




МРНТИ 29.05.41

<https://doi.org/10.26577/RCPh20259211>Д.Ж. Рахатов* , П.Ю. Цыба , О.В. Разина 

Евразийский национальный университет имени Л.Н. Гумилева, г.Астана, Казахстан

*e-mail: godauren@gmail.com

ГИБРИДНЫЕ НЕСИНГУЛЯРНЫЕ РЕШЕНИЯ МОДЕЛИ ЭЙНШТЕЙНА-ГАУССА-БОННЕ

Стандартная космологическая модель, основанная на концепции Большого взрыва, неизбежно сталкивается с проблемой начальной сингулярности, в которой теряют применимость современные физические законы. Одним из альтернативных подходов к разрешению данной проблемы является теория космологического отскока, предполагающая фазу сжатия, предшествующую расширению Вселенной. Однако традиционные модели отскока часто противоречат инфляционной теории и могут приводить к динамическим неустойчивостям. В данной работе представлена новая модель космологического отскока, основанная на модифицированной гравитации Эйнштейна-Гаусса-Бонне с масштабным фактором гибридного типа, сочетающим преимущества степенного и экспоненциального расширения. Для проверки соответствия модели наблюдательным данным применен метод Марковских цепей Монте-Карло с использованием данных Pantheon+ и SH0ES. Показано, что предложенная модель стабильна, что подтверждается положительными значениями скорости распространения барионных осцилляций, а также обеспечивает плавный переход от замедленного расширения к ускоренному. Анализ ранних стадий эволюции Вселенной проведен на основе параметров медленного скатывания, демонстрирующих наличие инфляционной фазы и ее достаточную продолжительность. Дополнительная проверка модели осуществлена путем сравнения теоретических предсказаний с данными наблюдений Planck 2018, обработанными с использованием статистического кода Cobaya. Полученные результаты подтверждают возможность реализации устойчивого космологического отскока, согласующегося с инфляционной парадигмой и современными космологическими ограничениями.

Ключевые слова: космология отскока, сингулярность, МСМС, инфляция, Эйнштейн-Гаусс-Бонне.

Д.Ж. Рахатов*, П.Ю. Цыба, О.В. Разина

Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті, Астана қ., Қазақстан

*e-mail: godauren@gmail.com

Эйнштейн-Гаусс-Бонне моделінің гибриді сингулярлы емес шешімдері

Үлкен Жарылыс тұжырымдамасына негізделген стандартты космологиялық модель қазіргі физикалық заңдардың қолданылуын жоғалтатын бастапқы сингулярлық проблемасына тап болады. Бұл мәселені шешудің бір баламасы – ғаламның ұлғаюына дейінгі қысу фазасын болжайтын космологиялық серпіліс теориясы. Алайда, дәстүрлі серпіліс модельдері көбінесе инфляциялық теорияға қайшы келеді және динамикалық тұрақсыздыққа әкелуі мүмкін. Бұл жұмыс Эйнштейн-Гаусс-Бонне модификацияланған гравитацияға негізделген, дәрежелік және экспоненциалды ұлғаюдың артықшылықтарын біріктіретін гибриді типті масштабты факторды қолданатын космологиялық қалпына келтірудің жаңа моделін ұсынады. Модельдің бақылау деректеріне сәйкестігін тексеру үшін Pantheon+ және SH0ES үлгілерін қолдана отырып, Монте-Карло Марков тізбектерінің әдісі қолданылды. Ұсынылған модель бариондық тербелістердің таралу жылдамдығының оң мәндерімен расталып, динамикалық тұрақтылыққа ие, сонымен қатар баяу ұлғаюдан үдемелі ұлғаюға біртіндеп ауысуды қамтамасыз етеді. Ғаламның эволюциясының алғашқы кезеңдерін талдау инфляциялық фазаның болуын және оның одан әрі ұлғаюы үшін жеткілікті ұзақтығын көрсететін баяу сырғу параметрлеріне негізделген. Модельді қосымша тексеру үшін оның теориялық болжамдары Cobaya статистикалық кодымен өңделген Planck 2018 бақылау деректерімен салыстырылады. Алынған нәтижелер инфляциялық парадигмаға және қазіргі космологиялық шектеулерге сәйкес келетін тұрақты космологиялық серпілісті жүзеге асыру мүмкіндігін растайды.

Түйін сөздер: серпіліс космология, сингулярлық, МСМС, инфляция, Эйнштейн-Гаусс-Бонне.

D.Z. Rakhatov*, P.Y. Tsyba, O.V. Razina
 L.N. Gumilyov Eurasian National University, Astana, Kazakhstan
 *e-mail: godauren@gmail.com

Hybrid nonsingular solutions of the Einstein-Gauss-Bonnet model

The standard cosmological model, based on the concept of the Big Bang, inevitably faces the problem of an initial singularity, in which modern physical laws lose their applicability. One of the alternative approaches to solving this problem is the theory of cosmological bounce, which assumes a phase of contraction preceding the expansion of the Universe. However, traditional bounce models often conflict with inflationary theory and can lead to dynamic instabilities. This paper presents a new model of cosmological bounce based on modified Einstein-Gauss-Bonnet gravity and using a hybrid type scale factor combining the advantages of power and exponential expansion. To verify the correspondence of the model to the observational data, the Markov chain Monte Carlo method was applied using Pantheon+ and SH0ES datasets. It is shown that the proposed model has dynamic stability, confirmed by positive values of the propagation speed of baryon oscillations, and provides a smooth transition from decelerated expansion to accelerated expansion. The analysis of the early stages of the Universe's evolution was carried out based on slow-roll parameters, demonstrating the presence of an inflationary phase and its sufficient duration for subsequent expansion. Additional verification of the model was carried out by comparing theoretical predictions with Planck 2018 observational data processed using the Cobaya statistical code. The results obtained confirm the possibility of realizing a stable cosmological rebound consistent with the inflationary paradigm and modern cosmological constraints.

Key words: bounce cosmology, singularity, MCMC, inflation, Einstein-Gauss-Bonnet.

Введение

Современная космология базируется на теории Большого Взрыва, которая успешно объясняет формирование крупномасштабной структуры и реликтового излучения [1]. Однако модель содержит в себе проблему первичной сингулярности, из-за которой начальный момент времени характеризуется бесконечной температурой и плотностью [2]. Наличие сингулярных значений выходит за рамки общей теории относительности и остается нерешенной проблемой. Для поиска решений необходимо введение новых физических механизмов, позволяющих описывать ранние этапы эволюции Вселенной без начальной сингулярности.

Одним из возможных решений является модель космологического отскока (cosmological bounce) [3]. В моделях такого типа фазе расширения предшествует фаза сжатия Вселенной. Таким образом удастся избежать наличия начальной сингулярности и осуществить непрерывность эволюции Вселенной. Однако, большинство предложенных моделей противоречат теории космологической инфляции, которая успешно объясняет первые мгновения после Большого Взрыва [4]. К тому же последние достижения наблюдательной космологии позволили выявить более четкие ограничения на существующие модели ранней Вселенной [5]. Наблюдения подтвердили наклон спектра скалярных возмущений n_s в красную область $n_s < 1$, что характерно для инфляци-

онных моделей. В моделях космологического отскока, напротив, наклон спектра имеет синий наклон $n_s > 1$ [6]. Помимо противоречий с инфляционной теорией, некоторые модели нарушают условие стабильности, основанное на скорости распространения барионных осцилляций C_S^2 [7], что приводит к противоречиям, связанным с поздними этапами расширения Вселенной. Тем не менее, перспектива решения проблемы начальной сингулярности при помощи космологического отскока остается актуальной и набирает популярность последние несколько лет [8–10].

Целью работы является разработка и тестирование модели космологического отскока, лишенной классических недостатков такого типа моделей. Для реализации жизнеспособной модели разработан новый масштабный фактор используемый совместно с моделью Эйнштейна-Гаусса-Бонне [11]. Выбор данной модели основан на ее перспективности в сфере исследования гравитационных волн [12]. Прогресс в сфере наблюдения гравитационных волн в ближайшем будущем поможет лучше исследовать самые ранние этапы формирования Вселенной, на которые нацелена данная работа. Преимуществом масштабного фактора гибридного отскока является высокая степень универсальности, основанная на одновременном использовании степенного и экспоненциального типа расширения. Наличие дополнительных промежуточных значений позволяет более тонко настроить модель.

Доказательство жизнеспособности модели строится на анализе ранних и поздних этапов расширения Вселенной. Для сравнения модели с наблюдениями использован метод Марковских цепей Монте-Карло (MCMC) совместно с данными Pantheon+ и SH0ES [13]. На основе статистического анализа вычисляются точные значения параметров масштабного фактора, используемые далее для анализа стабильности модели и динамики ускоренного расширения. Проверка в рамках ранней Вселенной основана на параметрах медленного скатывания, показывающих наличие инфляции и ее достаточную длительность для дальнейшего расширения. Отсутствие противоречий с теорией инфляции дополнительно проверяется сравнением с данными наблюдения Planck 2018 с использованием кода Собауа для статистического анализа [14]. Сравнительный статистический анализ позволяет проверить наличие противоречий с наклоном спектра скалярных возмущений n_s . Дополнительной ступенью проверки является анализ расхождения результатов статистического анализа в рамках ранней и поздней Вселенной.

Уравнения движения и масштабный фактор гибридного отскока

Действие исследуемой модели содержит компоненты скалярной кривизны пространства, скалярного поля, функцию связи и инвариант Гаусса-Бонне.

$$S = \int d^4x \sqrt{-g} \left[\frac{1}{2} R + \frac{1}{2} \dot{\phi}^2 - V(\phi) - \xi(\phi) G \right], \quad (1)$$

где g – определитель метрического тензора; R – скалярная кривизна пространства; ϕ – скалярное поле; $V(\phi)$ – потенциал скалярного поля; $\xi(\phi)$ – функция связи; G – инвариант Гаусса-Бонне.

Инвариант Гаусса-Бонне и скаляр Риччи вычисляются по формулам

$$R = g^{ik} R_{ik}, \quad (2)$$

$$G = R_{iklm} R^{iklm} - 4R_{ik} R^{ik} + R^2, \quad (3)$$

где R_{ik} – тензор Риччи; R_{iklm} – тензор Римана.

Вариация действия (1) по метрическому тензору $g_{\mu\nu}$ приводит к уравнению поля вида

$$\begin{aligned} 0 = & \frac{1}{2} \left(-R_{\mu\nu} + \frac{1}{2} g_{\mu\nu} R \right) + \frac{1}{2} \partial_\mu \phi \partial_\nu \phi - \frac{1}{4} g_{\mu\nu} \partial_\rho \phi \partial^\rho \phi - \frac{1}{2} g_{\mu\nu} V(\phi) - \\ & - 2 \left(\nabla_\mu \nabla_\nu \xi(\phi) \right) R + 2 R_{\mu\nu} (\nabla^2 \xi(\phi)) R + 4 \left(\nabla_\rho \nabla_\mu \xi(\phi) \right) R_\nu^\rho + 4 \left(\nabla_\rho \nabla_\nu \xi(\phi) \right) R_\mu^\rho - \\ & - 4 (\nabla^2 \xi(\phi)) R_{\mu\nu} - 4 g_{\mu\nu} \left(\nabla_\rho \nabla_\sigma \xi(\phi) \right) R^{\rho\sigma} + 4 (\nabla^\rho \nabla^\sigma \xi(\phi)) R_{\mu\rho\nu\sigma}. \end{aligned} \quad (4)$$

Модель исследуется в рамках метрики Фридмана-Робертсона-Уокера, характеризующей четырехмерную, плоскую, однородную и изотропную Вселенную.

$$ds^2 = -dt^2 + a^2(t)(dx^2 + dy^2 + dz^2), \quad (5)$$

Корень определителя метрического тензора в таком случае $\sqrt{-g} = a^3$. Используется естественная система единиц $8\pi G = M_p^{-2} = \hbar = c = 1$. Использование метрики (5) совместно с формулами (2, 3) и уравнением поля (4) позволяет получить уравнения движения.

$$\begin{aligned} p = & -3H^2 - 2\dot{H} = \\ = & \frac{1}{2} \dot{\phi}^2 - V - 16H(\dot{H} + H^2)\xi - 8H^2\ddot{\xi}, \end{aligned} \quad (6)$$

$$\rho = 3H^2 = \frac{1}{2} \dot{\phi}^2 + V + 24H^3\dot{\xi}, \quad (7)$$

$$\ddot{\phi} + 3H\dot{\phi} + G\xi_\phi + V_\phi = 0. \quad (8)$$

В рамках исследуемой модели уравнения (6, 7) являются модифицированными уравнениями Фридмана, в которых p – давление, ρ – плотность энергии. Модифицированная версия уравнения Клейна-Гордона задана уравнением (8). Для реализации космологического отскока разработана модификация гибридного масштабного фактора, комбинирующая степенную и экспоненциальную части, где параметр $\alpha \ll 1$.

$$a(t) = \alpha + \beta e^{\gamma t^2} t^{2\delta}, \quad (9)$$

где β, γ, δ – параметры масштабного фактора.

Масштабный фактор такого типа позволяет достичь высокой степени универсальности получаемых решений. Так, случай $\gamma = 0$ обеспечивает степенное решение. Случай $\delta = 0$ преобразует масштабный фактор в экспоненциальный вид. Дополнительным преимуществом является наличие промежуточных случаев, в которых $\gamma > 0$ и $\delta > 0$. Наличие симметрии, необходимой

для космологического отскока, обеспечено компонентами времени вида t^2 . Для наглядности все подвиды используемого масштабного фактора изображены на рисунке 1.

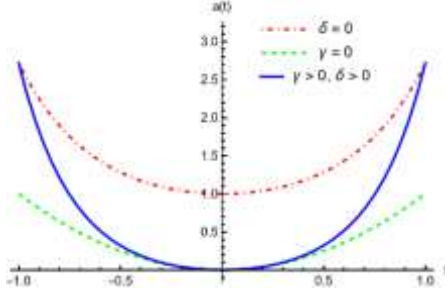


Рисунок 1 – Масштабный фактор гибридного отскока при $\gamma = 0$, $\delta = 0$ и $\gamma > 0$, $\delta > 0$.

Далее, необходимо вычислить безразмерный параметр Хаббла, получаемый на основе масштабного фактора по формуле

$$h(t) = \frac{\dot{a}(t)}{a(t)} = \frac{2\beta e^{\gamma t^2}(\delta + \gamma t^2)}{t(\alpha t^{-2\delta} + \beta e^{\gamma t^2})}. \quad (10)$$

$$\phi^2 = -\frac{4\beta e^{\gamma t^2} t^{2\delta-3} (\beta e^{\gamma t^2} t^{2\delta} (\gamma t^2 - \delta)) (-16\xi_1 \beta e^{2\gamma t^2} t^{4\delta} (\delta + \gamma t^2) + \beta e^{\gamma t^2} t^{2\delta+1})}{(\beta e^{\gamma t^2} t^{2\delta})^3}, \quad (13)$$

$$V = -\frac{\beta e^{\gamma t^2} t^{2\delta} (\delta(6\delta - 1) + 6\gamma^2 t^4 + t^2(12\gamma\delta + \gamma))}{(\beta e^{\gamma t^2} t^{2\delta})^3} \times \\ \times 2\beta e^{\gamma t^2} t^{2\delta-3} (16\beta \xi_1 e^{2\gamma t^2} t^{4\delta} (\delta + \gamma t^2) - \beta e^{\gamma t^2} t^{2\delta+1}). \quad (14)$$

Анализ параметров ранней и поздней Вселенной

Полученные решения необходимо протестировать в рамках поздних и ранних этапов расширения Вселенной. Однако масштабный фактор (9) содержит свободные параметры, без точного определения которых дальнейший анализ невозможен. Для обеспечения объективности вычислений необходимо использовать методы, основанные на сравнении с данными наблюдений. Для анализа модели (1) в рамках поздней Вселенной используются данные Pantheon+ и SH0ES [13], со-

держащие измерения характеристик 1550 сверхновых типа Ia в диапазоне красных смещений $0.01 < z < 2.26$. Анализ параметров ранней Вселенной основан на сравнении модели с данными Planck 2018 [5].

$$\ddot{\xi} - H\dot{\xi} = 0. \quad (11)$$

Подстановка параметра Хаббла (10) в условие (11) позволяет вычислить функцию связи, соответствующую ограничениям.

$$\xi(t) = \xi_0 - \frac{1}{2}\xi_1 t^{1-6\delta} \text{Ei}\left(\frac{1}{2} + 3\delta, 3\gamma t^2\right), \quad (12)$$

где ξ_0 , ξ_1 – параметры функции связи; Ei – интегральная показательная функция.

Комбинация уравнений (6) и (7) с полученными значениями параметра Хаббла (10) и функции связи (12) приводит к получению кинетической и потенциальной части скалярного поля

Первым шагом для анализа поздней Вселенной является переход в термины красного смещения $a(t) = (z + 1)^{-1}$. Благодаря такому переходу есть возможность оценить относительно точное время событий. Целевым результатом преобразования является безразмерный параметр Хаббла, на основе которого происходят дальнейшие вычисления

$$h(z) = \frac{e^{\delta W \left(\frac{\gamma \left(\frac{(1+z)^{-1}}{\beta} \right)^{\frac{1}{\delta}} \right)} \left[1 + W \left(\frac{\gamma \left(\frac{(1+z)^{-1}}{\beta} \right)^{\frac{1}{\delta}} \right) \right] \left[W \left(\frac{\gamma \left(\frac{(1+z)^{-1}}{\beta} \right)^{\frac{1}{\delta}} \right) \right]^{-\frac{1}{2}}}{2\beta \sqrt{\gamma \delta} e^{\delta W \left(\frac{\gamma \left(\frac{(1+z)^{-1}}{\beta} \right)^{\frac{1}{\delta}} \right)}}, \quad (15)$$

где $W(x)$ – функция Ламберта [17]; z – красное смещение. Далее, безразмерный параметр Хаббла в терминах красного смещения (15) используется

для вычисления расстояния светимости d_L , которое далее, используется в формуле фотометрического расстояния μ [18].

$$d_L = (1+z) \frac{c}{H_0} \int_0^z \frac{dz}{h(z)} \Rightarrow \mu = 5[\log_{10}(d_L) + 5], \quad (16)$$

где c – скорость света; H_0 – параметр Хаббла в настоящее время (при $z = 0$).

Для дальнейшей статистической обработки данных наблюдений и теоретических значений

фотометрического расстояния применяется метод МСМС. Результаты оптимизации параметров масштабного фактора показаны на рисунке 2.

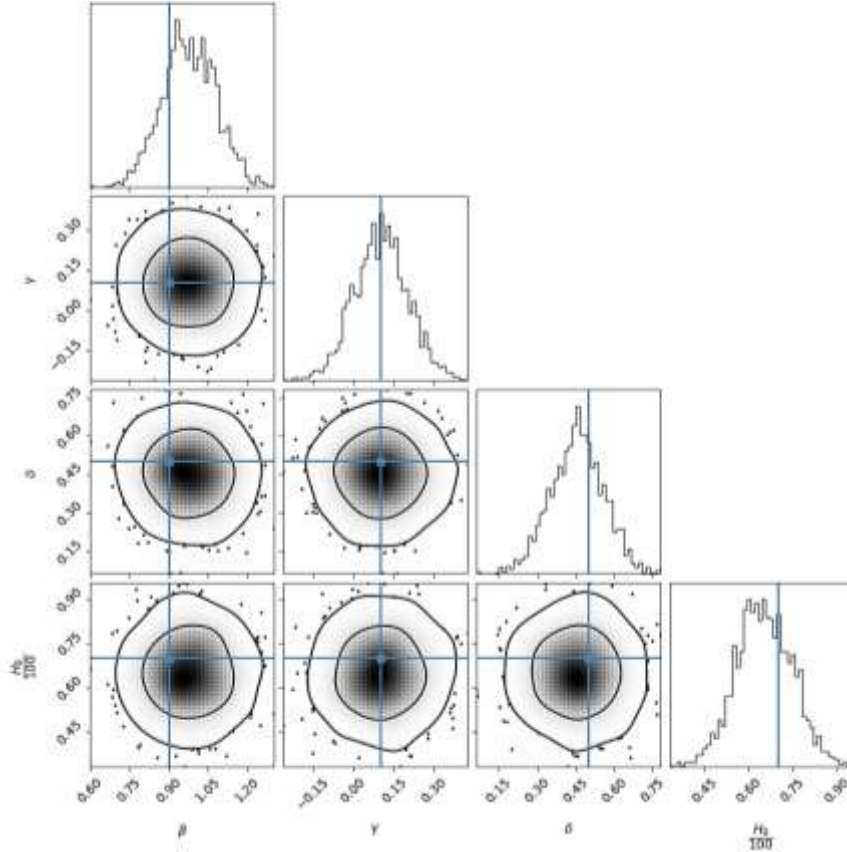


Рисунок 2 – Контурлы достоверности 68% и 95% оптимизированных параметров масштабного фактора на основе данных Pantheon+ и SH0ES.

В результате статистической обработки вычислены наиболее вероятные значения параметров $\beta = 0.974 \pm 0.07$, $\gamma = 0.1 \pm 0.065$ и $\delta = 0.457 \pm 0.069$. При таких значениях достигнуто максимальное соответствие данным наблюдений, показанное на рисунке 3.

Далее, для оценки динамики ускоренного расширения поздней Вселенной применяется космографический параметр замедления $q(z)$ [19]. Одним из наиболее примечательных событий поздней Вселенной является переход от замедленного расширения к ускоренному [20]. График параметра замедления $q(z)$ в сравнении с данными наблюдений показан на рисунке 4.

$$q(z) = \frac{\partial H(z)}{\partial z} \frac{(1+z)}{H(z)} - 1. \quad (17)$$

Наличие перехода от замедленного расширения к ускоренному определяется пересечением $q(z) = 0$. Замедленному расширению Вселенной соответствуют значения $q(z) > 0$. Ускоренный режим наблюдается при $q(z) < 0$. Рисунок 4 демонстрирует наличие перехода в момент $z \approx 0.66$, совпадающий с данными наблюдений. Связь красного смещения и времени [21] показывает, что переход произошел примерно 6.1 млрд. лет назад.

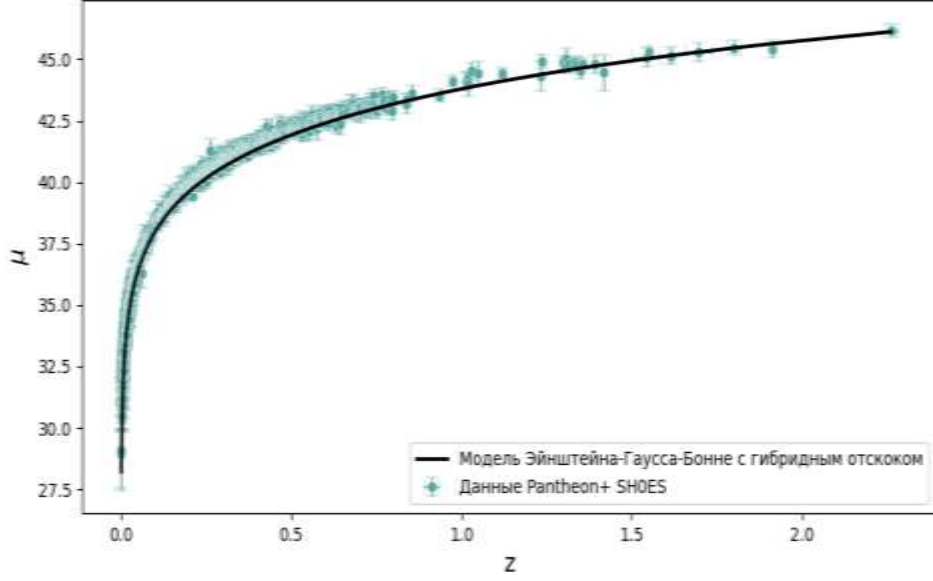


Рисунок 3 – Теоретические значения фотометрического расстояния $\mu(z)$ в сравнении с данными наблюдений при оптимизированных значениях параметров.

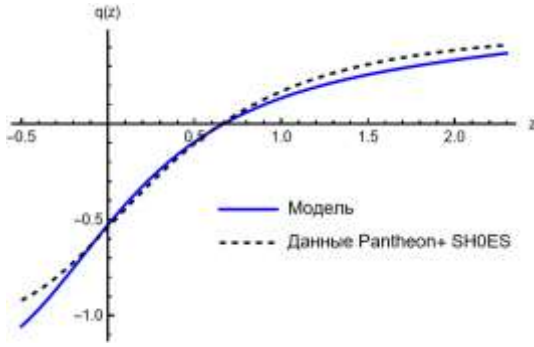


Рисунок 4 – Параметр замедления $q(z)$ модели в сравнении с данными наблюдений.

Несмотря на успешное соответствие данным наблюдений, использование решений на основе сценария космологического отскока может привести к нестабильности модели. Для проверки стабильности используется метод, основанный на скорости распространения барионных осцилляций, упрощенно называемой скоростью звука [22]. В ранние этапы эволюции Вселенной плотность барионной материи была достаточно высокой, обеспечивая скорость звука $C_S \approx 57\%$ от скорости света [23]. В настоящее время плотность материи близка к нулевой. Тем не менее, стабильные космологические модели должны демонстрировать положительные значения квадрата скорости звука C_S^2 , вычисляемые по формуле

$$C_S^2(t) = \frac{\dot{p}(t)}{\dot{\rho}(t)}. \quad (18)$$

Использование терминов обобщенного времени позволяет оценить не только поздние и ранние этапы эволюции Вселенной, но и стабильность до момента отскока. В данном случае момент космологического отскока $t = 0$ совпадает с моментом начала Вселенной. График квадрата скорости распространения барионных осцилляций показан на рисунке 5.

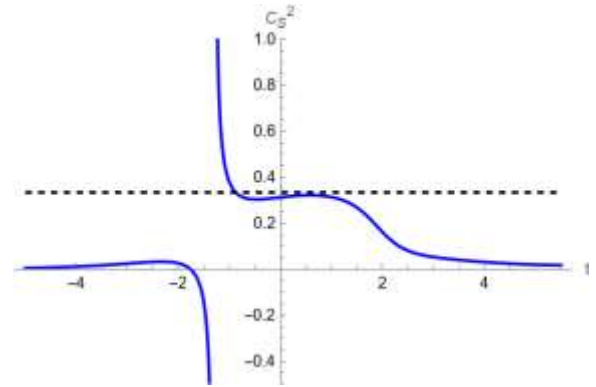


Рисунок 5 – Квадрат скорости распространения барионных осцилляций $C_S^2(t)$

Рисунок 5 показывает наличие нестабильности до точки отскока $t = 0$, после чего достигается максимальное значение скорости звука $C_S^2(t) \approx 0.333$. Дальнейшее уменьшение функции свидетельствует об уменьшении плотности материи. Так как модели космологического отскока часто являются альтернативой теории инфляции, первым шагом необходимо проверить наличие про-

тиворечий. Оценка инфляционной динамики реализуется при помощи параметров медленного скатывания.

$$\epsilon_1 = \frac{\dot{H}}{H^2}, \quad \epsilon_2 = \frac{\dot{\epsilon}_1}{H\epsilon_1}. \quad (19)$$

Соблюдение условия $\epsilon_1 \ll 1$ свидетельствует о наличии инфляции. Выполнение условия $\epsilon_2 \ll 1$ доказывает достаточную длительность данной фазы [24]. Оценка параметров ранней Вселенной происходит в терминах количества е-фолдов $a(t) = e^N$. Так, инфляционный диапазон ограничивается 50-60 е-фолдами, что показано на рисунке 6.

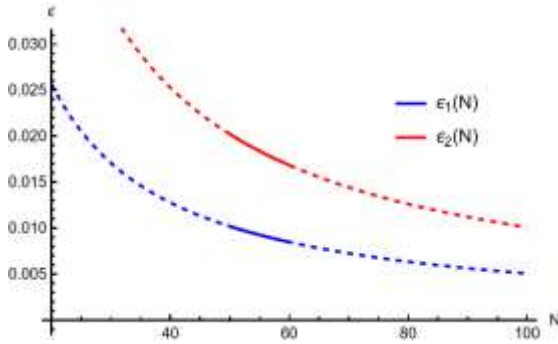


Рисунок 6 – Параметры медленного скатывания $\epsilon_1(N)$ и $\epsilon_2(N)$ в инфляционном диапазоне 50-60 е-фолдов.

Рисунок 6 свидетельствует об отсутствии противоречий между предложенной моделью отскока и космологической инфляцией. Модель демонстрирует наличие инфляции, соответствуя условию $\epsilon_1 \ll 1$ и достаточную длительность инфляционного периода согласно условию $\epsilon_2 \ll 1$.

Далее, параметры медленного скатывания используются для вычисления спектрального индекса скалярных возмущений n_s и отношения тензора к скаляру r . Анализ данных параметров позволяет определить влияние масштаба на скалярные возмущения.

$$n_s - 1 = -6\epsilon_1 + 2\epsilon_2, \quad (20)$$

$$r = 16\epsilon_1. \quad (21)$$

Соответствие условию $n_s < 1$ свидетельствует о красном наклоне спектра скалярных возмущений, что согласуется с инфляционной теорией [25]. Выполнение данного условия говорит о больших амплитудах возмущений на больших масштабах. Синий наклон $n_s > 1$ демонстрирует случай, при котором амплитуда возмущений выше на малых масштабах и ниже на больших. Это означает, что мелкомасштабные возмущения были более выражены в ранней Вселенной. Такой спектр не согласуется с наблюдениями и не предсказывается стандартными инфляционными моделями. Нейтральный наклон $n_s = 1$ характеризует одинаковую амплитуду на всех масштабах. Однако современные наблюдения показывают небольшое отклонение в сторону красного спектра.

Для более точной оценки модели необходимо провести сравнение с данными наблюдений. Наиболее релевантным источником является база данных результатов Planck 2018 по причине приоритетной направленности миссии на исследование параметров ранней Вселенной. Для сравнения использован метод МСМС совместно с кодом Собауа для статистического анализа, результаты которого показаны на рисунке 7.

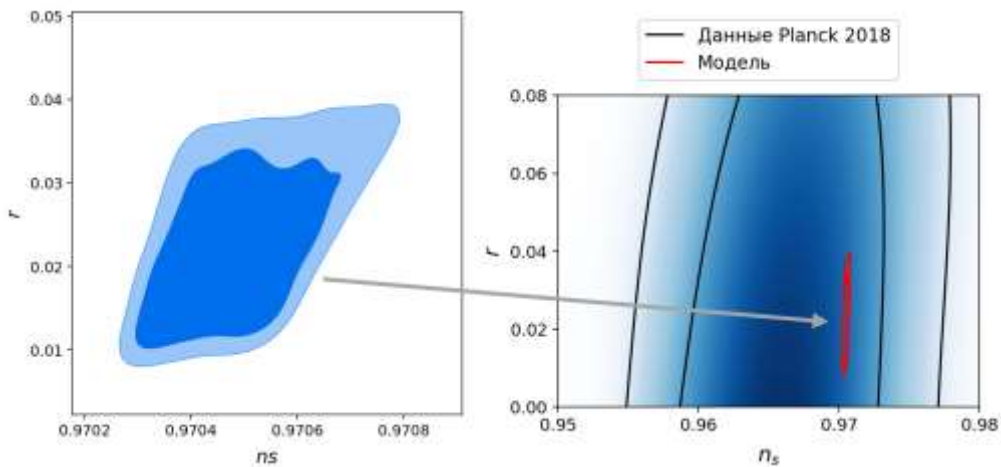


Рисунок 7 – Контуров достоверности 68% и 95% спектрального индекса скалярных возмущений $n_s(N)$ и отношения тензора к скаляру $r(N)$ в сравнении с данными Planck 2018.

Рисунок 7 демонстрирует отсутствие противоречий между предложенной моделью и теорией космологической инфляции. Показано соответствие данным наблюдений и наклон в красную сторону спектра скалярных возмущений. В результате статистической обработки вычислены наиболее вероятные значения параметров масштабного фактора: $\beta = 1.0 \pm 0.057$, $\gamma = 0.099 \pm 0.0581$, $\delta = 0.449 \pm 0.086$. Незначительные отклонения параметров модели при использовании данных Pantheon+, SH0ES и Planck 2018 свидетельствуют об универсальности модели в рамках исследования как ранних, так и поздних этапов расширения Вселенной.

Заключение

В данной работе была разработана и протестирована модель Эйнштейна-Гаусса-Бонне с масштабным фактором гибридного отскока. В отличие от традиционных подходов, предложенная модель сочетает в себе преимущества степенного и экспоненциального расширения, что позволяет тонко настраивать различные параметры эволюции Вселенной. На основе масштабного фактора гибридного отскока, с учетом ограничений скорости распространения гравитационных волн получены аналитические решения. Для точного вычисления параметров масштабного фактора использован статистический анализ методом MCMC на основе данных Pantheon+, SH0ES и Planck 2018.

Выяснилось, что для соответствия данным наблюдений, значения параметров ограничены диапазонами $\beta = 0.974 \pm 0.07$, $\gamma = 0.101 \pm 0.065$ и $\delta = 0.457 \pm 0.069$. Вычисленные значения позволили осуществить анализ динамики ускоренного расширения через параметр замедления $q(z)$. Рисунок 4 демонстрирует наличие перехода 6.1 млрд. лет назад. Далее проведен анализ стабильности модели, являющийся одним из наиболее критических для моделей отскока. По-

лученные данные свидетельствуют о стабильности модели в окрестности момента отскока $t = 0$. Помимо стабильности, показано, что динамика изменения скорости распространения барионных колебаний соответствует данным наблюдений и составляет 57% от скорости света.

Анализ совместимости с данными ранней Вселенной осуществлен при помощи параметров медленного скатывания. Несмотря на природу исследуемой модели, противоречия между космологическим отскоком и теорией инфляции не были обнаружены. Полученные данные свидетельствуют о наличии инфляции в модели и ее достаточной длительности. Для сравнения с данными наблюдений использованы данные миссии Planck 2018 совместно с кодом для статистического анализа Cobaya.

Для соответствия параметрам ранней Вселенной значения ограничены диапазонами $\beta = 1.0 \pm 0.057$, $\gamma = 0.099 \pm 0.0581$ и $\delta = 0.449 \pm 0.086$. Выяснилось, что расхождение данных статистического анализа в рамках ранней и поздней Вселенной минимально, что свидетельствует о возможности использования предложенной модели для анализа всей истории Вселенной.

Таким образом, предложенная модель представляет собой важный шаг в решении проблемы начальной сингулярности, обеспечивая совместимость с основными положениями современной космологии. Дальнейшее развитие данного подхода, а также новые достижения в наблюдении гравитационных волн, могут способствовать более глубокому пониманию ранних этапов эволюции Вселенной и уточнению физических механизмов, ответственных за ее динамику.

Благодарность

Данное исследование профинансировано Комитетом науки Министерства науки и высшего образования Республики Казахстан (грант № AP19674478).

Литература

- 1 Zhu X., Zhu J., Zhang M. A Brief Overview of the Big Bang Theory with Frontier Attachments // Theoretical and Natural Science. — 2023. — Т. 5, № 1. — С. 87–94.
- 2 Heller M. Cosmological Singularity and the Creation of the Universe // Zygon. — 2000. — Т. 35, № 3. — С. 665–685.
- 3 Brandenberger R., Peter P. Bouncing Cosmologies: Progress and Problems // Foundations of Physics. — 2017. — Т. 47, № 6. — С. 797–850.
- 4 Battefeld D., Peter P. A Critical Review of Classical Bouncing Cosmologies // Phys Reports. — 2014. — Т. 571. — С. 1–66.
- 5 Akrami Y. et al. Planck 2018 results. X. Constraints on inflation // Astron Astrophys. — 2018. — Т. 641. — С. 61.

- 6 Marozzi G., Tedesco L., Bozza V. Cosmological Perturbations in Bouncing Cosmologies and the Case of the Pre-Big Bang Scenario // *Universe*. — 2022. — T. 8, № 7. — C. 379.
- 7 Zubair M., Farooq M. Bouncing behaviours in four dimensional Einstein Gauss-Bonnet gravity with Cosmography and Observational constraints. // *The European Physical Journal Plus*. — 2023. — T.138, № 2. — C. 173.
- 8 Odintsov S.D., Paul T. Bounce universe with finite-time singularity. // *Universe* — 2022. — T.8, № 5. — C. 292.
- 9 Garcia-Saenz S., Hua J., Zhao Y. Geodesic completeness, cosmological bounces and inflation // *Physical Review D*. — American Physical Society, — 2024. — T. 110, № 6.
- 10 Ben-Dayana I. et al. Gravitational-wave background in bouncing models from semi-classical, quantum and string gravity // *Journal of Cosmology and Astroparticle Physics*. — 2024. — № 9. — C. 058.
- 11 Fernandes P.G.S. et al. The 4D Einstein-Gauss-Bonnet Theory of Gravity: A Review // *Class Quantum Gravity*. — 2022. — T. 39, № 6.
- 12 Nojiri S., Odintsov S.D., Oikonomou V.K. Propagation of Gravitational Waves in Einstein--Gauss-Bonnet Gravity for Cosmological and Spherically Symmetric Spacetimes. // *Nuclear Physics B*. — 2024. — № 998.
- 13 Scolnic D. et al. The Pantheon+ Analysis: The Full Dataset and Light-Curve Release // *Astrophys J*. — 2021. — T. 938, № 2. — C. 113.
- 14 Torrado J., Lewis A. Cobaya: Code for Bayesian Analysis of hierarchical physical models // *Journal of Cosmology and Astroparticle Physics*. — 2020. — T. 2021, — № 5.
- 15 Nojiri S., Odintsov Sergei.D. Propagation Speed of Gravitational Wave in Scalar--Einstein--Gauss-Bonnet Gravity. // *Nuclear Physics B*. — 2024. — № 998.
- 16 The LIGO Scientific Collaboration, The Virgo Collaboration. GW170817: Observation of Gravitational Waves from a Binary Neutron Star Inspiral // *Phys Rev Lett*. — 2017. — T. 119, № 16.
- 17 Saha S., Bamba K. The Lambert W function: A newcomer in the Cosmology class? // *Zeitschrift fur Naturforschung - Section A Journal of Physical Sciences*. — 2019. — T. 75, № 1. — C. 23–27.
- 18 Zaninetti L. Sparse formulae for the distance modulus in cosmology // *Journal of High Energy Physics, Gravitation and Cosmology*. — 2021. — T. 7, № 03. — C. 965–992.
- 19 Sadjadi H.M. On cosmic acceleration in four dimensional Einstein-Gauss-Bonnet gravity // *Physics of the Dark Universe*. — 2020. — № 30.
- 20 De Leon J.P. Transition from decelerated to accelerated cosmic expansion in braneworld universes // *Gen Relativ Gravit*. — 2004. — T. 38, № 1. — C. 61–81.
- 21 Dole H. Cosmology Ruler Bookmark for Teaching and Outreach Purposes (Pen-and-pencil cosmological ruler calculator for everyone, especially students). — 2024.
- 22 De Felice A., Gerard J.-M., Suyama T. Cosmological perturbation in $f(R,G)$ theories with a perfect fluid // *Physical Review D - Particles, Fields, Gravitation and Cosmology*. — 2010. — T. 82, № 6.
- 23 Bennett C.L. et al. Nine-Year Wilkinson Microwave Anisotropy Probe (WMAP) Observations: Final Maps and Results // *Astrophysical Journal, Supplement Series*. — 2012. — T. 208, № 2.
- 24 Arciniega G. et al. Geometric inflation // *Physics Letters B*. — 2020. — T. 802.
- 25 Minic D., Tze C.-H. Background Independent Quantum Mechanics and Gravity // *Physical Review D*. — 2003. — T. 68, № 6.

References

- 1 Zhu X., Zhu J., Zhang M., *Theoretical and Natural Science*, 5(1), 87–94, (2023).
- 2 Heller M., *Zygon*, 35(3), 665–685, (2000).
- 3 Brandenberger R., Peter P., *Foundations of Physics*, 47(6), 797–850, (2017).
- 4 Battefeld D., Peter P., *Physics Reports*, 571, 1–66, (2014).
- 5 Akrami Y. et al., *Astronomy and Astrophysics*, 641, 61, (2018).
- 6 Marozzi G., Tedesco L., Bozza V., *Universe*, 8(7), 379, (2022).
- 7 Zubair M., Farooq M., *The European Physical Journal Plus*, 138(2), 173, (2023).
- 8 Odintsov S.D., Paul T., *Universe*, 8(5), 292, (2022).
- 9 Garcia-Saenz S., Hua J., Zhao Y., *Physical Review D*, 110(6), (2024).
- 10 Ben-Dayana I. et al., *Journal of Cosmology and Astroparticle Physics*, 9, 058, (2024).
- 11 Fernandes P.G.S. et al., *Classical and Quantum Gravity*, 39(6), (2022).
- 12 Nojiri S., Odintsov S.D., Oikonomou V.K., *Nuclear Physics B*, 998, (2024).
- 13 Scolnic D. et al., *Astrophysical Journal*, 938(2), 113, (2021).
- 14 Torrado J., Lewis A., *Journal of Cosmology and Astroparticle Physics*, 2021(5), (2020).
- 15 Nojiri S., Odintsov S.D., *Nuclear Physics B*, 998, (2024).
- 16 The LIGO Scientific Collaboration, The Virgo Collaboration, *Physical Review Letters*, 119(16), (2017).
- 17 Saha S., Bamba K., *Zeitschrift für Naturforschung A*, 75(1), 23–27, (2019).
- 18 Zaninetti L., *Journal of High Energy Physics, Gravitation and Cosmology*, 7(3), 965–992, (2021).
- 19 Sadjadi H.M., *Physics of the Dark Universe*, 30, (2020).
- 20 de Leon J.P., *General Relativity and Gravitation*, 38(1), 61–81, (2004).
- 21 Dole H., (2024).

- 22 De Felice A., Gerard J.-M., Suyama T., Physical Review D, 82(6), (2010).
23 Bennett C.L. et al., Astrophysical Journal Supplement Series, 208(2), (2012).
24 Arciniega G. et al., Physics Letters B, 802, (2020).
25 Minic D., Tze C.-H., Physical Review D, 68(6), (2003).

История статьи:

Поступила 10 февраля 2025
Принята 11 марта 2025

Мақала тарихы:

Түсті – 10.02.2025
Қабылданды – 11.03.2025

Информация об авторах:

1. **Рахатов Даурен Жанатович** (автор-корреспондент) – докторант кафедры общей и теоретической физики ЕНУ им. Л. Н. Гумилева г.Астана, Казахстан. e-mail: godauren@gmail.com

2. **Цыба Петр Юрьевич** – PhD, ассоциированный профессор кафедры общей и теоретической физики ЕНУ им. Л. Н. Гумилева г. Астана, Казахстан, e-mail: tsyba_pyu@enu.kz

3. **Разина Ольга Викторовна** – PhD, ассоциированный профессор кафедры общей и теоретической физики ЕНУ им. Л. Н. Гумилева г. Астана, Казахстан. e-mail: razina_ov@enu.kz

Авторлар туралы мәлімет:

1. **Рахатов Даурен Жанатович** (автор корреспондент) – Л.Н. Гумилев ат. ЕАУ жалпы және теориялық физика кафедрасының докторанты, Астана қ., Қазақстан. e-mail: godauren@gmail.com

2. **Цыба Петр Юрьевич** – PhD, Л.Н. Гумилев ат. ЕАУ жалпы және теориялық физика кафедрасының ассоциаланған профессоры, Астана қ., Қазақстан. e-mail: tsyba_pyu@enu.kz

3. **Разина Ольга Викторовна** – PhD, Л.Н. Гумилев ат. ЕАУ жалпы және теориялық физика кафедрасының ассоциаланған профессоры, Астана қ., Қазақстан. e-mail: tsyba_pyu@enu.kz