , тогда как фаза в окружающем пространстве стремится к минимуму в точке  $\theta_{min} = 0$ . Это означает, что образуются замкнутые вакуумные стенки, разделяющие "остров" с  $\theta_{min} = 2\pi$  от  $\theta_{min} = 0$  Рис.(2).

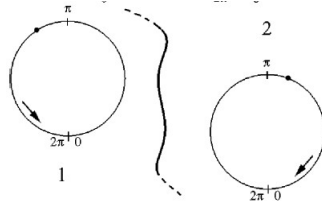


Рис. 2: Доменная стенка между двумя соседними областями пространства с вакуумным значением фазы  $\theta$  в разных состояниях

Плотность поверхностной энергии стенки шириной  $\sim 1/m \sim f/\Lambda^2$  составляет порядка  $\sim f\Lambda^2$ [3]. Те стенки, которые больше космологического горизонта, все еще следуют общему расширению Фридмана до того момента, когда они становятся причинно связанными как единое целое; это происходит, как только размер стенки становится равным размеру горизонта  $R_h$ . Внутренние напряжения, возникшие в стене после пересечения горизонта инициируют процессы, направленные на минимизацию поверхности стены. Это означает, что стенка имеет тенденцию, во-первых, приобретать сферическую форму и, во-вторых, сжиматься к центру. Если стенка в тот же момент локализуется в пределах гравитационного радиуса, образуется ПЧД. Распределение фаз, возникающее во время "раздувания отражается на распределении размеров вакуумных стенок и, следовательно, на массо-

вом распределении ПЧД, появляющихся после разрушения стенок. Диапазон масс сформированных ЧД ограничен фундаментальными параметрами модели  $f$  и  $\Lambda$ . Минимальная масса следует из условия, что гравитационный радиус ЧД превышает ширину стенки и равен

$$M_{min} = f \left( \frac{m_{pl}}{\Lambda} \right)^2. \quad (9)$$

Максимальная масса:

$$M_{min} = \frac{m_{pl}}{f} m_{pl} \left( \frac{m_{pl}}{\Lambda} \right)^2. \quad (10)$$

. Коллапс замкнутой стенки приводит к первичному спектру гравитационных волн, который достигает максимума при

$$\nu_0 = 3 \times 10^{11} \Lambda / f \text{ Гц}. \quad (11)$$

с плотностью энергии до

$$\Omega_{GW} = 10^{-4} (f / m_{pl}). \quad (12)$$

При  $f \sim 10^{14}$  ГэВ этот первичный гравитационно-волновой фон может достигать  $\Omega_{GW} \approx 10^{-9}$ . Для физически разумные значения[4]

$$1 < \Lambda < 10^8 \text{ ГэВ}$$

; максимум спектра соответствует[4]

$$3 \times 10^{-3} < \nu_0 < 3 \times 10^5 \text{ Гц}$$

## Список литературы

1. *M.Yu.Khlopov*. Fundamentals of Cosmoparticle..M. — 2011.
2. *M.Yu.Khlopov*. Cosmoparticle physics of Dark Universe. — 2021.
3. *M.Yu. Khlopov S.G. Rubin A. S.* Primordial structure of massive black hole clusters. // *Astroparticle Physics*. — 2004. — С. 265—277.
4. *M.Yu.Khlopov*. Primordial black holes. // 2010 Res. Astron. Astrophys. — 2010. — Т. 10, № 6. — С. 495—528.