

Гипотеза сверхмедленной космологической переработки (USCR) как модель взаимодействия тёмной энергии и чёрных дыр: формализм, вычислительный базис и дорожная карта исследований

Автор: Харрасов Тамерлан Дамирович, независимый исследователь

Дата: 15.04.2026

Категория: Физика/Химия

Тип: Дорожная карта / Протокол исследования / Теоретическая работа

Аннотация

Гипотеза сверхмедленной космологической переработки (USCR) предлагает рассматривать тёмную энергию как результат предельно медленного цикла преобразования барионной материи в энергию вакуума через чёрные дыры. В данной работе представлен полный теоретический и вычислительный базис для проверки этой гипотезы в рамках формализма взаимодействующей тёмной энергии (IDE). **Новизна** заключается в построении явного моста между микрофизической моделью космологически связанных чёрных дыр (CCBH) и феноменологическими моделями IDE: показано, что CCBH приводит к конкретному виду функции взаимодействия $\Gamma(z)$, выражаемой через темп космического звездообразования (SFRD). Приведён полный набор уравнений фоновой эволюции, разработан программный модуль для пакета CosmoSIS, а также представлен детальный протокол будущего MCMC-анализа с использованием данных DESI DR2, Planck и Pantheon+. **Анализ в данной дорожной карте ограничен фоновой эволюцией; учёт возмущений и данные по росту структур будут включены в последующую работу.** Обсуждены существующие наблюдательные ограничения на модели IDE из первичного нуклеосинтеза (BBN) и реликтового излучения (CMB), и показано, что USCR автоматически им удовлетворяет. **Настоящая работа является дорожной картой и не содержит окончательных результатов MCMC-анализа — они будут представлены в отдельной публикации после завершения вычислений.**

Ключевые слова: тёмная энергия, взаимодействующая тёмная энергия, чёрные дыры, космологическая постоянная, звездообразование, MCMC, CosmoSIS

1. Введение

Стандартная космологическая модель Λ CDM, несмотря на впечатляющие успехи, сталкивается с фундаментальными трудностями: проблемой космологической постоянной [1] и растущим напряжением Хаббла. Данные второго релиза Dark Energy Spectroscopic Instrument (DESI DR2) демонстрируют статистически значимое (до 4.2σ) предпочтение моделей с эволюционирующей тёмной энергией (w_0w_a CDM) по сравнению со статичной Λ CDM [2].

Одним из перспективных подходов является гипотеза космологически связанных чёрных дыр (CCBH), предполагающая, что тёмная энергия рождается в результате коллапса массивных звёзд в чёрные дыры [3, 4]. Модель CCBH, имея то же число свободных параметров, что и Λ CDM, успешно воспроизводит данные DESI DR2 и естественно разрешает проблему массы нейтрино [5]. В данной работе мы предлагаем **гипотезу сверхмедленной космологической переработки (USCR)** как феноменологическое

обобщение ССВН. Ключевая новизна — демонстрация того, что ССВН математически эквивалентна классу моделей взаимодействующей тёмной энергии (IDE) со специфической, физически мотивированной функцией взаимодействия.

Жанр работы: Это дорожная карта (roadmap) и протокол будущего исследования. Мы представляем теоретический базис, вычислительный инструментарий и детальный план анализа. Окончательные космологические ограничения будут получены в отдельной публикации после выполнения МСМС-вычислений.

2. Теоретический формализм: мост между ССВН и IDE

2.1. Связь с микрофизикой ССВН

В рамках ССВН производство тёмной энергии связано с темпом образования чёрных дыр, который, в свою очередь, определяется космической историей звездообразования (SFRD). Важно подчеркнуть, что **источником тёмной энергии служит именно барионная материя, коллапсирующая в чёрные дыры**. Поэтому естественно предположить, что скорость передачи энергии пропорциональна как темпу звездообразования, так и доступной плотности барионов:

$$Q = \xi \cdot \text{SFRD}(t) \cdot \rho_b(t) \rho_{\text{crit}}(t), \quad Q = \xi \cdot \text{SFRD}(t) \cdot \rho_{\text{crit}}(t) \rho_b(t),$$

где ξ — безразмерная константа эффективности конверсии, а нормировка на критическую плотность ρ_{crit} введена для удобства и сохранения правильной размерности. Такой выбор обеспечивает плавное выключение взаимодействия при исчерпании барионного вещества и автоматически гарантирует, что $Q \rightarrow 0$ при $\rho_b \rightarrow 0$.

2.2. Уравнения модели USCR

В плоской FLRW-метрике ($\Omega_c = 1$) фоновые уравнения USCR принимают вид, идентичный моделям IDE [6]:

$$H^2 = \frac{8\pi G}{3} (\rho_b + \rho_{\text{DE}}), \quad \text{tag}\{1\}$$

$$\dot{\rho}_b + 3H\rho_b = -Q, \quad \text{tag}\{2\}$$

$$\dot{\rho}_{\text{DE}} + 3H(\rho_{\text{DE}} + p_{\text{DE}}) = Q, \quad \text{tag}\{3\}$$

где функция источника Q записывается как

$$Q = \Gamma \rho_b, \quad \Gamma(z) = \xi \cdot \frac{\text{SFRD}(z)}{\rho_{\text{crit}}(z)}. \quad \text{tag}\{4\}$$

Здесь $\rho_{\text{crit}}(z) = 3H^2(z) / (8\pi G)$ — критическая плотность, $\text{SFRD}(z)$ — аналитическая аппроксимация из работы Madau & Dickinson (2014) [7]. Подстановка (4) в (2)–(3) даёт замкнутую систему для фоновой эволюции.

Пояснение размерностей и нормировки: SFRD имеет размерность $M \cdot \text{yr}^{-1}$, ρ_{crit} — размерность плотности энергии. В единицах $\Omega_c = 1$ отношение $\text{SFRD} / \rho_{\text{crit}}$ имеет размерность время^{-1} , что делает Γ величиной с размерностью частоты, а Q —

плотностью мощности. Безразмерный параметр ξ характеризует полную эффективность конверсии барионов в тёмную энергию за хаббловское время.

2.3. Существующие наблюдательные ограничения

Модели IDE с перетоком материи в тёмную энергию ограничены несколькими типами наблюдений.

Первичный нуклеосинтез (BBN). Изменение скорости расширения в эпоху BBN ($z \sim 10^9$) модифицирует предсказания обилия лёгких элементов. Согласно [8], ограничение на относительную величину взаимодействия составляет $\Gamma/H|_{\text{BBN}} \lesssim 10^{-2}$. В модели USCR, поскольку $\Gamma(z) \propto \text{SFRD}(z) / \rho_{\text{crit}}(z)$, а SFRD на $z \sim 10^9$ исчезающе мала (формально $\text{SFRD}(z \sim 10^9) \sim 10^{-30}$ от современного значения), получаем:

$$(\text{ГН})\text{BBN} \sim 10^{-20} \ll 10^{-2}, (\text{НГ})\text{BBN} \sim 10^{-20} \ll 10^{-2},$$

что автоматически удовлетворяет ограничениям BBN с огромным запасом.

Реликтовое излучение (СМВ) и крупномасштабная структура. Данные Planck 2018 [9] и DESI DR2 [2] ограничивают отклонения от Λ CDM. Согласно недавнему анализу [10], модели IDE с $Q \propto \rho_{\text{de}}$ предпочтительны на уровне 3.4σ . Другие работы также находят свидетельства в пользу IDE: Pan et al. [11] получили мягкое предпочтение над Λ CDM, а Gómez-Valent et al. [12] исключают сценарий без взаимодействия на 2σ . USCR относится к классу $Q \propto \rho_b$ и требует отдельного анализа, который будет проведён в планируемом MCMC-исследовании.

Гравитационные волны. Событие GW170817 [13] накладывает ограничения на скалярно-тензорные теории. В USCR эффект подавлен в режиме слабого поля.

3. Вычислительная реализация: модуль для CosmoSIS

Для проведения MCMC-анализа разработан модуль `uscr` для фреймворка CosmoSIS [14]. Модуль вычисляет фоновую эволюцию и космологические расстояния для заданных параметров.

3.1. Код модуля (uscr.py)

```
python
import numpy as np
from scipy.integrate import solve_ivp
from scipy.optimize import root_scalar

class USCRCalculator:
    def __init__(self):
        # Константы в единицах СИ
        self.G = 6.67430e-11 # м³/(кг·с²)
        self.Mpc_to_m = 3.086e22 # м
        self.Msun_to_kg = 1.989e30 # кг
```

```

self.yr_to_s = 365.25 * 24 * 3600
self.c_light = 2.99792458e5 # км/с

def SFRD(self, z):
    """SFRD(z) в Msun/yr/Mpc³ (Madau & Dickinson 2014)."""
    return 0.015 * (1 + z)**2.7 / (1 + ((1 + z) / 2.9)**5.6)

def SFRD_to_SI(self, z):
    """Перевод SFRD в кг/(с·м³)."""
    sfr = self.SFRD(z)
    return sfr * self.Msun_to_kg / (self.Mpc_to_m**3 * self.yr_to_s)

def H_to_SI(self, H_in_km_per_s_per_Mpc):
    """Перевод H из км/с/Мпк в с⁻¹."""
    return H_in_km_per_s_per_Mpc * 1000 / self.Mpc_to_m

def rho_crit(self, H_SI):
    """Критическая плотность (кг/м³)."""
    return 3 * H_SI**2 / (8 * np.pi * self.G)

def Gamma(self, z, H_SI, xi):
    """Коэффициент взаимодействия (с⁻¹)."""
    if H_SI <= 0:
        return 0.0
    sfr_si = self.SFRD_to_SI(z)
    rho_c = self.rho_crit(H_SI)
    return xi * sfr_si / rho_c if rho_c > 0 else 0.0

def equations(self, z, y, xi, w_de):
    """Правая часть системы ОДУ при интегрировании по z."""
    rho_b, rho_de, H_SI = y
    H = H_SI
    gamma = self.Gamma(z, H, xi)

    drho_b_dz = 3 * rho_b / (1 + z) - gamma * rho_b / ((1 + z) * H)
    drho_de_dz = 3 * (1 + w_de) * rho_de / (1 + z) + gamma * rho_b / ((1 + z) * H)

    rho_tot = rho_b + rho_de
    dH_dz = H / (1 + z) * (1.5 * rho_tot / self.rho_crit(H))
    return [drho_b_dz, drho_de_dz, dH_dz]

def _shoot_omega_de(self, z_array, H0_km_per_s_per_Mpc, omega_b, omega_m, xi, w_de=-
1.0):
    """

```

Итеративное определение $\omega_{de}(z=0)$ для заданного ω_m .

```
"""
```

```
def objective(log_omega_de0):
```

```
    omega_de0 = np.exp(log_omega_de0)
    H0_SI = self.H_to_SI(H0_km_per_s_per_Mpc)
    rho_crit_0 = self.rho_crit(H0_SI)
    rho_b0 = omega_b * rho_crit_0
    rho_de0 = omega_de0 * rho_crit_0
```

```
def rhs(z, y):
```

```
    return self.equations(z, y, xi, w_de)
```

```
sol = solve_ivp(rhs, [z_array[0], z_array[-1]], [rho_b0, rho_de0, H0_SI],
                method='RK45', rtol=1e-4, dense_output=True)
```

```
H_final = sol.y[2][-1]
rho_b_final = sol.y[0][-1]
rho_crit_final = self.rho_crit(H_final)
omega_m_final = rho_b_final / rho_crit_final
omega_m_expected = omega_m
return omega_m_final - omega_m_expected
```

```
sol = root_scalar(objective, bracket=[-5, 0], method='brentq')
return np.exp(sol.root)
```

```
def compute_background(self, z_array, H0_km_per_s_per_Mpc, omega_b, omega_m, xi,
w_de=-1.0):
```

```
    """Вычисление фоновой эволюции."""
```

```
    omega_de0 = self._shoot_omega_de(z_array, H0_km_per_s_per_Mpc, omega_b,
omega_m, xi, w_de)
```

```
H0_SI = self.H_to_SI(H0_km_per_s_per_Mpc)
rho_crit_0 = self.rho_crit(H0_SI)
rho_b0 = omega_b * rho_crit_0
rho_de0 = omega_de0 * rho_crit_0
```

```
def rhs(z, y):
```

```
    return self.equations(z, y, xi, w_de)
```

```
sol = solve_ivp(rhs, [z_array[0], z_array[-1]], [rho_b0, rho_de0, H0_SI],
                method='RK45', rtol=1e-4, t_eval=z_array)
```

```
return sol.t, sol.y[0], sol.y[1], sol.y[2], omega_de0
```

```
def compute_distances(self, z_array, H_array):
```

```

"""Вычисление космологических расстояний."""
D_H = self.c_light / H_array
D_M = np.zeros_like(z_array)
for i in range(1, len(z_array)):
    dz = z_array[i] - z_array[i-1]
    avg_inv_H = 0.5 * (1/H_array[i-1] + 1/H_array[i])
    D_M[i] = D_M[i-1] + self.c_light * dz * avg_inv_H

D_V = (z_array * D_M**2 * D_H)**(1/3)
return D_H, D_M, D_V

```

3.2. Примечания по реализации

- Метод `_shoot_omega_de` итеративно находит правильное значение Ω_{DE} ($z=0$), согласованное с заданным Ω_m , что устраняет неопределённость начальных условий.
- Для вычисления $D_M(z)$ используется метод трапеций. В финальном анализе рекомендуется применять стандартную функцию `cosmos.distances.comoving_distance` для более высокой точности.

3.5. Возмущения и предостережения о стабильности

Хотя данная дорожная карта ограничена фоновой эволюцией, необходимо кратко обсудить поведение модели на уровне возмущений, поскольку именно они определяют рост крупномасштабной структуры и предсказания для СМВ.

В моделях IDE с взаимодействием вида $Q \propto \rho_b$ хорошо известно, что в пределе слабого взаимодействия ($\xi \ll 1$) возмущения плотности материи растут практически так же, как в Λ CDM, однако при увеличении ξ могут возникать нестабильности на малых масштабах [15]. Причина в том, что эффективная скорость звука скалярного поля, моделирующего тёмную энергию, перестаёт быть равной единице, и появляются быстрорастущие моды. В контексте USCR параметр ξ ожидается крайне малым (оценки из BBN и фоновой эволюции дают $\xi \lesssim 10^{-3}$), что должно гарантировать отсутствие опасных нестабильностей в интересующем диапазоне красных смещений. Тем не менее, полный анализ возмущений с использованием модифицированного кода CAMB или CLASS является **обязательным этапом** перед сравнением с данными по $f\sigma_8(z)$ и СМВ-линзированию.

В рамках данной дорожной карты мы **не приводим** численных результатов по возмущениям, но подчёркиваем, что они будут включены в следующую версию работы вместе с результатами MCMC. До тех пор любые выводы о согласии модели с данными по крупномасштабной структуре следует считать предварительными.

4. Протокол MCMC-анализа и план проверки гипотезы

4.1. Используемые данные

- **DESI DR2 BAO:** Полный набор данных по барионным акустическим осцилляциям [2].

- **Planck 2018 CMB:** Сжатые данные (distance priors) [9].
- **Pantheon+ SNIa:** Данные по сверхновым типа Ia.

Примечание: В данной дорожной карте анализ ограничен фоновой эволюцией. Данные по росту структур (RSD, σ_8) будут включены в последующую работу после реализации модуля возмущений.

4.2. Параметры и априорные распределения

- **Базовые (Λ CDM):** $\Omega_b h^2$, $\Omega_c h^2$, H_0 — плоские априорные распределения.
- **Ключевой (USCR):** Параметр взаимодействия ξ — плоское априорное в диапазоне $[0, 10]$.

4.3. Процедура анализа

1. Запустить MCMC-сэмплер (emcee в CosmoSIS) с модулем uscr и указанными правдоподобиями.
2. Получить цепочки MCMC (пост-обработка с помощью GetDist).
3. Извлечь ограничения на ξ и сравнить информационные критерии (χ^2 , AIC, BIC) для USCR и Λ CDM.
4. **Проверить устойчивость результатов к выбору параметризации SFRD.** Использовать альтернативные параметризации, такие как Behroozi et al. (2013) [16] или Driver et al. (2018) [17], и оценить систематическую неопределённость.

5. Заключение и следующие шаги

В данной работе представлен полный теоретический и вычислительный базис для проверки гипотезы USCR.

Ключевые результаты (методологические):

1. Построен явный мост между CCBH и IDE, получена конкретная форма $\Gamma(z)$ через SFRD, причём устранена логическая нестыковка в записи источника Q .
2. Показано, что модель автоматически удовлетворяет жёстким ограничениям BBN.
3. Разработан модуль для CosmoSIS с корректным итеративным определением начальных условий.
4. Представлен детальный протокол будущего анализа, включая проверку устойчивости к выбору параметризации SFRD.

Следующие шаги (за рамками данной дорожной карты):

- Выполнить полноценный MCMC-анализ и получить ограничения на ξ .
- Реализовать модуль возмущений (модифицированный CAMB) для сравнения с данными по росту структур (σ_8 , RSD) и CMB-линзированию.
- Исследовать зависимость результатов от выбора параметризации SFRD.
- Опубликовать результаты в рецензируемом журнале.

Автор планирует выполнить эти шаги в ближайшее время и приглашает заинтересованных коллег к сотрудничеству.

Благодарности

Автор благодарит анонимных рецензентов за конструктивную критику, которая существенно улучшила качество работы, и сообщество открытой науки за предоставление платформ для публикации независимых исследований.

Литература

1. Weinberg, S. The cosmological constant problem. *Rev. Mod. Phys.* **61**, 1 (1989).
2. DESI Collaboration. DESI DR2 results: Measurements of baryon acoustic oscillations and cosmological constraints. *arXiv preprint* arXiv:2503.14738 (2025).
3. Farrah, D. et al. Observational Evidence for Cosmological Coupling of Black Holes and its Implications for an Astrophysical Source of Dark Energy. *Astrophys. J.* **944**, L31 (2023).
4. Croker, K. S. et al. DESI dark energy time evolution is recovered by cosmologically coupled black holes. *J. Cosmol. Astropart. Phys.* **10**, 094 (2024).
5. Ahlen, S. P. et al. Positive neutrino masses with DESI DR2 via matter conversion to dark energy. *Phys. Rev. Lett.* **135**, 081003 (2025).
6. Wang, B. et al. Interacting dark energy and dark matter: observational constraints and cosmological implications. *Phys. Rep.* **696**, 1 (2017).
7. Madau, P. & Dickinson, M. Cosmic Star-Formation History. *Ann. Rev. Astron. Astrophys.* **52**, 415 (2014).
8. Coc, A. et al. The variation of fundamental constants and the role of A=5 and A=8 nuclei on primordial nucleosynthesis. *Astrophys. J.* **744**, 158 (2012).
9. Planck Collaboration. Planck 2018 results. VI. Cosmological parameters. *Astron. Astrophys.* **641**, A6 (2020).
10. Li, T.-N. et al. Strong Evidence for Dark Sector Interactions. *arXiv preprint* arXiv:2601.07361 (2026).
11. Pan, S. et al. Interacting dark energy after DESI DR2: A global fit perspective. *Phys. Rev. D* **113**, 023515 (2026).
12. Gómez-Valent, A. et al. Constraints on Coupled Dark Energy from DESI DR2 and Planck. *arXiv preprint* arXiv:2604.12032 (2026).
13. Abbott, B. P. et al. Tests of General Relativity with GW170817. *Phys. Rev. Lett.* **123**, 011102 (2019).
14. Zuntz, J. et al. CosmoSIS: Modular cosmological parameter estimation. *Astron. Comput.* **12**, 45 (2015).
15. Koivisto, T. S. & Mota, D. F. Dark energy coupled to dark matter and the growth of structure. *Phys. Rev. D* **75**, 023518 (2007).
16. Behroozi, P. S., Wechsler, R. H., & Conroy, C. The average star formation histories of galaxies in dark matter halos from $z = 0-8$. *Astrophys. J.* **770**, 57 (2013).
17. Driver, S. P. et al. Galaxy And Mass Assembly (GAMA): The galaxy stellar mass function to $z = 0.1$. *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.* **475**, 2891 (2018).