

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 θ -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

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

Где m_θ -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 χ 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 θ 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 θ , зафиксированным на стадии инфляции соответствующей обозримой сейчас области вселенной. Эта специфика проиллюстрирована на рисунке[2]:

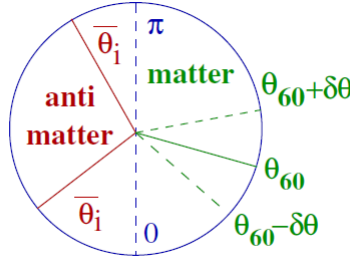


Рис. 1: Эволюция фазы на стадии инфляции вселенной

Если значение фазы θ_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 θ_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 е-фолдингом, и на некотором шаге N фаза θ_N может пересекать значение π . В этой области направление убывания к минимуму потенциала (Pict2) - 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_θ 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).

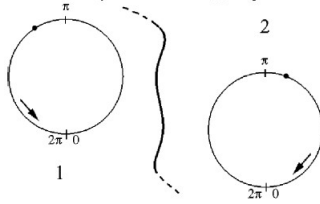


Рис. 2: Доменная стенка между двумя соседними областями пространства с вакуумным значением фазы θ в разных состояниях

Плотность поверхностной энергии стенки шириной $\sim 1/m \sim f/\Lambda^2$ составляет порядка $\sim f\Lambda^2$. 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 массовом рас-

пределении ПЧД, появляющихся после разрушения стенок. Диапазон масс сформированных ЧД ограничен фундаментальными параметрами модели f и Λ . 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

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

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

$$1 < \Lambda < 10^8 \text{ ГэВ}$$

; максимум спектра соответствует

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

Список литературы

1. *M.Yu.Khlopov*. Fundamentals of Cosmoparticle..M. — 2011.
2. *M.Yu.Khlopov*. Cosmoparticle physics of Dark Universe. — 2021.