

УДК 524.83, 524.834

## **ЭВОЛЮЦИИ ВОЗМУЩЕНИЙ ПЛОТНОСТИ ФЕРМИОННОГО ПОЛЯ НА ФОНЕ НЕОДНОРОДНОЙ ВЯЗКОЙ ЖИДКОСТИ**

**Рыскелді Бақытжан Айболұлы**

*[bakytzhan.ra@mail.ru](mailto:bakytzhan.ra@mail.ru)*

Магистрант 2-го курса кафедры «Общая и теоретическая физика»,

ЕНУ имени Л.Н. Гумилева, Нур-Султан, Казахстан

Научный руководитель - Е.М. Мырзакулов

За последние два десятилетия были предприняты усилия, чтобы понять причину ускорения и внедрить модели для его описания. С этой целью многими исследователями были проведены обширные исследования различных моделей темной энергии в изотропном пространстве-времени, таких как космологическая постоянная, скалярные поля, тахионное поле, фермионное поле, модифицированные модели гравитации, взаимодействующие модели, модель отскока и модели мира на бране. Некоторые другие модели можно назвать модифицированными телепараллельными моделями [1]. Следует отметить, что решение вышеупомянутых моделей дает подходящую альтернативу для описания ускоренного расширения Вселенной.

Как мы знаем, действие Эйнштейна-Гильберта записывается в терминах члена кривизны  $R$ , где описывает гравитацию в общей теории относительности. Общая теория относительности очень успешно согласуется с данными наблюдений. Кроме того, был предложен еще один гравитационный сценарий, так называемая телепараллельная гравитация, которую впервые ввел Эйнштейн [2]. Другими словами, член кривизны  $R$  в общей теории относительности преобразуется в член кручения  $T$  в телепараллельном сценарии, модифицированная форма которого изменяется от  $T$  до  $f(T)$  с помощью

произвольной функции в соответствующей космологии действия, так называемой  $f(T)$  теории.

В дополнение к вышеупомянутым теориям существование анизотропной жидкости является еще одним фактором изменения космического ускорения. Наиболее важными моделями анизотропной жидкости являются модель Бианки и модель вязкой жидкости [3,4]. Для этой цели мы будем рассматривать вязкую жидкость в этой работе, а именно, что во Вселенной преобладает вязкая жидкость. Таким образом, этот вопрос дает нам мотивацию для исследования динамических эффектов объемной вязкости на силу тяжести  $f(T, B)$ . Теперь мы собираемся изучить гравитацию  $f(T, B)$  при наличии объемной вязкости путем взаимодействия между компонентами материи и темной энергии. Тогда параметр Хаббла будет соответствовать алгебраической функции астрономическим данным.

В настоящем исследовании, руководствуясь сценарием телепараллельной темной энергии и ролью фермионного поля в космологическом контексте, мы предлагаем фермионную телепараллельную модель темной энергии, в которой фермионное поле с неминимальным потенциалом соединяется со скаляром кручения. Отметим, что модель полностью эквивалентна стандартной ОТО, когда поле фермионов минимально связано со скаляром кручения. В такой модели нам необходимо определить вид функции связи  $F(\Psi)$  и потенциала  $V(\Psi)$ . Подход симметрии Нетера, предложенный de Rittis et al. и Cappozziello et al. [5], позволяет определить потенциал и функцию связи динамически в скалярно-тензорной теории гравитации [6,7].

Для более глубокого понимания процесса эволюции барионного вещества в расширяющейся Вселенной необходимо знать физическое свойство конкретного поля, которое представляет собой фон субстратного типа темной энергии. Кроме того, необходимо детально изучить влияние такого поля на сплошную среду барионного вещества. Эти утверждения были реализованы для фермионного поля. Они дают свои вклады в полное давление и в полную массовую плотность барионной материй.

Эволюция фермионного поля от появления флуктуаций ее плотности до процессов образования галактик является одной из важнейших проблем современной космологии. Эта тема рассматривалась как в ньютоновской космологии, так и в рамках релятивистской космологии с разных сторон.

Структура этой статьи следующая. В разделе 2 уравнения поля выводятся из точечного лагранжиана в пространстве-времени ФРУ, которое получается из действия, включающего фермионное поле, неминимально связанное со скаляром кручения в рамках телепараллельной гравитации. В разделе 3 мы ищем симметрию Нетера, а в разделе 4 мы даем точные решения уравнений поля, используя функцию связи и потенциал, получающий подход симметрии Нетера. Наконец, в разделе 5 мы завершаем кратким изложением полученных результатов. Следует отметить, что мы полностью принимаем естественную систему единиц, взяв  $8\pi G = c = \hbar = 1$ . Индексы  $i, j, k$  проходят от 1 до 4 на протяжении всей этой статьи.

В этой статье мы изучаем модель эволюции возмущений плотности фермионного поля на фоне неоднородной вязкой жидкости в рамках  $f(T, B)$  гравитации с фермионным полем с применением подхода симметрии Нетер в плоской метрике ФРУ. Получены уравнения Фридмана в рамках модифицированной телепараллельной гравитации тетрадными компонентами для изучения связанных динамических систем и поиска космологических решений. Мы рассматриваем модель взаимодействия между материей и темной энергией так, чтобы во Вселенной доминировала вязкая жидкость.

Скаляр Риччи  $R$  и скаляр кручения  $T$  отличаются граничным членом  $B$  через

$$R = -T + \frac{2}{e} \partial_\mu (e T^\mu) = -T - B, \quad (1)$$

здесь для простоты мы вводим  $B = (2/e)\partial_\mu(eT^\mu) = \nabla_\mu T^\mu$ .

В данной работе мы рассматриваем действие фермионного поля предложенное в работе [8]

$$S = \int d^4x e \left\{ F(\Psi) f(T, B) + \frac{i}{2} \left[ \bar{\psi} \Gamma^\mu (\overleftarrow{\partial}_\mu - \Omega_\mu) \psi - \bar{\psi} (\overrightarrow{\partial}_\mu + \Omega_\mu) \Gamma_\mu \psi \right] - V(\Psi) \right\}, \quad (2)$$

где  $e = \det(e_\mu^a) = \sqrt{-g}$ , что  $e_\mu^a$  является тетрадным (вербейн),  $T$  - скаляр кручения,  $B$  - граничный член,  $\psi$  и  $\bar{\psi} = \psi^\dagger \gamma^0$  обозначают спинорное поле и сопряженное с ним поле, а крестик обозначает комплексное сопряжение.  $F(\Psi)$  и  $V(\Psi)$  - общие функции, представляющие связь с гравитацией и потенциалом самодействия фермионного поля соответственно.

Здесь рассмотрена однородная и изотропная космологическая модель ФРУ, пространственно-плоская метрика которой определяется выражением

$$ds^2 = dt^2 - a(t)^2 (dx^2 + dy^2 + dz^2), \quad (3)$$

где  $a(t)$  - масштабный фактор Вселенной. Для этой метрики  $T$  и  $B$  имеют вид

$$T = -6 \frac{\dot{a}^2}{a^2} \quad B = -6 \left( \frac{\ddot{a}}{a} + 2 \frac{\dot{a}^2}{a^2} \right). \quad (4)$$

Для рассматриваемой модели масштабного фактор эволюционирует по степенному закону в виде

$$a(t) = a_0 (t - t_0)^n, \quad (5)$$

где  $a_0 = \left( -\frac{4\mu}{(m-3)^2 \nu} \right)^{\frac{1}{m-3}}$ ,  $n = -\frac{2}{m-3}$ . Параметр Хаббла имеет следующий вид

$$H(t) = \frac{n}{t - t_0}. \quad (6)$$

Во многих статьях влияние различных космологических субстратов на эволюцию возмущений фермионного поля сводилось к заданию их уравнений состояния. В результате это приводит к установке различных выражений постоянной Хаббла в «термине трения» основного уравнения

$$\frac{d^2 \delta}{dt^2} + 2H \frac{d\delta}{dt} + (v_s^2 \mathbf{k}^2 - 4\pi G \rho_F) \delta = 0, \quad (7)$$

где  $v_s$  - скорость звука в фермионного поля,  $\mathbf{k}$  - волновой вектор, а  $\rho_F$  - плотность фермионного поля, которая описывает эволюцию возмущений плотности фермионного поля. Однако такой подход позволяет рассматривать такую эволюцию как процесс, протекающий только на фоне рассматриваемого пространства-времени  $f(T, B)$  гравитации. В выражении (7) в скобках присутствуют два слагаемых, первое из которых описывает внутреннюю энергию фермионного поля, а второе - ее внешнюю (гравитационную) энергию. При этом соотношение между этими видами энергий в ходе эволюции Вселенной меняется. Так как

рассматривается эпоха ранней Вселенной, вторым членом в данной работе пренебрегаем и предполагаем, что волновой вектор обратно пропорционален масштабному фактору пространства-времени, следовательно

$$\frac{d^2\delta}{dt^2} + 2H \frac{d\delta}{dt} + v_s^2 a^2 \delta = 0. \quad (8)$$

В очень ранней Вселенной вещество имеет релятивистский характер, и поэтому  $v_s \approx 1/3$ ; в более поздние эпохи вещество становится нерелятивистским и  $v_s \rightarrow 0$ .

Рассмотрим случай когда  $m=2$ , тогда  $n=2$ , приняв,  $a_0=1$ ,  $t_0=0$  и подставив уравнение (++) в (1). Таким образом найдем решение уравнения (1) и получим

$$\delta(t) = \left(3 + \frac{1}{t}\right) \cos\left(\frac{1}{3t}\right) - \left(3 - \frac{1}{t}\right) \sin\left(\frac{1}{3t}\right). \quad (9)$$

Построим график данного решения.

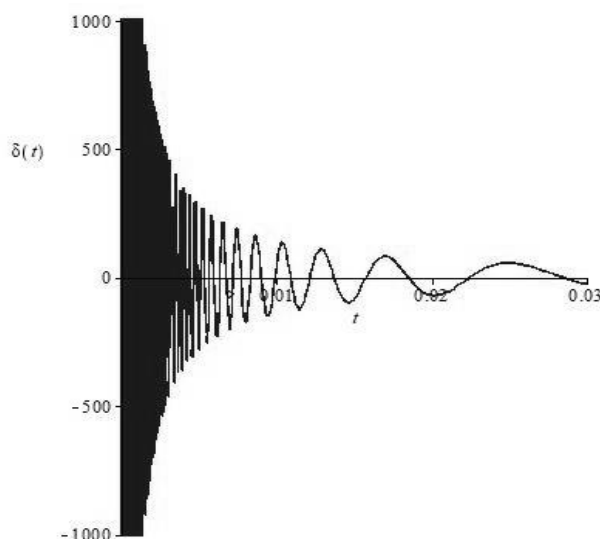


Рисунок 1. Эволюция возмущения плотности  $\delta(t)$  в ранней Вселенной.

В данной работе исследована эволюция возмущения плотности фермионного поля  $f(T, B)$  гравитации в ранней Вселенной.

Используя динамические параметры, описывающие  $f(T, B)$  гравитацию, такие как масштабный фактор и параметр Хаббла, получили эволюцию возмущения плотности фермионного поля. Так как в раннюю эпоху Вселенная имела релятивистский характер, рассмотрели преобладание кинетической энергии, относительно пренебрегая потенциальную энергию. Решение описывается тригонометрическими функциями и был получен график на Рис. 1. Анализ показывает, что при рождении Вселенной амплитуда возмущения плотности имеет максимальную величину, однако уже за доли секунд гармонически затухают, данные анализ совпадают со стандартными решениями (пылевидное вещество, излучение) для Вселенной, описываемой соответствующими стационарными состояниями [7].

Поэтому можно сказать, что при исследовании  $f(T, B)$  гравитации возмущения плотности фермионного поля действительно появились почти сразу же после Большого взрыва, как и предполагалось ранее в стандартных теориях гравитации.

*Данное исследование финансируется Комитетом науки Министерства образования и науки Республики Казахстан АР08052197.*

#### **Список использованных источников**

1. Myrzakulov R. Accelerating universe from  $F(T)$  gravity // *The European Physical Journal C.* – 2011. – Vol. 71. – P. 1752;
2. Einstein A. Neue Möglichkeit für eine einheitliche Feldtheorie von Gravitation und Elektrizität // *Physikalisch-mathematische Klasse.* – 1928. - Vol. 17. – P. 224-227;
3. Sadeghi J., Ali R.A., Tahmasbi N. Stability of viscous fluid in Bianchi type-VI model with cosmological constant // *Astrophysics and Space Science.* – 2013. – Vol. 3448. – P. 559–564;
4. Pourbagher A., Amani A. Thermodynamics and stability of  $f(T,B)$  gravity with viscous fluid by observational constraints // *Astrophysics and Space Science* // - 2019. – Vol. 364. – P. 140;
5. Bahamonde S., Capozziello S. Noether symmetry approach in  $f(T,B)$  teleparallel cosmology // *The European Physical Journal C.* – 2017. – Vol. 77. – P. 107
6. Gecim, G. Kucukakca Y. Scalar–tensor teleparallel gravity with boundary term by Noether symmetries // *International Journal of Geometric Methods in Modern Physics.* – 2018. – Vol 15, № 09. <https://doi.org/10.1142/S0219887818501517>;
7. Kucukakca Y. Teleparallel dark energy model with a fermionic field via Noether symmetry // *The European Physical Journal C.* – 2014. – Vol. 74. – P. 3086;
8. Myrzakulov Y., Bekov S., K. Myrzakulov Noether symmetry approach in  $f(T,B)$  teleparallel gravity with a fermionic field // *Journal of Physics: Conference Series.* – 2021. – Vol. 2090. – P. 012058.