

УДК 530.12

Космологические модели в специальном подклассе теории гравитации Хорндески

Ганин Максим Олегович

maximgn268@yandex.ru

Сушков Сергей Владимирович^(*)

sergey_sushkov@mail.ru

КФУ, Казань, Россия

Аннотация. Изучены космологические модели в специальном подклассе скалярно-тензорной теории гравитации Хорндески. Получены уравнения поля из действия с неминимальной кинетической связью. Проведен анализ решения наших моделей, исследовано поведение Вселенной на разных стадиях ее эволюции.

Ключевые слова: космология, скалярно-тензорные теории гравитации

Введение. Сегодня в космологии существует ряд нерешенных проблем, которые можно решить, модифицировав общую теорию относительности, либо путем введения дополнительных измерений, либо путем добавления дополнительных степеней свободы. После открытия в 1998 г. ускоренного расширения Вселенной появился новый импульс в изучении модифицированных теорий гравитации. Для этого требуется некий загадочный источник, пронизывающий все пространство-время или, другими словами, некое поле с отрицательным давлением $w \sim -1$. Наиболее вероятным кандидатом на это является вакуумная энергия квантовых полей. Но измеренные скорости расширения Вселенной показывают, что масса на 15–30 порядков меньше, чем должна быть в теории. Это несоответствие, известное как проблема космологической постоянной, побудило исследователей к изучению сценариев, которые могли бы объяснить самоускоряющееся поведение Вселенной за счет дегравитации вакуумной энергии. В качестве одного из универсальных вариантов решения этого несоответствия мы рассматриваем скалярно-тензорную теорию гравитации Хорндески [1] с уравнениями поля не выше второго порядка. Теория гравитации Хорндески содержит все ранее изученные модели со скалярным полем, связанным с гравитацией. Ввиду достаточной громоздкости и сложности для исследования общей теории Хорндески, мы рассмотрим подкласс этой теории гравитации, а именно однородные и изотропные космологические модели в подклассе этой теории с различным знаком кривизны $k = -1, 0, 1$, что соответствует открытой, плоской и закрытой моделям Вселенной.

Методы и материалы; результаты. В нашей работе мы рассматривали частный случай теории гравитации Хорндески, опираясь на работу [2]:

$$S = \int \left[X + \left(\frac{1}{2} M_{Pl}^2 + f(\phi) \sqrt{X} \right) R + \left[(\nabla_\mu \nabla^\nu \phi)^2 - (\nabla_\mu \nabla_\nu \phi)^2 \right] \right] dx^4,$$

где $f(\phi)$ — произвольная скалярная функция, R — скалярная кривизна, M_{Pl} — масса Планка, X — кинетический член, причем $X = \frac{1}{2}\dot{\phi}^2$ в метрике Фридмана — Леметра — Робертсона — Уолкера $ds^2 = -dt^2 + a(t)^2(\frac{dr^2}{1-kr^2} + r^2(d\theta^2 + \sin^2\theta d\varphi^2))$. Нашли основные уравнения поля с функцией скалярного поля, пользуясь статьей [3], которые необходимо изучить в данной однородной и изотропной космологической модели. В получившихся уравнениях мы рассмотрели случаи с функцией скалярного поля $f(\phi)$, принимающее постоянную ($f(\phi) = \beta_0$), линейную ($f(\phi) = \beta_0 + \beta_1\phi$) и квадратичную зависимости ($f(\phi) = \beta_0 + \beta_1\phi + \beta_2\phi^2$). Рассмотрели поведение масштабного фактора $a(t)$, параметра Хаббла $H(t)$ и скалярного поля $\phi(t)$ для каждого задания скалярного поля при определенных параметрах $\beta_0, \beta_1, \beta_2$.

Заключение. Исследована изотропная и однородная космологическая модель в специальном подклассе теории гравитации Хорндески. Получены основные полевые уравнения. Построены решения и проведен анализ. В случае $f(\phi) = \beta_0 + \beta_1\phi$ построена модель, описывающая квази-де Ситтеровскую стадию (инфляционную) стадию на раннем этапе эволюции Вселенной для открытой и плоской Вселенных. Поведение же закрытой Вселенной оказалось периодическим для случая $f(\phi) = \beta_0$ и уходящей в сингулярность для $f(\phi) = \beta_0 + \beta_1\phi$. Также, для $f(\phi) = \beta_0 + \beta_1\phi + \beta_2\phi^2$ показали сложное поведение Вселенной при различных параметрах $\beta_0, \beta_1, \beta_2$ для открытой, плоской и закрытой Вселенных.

Список источников

- [1] Horndeski G.W. Second-order scalar-tensor field equations in a four-dimensional space. International Journal of Theoretical Physics, 1974, vol. 10, pp. 363–384. <https://doi.org/10.1007/bf01807638>
- [2] Galeev R. et al. Anisotropic cosmological models in Horndeski gravity. Physical Review D, 2021, vol. 103, no. 10, art. no. 104015. <https://doi.org/10.1103/physrevd.103.104015>
- [3] Kobayashi T., Yamaguchi M., Yokoyama J. Generalized G-Inflation: — Inflation with the Most General Second Order Field Equations. Progress of Theoretical Physics, 2011, vol. 126, no. 3, pp. 511–529. <https://doi.org/10.1143/ptp.126.511>
- [4] Sushkov S.V. Realistic cosmological scenario with nonminimal kinetic coupling. Physical Review D — Particles, Fields, Gravitation, and Cosmology, 2012, vol. 85, no. 12, art. no. 123520. <https://doi.org/10.1103/physrevd.85.123520>
- [5] Clifton T. et al. Modified gravity and cosmology. Physics reports, 2012, vol. 513, no. 1–3, pp. 1–189. <https://doi.org/10.1016/j.physrep.2012.01.001>

Economy of Reusability of Future Cosmonautics and Issues of Efficiency

Ganin Maxim Olegovich¹

maximgn268@yandex.ru

Sushkov Sergey Vladimirovich^{2(*)}

sergey_sushkov@mail.ru

KFU, Kazan, Russia

Abstract. Cosmological models are studied in a special subclass of the scalar-tensor theory of gravity of Horndeski. Equations of the field of action with non-minimal kinetic coupling are obtained. An analysis of the solutions of our models is carried out, and the behavior of the Universe at different stages of its evolution is studied.

Keywords: cosmology, scalar-tensor theories of gravity

Introduction. There are currently a number of unsolved problems in cosmology that can be solved by modifying general relativity, either by introducing extra dimensions or by adding extra degrees of freedom. The discovery of the accelerating expansion of the Universe in 1998 has given new impetus to the study of modified theories of gravity. This requires some mysterious source permeating all of spacetime, or in other words, some field with a negative pressure $w \sim -1$. The most likely candidate for this is the vacuum energy of quantum fields. But measured expansion rates of the Universe show that the mass is 15 to 30 orders of magnitude smaller than expected in theory. This discrepancy, known as the cosmological constant problem, has prompted researchers to explore scenarios that could explain the self-accelerating behavior of the Universe through the degravitation of the vacuum energy. As one of the universal variants of solving this discrepancy, we consider the scalar-tensor theory of Horndeski gravity [1] with field equations of no higher than the second order. The Horndeski theory of gravity contains all previously studied models with a scalar field associated with gravity. Due to the sufficient bulkiness and complexity for studying the general Horndeski theory, we will consider a subclass of this theory of gravity, namely, homogeneous and isotropic cosmological models in the subclass of this theory with different signs of curvature $k = -1, 0, 1$, which corresponds to the open, flat and closed models of the Universe.

Methods and materials; results. In our work we considered a special case of Horndeski's theory of gravity, based on the work [2]:

$$S = \int [X + \left(\frac{1}{2}M_{Pl}^2 + f(\phi)\sqrt{X}\right)R + [(\nabla_\mu \nabla^\nu \phi)^2 - (\nabla_\mu \nabla_\nu \phi)^2]]dx^4,$$

where $f(\phi)$ is an arbitrary scalar function, R is the scalar curvature, M_{Pl} is the Planck mass, X is the kinetic term, and $X = \frac{1}{2}\dot{\phi}^2$ in the Friedmann-Lemaitre-Robertson-Walker metric $ds^2 = -dt^2 + a(t)^2(\frac{dr^2}{1-kr^2} + r^2(d\theta^2 + \sin^2\theta d\varphi^2))$. We found the basic field equations with the scalar field function using the article [3], which need to be studied in this homogeneous and isotropic cosmological

model. In the resulting equations, we considered cases with the scalar field function $f(\phi)$ taking a constant ($f(\phi) = \beta_0$), linear ($f(\phi) = \beta_0 + \beta_1\phi$) and quadratic dependences ($f(\phi) = \beta_0 + \beta_1\phi + \beta_2\phi^2$). We considered the behavior of the scale factor $a(t)$, the Hubble parameter $H(t)$ and the scalar field $\phi(t)$ for each assignment of the scalar field for certain parameters $\beta_0, \beta_1, \beta_2$.

Conclusion. An isotropic and homogeneous cosmological model in a special subclass of the Horndeski gravity theory is investigated. The main field equations are obtained. Solutions are constructed and an analysis is performed. In the case of $f(\phi) = \beta_0 + \beta_1\phi$, a model is constructed that describes the quasi-de Sitter stage (inflationary) at the early stage of the Universe evolution for the open and flat Universes. The behavior of the closed Universe turned out to be periodic for the case of $f(\phi) = \beta_0$ and going into a singularity for $f(\phi) = \beta_0 + \beta_1\phi$. Also, for $f(\phi) = \beta_0 + \beta_1\phi + \beta_2\phi^2$, a complex behavior of the Universe was shown for different parameters $\beta_0, \beta_1, \beta_2$ for the open, flat and closed Universes.

References

- [1] Horndeski G.W. Second-order scalar-tensor field equations in a four-dimensional space. International Journal of Theoretical Physics, 1974, vol. 10, pp. 363–384. <https://doi.org/10.1007/bf01807638>
- [2] Galeev R. et al. Anisotropic cosmological models in Horndeski gravity. Physical Review D, 2021, vol. 103, no. 10, art. no. 104015. <https://doi.org/10.1103/physrevd.103.104015>
- [3] Kobayashi T., Yamaguchi M., Yokoyama J. Generalized G-Inflation: — Inflation with the Most General Second Order Field Equations. Progress of Theoretical Physics, 2011, vol. 126, no. 3, pp. 511–529. <https://doi.org/10.1143/ptp.126.511>
- [4] Sushkov S.V. Realistic cosmological scenario with nonminimal kinetic coupling. Physical Review D — Particles, Fields, Gravitation, and Cosmology, 2012, vol. 85, no. 12, art. no. 123520. <https://doi.org/10.1103/physrevd.85.123520>
- [5] Clifton T. et al. Modified gravity and cosmology. Physics reports, 2012, vol. 513, no. 1–3, pp. 1–189. <https://doi.org/10.1016/j.physrep.2012.01.001>