

УДК 520.607

Вселенная с магнитным полем в теории гравитации с неминимальной кинетической связью

Башир Шехабабдин Омер Али^{1,2(*)}

shehapbashir@gmail.com

SPIN-код: 6046-2480

Мухарлямов Руслан Камилевич¹

rmukhar@mail.ru

¹ФГАОУ ВО КФУ, Казань, Россия²Хартумский университет, Хартум, Судан

Аннотация. Получены точные решения для космологической модели Бианки-I с односторонним магнитным полем (МП) в теории гравитации с неминимальной кинетической связью (НКС) скалярного поля с кривизной. Модель изучается применительно к периоду до и во время первичной инфляции вселенной. Получены ограничения на параметры модели, которые обеспечивают наблюдаемое тензорно-скалярное отношение r , отсутствие духов и неустойчивости Лапласа. При таких ограничениях модель обладает необходимыми свойствами: изотропизация, быстрый переход из постсингулярной эпохи к инфляции.

Ключевые слова: Бианки-I, теория Хорндески, неминимальная кинетическая связь, магнитное поле, скалярное поле

Введение. Ускоренное расширение Вселенной мотивирует применение модифицированных теорий гравитации, в частности, теорию Хорндески (ТХ). Теория гравитации с НКС есть частный случай ТХ. НКС в космологических моделях дает новый механизм первичной инфляции без настройки потенциала [1]. На ранних этапах эволюции Вселенной НКС может экранировать обычную материю. Это свойство дает модель естественной смены космологических эпох. Как известно, МП наблюдаются на различных масштабах Вселенной. Глобальное МП подразумевает анизотропное пространство-время. В анизотропных моделях с НКС допускается немонотонное поведение анизотропии [2, 3]. Придерживаясь гипотезы о рождении МП до или во время первичной инфляции, мы изучаем взаимодействие магнитного и скалярного полей в рамках НКС. Мы задаемся вопросами об изотропизации модели в ходе расширения, о следствиях включения МП в модель НКС.

Методы и материалы; результаты. Плотность действия для НКС и электромагнитного поля берется в форме

$$L = \sqrt{-g} \left(\frac{\mu R}{2} + \varepsilon X - \Lambda + \frac{\eta \phi}{2} G_{\mu\nu} \nabla^\mu \nabla^\nu \phi - \frac{1}{4} F^{\mu\eta} F_{\mu\eta} \right), \quad \mu = M_{\text{PL}}^2, \quad \varepsilon = \pm 1.$$

Модель изучается в рамках пространства-времени Бианки I. Необходимым, но недостаточным условием изотропизации является неравенство $\varepsilon/\eta > 0$. Плотность энергии МП уменьшается от ограниченного значения.

Вследствие включения МП в НКС-модель, знак параметра $l = 1 + \varepsilon\eta\Lambda/\mu$ начинает качественно влиять на свойства модели. В случае $l = 0$ процесс изотропизации отсутствует. В случае $l < 0$ тип сингулярности меняется: $a \rightarrow \text{const}$, $H \propto t^{-1/2} \rightarrow \infty$, $t \rightarrow 0$. Эволюция Вселенной начинается с ненулевого объема. Существуют две ветви решения. Одна ветвь описывает сжимающуюся вселенную. Согласно другой ветви, вселенная расширяется, но модель имеет духи и неустойчивость Лапласа. В случае $l > 0$ тип сингулярности не меняется: $a \propto t^{1/3} \rightarrow 0$, $H \propto t^{-1} \rightarrow \infty$, $t \rightarrow 0$. После короткой постсингулярной эпохи вселенная входит в квазидеситтеровскую эпоху с параметром $h_\eta = \sqrt{\varepsilon/(3\eta)} \approx 6 \cdot 10^{38} \text{ sec}^{-1}$. С начала инфляции ($h_\eta \cdot t \approx 0,387$) модель становится изотропной за несколько единиц $h_\eta \cdot t$ (продолжительность инфляции $h_\eta \cdot t \approx 60$). Ограничения $\varepsilon = 1$, $\eta > 0$, $\Lambda > 0$, $1 < \eta\Lambda/\mu < 1,049$ обеспечивают отсутствие духов, неустойчивости Лапласа и наблюдаемое тензорно-скалярное отношение $r < 0,1$.

Заключение. Таким образом, существует возможность «гармонично» включить МП в НКС-модель с параметром $l > 0$. В остальных случаях у модели есть различные недостатки. НКС подавляет Λ -член и сам генерирует первичную инфляцию. Однако, Λ -член является важным фактором устойчивости. Например, при $\Lambda = 0$, для скалярных возмущений имеем $c_s^2 = -1/3 < 0$. Λ -член представлен в параметре l . В силу требования $\varepsilon/\eta > 0$ знак Λ критичен для знака l , т. е. Λ -член регулирует степень влияния МП на НКС-модель.

Список источников

- [1] Sushkov S.V. Realistic cosmological scenario with nonminimal kinetic coupling. Phys. Rev. D, 2012, vol. 85, art. no. 123520. <https://doi.org/10.1103/PhysRevD.85.123520>
- [2] Galeev R., Muharlyamov R.K., Starobinsky A.A., Sushkov S.V., Volkov M.S. Anisotropic cosmological models in Horndeski gravity. Phys. Rev. D, 2021, vol. 103, art. no. 104015. <https://doi.org/10.1103/PhysRevD.103.104015>
- [3] Muharlyamov R.K., Pankratyeva T.N. Reconstruction in the Horndeski theory within the scope of the Bianchi I cosmology. Modern Physics Letters A, 2022, vol. 37, no. 17, art. no. 225018. <https://doi.org/10.1142/S0217732322501085>

The Universe with magnetic field in the theory of gravity with non-minimal kinetic coupling

Bashir Shehabaldeen Omer Ali^{1, 2(*)}

shehapbashir@gmail.com

SPIN-code: 6046-2480

Muharlyamov Ruslan Kamilevitch¹

rmukhar@mail.ru

¹KFU, Kazan, Russia

²University of Khartoum, Khartoum, Sudan

Abstract. Exact solutions are obtained for the Bianchi-I cosmological model with a unidirectional magnetic field (MF) in the theory of gravity with non-minimum kinetic coupling (NKC) of a scalar field with curvature. The model is studied in relation to the period before and during the primary inflation of the universe. Constraints on the model parameters are obtained that ensure the observed tensor-scalar ratio, the absence of ghosts and Laplace instability. With such constraints, the model has the necessary properties: isotropization, a rapid transition from the post-singular epoch to inflation.

Keywords: Bianchi-I, Horndeski theory, non-minimal kinetic coupling, magnetic field, scalar field

Introduction. The accelerated expansion of the Universe motivates the use of modified theories of gravity, in particular, the Horndeski theory (HT). The theory of gravity with NKC is a special case of HT. NKC in cosmological models provides a new mechanism of primordial inflation without potential tuning [1]. At the early stages of the Universe evolution, NKC can screen ordinary matter. This property provides a model of natural change of cosmological epochs. As is known, MF are observed at different scales of the Universe. Global MF implies anisotropic space-time. In anisotropic models with NKC, non-monotonic behavior of anisotropy is allowed [2, 3]. Adhering to the hypothesis of the birth of MF before or during primordial inflation, we study the interaction of magnetic and scalar fields within the framework of NKC. We ask questions about the isotropization of the model during the expansion, about the consequences of including MF in NKC model.

Methods and materials; results. The density of action for the NKC and the electromagnetic field is taken in the form

$$L = \sqrt{-g} \left(\frac{\mu R}{2} + \varepsilon X - \Lambda + \frac{\eta \phi}{2} G_{\mu\nu} \nabla^\mu \nabla^\nu \phi - \frac{1}{4} F^{\mu\eta} F_{\mu\eta} \right), \quad \mu = M_{\text{PL}}^2, \quad \varepsilon = \pm 1.$$

The model is studied within the framework of Bianchi I space-time. A necessary but insufficient condition for isotropization is the inequality $\varepsilon/\eta > 0$. The energy density of MF decreases from a limited value. Due to the inclusion of MF in NKC model, the sign of the parameter $l = 1 + \varepsilon\eta\Lambda/\mu$ begins to qualitatively influence the properties of the model. In case $l = 0$, the isotropization process is absent. In case $l < 0$, the singularity type changes: $a \rightarrow \text{const}$, $H \propto t^{-1/2} \rightarrow \infty$, $t \rightarrow 0$.

The Universe evolution begins with a non-zero volume. There are two branches of the solution. One branch describes a contracting universe. According to the other branch, the universe expands, but the model has ghosts and Laplace instability. In case $l > 0$, the type of singularity does not change: $a \propto t^{1/3} \rightarrow 0$, $H \propto t^{-1} \rightarrow \infty$, $t \rightarrow 0$. After a short post-singularity epoch, the Universe enters a quasi-de Sitter epoch with parameter $h_\eta = \sqrt{\varepsilon / (3\eta)} \approx 6 \cdot 10^{38} \text{ sec}^{-1}$. From the onset of inflation ($h_\eta \cdot t \approx 0.387$) the model becomes isotropic within a few units $h_\eta \cdot t$ (the duration of inflation $h_\eta \cdot t \approx 60$). Constraints $\varepsilon = 1$, $\eta > 0$, $\Lambda > 0$, $1 < \eta\Lambda / \mu < 1.049$ ensure the absence of ghosts, Laplace instability, and the observed tensor-scalar ratio $r < 0.1$.

Conclusion. Thus, it is possible to “harmoniously” include the MF in the NKC model with parameter $l > 0$. In other cases, the model has various disadvantages. The NKC suppresses the Λ -term and generates primary inflation. However, the Λ -term is an important factor of stability. For example, at $\Lambda = 0$, for scalar perturbations we have $c_s^2 = -1/3 < 0$. The Λ -term is represented in parameter l . Due to requirement $\varepsilon / \eta > 0$, sign Λ is critical for sign l , that is, the Λ -term regulates the degree of influence of MF on NKC model.

References

- [1] Sushkov S.V. Realistic cosmological scenario with nonminimal kinetic coupling. Phys. Rev. D, 2012, vol. 85, art. no. 123520. <https://doi.org/10.1103/PhysRevD.85.123520>
- [2] Galeev R., Muharlyamov R.K., Starobinsky A.A., Sushkov S.V., Volkov M.S. Anisotropic cosmological models in Horndeski gravity. Phys. Rev. D, 2021, vol. 103, art. no. 104015. <https://doi.org/10.1103/PhysRevD.103.104015>
- [3] Muharlyamov R.K., Pankratyeva T.N. Reconstruction in the Horndeski theory within the scope of the Bianchi I cosmology. Modern Physics Letters A, 2022, vol. 37, no. 17, art. no. 225018. <https://doi.org/10.1142/S0217732322501085>