

Пирязев Игорь Олегович

Piryazev Igor Olegovich

E-mail: [port10@ya.ru](mailto:port10@ya.ru)

**КОСМОЛОГИЧЕСКАЯ РЕЛАКСАЦИЯ ПОСТОЯННОЙ ТОНКОЙ  
СТРУКТУРЫ: МОДЕЛЬ  $\Psi$ CDM КАК РЕШЕНИЕ ПРОБЛЕМ  
ПЕРВИЧНОГО НУКЛЕОСИНТЕЗА И АНОМАЛИЙ СМВ**

**Аннотация.** Представлена модель  $\Psi$ CDM с динамическим скалярным полем  $\Psi$ , обеспечивающая механизм релаксации постоянной тонкой структуры  $\alpha$ . Модель решает проблему первичного лития-7 через изменение  $\Delta\alpha/\alpha \approx -0.019$  в эпоху BBN и объясняет крупномасштабные аномалии реликтового излучения через флуктуации поля  $\delta\Psi \sim 10^{-5}$ . Все предсказания модели согласуются с современными наблюдательными ограничениями.

A model of  $\Psi$ CDM with a dynamic scalar field  $\Psi$  is presented, which provides a relaxation mechanism for the fine structure constant  $\alpha$ . The model solves the problem of primary lithium-7 through the change of  $\Delta\alpha/\alpha \approx -0.019$  in the BBN epoch and explains large-scale anomalies of the cosmic microwave background radiation through fluctuations of the  $\delta\Psi \sim 10^{-5}$  field. All predictions of the model are consistent with current observational constraints.

Keywords: cosmology, scalar field, fine structure constant,  $\Lambda$ CDM, primary nucleosynthesis, CMB anomalies, fundamental constants, BBN, recombination.

**Ключевые слова:** космология, скалярное поле, постоянная тонкой структуры,  $\Lambda$ CDM, первичный нуклеосинтез, аномалии СМВ, фундаментальные постоянные, BBN, рекомбинация.

**Keywords:** cosmology, scalar field, fine structure constant,  $\Lambda$ CDM, primary nucleosynthesis, CMB anomalies, fundamental constants, BBN, recombination.

**Введение**

Стандартная космологическая модель  $\Lambda$ CDM успешно описывает большинство наблюдательных данных [1], однако сохраняются фундаментальные проблемы:

- **Проблема первичного лития-7:** предсказанный выход  ${}^7\text{Li}$  превышает наблюдаемое содержание в старейших звездах населения II в 3-4 раза [2]
- **Крупномасштабные аномалии СМВ:** дефицит мощности на больших угловых масштабах ( $l < 30$ ) и другие статистические особенности [3]

В данной работе представлена модель  $\Psi$ CDM, которая предлагает решение этих проблем через введение динамического скалярного поля, влияющего на электромагнитное взаимодействие.

## Теоретическая основа модели

### Действие и уравнения движения

Действие модели включает скалярное поле  $\Psi$  с экспоненциальным потенциалом:

$$S = \int d^4x \sqrt{-g} \left[ R/(16\pi G) - (1/2)(\partial\Psi)^2 - V_0 e^{(-\lambda\Psi)} - (1/4)F_{\mu\nu}F^{\mu\nu}(1 + 2\beta\Psi) \right]$$

Уравнение движения поля в пространстве Фридмана:

$$d^2\Psi/dt^2 + 3H d\Psi/dt + \lambda V_0 e^{(-\lambda\Psi)} = 0$$

Связь с постоянной тонкой структуры:

$$\Delta\alpha/\alpha \equiv (\alpha - \alpha_0)/\alpha_0 = -2\beta\Psi$$

Параметры модели

Параметр	Значение	Физический смысл
$\lambda$	0.1	Крутизна потенциала
$\beta$	0.0011	Константа связи с электромагнетизмом
$V_0$	$2.3 \times 10^{-123} \text{ eV}^4$	Амплитуда потенциала

## Численное моделирование и результаты

### Эволюция скалярного поля $\Psi$

Расчёт значений поля  $\Psi$  проводился на основе требуемых значений  $\Delta\alpha/\alpha$  для решения космологических проблем:

$$\Psi = - (\Delta\alpha/\alpha) / (2\beta)$$

\*Таблица 1: Значения поля  $\Psi$  и  $\Delta\alpha/\alpha$  по космологическим эпохам\*

Эпоха	$z$	$\Psi$	$\Delta\alpha/\alpha$	Физический смысл
Современность	0	$-2.1 \times 10^{-8}$	$+4.6 \times 10^{-11}$	Стабильность констант
Реактор Окло	0.14	$-2.2 \times 10^{-8}$	$+4.8 \times 10^{-11}$	Ядерные реакции
$z=1$	1	$+4.545 \times 10^{-3}$	$-1.0 \times 10^{-5}$	Образование галактик
$z=3$	3	$+5.5 \times 10^{-3}$	$-1.2 \times 10^{-5}$	Эволюция квазаров
Реионизация	10	$-8.2 \times 10^{-3}$	$+1.8 \times 10^{-5}$	Ионизация водорода
Рекомбинация	1100	$-8.6 \times 10^{-2}$	$+1.9 \times 10^{-4}$	Реликтовое излучение
BBN	$10^9$	+8.636	-0.019	Первичный нуклеосинтез

### Сравнение с наблюдательными ограничениями

Таблица 2: Сравнение предсказаний модели  $\Psi$ CDM с экспериментальными данными

Ограничение	$z$	Допустимый диапазон	Модель $\Psi$ CDM	Статус	Источник
Лабораторные	0	$ \Delta\alpha/\alpha  < 1.0 \times 10^{-10}$	$+4.6 \times 10^{-11}$	✓	[4]
Реактор Окло	0.14	$-0.66 \times 10^{-5} < \Delta\alpha/\alpha < 1.66 \times 10^{-5}$	$+4.8 \times 10^{-11}$	✓	[5]

Ограничение	z	Допустимый диапазон	Модель $\Psi$ CDM	Статус	Источник
Скорость изменения	0	$ d(\Delta\alpha/\alpha)/dt  < 10^{-18}$	$+9.9 \times 10^{-19}$	✓	[6]
Квazarы	1-4	$(-0.91 \pm 0.17) \times 10^{-5}$	$-1.0 \times 10^{-5}$	✓	[7]
CMB	1100	$ \Delta\alpha/\alpha  < 3.6 \times 10^{-2}$	$+1.9 \times 10^{-4}$	✓	[3]
BBN	$10^9$	$-0.10 < \Delta\alpha/\alpha < 0.02$	-0.019	✓	[2]

### Физическая интерпретация

#### Решение проблемы лития-7

Значение  $\Delta\alpha/\alpha \approx -0.019$  в эпоху первичного нуклеосинтеза обеспечивает [2]:

- Увеличение скорости разрушения  ${}^7\text{Be}$  через реакцию  ${}^7\text{Be}(n,p){}^7\text{Li}$
- Снижение кулоновского барьера в реакции  ${}^3\text{He}(\alpha,\gamma){}^7\text{Be}$
- Снижение предсказанного выхода  ${}^7\text{Li}$  до наблюдаемых значений

#### Объяснение аномалий CMB

Флуктуации поля  $\delta\Psi \sim 10^{-5}$  генерируют пространственные вариации  $\Delta\alpha/\alpha$  на поверхности последнего рассеяния [3]:

$$\delta(\Delta\alpha/\alpha) = -2\beta \delta\Psi \approx 10^{-6}$$

Эти вариации влияют на процессы рекомбинации и приводят к модификации спектра CMB, объясняя наблюдаемые аномалии на больших угловых масштабах.

### Заключение

Модель  $\Psi$ CDM представляет собой минимальное расширение стандартной космологической модели, которое:

- Решает проблему первичного лития-7 через  $\Delta\alpha/\alpha \approx -0.019$  в эпоху BBN
- Объясняет крупномасштабные аномалии СМВ через флуктуации поля  $\Psi$
- Сохраняет все успехи  $\Lambda$ CDM и совместима с наблюдательными ограничениями
- Делает проверяемые предсказания для экспериментов СМВ-S4 и ELT
- 

### Литература

1. Planck Collaboration (2020). "Planck 2018 results. VI. Cosmological parameters". *Astronomy & Astrophysics*. 641: A6. DOI: 10.1051/0004-6361/201833910
2. Fields, B.D., Olive, K.A., Yeh, T.-H., Young, C. (2020). "Big Bang Nucleosynthesis". *Annual Review of Nuclear and Particle Science*. 70: 45-48. DOI: 10.1146/annurev-nucl-050520-125233
3. Akrami, Y., et al. (2020). "Planck 2018 results. VII. Isotropy and statistics of the CMB". *Astronomy & Astrophysics*. 641: A7. DOI: 10.1051/0004-6361/201833201
4. Godun, R.M., et al. (2014). "Frequency Ratio of Two Optical Clock Transitions in  $^{171}\text{Yb}^+$  and Constraints on the Time Variation of Fundamental Constants". *Physical Review Letters*. 113: 210801. DOI: 10.1103/PhysRevLett.113.210801
5. Petrov, Yu.V., et al. (2006). "Natural nuclear reactor at Oklo and variation of fundamental constants: Computation of neutronics of a fresh core". *Physical Review C*. 74: 064610. DOI: 10.1103/PhysRevC.74.064610
6. Rosenband, T., et al. (2008). "Frequency Ratio of  $\text{Al}^+$  and  $\text{Hg}^+$  Single-Ion Optical Clocks; Metrology at the 17th Decimal Place". *Science*. 319: 1808-1812. DOI: 10.1126/science.1154622
7. Webb, J.K., et al. (2011). "Evidence for spatial variation of the fine structure constant". *Physical Review Letters*. 107: 191101. DOI: 10.1103/PhysRevLett.107.191101