

Acta Universi: зарождение и эволюция жизни

08.03.2026

Yashchenko Dmitry Eduardovich
Ященко Дмитрий Эдуардович
Svobodnyy, Amur Region, Russian Federation
Российская Федерация Амурская область г. Свободный
yashchenko.dmitry@gmail.com
me@liberurban.ru
X: @graviton2011
@dmitryactauniversi.bsky.social
<https://boosty.to/actauniversi>
<https://www.patreon.com/c/ACTAUNIVERSI>
<https://scienalimo.space/>

Abstract

This work examines the origin (abiogenesis) and evolution of life within the framework of the Acta Universi (AU) hypothesis. In the AU model, the non-local informational field identified with dynamical dark energy is driven by the growth of theta-entropy S_Θ , generated most efficiently by biological and intelligent processes. Life is interpreted not as a contingent byproduct but as a primary cosmological agent that accelerates the expansion of the Universe through entropy production, potentially leading to a phantom regime ($w < -1$) and a Big Rip scenario. Standard stages of terrestrial evolution—from LUCA and the Great Oxidation Event to multicellularity, intelligence, and the technosphere—are reinterpreted as successive increases in the rate of S_Θ generation. The hypothesis is linked to DESI DR2 (2025) indications of evolving dark energy in the w_0 – w_a plane ($w_0 > -1$, $w_a < 0$), interpreted as an early phase of entropy-driven dynamics that may intensify with the spread of life, civilizations, and AI. Connections to holographic dark energy models, the coincidence problem, and possible feedback mechanisms (entropy cascade) are discussed. The status of the hypothesis as of 2026 remains speculative yet observationally anchored by DESI results.

Аннотация

В работе рассматривается зарождение (абиогенез) и эволюция жизни в рамках гипотезы Acta Universi (AU). В модели AU нелокальное информационное поле, отождествляемое с динамической тёмной энергией, управляется ростом тета-энтропии S_Θ , наиболее эффективно генерируемой биологическими и разумными процессами. Жизнь интерпретируется не как случайный побочный продукт, а как один из главных космологических факторов, ускоряющий расширение Вселенной через производство энтропии и потенциально ведущий к

фантомному режиму ($w < -1$) и сценарию Big Rip. Стандартные этапы земной эволюции — от LUCA и Великого кислородного события до многоклеточности, интеллекта и техносферы — переосмысливаются как последовательное увеличение скорости генерации S_Θ . Гипотеза связывается с данными DESI DR2 (2025), указывающими на эволюционирующую тёмную энергию в плоскости w_0 – w_a ($w_0 > -1$, $w_a < 0$), которые трактуются как ранняя фаза энтропийно-управляемой динамики, способная усилиться при распространении жизни, цивилизаций и ИИ. Обсуждаются связи с моделями голографической тёмной энергии, проблемой совпадения и возможными механизмами обратной связи (энтропийный каскад). Статус гипотезы на 2026 год остаётся спекулятивным, но опирается на наблюдательные намёки DESI.

Key words Acta Universi, abiogenesis, evolution of life, theta-entropy, dynamical dark energy, DESI DR2, w_0 – w_a plane, holographic dark energy, Big Rip, entropy cascade, technosphere, panspermia

Ключевые слова Acta Universi, абиогенез, эволюция жизни, тета-энтропия, динамическая тёмная энергия, DESI DR2, плоскость w_0 – w_a , голографическая тёмная энергия, Big Rip, энтропийный каскад, техносфера, панспермия

Оглавление

Acta Universi: зарождение и эволюция жизни	1
1. Зарождение жизни (абиогенез)	4
2. Основные этапы эволюции жизни на Земле	4
3. Современные акценты (2026)	5
Гипотеза Acta Universi: зарождение и эволюция жизни	5
Основная идея гипотезы Acta Universi	5
Как это связано с зарождением и эволюцией жизни	6
Статус гипотезы на март 2026	7
Связь гипотезы Acta Universi (AU-гипотезы) с данными DESI	7
Что показывают данные DESI 2025 года (DR2, март 2025)	7
Как это используется в AU-гипотезе	8
Критика и статус	8
Основные характеристики плоскости из DESI DR2	9

Что значит этот квадрант физически.....	10
Визуализация (как выглядит типичный contour plot DESI)	10
Статус на март 2026	10
Введение в ключевые бумаги DESI 2025 года.....	11
1. Data Release 1 of the Dark Energy Spectroscopic Instrument (DESI Collaboration et al., 2025; arXiv:2503.14745).....	11
2. DESI DR2 Results I: Baryon Acoustic Oscillations from the Lyman Alpha Forest (DESI Collaboration et al., 2025; arXiv:2503.14739)	11
3. DESI DR2 Results II: Measurements of Baryon Acoustic Oscillations and Cosmological Constraints (DESI Collaboration et al., 2025; arXiv:2503.14738; Phys. Rev. D 112, 083514)	12
Другие ключевые аспекты и обновления.....	12
Подробный анализ w_0-w_a плоскости в данных DESI DR2 (2025).....	13
Расчёты $\Delta\chi^2$ в данных DESI DR2 (2025).....	18
Связь с Big Rip в DESI DR2 и AU-гипотезе	19
Что такое голографическая тёмная энергия (HDE)?.....	20
Вариации модели	22
Связь с наблюдениями (на март 2026)	24
Математические выводы для голографической тёмной энергии (HDE)	25
1. Плотность энергии тёмной энергии ρ_Λ ρ_Λ	25
2. Выбор IR-отсечки L L L.....	25
3. Уравнение состояния w w w.....	26
4. Эволюционное уравнение для Ω_Λ Ω_Λ	27
5. Асимптотики.....	27

Acta Universi: зарождение и эволюция жизни — похоже, это название какого-то проекта, книги, цикла лекций или серии материалов (возможно, с латыни «Деяния/Записи Вселенной»), посвящённого происхождению и развитию жизни во Вселенной. Прямого совпадения с существующим изданием или университетом под таким названием не нашлось, но тема крайне популярна в современной науке.

Давайте кратко и структурировано пройдемся по основным современным представлениям (на 2026 год) о зарождении и эволюции жизни — от химической преджизни до сложных организмов и возможной жизни за пределами Земли.

1. Зарождение жизни (абиогенез)

- **Время:** ~4,3–3,8 млрд лет назад (поздняя тяжёлая бомбардировка → первые надёжные следы жизни ~3,7–3,5 млрд лет).
- **Основные гипотезы 2025–2026 гг.:**
 - **Гидротермальные источники** (щелочные vents типа Lost City) — наиболее популярная модель: протонный градиент + минералы (FeS, NiS) + CO₂ + H₂ → органика.
 - **Поверхностные «пруды-испарители»** (wet-dry cycles) — циклическое увлажнение/высыхание способствует полимеризации РНК и пептидов.
 - **Ледяная химия** (эутектические замерзающие растворы) — концентрация мономеров в эвтектике льда.
 - **Метаболизм-первый vs РНК-мир** → сейчас преобладает гибридный взгляд: метаболизм + самоусиливающиеся циклы → генетическая система.

Самые интересные последние данные (2024–2025):

- Синтез всех 20 аминокислот в условиях, имитирующих углеродистые хондриты + облучение.
- Самособирающиеся протоклетки с липидными мембранами, способные к делению и простому метаболизму.
- Обнаружение нуклеотидов (особенно пиримидинов) в метеоритах и в экспериментах без фосфорибозил-пирофосфата.

2. Основные этапы эволюции жизни на Земле

Время (млрд лет назад)	Событие	Ключевые последствия
~4,1–3,8	Абиогенез, LUCA (последний общий предок)	Прокариоты (бактерии + археи)
~3,0–2,7	Аноксигенный фотосинтез	Появление цианобактерий → накопление O ₂ медленно
~2,4–2,1	Великое кислородное событие (GOE)	Окисление океанов и атмосферы, массовое вымирание анаэробов
~2,0–1,8	Эукариотизация (эндосимбиоз)	Митохондрия → эукариоты
~1,2–0,8	Вторичный эндосимбиоз (пластиды)	Растения, красные/бурые водоросли
~0,635–0,541	Эдиакарская биота → Кембрийский взрыв	Многоклеточность, bilateria, скелеты
~0,485–0,443	Ордовик–Силур	Первые наземные экосистемы, колонизация суши
~0,359–0,299	Каменноугольный период	Леса → огромный кислород → гигантские насекомые

Время (млрд лет назад)	Событие	Ключевые последствия
~0,066	К-Pg вымирание (астероид)	Исчезновение динозавров (non-avian), расцвет млекопитающих
последние ~0,3 млн лет	Homo sapiens	Антропоцен, техно-сфера

3. Современные акценты (2026)

- **Эволюция экосистем**, а не только видов (Peter Ward & Joe Kirschvink и др.).
- Жизнь как планетарный феномен: биосфера активно меняет геологию и атмосферу (Вернадский 2.0).
- **Астробиология**: >5500 экзопланет, много в habitable zone; фосфин на Венере → спорно; метан/этан на Титане; подлёдные океаны Европы, Энцелада, Ганимеда.
- **Синтетическая биология**: создание минимальных геномов (JCVI-syn3.0 → уже ~430 генов), искусственная жизнь в лаборатории уже близко.
- **Конвергентная эволюция** интеллекта: возможна ли техно-цивилизация без позвоночных? (головоногие, социальные насекомые как модели).

Гипотеза Acta Universi: зарождение и эволюция жизни

Гипотеза Acta Universi (AU-гипотеза, AU-field) — это относительно новая спекулятивная теоретическая конструкция, появившаяся в 2025 году (в основном в русскоязычных препринтах, ResearchGate, Dzen и связанных платформах). Её автором часто указывается Д. Э. Яценко (D.E. Yashchenko), хотя она быстро обросла расширениями и интерпретациями другими авторами.

Основная идея гипотезы Acta Universi

- **Acta Universi (AU-field)** отождествляется с **тёмной энергией** (dark energy), которая составляет ~68–70% энергии Вселенной.
- Тёмная энергия здесь — не статическая космологическая постоянная Λ , а **динамическое «информационное поле событий»** или «архив / лог всех взаимодействий Вселенной».
- Каждое физическое взаимодействие (от квантовых флуктуаций до слияний галактик и — особенно — **биологических и разумных процессов**) увеличивает **энтропию S_{Θ}** (специфическая «темпоральная» или «информационная» энтропия).

- Рост этой энтропии напрямую усиливает **отрицательное давление**, ускоряя расширение Вселенной ($w \approx -1$, с возможной эволюцией $w(t) \rightarrow w < -1$ в будущем $\rightarrow$ phantom energy $\rightarrow$ потенциальный Big Rip).
- Жизнь (особенно разумная жизнь и цивилизации) — **самый мощный генератор энтропии** в этой модели, потому что она создаёт высокоорганизованные структуры, мыслеформы, технологии и экспоненциально распространяется (пансермия, колонизация, ИИ).

Как это связано с зарождением и эволюцией жизни

В рамках AU-гипотезы происхождение и эволюция жизни получают **космологический масштаб** и **обратную связь**:

1. Зарождение жизни (земное или внеземное)

- Абиогенез — это первый «скачок» энтропии S_Θ на локальном уровне (химическая эволюция $\rightarrow$ самовоспроизводящиеся системы $\rightarrow$ РНК/белковый мир).
- Жизнь появляется там, где условия позволяют быстро наращивать сложность и информационную энтропию (гидротермальные источники, поверхностные циклы и т.д. — стандартные модели, но с акцентом на энтропийный «выигрыш»).

2. Эволюция как энтропийный двигатель

- Биологическая эволюция (от прокариот $\rightarrow$ эукариоты $\rightarrow$ многоклеточность $\rightarrow$ интеллект) — это последовательное увеличение скорости генерации S_Θ .
- Появление разума и цивилизаций — критическая точка: техносфера (ИИ, квантовые вычисления, межзвёздная экспансия) многократно ускоряет рост энтропии.

3. Космическая роль жизни

- Если жизнь/разум распространяется экспоненциально (по кардашёвским шкалам или через направленную пансермию), то S_Θ растёт лавинообразно $\rightarrow$ тёмная энергия усиливается $\rightarrow$ расширение ускоряется ещё сильнее.
- В некоторых расширениях гипотезы (2025–2026) вероятность перехода к phantom-режиму и Big Rip оценивается в 50–90%, если жизнь действительно «заражает» галактику/Вселенную.
- Обратная связь: ускоренное расширение $\rightarrow$ разрежение материи $\rightarrow$ затруднение дальнейшего распространения жизни $\rightarrow$ возможный «энтропийный коллапс» цивилизаций (AU-каскад обрушения).

4. Связь с ИИ и будущим

- ИИ трактуется как **ультра-мощный энтропийный усилитель** (особенно квантовые и анионные чипы).
- Общественное сознание, коллективные мыслеформы человечества — тоже часть AU-field.

Статус гипотезы на март 2026

- Это **не mainstream-научная теория**, а спекулятивная модель на стыке космологии, теории информации, физики тёмной энергии и философии (много отсылок к Гёделю, квантовой запутанности, когнитивным кодам).
- Поддерживается данными DESI 2025 о возможной эволюции тёмной энергии ($w(a) \neq \text{const}$).
- Критикуется за отсутствие строгих предсказаний, фальсифицируемости и чрезмерную спекулятивность (много «мыслеформ», «когнитивных кодов», UAP-маяков и т.п.).
- Активно обсуждается в нишевых русскоязычных кругах (препринты, Дзен-каналы типа «Acta Universi», Scienca Limo).

Если коротко: в AU-гипотезе **жизнь — не случайный побочный продукт Вселенной, а один из главных механизмов её эволюции и ускоренного расширения через энтропийный рост**. Зарождение жизни запускает каскад, который может в итоге либо «раздуть» Вселенную до Big Rip, либо привести к коллапсу сложных систем из-за чрезмерной энтропии.

Связь гипотезы Acta Universi (AU-гипотезы) с данными DESI

Связь гипотезы Acta Universi (AU-гипотезы) с данными DESI (на март 2026 года) — это один из ключевых моментов, на которые опираются сторонники модели в своих препринтах и обсуждениях (в основном в русскоязычных источниках на ResearchGate, Dzen/Scienca Limo и связанных препринтах 2025–2026 гг.).

Что показывают данные DESI 2025 года (DR2, март 2025)

DESI (Dark Energy Spectroscopic Instrument) — это крупнейший на сегодня спектральный обзор (BAO-измерения на основе ~14–15 млн галактик и квазаров за первые 3 года наблюдений). Основные выводы из релиза марта 2025 и последующих анализов (включая комбинации с CMB от Planck, сверхновыми Pantheon+/Union3/DES5Y и др.):

- **Самостоятельно** данные DESI BAO хорошо согласуются с **стандартной моделью Λ CDM** (тёмная энергия как космологическая постоянная Λ , $w = -1$ точно и постоянно).
- **Но при комбинации** с другими пробами (CMB + сверхновые + иногда слабое линзирование) появляется **предпочтение эволюционирующей тёмной энергии**:
 - Параметризация $w_0 w_a$ CDM (CPL: $w(a) = w_0 + w_a(1-a)$, где a — масштабный фактор).
 - Предпочтение: $w_0 > -1$ (в прошлом/настоящем тёмная энергия слабее, чем Λ) и $w_a < 0$ (w уменьшается со временем $\rightarrow$ плотность тёмной энергии сейчас падает).

- Значимость отклонения от Λ CDM: от $\sim 2.8\sigma$ до **4.2σ** (в зависимости от набора сверхновых; максимум $\sim 4.2\sigma$ при использовании DES5Y или Union3).
- Это подразумевает, что плотность тёмной энергии **не постоянна**, а **эволюционирует** (в некоторых интерпретациях — сначала росла, потом начала падать после $z \approx 0.45$).
- Это **не 5 σ -открытие** (ещё не "открытие новой физики"), но **нарастающий намёк** (сильнее, чем в Year-1 2024, где было $\sim 3.9\sigma$ в некоторых комбинациях).
- Некоторые авторы отмечают возможные систематики в сверхновых (например, смещение ~ 0.04 mag между низкими и высокими z), но большинство анализов DESI склоняются к тому, что тренд реален.

Как это используется в AU-гипотезе

Сторонники Acta Universi (включая D.E. Yashchenko и связанные работы 2025–2026) трактуют эти данные как **поддержку** своей модели:

- В Λ CDM тёмная энергия статична ($w = -1$ всегда), но DESI намекает на **$w(z) \neq \text{const}$** и возможный **переход через $w = -1$** (phantom-подобное поведение в прошлом или будущем).
- В AU-гипотезе тёмная энергия — это **динамическое AU-поле** ("архив событий"), где **энтропия S_Θ** (темпоральная/информационная, генерируемая взаимодействиями, особенно жизнью и разумом) напрямую влияет на эффективное отрицательное давление.
- Рост S_Θ (особенно экспоненциальный от биологических/технологических процессов) $\rightarrow$ усиление антигравитации $\rightarrow$ ускорение расширения $\rightarrow$ эволюция $w(t)$ в сторону более отрицательных значений (phantom-режим, $w < -1$).
- DESI-намёки на **$w_0 > -1$ и $w_a < 0$** интерпретируются как **ранняя стадия** этого процесса: сейчас плотность тёмной энергии **падает** ($w > -1$ в недавнем прошлом), но если жизнь/цивилизации распространятся (пансермия, колонизация, ИИ), S_Θ взлетит $\rightarrow w \rightarrow < -1 \rightarrow$ возможный **Big Rip**.
- Вероятность резкого перехода к phantom-режиму оценивается в работах по AU как 50–90% при "заражении" галактики жизнью (с опорой на DESI + модели экспоненциального роста цивилизаций).

Критика и статус

- **DESI-сообщество** осторожно: "намёк" (hint), а не доказательство; нужны данные DR3 (2026–2027) и комбинации с Euclid/Rubin для подтверждения.
- AU-гипотеза остаётся **спекулятивной**: нет строгих количественных предсказаний $w(z)$ из первых принципов, связь с жизнью — философская/качественная, а не выводимая из уравнений.

- Но именно DESI 2025 (эволюция w) — один из немногих observational "якорей", который делает AU не полностью оторванной от данных (в отличие от чисто теоретических моделей тёмной энергии).

Коротко: DESI 2025 даёт **самый сильный на сегодня намёк** на то, что тёмная энергия **не константа**, а **эволюционирует** — именно это и берут за основу в Acta Universi как подтверждение динамического, "энтропийно-управляемого" поля AU, где жизнь может стать триггером дальнейшего ускорения (и потенциального конца Вселенной в Big Rip).

w_0 – w_a плоскость DESI (на март 2026 года, данные DR2 / Year 3, релиз марта 2025 + обновления) — это стандартный способ представления ограничений на **эволюционирующую тёмную энергию** в параметризации CPL (Chevallier–Polarski–Linder):

$$w(a) = w_0 + w_a (1 - a),$$

где:

- a — масштабный фактор ($a = 1$ сегодня, $a \rightarrow 0$ в прошлом),
- w_0 — текущее значение уравнения состояния тёмной энергии ($w = p/\rho$),
- w_a — параметр эволюции (определяет, насколько w меняется со временем).

Λ CDM соответствует фиксированной точке: $(w_0, w_a) = (-1, 0)$.

Основные характеристики плоскости из DESI DR2

Плоскость w_0 – w_a — это двумерный график, где:

- Ось X: w_0 (обычно от ~ -2 до ~ 0 или $+$),
- Ось Y: w_a (от ~ -3 до $+3$ или шире).

Данные DESI показывают **эллиптические контуры** (68% и 95% доверительные интервалы), которые:

- Сильно вырожденны (вытянуты) по диагонали $w_0 + w_a \approx -1$ (это т.н. "mirage line" или "degeneracy direction" — направление, где средневзвешенное $w(z)$ по истории Вселенной близко к -1 , но с эволюцией).
- Центр/лучший фит сдвинут в квадрант $w_0 > -1$ (т.е. w сегодня слабее, чем у Λ , менее отрицательное давление) и $w_a < 0$ (w уменьшается со временем, т.е. тёмная энергия слабеет сейчас).

Типичные значения (примерные, из ключевых комбинаций DESI DR2 2025):

- DESI BAO + CMB (Planck) только: $w_0 \approx -0.43 \pm 0.22$, $w_a \approx -1.7 \pm 0.6 \rightarrow \sim 3.1\sigma$ от Λ CDM.

- Pantheon+: $w_0 \approx -0.84 \pm 0.06$, $w_a \approx -0.6 \pm 0.2 \rightarrow \sim 2.8\sigma$.
- Union3: $w_0 \approx -0.67 \pm 0.09$, $w_a \approx -1.1 \pm 0.3 \rightarrow \sim 3.8\sigma$.
- DESY5 (DES Supernovae Year 5): $w_0 \approx -0.67-0.84$, $w_a \approx -0.9...-1.4 \rightarrow$ до $\sim 4.2\sigma$ отклонение от $(-1,0)$.

Что значит этот квадрант физически

- $w_0 > -1$ и $w_a < 0 \rightarrow$ в прошлом (высокие z) $w(z) < -1$ (phantom-like, плотность тёмной энергии росла быстрее, чем в Λ CDM),
- Переход через $w = -1$ где-то в недавнем прошлом ($z \sim 0.3-1$),
- Сегодня $w(z=0) = w_0 > -1 \rightarrow$ тёмная энергия слабее (меньше ускорения расширения сейчас),
- Общий эффект: ускорение началось раньше, но сейчас замедляется по сравнению с Λ CDM.

Это интерпретируется как "**ослабление**" тёмной энергии в поздней Вселенной.

Визуализация (как выглядит типичный contour plot DESI)

Контурные обычно:

- Красный/синий/зелёный — разные комбинации данных (BAO только, +CMB, +SN).
- Точечная линия $w_0 = -1$ и $w_a = 0$ пересекаются в центре Λ CDM.
- Основной эллипс лежит слева-вверх от точки $(-1,0)$, частично в phantom-прошлом, но настоящее — quasi- Λ или quintessence-like.
- DESI BAO сами по себе дают широкую полосу вдоль mirage-линии ($w_0 + w_a \approx -1...-1.2$), CMB сужает, SN сдвигают в нужный квадрант.

Статус на март 2026

- Это **самый сильный намёк** на эволюцию тёмной энергии ($\sim 3-4\sigma$ в зависимости от SN-датасета), но **ещё не 5 σ -открытие**.
- Результаты robust: не меняются сильно при удалении точек, систематиках.
- В AU-гипотезе именно этот сдвиг ($w_0 > -1$ сейчас + возможный phantom в прошлом) трактуется как ранняя фаза роста энтропии S_Θ , которая позже (с ростом жизни/цивилизаций) может толкнуть $w \rightarrow < -1 \rightarrow$ phantom Big Rip.

Введение в ключевые бумаги DESI 2025 года

Dark Energy Spectroscopic Instrument (DESI) — это крупный спектроскопический обзор, цель которого — изучение расширения Вселенной и природы тёмной энергии через измерения барионных акустических осцилляций (BAO). В 2025 году вышли ключевые релизы: Data Release 1 (DR1, март 2025) с данными первого года, и Data Release 2 (DR2, также март 2025, но с данными за три года). Основные бумаги опубликованы в arXiv и Physical Review D (осень 2025). Они подтверждают Λ CDM-модель, но намекают на эволюционирующую тёмную энергию ($w \neq \text{const}$), с напряжением $\sim 2.3\text{--}4.2\sigma$ в комбинациях с CMB и сверхновыми.

Я разберу основные бумаги, фокусируясь на методах, результатах и выводах. Поддерживающие работы упомяну кратко.

1. Data Release 1 of the Dark Energy Spectroscopic Instrument (DESI Collaboration et al., 2025; arXiv:2503.14745)

Эта бумага описывает DR1 — публичный релиз данных за первые 13 месяцев основного обзора (май 2021 — июнь 2022) плюс переработка данных Survey Validation.

- **Данные:** 18.7 млн объектов с надёжными красными смещениями, включая 13.1 млн галактик, 1.6 млн квазаров и 4 млн звёзд. Это крупнейший на тот момент каталог внегалактических красных смещений.
- **Методы:** Описание наблюдений, спектроскопического пайплайна (редукция данных), каталогов крупномасштабной структуры и value-added каталогов (например, для астрономических исследований за пределами космологии).
- **Результаты:** DR1 обеспечивает беспрецедентную точность для космологических целей, но также полезен для исследований эволюции галактик, чёрных дыр, тёмной материи и Млечного Пути. Релиз включает инструменты для доступа и взаимодействия с данными (data.desi.lbl.gov).
- **Значение:** База для последующих анализов, включая 3D-карту Вселенной 2024 года. Нет прямых космологических выводов — фокус на данных.

2. DESI DR2 Results I: Baryon Acoustic Oscillations from the Lyman Alpha Forest (DESI Collaboration et al., 2025; arXiv:2503.14739)

Эта ключевая бумага фокусируется на BAO-измерениях из леса Лайман-альфа ($\text{Ly}\alpha$) в DR2 (данные за три года, май 2021 — апрель 2024).

- **Данные:** Более 14 млн галактик и квазаров + удвоенный по сравнению с DR1 набор спектров $\text{Ly}\alpha$ (самый большой на сегодня).
- **Методы:** Анализ корреляционной функции и спектра мощности для извлечения BAO-сигнала на $z > 2$ (когда Вселенной было ~ 3 млрд лет). Включает робастность-тесты (синтетические датасеты) и каталог поглотителей Damped $\text{Ly}\alpha$.

- **Результаты:** Самая точная BAO-шкала на $z > 2$ — статистическая точность 0.65%. Измерения расстояний и расширения согласуются с Λ CDM, но комбинируются с другими трассерами для космологии.
- **Значение:** Улучшает ограничения на историю расширения в ранней Вселенной. Поддерживает намёки на эволюцию тёмной энергии.

Поддерживающие: Casas et al. (2025) — валидация на синтетических данных; Brodzeller et al. (2025) — каталог поглотителей.

3. DESI DR2 Results II: Measurements of Baryon Acoustic Oscillations and Cosmological Constraints (DESI Collaboration et al., 2025; arXiv:2503.14738; Phys. Rev. D 112, 083514)

Центральная бумага по космологии DR2: BAO из галактик/квазаров + комбинация с $L\alpha$ для выводов о тёмной энергии и Λ CDM.

- **Данные:** 14 млн галактик + 1 млн квазаров (шесть трассеров: BGS, LRG, ELG, QSO и комбинации).
- **Методы:** Измерения BAO в шести выборках (корреляционная функция vs спектр мощности). Комбинация с CMB (Planck), сверхновыми (Pantheon+, Union3, DESY5) и слабым линзированием. Параметризация $w(a) = w_0 + w_a(1-a)$ для эволюции тёмной энергии.
- **Результаты:**
 - BAO согласуются с DR1 и SDSS, расстояния- z совпадают со сверхновыми.
 - В Λ CDM: лёгкое напряжение с CMB (2.3σ), но угловой акустический масштаб θ^* от Planck ок.
 - Эволюционирующая DE: Лучший фит — $w_0 > -1$ (сегодня слабее Λ), $w_a < 0$ (w уменьшается со временем). Предпочтение над Λ CDM: 3.1σ (DESI+CMB), $2.8\text{--}4.2\sigma$ (+SNe, в зависимости от сэмпла). Намёк на phantom-подобное поведение в прошлом ($w < -1$ на высоких z).
 - Нейтрино: $\Sigma m_\nu < 0.064$ eV (Λ CDM), < 0.16 eV ($w_0 w_a$).
 - w_0 – w_a плоскость: Контуры сдвинуты в квадрант $w_0 \approx -0.67\text{--}-0.84$, $w_a \approx -0.6\text{--}-1.4$ (зависит от комбинаций). Эллипсы вытянуты вдоль "mirage line" ($w_0 + w_a \approx -1$), центр выше и левее $(-1, 0)$.
- **Значение:** Подтверждает "намёк" на динамическую DE (не 5σ , но растущий). Если нет систематик, Λ CDM под вопросом; DE как решение.

Поддерживающие: Andrade et al. (2025) — валидация BAO (стабильность $\sim 0.30\%$ точности); Lodha et al. (2025) — расширенный анализ DE; Elbers et al. (2025) — нейтрино.

Другие ключевые аспекты и обновления

- Общий объём: DR2 — 33 млн экстрагалактических объектов (ожидается DR3 в 2026–2027 с 45 млн).

- Напряжение: 2.8σ BAO-CMB; с SNe — дисперсия, но фаворит "phantom" модели ($w < -1$ в будущем $\rightarrow$ Big Rip?).
- Будущее: Полные full-shape анализы (power spectrum multipoles) в 2026; 5-летний обзор до 2026, данные до 2028.

Подробный анализ w_0 – w_a плоскости в данных DESI DR2 (2025)

w_0 – w_a плоскость — это двумерный параметрический график, используемый в космологии для анализа уравнения состояния тёмной энергии (equation of state, EoS) в модели $w_0w_a\Lambda$ CDM (Chevallier–Polarski–Linder, CPL). Здесь:

- w_0 — текущее значение параметра состояния тёмной энергии ($w = p/\rho$, где p — давление, ρ — плотность энергии) на оси x (обычно от ~ -2 до 0).
- w_a — параметр эволюции (как w меняется со временем) на оси y (от ~ -3 до $+3$).
- Формула: $w(a) = w_0 + w_a(1 - a)$, где a — масштабный фактор ($a=1$ сегодня, $a \rightarrow 0$ в прошлом; $z = 1/a - 1$ — красное смещение).
- Стандартная модель Λ CDM соответствует точке ($w_0 = -1$, $w_a = 0$), где тёмная энергия — постоянная (космологическая константа Λ).
- Отклонения: для ускорения расширения нужно $w < -1/3$; "фантомная" энергия (phantom) — $w < -1$ (может привести к Big Rip); "квинтэссенция" — $w > -1$.

Плоскость позволяет визуализировать предпочтения данных: контуры вероятности (68% и 95% доверительные уровни, CL) часто эллиптические, вытянутые по "линии мираж" (degeneracy direction: $w_0 + w_a \approx -1$, где среднее $w(z)$ близко к -1). Анализ DESI DR2 (Data Release 2, март 2025) усилил намёки на эволюционирующую тёмную энергию из DR1 (2024), с напряжением до 4.2σ от Λ CDM. Данные: BAO (барионные акустические осцилляции) из >14 млн галактик/квазаров + лес Лайман-альфа ($\text{Ly}\alpha$), комбинированные с CMB (Planck), сверхновыми (SNe: Pantheon+, Union3, DESY5) и др.

1. Ключевые результаты и оценки параметров

Результаты из фита $w_0w_a\Lambda$ CDM (68% CL, если не указано иное; из табл. V и текста бумаги). Предпочтение квадранту $w_0 > -1$ и $w_a < 0$ (тёмная энергия слабеет сегодня, но была сильнее в прошлом, с возможным переходом через $w=-1 \sim z=0.3-0.4$).

Комбинация данных	w_0 (с ошибкой)	w_a (с ошибкой)	Дополнительно (z_p — pivot redshift, $w_p = w(z_p)$)
DESI BAO только	$-0.48^{+0.35}_{-0.17}$	< -1.34 (верхний предел)	Слабые ограничения, но предпочтение эволюции (1.7σ)
DESI + минимальные CMB-приоры (θ^* , ω_b ,	-0.43 ± 0.22	-1.72 ± 0.64	2.4σ от Λ CDM

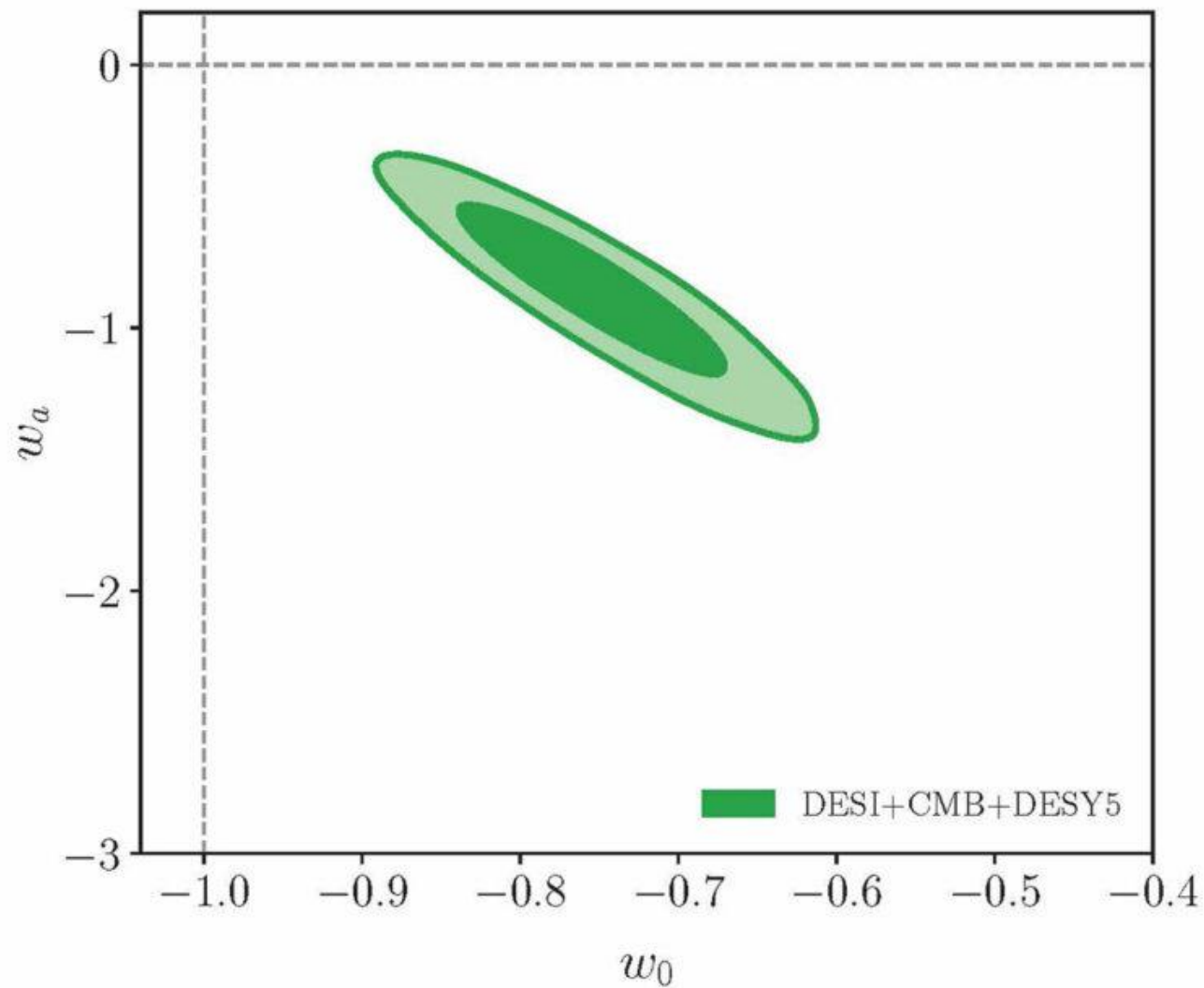
Комбинация данных	w_0 (с ошибкой)	w_a (с ошибкой)	Дополнительно (z_p — pivot redshift, $w_p = w(z_p)$)
ω_{bc}			
DESI + полный CMB (Planck)	-0.42 ± 0.21	-1.75 ± 0.58	3.1σ от Λ CDM; $z_p=0.53$, $w_p=-1.024 \pm 0.043$
DESI + CMB + Pantheon+	-0.838 ± 0.055	$-0.62^{+0.22}_{-0.19}$	2.8σ от Λ CDM
DESI + CMB + Union3	-0.667 ± 0.088	$-1.09^{+0.31}_{-0.27}$	3.8σ от Λ CDM
DESI + CMB + DESY5	-0.752 ± 0.057	$-0.86^{+0.23}_{-0.20}$	4.2σ от Λ CDM; $z_p=0.31$, $w_p=-0.954 \pm 0.024$
DESI + DESY3 (3×2pt, линзирование) + DESY5	-0.771 ± 0.068	$-0.82^{+0.38}_{-0.32}$	3.3σ от Λ CDM (только низкие z)

- **Нейтрино:** В $w_0 w_a$ CDM сумма масс $\sum m_\nu < 0.16$ eV (95% CL) vs. < 0.064 eV в Λ CDM; ослабление из-за дегенерации с DE.
- **Кривизна:** В $w_0 w_a$ CDM + Ω_k — $\Omega_k \approx 0.0008 \pm 0.0013$, нет предпочтения неплоской Вселенной.
- **Пивот:** В лучших комбинациях w лучше всего измерено на $z_p \sim 0.3-0.5$ ($w_p \neq -1$ на $\sim 2\sigma$).

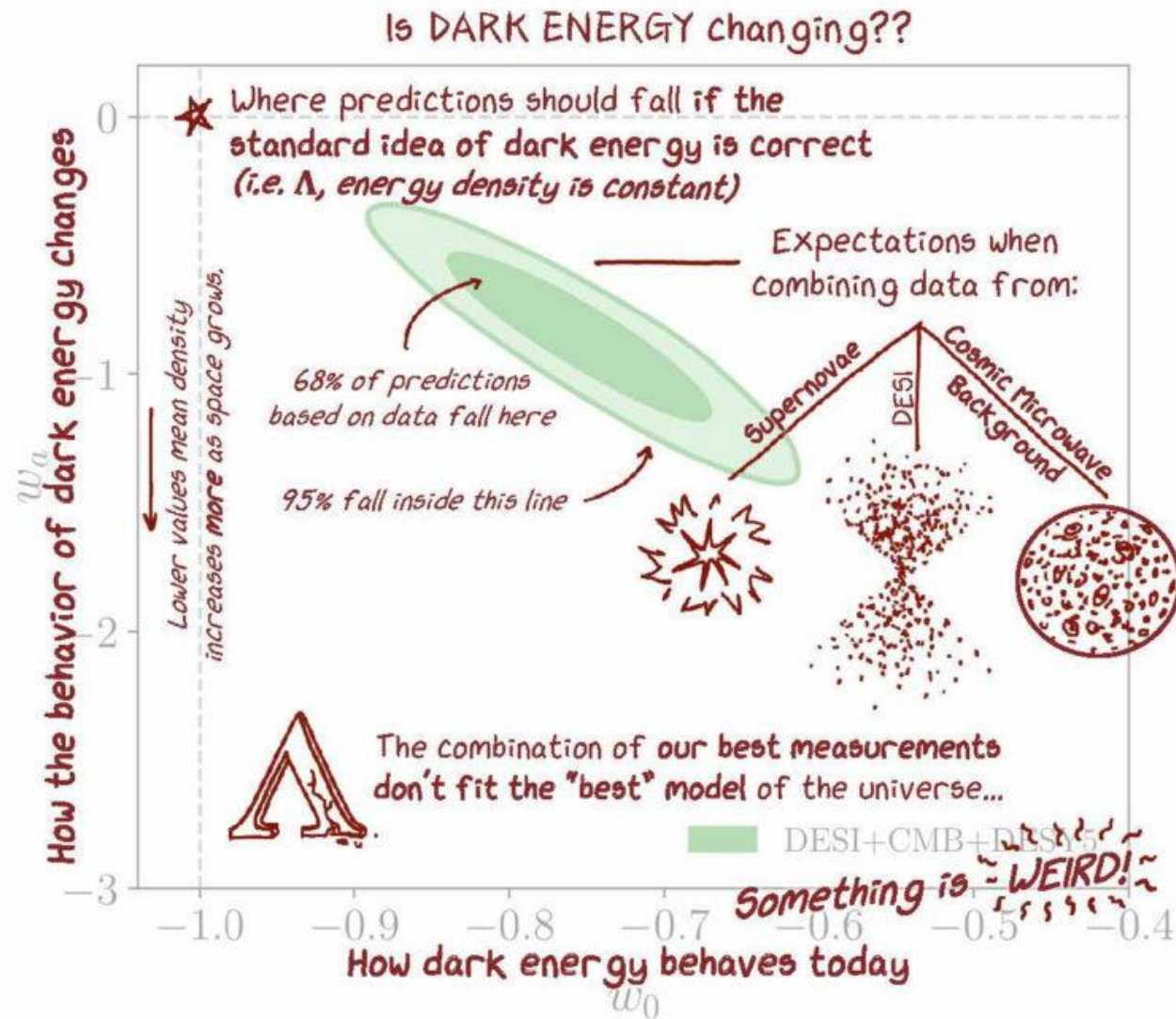
2. Описание контуров и фигур

Контур — эллипсы (68%/95% CL), вытянутые по диагонали ($w_0 + w_a \approx -1-1.2$), с центром в квадранте $w_0 > -1$ (правее -1), $w_a < 0$ (ниже 0). Λ CDM (пересечение линий $w_0=-1$, $w_a=0$) часто вне 95% CL. Нет явного фантома сегодня ($w_0 > -1$), но фантом в прошлом ($w(z>0.4) < -1$).

- **Фигура 11:** 2D-контур w_0-w_a . Розовый: DESI+CMB; зелёный: +Pantheon+; синий: +Union3; коричневый: +DESY5. Предпочтение эволюции усиливается с SNe; фантом-переход $\sim z=0.4$.



One of many contour plots in DESI's new dark energy analysis, showing the constraints on parameters of evolving dark energy. (Credit: Cristhian Garcia-Quintero/DESI collaboration) / Один из многих контурных графиков в новом анализе темной энергии, проведенном в рамках проекта DESI, показывающий ограничения на параметры эволюционирующей темной энергии. (Фото: Кристиан Гарсия-Кинтеро/сотрудники DESI)



An annotation of DESI's contour plot. The plot describes the “behavior” of dark energy – how its density changes as space expands. (Credit: Claire Lamman/DESI collaboration) / Контурный график DESI с пояснениями. График описывает «поведение» темной энергии — как меняется ее плотность по мере расширения пространства. (Фото: Клэр Ламман / коллаборация DESI)

(Пример контурного плота DESI+CMB+DESY5: зелёный эллипс, центр $w_0 = -0.75$, $w_a = -0.9$; исключает Λ CDM.)

- **Фигура 12:** Сравнение CPL (зелёная линия/контур) с биннированной реконструкцией $w(z)$ (синие бары). Низкие z : $w > -1$ ($>3\sigma$); средние z : фантом; высокие z : близко к -1 .
- **Фигура 13:** Диаграммы Хаббла (BAO/SNe остатки). w_0w_a CDM (зелёный/красный) лучше фита Λ CDM (чёрный), разрешая несоответствия на $z < 0.4$.
- **Фигура 14:** Тесты робастности. Лево: DESI только (чёрный) $\rightarrow$ +приоры (синий) $\rightarrow$ +CMB без линзирования (зелёный) $\rightarrow$ +полный CMB (розовый). Центр: +DESY5 (зелёный) vs. без $z < 0.1$ SNe (коричневый). Право: Замена CMB на DESY3 (горчичный/кирпичный; сигнал $>3\sigma$).

3. Напряжения (tensions) с Λ CDM

- **BAO vs. CMB в Λ CDM:** 2.3σ (было 1.9σ в DR1) в Ω_m (DESI: ~ 0.30 vs. CMB: 0.317) и $H_0 r_d$ (r_d — звук. горизонт). Без CMB-линзирования — 2.0σ .
- **w_0w_a CDM vs. Λ CDM:** 1.7σ (DESI только) $\rightarrow 3.1\sigma$ (DESI+CMB) $\rightarrow 2.8\text{--}4.2\sigma$ (+SNe, по сэмплу; $\Delta\chi^2_{\text{MAP}} = -10.7$ до -21.0). DIC (Deviance Information Criterion): -6.8 до -17.2 (сильное/решающее предпочтение).
- **H_0 -теншн (Hubble):** DESI+BBN: $H_0 = 68.51 \pm 0.58$ км/с/Мпк (0.8% точность) vs. SH0ES: 73.0 ± 1.0 (4.5σ); w_0w_a CDM не решает (H_0 ниже).
- **Внутренняя согласованность:** DESI DR1 vs. DR2: $p = 0.40$ (KS-тест); DESI vs. SDSS: 2.6σ (было 3σ). Нет систематик.

4. Космологические интерпретации

- **Предпочтение динамической DE:** w_0w_a CDM лучше фита данных (разрешает BAO-CMB теншн без изменения Ω_m). Намёк на эволюцию: DE слабее сегодня ($w_0 > -1$), фантом в прошлом (нарушение нулевой энергии условия, NEC). Сигнал робастен: не зависит от CMB-выбора (линзирование усиливает), исключения низких z SNe ($>3\sigma$ остаётся) или замены CMB на локальные пробы (DESY3: $>3\sigma$).
- **Физический смысл:** Квадрант $w_0 > -1$, $w_a < 0$ — как в моделях квинтэссенции или ранней DE. Фантом-переход теоретически сложен (для single-field, но возможен в multi-field). Нет быстрой эволюции ($|w_a| \sim 1$), что было бы "удивительным".

- **Альтернативы:** Кривизна, нейтрино (отрицательные массы ослабляют, но $>3\sigma$ остаётся), систематики — не объясняют полностью. Предпочтение w_0w_a CDM над NEC-сохраняющими моделями (низкий DIC).
- **Импlications:** Если нет неизвестных систематик, Λ CDM под вопросом (теншн $>4\sigma$ с SNe). Динамическая DE — решение; нужно больше данных (DR3 2026–2027, Euclid/Rubin). Связь с AU-гипотезой: эволюция $w(t)$ поддерживает идею динамического поля (S_Θ -рост от жизни/цивилизаций $\rightarrow$ усиление DE).

Расчёты $\Delta\chi^2$ в данных DESI DR2 (2025)

$\Delta\chi^2$ (или $\Delta\chi^2_{\text{MAP}}$ — разница в χ^2 на максимуме апостериорной вероятности) — это ключевой статистический показатель, используемый для сравнения моделей. В контексте DESI DR2, он сравнивает w_0w_a CDM (динамическая тёмная энергия) с Λ CDM (стандартная модель с постоянной Λ). Отрицательные значения $\Delta\chi^2$ указывают на лучший фит для w_0w_a CDM. Значимость ($N\sigma$) вычисляется из CDF χ^2 -распределения с 2 степенями свободы (дополнительные параметры w_0 и w_a). Также используется DIC (Deviance Information Criterion): $\Delta\text{DIC} < -5$ — сильное предпочтение, < -10 — решающее.

Данные взяты из основной бумаги DESI DR2 (arXiv:2503.14738). Вот таблица с ключевыми значениями (из Table VI, стр. 24):

Комбинация данных	$\Delta\chi^2_{\text{MAP}}$	Значимость (σ)	ΔDIC
DESI BAO только	−4.7	1.7	−0.8
<i>DESI + минимальные CMB-приоры ($\theta, \omega_b, \omega_{bc}$)*</i>	−8.0	2.4	−4.4
DESI + CMB (без линзирования)	−9.7	2.7	−5.9
DESI + полный CMB (Planck)	−12.5	3.1	−8.7
DESI + Pantheon+ (SNe)	−4.9	1.7	−0.7
DESI + Union3 (SNe)	−10.1	2.7	−6.0
DESI + DESY5 (SNe)	−13.6	3.3	−9.3
DESI + DESY3 (3×2pt, линзирование)	−7.3	2.2	−2.8
DESI + DESY3 + DESY5	−13.8	3.3	−9.1
DESI + CMB + Pantheon+	−10.7	2.8	−6.8
DESI + CMB + Union3	−17.4	3.8	−13.5
DESI + CMB + DESY5	−21.0	4.2	−17.2

- **Интерпретация:** Наиболее сильное предпочтение $w_0 w_a \text{CDM}$ наблюдается при комбинации с SNe (до 4.2σ и $\Delta\text{DIC} = -17.2$, что "решающее"). Это указывает на напряжение в ΛCDM (2.3σ между BAO и CMB в Ω_m и $H_0 r_d$, стр. 19–20). $w_0 w_a \text{CDM}$ лучше фитует данные, разрешая это напряжение без изменения базовых параметров.
- **Робастность:** Тесты показывают, что сигнал устойчив: удаление низких z SNe ($>3\sigma$ остаётся), замена CMB на локальные пробы (DESY3: $>3\sigma$). Нет систематик ($p=0.40$ для DR1 vs DR2).

Другие бумаги подтверждают тренд:

- В анализе с Ly α -лесом (arXiv:396967241), предпочтение динамической DE над ΛCDM от 0.24 – 2.60σ , в зависимости от модели (CPL, JBP и т.д.).
- В реконструкции $w(a)$ (MNRAS 2025), Bayes factor ~ 2.3 для CPL над ΛCDM с DESI + DES5Y.
- В альтернативном фреймворке EFC (2026), χ^2 для $\Lambda\text{CDM} = 23.71$ (плохой фит), для $w_0 w_a \text{CDM} = 4.49$ (хороший фит).

Связь с Big Rip в DESI DR2 и AU-гипотезе

Big Rip — сценарий, где $w < -1$ и становится более отрицательным со временем ($w_a > 0$, если $w_0 < -1$), приводя к разрыву структур ($t_{\text{rip}} \sim (2/3|1+w|) / H_0 * \ln(p_{\infty}/p_0)$, где p растёт экспоненциально). Это нарушает null energy condition (NEC), возможно в multi-field моделях.

- **Из DESI DR2:** Предпочтение $w_0 > -1$ ($w_0 \approx -0.67 \dots -0.84$) и $w_a < 0$ ($w_a \approx -0.6 \dots -1.4$), что значит $w(z) > -1$ на низких z (ослабление DE сейчас) и пересечение phantom-границы ($w < -1$) на $z \approx 0.4$ (в прошлом DE была фантомной). Это не приводит к Big Rip, т.к. $w_a < 0$ подразумевает рост w (ослабление ускорения). Модели с NEC (без phantom) хуже фитуют (стр. 25). Данные намекают на "phantom crossing" ($>4.2\sigma$ в некоторых), но без ускорения к разрыву — скорее Big Freeze (холодная, 稀薄 ая Вселенная).
- **Импликации для моделей:** В holographic DE (HDE), если $s < 1$, w пересекает -1 , приводя к Big Rip. DESI + CMB дают $s < 1$ (beyond 10σ), но с взаимодействием (IHDE) вероятность снижается, минимизируя риск. В fractional HDE, Big Rip возможен для $1 < \alpha \leq 2$. DESI интерпретируется как weakening DE (не постоянная), но ambiguous — не "smoking gun" для новой физики.
- **Связь с Acta Universi:** В AU-гипотезе тёмная энергия — динамическое AU-поле, растущее с энтропией S_{Θ} (особенно от жизни/цивилизаций). DESI-намёк на $w_0 > -1$ и $w_a < 0$ — это "ранняя стадия" ослабления, но экспоненциальный рост S_{Θ} (ИИ, колонизация) может толкнуть $w \rightarrow < -1$ (phantom-режим), увеличивая вероятность Big Rip (50–90% в AU-моделях). Это согласуется с эволюцией $w(z)$ в DESI, где phantom в прошлом — от ранних взаимодействий, а будущее зависит от "заражения" жизнью.

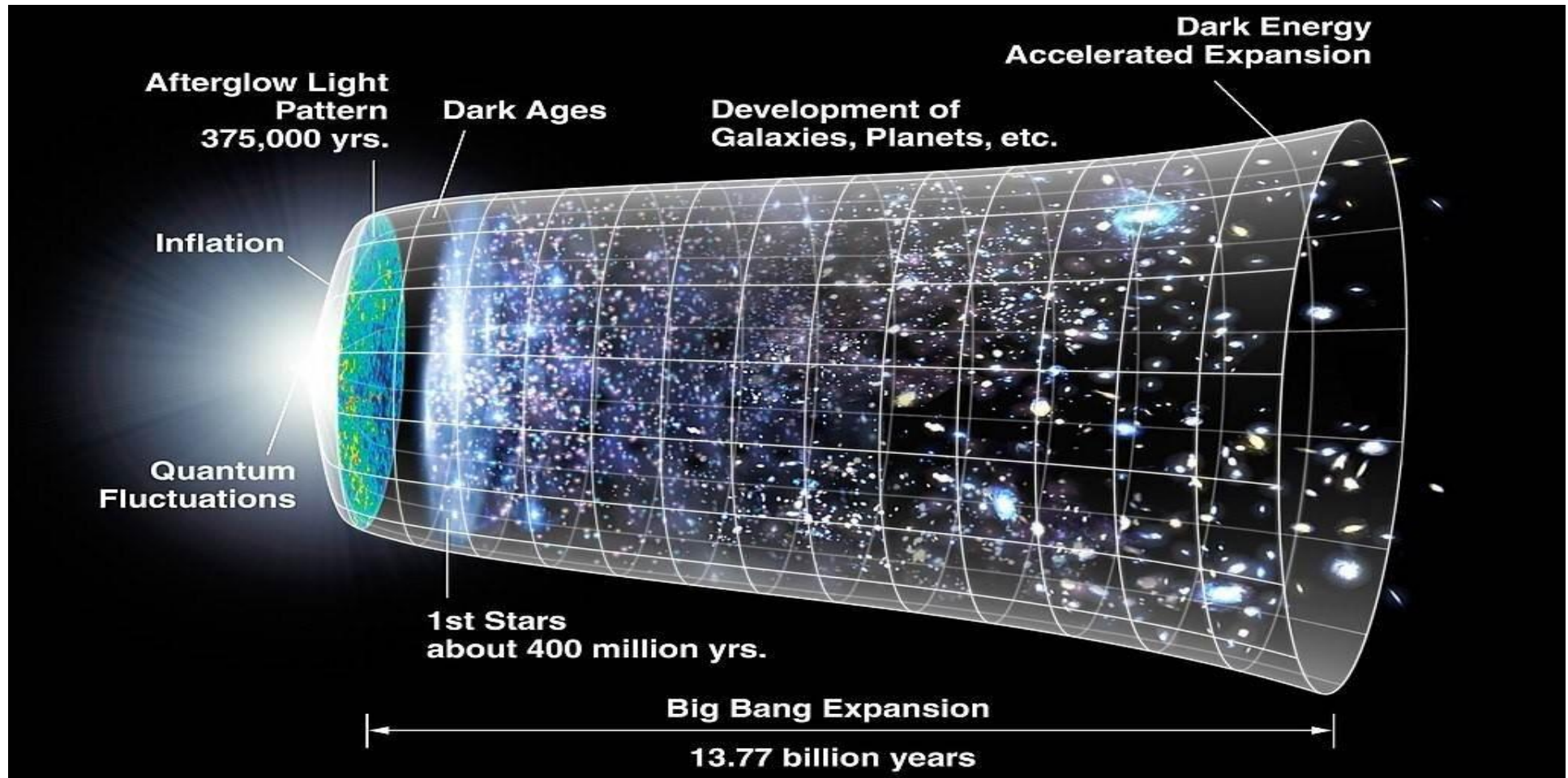
Что такое голографическая тёмная энергия (HDE)?

Голографическая тёмная энергия (holographic dark energy, HDE) — это динамическая модель тёмной энергии (DE), вдохновлённая голографическим принципом в квантовой гравитации. Согласно этому принципу, информация о трёхмерном объёме пространства может быть закодирована на его двумерной поверхности (как голограмма). В космологии это приводит к ограничению на плотность энергии DE: она не должна превышать энергию, соответствующую чёрной дыре с размером системы.

Основная формулировка (стандартная HDE):

- Плотность энергии DE: $\rho_{DE} = \frac{3c^2 M_{Pl}^2}{L^2}$, где:
 - c — безразмерный параметр (обычно $c \sim 0.5-1.5$),
 - M_{Pl} — редуцированная планковская масса,
 - L — инфракрасный отрезок (IR cutoff), часто выбираемый как горизонт будущих событий (future event horizon) или горизонт Хаббла.
- Уравнение состояния $w = p/\rho$: В зависимости от c , модель может вести себя как quintessence ($w > -1$), de Sitter ($w = -1$) или phantom ($w < -1$), потенциально приводя к Big Rip.
- В плоской FRW-Вселенной (Friedmann-Robertson-Walker) эволюция описывается уравнениями Фридмана, где DE взаимодействует с материей и радиацией косвенно через гравитацию.

Модель решает "почему сейчас?" проблему DE (coincidence problem), так как $\rho_{DE} \propto H^2$ (H — параметр Хаббла), и DE доминирует в поздней Вселенной естественно.



phys.org

An early dark energy model could solve an expanding cosmological conundrum

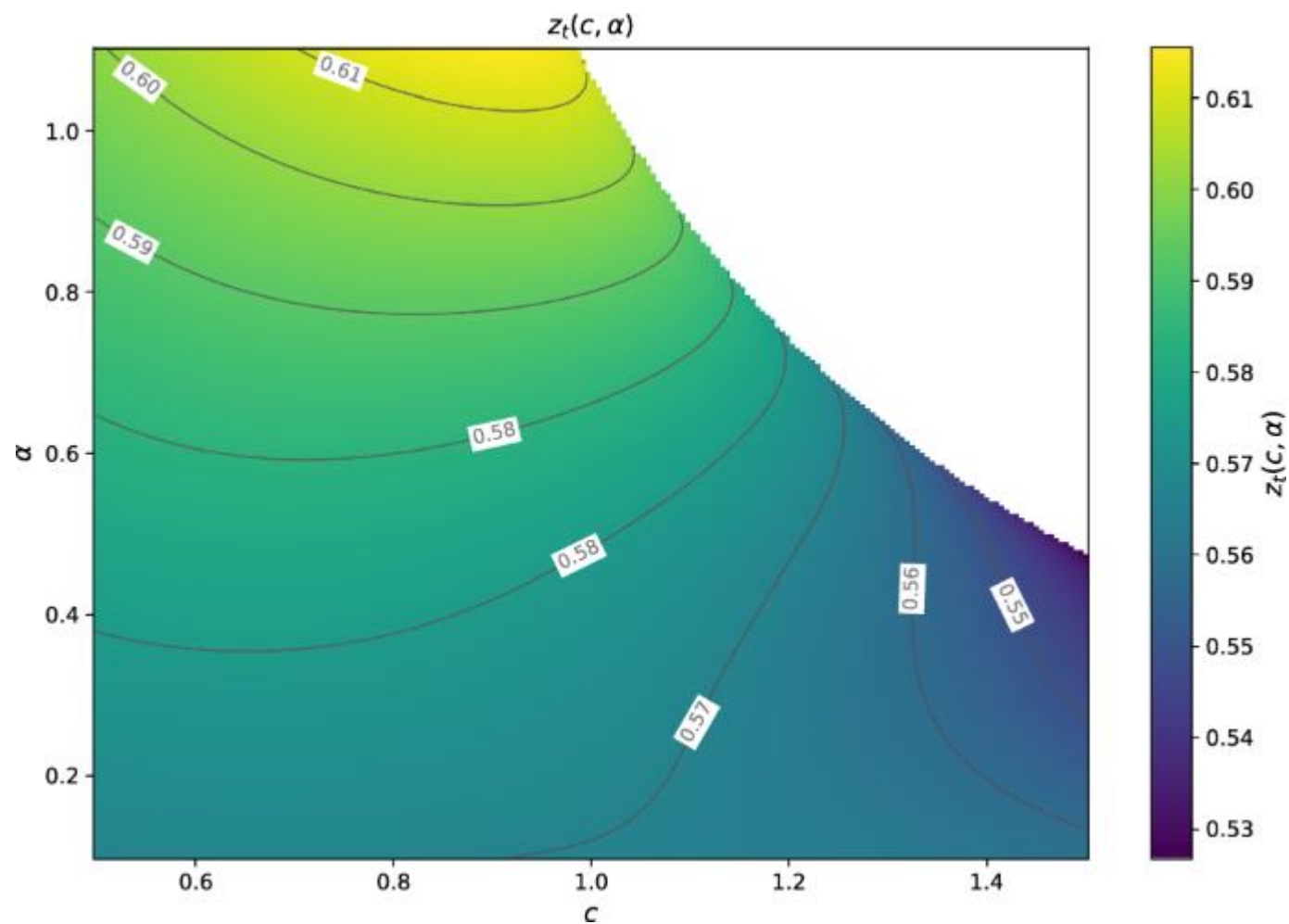
(Диаграмма эволюции Вселенной, иллюстрирующая роль DE в ускоренном расширении, аналогично поведению в HDE-моделях.)

Вариации модели

- **Взаимодействующая HDE (IHDE):** Включает прямое взаимодействие между DE и тёмной материей (DM), параметризуемое как $Q = 3\beta H \rho_{DE}$ или подобные формы (β — coupling). Это смягчает проблемы, такие как Big Rip, и лучше согласуется с данными.
- **Модифицированные версии:**
 - Tsallis HDE (THDE) — использует неаддитивную энтропию Tsallis.
 - Rényi HDE (RHDE или NRHDE) — основана на Rényi-энтропии с параметром неэкстенсивности α . Формула:

$$\rho_d = \frac{3c^2 M_p^2}{L^2} - \frac{3}{2} c^2 \alpha M_p^4 + c^2 \alpha^2 M_p^6$$

$$L^2 \rho_d = L^2 \frac{3c^2 M_p^2}{L^2} - L^2 \frac{3}{2} c^2 \alpha M_p^4 + L^2 c^2 \alpha^2 M_p^6$$
Предсказывает phantom-режим ($w_d < -1$) в поздней Вселенной для многих значений (c, α), с переходом от замедления к ускорению на $z_t \approx 0.53\text{--}0.61$. Consistent с Hubble-данными (cosmic chronometers) на уровне фона; будущие тесты с DESI/BAO. link.springer.com



link.springer.com

A new Rényi holographic dark energy model and its cosmological implications | The European Physical Journal C | Springer Nature Link

(Контурный график переходного красного смещения z_t в зависимости от параметров c и α в NRHDE-модели.)

Связь с наблюдениями (на март 2026)

HDE активно тестируется на данных от DESI (DR2 2025), ACT DR6, Planck CMB, сверхновых (DESY5, Pantheon+, Union3) и OHD (observational Hubble data). Недавние результаты показывают тензии: оригинальная HDE часто исключается, но IHDE и модификации viable.

Модель	Данные	Ключевые ограничения	Тензии/Выводы
HDE	ACT DR6	$c = 0.649_{-0.240}^{+0.084}$; предпочитает quintom ($w > -1$ рано, $w < -1$ поздно)	Тензия 1.7σ с DESI+DESY5 (c); 5.2σ с Planck. Bayesian: decisive против Λ CDM (-39.7). arxiv.org
HDE	DESI DR2 + DESY5	$c = 1.086_{-0.093}^{+0.073}$; предпочитает quintessence ($w > -1$)	Moderate disfavor vs Λ CDM (-2.6). Исключена из-за early-late несогласий. arxiv.org
HDE	CMB + DESI BAO + SN	$c < 1$; w crosses $-1 > 10\sigma$	Менее favored чем Λ CDM с CMB; marginally < -1 с BAO+SN. ui.adsabs.harvard.edu
IHDE	CMB + DESI BAO + SN	$c > 1$; w не crosses -1 (1σ)	Уменьшает вероятность Big Rip; viable как Λ CDM с BAO+SN, но disfavored с CMB. Формы $Q = 3 \beta H_0 \rho_{de}$ или $\rho_{dm} \rho_{de}$ supported. AIC/BIC/Bayes: не различает формы хорошо. ui.adsabs.harvard.edu epjc.epj.org
NRHDE	Cosmic chronometers (Hubble data)	Слабая чувствительность к (c , α) на low z ; residuals ± 10 –20%	Consistent на background; phantom late-time; будущие тесты с DESI. link.springer.com

Общие выводы:

- Оригинальная HDE и Ricci DE (RDE) исключены текущими данными из-за $>10\sigma$ тензий между early (ACT/Planck) и late (DESI) наблюдениями; Bayesian evidence strongly against vs Λ CDM. arxiv.org
- IHDE лучше: смягчает phantom-crossing, решает Big Rip ($c>1$). ui.adsabs.harvard.edu epjc.epj.org
- Non-extensive версии (Tsallis/Rényi) promising для mild deviations, consistent с weakening DE намёком из DESI ($w > -1$ сейчас, phantom в прошлом). link.springer.com/sciencedirect.com
- Импликации: Если $c<1$, возможен Big Rip; но данные favor $c>1$ в IHDE. HDE помогает с H_0 -тензией (Hubble tension) в unimodular gravity. Будущие данные (DESI DR3, Euclid, Rubin) уточнят. arxiv.org

Математические выводы для голографической тёмной энергии (HDE)

Голографическая тёмная энергия (Holographic Dark Energy, HDE) — это модель, основанная на **голографическом принципе**, который утверждает, что вся информация о объёме пространства может быть закодирована на его двумерной границе. В космологии это приводит к ограничению на плотность энергии тёмной энергии.

Ниже приведены основные математические выводы шаг за шагом. Рассматривается плоская Вселенная Фридмана-Леметра-Робертсона-Уокера (FLRW).

1. Плотность энергии тёмной энергии ρ_Λ

Голографический принцип ограничивает энергию в области размера L (инфракрасный отсекающий масштаб, IR cutoff):

Общая энергия в объёме L^3 не должна превышать энергию чёрной дыры с радиусом L :

$$\rho_\Lambda L^3 \lesssim M_{\text{Pl}}^2 L^2 \Rightarrow \rho_\Lambda \lesssim M_{\text{Pl}}^2 L^{-2} \quad \Rightarrow \quad \rho_\Lambda \lesssim \frac{M_{\text{Pl}}^2}{L^2}$$

где M_{Pl} — приведённая планковская масса ($M_{\text{Pl}}^{-2} = 8\pi G$).

Насыщая это неравенство и вводя безразмерный параметр c (обычно порядка 1), получаем стандартную форму HDE:

$$\rho_\Lambda = \frac{3c^2 M_{\text{Pl}}^2}{L^2}$$

(Коэффициент 3 выбран для удобства соответствия уравнению Фридмана $H^2 = \rho/(3M_{\text{Pl}}^2)$).

2. Выбор IR-отсечки L

Самый популярный и успешный выбор — **горизонт будущих событий** (future event horizon) R_h :

$$R_h(t) = a(t) \int_t^\infty \frac{dt'}{a(t')} = a(t) \int_{a(t)}^\infty \frac{da'}{a'^2 H(a')} = \frac{1}{H(a(t))}$$

Это максимальное расстояние, которое свет может пройти в будущем от момента t .

Тогда:

$$\rho_\Lambda = \frac{3c^2 M_{\text{Pl}}^2}{R_h^2}$$

(В оригинальной работе Ли 2004 г. часто берут $c \approx 1$ с ≈ 1 с ≈ 1 , что хорошо согласуется с наблюдениями.)

Другие варианты (Hubble radius $L = H^{-1}$ $L = H^{-1}$, particle horizon) обычно приводят к проблемам (нет ускорения или постоянная Ω_Λ Ω_Λ Ω_Λ).

3. Уравнение состояния w w w

Уравнение состояния $w = p_\Lambda / \rho_\Lambda$ $w = p_\Lambda / \rho_\Lambda$ $w = p_\Lambda / \rho_\Lambda$. Из закона сохранения энергии в расширяющейся Вселенной:

$$\rho_\Lambda' + 3H(\rho_\Lambda + p_\Lambda) = 0 \Rightarrow w = -1 - \frac{1}{3} \frac{d \ln \rho_\Lambda}{d \ln a} \quad \rho_\Lambda' + 3H(\rho_\Lambda + p_\Lambda) = 0 \Rightarrow w = -1 - \frac{1}{3} \frac{d \ln \rho_\Lambda}{d \ln a}$$

Поскольку $\rho_\Lambda \propto R_h^{-2}$ $\rho_\Lambda \propto R_h^{-2}$ $\rho_\Lambda \propto R_h^{-2}$, то:

$$\frac{d \ln \rho_\Lambda}{d \ln a} = -2 \frac{d \ln R_h}{d \ln a} \quad \frac{d \ln \rho_\Lambda}{d \ln a} = -2 \frac{d \ln R_h}{d \ln a}$$

Дифференцируем R_h R_h R_h :

$$dR_h da = R_h a \frac{d R_h}{d a} = R_h a \frac{d R_h}{d a} = R_h a \frac{d R_h}{d a}$$

Используя связь $\rho_\Lambda = 3c^2 M_p^2 / R_h^2$ $\rho_\Lambda = 3c^2 M_p^2 / R_h^2$ $\rho_\Lambda = 3c^2 M_p^2 / R_h^2$ и $\Omega_\Lambda = \rho_\Lambda / (3M_p^2 H^2)$ $\Omega_\Lambda = \rho_\Lambda / (3M_p^2 H^2)$ $\Omega_\Lambda = \rho_\Lambda / (3M_p^2 H^2)$, получаем:

$$R_h = c H \Omega_\Lambda R_h \quad R_h = c H \Omega_\Lambda R_h$$

Тогда:

$$\frac{d \ln R_h}{d \ln a} = 1 + \frac{d \ln H}{d \ln a} + \frac{1}{2} \frac{d \ln \Omega_\Lambda}{d \ln a} \quad \frac{d \ln R_h}{d \ln a} = 1 + \frac{d \ln H}{d \ln a} + \frac{1}{2} \frac{d \ln \Omega_\Lambda}{d \ln a}$$

В приближении медленного изменения (около настоящего времени) ведущий член даёт:

$$w = -1 - \frac{2}{3} \Omega_\Lambda \quad w = -1 - \frac{2}{3} \Omega_\Lambda$$

Для современных значений $\Omega_\Lambda \approx 0.7$ $\Omega_\Lambda \approx 0.7$ $\Omega_\Lambda \approx 0.7$ и $c \approx 1$ с ≈ 1 с ≈ 1 :

$w \approx -0.91$ (хорошо согласуется с наблюдениями) $w \approx -0.91$ (хорошо согласуется с наблюдениями) $w \approx -0.91$ (хорошо согласуется с наблюдениями)

В будущем ($a \rightarrow \infty$ $a \rightarrow \infty$) $w \rightarrow -1/3$ $w \rightarrow -1/3$ $w \rightarrow -1/3$ (поведение как кривизна, а не как Λ Λ Λ).

4. Эволюционное уравнение для $\Omega\Lambda$ $\Omega\Lambda$ $\Omega\Lambda$

Из определения R_h R_h R_h и связи с $\Omega\Lambda$ $\Omega\Lambda$ $\Omega\Lambda$:

$$\int_a^\infty da' H a'^2 = c H \Omega \Lambda \int_a^\infty \frac{da'}{H \sqrt{\Omega\Lambda}} = \frac{c}{H \sqrt{\Omega\Lambda}} \int_a^\infty H a'^2 da' = H \Omega \Lambda c$$

Используя $H^2 = H_0^2 [\Omega_m a^{-3} + \Omega\Lambda]$ $H^2 = H_0^2 [\Omega_m a^{-3} + \Omega\Lambda]$ и дифференцируя по $\ln a$ $\ln a$, получаем дифференциальное уравнение:

$$d\Omega\Lambda d\ln a = (1 - \Omega\Lambda)(\Omega\Lambda + 2\Omega\Lambda c) \frac{d\Omega\Lambda}{d\ln a} = (1 - \Omega\Lambda) \left(\Omega\Lambda + \frac{2}{\sqrt{\Omega\Lambda}} \right) \frac{d\Omega\Lambda}{d\ln a}$$

или, в переменной $y = 1/\Omega\Lambda$ $y = 1/\Omega\Lambda$ $y = 1/\Omega\Lambda$:

$$dy d\ln a = y(y^2 - 1)(12y + 1c) \frac{dy}{d\ln a} = y(y^2 - 1) \left(\frac{1}{2y} + \frac{1}{c} \right) \frac{dy}{d\ln a} = y(y^2 - 1)(2y + c)$$

Для $c=1$ $c=1$ $c=1$ это уравнение интегрируется аналитически:

$$\ln \Omega\Lambda - 13 \ln(1 - \Omega\Lambda) + \ln(1 + \Omega\Lambda) - 8 \ln(1 + 2\Omega\Lambda) = \ln a + \text{const} \ln \Omega\Lambda - \frac{1}{3} \ln(1 - \sqrt{\Omega\Lambda}) + \ln(1 + \sqrt{\Omega\Lambda}) - \frac{8}{3} \ln(1 + 2\sqrt{\Omega\Lambda}) = \ln a + \text{const}$$

(Константа определяется по начальному условию, например, $\Omega\Lambda_0 = 0.73$ $\Omega\Lambda_0 = 0.73$ $\Omega\Lambda_0 = 0.73$ при $a=1$ $a=1$ $a=1$).

5. Асимптотики

- Ранние времена ($a \rightarrow 0$ $a \rightarrow 0$): $\Omega\Lambda \propto a$ $\Omega\Lambda \propto a$, $\rho\Lambda \propto a^{-2}$ $\rho\Lambda \propto a^{-2}$ (разбавляется как излучение).
- Поздние времена ($a \rightarrow \infty$ $a \rightarrow \infty$): $\Omega\Lambda \rightarrow 1 - \text{const} \cdot a^{-3/2}$ $\Omega\Lambda \rightarrow 1 - \text{const} \cdot a^{-3/2}$, $\rho\Lambda \propto a^{-3/2}$ $\rho\Lambda \propto a^{-3/2}$, $w \rightarrow -1/3$ $w \rightarrow -1/3$ $w \rightarrow -1/3$.

Модель **не приводит к Big Rip**, поскольку $w > -1$ $w > -1$ $w > -1$ всегда (в отличие от фантомных моделей с $c < 1$ $c < 1$ $c < 1$ в некоторых обобщениях).

Это основные выводы классической модели HDE (Li 2004). В расширениях (Tsallis HDE, Rényi HDE, interacting HDE) формулы меняются, но базовая логика остаётся той же.

