

Обобщенный лагранжиан с аксионоподобными полями

Отчет о научно-исследовательской работе

Консультант:

Научный руководитель:

Студент:

М.А.Краснов

М.Ю. Хлопов

С.Д.Франк-Каменецкая

- исследовать поведение скалярного поля с аксионоподобным потенциалом поля
- исследовать, сводится ли модель поля, описываемая обобщенным лагранжианом, к Λ CDM

Аксионы и аксионоподобные частицы (ALP's)

Аксионы - легкие нейтральные частицы, естественным образом возникшие вследствие нарушения CP-симметрии в ряде эффектов сильного взаимодействия, однако в Стандартную модель не входящие.

Масса аксиона:

$$m = \frac{f_\pi m_\pi}{f} \frac{\sqrt{m_d m_u}}{m_d + m_u}$$

Впоследствии было показано, что аксионоподобные частицы - псевдоскалярные частицы с независимыми параметрами массы и постоянной распада - могут возникать в ряде низкоэнергетических аспектов теории струн.

Аксионоподобные частицы являются одними из хороших кандидатов на роль частиц темной материи.

Потенциал аксионоподобного поля:

$$V(\phi) = \Lambda^4 \left(1 - \cos\left(\frac{\phi}{f}\right)\right)$$

Обобщенный лагранжиан

Рассмотрен параметризованный лагранжиан, объединяющий в себе сразу 3 модели описания динамики скалярного поля:

$$\mathcal{L}_X = \alpha X^{\alpha^2} - V(\phi) (1 - 2X)^{\beta/2}$$

$$(\alpha, \beta) = \begin{cases} \alpha = 0, \beta = 1; & - \text{ модель тахионов} \\ \alpha = 1, \beta = 0; & - \text{ модель квинтэссенции} \\ \alpha = -1, \beta = 0; & - \text{ модель фантомного поля} \end{cases}$$

Плотность энергии и давление разделяются на три компоненты:

$$\rho_\phi = \frac{\partial \mathcal{L}_X}{\partial \dot{\phi}} - \mathcal{L}_X = (2\alpha^3 - \alpha)X^{\alpha^2} + V(\phi)(1 - 2X)^{\beta/2} \left[1 + \frac{2\beta X}{(1 - 2X)} \right], \text{ где } X = \frac{1}{2} \partial_\mu \phi \partial^\mu \phi$$

$$p_\phi = p_X + p_V + p_{(X,V)} = \alpha X^{\alpha^2} - V(\phi) + X\beta V(\phi)$$

Обобщенный лагранжиан

Параметры уравнения состояния также разделяются на соответствующие кинетической, потенциальной и смешанной компоненте:

$$w_X = \frac{1}{2\alpha^2 - 1} = \text{const}$$

$$w_V = -1 = \text{const}$$

$$w_{X,V} = \begin{cases} \frac{1-\dot{\phi}^2}{1+\dot{\phi}^2}, & \text{для } \beta = 0 \\ 1 - \dot{\phi}^2, & \text{для } \beta = 1 \end{cases}$$

Уравнение движения для обобщенного лагранжиана:

$$\ddot{\phi}\dot{\phi} \left[\alpha^2(2\alpha^3 - \alpha) \left(\frac{\dot{\phi}^2}{2} \right)^{\alpha^2-1} + \frac{V(\phi)(1 - \dot{\phi}^2)^{(\beta/2)}\beta}{(1 - \dot{\phi}^2)} \left(1 + \frac{(2 - \beta)\dot{\phi}^2}{1 - \dot{\phi}^2} \right) \right] + 3H \left[2\alpha^3 \left(\frac{\dot{\phi}^2}{2} \right)^{\alpha^2} + \frac{\beta\dot{\phi}^2 V(\phi)(1 - \dot{\phi}^2)^{(\beta/2)}}{(1 - \dot{\phi}^2)} \right] + \frac{dV}{d\phi} \left[\dot{\phi}(1 - \dot{\phi}^2)^{(\beta/2)} \left(1 + \frac{\beta\dot{\phi}^2}{1 - \dot{\phi}^2} \right) \right] = 0$$

Квинтэссенция

Модель квинтэссенции описывается каноническим скалярным полем, минимально связанным с гравитацией. Медленно меняющееся поле вдоль потенциала $V(\phi)$ может привести к ускорению Вселенной. Уравнение состояния
Параметр уравнения состояния в данном случае:

$$w_\phi = \frac{p_\phi}{\rho_\phi} = \frac{\dot{\phi}^2 - 2V(\phi)}{\dot{\phi}^2 + 2V(\phi)}$$

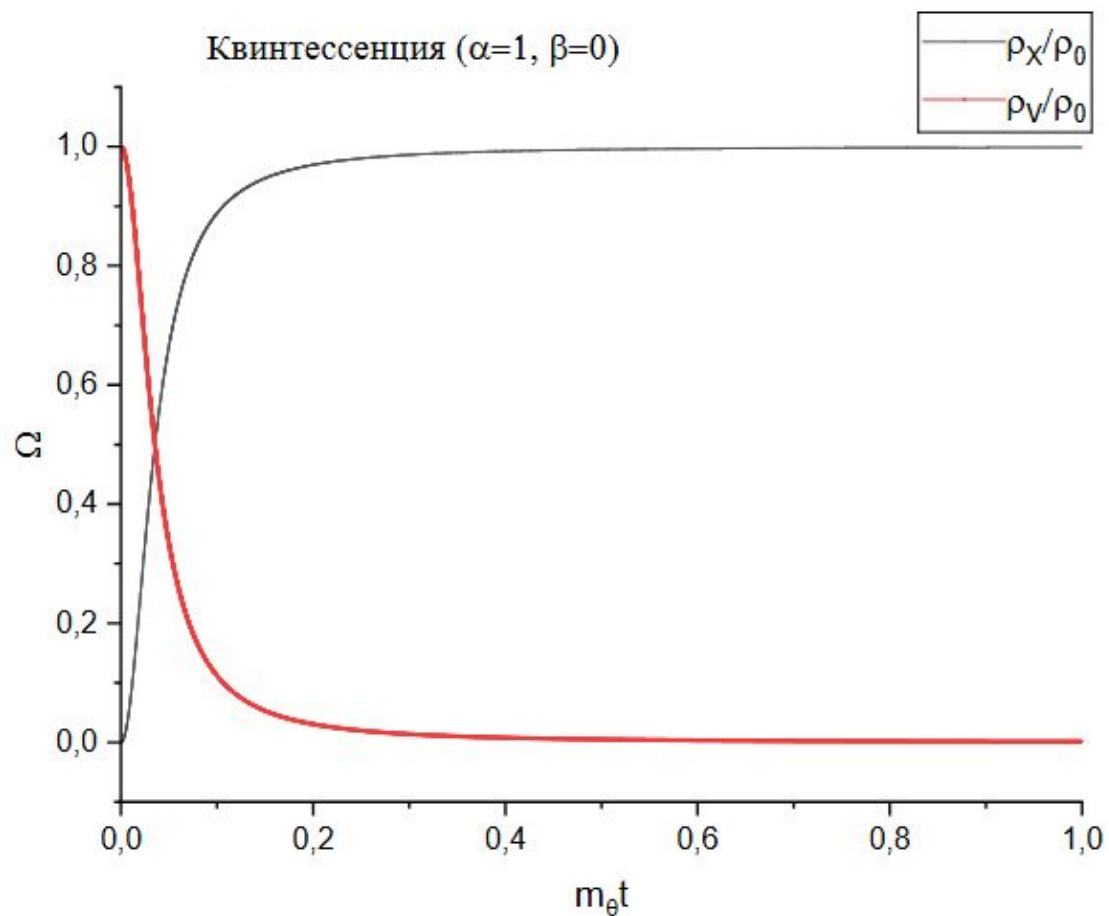
Плотность энергии:

$$\rho_\phi = \rho_X + \rho_V = \frac{\dot{\phi}^2}{2} + \Lambda^4 \left(1 - \cos\left(\frac{\phi}{f}\right)\right)$$

Уравнение движения:

$$\ddot{\phi} + 3H\dot{\phi} + V'(\phi) = 0 \quad , \text{ где } \quad H^2 = \frac{8\pi G}{3} \left(\frac{\dot{\phi}^2}{2} + \Lambda^4 \left(1 - \cos\left(\frac{\phi}{f}\right)\right) \right)$$

Эволюция плотности энергии квинтэссенции



$m_\theta = \frac{\Lambda^2}{f}$ - масса аксионоподобной частицы

Модель фантомного поля

Описывается аномальным скалярным полем ϕ , медленно меняющимся вдоль потенциала. Интересной особенностью такой модели является то, что с расширением плотность таких полей возрастает. Фантомные модели нарушают условие доминирующей энергии, поэтому они не могут быть физически стабильными моделями темной энергии, но, тем не менее, оказываются совместимыми с многими классическими тестами космологии.

$$w_\phi = \frac{p_\phi}{\rho_\phi} = \frac{-\dot{\phi}^2 - 2V(\phi)}{-\dot{\phi}^2 + 2V(\phi)}$$

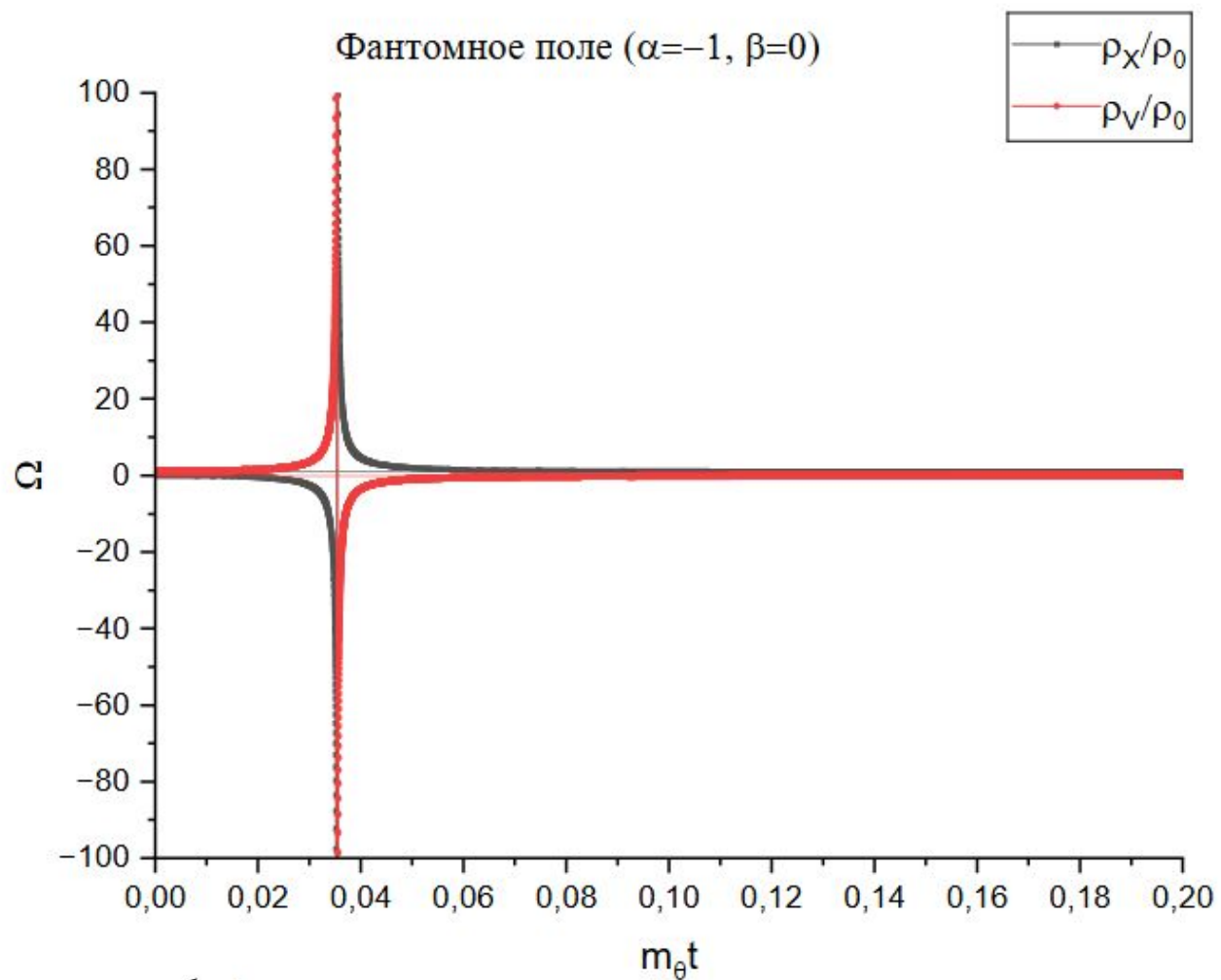
Плотность энергии:

$$\rho_\phi = \rho_X + \rho_V = -\frac{\dot{\phi}^2}{2} + \Lambda^4 \left(1 - \cos\left(\frac{\phi}{f}\right)\right)$$

Уравнение движения:

$$\ddot{\phi} + 3H\dot{\phi} - V'(\phi) = 0 \quad , \text{ где } H^2 = \frac{8\pi G}{3} \left(-\frac{\dot{\phi}^2}{2} + \Lambda^4 \left(1 - \cos\left(\frac{\phi}{f}\right)\right) \right)$$

Эволюция плотности энергии фантомного поля



$m_\theta = \frac{\Lambda^2}{f}$ - масса аксионоподобной частицы



Тахионы

Скалярное поле, изменяющее плотность энергии вакуума, также можно описать динамикой аксионоподобных тахионов. Уравнение состояния в этом случае имеет вид:

$$w_\phi \equiv \frac{p_\phi}{\rho_\phi} = \dot{\phi}^2 - 1$$

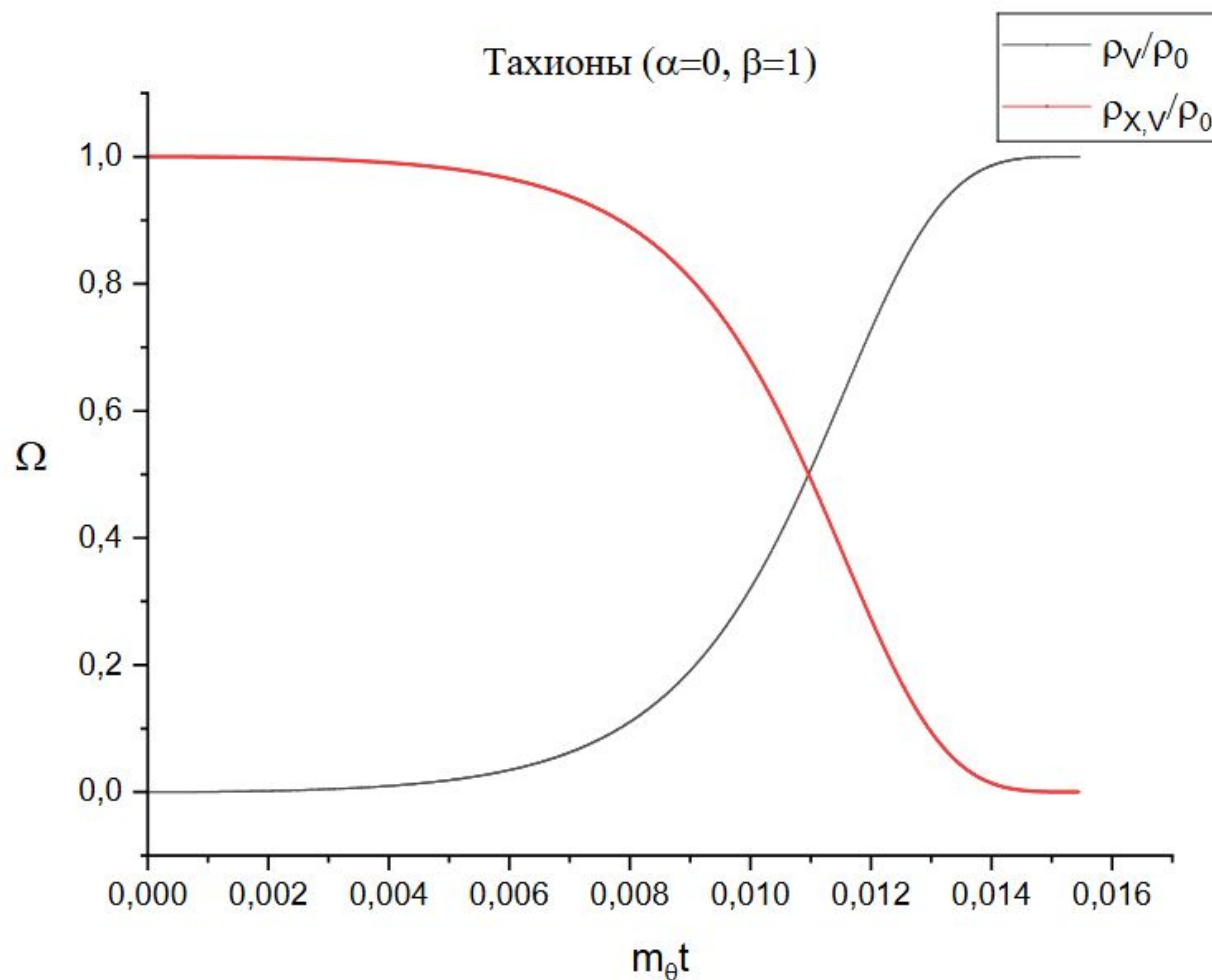
Плотность энергии:

$$\rho_\phi = \rho_V + \rho_{X,V} = V(\phi) + \frac{\dot{\phi}^2}{2} V(\phi) \left(\frac{1}{1 - \dot{\phi}^2} \right)$$

Уравнение движения:

$$\frac{\ddot{\phi}}{1 - \dot{\phi}^2} + 3H\dot{\phi} + \frac{V'(\phi)}{V(\phi)} = 0, \text{ где } H^2 = \frac{8\pi G}{3} \left(\Lambda^4 \left(1 - \cos \left(\frac{\phi}{f} \right) \right) \right) \left(1 + \frac{1}{1 - \dot{\phi}^2} \right)$$

Эволюция плотности энергии тахионов



$m_\theta = \frac{\Lambda^2}{f}$ - масса аксионоподобной частицы

Следующий этап

Также рассмотрен случай $\alpha \gg 1, \beta = 0$.

$$w_X = \frac{1}{2\alpha^2 - 1} \rightarrow 0$$

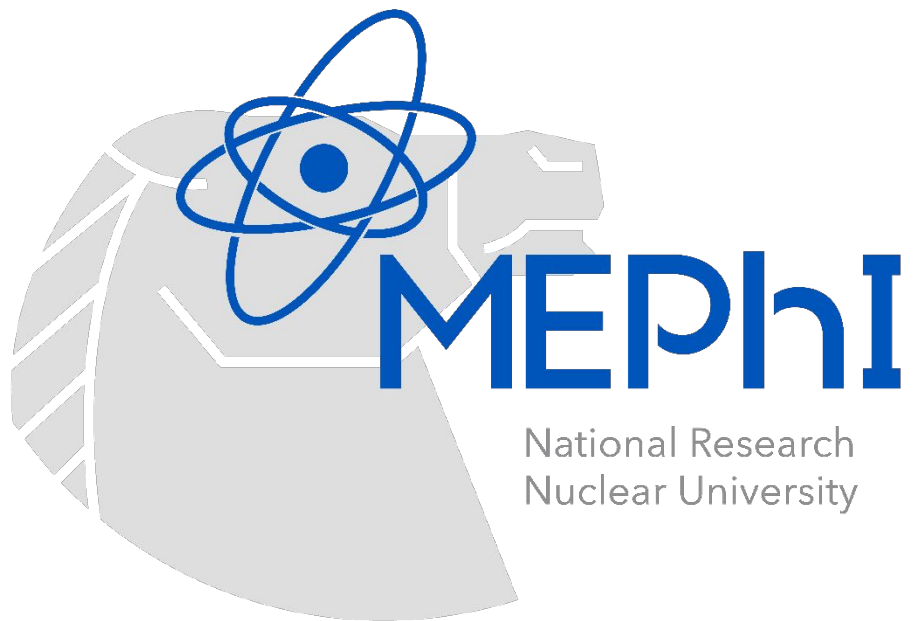
$$w_Y = -1 = \text{const}$$

При таких значениях параметров лагранжиан объединяет в себе и темную материю, и темную энергию. Уравнение движения после замены $\phi = f \theta$ и перехода к производной по $m_\theta t$:

$$\Lambda^4 \ddot{\theta} (2\alpha^5 - \alpha^3) \left(\frac{\Lambda^4 \dot{\theta}^2}{2} \right)^{\alpha^2} + \sqrt{\frac{24\pi G}{3}} 2\alpha^3 f \left(\frac{\Lambda^4 \dot{\theta}^2}{2} \right)^{\alpha^2} \sqrt{(2\alpha^3 - \alpha) \left(\frac{\Lambda^4 \dot{\theta}^2}{2} \right)^{\alpha^2} + \Lambda^4 (1 - \cos \theta) + \Lambda^6 \dot{\theta} \sin \theta} = 0$$

В ходе исследовательской работы:

- было проведено ознакомление с феноменом аксионоподобных частиц и космологическими теориями
- рассмотрен обобщенный лагранжиан с аксионоподобным потенциалом самодействия поля
- были получены графики, показывающие эволюцию плотности энергии, которые могут описывать поведение темной энергии



Спасибо за внимание!