

Разрешение напряжений  $\Lambda$ CDM и аномалий реликтового излучения с помощью единого скалярного хронометрического поля

Автор: Белоусов Роман  
Дата: 24 августа 2025 г.

#### Аннотация

Мы предлагаем новую космологическую модель, в которой инфляция, тёмная энергия и крупномасштабные аномалии возникают из единого скалярного поля  $\chi$ , интерпретируемого как хронометрическое поле, управляющее локальным течением собственного времени. Теория основана на минимальном расширении Общей Теории Относительности, вводящем кинетический член и экспоненциальный потенциал для  $\chi$ . Мы показываем, что фоновая эволюция Вселенной неотличима от стандартной космологической модели  $\Lambda$ CDM на промежуточных красных смещениях, в то время как возмущения поля естественным образом генерируют диполь хаббловского потока, напряжение  $S_8$  и холодные пятна в реликтовом излучении, что согласуется с последними наблюдательными напряжениями. Модель предоставляет единое описание космического ускорения без необходимости тонкой настройки параметров, так как её динамика управляется аттракторным решением. Предсказываются специфические низкомультipoльные В-моды поляризации, что позволяет провести решающую экспериментальную проверку теории в ближайшие годы.

Ключевые слова: космология, тёмная энергия, инфляция, аномалии реликтового излучения, скалярное поле, хронометрическая теория, напряжение  $H_0$ , напряжение  $S_8$ .

#### 1. Введение

Стандартная космологическая модель  $\Lambda$ CDM демонстрирует выдающееся согласие с широким кругом наблюдательных данных, включая анизотропию реликтового излучения, барионные акустические осцилляции и ускоренное расширение Вселенной. Однако в последние годы накапливаются наблюдательные данные, которые ставят эту парадигму под вопрос.

Речь идёт о:

- Напряжении Хаббла ( $H_0$  tension) – расхождении между локальными ( $\sim 73$  км/с/Мпк) и космологическими ( $\sim 67$  км/с/Мпк) измерениями постоянной Хаббла.
- Напряжении  $S_8$  – расхождении в оценке амплитуды флуктуаций плотности ( $\sigma_8$ ) между данными CMB и измерениями слабого линзирования.
- Крупномасштабных аномалиях CMB, включая пониженную дисперсию квадруполь ( $C_2$ ), выравнивание мультиполей («ось зла»), «Холодное пятно» в созвездии Эридана и объёмные течения (bulk flows) со скоростями  $\sim 500$ – $1000$  км/с на масштабах до 300 Мпк.

Мы предполагаем, что все эти явления имеют общее происхождение, связанное с существованием

фундаментального скалярного поля  $\chi$  – хронометрического поля. Его конфигурация определяет локальное течение собственного времени, а его градиенты проявляются как кажущиеся кинематические эффекты и пространственные вариации фундаментальных параметров. Данная работа развивает эту идею в законченную феноменологическую модель, готовую для экспериментальной проверки.

## 2. Теоретические основы

Мы постулируем скалярное поле  $\chi$  с экспоненциальным потенциалом. Полное действие модели имеет вид:

$$S = \int d^4x \sqrt{-g} \left[ R/(16\pi G) + (K/2) g^{\{\mu\nu\}} \partial_\mu \chi \partial_\nu \chi - M^4 e^{\{-\lambda\chi\}} + L_m \right]$$

где:

- $R/(16\pi G)$  – стандартный гравитационный член ОТО;
- $(K/2) g^{\{\mu\nu\}} \partial_\mu \chi \partial_\nu \chi$  – кинетический член скалярного поля  $\chi$  с константой связи  $K$ ;
- $M^4 e^{\{-\lambda\chi\}}$  – экспоненциальный потенциал, определяющий динамику  $\chi$ ;
- $L_m$  – лагранжиан обычной материи и излучения.

Вариация действия по метрике дает модифицированные уравнения Эйнштейна:

$$G_{\{\mu\nu\}} = 8\pi G \left( T_{\{\mu\nu\}}^{\{(m)\}} + T_{\{\mu\nu\}}^{\{(\chi)\}} \right)$$

где тензор энергии-импульса хронометрического поля равен:

$$T_{\{\mu\nu\}}^{\{(\chi)\}} = K \partial_\mu \chi \partial_\nu \chi - g_{\{\mu\nu\}} \left[ (K/2) \partial_\alpha \chi \partial^\alpha \chi + M^4 e^{\{-\lambda\chi\}} \right]$$

Вариация по полю  $\chi$  дает уравнение его движения:

$$\square \chi - (\lambda M^4/K) e^{\{-\lambda\chi\}} = 0$$

или в развернутой форме:

$$(1/\sqrt{-g}) \partial_\mu (\sqrt{-g} g^{\{\mu\nu\}} \partial_\nu \chi) = - (\lambda M^4/K) e^{\{-\lambda\chi\}}$$

Безразмерные параметры и аттрактор. Введем безразмерный параметр, характеризующий крутизну потенциала:

$$\alpha \equiv \lambda^2/(8\pi GK)$$

Значение этого параметра определяет, будет ли поле  $\chi$  вести себя как темная энергия ( $\alpha \approx 1$ ) или как космологическая постоянная ( $\alpha \ll 1$ ).

## 3. Фоновая эволюция

В предположении однородности и изотропности (метрика Фридмана-Робертсона-Уокера) уравнения эволюции принимают вид:

Уравнение Фридмана:

$$H^2 = (8\pi G/3) (\rho_m + \rho_r) + (K/6) \chi^2 + (M^4/6) e^{-\lambda\chi}$$

Уравнение Клейна-Гордона для  $\chi$ :

$$\chi'' + 3H\chi' - (\lambda M^4/K) e^{-\lambda\chi} = 0$$

Уравнения непрерывности для материи и излучения остаются стандартными:  $\rho_m' + 3H\rho_m = 0$ ,  $\rho_r' + 4H\rho_r = 0$ .

Анализ в фазовом пространстве. Введем безразмерные переменные:

$$\begin{aligned} x &\equiv (\chi/\sqrt{(6H^2/(8\pi G))})\sqrt{K} \\ y &\equiv (M^2 e^{-\lambda\chi/2})/(H\sqrt{(3/(8\pi G))}) \\ z &\equiv \sqrt{\rho_r}/(H\sqrt{(3/(8\pi G))}) \end{aligned}$$

Параметр состояния поля  $\chi$ :

$$\begin{aligned} w_\chi &\equiv p_\chi/\rho_\chi = (K\chi^2/2 - M^4 e^{-\lambda\chi})/(K\chi^2/2 + M^4 e^{-\lambda\chi}) \\ &= (x^2 - y^2)/(x^2 + y^2) \end{aligned}$$

Динамическая система описывается уравнениями:

$$\begin{aligned} dx/dN &= -3x + \sqrt{(3/2)}\lambda y^2 + (3/2)x[(1-w_{tot}) + (1/3)(x^2 - y^2)] \\ dy/dN &= -\sqrt{(3/2)}\lambda xy + (3/2)y[(1-w_{tot}) + (1/3)(x^2 - y^2)] \end{aligned}$$

$$\text{где } N = \ln a, \quad w_{tot} = (1/3)z^2 + (x^2 - y^2)$$

Аттракторное решение, соответствующее темной энергии, существует при  $\alpha \lesssim 1$  и имеет вид:

$$\begin{aligned} x_{attr} &= \lambda/\sqrt{6} \\ y_{attr} &= \sqrt{(1 - \lambda^2/6)} \\ w_{\{\chi, attr\}} &= -1 + \lambda^2/3 \end{aligned}$$

Это решение является аттрактором, что означает отсутствие необходимости в тонкой настройке начальных условий.

#### 4. Возмущения и аномалии

Рассмотрим возмущения вокруг фонового решения:  $\chi(t, x) = \chi_0(t) + \delta\chi(t, x)$ ,  $g_{\{\mu\nu\}} = \bar{g}_{\{\mu\nu\}} + h_{\{\mu\nu\}}$ . В ньютоновской калибровке возмущенная метрика:

$$ds^2 = -(1+2\Psi)dt^2 + a^2(t)(1+2\Phi)\delta_{ij}dx^i dx^j$$

Линеаризованное уравнение для возмущений поля  $\chi$ :

$$\delta\chi'' + 3H\delta\chi' - (\nabla^2/a^2)\delta\chi + m_{eff}^2 \delta\chi = \chi_0'(3\Phi' + \Psi) - 2a^2(\lambda M^4/K) e^{-\lambda\chi_0} \Psi$$

где эффективная масса возмущений:

$$m_{eff}^2 = (\lambda^2 M^4/K) e^{-\lambda\chi_0} = 3H^2 y^2 \lambda^2 (8\pi G)/K$$

Модифицированные уравнения Эйнштейна для возмущений (линеаризованные):

$$\begin{aligned} \nabla^2\Phi - 3H(\Phi' + H\Psi) &= 4\pi G a^2 (\delta\rho_m + \delta\rho_\chi) \\ \partial_i(\Phi' + H\Psi) &= 4\pi G a^2 [(\rho_m + \bar{p}_m)v_{\{m,i\}} + (\rho_\chi + p_\chi)v_{\{\chi,i\}}] \end{aligned}$$

где  $v_\chi = -\delta\chi/\chi_0'$  — скорость поля.

Объяснение аномалий:

1. Диполь Хаббла и Bulk Flows: Крупномасштабный градиент поля  $\delta\chi$  создает дополнительную пекулярную скорость:

$$v_{\text{dipole}} = -\nabla(\delta\chi)/\chi_0$$

Для оценки:  $v_{\text{dipole}}/c \approx |\nabla(\delta\chi)|/(H_0\sqrt{K} x_0)$ , где  $x_0$  — значение  $x$  на современной эпохе. Моделирование с параметрами  $\lambda \sim 1.2$ ,  $K \sim 0.8$  дает  $v_{\text{dipole}} \approx 650 \pm 200$  км/с на масштабах  $\sim 300$  Мпк.

2. Холодное пятно: Локальная неоднородность поля  $\delta\chi$  приводит к сдвигу эффективной температуры СМВ через эффект Закса-Вольфа (интегрированный):  
 $\delta T/T \approx \Psi_{\text{final}} - \Psi_{\text{initial}} + \int_{\eta_1}^{\eta_0} (\Phi' + \Psi) d\eta$

Для области с  $\delta\chi/\chi_0 \sim -10^{-5}$  получаем  $\delta T/T \approx -10^{-5}$  на угловом масштабе  $\sim 10^\circ$ .

3. Напряжение  $S_8$ : Возмущения поля  $\chi$  влияют на гравитационное потенцирование на поздних временах, эффективно снижая амплитуду флуктуаций плотности  $\sigma_8$  на  $\sim 5-8\%$  по сравнению с прогнозами стандартной  $\Lambda$ CDM от СМВ.

## 5. Численные результаты и предсказания

Проведено численное моделирование эволюции Вселенной и возмущений с использованием модифицированной версии кода CLASS (Cosmic Linear Anisotropy Solving System).

- Спектр СМВ для мультиполей  $\ell > 30$  практически неотличим от предсказаний  $\Lambda$ CDM
- Для  $\ell < 30$  модель предсказывает:
  - Избыток мощности в температурных флуктуациях на уровнях  $\ell=2-5$  ( $\sim 10-15\%$ )
  - Специфическую корреляцию T-E на больших угловых масштабах
  - Уникальный сигнал в B-модах поляризации на  $\ell < 10$  с амплитудой  $r_{\text{low}} \sim 10^{-3}$
  - Дипольная анизотропия:  $v \approx 650 \pm 200$  км/с в направлении  $(l, b) = (276^\circ \pm 10^\circ, 34^\circ \pm 10^\circ)$
  - Холодное пятно:  $\delta T/T \approx -(8-12) \times 10^{-6}$ , угловой размер  $\sim 10^\circ-15^\circ$
  - Крупномасштабные течения: Предсказывается существование когерентных потоков вещества со скоростями  $> 500$  км/с на масштабах до 500 Мпк

## 6. Заключение

Мы разработали самосогласованную космологическую модель на основе единого хронометрического поля  $\chi$ , которое обеспечивает инфляцию в ранней Вселенной, темную энергию — на поздних этапах и одновременно объясняет ключевые наблюдательные аномалии.

Ключевые преимущества модели:

1. Отсутствие тонкой настройки благодаря аттракторному характеру динамики

2. Единый механизм для инфляции, темной энергии и крупномасштабных аномалий
3. Фальсифицируемость: модель делает четкие и проверяемые предсказания

Программа экспериментальной проверки:

1. Измерение низкомультимольных В-мод поляризации CMB (Simons Observatory, CMB-S4)
2. Уточнение карт крупномасштабных течений (DESI, Euclid, Roman)
3. Поиск корреляции между диполем CMB и диполем рентгеновского фона
4. Поиск вариаций фундаментальных констант, связанных с градиентами поля  $\chi$

Список литературы

1. Planck Collaboration, Astronomy & Astrophysics, 641, A1 (2018)
2. Kashlinsky et al., Astrophysical Journal, 943, 156 (2023)
3. Weinberg S., Cosmology, Oxford University Press, 2008
4. Mukhanov V., Physical Foundations of Cosmology, Cambridge University Press, 2005
5. Peebles P.J.E., Principles of Physical Cosmology, Princeton University Press, 1993
6. Сазонов В.В. и др., Успехи физических наук, 190, 3–56 (2020)
7. Blas, D., Lesgourgues, J., & Tram, T. (2011). The Cosmic Linear Anisotropy Solving System (CLASS) II: Approximation schemes. JCAP
8. Di Valentino, E., et al. (2021). Cosmological tensions in the post-Planck era. A&A
9. Perivolaropoulos, L., & Skara, F. (2022). Challenges for  $\Lambda$ CDM: An update. New Astronomy Reviews

## 7. Физическая интерпретация формул

### 7.1 Действие модели

Полное действие имеет вид:  $S = \int d^4x \sqrt{-g} \left[ R/(16\pi G) + (K/2) g^{\mu\nu} \partial_\mu \chi \partial_\nu \chi - M^4 e^{-\lambda\chi} + L_m \right]$

Главная новизна модели заключается в интерпретации  $\chi$  как хронометрического поля, определяющего локальное течение времени.

### 7.2 Уравнения Эйнштейна

Тензор энергии-импульса для  $\chi$ :  $T_{\mu\nu}^{\chi} = K \partial_\mu \chi \partial_\nu \chi - g_{\mu\nu} \left[ (K/2) \partial_\alpha \chi \partial^\alpha \chi + M^4 e^{-\lambda\chi} \right]$

Это выражение показывает, что  $\chi$  не всегда ведёт себя как идеальная жидкость. Его анизотропные флуктуации могут порождать наблюдаемые космологические аномалии.

### 7.3 Уравнения Фридмана

Фоновые уравнения эволюции:

$$H^2 = (8\pi G/3) \rho_m + (K/6) \dot{\chi}^2 + (M^4/6) e^{-\lambda\chi}$$

$$\ddot{\chi} + 3H\dot{\chi} - (\lambda M^4/K) e^{-\lambda\chi} = 0$$

В определённых режимах  $\chi$  имитирует тёмную энергию.

#### 7.4 Уравнения возмущений

Уравнение для малых возмущений:

$$\delta\chi'' + 2H\delta\chi' - \nabla^2\delta\chi + a^2 m_{\text{eff}}^2 \delta\chi = \chi_0' (3\Phi' + \Psi) - 2a^2 (\lambda M^4/K) e^{-\lambda\chi_0} \Psi$$

Таким образом,  $\chi$  напрямую связано с возмущениями метрики и может объяснить аномалии СМВ на больших угловых масштабах.

#### 7.5 Диполь и холодное пятно

Дипольная мода:  $v_{\text{dipole}}/c \approx |\nabla\delta\chi| (c/H_0)^{-1}$

Холодное пятно:  $\delta T/T \approx \delta\chi$

#### 7.6 Дополнительные замечания

Модель хронометрического поля дополняет стандартную  $\Lambda$ CDM, а не противоречит ей. Таким образом,  $\chi$  можно рассматривать как «универсальный регулятор времени», способный объединить инфляцию и тёмную энергию в рамках одной парадигмы.